Werk

Titel: Kolloidchemie und Biologie

Autor: Freundlich, H.

Ort: Berlin

Jahr: 1924

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0012|log175

Kontakt/Contact

Digizeitschriften e.V.
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

info@digizeitschriften.de

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

Zwölfter Jahrgang. 28. März 1924. Heft 13.

Kolloidchemie und Biologie.

Von H. Freundlich, Berlin-Dahlem.

Gottfried Keller beginnt seinen 1881 erschienenen Novellenkreis „Das Sinngedicht" mit den leise spöttisch klingenden Worten: „Vor etwa 25 Jahren, als die Naturwissenschaften *eben wieder* auf einem höchsten Gipfel standen, obgleich das Gesetz der natürlichen Zuchtwahl noch nicht bekannt war . . ." Und es ist wirklich so; man ist überrascht, wie oft man in den Lebensdarstellungen ausgezeichneter Naturwissenschaftler der letzten 150 Jahre der Wendung begegnet: sie hätten eine Entwicklung dieses Wissensgebietes erlebt, wie es nie einem Früheren beschieden gewesen sei, und wie es so leicht auch keinem Späteren beschieden sein würde. Ich glaube, manchem von uns geht es ähnlich, wenn er auf die letzten 25 Jahre naturwissenschaftlichen Forschens zurückblickt. Man braucht bloß daran zu denken, wie etwa eine Abhandlung über den Bau der Atome im Jahre 1900 nicht gerade gern von der Leitung einer wissenschaftlichen Zeitung angenommen wurde, während heute die physikalischen Zeitschriften fast völlig von derartigen Aufsätzen angefüllt sind, und wie es geglückt ist, auf Grund der Bohrschen Theorie vom Bau der Atome das Spektrum des Wasserstoffes richtig zu berechnen und die Eigenschaften eines neuen Elementes, des Hafniums, richtig vorauszusagen. Oder man denke an die Relativitätstheorie, und wie durch sie Fragen nach dem Bau des Weltalls mit den Grundfragen der Mathematik verknüpft werden.

Auch die Kolloidchemie hat ihre eigentliche Entwicklung ganz in diesem Jahrhundert erlebt. Ihre Ziele sind bescheidener; sie lehrt uns nichts über den Bau der Atome oder über den des Weltalls. Dafür hat sie einen anderen Reiz. Sie ist eine Grundlage für das Verständnis der Lebenserscheinungen geworden und wird es immer bleiben. Wie weit dies der Fall ist und weshalb es so ist, möchte ich im folgenden kurz auseinandersetzen.

Ehe ich auf diese meine eigentliche Aufgabe eingehe, muß ich vorausschicken, was man unter Kolloiden versteht. Die kolloiden Gebilde, mit denen wir es vor allem zu tun haben, sind die *kolloiden Lösungen* oder *Sole*. Von ihrem Wesen kann man sich eine Vorstellung machen auf Grund von Versuchen, die man etwa mit einer Tasse Tee anstellt. Der Farbstoff, der den Tee braun färbt, ist in kolloider Lösung vorhanden. Der Zucker, mit dem man den Tee gesüßt hat, ist dagegen nicht kolloid, sondern echt gelöst. Man kann den Unterschied erkennen, wenn man den Tee in ein Säckchen aus Pergamentpapier füllt und dieses in ein Glas mit Wasser hängt. Der Zucker dringt durch das Pergamentpapier hindurch, nach kurzer Zeit schmeckt das Wasser süß, und wenn man es immer wieder erneuert, kann man es dahin bringen, daß der Zucker so gut wie völlig aus dem Tee in das Wasser übertritt. Der braune Farbstoff dagegen geht nicht durch das Pergamentpapier hindurch. Die Flüssigkeit im Pergamentsack bleibt braun, mag man das Wasser im Glase noch so oft erneuern. Dieses verschiedenartige Verhalten des Zuckers und des braunen Teefarbstoffes beruht auf der verschiedenen Größe der Teilchen, aus denen beide bestehen. Der Zucker ist im Tee bis zu so kleinen Teilchen aufgeteilt, daß sie durch die Poren des Pergamentes durchtreten können. Es sind Teilchen von einer Größe, wie sie auch in den Gasen und Flüssigkeiten vorhanden sind, also von der Größe der Moleküle. Sie sind im Durchschnitt kleiner als ein Millionstel Millimeter. Die Teilchen des Teefarbstoffes sind dagegen so viel größer, daß sie nicht durch das Pergamentpapier hindurchtreten können. Ihre Größe bewegt sich etwa in einem Bereich von $^1/_{1\,000\,000}$ bis zu einem $^1/_{2000}$ mm. Man nennt nun Lösungen, deren Teilchen nicht aus Molekülen bestehen, wie das bei den Zuckerlösungen der Fall ist, sondern etwa 100- bis 1000mal größer sind, kolloide Lösungen oder Sole. Viele durch den täglichen Gebrauch bekannte Flüssigkeiten sind solche kolloide Lösungen, so z. B. eine Lösung von Gelatine, von Stärke, von Seife oder die leichtflüssige Eiweißflüssigkeit des Hühnereis.

