



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Die Welt der vernachlässigten Dimensionen

Ostwald, Wolfgang

Dresden, 1916

IV. Die wissenschaftlichen Anwendungen der Kolloidchemie

[urn:nbn:de:hbz:466:1-77872](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:466:1-77872)

Die wissenschaftlichen Anwendungen der Kolloidchemie.

Meine Herren, wir wollen in den letzten zwei uns zur Verfügung stehenden Stunden über die Anwendungen der Kolloidchemie sprechen. In zweierlei Sinne können wir eine Wissenschaft anwenden. Es ist uns allen geläufig, daß wir etwa in Biologie und Mineralogie Physik und Chemie nicht nur anwenden können, sondern sogar sollen. Eine Wissenschaft kann also auf andere Wissenschaften angewandt werden, wenschon eine solche Verknüpfung nicht mit jedem beliebigen Paar von Wissenschaften und nicht in jedem beliebigen Verhältnis derselben möglich ist. So können wir gewiß Chemie auf die biologische Lehre von der Vererbung, aber nicht umgekehrt Vererbungslehre auf Chemie anwenden, wobei wir aber auf die philosophischen Gründe dieser Sachlage hier nicht eingehen wollen ⁷⁵⁾. Auf der anderen Seite kann man aber eine Wissenschaft anwenden auf technische, praktische, industrielle Erscheinungen und Probleme, wie Ihnen ja allen geläufig ist.

Auch die Kolloidchemie ist einer solchen zweifachen Anwendung fähig. Ja ich kann nicht anders, als meine Ausführungen über die wissenschaftlichen und technischen Anwendungen der Kolloidchemie mit dem „großen Wort“ beginnen, daß seit den letzten dreißig Jahren, d. h. seit der Begründung der sogenannten klassischen physikalischen Chemie der molekularen Lösungen kein einziger Zweig der Physik und Chemie entstanden ist, der sich in bezug auf wissenschaftliche und technische Anwendbarkeit mit der Kolloidchemie auch nur annähernd vergleichen könnte. Ich versichere Sie, daß ich mir der Größe dieses Anspruches voll bewußt bin, aber ich bilde mir ein, durchaus bereit zu sein zur Verteidigung dieser These, und die heutige sowie unsere nächste Besprechung sollen den

Versuch darstellen, Sie von der Angemessenheit dieser Behauptung zu überzeugen. Ich weiß sehr wohl, daß z. B. die Radiochemie, die man in bezug auf ihr Alter eine Schwesterwissenschaft der Kolloidchemie nennen könnte, Resultate gezeitigt hat, die unser Wissen von der Natur auf das einschneidendste modifiziert und auf das überraschendste erweitert haben. Aber in bezug auf Anwendungen, in bezug auf die Zahl und die Mannigfaltigkeit wissenschaftlicher und technischer Probleme, die durch eine neue Wissenschaft angegriffen und vielleicht gelöst werden können, kann sich selbst eine Radiochemie nicht im entferntesten mit der Kolloidchemie messen.

Habe ich Ihnen bereits geklagt, daß der Reichtum der Erscheinungen und Ideen in der reinen Kolloidchemie eine angemessene Darstellung ihrer Hauptergebnisse schwer macht, so muß ich das selbe Klagegedicht nur noch viel lauter anstimmen, wenn ich jetzt versuchen will, der angewandten Kolloidchemie gerecht zu werden. Ich glaube nicht, daß jemand sich z. B. getrauen würde, alle Abhandlungen durchzulesen, in denen etwas über die Anwendung der Kolloidchemie auf biologische und medizinische Probleme steht. Und analog wären eigentlich schon jetzt ganze Bücher nötig, um allein über die Geschichte kolloidchemischer Anschauungen auf relativ so speziellen technischen Gebieten wie auf denen der Färberei und Gerberei zu orientieren. Ich bin mir nicht bewußt zu übertreiben mit der Konstatierung, daß in den letzten Jahren (und natürlich auch noch heute) alle paar Wochen ein größerer wissenschaftlicher oder technischer Erscheinungskomplex bezeichnet worden ist, dessen Probleme durch die Anwendung der Kolloidchemie geklärt oder wenigstens einer zukünftigen Klärung durch kolloidchemische begriffliche und experimentelle Hilfsmittel zugänglich gemacht werden. Natürlich kann man auch gelegentlich beobachten, daß im Schwunge dieser neuen Erkenntnis Probleme als kolloidchemisch bezeichnet werden, die in ein anderes Wissenschaftsgebiet gehören. Aber trotz solcher gelegentlichen Fehlgriffe wird jeder, der ein wenig eingehender die Entwicklung der angewandten Kolloidchemie beobachtet hat, ohne weiteres mit mir übereinstimmen, daß nicht nur Zahl und Art der bereits sicher erkannten Anwendungsgebiete verwirrend groß und verschiedenartig sind, sondern daß auch die zukünftigen Grenzen dieser Anwendbarkeit heute noch gar nicht abzuschätzen sind. Es erscheint immer noch als ein gutes Geschäft, auf die zukünftige Leistungsfähigkeit der Kolloidchemie zu spekulieren.

Angesichts dieser Sachlage kann ich Ihnen in diesen zwei Vorträgen nichts mehr darbieten als eine bescheidene Auswahl aus dem Reichtum der angewandten Kolloidchemie. Es bestehen dabei die zwei Möglichkeiten, daß ich Ihnen entweder über ein paar Anwendungsgebiete verhältnismäßig eingehend berichte, oder aber, daß ich versuche, durch eine möglichst umfassende Darstellung Ihnen einen Überblick über das ganze Anwendungsgebiet zu geben. Ich muß, wenn ich das letztere zu tun versuche, oberflächlich sein und muß darauf verzichten, Einzelheiten zu erwähnen und insbesondere in jedem Falle genau abzugrenzen, was an ihm kolloidchemisch ist und was nicht. Aber ich glaube doch, Ihren Wünschen besser zu entsprechen, wenn ich die zweite Möglichkeit wähle und das Moment der Mannigfaltigkeit oder Verschiedenartigkeit der angewandten Kolloidchemie nicht unterdrücke, sondern hervorhebe. Denn das letztere Moment gehört meiner Meinung nach zu den bemerkenswertesten und charakteristischsten Kennzeichen der modernen Kolloidchemie, von der ich Ihnen hier ein Bild entwerfen soll.

Wir wollen uns heute mit den wissenschaftlichen Anwendungen der Kolloidchemie beschäftigen. Schon im Rahmen der Chemie in ihrem allgemeineren Sinne selbst finden wir zahlreiche Anwendungen. Beginnen wir mit dem Spezialzweig der Chemie, in dem wir in der Regel zuerst unterrichtet werden, mit der analytischen Chemie. Schon in unserer ersten Besprechung zeigte ich Ihnen ein kolloidchemisches Phänomen aus diesem Gebiete, das Durchlaufen von Niederschlägen, z. B. von Sulfiden, durch Filtrierpapier. Die verschiedenen Maßregeln, welche die analytische Chemie zur Vermeidung dieses Phänomens gibt, sind z. B. Arbeiten in nicht zu verdünnten Lösungen, Stehenlassen der Niederschläge ev. bei höherer Temperatur, Zusatz von Salzlösungen usw. Nach dem, was ich Ihnen inzwischen über den Einfluß der Konzentration auf den Dispersitätsgrad von Reaktionsprodukten, über Alterungs- und Koagulationserscheinungen von Kolloiden gesagt habe, erhalten diese Vorschriften sofort eine rationale, nämlich kolloidchemische Grundlage. Weitere sehr interessante analytische Anwendungen der Kolloidchemie finden wir unter den Methoden zum Nachweis minimaler Mengen von Edelmetallen. Bei Besprechung der Farbenercheinungen in Kolloiden machte ich Sie auf die außerordentliche Intensität der Farben kolloider Edelmetalle aufmerksam, eine Intensität, die gelegentlich sogar größer war als die Farbkraft der Anilinfarbstoffe. Es ist ganz natürlich, daß man diese

Eigenschaft zum analytischen Nachweis von Spuren dieser Metalle benutzt hat, und so besteht denn auch schon eine der ältesten und bekanntesten Methoden zum Nachweis von Gold in der Erzeugung der betreffenden Kolloidfärbung. Ich meine hiermit die Bildung des Cassiusschen Goldpurpurs, die einen typischen Fall eines Niederschlags darstellt, der durch die gegenseitige Fällung zweier Kolloide in Form einer Sorptionsverbindung entsteht. Die Probe beruht zunächst auf der Reduktionswirkung von Zinnchlorür auf Goldsalze, wobei kolloides Gold und kolloide Zinnsäure entsteht, die sich dann in Gestalt des bekannten rot-violetten Niederschlags vereinigen. Es gibt aber noch viel empfindlichere, auf demselben Prinzip beruhende Methoden zum Nachweis kleinster Mengen von Edelmetallen, und eine derselben möchte ich Ihnen hier zeigen (Dem.). Nach den hübschen, viel zu wenig bekannten Untersuchungen von J. Donau werden verdünnte Lösungen von Edelmetallsalzen auch in der Borax- oder Phosphorsalzperle zu festen kolloiden Lösungen reduziert, indem sie der sonst farblosen Schmelze je nach ihrem Dispersitätsgrad und nach der Art des Metalls verschiedene Färbungen erteilen. Ich bereite nun in der Platinöse über dem Bunsenbrenner auf ganz normale Art eine Boraxperle vor, indem ich das Salz zum „Schäumen“ bringe, befeuchte das letztere dann vorsichtig mit sehr verdünnter Goldchloridlösung und schmelze das Gemisch dann endgültig zur Perle. Wie Sie bei näherer Betrachtung sehen werden, hat die Perle eine ausgesprochen rosenrote Färbung angenommen, die Farbe des hochkolloiden Goldes. Würde ich konzentriertere Goldlösungen nehmen, so würde ich violette und blaue Perlen erhalten, entsprechend dem geringeren Dispersitätsgrad des reduzierten Goldes, und ebenfalls schlägt die Farbe bei längerem Erhitzen meist nach Violett um, da nämlich bei längerem Verweilen des kolloiden Goldes in der flüssigen Schmelze Dispersitätsverringern und schließlich Koagulation eintritt. Mit Silber erhält man meist braune und gelbe, mit Platin auch violette Perlen. Von besonderem Interesse ist nun aber die Empfindlichkeit dieser Methoden. Wie Sie wissen, ist das Verfahren der Spektralanalyse geradezu berühmt durch seine überaus große Empfindlichkeit. Da ist es nun gewiß sehr bemerkenswert, feststellen zu können, daß in bezug auf den Nachweis von Edelmetallen die kolloidchemische Methode der spektralanalytischen nicht nur gleichkommt, sondern sie in einigen Fällen ganz wesentlich übertrifft. Die kleinsten Mengen von Gold, die man spektralanalytisch nachweisen kann,

betragen 130 Milliontel Milligramm. Auf kolloidchemischem Wege können wir aber noch 2 Milliontel Milligramm erkennen. Die entsprechenden Zahlen sind bei Platin 130 und 50, während beim Silber wiederum die spektralanalytische Methode etwas empfindlicher ist (50 zu 180)⁷⁶). Sie sehen also, daß die kolloidchemischen Methoden nicht nur anderen gleichwertig sein können, sondern sogar die Grenzen der uns experimentell zugänglichen Stoffmengen verschieben und erweitern können.

Ich sagte Ihnen bei der Herstellung von kolloidem Gold in unserer ersten Vorlesung, daß sehr verschiedene Stoffe speziell organischer Natur als Reduktionsmittel benutzt werden können. Unter den vielen organischen Reduktionsmitteln gibt es einige, die ganz besonders energisch z. B. auf Goldsalze wirken, so daß man umgekehrt die Bildung von kolloidem Gold für den Nachweis derartiger organischer Reduktionsmittel verwenden kann. Ein solcher Stoff ist z. B. die sogenannte Humussäure, jene intensiv gefärbte, ebenfalls meist in kolloidem Zustande auftretende kohlenstoffreiche Substanz, die der Ackererde ihre schwarze Färbung verleiht. Humussäuren reduzieren in so kleinen Konzentrationen Goldsalzlösungen zu kolloidem Gold, daß diese Reaktion schon frühzeitig zum Nachweis kleiner Mengen von Humussäuren selbst benutzt worden ist⁷⁷). Ein analoges Beispiel haben Sie in der sog. Leyschen Probe zur Unterscheidung von natürlichem und künstlichem Honig. Reduziert man nämlich eine ammoniakalische Silbernitratlösung mit einigen Tropfen der stark verdünnten Honigproben, so entsteht in beiden Fällen kolloides Silber, das bei sonst gleichen Versuchsbedingungen bei der natürlichen Honigprobe jedoch anders, meist mehr rotgelb, gefärbt ist als in der künstlichen Honiglösung, die einen dunkleren, mehr grünlichen Ton aufweist. Hier sind es jedenfalls minimale Mengen von Eiweiß oder vielleicht ätherischen Ölen besonderer Art im natürlichen Produkt, durch deren „Schutzwirkung“ der Farbunterschied, das heißt der höhere Dispersitätsgrad des kolloiden Silbers im Naturprodukte entsteht, Stoffe, die man dem Kunstprodukt einzuverleiben noch nicht verstanden hat. Obgleich ich eine solche Untersuchung natürlich nicht empfehlen würde, sollte es dem Kolloidchemiker eigentlich nicht schwer fallen, auch diesen Unterschied zwischen Natur- und Kunstprodukt durch einen Zusatz entsprechender, als Schutzkolloid wirkender Stoffe zu beseitigen. Das praktische Resultat einer solchen Untersuchung würde dann vielleicht in einer Umkehrung der Ley-

schen Probe bestehen, insofern als die Fabrikanten vermutlich auch hier, wie meist, zuviel von diesem Schutzkolloid zusetzen würden.

