

# Erkennen und Verstehen in der Chemie

Ernst-Michael Kranich

Vor einigen Jahrzehnten forschte und lehrte an einer süddeutschen Universität der bekannte Chemiker G. Wittig.\* Er hat auf seinem Gebiet, der organischen Chemie, Bedeutendes geleistet und wurde 1979 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Sein Umgang mit den Studenten war freundlich und wohlwollend, aber jeder Examenskandidat war froh, wenn er nicht zu Herrn Wittig in die Prüfung kam. Nicht etwa, dass da Ungewöhnliches verlangt wurde oder eine unangenehme Atmosphäre herrschte. Es war eine bestimmte Frage, die den Prüfling verunsicherte. Wenn er chemische Reaktionen durch Formeln erläuterte, kam irgendwann die Frage: »Nun Herr X., wie sieht denn der Stoff aus, von dem Sie gerade sprechen?« Das war der gefürchtete Augenblick. Denn man kann den Kopf voll von Formeln, Reaktionsgleichungen, Bindungstheorien und dergleichen haben, braucht aber nichts von den Erscheinungen zu kennen.

Das ist eine unnatürliche Situation, wenn theoretisches Wissen und sinnliche Erfahrung so weit auseinander klaffen, dass sie wie durch einen Abgrund voneinander getrennt sind. Wer kann durch die Formel  $\text{NaCl}$  erfassen, dass es sich um einen festen Stoff handelt, der in Würfeln kristallisiert, sich leicht in Wasser löst und salzig schmeckt? Man hat gelernt:  $\text{NaCl}$  ist die Formel von Kochsalz – oft wird sogar gesagt,  $\text{NaCl}$  sei Kochsalz – man versteht durch die Formel das Kochsalz aber nicht. Wenn der junge Mensch durch die Schule solches Wissen erwirbt, dann hat das jene Wirkung, die man durch eine Reihe von Untersuchungen gut kennt: Das Interesse an Chemie nimmt von Schuljahr zu Schuljahr ab, besonders bei den Mädchen. Wie kann man sich auch an einem Fach engagieren, wo man letzten Endes kaum etwas wirklich versteht?

Dieses Problem wird an den Waldorfschulen in der Regel deutlich gesehen. Wie wird aber darauf reagiert? Man wendet sich mit den Schülern den Erscheinungen zu. Man beschreibt und charakterisiert die Elemente, wie man das z. B. bei F. H. Julius in seinen »Grundlagen einer phänomenologischen Chemie« findet. Und man verfolgt die Phänomene bei den chemischen Reaktionen – und bleibt dabei durch mehrere Schuljahre stehen. So herrscht vielfach bis in die Oberstufe eine Art von Phänomenalismus. Die Fragen, die die Phänomene entzünden könnten,

\* Neufassung eines Vortrags am 23.9.2000 auf einer Chemielehrer-Tagung, auf der verschiedene Auffassungen von Chemie-Unterricht vertreten wurden. (Vgl. die Diskussion zum Thema in der »Erziehungskunst« von Heft 3/1998 bis Heft 2/1999.)

bleiben unberücksichtigt. Wie kommt es, dass bei einer chemischen Reaktion gerade dieser Stoff mit seinen spezifischen Eigenschaften entsteht, ist kein Thema. Die Zusammenhänge, die es zu erfassen gilt, werden kaum berührt. Die Schüler sollen beobachten und beschreiben und dabei etwas lernen, was ohne Zweifel einen großen Wert in sich trägt: Hingabe an die Erscheinungen. Das ist aber nur eine andere Form der Einseitigkeit. Es ist auch ein Wissen ohne Verstehen, das sich einstellt, wenn das Denken nicht gefordert wird. Diese Form des Vorgehens wird bisweilen mit einem Wort Goethes untermauert: »Man suche nichts hinter den Phänomenen« – so als ob Goethe gemeint hätte, man solle nicht mit dem Denken *in* die Erscheinungen eindringen.

Diese Art von Phänomenalismus führt schließlich in eine paradoxe Situation, nämlich dann, wenn die Formelsprache eingeführt wird. Dieser Schritt von den Phänomenen zu den Formeln mit den ganzen theoretischen Erörterungen, die dabei unumgänglich sind, wird von Schülern als ein Bruch erlebt. Es entsteht plötzlich ein so ganz anderes Bild der Stoffe und Prozesse: das der Molekülchemie. Man landet unvermittelt in jener anderen Einseitigkeit, die man doch unbedingt umgehen wollte. Weil man eine Form der Chemie getrieben hat, die die Phänomene geistig nicht durchdrungen hat, kommt man zu jener Chemie, die mit ihren theoretischen Modellen den Zusammenhang mit den Phänomenen verliert. Dann ist die »Waldorf-Chemie« eine schöne, ästhetisch anregende und reiche Erfahrung, die schließlich aber doch von der Molekülchemie eingeholt wird.