Wie außerordentlich klein die Moleküle und Kolloidteilchen sind, dafür ist folgender Vergleich lehrreich, der wohl von *Aston* stammt. Im ganzen Weltmeer sind etwa 1500 Trillionen Liter Wasser enthalten. Die Zahl der Wassermoleküle in einem Liter beträgt aber 33 000 000 Trillionen. Schöpfte man also aus dem Meere ein Liter heraus, bezeichnete dessen Moleküle einzeln mit Nummern, gösse dann das Liter wieder ins Meer zurück und mischte völlig gleichmäßig durch, so fände man, wenn man von neuem ein Liter herausschöpfte, in diesem noch eine große Zahl von Molekülen, die schon im ersten Liter enthalten waren. Teilte man andererseits das Liter Wasser in Teilchen auf von der Größe der Kolloid-

teilchen, etwa in Würfel von $^1/_{100000}$ mm Kantenlänge, so wären in dem Liter Wasser 1000 Trillionen solcher Würfel enthalten, also beinahe ebenso viel wie Liter Wasser im Weltmeer.

Man kann die Teilchen einer kolloiden Lösung nicht unmittelbar mit einem gewöhnlichen Mikroskop sehen. Die kleinsten Teilchen, die man mit diesem erkennen kann, sind wenig kleiner als $^1/_{1000}$ mm. Wohl aber gelingt dies mit dem sogenannten Ultramikroskop. Dessen Konstruktion beruht auf einer ähnlichen Erscheinung, wie man sie vor sich hat, wenn man in einem sonst dunklen Zimmer durch ein Loch im Fensterladen einen kräftigen Sonnenstrahl eintreten läßt und die sogenannten Sonnenstäubchen sieht. Jedes Stäubchen reflektiert das Licht, das auf es fällt, und da man die Stäubchen gegen einen dunklen Hintergrund erblickt, so sind sie erkennbar, auch wenn das von ihnen reflektierte Licht nur schwach ist. Auch bei dem Ultramikroskop läßt man das Licht der Sonne oder einer Bogenlampe seitlich durch die kolloide Lösung treten und sorgt dafür, daß es nicht unmittelbar ins Mikroskop gelangt. Dann sieht man bei geeigneten Vorsichtsmaßregeln nur das Licht, das von den in der kolloiden Lösung enthaltenen Teilchen, den Kolloidteilchen, ausgeht, und diese werden sichtbar. Unter günstigen Bedingungen kann man auf diese Weise noch Teilchen sehen, deren Durchmesser $^1/_{100000}$ mm beträgt. Die Kolloidteilchen liegen nun keineswegs ruhig in der Flüssigkeit, sondern sie zeigen eine lebhafte wimmelnde Bewegung, man glaubt einen Mückenschwarm vor sich zu haben. Es ist dies die sogenannte Brownsche Molekularbewegung. Sie rührt daher, daß sich die Moleküle, aus denen ja auch die Flüssigkeiten wie die Gase bestehen, in jener steten Bewegung befinden, auf die wir die Wärme zurückführen. Die lebhaft bewegten Moleküle stoßen auf die Kolloidteilchen und versetzen sie in eine ähnliche Bewegung, ganz so wie etwa beim Fußballspiel der Fußball durch die Stöße der Spieler in Bewegung gesetzt wird.

Eine zweite Gruppe kolloider Gebilde, die biologisch wichtig sind, haben wir in den *Gelen*. Auch für diese kann man leicht Beispiele aus dem täglichen Leben heranziehen. Alle Gallerten, etwa eine Gelatinegallerte oder ein Apfelgelee sind derartige Gele — ich bemerke nebenbei, daß ja die Kochkunst nichts anderes ist als eine angewandte Kolloidchemie —, aber zu den Gelen gehören auch die Fasern, wie die der Baumwolle, der Wolle u. a. m. Über ihren Bau wissen wir nicht so genau Bescheid, wie über den der Sole. Wahrscheinlich hat man es wieder mit Kolloidteilchen zu tun, die aber eng aneinandergedrängt sind, so daß sie nur von dünnen Flüssigkeitshäuten voneinander getrennt sind, deren Dicke bloß einige Millionstel Millimeter beträgt. Die Teilchen eines Gels können deshalb keine so lebhafte Bewegung ausführen wie die eines Sols, sie schwingen nur um ihre Ruhelagen herum.

Die Bedeutung der Kolloidchemie für die Biologie wird nun leicht daraus klar, daß man ohne zu übertreiben sagen darf: alle Flüssigkeiten, die in den Lebewesen vorhanden sind, sind kolloide Lösungen, fast alle festen Gebilde sind Gele. So sind im Blut außer den Blutkörperchen, die ja erheblich größer sind als Kolloidteilchen, Eiweißstoffe kolloid gelöst. Das gleiche gilt von der Lymphe, vom Speichel und allen anderen Körpersäften der Tiere wie der Pflanzen. Gele sind die Haut, die Muskel- und Nervenfasern, das Bindegewebe, die Wände der Zellen u. a. m. Immer wieder wird man daher bei biologischen Untersuchungen genötigt, auf die kolloide Beschaffenheit aller lebenden Gebilde Rücksicht zu nehmen.