Gehen wir zu anderen Zweigen der Chemie, in denen die Kolloidchemie Anwendung gefunden hat. Gestatten Sie, daß ich ein Beispiel anführe, das in gleicher Weise die anorganische Chemie und die Photochemie interessiert. Es ist Ihnen vielleicht bekannt, daß zu den interessantesten und meistdiskutierten Problemen in der photographischen Chemie die Frage nach der chemischen Natur der Substanz des latenten Bildes gehört. Experimentell weiß man, daß es sich um irgendein Reduktionsprodukt des Silberhaloids handeln muß, d. h. also um eine Verbindung, die mehr Silber und weniger Haloid enthält als z. B. durch die Formel AgCl dargestellt wird. Fernerhin ist dieses Reduktionsprodukt oder das „Photohaloid“ ausgezeichnet durch lebhaft und insbesondere sehr verschiedenartige Farben (Gelb, Rot, Violett, Blau usw.), die Sie wahrnehmen, wenn Sie photographische Platten lange belichten, ohne nachher zu entwickeln. Die bis vor kurzem herrschende und auch noch jetzt von einigen Forschern vertretene ältere Theorie bestand nun in der Annahme der Existenz eines sog. Subhaloids, d. h. einer Verbindung etwa von der Formel Ag_2Cl . Die Hauptschwierigkeit für diese Theorie liegt nun darin, daß man erstens dieses Subhaloid nie hat analytisch isolieren oder darstellen können und daß man zweitens zu der Annahme einer ganzen Anzahl verschieden gefärbter Subhaloide (α -, β -, γ -, δ -usw. Haloide) gezwungen war, die noch dazu stetig ineinander übergehen mußten. Vielleicht erinnern Sie sich nun schon selbst an die verschiedenen Farben des kolloiden Silbers, die ich Ihnen früher zeigte und kommen selbst auf einen Gedanken, der durch zahlreiche und eingehende Untersuchungen besonders von Lüppo-Cramer⁷⁸⁾ heute praktisch zur Gewißheit erhoben worden ist. Es handelt sich bei den Photohaloiden nicht um irgendwelche chemische Verbindungen, die Silber und Halogen in stöchiometrischen Verhältnissen enthalten, sondern um Sorptionskomplexe von kolloidem Silber wechselnden Dispersitätsgrades und normalem unreduziertem Silberhaloid. In besonders demonstrativer Weise ist die Richtigkeit dieser kolloidchemischen Theorie durch die Versuche von W. Reinders⁷⁹⁾ dargestellt worden, dem es gelang, diese Photohaloide in verschieden gefärbten Kristallen synthetisch darzustellen. Er erzielte aber die verschiedenen Farben dadurch, daß er die Kristallisation des Silberhaloids in Gegenwart von hinzugegebenen verschieden ge-

färbten Silbersolen vor sich gehen ließ. Die Kristalle nahmen dann das kolloide Silber auf und erschienen mit denselben resp. ähnlichen Farben. Dies ist gewiß ein sehr eleganter Beweis für die kolloidchemische Auffassung der Photohaloide. Nebenbei möchte ich noch bemerken, daß auch zahlreiche andere Kolloide, z. B. organische Farbstoffe, aber auch Gelatine bei der Kristallisation aufgenommen wurden, eine sehr nachdenkliche Tatsache, insofern sie zeigt, daß Kristallisieren in Gegenwart von Kolloiden keineswegs immer eine Reinigung des betreffenden Stoffes bedeutet. Es sind auch noch andere Fälle in der anorganischen Chemie bekannt, in denen kolloide Verunreinigungen und ihre Konsequenzen in bezug auf Farbe usw. irrtümlicherweise zur Aufstellung von verschiedenen chemischen Verbindungen, sog. Chromoisomeren usw., geführt haben ⁸⁰⁾.

Ich kann nur ganz cursorisch darauf hinweisen, daß noch zahlreiche andere anorganische Verbindungen, z. B. solche mit Wasser (Hydrate), sich im Laufe der Zeit als Kolloid- oder Sorptionsverbindungen erwiesen haben, wie z. B. manche der verschiedenen wasserhaltigen Kieselsäuren ⁸¹⁾, daß sich wiederum andere Verbindungen, wie etwa die verschiedenen Zinnsäuren, im wesentlichen als ein und dieselbe chemische Substanz, aber in verschiedenem Dispersitätsgrade, ergeben haben ⁸²⁾, daß die merkwürdigen Lösungen speziell der Alkalimetalle oder des Schwefels in flüssigem Ammoniak sehr wahrscheinlich Lösungen von kolloidem Dispersitätsgrade sind usw. ⁸³⁾.

Auch in der organischen Chemie sind die Anwendungen der Kolloidchemie nicht nur schon jetzt überaus zahlreich, sondern eine noch viel größere Ernte steht hier bevor. Alle jene schmierigen, schleimigen, klebrigen, harzigen, pechartigen usw. Massen, die nicht kristallisieren wollen und die der Abscheu des normalen Organikers sind, die er sorgfältigst zu hinterst in sein Regal stellt mit der Aufschrift: „Zu weiterer Bearbeitung nicht geeignet“ — gerade diese Dinge sind umgekehrt das Entzücken des Kolloidchemikers. Denn in den meisten Fällen sind die genannten Eigenschaften ja gerade die Eigentümlichkeiten von Kolloiden, insbesondere von solvatisierten Emulsoiden und schließlich einer Sorte von Kolloiden, über die ich bisher noch gar nicht gesprochen habe, den sogenannten Isokolloiden ⁸⁴⁾. Erinnern Sie sich bitte daran, daß wir unter einem Kolloid weiter nichts als ein disperses System von einem bestimmten Dispersitätsgrade verstanden haben. Nun sind aber Fälle nicht nur denkbar, sondern tatsächlich auch realisiert, in denen

disperse Phase und Dispersionsmittel dieselbe chemische (analytische) Zusammensetzung haben und doch nicht zu einem homogenen, resp. molekulardispersen Gebilde verschmelzen. So ist z. B. eine polymere Verbindung sehr häufig nicht molekular löslich in ihrer monomeren Form, und das gleiche gilt für manche Paare von isomeren Stoffen. Um ein besonders modernes Beispiel zu nennen, möchte ich Sie an die künstliche Synthese des Kautschuks durch Polymerisation von Isopren erinnern. Hier findet z. B. bei mehrstündigem Erhitzen allmählich eine Polymerisation zu einem kolloiden Produkt statt, das zunächst in dem monomeren Isopren kolloid gelöst ist, dessen Viskosität erheblich vermehrt, durch Alkohol ausgefällt werden kann usw. Ja es gibt Kolloide, die aus einem einzigen Element bestehen, insofern als natürlich auch zwei Elemente in verschiedenen sog. allotropen Zuständen ineinander kolloid verteilt sein können⁸⁵⁾. Es ist Ihnen ja bekannt, daß z. B. Schwefel oder Phosphor in einer ganzen Anzahl von verschiedenen physikalischen Zuständen oder allotropen Modifikationen auftreten können, und es gibt eine ganze Reihe von Gemischen solcher allotroper Modifikationen, die z. T. nachweislich, z. T. mit größter Wahrscheinlichkeit kolloide Gemische darstellen. So verwandelt sich bekanntlich weißer Phosphor im Lichte allmählich in die rote Modifikation. Unter einem lichtstarken Ultramikroskop kann man aber direkt sehen, wie diese allotrope Umwandlung diskontinuierlich oder punktwise in der weißen Schmelze vor sich geht, indem sich unter dem Einflusse des Lichtes typische kolloide Teilchen bilden, die sich — ganz ähnlich wie bei der Gelatinierung — allmählich zu größeren Aggregaten, zu Netzstrukturen, Gelgerüsten usw. zusammenlagern⁸⁶⁾. Auch in der Schmelze des Schwefels zwischen 160 und 200° haben wir mit großer Wahrscheinlichkeit ein kolloides Emulsoid zweier Schwefelmodifikationen, wie aus der völligen Übereinstimmung der bekannten Viskositätsanomalie mit dem Verhalten der Viskosität bei einer kolloiden Entmischung und noch aus manchen anderen Gründen hervorgeht⁸⁷⁾. Zu solchen Isodispersoiden und speziell Isokolloiden gehören nun sehr wahrscheinlich die meisten Harze, viele Öle und insbesondere auch wohl die Mehrzahl jener „peinlichen Reste“, die sich der normalen chemischen Verarbeitung durch Kristallisieren usw. entziehen.

Aber auch auf anderen Gebieten der organischen Chemie, z. B. auf dem der Farbstoffchemie, stehen der kolloidchemischen Betrachtungsweise vermutlich noch sehr große Erfolge bevor. Man

kann sagen: mit Notwendigkeit. Denn es ist bekannt, daß eine ganz außerordentlich große Anzahl organischer Farbstoffe in Wasser typische kolloide Lösungen ergeben, und es erscheint selbstverständlich nach all dem, was ich Ihnen über die grundsätzliche Abhängigkeit aller physikalisch-chemischen Eigenschaften vom Dispersitätsgrade gesagt habe, daß z. B. die Änderungen des kolloiden Zustandes solcher Farbstoffe auch nicht ohne Einfluß auf die Farbe der letzteren bleiben werden. In der Tat liegen auch schon einige Versuche vor, auf diesem Wege in das Dunkel namentlich solcher Farbstoffprobleme einzudringen, in denen die konstitutionschemische Auffassung bisher versagt oder doch nur willkürliche Erklärungen zu geben vermag. So gilt für die Farbänderungen einer großen Anzahl kolloider organischer Farbstoffe die bei kolloiden Metallen gefundene Regel, daß sich die Farbe bei abnehmendem Dispersitätsgrade von Gelb nach Rot über Blau verschiebt, ganz genau so wie wir bei kolloidem Gold oder Silber gesehen haben⁸⁸⁾. Eigentlich könnten solche Beziehungen von vornherein erwartet werden, da die speziellen optischen Eigenschaften organischer Farbstoffe den entsprechenden Eigenschaften der Metalle so ähnlich sind, daß in jedem größeren physikalischen Lehrbuch die Optik der Metalle und der organischen Farbstoffe gemeinsam behandelt wird.

Auch in den unmittelbaren Schwesterwissenschaften der Kolloidchemie, den einzelnen Zweigen der physikalischen Chemie, finden wir zahlreiche Anwendungen. Zunächst bestehen natürlich die allerengsten Beziehungen zwischen der Kolloidchemie und der eigentlichen Kapillarchemie, das heißt der physikalischen Chemie der Oberflächen. Die Kolloidchemie ist ja eigentlich nichts anderes als ein Spezialgebiet dieses allgemeinen Zweiges, indem sie sich auf Systeme bezieht, die praktisch nur „aus physikalischer Oberfläche bestehen“. Während auf der einen Seite die Erscheinungen der Oberflächenspannung, der Sorption an nichtdispersen Oberflächen oder die Phänomene der Kapillarelekttrizität unmittelbare Anwendungen auf die Eigentümlichkeiten kolloider Systeme gestatten, wird natürlich auch das Studium der eigentlichen kapillarchemischen Phänomene umgekehrt befruchtet und bereichert durch die Erscheinungen der Kolloidchemie. Die wechselseitigen Beziehungen zwischen diesen zwei Wissenschaften sind so offenkundig, daß ich hier nicht näher darauf einzugehen brauche.