Soweit der Chemie-Unterricht in der skizzierten Weise verläuft, entspricht er nicht den Forderungen, die von der Waldorfpädagogik an dieses Gebiet zu stellen sind. Das wird deutlich, wenn man sich klar macht, aus welchen Gründen dieser Unterricht im siebten Schuljahr beginnt. Es ist das Alter, in dem sich das Wesensgefüge des jungen Menschen tiefgreifend verwandelt (siehe hierzu das Kapitel »Die Geburt des Astralleibes« in meinem Buch »Anthropologische Grundlagen der Waldorfpädagogik«). Die auffälligste Erscheinung in diesem Geschehen ist der sogenannte puberale Wachstumsschub. Die Gliedmaßen beginnen beschleunigt zu wachsen, und zwar zunächst nur das Knochenskelett in den Füßen und Beinen und den Händen und Armen. Damit gewinnen die Knochen mit ihrer Schwere (spezifisches Gewicht  $1,94 \text{ g/cm}^3$ ) das Übergewicht über die Muskeln (spezifisches Gewicht  $1,06 \text{ g/cm}^3$ ). Bisher waren die Gliedmaßen in ihrer Muskulatur durch den Puls der Arterien stärker mit der rhythmischen Organisation verflochten. Nun lösen sie sich davon bis zu einem gewissen Grade los, indem der Wille in der Muskulatur unter den intensiven Einfluss der Knochenmechanik und der Schwere (Gravitation) kommt. Das führt zu einer neuen Erfahrung.

Wenn der junge Mensch z. B. beim Stehen das Gewicht auf ein Bein verlagert, fordert das unmittelbar Ausgleichsaktivitäten im anderen Bein, in der Haltung des Beckens und der Wirbelsäule. Es handelt sich um einen ganzheitlichen Vorgang, in dem die eine Willensaktivität mit den anderen im strengen Sinne des »wenn ... dann ...« verknüpft ist. Diese Kausalität in der Beherrschung der Kno-

chenmechanik erlebt nun der junge Mensch bei jeder Bewegung, bei der er sich vom Ich aus im Gleichgewicht hält.

Diese Eigenart des Willens wirkt nun in andere Bereiche hinein, in denen der junge Mensch auch aus dem Willen tätig ist. Das geschieht, wenn er sich bemüht, das, was er beobachtet, zueinander in Beziehung zu bringen; denn das ist verbunden mit einer inneren Willenstätigkeit. So entsteht vom 12. Lebensjahr an die Veranlagung, äußere Tatsachen im Sinne der Kausalität zu verknüpfen. Das hat nach R. Steiner folgende Konsequenz: »... wir finden das Kind vom elften, zwölften Lebensjahr reif dazu, dasjenige durch den Intellekt aufzufassen, was erarbeitet werden muss nach den Zusammenhängen von Ursache und Wirkung. Und das muss in Physik und Chemie geschehen« (Steiner GA 307, S. 195).<sup>1</sup> Was heißt aber, Zusammenhänge kausal zu verstehen?

Das »wenn ..., dann ...« kann in zweierlei Weise verstanden werden. Einmal als regelmäßige zeitliche Aufeinanderfolge oder regelmäßiges Zusammentreffen von Ereignissen. Und dann als notwendige Folge, die sich aus bestimmten Bedingungen ergibt. Nur in diesem zweiten Fall kann es sich um Kausalität handeln. Eine klare Charakterisierung von Kausalität findet man bei R. Steiner in dem Buch »Grundlinien einer Erkenntnistheorie der Goetheschen Weltanschauung« (Kap. »Das Natur-Erkennen. Die unorganische Natur«). Als Beispiel dient die Wurfbewegung.

Will man die Bahn eines in horizontaler Richtung geworfenen Steins begreifen, dann muss man die Faktoren, die beim Zustandekommen der Bewegungsbahn beteiligt sind, kennenlernen. Durch Analyse findet man drei Kräfte: »1. Die Stoßkraft, die ich ausgeübt; 2. Die Kraft, mit der die Erde den Stein anzieht; 3. Die Kraft des Luftwiderstands« (Steiner GA 2, S. 90). Die beiden erstgenannten Kräfte sind die wesentlichen Faktoren, die dritte hat lediglich einen modifizierenden Einfluss. Und nun rekonstruiert man im Denken, was sich aus dem Zusammenwirken der 1. und der 2. Kraft ergibt: es ist die parabelförmige Bahn der Wurfbewegung. Man erfasst mit voller innerer Klarheit, dass diese Bewegung aus dem Ineinandergreifen der gleichförmigen Bewegung infolge des Stoßes und der gleichmäßig beschleunigten Fallbewegung entsteht. »In dieser Weise löst der Geist alle Phänomene der unorganischen Natur in solche auf, wo ihm die Wirkung mit Notwendigkeit aus dem Bewirkenden hervorzugehen scheint« (GA 2, S. 91). Man gewinnt geistige Sicherheit in der Beurteilung der Zusammenhänge. Und es ist wichtig, dass der junge Mensch diese innere Sicherheit erringt.