Man könnte sich fragen, ob es überhaupt berechtigt ist, Gebilde, deren Teilchen eine bestimmte Größe haben, also mit Durchmessern zwischen $^1/_{1\,000\,000}$ bis $^1/_{2000}$ mm, in dieser Weise abzugrenzen und ihr chemisches und physikalisch-chemisches Verhalten in der Kolloidchemie als ein besonderes Wissensgebiet zu behandeln. Weder nach oben noch nach unten gibt es eine scharfe Grenze. Flüssigkeiten, die noch größere, also unter dem Mikroskop sichtbare Teilchen enthalten — man nennt sie Emulsionen oder Suspensionen —, verhalten sich durchaus so wie kolloide Lösungen, sie sind nur weniger haltbar und deshalb im allgemeinen nicht so häufig und nicht so leicht zu untersuchen. Aber die Eigenschaften von Emulsionen oder von Suspensionen gehen ganz allmählich und stetig in die Eigenschaften der kolloiden Lösungen über, und das gleiche gilt von dem Übergang einer echten Lösung in eine kolloide. Und doch scheint es mir zweckmäßig, die Kolloidchemie als ein besonderes Wissensgebiet abzugrenzen: bei den kolloiden Gebilden treten eine Reihe von Eigenschaften besonders auffallend und ausgeprägt hervor, und gerade sie spielen ferner in der Biologie und der Technik eine überaus wichtige Rolle.

Ich möchte jetzt einige jener Eigenschaften, die die kolloiden Gebilde vor allem auszeichnen, einzeln besprechen und will dann bei jeder gleich Beispiele aus der Biologie und Physiologie anknüpfen.

Eine besondere Eigenschaft des kolloiden Zustandes ist es, daß wegen der Kleinheit der Teilchen die Oberfläche, die sie in ihrer Gesamtheit entwickeln, sehr groß ist. Eine einfache bekannte Rechnung macht dies verständlich. Man denke sich einen Würfel von 1 cm Kantenlänge und teile ihn in 1000 kleine Würfel von 1 mm Kantenlänge, so ergibt sich für die gesamte Oberfläche dieser kleinen Würfel eine Fläche von 60 qcm. Wenn man aber den Würfel von 1 cm Kantenlänge in so kleine Würfel aufteilt, wie sie als Teilchen in kolloiden Gebilden vorhanden sind, also etwa in Würfel von einem Millionstel cm Kantenlänge, so erhält man eine Trillion solcher Würfel, und deren Oberfläche beträgt jetzt 6 Millionen qcm

oder 600 qm. Es kann also leicht eine kleine Menge eines kolloid gelösten Stoffs eine Oberfläche von mehreren Hundert qm entwickeln. Eine Folge dieser ungeheuren Oberflächenentwicklung ist es, daß die sogenannten Adsorptionsvorgänge bei den Kolloiden so bedeutsam sind[1]).

Unter *Adsorption* versteht man eine lockere Bindung, wie sie Gase und gelöste Stoffe, namentlich an festen Oberflächen, erfahren können. Wenn man ein übelriechendes Wasser dadurch reinigt, daß man es durch Holzkohle filtriert und dabei die Geruchsstoffe an der Kohle festgehalten werden, so beruht dies auf ihrer Adsorption an der Holzkohle. Auch gelöste Farbstoffe können durch Kohle auf diese Weise aus einer Lösung entfernt werden. Im Kriege beruhte die Anwendung der Atemfilter unserer Gasmasken in erster Reihe auf einer Adsorptionswirkung; die Filter enthielten als besonders wirksamen Stoff gepulverte Holzkohle, die die in der Luft enthaltenen Giftgase durch Adsorption zurückhielt. Für die Adsorption gelten eine Reihe charakteristischer Gesetzmäßigkeiten. Die Bindung des Gases oder gelösten Stoffes an der festen Oberfläche erfolgt sehr schnell, sie läßt sich aber auch meist leicht rückgängig machen; man kann also z. B. durch Auswaschen mit Wasser den an der Kohle adsorbierten Farbstoff leicht entfernen. Sehr bezeichnend für die Adsorptionsvorgänge ist ferner, daß gerade Stoffe in sehr kleiner Menge besonders vollständig von der Kohle zurückgehalten werden. Wäre dies nicht der Fall, so hätte man nie von der Adsorption in den Atemfiltern Gebrauch machen können, denn die Giftgase waren stets nur mit einem sehr kleinen Gehalt in der Luft vorhanden.