Aber auch zu ganz anderen scheinbar weitliegenden Gebieten der physikalischen Chemie ergeben sich Beziehungen zur Kolloid-

chemie. Betrachten wir z. B. das klassische Gebiet der echten oder molekularen Lösungen, so möchte ich Sie daran erinnern, daß die bekannten Lösungsgesetze von van't Hoff usw. um so weniger gelten, je konzentrierter die molekulardispersen Systeme sind. Auf der anderen Seite sagte oder zeigte ich Ihnen sogar, daß solche konzentrierte Lösungen vielfach schon Kennzeichen des kolloiden Zustandes aufweisen, wie z. B. das intensive Tyndallphänomen in Rohrzuckerlösungen usw. Ferner ist in neuerer Zeit — besonders übrigens von amerikanischen Forschern — zur Erklärung des Verhaltens konzentrierter molekularer Lösungen die Verbindung mit dem Lösungsmittel oder die Solvatation herangezogen worden, indem man annimmt, daß Ionen und Moleküle sich unter Umständen mit sehr zahlreichen, hundert und mehr Molekülen des Dispersionsmittels locker vereinigen. Es scheint bisher noch nicht einmal darauf hingewiesen worden zu sein, daß sich aus der Vereinigung etwa von 1000 Molekülen schon räumlich notwendigerweise ein kolloides Teilchen ergibt. Ferner weiß man, daß die Menge dieses von den Molekülen gebundenen Dispersionsmittels stetig variiert und nicht durch einfache stöchiometrische Zahlenverhältnisse ausgedrückt werden kann. Eine eingehendere Betrachtung zeigt aber, daß zwischen den Gesetzmäßigkeiten dieser Solvatation eine ganze Reihe, darunter sogar quantitativer Analogien und Übereinstimmungen besteht mit den Kennzeichen solcher lockerer Verbindungen, die wir oben als Sorptionsverbindungen bezeichnet haben ⁸⁹⁾. — Andererseits ist ja die Solvatation geradezu charakteristisch für eine große Reihe von Kolloiden, wie wir früher besprochen haben, und tritt hier sogar in exzessiver Form auf. In einem Teilchen einer Eiweiß- oder Gelatine-lösung ist das Verhältnis zwischen trockner Substanz und Wasser zuweilen sicher noch größer als 1 zu 1000. Es ergibt sich aus diesen Befunden und Überlegungen, die noch viel weiter ausgesponnen werden könnten, daß Lösungsgesetze gefunden werden müssen, die beide Dispersoidklassen, kolloide und molekulardispersoide, umfassen sollten, wobei sich dann grobe Kolloide (oder gar grobe Dispersionen) auf der einen Seite, verdünnte Molekulardispersoide auf der anderen Seite als extreme Fälle ergeben würden. Wir haben einstweilen solche Gesetze noch nicht. Ich glaube aber, daß ein solcher Gesichtspunkt fruchtbarer sein wird als der Versuch, durch immer weitergehende Korrekturen die Gesetze verdünnter molekularer Lösungen den nicht mehr so hochdispersen Systemen anzupassen. Da die Erscheinungsreihe zwischen molekulardispersen

und kolloiden Systemen eine kontinuierliche ist, so würden solche allgemeinere Gesetze natürlich von vornherein die Korrekturen für die Anomalie der konzentrierten molekularen Lösungen enthalten.

Es ist nicht nur Zufall, wenn neben diesem alten klassischen Problem auch die drei modernsten Zweige der physikalischen Chemie, die Lehre von der Katalyse, von den kristallinen Flüssigkeiten und von den radioaktiven Stoffen, interessante Beziehungen zur Kolloidchemie ergeben haben. Was die Lehre von der Katalyse anbetrifft, die Wissenschaft von den Reaktionsbeschleunigungen und -verlangsamungen durch die Gegenwart von Stoffen, welche nicht im Reaktionsprodukt erscheinen, so machte ich schon in der zweiten Vorlesung darauf aufmerksam, daß gerade kolloide Stoffe, wie etwa die kolloiden Metalle, überaus wirksame Katalysatoren sind. Neben dieser eigentlichen Kolloidkatalyse gibt es nun aber zahlreiche weitere katalytische Prozesse, in denen ebenfalls sehr oberflächenreiche, wenschon nicht kolloiddisperse Substanzen den katalytischen Effekt hervorbringen. Ich brauche nur an den Kontakteffekt von Platinmohr und anderen Metallpulvern bei der Schwefelsäureherstellung, an die Methoden von J. Sabatier mit feinverteilten Metallhydroxyden usw. zu erinnern. Schließlich aber hat sich auch herausgestellt, daß der katalytische Einfluß der Gefäßwände etwa bei Gasreaktionen in hervorragendem Maße z. B. von ihrer Rauigkeit abhängt, und daß somit ganz allgemein die Fälle von Katalysen durch Oberflächenwirkung sehr häufig sind. Versucht man sich eine Theorie dieser auch „heterogene Katalyse“ genannten Erscheinungen zu machen, so liegt es unmittelbar nahe, an die Sorptionserscheinungen zu denken, für deren Ausgiebigkeit ja ebenfalls die Größe der absoluten und speziell spezifischen Oberfläche (des Quotienten aus Oberfläche und Volum oder Gewicht) maßgebend ist. Durch diese Konzentrationserhöhung in den Grenzflächen, vielleicht auch durch die lokale Wärmeentwicklung, die bei solchen Sorptionen stattfindet, kann zum mindesten ein großer Teil der beobachteten Reaktionsbeschleunigungen erklärt werden. Für eine andere Gruppe solcher Katalysen könnten weiterhin die sekundären chemischen Reaktionen verantwortlich gemacht werden, die, wie ich bereits früher zu schildern versuchte, im Gefolge von Sorptionsvorgängen möglich sind, z. B. dann, wenn durch die besonders starke oder spezifische Sorption eines Bestandteils des Reaktionsgemisches das chemische Gleichgewicht in dem

letzteren gestört wird. Die Erscheinungen der Kolloid- und Sorptionskatalyse stellen überaus wichtige Beziehungen zwischen diesem Zweige der physikalischen Chemie und der Kolloidchemie dar. Daß schließlich auch die sog. „Fermente“ der Organismen sich in der Mehrzahl in kolloidem Zustande befinden, und daß dementsprechend ihre Reaktionen vom Standpunkt der Kolloid- und Sorptionskatalyse betrachtet werden müssen, sei hier nur angedeutet.

Das zweite Anwendungsgebiet der Kolloidchemie in der neueren physikalischen Chemie haben wir in dem der flüssigen Kristalle resp. genauer der kristallinen Flüssigkeiten, jenen eigentümlichen Substanzen, deren Brechungserscheinungen sie in engster Verwandtschaft zu den festen Kristallen setzen. Diejenigen unter Ihnen, welche sich für die Frage nach der Natur dieser „Schmelzen“ etwas näher interessiert haben, werden wissen, daß lange Zeit diskutiert worden ist über eine Frage, die in fast verblüffender Weise identisch ist mit einem Problem, das die Kolloidchemie lange Zeit beschäftigt hat. Es handelt sich um die Frage, ob diese zuweilen deutlich trüb erscheinenden oder schöne Brechungsfarben⁹⁰⁾ aufweisenden, häufig auch stark viskosen Flüssigkeiten homogene, d. h. molekularisperse oder aber heterogene Systeme sind von der Art etwa der Emulsionen, eine Frage, die wir, wie Sie sich erinnern, in Anwendung auf kolloide Systeme ausführlich in unserer ersten Vorlesung besprochen haben. Wie bei den Kolloiden sprachen auch hier manche Umstände für die eine und manche wieder für die andere Ansicht, und ebenfalls wie bei den Kolloiden hat strenggenommen auch hier die Diskussion keine Entscheidung im einen oder anderen Sinne gebracht. Die vielleicht am meisten anerkannte Theorie der klassischen Physikochemiker ist die von M. Bose, nach welcher in den kristallinen Flüssigkeiten Molekülschwärme, d. h. lose Vereinigungen einer ganzen Anzahl von Molekülen herumschwimmen. Nun ist aber der theoretische Begriff eines „Molekülschwarms“ phänomenologisch offenkundig gar nichts anderes als eine Bezeichnung submolekularer, d. h. zunächst kolloider Aggregate, und obschon das Wort „Kolloid“ relativ spät in der Diskussion aufgetaucht ist⁹¹⁾, so häufen sich immer mehr Befunde, die mit größter Deutlichkeit darauf hinweisen, daß zum mindesten in zahlreichen Fällen kristallinische Flüssigkeiten typische emulsoide Kolloide sind. Neben den erwähnten Trübungs- und Opaleszenzerscheinungen sei nur genannt die Viskositätsanomalie bei der Entstehung dieser Schmelzen durch Ab-

kühlung, deren Form wiederum vollkommen identisch ist mit der Viskositätskurve der kolloiden Entmischung von kritischen Flüssigkeiten, der Hitzeoagulation des Eiweiß, der Entmischung der Schwefelschmelzen usw.⁹²⁾. Ferner ist in vielen Fällen direkt auf ultramikroskopischem Wege der kolloide Dispersitätsgrad solcher Systeme erwiesen worden, der große Einfluß von chemisch indifferenten Zusätzen auf die Ausbildung der optischen Anisotropie spricht für die Rolle des kolloiden Zustandes, desgleichen die Tatsache, daß man nach D. Vorländer einfach durch Vermischen zweier isotroper Flüssigkeiten ein anisotropes Gemisch erhält, ohne daß eine chemische Wechselwirkung wahrscheinlich wäre — kurz, wir finden eine immer größer werdende Zahl von Übereinstimmungen von kristallinen Flüssigkeiten und kolloiden Systemen. Mit der Einreihung von kristallinen Flüssigkeiten unter vielfach kolloide Dispersoide ist natürlich noch nicht eine Erklärung ihrer optischen Merkwürdigkeiten gegeben. Vielleicht hilft aber auch hier die Weiterverfolgung einer überaus interessanten, anscheinend fast vergessenen mikroskopischen Kapillarerscheinung: ganz normale isotrope Flüssigkeiten, z. B. selbst Wasser, zeigen deutliche Polarisationserscheinungen, wenn man sie in dispersem Zustande, d. h. in Tröpfchenform, beobachtet⁹³⁾. Man hat diese Erscheinung als „Oberflächenpolarisation“ bezeichnet und sie zurückgeführt auf die Wirkung der Oberflächenspannung, welche in kleinen Tröpfchen durch den Kapillardruck ganz erhebliche Beträge erreichen kann. Nun ist aber anzunehmen, daß der Betrag dieser Oberflächenpolarisation zunächst zunehmen wird mit steigendem Dispersitätsgrade parallel mit der Oberflächenspannung, und daß andererseits je nach der chemischen Natur oder vielleicht je nach der Gestalt der Moleküle Art, Vorzeichen und Größe der Polarisation verschieden sein wird. Vielleicht — ich mache diese Bemerkung mit allem Vorbehalt — findet sich also hier eine Brücke zwischen den Oberflächenerscheinungen mikroskopischer Flüssigkeitströpfchen und den optischen Eigenschaften solcher Systeme, die wie die Kolloide praktisch ganz aus Oberfläche bestehen.

Der dritte moderne, ja vielleicht modernste Zweig der physikalischen Chemie, in den plötzlich die Kolloidchemie eingedrungen ist, ist die Radiochemie. Vor Jahren hatte der Vortragende es als ein ganz besonderes reizvolles Problem der synthetischen Kolloidchemie bezeichnet, radioaktive Stoffe in den kolloiden Zustand überzuführen⁹⁴⁾. Im vergangenen Jahre ist nun gezeigt worden,

daß die Natur dieses Experiment schon selbst gemacht hat, insofern es sich herausstellt, daß eine ganze Anzahl wäßriger Lösungen radioaktiver Substanzen an und für sich schon kolloide Lösungen sind ⁹⁵). Sie zeigen die Erscheinungen der Elektrophorese, der Koagulation durch Elektrolyte, sie diffundieren und dialysieren nicht, werden leicht durch andere Kolloide sorbiert usw. Es befinden sich nicht alle, wohl aber vielleicht die größere Anzahl radioaktiver Lösungen in kolloidem Zustand, und die kolloidchemischen Methoden z. B. der Dialyse, der Sorption usw. gestatten demgemäß eine Trennung und Konzentrierung der einzelnen Zerfallsprodukte je nach ihrem Dispersitätsgrade. Das ist gewiß eine sehr überraschende und interessante Anwendung der Kolloidchemie in der neueren physikalischen Chemie.

Aber noch für eine Reihe anderer Untersuchungen, die in gleicher Weise Chemie und Physik interessieren, haben Beobachtungen an dispersen und speziell auch kolloiden Systemen ein Material von entscheidender Vorzüglichkeit geliefert. Ich meine hier die experimentelle Bestimmung der sog. Avogadro'schen Konstante, der berühmten Zahl N , welche angibt, wieviel Moleküle in einem Grammmolekül irgendeines Stoffes enthalten sind. Es gibt verschiedene Wege, diese fundamentale Zahl zu bestimmen, von denen ich nur den folgenden erwähnen will: Es ist Ihnen allen bekannt, daß unsere Erdatmosphäre um so verdünnter wird, je höher wir uns von der Erdoberfläche hinaufbegeben. Es besteht dabei das Gesetz, daß bei arithmetischer Progression der Höhe die Dichte der Atmosphäre in geometrischer Progression abnimmt. In der kinetischen Gastheorie kann nun dieses Gesetz benutzt werden zur Ableitung der Avogadro'schen Konstante, insofern, als die Größe der Niveauänderung, die eine bestimmte Dichteabnahme zur Folge hat, dem Grammmolekül des Gases umgekehrt proportional ist ⁹⁶). Dieselbe Erscheinung dieser Konzentrationsänderung unter dem Einfluß der Schwere zeigen nach den Versuchen von J. Perrin nun auch Dispersionen und Kolloide, falls die Teilchen so klein sind, daß sie sich in Brownscher Bewegung befinden. In einem Kolloidvolum ist also die Konzentration am Boden des Gefäßes immer größer als in den oberen Partien, und zwar wird bei gegebener Höhe des Gefäßes der Unterschied natürlich um so größer, je größer die Dispersion ist. Bei Suspensionen z. B. von Gummigutt oder Mastix, die etwa $0,3 \mu$ groß sind, ist die Konzentration schon in der Höhe von etwa 50μ nur halb so groß wie

auf dem Boden, während die Dichte der Erdatmosphäre erst etwa in 6 km Höhe halb so groß ist wie auf der Oberfläche. Perrin konnte nun aber noch zeigen, daß nicht nur dasselbe formale Gesetz die Verteilung von Gasen und groben Dispersionen kontrolliert, sondern daß man auch die Avogadro'sche Konstante selbst erhält, unter der Voraussetzung, daß jedes disperse Teilchen sich wie ein Molekül verhält. Ein „Grammolekül“ dieser groben Teilchen würde also gleich sein dem Gewicht ihrer N -fachen Zahl. Die auf diese Weise erhaltenen Zahlen stimmen nun in frappierender Weise überein mit den auf ganz anderen Wegen gefundenen Werten und ergeben eine Anzahl von $6-7 \cdot 10^{23}$ Molekülen im Grammolekül.