Es geht beim kausalen Erkennen also um folgende Schritte bei der Bearbeitung eines Phänomenkomplexes:

1. Um die Analyse des betreffenden Phänomens, um die in ihm zusammenwirkenden Faktoren kennenzulernen,

1 Siehe hierzu auch R. Steiner in GA 305, S. 113

2. um Unterscheidung der bestimmenden und der nur modifizierenden Faktoren,
3. um ein Kennenlernen der bestimmenden Faktoren in ihrer spezifischen Gesetzlichkeit,
4. um das Rekonstruieren des Phänomens aus dem Zusammenwirken der bestimmenden Faktoren im Denken.

Auf die Chemie übertragen handelt es sich um Analyse einer bestimmten Substanz in ihre Elemente und ein gründliches Kennenlernen dieser Elemente. Dann hat man im Denken nachzuvollziehen, wie aus dem Zusammenwirken eben dieser Elemente jene Substanz entsteht. Es geht nicht um die Synthese dieser Substanz im Labor, sondern um ein gedankliches Rekonstruieren.

Will man in dieser Weise mit den Schülern im Chemie-Unterricht die Fähigkeit des kausalen Erkennens ausbilden, dann muss man zuvor folgende Frage klären: Wie ist das Zusammenwirken der Elemente zu denken, wenn aus ihnen in der chemischen Reaktion ein bestimmter Stoff entsteht?

Bei der Wurfbewegung hat man es mit dem wechselseitigen Ineinandergreifen der beiden Kräfte zu tun. Dadurch entsteht ein Phänomen – die parabelförmige Bewegung –, das weder aus der einen noch aus der anderen der beiden Kräfte herrührt. Auch bei der Verbindung von zwei Elementen zu einem neuen Stoff treten neue Eigenschaften auf. Das weist darauf hin, dass das eine Element mit den in ihm wirkenden Kräften sich mit denen des anderen Elementes vereinigt. Man muss sich also klar machen, dass sich die Elemente in dem neuen Stoff wechselseitig durchdringen.<sup>2</sup> F. H. Julius hat das recht klar herausgearbeitet und schreibt: »Wenn sie [zwei Stoffe] sich verbinden, treten sie in den gleichen Raum« ein (Julius 1988, S. 54); und: in der Chemie vollziehe sich »das Eindringen der Stoffe in ihr gegenseitiges Sein und Wesen« (S. 55). Im Hinblick auf die Elemente Wasserstoff und Sauerstoff im Wasser sagt R. Steiner: »die beiden muss man sich irgendwie ineinander denken« (GA 326, S. 110).

Wenn zwei Elemente sich durchdringen, dann treten sie miteinander in Wechselwirkung. Das heißt: das eine Element mit seinen Kräften und Eigenschaften wirkt hinein in die des anderen. Zugleich wirkt dieses aber auch in jenes hinein. Beide beeinflussen sich wechselseitig. Deshalb ist keines der Elemente noch so, wie es vor der chemischen Verbindung war. Und dennoch ist noch etwas von ihrer Eigenart vorhanden, aber eben als Komponenten im Zusammenwirken. Es ist also von vornherein nicht zu erwarten, dass die Eigenschaften der Elemente in der chemischen Verbindung so bestehen bleiben, wie man sie vorher wahrgenommen hat. Man hat sich im Denken bewusst zu machen, welche Phänomene

2 Die Vorstellung des Sich-Durchdringens bereitet nur dann Schwierigkeiten, wenn man die Elemente für Aggregate von Korpuskeln hält. Nach der Quantenmechanik muss man das Atom »am ehesten als eine verschwommene Wolke betrachten« (D. Bohm, Die implizite Ordnung, München 1985, S. 29). Wolken können aber verschmelzen.

aus der Wechselwirkung resultieren. Dabei hat man die energetische Veränderung, die bei der betreffenden Reaktion eintritt, zu berücksichtigen, besonders das Freiwerden oder Gebundenwerden von Wärme. Das wäre dann kausales Erkennen in der Chemie.