Die Kolloidteilchen der Sole und Gele sind nun in ganz ausgezeichnetem Maße befähigt, Adsorptionswirkungen auszuüben, und so kommt es, daß man bei physiologischen und biologischen Vorgängen immer wieder Vorgängen begegnet, die man als Adsorptionen ansehen muß. Nur einige Beispiele seien angeführt. Man hat die Aufnahme eines Giftes, des Veratrins, durch den Herzmuskel einer im Meere lebenden Schnecke untersucht und gefunden, daß sie sich in jeder Hinsicht wie eine Adsorption verhält. Ein Gleiches gilt von der Aufnahme vieler anderer giftig wirkender Stoffe, wie des Sublimats, der Karbolsäure u. a., durch die Hefezellen, die Blutkörperchen und ähnliche Gebilde. Es ist somit wahrscheinlich, daß bei der Desinfektion zunächst eine Adsorption der desinfizierenden Stoffe an den Bakterien statthat; an diese schließen sich erst nachträglich rein chemische Veränderungen an, die sich nicht so leicht rückgängig machen lassen wie die Adsorption.

Nicht anders steht es mit den Gegengiften, die der tierische Körper selbst als Abwehrmittel gegen eine Infektion durch Bakterien erzeugt. Bekanntlich beobachtet man bei vielen Bakterieninfektionen, daß bei der Einwirkung der Bakterien auf den Organismus Stoffe entstehen, die den Bakterien in irgend einer Weise nachteilig sind. So bildet sich z. B. bei der Infektion durch Typhusbakterien ein Stoff, das Typhusagglutinin, das von den Bakterien aufgenommen wird und sie derart verändert, daß sie sich jetzt nicht mehr in den Körperflüssigkeiten schwebend erhalten, sondern sich absetzen müssen. Die Aufnahme des Agglutinins durch die Bakterien folgt wiederum fast durchweg den Gesetzen der Adsorption. Freilich zeigt sich eine Besonderheit. Die Bindung ist stark spezifisch, d. h. von den Typhusbakterien wird nur ein Agglutinin aufgenommen, das von Typhusbakterien erzeugt worden ist, nicht eines, das von anderen Bakterien herrührt. Und bisher ist es noch nicht gelungen, derartig spezifische Adsorptionen im Laboratorium künstlich nachzuahmen. Aber man hat allen Grund, anzunehmen, daß eine charakteristische Gestaltung der Bakterienoberfläche und eine besondere Lagerung der Agglutininmoleküle an ihr die Ursache dieser Spezifität ist. Und da man schon Beispiele kennt, bei denen eine besondere Lagerung der adsorbierten Moleküle an Oberflächen statthat, so ist es nicht undenkbar, daß man auch die spezifische Adsorption wird nachahmen können.

Man hat ferner mit Hilfe der Adsorption nachgewiesen, daß viele der wichtigsten Reaktionen, die sich im pflanzlichen und tierischen Organismus abspielen, an Oberflächen vor sich gehen. Zu diesen Reaktionen gehört die Kohlensäureassimilation, durch die die grünen Pflanzen aus der Kohlensäure der Luft Stärke bilden, dann die Atmung, die Gärung und auch die gärungsähnliche Reaktion, durch die sich nach den neueren Untersuchungen *O. Warburgs* die Zellen einer Krebsgeschwulst von denen des gesunden Organismus unterscheiden. Alle diese Reaktionen lassen sich durch Stoffe hemmen, die stark adsorbierbar sind; es gehören dazu durchweg die Stoffe, die man als Narkotika bezeichnet, also Alkohole u. dgl. Und die Hemmung ist um so stärker, je stärker adsorbierbar diese Stoffe sind. Daraus kann man nur folgern, daß jene Reaktionen an Grenzflächen vor sich gehen und daß sie durch die Anwesenheit der dort adsorbierten Narkotika gestört werden. Man hat sich etwa vorzustellen, daß die reagierenden Stoffe, bei der Kohlensäureassimilation die Kohlensäure, bei der Gärung der Traubenzucker, an Grenzflächen, die in den Zellen vorhanden sind, adsorbiert sind und nur dort reagieren. Wenn dann die Narkotika gleichfalls adsorbiert werden, so

[1]) Man könnte fragen: die Moleküle sind noch kleiner als die Kolloidteilchen, ihre Oberfläche also noch größer, weswegen sind bei ihnen die Adsorptionsvorgänge nicht noch ausgesprochener? Hierauf ist zu antworten, daß wegen der viel lebhafteren Bewegung der Moleküle lockere Bindungen, wie sie bei der Adsorption vorliegen, weit unbeständiger sind, und daß ferner die ganze Anordnung der Valenzen an der Oberfläche eines kleinen, an Atomen armen Moleküls eine ganz andere ist als an der Oberfläche der atomreichen Kolloidteilchen.

verdrängen sie diese reagierenden Stoffe von der Grenzfläche und beeinträchtigen dadurch offenbar deren Reaktion.