Ich kann nur kurz erwähnen, daß auch aus der Geschwindigkeit der Brownschen Bewegung die Avogadro'sche Konstante abgeleitet werden kann und daß sich aus diesen Untersuchungen ebenfalls derselbe Wert für diese wichtige Größe ergeben hat. Es ist gewiß überaus bemerkenswert, daß aus der Beobachtung eines einzigen in Brownscher Bewegung befindlichen Öl- oder Quecksilbertröpfchens, ja selbst aus einem Tropfen verdünnter Milch (Deckhuyzen) eine so fundamentale Zahl wie die Avogadro'sche Konstante berechnet werden kann. —

Ich bitte um die Erlaubnis, Sie gleich in noch höhere Regionen spazieren führen zu dürfen. Vielleicht halten Sie es zunächst für einen Scherz, wenn ich Ihnen sage, daß die Kolloidchemie einiger interessanter Anwendungen auch auf dem Gebiete der kosmischen Physik fähig gewesen ist und in Zukunft sich jedenfalls als noch fähiger erweisen wird. Eine nähere Betrachtung zeigt aber ohne weiteres, daß wir in der kosmischen Physik nicht nur Körper in großen Massen oder nur in Molekülen, sondern auch Dispersoide von sehr verschiedenen dazwischenliegenden Dispersitätsgraden haben. Insbesondere sind hier die „Himmeldispersoide“ zu nennen, wie wir sie im atmosphärischen Staub, im Wasser in seinen verschiedenartigsten Dispersionszuständen als Dampf, in kondensierter und gröberdispenser Form als Wolken und Nebel, schließlich als Regen und Schnee vor uns haben. Ich machte Sie schon an früherer Stelle darauf aufmerksam, daß die blauen und gelbroten Himmelfarben durchaus auf diese selben Ursachen zurückzuführen sind wie die Opaleszenzerscheinungen typischer Kolloide. In beiden Fällen ist die selektive Abbeugung an Teilchen, die kleiner als Lichtwellenlänge sind, für den Farbeffekt verantwortlich. Die Übereinstimmung zwischen der Opaleszenz des Himmels und der eines Mastix-

sols geht sogar so weit, daß dieselbe Formel die Erscheinungen quantitativ beherrscht und daß auch die spezielleren Verhältnisse wie die Polarisierungseffekte in beiden Fällen ganz gleichartig sind⁹⁷). Ich möchte noch kurz auf einen anderen optischen Effekt hindeuten, bei dem die Anwesenheit kleiner lichtabbeugender Teilchen die Hauptrolle spielt, das ist die Helligkeit des Himmels. Würde das Licht der Sonne nicht durch die Dispersoide der Erdatmosphäre diffus zerstreut, so hätten wir keine Tageshelligkeit in dem uns geläufigen Sinne. Die Sonne würde, wie etwa der Mond, als eine grell leuchtende Scheibe auf einem vollständig dunklen Hintergrund stehen. Überall wo das Sonnenlicht nicht direkt hinträte, hätten wir einen tiefschwarzen Schatten, überall würde ein greller Kontrast zwischen beleuchteten und unbeleuchteten Stellen auftreten, kurz, die Erde sähe ganz anders aus. Die diffuse Himmels-helligkeit verdanken wir nur dem Vorhandensein der atmosphärischen Dispersoide.

Aber auch die Wolken, Dispersoide meist von der Zusammensetzung $G + Fl$, zeigen eine Reihe von Übereinstimmungen mit dem Verhalten kolloider Systeme. Es ist schwierig, die Größe der Wassertropfchen zu bestimmen, welche die Wolken aufbauen. Jedenfalls handelt es sich aber um Teilchen, die den kolloiden Dimensionen sehr nahe stehen, wie nicht nur aus der Tatsache ihres Schwebens in der Luft, sondern auch z. B. aus dem Polarisationsgrad des von ihnen ausgesandten Lichtes hervorgeht⁹⁸). Insbesondere zeigen aber diese Himmelsdispersoide die typischen Koagulationserscheinungen emulsoider Systeme: Das Koagulationsprodukt ist der Regen. Auch dies ist nicht nur ein Scherz oder nur eine äußerliche Analogie. Wir wissen sogar ziemlich genau, welches Koagulationsprinzip vorwiegend für die Koagulation dieser Himmelsdispersoide verantwortlich zu machen ist. Es sind hauptsächlich elektrische Koagulationen, die zur Verschmelzung der hochdispersen Wassertropfchen und zur Niederschlagsbildung im wahrsten Sinne des Wortes führen.

Aber noch höher und noch weiter hinaus erstreckt sich die Anwendbarkeit der Kolloidchemie. Ich vermute, daß eine ganze Anzahl von Ihnen das interessante Buch von S. Arrhenius über „Das Werden der Welten“ gelesen hat. Vielleicht werden Sie sich erinnern, daß in den geistreichen Theorien dieses Forschers über die Entstehung der Welt zwei Faktoren eine besonders große Rolle spielen, der Lichtdruck und der überall im Weltenraum vorhandene kosmische Staub. In der Bewegung dieses letzteren kosmischen

Staubes durch den Lichtdruck sieht S. Arrhenius eines der wichtigsten Momente für verschiedene kosmische Erscheinungen, und auch bei der Entstehung neuer Himmelskörper könnte eine durch den Lichtdruck bewirkte Verschiebung und Anhäufung des kosmischen Staubes eine große Rolle spielen. Nun haben K. Schwarzschild und einige andere Physiker berechnet, daß es für die Geschwindigkeit der Fortbewegung solcher kosmischer Teilchen nicht gleichgültig ist, wie groß die letzteren sind. Zu kleine und zu große Teilchen werden langsamer fortbewegt als mittelgroße, und die Rechnung ergibt ein Optimum der Teilchenbeweglichkeit bei einer Größe von etwa $0,16 \mu$. Nun, Sie werden sich wohl erinnern — daß dies ja grade die kolloiden Dimensionen sind, so daß sich also ergibt, daß kolloider kosmischer Staub die günstigsten Bedingungen für die genannten kosmischen Substanzverschiebungen besitzt. Sie haben also auch hier wieder eine Beziehung zwischen Dispersitätsgrad und Eigenschaften, welche, wie so viele andere, ein Maximum gerade im kolloiden Dispersitätsgebiete aufweist. Daß sie auch bei der Entstehung neuer Welten hilft — mehr kann man von der Kolloidchemie eigentlich nicht verlangen!

Kehren wir nun aus diesen hohen Regionen zurück und wenden wir unseren Blick gerade in die entgegengesetzte Richtung. Mineralogie, Geologie, Bodenkunde und Agrikulturchemie sind Wissenschaften, in denen die Kolloidchemie in ganz hervorragendem Maße angewendet wurde, ja in denen sie eigentlich schon lange zu Hause ist. Beginnen wir mit der Mineralogie, so spielen hier natürlich feste kolloide Lösungen die Hauptrolle. Um Ihnen gleich ein besonders hübsches Beispiel eines Minerals zu zeigen, das eine feste kolloide Lösung darstellt, reiche ich Ihnen hier einige Proben des bekannten blauen Steinsalzes herum (Dem.). Man hat lange geschwankt, auf welche Ursachen diese blaue Färbung zurückgeführt werden kann, da die chemische Analyse keinen konstanten Unterschied zwischen farblosem und blauem Salz ergeben hat. Neben organischen Verunreinigungen dachte man ähnlich wie bei den Silberhaloiden an ein blaugefärbtes Natriumsubhaloid usw. Durch neuere, besonders ultramikroskopische und synthetische Versuche können wir aber mit großer Bestimmtheit schließen, daß wir es hier mit einer kolloiden Lösung von Natriummetall in festem NaCl zu tun haben. Zunächst zeigt die ultramikroskopische Untersuchung in allen blauen Proben zahlreiche intensiv gefärbte und mit gewisser Regelmäßigkeit angeordnete kolloide Teilchen, die im farblosen Mineral fehlen.

Sodann aber kann man ein blaues Steinsalz mit einem sehr ähnlichen ultramikroskopischen Bilde künstlich nach H. Siedentopf darstellen auf die folgende Weise: Man schließt in eine Glasröhre gleichzeitig ein Stück farbloses Steinsalz und ein Stückchen Natriummetall ein, evakuiert die Röhre und erhitzt das Ganze bis über den Verdampfungspunkt des Natriums. Das Steinsalz färbt sich dabei gelblich und die ultramikroskopische Untersuchung zeigt, daß wir es hier mit einer molekulardispersen Lösung des Natriummetalls zu tun haben. Dieses gelbgefärbte Präparat erhitzt man nun zum zweiten Male vorsichtig auf bestimmte Temperaturen, kühlt ev. ab und erhitzt wieder usw. — bis man ein rotviolettes und schließlich ein blaues Steinsalz erhält. Dieses „Anlassen“ des gelben Präparates bezweckt natürlich eine Kondensation des zuerst molekulardispersen Metalls zu größeren und speziell kolloiden Komplexen. Es handelt sich also um eine typische Kondensationsmethode. Ich will nur nebenbei erwähnen, daß man genau dieselben Prozeduren — primäre Herstellung einer hoch- ev. molekulardispersen Lösung, Abkühlen und sekundäre Erwärmung zur Herstellung größerer, speziell kolloider Teilchen — anwendet bei der Herstellung des Goldrubinglases, des Ultramarins, vieler organischer Schwefelfarbstoffe, der sog. Leuchtsteine, mancher Stahlorten usw. Kurz erwähnen will ich noch, daß die Farbe des blauen Steinsalzes ganz übereinstimmt mit der Farbe des durch elektrische Zerstäubung erzeugten kolloiden Natriums in organischen Lösungsmitteln⁹⁹⁾, daß durch Bestrahlung mit den verschiedenartigsten Strahlen, z. B. auch durch Radiumstrahlen, analoge Färbungen erzeugt werden können, daß das Vorkommen der blauen Präparate in der Natur vielleicht auf die schwache Radioaktivität der gemeinschaftlich auftretenden Kaliumsalze zurückgeführt werden kann, daß vermutlich noch viele andere Färbungen von Mineralien, wie diejenigen mancher Edelsteine auf kolloide Färbemittel, z. B. kolloide Hydroxyde, zurückzuführen sind¹⁰⁰⁾ usw.

Neben solchen bekannteren Musterbeispielen kolloider Systeme in der Mineralogie gibt es aber auch eine überraschend große Anzahl von Fällen, deren kolloide Natur erst in neuerer Zeit beachtet worden ist. Ja es hat sich ergeben, daß solche verschieden dispersen Zustandsformen von Mineralien so häufig sind, daß man ein systematisches Prinzip auf die Verschiedenheit des Dispersitätsgrades von Mineralien begründen kann. Von dem zu früh verstorbenen österreichischen Mineralogen F. Cornu ist zuerst darauf hingewiesen worden, daß wir eine große Reihe von „Mineralgelen“ in den alten Klassen

der sog. „hyalinen“ und „porodinen“ Mineralien vor uns haben ¹⁰¹⁾. Diese hochdispersen Formen sind so zahlreich, daß F. Cornu zur Aufstellung des sog. „Theorems der Isochemite“ geführt wurde, welches besagt, daß für jedes kristallisierte Mineral ein hochdisperser z. B. auch kolloider Doppelgänger existiert. So kennen wir neben der kristallisierten Kieselsäure, dem Quarz, den Opal, der ein Kieselsäuregel ist und abgesehen vom Wassergehalt und ev. Verunreinigungen die gleiche Zusammensetzung hat. Für das wasserhaltige kristallisierte Eisenoxyd, für den Göthit oder das Brauneisenerz haben wir als hochdispersen Doppelgänger die sog. Stilpnosiderite resp. den gelben Ocker, für das wasserfreie kristallisierte Roteisenerz den Rötel oder roten Ocker, den kristallisierten Sulfiden der Schwermetalle entsprechen die hochdispersen „Schwärzen“ oder „Indigo“, wie Eisenschwärze, Kupferindigo usw.