An einem kleinen Ausschnitt aus der Chemie des Schwefels sei das exemplifiziert. Da man den Schwefel als solchen in der Natur, besonders in vulkanischen Gebieten, findet, ist es nicht nötig, ihn durch Analyse aus einer seiner Verbindungen zu isolieren. So kann man gleich mit der Charakterisierung dieses Elementes beginnen, um dann auf einige seiner Verbindungen einzugehen. Man stößt aber sofort auf ein Problem. Üblicherweise wird der Schwefel zunächst durch seine physikalischen Eigenschaften beschrieben (Farbe, Härte, Dichte, Schmelzpunkt usw.). Das ist eine bloße Summe. Wie ist aber der innere Zusammenhang dieser Eigenschaften, d. h. was ist der Schwefel als das Gemeinsame dieser Merkmale? Das ist die erste Aufgabe, die man zu bewältigen hat: durch das Zusammenschauen der Eigenschaften einen vorläufigen Begriff des Schwefels zu bilden. Das wird in der Regel nicht berücksichtigt; man beginnt mit einer unklaren Anschauung des Elementes.

Da ist zunächst die gelbe Farbe als eine charakteristische Manifestation des Schwefels. Was spricht sich in der Farbe aus? »Die Farbe gibt sich als Oberfläche eines Körpers kund. Aber man kann sagen: wie da der Körper sich an seiner Oberfläche offenbart, das ist ein Zutagetreten seiner inneren Wesenheit durch das Mittel des Lichtes« (Steiner GA 45, S. 34).

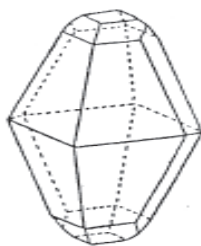
Das helle Gelb des Schwefels ist seiner Qualität nach etwas Verströmendes. Und Gelb hat im Gegensatz zum Weiß immer die Qualität von Wärme. Im Schwefel sind diese Qualitäten wirksam und äußern sich in seiner gelben Farbe. Im spezifischen Gewicht von  $2.069 \text{ g/cm}^3$  kommt zum Ausdruck, dass die Verdichtung der Substanz ziemlich gering ist; die Härte von 2,5 in der Mohs'schen Skala weist darauf hin, dass das Erstarrtsein im festen Zustand ebenfalls schwach ist. Das zeigt sich in dem Schmelzpunkt von nur  $113^\circ \text{C}$ ; eine nur relativ geringe Durchwärmung überwindet dieses Erstarrtsein.

Der Schwefel ist also eine Substanz mit einer starken inneren Wirksamkeit von Wärme, von verströmend-auflösender Kraft. Die Kräfte, die in die Erstarrung und in die Verdichtung führen, entfalten dagegen nur eine relativ schwache Wirksamkeit; denn die dem Schwefel immanente Wärme wirkt dem Verdichten und Erstarren entgegen.

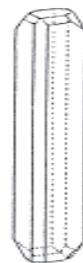
Dieses Bild wird differenzierter, wenn man einige Tatsachen hinzufügt. So ist Schwefel ein außerordentlich schlechter Wärmeleiter. Er nimmt die Wärme tief in seine Substanz auf, ohne sie sogleich an seine unmittelbare Umgebung abzugeben. Er hat eine tiefe Affinität zur Wärme. Nun dehnen sich die Stoffe beim Erwärmen aus, aber in sehr unterschiedlicher Intensität. Schwefel ist nach den weichen Alkalimetallen und dem Phosphor unter den festen Elementen das mit der stärksten Wärmeausdehnung. In ihm entfaltet die Wärme ihre ausdehnende,

d.h. die Verdichtung überwindende Wirksamkeit besonders stark, weil durch die dem Schwefel immanente Wärme die erstarrende Wirksamkeit schwach ist. So zeigt sich ein innerer Zusammenhang zwischen den verschiedenen Eigenschaften. Man kommt von der Erscheinung zu einem vorläufigen Begriff des Elementes Schwefel.

Zu den ganz spezifischen Eigenschaften des Schwefels gehört auch seine ungewöhnlich starke Wandelbarkeit unter dem Einfluss der Wärme, seine sogenannten allotropen Modifikationen. Bei normaler Temperatur kristallisiert der Schwefel in schönen rhombischen Kristallen. Erwärmt man diese auf  $95,5^{\circ}\text{C}$ , dann entsteht eine neue Form des festen Schwefels: strahlige monokline Kristalle, die etwas weniger dicht sind und erst bei  $119,2^{\circ}\text{C}$  schmelzen. Auch im flüs-



*Rhombischer Schwefel*



*Monokliner Schwefel*

sigen Zustand kommt es bei  $160^{\circ}\text{C}$  zu einer völligen Veränderung. Unter einem dramatischen Anstieg der spezifischen Wärme wird der zunächst dünnflüssige Schwefel zu einer dunklen, schließlich harzig dichten Masse, die dann bei  $400^{\circ}\text{C}$ , d. h. wenig unter dem Siedepunkt von  $444,6^{\circ}\text{C}$ , wieder flüssig wird. Auch im gasförmigen Zustand durchläuft der Schwefel einige Verwandlungen, die sich in recht charakteristischen Farben zeigen.