Hier ist es nun gelungen, sich eine noch verfeinerte Vorstellung vom Verlauf dieser Vorgänge zu bilden. Manche dieser Reaktionen, wie z. B. die Kohlensäureassimilation oder die Atmung, werden auch von der Blausäure stark gehemmt. Deren starke Giftigkeit beruht auf dieser ihrer Einwirkung auf die Atmung. Nun ist die Blausäure gar kein stark adsorbierbarer Stoff; er wird von Kohle viel schwächer adsorbiert als viele Narkotika, die in weit schwächerem Grade diese Reaktionen hemmen. Dieser merkwürdige Widerspruch hat sich folgendermaßen aufklären lassen, wobei wir als Beispiel den Fall der Atmung betrachten wollen. Die Reaktion, um die es sich bei der Atmung handelt, vollzieht sich nicht an der ganzen Oberfläche der festen Zellbestandteile, sondern nur an bestimmten Stellen, an denen gewisse Eisenverbindungen sitzen. Vergleicht man die Oberfläche mit einem Schachbrett, so sind es etwa nur die schwarzen Felder, die von dieser Eisenverbindung bedeckt sind, und an denen die Atmung — sie ist ja eine langsame Verbrennung — vor sich geht. Die Blausäure hat nun eine besondere Verwandtschaft zu diesen Eisenverbindungen und wird von ihnen nach Art einer Adsorption aufgenommen. Dadurch werden diese eisenhaltigen Felder der Oberfläche mit Beschlag belegt, und es kann sich an ihnen die Atmung nicht weiter abspielen. Dies Verhalten hat sich völlig in einem Modell nachahmen lassen. Man hat eine Adsorptionskohle herstellen können, an der solche Stoffe, wie sie bei der Atmung verbrannt werden, z. B. die Aminosäuren, zwar adsorbiert, aber nicht verbrannt werden. Eine solche Kohle war völlig eisenfrei. Brachte man aber in sie geeignete Eisenverbindungen, so wurden die Aminosäuren von diesen eisenhaltigen Kohlen energisch verbrannt, und diese Verbrennung konnte wiederum durch Blausäure völlig gehemmt werden, ganz wie das bei der Atmung der Fall ist.

Es ist leicht einzusehen, weshalb gerade Adsorptionsvorgänge in so bevorzugtem Maße in den Organismen auftreten. Eine Besonderheit der Lebensvorgänge ist ja, daß sie selbstregulierbar sind; tritt also irgendeine Störung auf, so erzeugt sie im Organismus eine Gegenwirkung, die sie rückgängig zu machen sucht. Eine grob chemische Reaktion, bei der gleich Stoffe entstehen, die sich nicht ohne weiteres in die Ausgangsstoffe zurückbilden lassen, sind für eine solche Selbstregulierung weniger geeignet als die lockeren Bindungen der Adsorption, bei denen dies viel leichter möglich ist.

Eng verknüpft mit der Adsorption sind auch die Quellungsvorgänge. Was *Quellung* ist, läßt sich gleichfalls unschwer durch Beispiele aus dem täglichen Leben verständlich machen. Wenn eine harte, trockene Gelatineplatte, die man in Wasser legt, erweicht und durch Aufnahme von Wasser ihr Volumen um ein Mehrfaches vergrößert, so ist das ein Quellungsvorgang. Im Altertum hat man die Quellung vielfach für technische Zwecke angewendet. Man konnte Felsen sprengen, indem man in ein Loch, das man in den Felsen geschlagen hatte, trockenes Holz eintrieb und dieses mit Wasser zum Quellen brachte. Die quellenden Stoffe sind durchweg Gele. Ob es sich beim Quellen darum handelt, daß das Wasser durch Adsorption an den Kolloidteilchen des Geles gebunden wird, und diese dabei auseinanderdrängt, oder ob man es mehr mit einem echten Lösungsvorgang zu tun hat, steht noch dahin. Sicher ist, daß die Quellung für viele biologische Erscheinungen wichtig ist. So ist bei wasserarmen lebenden Gebilden, wie vielen Bakterien, Samen, Sporen u. dgl., das Wasser als Quellungswasser enthalten. Nun ist bei niedrigem Quellungsgrade der Gefrierpunkt des Wassers im gequollenen Gel stark erniedrigt. Es gefriert bis zu 100 und mehr Grad tiefer als reines Wasser. Dies ist mit die Ursache, daß solche wasserarmen Gebilde, wie Bakterien und Samen, sehr niedrige Temperaturen, bis zu denen der flüssigen Luft, also —190°, aushalten können, ohne getötet zu werden. Gefriert das Wasser zu Eis, so treten im lebenden Organismus leicht Veränderungen ein, die tödlich sind, während dies nicht der Fall ist, wenn das Wasser flüssig bleibt.