Aber noch in anderer Hinsicht, in bezug auf die analytische Unterscheidung der einzelnen Mineralien, kann man aus der Dispersoidchemie einige sehr beachtenswerte Lehren ziehen. Ich habe Ihnen hier eine ganze Serie von Mineralien aufgestellt, die alle nur aus Kieselsäure resp. aus Kieselsäure und Wasser bestehen (Dem.). Zunächst haben Sie einige der großen bekannten Quarzkristalle, denen Präparate zur Seite gestellt sind, die aus immer kleineren Kristallchen zusammengesetzt sind. Hier haben Sie z. B. den sog. Chalzedon, der vielleicht nicht einmal mehr mikrokristallinisch ist, hier den sog. Kascholong, für den dasselbe gilt, hier den völlig amorphen glasklaren Hyalith, der schon einige Prozente Wasser enthält, den Kieselsinter, den Opal, der als sog. Weichopal mit 30–40 % Wasser vorkommt, und schließlich das im Laboratorium hergestellte normale Kieselsäuregel. Ich habe Ihnen also hier eine Serie von Kieselsäuremineralien vorgeführt, welche die verschiedensten Dispersitätswerte besitzen, von makroskopischen Kristallen bis zu typisch kolloiden Teilchen. Es ist dies genau eine solche Dispersoidserie, wie ich sie Ihnen z. B. beim Schwefel oder Kochsalz zeigte, und ebenso — und das ist das hier Wichtige — variieren auch bei den Quarzmineralien verschiedenen Dispersitätsgrades die physikalisch-chemischen Eigenschaften in durchaus kontinuierlicher Weise je nach dem Dispersitätsgrad des betreffenden Spezimens. So finden sich Mineralien, von denen man nicht recht weiß, ob man sie noch zu dem kristallinen Quarz oder zu dem mikro- und kryptokristallinen Chalzedon zählen soll, und auch chemische Methoden,

wie etwa die Löslichkeit in Kalilauge, ergeben unscharfe Resultate. Der Kolloidchemiker zeigt nun aber, warum diese analytischen Methoden gelegentlich versagen müssen, und warum derartige dem Systematiker zunächst höchst unerwünschte Übergangsformen zwischen den einzelnen Spezies einer solchen Mineralgruppe auftreten. So geht z. B. aus den Erörterungen unserer zweiten Vorlesung unmittelbar hervor, daß die Löslichkeit von Kieselsäure in Alkalien verschieden sein wird bei verschiedenem Dispersitätsgrade, aber auch stetig variieren wird, wenn sich letzterer stetig ändert. In der vorgeführten Reihe wird also die Alkalilöslichkeit stetig zunehmen vom kristallisierten Quarz bis zum Opal resp. bis zur kolloiden Kieselsäure, und dieser Forderung entspricht auch der tatsächliche Befund der Mineralanalyse. Zum Überfluß kann dieser Schluß auch direkt erhärtet werden durch Experimente, welche W. Michaelis über die Löslichkeit von Quarz in Kalkwasser ausgeführt hat, und in denen er Präparate untersuchte, welchen er in willkürlicher Weise einen verschiedenen Dispersitätsgrad erteilt hatte. So betrug unter bestimmten Versuchsbedingungen die Löslichkeit eines blank polierten Quarzkristalls ca. 1 ‰, die des mattgeschliffenen Kristalls 25 ‰, die von geschmolzenem Quarzglas 1,6 ‰, während bei einem Quarzpulver (hergestellt aus reinstem Bergkristall) von sehr kleiner, aber immer noch mikroskopischer Teilchengröße 12,4 % in Lösung ging, und bei dem höchstdispersen, durch sorgfältiges Schlämmen erhaltenen Quarzpulver (Teilchengröße kleiner als 1 μ) praktisch beliebige Mengen in Lösung und in chemische Verbindung übergeführt werden konnten¹⁰²). Ähnliche Erwägungen gelten für den Wassergehalt der Quarzminerale, der ebenfalls in stetiger Weise zunimmt vom Chalzedon bis zum Opal. Es ist kolloidchemisch einfach notwendig, daß die gebundene Wassermenge zunimmt mit steigendem Dispersitätsgrade, aber andererseits außerordentlich leicht variiert, falls z. B. durch Beimengungen der Dispersitäts- und Hydrationsgrad des Minerals geändert wird. Zusammenfassend können wir also sagen, daß die dispersoidchemische Betrachtungsweise gewisse Mineralgruppen zu „Dispersoidfamilien“ zusammenfaßt, deren Einzelglieder in bezug auf ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften kontinuierlich ineinander übergehen.

Gestatten Sie mir, Ihnen schließlich noch ein besonders interessantes Beispiel für die Anwendung der Kolloidchemie auf ein mineralogisches Problem vorzuführen. Ich denke, daß bei der gestrigen Vorführung der periodischen Niederschlagsbildung in Kolloiden,

den sog. Liesegangschen Ringen, gewiß viele von Ihnen an die Ähnlichkeit dieser Strukturen mit den bekannten Bändern und Streifen gedacht haben, welche wir in so schöner Ausbildung bei den Achaten, dem Bänderjaspis usw. finden. Auch bei manchen Erzen, z. B. bei Golderzen, treten gelegentlich solche Bänderstrukturen auf. In der Tat ist nun diese Analogie nicht nur eine äußerliche, sondern zahlreiche eingehende Untersuchungen der neueren Zeit, insbesondere auch von R. E. Liesegang selbst, haben gezeigt, daß die genannten Laboratoriumspräparate auch in den Einzelheiten durchaus mit den entsprechenden Mineralien übereinstimmen, und daß weiterhin dieselbe Entstehungsweise bei den letzteren höchstwahrscheinlich ist. Es handelt sich also um geologische oder mineralogische Diffusionsprozesse molekular gelöster Stoffe innerhalb von Mineralgelen, speziell wohl innerhalb von Kieselsäure- oder Silikatgelen, wobei z. B. eine periodische Niederschlagsbildung mit einer in dem Gel schon gelösten Substanz eintrat. In anderen Fällen, bei denen die Achatbildung etwa um einen im Innern des Gels gelegenen festen Kern beobachtet wird, kann der Diffusionsprozeß und die periodische Niederschlagsbildung auch in zentrifugaler Richtung erfolgt sein usw. Einzelheiten finden Sie in dem vorliegenden Buche von R. E. Liesegang¹⁰³). Um Ihnen nun zu zeigen, wie täuschend ähnlich solche Achatbildungen im Laboratorium nachgeahmt werden können, habe ich den folgenden Versuch vorbereitet (Dem.): Sie erinnern sich der periodischen Silberchromatniederschläge, die man erhält, wenn man Silbernitrat in eine mit Kaliumbichromat versetzte Gelatinegallerte entweder auf einer Glasplatte oder in einem Reagenrohr hinein diffundieren läßt. Statt solcher ein- oder zweidimensionaler Diffusionen kann man aber auch dreidimensionale in der folgenden Weise anstellen. Man bereitet sich in einem Becherglase eine größere Menge, hier z. B. 500 ccm, der mit Kaliumbichromat versetzten Gallerte, löst die Gallerte nach ihrem vollständigen Erstarren vorsichtig aus dem Becherglas heraus¹⁰⁴) und bringt sie dann in ein etwas größeres Becherglas mit Silbernitratlösung. Die letztere umspült den Gallertklumpen von allen Seiten und diffundiert dementsprechend konzentrisch in ihn hinein. Nach etwa 24 Stunden gießt und spült man das Silbernitrat ab, bringt die Gallerte auf eine Schale und zerschneidet dieselbe vorsichtig mit einem großen und möglichst scharfen Messer (Dem.). Wenn der Versuch gut gelungen ist — es ist dies immer eine etwas aufregende Sache, da man in den Gallertklumpen während des Versuches nicht hineinsehen kann —,

so erscheint die Gallerte wie hier durchzogen von zahlreichen konzentrischen Schichten, die sich bei jedem neuen Schnitt in verschiedener Anordnung zeigen und manchen Achaten frappierend ähnlich aussehen.

Nebenbei und vorgreifend möchte ich bemerken, daß wir derartige periodische Strukturen ja auch zahlreich bei Tieren und Pflanzen vorfinden und daß eine analoge Erklärung ihrer Entstehung nahe liegt. Ich kann Ihnen in der Tat ein zweites Buch von E. Küster vorlegen, welches sich nur mit den biologischen Anwendungen dieser periodischen Niederschlagsbildungen beschäftigt. Wennschon ich nicht gerade sagen will, daß man auf diese Weise die Zeichnung eines Zebras oder eines Tigers gleich kolloidchemisch erklären kann, so besteht doch gar kein Zweifel, daß hier wichtige und weitgehende Analogien zwischen kolloidchemischen und biologischen Phänomenen vorliegen.

Gehen wir über zu geologischen Erscheinungen, so bieten gleich die überaus wichtigen Verwitterungsvorgänge Anlaß zu kolloidchemischen Betrachtungen. Wiederum von F. Cornu wurde darauf hingewiesen, daß die Produkte der Verwitterung kristallisierter Mineralien fast immer Gele oder Gelgemische sind. Aus den Feldspaten entsteht das hochdisperse Kaolin, aus dem Serpentin der Talk, das Brauneisenerz gibt den Raseneisenstein oder gelben Ocker, welcher die Gelbfärbung des Lehms und des Bodens bewirkt usw. Ein besonders scharf umrissenes Beispiel für die Mitwirkung kolloidchemischer Faktoren bei geologischen Prozessen ist die Deltabildung der Flüsse. Sie beruht auf der Koagulation der grobdispersen und insbesondere kolloiden Schwebestoffe, die im Süßwasser des Flusses enthalten sind, durch die Elektrolyte des Meerwassers. Es ist auch ersichtlich, daß diese Koagulation um so schneller und intensiver sein wird, je konzentrierter das Seewasser ist, das mit dem Flußwasser zusammentrifft. In diesem Sinne entspricht dem bekanntlich ungewöhnlich hohen Salzgehalt des Mittelmeers auch die berühmteste Deltabildung, diejenige des Nils.

Auch die Bodenkunde arbeitet wie die Mineralogie mit einer ganzen Reihe verschiedener Dispersoide, wobei aber die höherdispersen Formen und speziell die kolloiden besonders in den Vordergrund treten. Die sog. mechanische Bodenanalyse ist ja nichts anderes als eine Dispersoidanalyse; die grobdispersen Anteile werden durch Sieben, Schlämmen, Sedimentieren und Filtrieren, die kolloiddispersen durch Dialyse und die molekulardispersen Anteile schließ-

lich durch Diffusion voneinander getrennt. Von typischen Kolloiden resp. ihren Gelen im Ackerboden können wir insbesondere vier Arten nennen: die Kieselsäure resp. die kiesel-sauren Salze, das Aluminiumhydroxyd und seine Verbindungen mit der Kieselsäure, das heißt die Tone usw., das Eisenhydroxyd und schließlich die gewöhnlich unter dem Namen Humussäuren zusammengefaßten kohlenstoffreichen Substanzen unbekannter chemischer Zusammensetzung, von denen wenigstens ein Teil sich in unzweifelhaftem kolloiden Zustande befindet¹⁰⁵). Hinzukommen Mikroorganismen wie die Bodenbakterien, die bereits vielfach so klein sind, daß ihre Aufschwemmungen Koagulationsphänomene zeigen¹⁰⁶); ferner die von ihnen und anderen Organismen ausgeschiedenen Schleims-substanzen. Als Bestimmungsmethode des Kolloidgehalts verschiedener Bodenproben ist in neuerer Zeit neben dem dialytischen Verfahren auch die Sorption von Farbstoffen wie Malachitgrün usw. verwendet worden. Im Laufe der Zeit ist nun die Rolle der kolloiden Bodensubstanzen immer stärker betont, ja gelegentlich sogar übertrieben worden, indem man den Ausspruch hörte, „daß die Fruchtbarkeit eines Bodens im direkten Verhältnis stünde zu seinem Kolloidgehalt“. Daß diese extreme Folgerung irrtümlich ist, geht am besten daraus hervor, daß eine ganze Reihe von Meliorationsmethoden von Böden darin besteht, daß man die Bodenkolloide zur Koagulation bringt, um die optimale „Krümelstruktur“ zu erreichen. Auf eine solche Koagulationswirkung ist jedenfalls der bekannte günstige Einfluß des Frostes auf den Ackerboden zurückzuführen, bei dem, wie der Laboratoriumsversuch zeigt, Gele gebildet werden, die dem Boden einen Teil seiner „Speckigkeit“ nehmen. In gleicher Weise wirkt das namentlich früher vielfach angewendete „Brennen“ des Bodens, ferner aber insbesondere die Behandlung mit den schon in kleinen Konzentrationen stark koagulierenden Salzen wie mit Kalziumsulfat. Alle diese Methoden wirken nicht nur dispersitätsvergrößernd auf die Bodenkolloide, sondern sie reduzieren gleichzeitig das zu hohe Quellungsvermögen mancher Böden, das in der Tat das Charakteristikum „speckiger“ Proben ist. Aus allem diesen geht hervor, daß ein übertrieben großer Kolloidgehalt jedenfalls nicht die optimale Bedingung für das Pflanzenwachstum darstellt.