Was äußert sich in diesen Tatsachen? Normalerweise gibt es beim Erwärmen der Stoffe die zwei Phasenübergänge: fest  $\rightarrow$  flüssig, flüssig  $\rightarrow$  gasförmig. Das Charakteristische bei diesen Phasenübergängen besteht darin, dass die Wärme in den Stoffen eine tiefere Wirksamkeit entfaltet als beim Wärmer- bzw. Heißenwerden. Wenn der feste Stoff flüssig wird, dann wirkt die Wärme in dem Flüssigwerden und manifestiert sich mit ihrer auflösenden Wirksamkeit in der Beweglichkeit des Flüssigen; und dann beim Sieden in der noch viel größeren Beweglichkeit und Aufgelöstheit des Gaszustandes.

Nun kommt es beim Schwefel nicht nur an diesen Phasenübergängen zu einer Umwandlung in der stofflichen Konstitution, sondern zusätzlich noch innerhalb der Phasen. Und in diesen zusätzlichen Umwandlungsprozessen nimmt der Schwefel jeweils eine neue Konfiguration an, in der sich das Wesen der Wärme auch stärker manifestiert.

Was liegt dieser so ungewöhnlichen Wandelbarkeit des Schwefels zu Grunde? M. v. Mackensen hat den Begriff des labilen Schwefels geprägt (v. Mackensen

1994, S. 45). Was ist aber der Grund für diese Labilität? Wenn ein Stoff von einer Phase in eine dynamischere übergeht, dann muss er eine bestimmte Temperatur haben; er muss bis zu einem ganz bestimmten Grad von Wärme durchglüht sein. Dann wird die bisherige Konfiguration labil und geht in die dynamischere des Flüssigen oder Gasförmigen über. Die Bedingung ist das Labilwerden infolge einer bestimmten Durchwärmung bzw. Durchhitzung. Ein analoger Vorgang geschieht beim Schwefel also innerhalb einer Phase beim Übergang von einer Modifikation zur anderen. Da wird die vorhandene Konfiguration also schon viel früher labil – d.h. bei einem geringeren Grad des Durchglühtseins von Wärme. Es muss in der Substanz etwas vorliegen, was dazu führt, dass schon bei geringerer Temperatur diese Labilität eintritt.

Nun haben alle Elemente eine latente innere Wärme, die bei den exothermen Reaktionen zu Tage tritt. Wenn diese sehr groß ist und wenn sie zugleich unter den verschiedenen Kräften bei dem betreffenden Element die bestimmende Kraft ist, dann kann schon bei geringerer Erwärmung von außen durch die hohe innere latente Wärme eine Labilität der Konstitution eintreten. Das muss man beim Schwefel annehmen. Bei ihm bewirkt eine ungewöhnlich hohe latente Wärme nicht nur den niedrigen Schmelz- und Siedepunkt, sondern, dass er innerhalb der festen und der flüssigen Phase labil wird und eine Umwandlung seiner festen und flüssigen Konfiguration geschieht. Dieser Reichtum an innerer Wärme durchwirkt die Substanz so stark, dass er im Gelb ihrer Farbe sichtbar wird. – Damit haben wir nun eine Grundlage, um auf einige chemische Reaktionen des Schwefels eingehen zu können.

Durch sein geringes Erstarrtsein und seine innere Dynamik verbindet sich Schwefel leicht mit einer Reihe anderer Elemente. Besonders ausgeprägt ist seine Affinität zum Sauerstoff. Welches sind die Eigenschaften dieses Elementes? Es befindet sich als Gas in dem aufgelösesten Zustand der Materie. In ihm wirkt wie in allen Gasen die Tendenz, sich nach allen Richtungen zu verflüchtigen (Gas übt in einem abgeschlossenen Raum nach jeder Seite hin einen Druck auf die Wände aus). Sauerstoff ist dem Licht gegenüber völlig offen. Erst bei  $-183^{\circ}\text{C}$  geht er in den flüssigen Zustand über. Man muss sich vergegenwärtigen, welche Wirksamkeit im Sauerstoff gegen die Verdichtung tätig ist, wenn er noch bei einer nahezu unvorstellbaren Eiseskälte Gas ist. Dann wirkt aber im Sauerstoff eine Tendenz, sich mit vielen anderen Elementen unter Freiwerden von Wärme, z. T. sogar unter Feuererscheinung zu verbinden. Sauerstoff bewirkt, dass aus den Elementen, mit denen er sich verbindet, latente Energien befreit werden. Er führt die Stoffe in energieärmere Zustände über.