Quellungsvorgänge sind auch bei der Muskelkontraktion zu berücksichtigen, so daß man die Muskeln wohl als Quellungsmotoren bezeichnen darf. Hier drängt sich der Vergleich auf zwischen diesen Motoren der Lebewesen und den ganz andersartigen Maschinen, die wir besitzen. An unseren Dampfmaschinen, Explosions- und Elektromotoren ist alles groß und schwer und besteht aus Metall, und auch unsere kleinsten Motoren, die durch Federn getriebenen der Taschenuhren, sind durchaus metallisch. Die Quellungsmotoren sind dagegen klein und leicht; sie bestehen ja durchaus aus nichtmetallischen Stoffen, und sie sind dabei doch sehr wirksam. Man denke etwa an die Leistungen des Muskels eines Insektenflügels, der bis zu 330 Flügelschläge in der Sekunde vollführt. Wir verstehen noch nicht die Kunst, solche Quellungsmotoren zu bauen. Sie hätten mancherlei Vorteile, sie arbeiten sehr geräuschlos, und die Energieausbeute ist nicht schlecht. Aber wir können jetzt schon erkennen, daß die sogenannte Oberflächenenergie, die bei Oberflächenveränderungen wirksam ist und die in den Solen und Gelen des Muskels immer wieder zur Geltung kommt, große Vorteile bietet, wenn es gilt, in sehr kleinen Räumen zu arbeiten, wie es offenbar der Bau der Lebewesen erfordert. Man braucht sich bloß zu erinnern, wie ungeheuer groß die Oberfläche einer kleinen Stoffmenge auch in einem kleinen Raume sein kann, und wie stark sie sich ändert, wenn sich die Teilchen etwas vergröbern, um einzusehen, daß die Oberflächen-

energie in hohem Grade geeignet ist, wenn es gilt, solche äußerst kleinen Motoren zu bauen.

Bisher habe ich nur Eigenschaften der kolloiden Gebilde berücksichtigt, die irgendwie mit der großen Oberflächenentwicklung der Kolloidteilchen zusammenhängen. Diese sind in der Tat von überragender Bedeutung, und ich müßte eigentlich noch auf die elektrischen Erscheinungen in den Organismen und auf die Frage der Durchlässigkeit von Zellhäuten für gelöste Stoffe eingehen, bei denen Oberflächenwirkungen gleichfalls von entscheidender Bedeutung sind. Aber es verdienen doch noch einige andere Eigenschaften der Sole und Gele kurz gestreift zu werden. Es ist eine bemerkenswerte Eigentümlichkeit vieler kolloider Lösungen, daß sie ausgesprochen *elastisch* sind. Daß die Gele oft sehr elastisch sind, ist eine alltägliche Erfahrung; man denke an die pendelnden Schwingungen, in die man eine Gelatinegallerte leicht versetzen kann. Es ist aber nun nicht bloß die Gelatinegallerte elastisch, sondern auch die leichtflüssige Gelatinelösung, in die man die Gallerte durch Erwärmen oder durch Auflösen in Wasser verwandeln kann. Diese Elastizität läßt sich in der Weise nachweisen, daß man ein winziges Eisen- oder Nickelteilchen, das in der Gelatinelösung schweben bleibt, durch einen Magneten von außen anzieht, es vorwärts bewegt und durch Entfernen des Magneten wieder freigibt. Das Metallteilchen springt dann unter Umständen glatt in seine Ausgangslage zurück. Mit reinem Wasser oder selbst einer so zähen Flüssigkeit wie Glycerin gelingt dieser Versuch nicht. Das Metallteilchen bleibt dort stehen, wohin es durch den Magneten gezogen worden ist. Eine große Reihe kolloider Lösungen zeigen dies elastische Verhalten, so die Lösungen der Gelatine, der Eiweißstoffe, der Seifen u. a. m. Hierin äußert sich der enge Zusammenhang zwischen Gelen und Solen, deren Eigenschaften auch sonst ganz allmählich und stetig ineinander übergehen.

In ähnlicher Weise, wie es eben geschildert wurde, hat man auch vom Protoplasma, dem Inneren der lebenden Zelle, selbst wenn es merklich flüssig ist, nachweisen können, daß es zu den Solen gehört, die elastische Eigenschaften haben. Damit ist eine alte Streitfrage geklärt, der man oft in älteren Lehrbüchern der Physiologie begegnet, nämlich die Frage, ob das Protoplasma fest oder flüssig sei. Die Antwort lautet: Es ist entweder ein Sol oder ein Gel, aber wohl stets elastisch. Im Laufe der Lebensvorgänge ändert sich die Festigkeit des Protoplasmas. Es ist bald mehr gelartig fest oder solartig flüssig, und es sind Fälle genug bekannt, in denen solche Umwandlungen schnell vor sich gehen und man sie durch leichte mechanische Eingriffe, wie Rühren oder Schütteln, beeinflussen kann. Derartige Erscheinungen hat man jetzt auch im Laboratorium verwirklichen können. Es gibt Sole, wie z. B. die konzentrierten Sole des Eisenoxyds, die zu einem Gel erstarren und durch bloßes leichtes Schütteln wieder zu einem Sol verflüssigt werden können, ein Vorgang, der sich beliebig oft wiederholen läßt.