Auf der anderen Seite steht es aber außer Zweifel, daß die Kolloide nicht nur eine wichtige, sondern direkt eine integrierende Rolle für die Fruchtbarkeit eines Bodens spielen. Dies war schon den alten Agrikulturchemikern wohlbekannt und geht ja unmittelbar aus

der Tatsache hervor, daß sandige oder körnige Böden beliebiger chemischer Zusammensetzung ohne Kolloidgehalt unfruchtbar sind. Es lassen sich auch sofort einige Punkte anführen, welche für die Wichtigkeit eines mittleren Kolloidgehalts im Ackerboden sprechen. Zunächst ist es klar, daß der Wassergehalt eines Bodens weitgehend reguliert wird durch das Vorhandensein hydrationsfähiger Bodenkolloide. Durch Sand oder überhaupt grobdispersen Boden läuft das Regenwasser leichter ab und wird das Grundwasser schwieriger und zu geringeren Höhen hinaufgezogen als durch einen kolloidreichen Ackerboden. Durch diese beiderseitige Fixierung des Wassers in der Erdoberfläche wird eine der wichtigsten Bedingungen für das Pflanzenwachstum geschaffen. Sodann aber ist die Sorptionsfähigkeit der Bodenkolloide für gelöste Substanzen von ganz besonderer Bedeutung für das Pflanzenwachstum. Wir können insbesondere zwei Gruppen von agrikulturchemisch wichtigen Sorptionsprozessen unterscheiden: einmal die Sorptionen der von den Pflanzen benötigten Nahrungsstoffe, andererseits die Sorptionen der den Pflanzen schädlichen, von vornherein im Boden befindlichen Stoffe oder aber von ihnen selbst ausgeschiedenen Stoffwechselprodukte. Die günstige Wirkung der sorptiven Entfernung und Bindung letzterer Stoffe ist einleuchtend; in der Tat gedeihen Wasserkulturen besser, wenn man ihnen irgendwelche hochdisperse Pulver oder Kolloide, wie Kohle, Eisenhydroxyd, Kieselsäure usw. zusetzt. Auf der anderen Seite ergibt sich aber, daß die Sorptionswirkung der Bodenkolloide auf die Nährstoffe der Pflanzen sowohl günstig als auch ungünstig wirken kann, entsprechend nämlich der Konzentration der vorhandenen Nährstoffe als auch der Intensität der Sorption, welche letztere in erster Annäherung gleichsinnig mit der sorbierenden Oberfläche, d. h. gleichsinnig mit dem Kolloidgehalt steigen wird. Günstig kann eine Sorption der Bodenkolloide dann wirken, wenn die betreffenden Nährstoffe nur in relativ kleinen Konzentrationen vorhanden sind, durch die Bodenkolloide dann gesammelt und der Pflanze auf diese Weise in größerer Menge zur Verfügung gestellt werden. Ungünstig kann aber diese Sorptionswirkung werden einmal dadurch, daß die Anreicherung der Nährstoffe bis zu einer superoptimalen Konzentrierung führt — das gilt speziell für die Salze — oder aber dadurch, daß die Nährstoffe zu fest in der sorbierenden Oberfläche festgehalten werden, als daß sie von den Pflanzenwurzeln in optimaler Menge und Geschwindigkeit aufgenommen werden könnten. So beruht die günstige

Wirkung eines Zusatzes von Kalksalzen bei der Verabfolgung von Düngerphosphaten wohl zum größeren Teile auf der koagulierenden Wirkung der ersteren, die einer sorptiven Bindung der Phosphorsäure durch die Bodenkolloide entgegenarbeitet. Diese ungünstigen Wirkungen treten jedenfalls ein, wenn der Boden zuviel Kolloidsubstanzen enthält, und so ergibt sich aus diesen allgemeinen Gleichgewichtsbetrachtungen in der Tat dasselbe Resultat, was die Praxis gefunden hat: Unter analogen Bedingungen ergibt ein mittlerer Kolloidgehalt die maximale Fruchtbarkeit eines Bodens; dieser mittlere Kolloidgehalt kann verschiedene Werte haben, je nach der verschiedenen Konzentration der vorhandenen Nährstoffe, d. h. je nach der chemischen Zusammensetzung des Bodens und natürlich je nach den individuellen Bedürfnissen verschiedener Pflanzen. Ich glaube, daß diese Konstatierung den überaus zahlreichen und sich anscheinend vielfach widersprechenden Untersuchungen über die Beziehung zwischen Bodenkolloiden und Fruchtbarkeit am besten Rechnung trägt.

Nur andeutungsweise möchte ich kurz auf die interessanten chemischen Folgereaktionen von Sorptionsprozessen hinweisen, wie wir sie in den sog. Sorptionszersetzungen vielfach bei den Bodenkolloiden finden. Schon J. M. van Bemmelen zeigte, daß Gele aus Kaliumsulfatlösungen nur die Kaliumionen, nicht jedoch die Sulfationen sorbierten, so daß in der Sorptionsflüssigkeit freie Schwefelsäure nachgewiesen werden konnte. Solche spezifische Sorptionserscheinungen, die erhebliche sekundäre chemische Änderungen zur Folge haben können, spielen zweifellos eine große Rolle in der Dynamik des Bodens. —

Meine Herren, ich habe schon den größten Teil der mir zur Verfügung stehenden Zeit verbraucht und komme jetzt erst zu einem wissenschaftlichen Anwendungsgebiet der Kolloidchemie, das vielleicht das größte und interessanteste von allen ist: die Anwendungen der Kolloidchemie in Biologie und Medizin¹⁰⁷). Die Kolloidchemie ist das gelobte Land der biologischen Wissenschaften, und es ist für einen begeisterten Kolloidforscher beinahe schwierig, nicht Poesie zu reden, wenn er auf dieses Anwendungsgebiet zu sprechen kommt. Sie wissen, daß die chemischen Elementarbedingungen der organisierten Substanz gekennzeichnet werden durch die Begriffe: Eiweiß, Lipoide, Salze und Wasser. Die physikalischen und physikalisch-chemischen Grundbedingungen der lebenden Sub-

stanz können aber nach dem heutigen Stande der Wissenschaft nicht genauer und konziser zusammengefaßt werden als durch den Satz: alle Lebenserscheinungen spielen sich ab in einem kolloiden System. Der kolloide Zustand ist eine integrierende Vorbedingung für das Auftreten biologischer Erscheinungen, oder vielleicht richtiger: Wir bezeichnen nur solche Gebilde als Organismen, an denen wir den kolloiden Zustand unter allen Umständen nachweisen können.

Es ist selbstverständlich, daß bei einer derartig engen Verknüpfung von Kolloidchemie und Biologie die Menge von biologischen Einzelanwendungen kolloidchemischer Gesetzmäßigkeiten ganz unermesslich groß ist. Denn da Organismen spezielle Fälle kolloider Systeme sind, kann es logischerweise ja gar kein biologisches Problem geben, in dem die Kolloidchemie nicht in irgendeiner Weise beteiligt ist. Die kolloidchemische Betrachtungsweise durchdringt die Biologie von der kausalen Morphologie oder Formbildungslehre bis zur chemischen Physiologie. Der Bakteriologe wie der praktische Arzt, der Entwicklungsmechaniker wie der Pflanzenphysiologe — alle sind interessiert an der Kolloidchemie und ihrer weiteren Entwicklung. Die Kolloidchemie wird wie kaum eine andere Wissenschaft gebraucht von den biologischen Disziplinen, sie ist ihnen keine unerwartet gekommene Gabe, sondern von alters her haben die Biologen selbst versucht, die reine Kolloidchemie zu fördern eben um ihrer Anwendungen willen. Nichts kann vielleicht besser die engen Beziehungen zwischen diesen beiden Wissenschaften demonstrieren als die Tatsache, daß eine große Anzahl von Kolloidchemikern aus der Biologie oder durch die Biologie hindurch in die reine Kolloidchemie eingetreten ist. Ich brauche nur an die Namen A. Fick, C. Ludwig, F. Hofmeister, Wo. Pauli, F. Bottazzi usw. zu erinnern. Und auch die neuere Kolloidchemie verdankt ihre rapide und großartige Entwicklung nicht zum wenigsten dem großen Interesse und der eifrigen Mitarbeit biologischer Kolloidchemiker.

Ich muß mit großer Willkür vorgehen, wenn ich Ihnen aus dem Reichtum biologischer Anwendungen der Kolloidchemie einige Proben hier vorführe. Fragen wir uns zunächst, auf welche Weise man den kolloiden Zustand der lebenden Substanz nachweisen oder erkennen kann. Zunächst ergibt die vorsichtige chemische Analyse als die unmittelbaren Bausteine der organisierten Substanz Eiweißstoffe und Lipide. Es ist Ihnen aber in den früheren Vorlesungen

wohl genügend oft berichtet und gezeigt worden, daß speziell die Eiweißkörper zu den typischen kolloiden Substanzen, im besonderen zu den hydratisierten Emulsoiden gehören. Die Tatsache, daß unzählige Kolloidversuche mit frischem Eieralbumin, Blutserum oder Muskelpreßsaft angestellt worden sind, zeigt, daß der kolloide Zustand dieser Lösungen auch im lebenden Organismus vorhanden ist und nicht etwa erst bei der chemischen Analyse entsteht. Außerdem können Sie aber Koagulationsversuche mit genau den gleichen Versuchsbedingungen und Resultaten an lebenden Zellen oder Organen, z. B. an den Geißeln der Bakterien, anstellen, die grundsätzliche Übereinstimmung mit dem entsprechenden Verhalten von Eiweißlösungen im Reagensglas abgeben. Schließlich können Sie aber auch — und dies erscheint beinahe als der einfachste Weg — lebende Substanz unter dem Ultramikroskop untersuchen, wobei allerdings meist nur kurze Beobachtungszeiten erlaubt sind, da das intensive Licht den Organismus meist unter Koagulationserscheinungen bald abtötet. Betrachtet man nun z. B. das farblose Plasma einer Algenzelle¹⁰⁸), so erkennt man auf dem dunklen Hintergrunde ein Gemisch zahlreicher und verschieden großer Teilchen, von denen ein großer Anteil die für kolloide Teilchen typischen Bilder gibt. Von besonderem Interesse ist aber, daß zahlreiche dieser Teilchen in lebhaftester Bewegung, ja in Form- resp. Größenwechsel begriffen sind: Es nähern sich Teilchen, stoßen sich wieder ab, vereinigen sich zu größeren, verschwinden völlig, kurz, derjenige, der zum ersten Male das Ultrabild einer solchen lebenden Zelle sieht, kommt vielleicht zu der Meinung, daß das „eigentliche“ Leben einer solchen Zelle sich erst im ultramikroskopischen d. h. kolloiden Dimensionsgebiet abspielt. Hierin ist er allerdings teilweise im Irrtum; die Bewegung der kolloiden Teilchen ist tatsächlich nichts anderes als die schon besprochene Brownsche Bewegung in Solen, und das Plasma solcher Zellen ergibt sich ultramikroskopisch als ein Gemisch von Hydrosolen und Dispersionen des verschiedenartigsten Dispersitätsgrades. Dieser Befund stimmt offenbar völlig überein mit dem Resultat der chemischen Analyse, und ebenfalls besteht kein Widerspruch zwischen diesem Schluß und dem schon früher erwähnten Befund, daß die ultramikroskopische Analyse wegen zu starker Hydratation der Biokolloide gelegentlich versagt.

Man kann nun fragen, ob dieses Hydrosolgemisch in der Form vorliegt, daß in einem wäßrigen Dispersionsmittel unmittelbar nebeneinander z. B. Albumin- und Lipoidteilchen herumschwimmen, oder

ob vielleicht noch irgendeine sekundäre Anordnung und Verknüpfung etwa von gleichartigen Kolloidteilchen zum Beispiel zu mikroskopischen Strukturen möglich ist. Es ist den Biologen unter Ihnen ja wohl bekannt, daß man vielfach derartig höhere Verbände von Teilchen, Netz- oder Wabenstrukturen usw., im lebenden Plasma sieht, ja daß einige Autoren, wie z. B. O. Bütschli, solche subkolloide Strukturen für ein ganz regelmäßiges Charakteristikum der lebenden Substanz ansehen. Gibt es für das Auftreten solcher mikroskopischer Strukturen — wohl gemerkt im lebenden Plasma! — eine kolloidchemische Erklärung oder Laboratoriumsanalogie? Das ist in der Tat so. Von M. Beijerinck ist die hochinteressante Tatsache gefunden worden, daß sich z. B. Gelatine- und Stärkelösungen in bestimmten Konzentrationen nicht zu einem kolloiddispersen Hydrosolegemisch mit unveränderter Teilchengröße vermischen, sondern daß sich das eine Kolloid in Form mikroskopischer Tröpfchen im anderen beim Zusammengießen verteilt, und daß das Gemisch auf diese Weise die verschiedenartigsten Netz- und Wabenstrukturen annehmen kann. Dieser Versuch ist offenbar eine weitgehende Analogie zu dem Verhalten des lebenden Plasmas, wie es durch die mikro- und ultramikroskopische Untersuchung festgestellt wird.