Wenn sich Schwefel bei einer Temperatur von  $250$  bis  $260^{\circ}\text{C}$  entzündet und nun langsam mit dem bläulichen Flämmchen verbrennt, kommt es zur Verbindung, d. h. zur Wechselwirkung mit dem Sauerstoff. Dabei entsteht ein farbloses Gas. Man muss sich sagen: der gasförmige Zustand des entstehenden Schwefeldioxids ist eine Wirksamkeit des Sauerstoffs, ebenso auch die Durchsichtigkeit

dieses Gases. Aber indem der Sauerstoff mit dem Schwefel in Wechselwirkung tritt, wird der intensive Gascharakter des Sauerstoffs abgeschwächt: Schwefeldioxid wird viel schneller flüssig als Sauerstoff, nämlich schon bei  $-10,7^{\circ}\text{C}$ . Auch die Schwere des Schwefeldioxidgases ist eine Wirkung des Schwefels.

Im Schwefeldioxid kommt der Schwefel in den gasförmigen Zustand. Im festen Zustand war er in sich verdichtet und von der Umgebung abgesondert. Nun ist er im Schwefeldioxid völlig aufgelöst und verströmend. Und da äußert sich, was im Festen in sich verdichtet war: nämlich als stechender Geruch, in dem man etwas von der inneren Hitze des Schwefels empfindet.

Wieso entsteht aber aus der Vereinigung von Schwefel und Sauerstoff gerade ein Gas? Da wirken zusammen die intensive Gastendenz des Sauerstoffs und der Schwefel, der so wenig erstarrt und verdichtet ist und in dem die auflösenden Kräfte der Wärme stark wirksam sind. Da hat die Gasnatur des Sauerstoffs eine deutliche Übermacht über das so schwache Erstarrtsein des Schwefels. – Bei dieser Vereinigung macht der Schwefel eine innere Verwandlung durch, indem aus ihm sehr viel Wärme entbunden wird.

Das ist eine Bedingung dafür, dass sich der Schwefel in seiner Vereinigung mit dem Sauerstoff im Wasser lösen und sich mit ihm vereinigen kann. Denn in Stoffen mit sehr viel latenter innerer Wärme entsteht in der Regel erst eine Affinität zum Wasser, wenn durch Oxidation ein Teil dieser Wärme entweicht. Indem das Schwefeldioxid sich mit dem Wasser vereinigt, werden nun im Flüssigen die gasförmig auflösenden Kräfte und der aggressive Charakter des Schwefeldioxids wirksam – und es entsteht in der Wechselwirkung mit dem Wasser eine zersetzend wirkende Flüssigkeit: die schweflige Säure. Durch die Komponente des Wassers verliert das Schwefeldioxid seinen gasförmigen Zustand; durch die Komponente des Schwefeldioxids entsteht im Wässrigen die Säure.

Die Vereinigung mit dem Wasser ist aber äußerst labil, denn bekanntlich zerfällt die schweflige Säure beim Erhitzen wieder in ihre Komponenten. Daran wird aber etwas Wichtiges sichtbar. Durch die Art, wie der Schwefel im Schwefeldioxid wirkt, ist die Affinität zum Wasser noch ziemlich gering. Eine so extrem sulfurische Substanz wie der Schwefel muss einiges durchmachen, bis sie sich ganz mit der dichten und kühlen Substanz des Wassers verbinden kann.

Ein wichtiger Schritt auf diesem Weg ist die nochmalige Oxidation, d.h. eine veränderte Wechselwirkung zwischen dem Schwefel und Sauerstoff im Schwefeltrioxid. Dabei wird noch einmal eine erhebliche Wärmemenge aus dem Schwefel entbunden.

Nun ist ein solches Sich-Herauslösen von Wärme aus der Substanz einem anderen Vorgang zu vergleichen, bei dem auch Wärme aus der Substanz frei wird: das ist der Phasenwechsel beim Übergehen in einen dichteren Aggregatzustand. So macht der Schwefel beim Übergang von Schwefeldioxid zu Schwefeltrioxid durch die Verringerung seiner inneren Wärme eine Art von Verdichtung durch. Die im Schwefel wirkenden Kräfte des Verdichtens werden stärker. Das wirkt hinein in das Zusammenwirken mit dem Sauerstoff. Und so entsteht bei der Oxidation aus dem gasförmigen Schwefeldioxid das dichtere Schwefeltrioxid als



eine klare, farblose Flüssigkeit.