Auch die optischen Eigenschaften der Sole möchte ich kurz berühren. Ich erwähnte schon das Ultramikroskop und wie sein Bau darauf beruht, daß die Kolloidteilchen, wenn sie von kräftigem Licht betroffen werden, nach den Seiten Licht auszustrahlen vermögen. Für dieses Licht, das man als *Tyndall-Licht* bezeichnet, gelten ausgeprägte Gesetzmäßigkeiten. Sind die Kolloidteilchen an sich farblos und werden sie von weißem Licht getroffen, so strahlen sie nach den Seiten wesentlich den blauen und violetten Anteil des Lichtes aus, während die roten und gelben Strahlen durch die kolloide Lösung hindurchgehen. Betrachtet man die Bahn des Lichtes in der kolloiden Lösung von der Seite, so erscheint sie schön blau gefärbt, die kolloide Lösung selbst gegen einen hellen Hintergrund betrachtet ist gelblich rot. Dies sogenannte Tyndallphänomen beobachtet man bei allen kolloiden Gebilden, also nicht nur bei kolloiden Lösungen, sondern auch bei Gelen oder bei Gläsern, wie Milchglas, die kolloide Teilchen enthalten, oder bei einem feinen Rauch oder Nebel. Man kann es oft an einem Rauch beobachten, der etwa von einer Lokomotive aufsteigt: gegen einen hellen Hintergrund, etwa den hellen Himmel, erscheint er rötlich, gegen einen dunklen, etwa einen Waldrand, bläulich. Auch bei den Lebewesen beruhen manche Färbungen auf diesem Tyndallphänomen, so die blaue Farbe vieler Federn, wahrscheinlich auch die Farbe blauer Augen, dann der blaue Duft, den man auf Pflaumen und Schlehen beobachtet, u. a. m. Ich darf noch daran erinnern, daß das Tyndallphänomen nichts anderes ist als das Urphänomen in *Goethes* Farbenlehre: Trübes gegen einen hellen Hintergrund ist rötlichgelb, gegen einen dunklen bläulich. Das „Trübe" ist nichts anderes als ein kolloides Gebilde. Erst mehrere Jahrzehnte nach *Goethes* Tode gelang es *Rayleigh*, das Tyndallphänomen in die Theorie des Lichtes einzuordnen. Zu *Goethes* Zeit hatte die Physik keine Erklärung für diese Erscheinung, was man wohl berücksichtigen muß, wenn man *Goethes* Mißtrauen gegen die zünftigen Physiker verstehen will.

Das Ultramikroskop gibt keine getreue Abbildung der Kolloidteilchen. Man kann also nicht erkennen, ob sie etwa Kugeln oder Würfel oder Oktaeder sind. Nur starke Abweichungen von der Kugelform, wenn man es etwa mit langgestreckten Stäbchen zu tun hat, machen sich unmittelbar bemerkbar. Man kann jedoch auch verhältnismäßig unbedeutende Abweichungen von der Kugelform dadurch erkennen, daß, während die kugelförmigen Teilchen unter dem Ultramikroskop ein stetiges ruhiges Licht ausstrahlen, die nichtkugeligen Teilchen funkeln. Dies Funkeln hat folgende Ursache. Man sieht ein langgestrecktes Teilchen im Ultramikroskop nur dann,

wenn das beleuchtende Licht senkrecht zur Achse der Teilchen auftrifft, und das Teilchen selbst seiner Länge nach in der Ebene liegt, die man mit dem Mikroskop betrachtet. Trifft das Licht in der Längsrichtung der Teilchen auf oder steht das Teilchen senkrecht zur Beobachtungsebene, so sieht man es nicht oder jedenfalls viel schlechter. Da sich nun die Teilchen in lebhafter Brownscher Bewegung befinden, so leuchten sie auf, wenn sie gerade in der richtigen Lage stehen, sie verschwinden in jeder anderen Lage, und dies verursacht das Funkeln. Durch geeignete Blenden hat man diese Funkelwirkung viel deutlicher machen können, nicht minder die unmittelbare Erkennbarkeit der Stäbchen- oder Fadenform der Kolloidteilchen.

Es hat sich so herausgestellt, daß tatsächlich viele Sole und Gele nichtkugelige Teilchen enthalten, Stäbchen oder Blättchen. So finden sich in den Seifenlösungen Kolloidteilchen in der Form feiner biegsamer Fäden. Diese bilden an der Oberfläche der Lösung leicht ein verfilztes dichtes Geflecht, und darauf beruht zum wesentlichen Teil die große Haltbarkeit der Seifenblasen, bei denen dieses Geflecht wie ein zähes Gerüst wirkt. Auch bei vielen biologischen Gebilden hat man Kolloidteilchen nachweisen können, die stark von der Kugelform abweichen. So hat man lange beim Bindegewebe vermutet, daß in ihm Teilchen vorhanden sein müßten, die sich in der einen Richtung anders verhalten als in der anderen; denn die Quellung des Bindegewebes erfolgte unsymmetrisch. Mit Hilfe des Ultramikroskops und unter Verwendung der eben erwähnten Blenden hat man unmittelbar nachweisen können, daß gerichtete Fädchen im Bindegewebe vorhanden sind.