Eine der meistdiskutierten Fragen der allgemeinen Biologie, welche durch die sinngemäße Anwendung der Kolloidchemie eine, man möchte fast sagen, außerordentlich einfache Klärung gefunden hat, ist die Frage nach dem Aggregatzustand der lebenden Substanz. Ist das Plasma fest oder flüssig? Auch hier hat es sich, wie schon so oft in der Wissenschaftsgeschichte, gezeigt, daß die Fragestellung falsch war. Das Plasma ist weder fest noch flüssig, falls man es mit typischen festen oder flüssigen Körpern vergleicht. Seine physikalischen Besonderheiten sind vie mehr diejenigen eines hydratisierten Emulsoids von allen Stadien der Viskosität, zwischen dem Werte einer normalen tropfbaren Flüssigkeit und dem eines starren Gels mit den Eigenschaften fester Körper. Genau so wie eine Gelatinelösung je nach der Konzentration und Temperatur alle Übergänge zwischen fest und flüssig zeigen kann, finden wir auch das Plasma in entsprechenden Zwischenstadien. Genau so wie etwa eine verdünnte Gelatinegallerte — und das eigentliche lebende Plasma ist ein solches verdünntes Kolloid, wie wir noch sehen werden —, genau wie eine solche Gallerte in der merkwürdigsten Weise die Eigenschaften flüssiger und fester Körper in sich vereinigt, ge-

nau so zeigt auch die lebende Substanz Erscheinungen, die bald mit den Eigentümlichkeiten von Flüssigkeiten und bald mit denen fester Körper übereinstimmen. Wir finden z. B. Plasmaströmungen, die Bildung kugelförmiger Vakuolen, Pseudopodienbildung, ein abgetrennter Plasmotropfen nimmt Tropfenform an und zeigt auch in anderer Hinsicht Kapillaritätsphänomene¹⁰⁹). Dies sind Eigenschaften, die man als charakteristisch für Flüssigkeiten ansieht. Auf der anderen Seite finden wir eine gewisse Plastizität und Formbeständigkeit, wie wir sie ähnlich nur an festen Körpern kennen. Eine z. B. durch Druck deformierte Amöbe pflegt zwar allmählich ihre ursprüngliche mehr oder weniger tropfenartige Form wieder anzunehmen, doch braucht sie hierzu häufig ganz beträchtlich viel Zeit. Oder man kann durch schwache, aber langanhaltende Druck- und Zugwirkungen z. B. den Furchungszellen eines Froschies eine fremde nichtkugelförmige Gestalt geben, die sie nachher noch stundenlang behalten. Hinzu kommt noch, daß der Zustand der lebenden Substanz anscheinend unaufhörlich variiert zwischen den Extremen des festen Gels und des flüssigen Sols. Solche in beiderseitigem Sinne verlaufende Umwandlungen treten sehr wahrscheinlich auf bei der amöboiden Bewegung, sie bilden das Grundphänomen für das Auftreten und Verschwinden der zahllosen Strukturen während des Lebens einer Zelle usw. Der deutsche Forscher L. Rhumbler, der in mustergültiger Weise die physikalischen Besonderheiten der lebenden Substanz studiert hat, kommt zu dem Schlusse, daß nur eine besondere disperse Struktur, die er die „Spumoidstruktur“ nennt, diese merkwürdige Kombination physikalischer Eigenschaften erklären kann. Er hebt aber dabei selbst hervor, daß diese Struktur durchaus von derselben Art sein muß wie diejenige der hydratisierten Emulsoide. Die Physik des Protoplasmas ist in der Tat eine Physik hydratisierter Emulsoide.

Im engsten Zusammenhange mit den physikalischen Besonderheiten der lebenden Substanz steht ihr großer Wassergehalt. Es ist keineswegs allgemein bekannt, wie außerordentlich hoch die Beträge des Wassers in der funktionsfähigen organisierten Substanz zu sein pflegen. So bestehen wir selbst zu mehr als der Hälfte unseres Körpergewichts aus Wasser, und es gibt z. B. Meeresalgen oder Quallen, die mehr als 96 % Wasser enthalten. Es ist gewiß überaus bemerkenswert, daß solche Organismen nicht nur ihre Form erhalten können, sondern dazu noch sich bewegen, schwimmen, fressen, lieben können — und das alles mit 96 % Wasser im Leibe!

Alles dieses ist nur möglich durch die Kolloidchemie! Denn nur kolloide Systeme, nämlich nur die Gallerten, besitzen die Eigentümlichkeiten der Formbeständigkeit usw. gleichzeitig mit einem Wassergehalt von 96 und mehr Prozent. Und es erscheint eigentlich fast selbstverständlich, daß auch die Frage nach den Ursachen dieser Wasserbindung, die Frage nach den Kräften, welche den Wassergehalt eines Organismus bestimmen und regulieren, ein Problem der Kolloidchemie ist. Es ist Ihnen wohl bekannt, daß man namentlich in der Blütezeit der klassischen physikalischen Chemie der Lösungen andere nichtkolloidchemische Kräfte für die Erklärung der Wasserbindung und Wasserbewegung im Organismus herangezogen hat, nämlich die osmotischen. Man nahm an, daß die Zellmembranen, wie wir sie in den Geweben höherer Organismen finden, als osmotische Membranen wirkten, indem sie z. B. manchen Salzen nur schwierig den Durchtritt gestatteten und auf diese Weise eine osmotische Wasserbewegung in die Zelle und damit einen Zellturgor hervorriefen. Die neuere Entwicklung der Zellphysiologie hat nun immer deutlicher gezeigt, daß die Rolle dieser osmotischen Effekte jedenfalls früher erheblich überschätzt worden ist, und daß es beinahe seltene Fälle sind, in denen eine vollständige Übereinstimmung zwischen den Gesetzen des osmotischen Druckes und denen der Wasserbewegung in Zellen beobachtet werden kann. Wenschon ich nicht die etwas extreme Meinung vertreten möchte, daß osmotische Vorgänge überhaupt keine Rolle bei der Wasserabsorption der Organismen spielen, so muß doch eine vorurteilsfreie Betrachtung der Tatsachen zu dem Schluß gelangen, daß neben oder richtiger über dem osmotischen Druck ganz andere Kräfte den Wassergehalt eines Organismus bestimmen. Es sind nicht die osmotisch wirksamen molekulardispersen Bestandteile einer Zelle, also speziell die Salze, sondern vielmehr die Plasmakolloide, die für den Wassergehalt eines Organismus und seine Änderungen in erster Linie verantwortlich erscheinen.

Wie gesagt, erscheint diese Schlußfolgerung, die in besonders ausgeprägter Form zuerst von dem Deutschamerikaner Martin H. Fischer gezogen und diskutiert worden ist¹¹⁰⁾, hinterher als fast selbstverständlich. Denn wir wissen ja aus Laboratoriumsversuchen mit dem Organismus entnommenen Emulsoiden nicht nur, daß diese letzteren die abnorm großen Mengen von Wasser ebenso zu binden vermögen, wie wir es im Organismus selbst sehen, sondern

wir wissen auch, daß dieses Wasserbindungsvermögen, gemessen z. B. durch die Viskosität, von den allerverschiedenartigsten und scheinbar geringfügigsten Ursachen modifiziert werden kann. Speziell der Einfluß von Elektrolyten, von Säuren, Basen und Salzen ist ein derartig großer, daß durch Variationen dieser Zusätze innerhalb der im biologischen Geschehen normalen Konzentrationsgrenzen ganz erhebliche Schwankungen im Wassergehalt entstehen können. Ich möchte diesen Satz durch ein Beispiel erhärten: Wie ich Ihnen bereits zeigte, erhöhen Säuren in mässigen Konzentrationen sehr wesentlich das Wasserbindungsvermögen von Gelatine, Fibrin, Eiweiß usw. Dieser Einfluß des H-Ions ist aber so enorm groß, daß bereits die schwache Kohlensäure einen deutlich quellungsfördernden Einfluß auf Gelatineplatten ausübt, wie Wo. Pauli und R. Chiari gezeigt haben. Bestimmt man die Wasseraufnahme zweier Gelatineplatten, von denen die eine in frisch destilliertem Wasser, die andere in destilliertem Wasser gequollen ist, das durch Stehen in der Luft etwas Kohlensäure aufgenommen hat, so erhält man im letzteren Falle höhere Quellungswerte. Derartige Quellungserscheinungen können also direkt als Indikatoren für H-Ion benutzt werden, und es ist ersichtlich, wie außerordentlich leicht durch den Chemismus der biologischen Vorgänge Veränderungen in den Bedingungen für die Wasserabsorption der Biokolloide entstehen können. Wir kommen hierauf noch zurück.

Neben diesen allgemeinen strukturellen und physikalischen Besonderheiten der lebenden Substanz, welche durch die kolloidchemische Betrachtungsweise erklärt oder neu beleuchtet werden, ergeben sich aber auch weiterhin enge Beziehungen zwischen den chemischen und physikalisch-chemischen biologischen Grundphänomenen und der Kolloidchemie. Es ist z. B. oft die Frage aufgeworfen worden, wie es möglich ist, daß in einem vorwiegend aus Flüssigkeit bestehenden Gebilde so vielerlei Stoffe nebeneinander bestehen, so viele Reaktionen nebeneinander verlaufen können, ohne daß völlige Vermischung und Unordnung entsteht. Nun zeigen aber die oben erwähnten Versuche mit Kolloidgemischen, daß zwei kolloide Stoffe, obschon sie in demselben Dispersionsmittel zerteilt sind, sich keineswegs völlig vermischen müssen, sondern in mikroskopischer Tröpfchenform nebeneinander bestehen können. Die große Mannigfaltigkeit der mikroskopischen und ultramikroskopischen Strukturen in der organisierten Substanz legt die Folgerung nahe, daß auch die verschiedenen chemischen Bestandteile des Plasmas, speziell

solche in kolloidem Zustande, sich in analoger Weise unvermischt erhalten können. Wie F. Hofmeister in ansprechender Weise ausgeführt hat, kann man sich geradezu vorstellen, daß die einzelnen Tröpfchen und Wabenräume, oder vielleicht richtiger: die verschiedenen Arten solcher Tröpfchen jede für sich eine Art von kleinen Speziallaboratorien darstellen, in denen ungehindert von der Umgebung nur eine oder einige Reaktionen ausgeführt werden. Eine derartige Lokalisation chemischer Vorgänge innerhalb eines solchen Gemisches verschiedener Zerteilungen würde auch noch begünstigt werden dadurch, daß ein großer Teil der reagierenden Stoffe und der Reaktionsprodukte selbst kolloid ist, mit anderen Worten, sich nicht selbsttätig vermischt oder diffundiert.

Aber noch in anderer Hinsicht spielt der kolloide Zustand eine große Rolle in der Chemie der lebenden Substanz. Ich habe wiederholt hervorgehoben, daß Sorptionsprozesse in kolloiden Systemen eine besonders große Rolle spielen müssen und daß speziell viele Erscheinungen der Katalyse Folgeerscheinungen solcher Konzentrationserhöhungen in Grenzflächen sind. In diesem Sinne bietet natürlich ein Kolloidgemisch von der Art des Plasmas ganz hervorragend günstige Bedingungen für das Auftreten von durch Sorptionskatalyse beschleunigten oder eingeleiteten chemischen Reaktionen. So ist es denn auch nicht verwunderlich, daß jene Substanzen, die man neben Wasser, Salzen, Lipoiden und Eiweiß zu den integrierenden Bestandteilen der organisierten Substanz zählen kann, die Fermente, in überwiegender Mehrzahl selbst im kolloiden Zustand auftreten. Die lebende Substanz ist geradezu ein Tummelplatz für Sorptions- und Kolloidkatalysen.

Gestatten Sie, daß ich nach diesem kolloidchemischen Überblick über die allgemeinsten physikalischen und physikalisch-chemischen Kennzeichen der organisierten Substanz noch über eine Reihe speziellerer biologischer Probleme kurz Revue passieren lasse, bei denen die kolloidchemische Betrachtungsweise aufklärend oder befruchtend gewirkt hat. Die Auswahl muß notwendigerweise willkürlich sein, und ebenfalls kann ich nur in oberflächlichster Weise die einzelnen Gegenstände berühren. Für nähere Auskunft muß ich Sie auf die Spezialliteratur verweisen¹¹¹⁾.