Durch diesen höheren Oxidationsgrad hat nun das Schwefeltrioxid gegenüber dem Schwefeldioxid eine starke Affinität zum Wasser. Die Vereinigung mit dem Wasser verläuft recht dramatisch. Bringt man ein kleines Röhrchen mit flüssigem Schwefeltrioxid in ein Gefäß mit Wasser, kommt es zu einer Reaktion, wie wenn ein glühender Eisenstab in das Wasser tauchen würde. Die Schwefelsäure entsteht unter einem intensiven Abstrahlen von Wärme.

Da kommen Schwefeltrioxid und Wasser zu einer inneren Wechselwirkung. Wir haben gesehen, dass Schwefel außerordentlich viel latente Wärme enthält. So ist auch noch das Schwefeltrioxid im Vergleich zu den Oxiden anderer Elemente sehr reich an latenter Wärme. Wasser ist aber eine innerlich kühle Substanz. Das zeigt sich an seiner extrem hohen spezifischen Wärme.<sup>3\*</sup> Wenn Schwefeltrioxid mit Wasser in Wechselwirkung tritt, dann wirkt das Kühle hinein in das Schwefeltrioxid. Das hat zur Folge, dass das Schwefeltrioxid, indem es sich mit dem Wasser vereinigt, unter dem Einfluss von dessen kühler Natur einen Teil seiner inneren Wärme abgeben muss. Und indem nun das Schwefeltrioxid seine Wirksamkeit im Wasser entfaltet, entsteht durch seine gedämpfte Glut in der Vereinigung mit dem Wasser die Schwefelsäure, und zwar zunächst die reine Schwefelsäure, das Oleum. Wenn sich diese dann in Wasser löst, d.h. in das kühle Medium des Wassers übergeht, dann ist das wieder mit starker Erwärmung durch eine nochmalige erhebliche Verminderung von latenter Wärme verbunden.

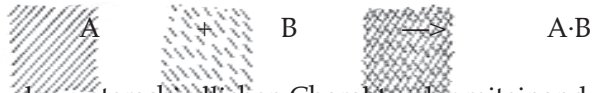
Das alles bliebe unverständlich, wenn man sich nicht zunächst einen möglichst differenzierten Begriff von Schwefel und dann auch vom Sauerstoff gebildet hätte. Will man zum Erkennen in der Chemie kommen, muss man im Unterricht Anschauungen der Elemente und Stoffe erarbeiten, in denen der innere Zusammenhang der verschiedenen Eigenschaften sichtbar wird. Dann hat man mit den Schülerinnen und Schülern ein Denken auszubilden, das das Entstehen neuer Stoffe aus der Vereinigung von Elementen (und Stoffen) im Sinne der Wechselwirkung begreift. Was man vorher im Experiment von außen beobachtet hat, vollzieht man nun im Denken durch die Kraft der Fantasie nach. Man ist innerlich beim Entstehen der Stoffe gleichsam dabei, indem man den Prozess ideell rekonstruiert. Dadurch begreift man von innen, was man vorher von außen aufgefasst hat. Auf diese Weise führt kausales Erkennen zum Verstehen.

Wo Schülerinnen und Schüler zu einer solchen Art des kausalen Erkennens im Chemie-Unterricht angeregt wurden, zeigte sich in der Klasse ein starkes inneres Engagement. Der junge Mensch kann nämlich von dem siebten Schuljahr an – das zeigt die Erfahrung – die beschriebene Form des Erkennens allmählich ausbilden. Da entsteht keine Kluft zwischen der sinnlichen Erfahrung und dem, was man denkt; denn man dringt mit dem Denken in das Gewebe der Erscheinungen

3 Wasser hat unter allen natürlichen Stoffen die höchste »spezifische Wärme«. Um eine bestimmte Menge Wasser zu erwärmen, wird mehr Wärme benötigt als bei den übrigen Stoffen.

ein. Die Phänomene der Chemie werden durchsichtig.

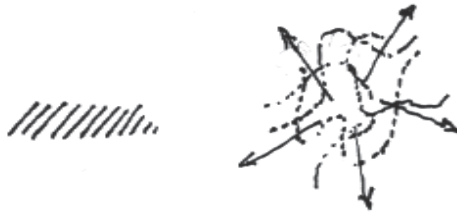
Man kann mit den Schülern die chemischen Prozesse in schematischen bzw. symbolischen Bildern wiedergeben. Die Grundform einer chemischen Vereinigung der zwei Elemente A und B wäre in der folgenden Weise darzustellen:



Nun ist es möglich, den unterschiedlichen Charakter der miteinander reagierenden Elemente zu akzentuieren, z. B. den Unterschied von Schwefel und Sauerstoff:

Und dann die Vereinigung der beiden im Schwefeldioxid:

Ebenso kann man auch die labile Vereinigung des Schwefeldioxids mit dem Wasser zu schwefliger Säure symbolisieren.