Die nichtkugeligen Teilchen der Sole und Gele bestehen fast immer aus äußerst feinen Kriställchen. Ein Durchleuchten fester Stoffe mit Röntgenstrahlen ist heute der beste Weg, um zu entscheiden, ob feste Teilchen kristallinisch oder amorph fest sind. — Als Beispiel eines kristallinischen Stoffes sei das Kochsalz erwähnt, als Beispiel eines amorph-festen das Glas. — Durchstrahlt man einen kristallinischen Stoff mit Röntgenstrahlen, so entstehen unter geeigneten Versuchsbedingungen auf einer photographischen Platte charakteristische Linien, während bei einem amorphen Stoff eine gleichmäßige Schwärzung statthat. Es ergab sich, daß die Teilchen vieler Sole und Gele, namentlich auch solche, die man im Ultramikroskop als stäbchen- oder blättchenförmig erkannt hatte, fein kristallinisch sind. Recht überraschend war dies bei einigen Gelen, wie z. B. den Fasern der Zellulose, wie man sie in der Baumwolle, dem Holz usw. vor sich hat. Auch diese erwiesen sich durchweg als kristallinisch. Selbst bei Gebilden, wie den Nerven, den Muskelfasern, hat man auf diesem röntgenographischen Wege Abweichungen vom amorph-festen Zustand gefunden. Man hat demnach allen Grund, anzunehmen, daß viele der im Organismus vorhandenen Gele fein kristallinisch sind, sich also aus kristallisierten Kolloidteilchen aufbauen. Vielleicht wird man hieran denken müssen, wenn man einmal versuchen wird, den Bau der sog. Chromosomen, der Träger der Erbeinheiten, aufzuklären.

Schon aus meiner bisherigen Darstellung ist wohl zutage getreten, daß bei der Anwendung der Kolloidchemie auf die Biologie noch alles im Fluß ist, und daß es Arbeit genug kosten wird, um die Ergebnisse des Laboratoriums für biologische Forschungen nutzbar zu machen. Aber das Neue ist für die Naturwissenschaften so wichtig, daß man sich immer wieder fragt, wie sich die weitere Zukunft gestalten wird. Sie ist hier nicht minder schwer zu durchschauen als sonst auch. Fortschritte in theoretischer Hinsicht sind ja oft dadurch bedingt, daß es gelingt, völlig neue Begriffe zu bilden, und daß man nicht bloß von Ähnlichem auf Ähnliches schließt und allzu stark verallgemeinert, wie unser Denken zunächst zu tun geneigt ist. Und ein neuer Begriff wird meist erst durch völlig neue, unvorhergesehene Tatsachen, die gebieterisch Erklärung fordern, zum Leben erweckt. Eine Überlegung möchte ich aber kurz anführen, die man vielleicht in der Zukunft weitgehend verfolgen wird: Alle Erscheinungen, die ich bisher besprochen habe, rühren daher, daß eine ungeheuer große Zahl von Kolloidteilchen zur Wirkung gelangen, und es kommt immer auf den mittleren Wert der Eigenschaften an, die die Kolloidteilchen haben. Alle diese Vorgänge stehen daher auch im Einklang mit dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre, der stets gilt, wenn ein Vorgang von einer ungeheuren Zahl von Teilchen, seien es Moleküle oder Kolloidteilchen, verursacht wird. Nun erwähnte ich die eigentümliche Brownsche Bewegung, die die Kolloidteilchen der Sole ausführen. Bei dieser treten ausgesprochene Schwankungen in der Zahl der Teilchen auf, die in einem bestimmten kleinen Raum enthalten sind. Im Mittel seien z. B. in einem Raum von 1 Milliardstel cmm zwei Teilchen enthalten. Ihre Anzahl kann auf Null herabsinken, kann aber auch auf viel größere Werte — bis zu sieben hat man schon gefunden — ansteigen. In so kleinen Räumen und bei einer so kleinen Zahl von Teilchen gilt der zweite Hauptsatz der Wärmelehre nicht mehr[1]). Für diesen ist ja nur die mittlere Zahl der Teilchen wesentlich. Die Anzahl kann wohl von selbst abnehmen. Es steht aber im Widerspruch mit diesem Satz, wenn die Zahl von

[1]) Es ist hier freilich zu bemerken, daß beim Ablauf einer jeden chemischen Reaktion dieser Satz insofern nicht gilt, als es nicht auf einen Mittelwert der Eigenschaften der Moleküle ankommt, sondern nur gewisse Moleküle reagieren, die sich in ihren Eigenschaften von diesem Mittelwert auszeichnen. Immerhin ist hierbei die Abweichung von dem nach dem zweiten Hauptsatz zu erwartenden Verhalten nicht so auffallend wie bei diesen Schwankungserscheinungen.