Von diesen Symbolisierungen kommt man zu den Formeln, wenn man zu der



qualitativen Betrachtung die quantitative hinzufügt, indem man die Gewichtsverhältnisse bei der Vereinigung der Elemente berücksichtigt; dabei sind allerdings die Gewichtsverhältnisse auf die gemeinsame Bezugsgröße Kohlenstoff (12) zu beziehen. Wenn ein Schüler in der 10. Klasse schreibt:



dann ist das für ihn keine Abstraktion. Denn er vollzieht innerlich die Vereinigung von Schwefel und Sauerstoff durch kausales Denken mit und sagt sich: quantitativ betrachtet vollzieht sich diese Vereinigung im Verhältnis 1 : 1.

Zum Schluss sei noch bemerkt, dass sich die Betrachtung, die hier skizziert

(weiter auf Seite 56)

# Anzeige VFG Kranich

wurde, auf das ganze Gebiet der Chemie ausdehnen lässt. Es ist aber hinzuzufügen: das kausale Verstehen, wie es von R. Steiner für den Chemie-Unterricht an den Waldorfschulen gefordert wurde, steckt noch sehr in den Anfängen.

*Zum Autor:* Ernst-Michael Kranich, geboren 1929, Studium der Biologie, Paläontologie, Geologie und Chemie in Tübingen. Promotion in Botanik. Mehrere Jahre Oberstufenlehrer an einer Waldorfschule. Seit 1962 Leiter der Freien Hochschule Stuttgart/Seminar für Waldorfpädagogik. Zahlreiche Publikationen zur Botanik, Zoologie und Anthropologie.

#### *Literatur:*

F. H. Julius: Grundlagen einer phänomenologischen Chemie, Stuttgart <sup>2</sup>1988

M. v. Mackensen: Prozesschemie aus spirituellem Ansatz, Kassel 1994

R. Steiner: Grundlinien einer Erkenntnistheorie der Goetheschen Weltanschauung, GA 2, Dornach <sup>7</sup>1979; Anthroposophie. Ein Fragment aus dem Jahre 1910, GA 45, Dornach <sup>3</sup>1980;

Die geistig-seelischen Grundkräfte der Erziehungskunst, GA 305, Dornach <sup>2</sup>1979; Gegenwärtiges Geistesleben und Erziehung, GA 307, Dornach <sup>5</sup>1986; Der Entstehungsmoment der Naturwissenschaft in der Weltgeschichte, GA 326, Dornach <sup>3</sup>1977

#### *Beispiele für kausales Erkennen in der Chemie:*

E. M. Kranich: Wasser ist sicher mehr als H<sub>2</sub>O, in: P. Buck, E. M. Kranich (Hrsg.): Auf der Suche nach dem erlebbaren Zusammenhang, Weinheim/Basel 1995; Kausales Erkennen als Phänomenologie, in: E. M. Kranich (Hrsg.): Unterricht im Übergang zum Jugendalter. Beiträge zur Pädagogik Rudolf Steiners 4, Stuttgart 1997; Über die Notwendigkeit eines Qualitätsveränderung im Chemie-Unterricht, in: chimica didactica 2/1998

Anzeige

## Medizinisch-Pädagogische Konferenz

Rundbrief für Ärzte, Erzieher, Lehrer und Therapeuten  
Herausgeben von Dr. Claudia McKeen, Peter Fischer-Wasels

Aus dem Inhalt vom Novemberheft, Nr.15/2000:

Gisbert Husemann †: Lehrer und Arzt

Felicitas Vogt: Kindheit und Medien.  
Verletzung oder Vernetzung der Sinne?

Ingrid Best: Chirophonetik bei Enuresis – ein Behandlungsbericht

Friedwart Husemann: Erziehung zur Verträglichkeit

Berichte von Tagungen/Buchbesprechungen/Tagungsankündigungen/  
Aktuelle Informationen

Bestellungen/Abonnements: Medizinisch-Pädagogische Konferenz, Eveline Staub-Hug, Ehrenhalde 1, 70192 Stuttgart  
Jahresabonnement DM 24,- zzgl. Porto, Einzelheft DM 6,- zzgl. Porto; erscheint viermal im Jahr