Bereits bei den ersten biologischen Prozessen, die zur Entstehung eines neuen Organismus führen, bei den Befruchtungs- und Entwicklungserscheinungen z. B. tierischer Eier, finden wir Fälle, in denen die Kolloidchemie auch bei relativ speziellen Fragen

aufklärend wirkt. Es ist Ihnen vielleicht bekannt, daß z. B. in einem Seeigeli, gleichgültig ob es sich um sexuelle Befruchtung oder um die sog. künstliche Entwicklungserregung handelt, der Anstoß der Entwicklung morphologisch durch die Bildung sog. Astrosphären gekennzeichnet wird. Es entstehen Strahlungen von verdichtetem Plasma, entweder um den Kern der befruchteten Zelle herum oder aber an den verschiedensten Stellen des Plasmas, wobei im späteren Verlauf diese Strahlungen als Zentren für den Zerfall der Eizelle in Tochterzellen erscheinen. Einzelheiten muß ich hier übergehen; bei aller Variabilität von Einzelheiten ist diese Astrosphärenbildung eine der durchaus konstanten Begleiterscheinungen der Befruchtung und Zellteilung des Eies. Nun ergibt die nähere Betrachtung unzweifelhaft, daß diese Astrosphärenbildung eine spezielle Form der Koagulation der Plasmakolloide darstellt. Die einfache mikroskopische Betrachtung zeigt schon, daß es sich um eine lokalisierte Ansammlung von wasserärmerem und gröber strukturiertem Plasma handelt und die Tatsache einer solchen Sol-Gelumwandlung wird über jeden Zweifel erhoben durch den Befund, daß sich bei der Mikrotomie solcher Zellen, d. h. bei ihrer Zerlegung z. B. mit feinen Glasnadeln, diese Astrosphären als kleine Klümpchen von relativ fester Konsistenz aus dem viel flüssigeren Eiplasma heraussondern lassen (G. L. Kite). Die hieraus sich ergebende Schlußfolgerung, daß dieser wichtige Teilvorgang der Befruchtung ein Koagulationsprozeß ist, wird aber noch auf ganz anderen Wegen bestätigt. Diejenigen unter Ihnen, welche den berühmten Untersuchungen des Deutsch-amerikaners Jacques Loeb und anderer Forscher über die künstliche Entwicklungserregung gefolgt sind, werden wissen, daß unbefruchtete Eier z. B. von Seeigeln oder Seesternen auf die aller-verschiedenartigste Weise zur Entwicklung angeregt werden können. Neben Behandlung mit Säuren und Basen, mit spezifischen Ionen oder aber auch einfach mit wasserentziehenden Neutralsalzlösungen, finden wir Entwicklungsmethoden durch kurze Behandlung mit hohen oder aber auch tiefen Temperaturen, durch Behandlung mit anderen Kolloiden, wie mit dem Serum höherer Organismen, durch Behandlung mit organischen Flüssigkeiten wie mit Benzol und Toluol, ja nur durch mechanische Behandlung wie Schütteln, Reiben, Bürsten usw., gelangen die unbefruchteten Eier mancher Organismen zur Entwicklung. Was ist nun das gemeinsame Agens dieser so überaus heterogenen Methoden? Wenn Sie sich an das erinnern, was ich Ihnen in der gestrigen Vorlesung über die Variabilität des kollo-

iden Zustandes unter dem Einfluß schon der geringfügigsten Faktoren gesagt habe, so erscheint es klar, daß alle diese Behandlungsmethoden zu kolloiden Zustandsänderungen, speziell zu Koagulationen der Biokolloide führen können. In der Tat kann man aber auch im einzelnen nachweisen, daß sämtliche aufgezählte und noch weitere nicht genannte Methoden zur Entwicklungserregung auch zur Koagulation von Eiweißsolen im Reagensglas benutzt werden können, und daß umgekehrt kaum eine Art von Eiweißfällungsmethoden bekannt ist, die bei geeigneter Anwendung nicht auch zur Entwicklungserregung führt¹¹²⁾. Schließlich aber wird diese Koagulationstheorie der Befruchtungsvorgänge noch besonders

schön unterstützt durch die Tatsache, daß es auch möglich ist, experimentell in Kolloiden und Kolloidgemischen durch lokale orientierte Koagulationsprozesse Strukturen hervorzubringen, die auf das verblüffendste mit den in der Eizelle beobachteten übereinstimmt. Ich zeige Ihnen hier ein paar Bilder solcher künstlicher Astrosphären, wie sie insbesondere von O. Bütschli in Kolloidgemischen hergestellt wurden, lange bevor die

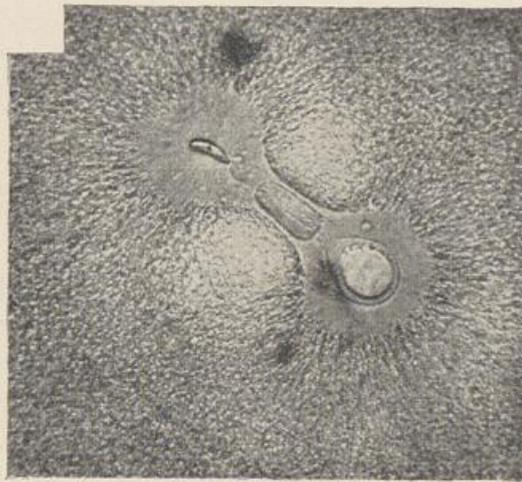


Fig. 29.

skizzierte kolloidchemische Befruchtungstheorie aufgestellt worden ist (Fig. 29). Die Biologen unter Ihnen werden gewiß die außerordentliche Ähnlichkeit zwischen diesen künstlichen und den natürlichen Strukturen anerkennen. Der die Entwicklung einleitende primäre Vorgang ergibt sich also als ein kolloidchemischer Prozeß der Sol-Gelumwandlung. Natürlich bitte ich Sie, mich nicht insofern mißzuverstehen, als ich keineswegs die Meinung vertrete, daß dieses Kolloidphänomen den Vorgang der Entwicklungserregung erschöpfend erklärt. Selbstverständlich begleiten sehr verschiedene chemische Prozesse, z. B. eine gesteigerte Oxydation, diesen Vorgang. Letztere treten jedoch erst sekundär in Erscheinung, nachdem die beschriebene kolloide Zustandsänderung den Anfang gemacht hat; der Anstoß der Entwicklung ist ein kolloidchemischer.

Bei den Wachstumserscheinungen sprechen andererseits Quellungsphänomene sehr wahrscheinlich eine wichtige Rolle. Analysiert man z. B. sich entwickelnde Kaulquappen, so findet man die Gewichtsvermehrung bis zur Metamorphose der Kaulquappen zu Landtieren in ganz überwiegender Weise bestritten durch eine

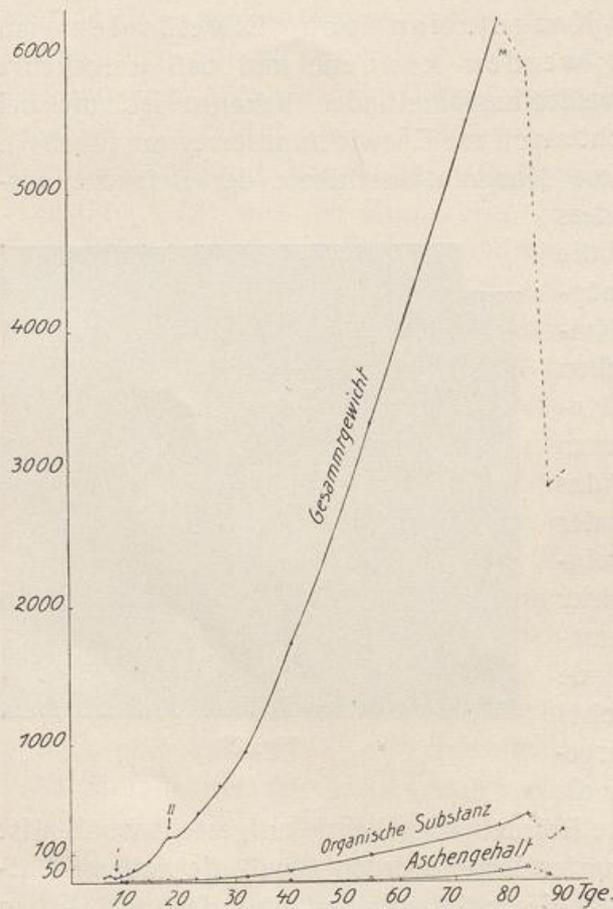


Fig. 30.

Gewichtsvermehrung wachsender Kaulquappen nach C. Schaper.

exzessive Wasseraufnahme; wie beistehende Kurvenzeichnung zeigt, ist die gleichzeitige Vermehrung fester Substanzen so gering, daß eine Kaulquappe vor dem Anlandkriechen aus ca. 93 % Wasser besteht (Fig. 30) ¹¹³). Ähnliches gilt für wachsende Pflanzenteile. Eine Differenz in den osmotisch wirksamen Bestandteilen der Larven, welche diese größere Wasserabsorption erklären könnte, ist nicht bekannt. Wohl aber weiß man, daß manche wachsende Pflanzenteile eine saure Reaktion zeigen. Wie erwähnt, steigern aber Säuren schon in kleinsten Konzentrationen das Wasserbindungsvermögen vieler Kolloide, ein deutlicher Hinweis auf die

Rolle der Quellungsvorgänge bei diesen Prozessen. Wird der Frosch zum Landtier, so verliert er beträchtlich Wasser. Auch dies ist kolloidchemisch erklärlich, da ich Ihnen schon früher mitteilte, daß ein Gel z. B. gegenüber Wasserdampf ein anderes, niedrigeres Quellungs-gleichgewicht besitzt als gegenüber flüssigem Wasser. Ebenfalls sehr plausibel vom kolloidchemischen Standpunkte erscheint die Tatsache, daß

Wüstenpflanzen häufig eine saure Reaktion zeigen, ein Umstand, der nicht nur eine relativ reichlichere Wasserabsorption, sondern auch einen entsprechend stärkeren Schutz gegen Austrocknen gestattet. Auch die täglichen periodischen Reaktionsänderungen in Pflanzen wirken wohl in analogem Sinne.

Ein anderes Problem, zu dessen Lösung schon seit langer Zeit kolloidchemische Ansätze gemacht worden sind, ist das Problem der Muskelkontraktion. Ich kann nicht mehr auf Einzelheiten eingehen, sondern will nur hervorheben, daß sich die elektrischen, chemischen, mechanischen, optischen usw. Einzelvorgänge immer deutlicher zu einer kolloidchemischen Theorie haben zusammenfassen lassen¹¹⁴). Als das Hauptmoment erscheint hierbei eine Wasserverschiebung zwischen den Strukturelementen der kontraktile Substanz resp. der sie aufbauenden Kolloide, die bewirkt wird durch die lokale Produktion von Säuren (vermutlich besonders von Milchsäure) an den Grenzflächen der Strukturelemente. Auch hier kommt also der so weit verbreitete und so außerordentlich mächtige Einfluß des H-Ions auf das Wasserbindungsvermögen der Biokolloide zum Vorschein. Daß auch rein äußerlich Quellungserscheinungen die Geschwindigkeiten und den Umfang zeigen können, wie wir sie für eine kolloidchemische Theorie der Muskelkontraktion brauchen, habe ich Ihnen gestern an der Quellung der Kautschukfolie und der Gelatineblättchen zu zeigen versucht. Ebenfalls berichtete ich Ihnen schon bei Besprechung der reinen Quellungsprozesse, daß durch die Quellung Beträge mechanischer Energie geliefert werden können, die derjenigen des Muskels zum mindesten gleichkommen.

Aus den zahllosen weiteren Problemen der Physiologie, die einer Anwendung der Kolloidchemie zugänglich erscheinen, möchte ich hier nur noch eins mit kurzen Worten kennzeichnen: das Problem der Sekretion oder der Flüssigkeitsabscheidung. Die Physiologen unter Ihnen werden wissen, daß bei den Sekretionserscheinungen noch ganz besonders die Erkenntnis der sog. „treibenden“ Kräfte fehlt, die es bewirken, daß unter Umständen entgegen dem hydrostatischen und osmotischen Druck aus einem Gewebe oder einer Zelle Flüssigkeiten abgeschieden werden. Mehr fast als auf einem anderen Gebiete der Physiologie spricht man hier noch von „vitalen“ Kräften, und auch die Einführung der neueren Ideen der physikalischen Chemie der Lösungen (neben Filtration, Diffusion usw.) hat, offen gestanden, nur verhältnismäßig spärliche Fortschritte ge-

zeitigt. Nun scheint aber auch hier die Kolloidchemie eine Kraft zu liefern, die, soweit ich es augenblicklich übersehen kann, durchaus imstande ist, die erwähnte prinzipielle Unabhängigkeit der Sekretion von hydrostatischen und osmotischen Druckdifferenzen sowie eine Reihe weiterer Einzelheiten wenigstens grundsätzlich verständlich zu machen. Es ist dies die Ihnen in letzter Stunde gezeigte Erscheinung der Synäresis. Ich bitte Sie, zu überlegen, daß jede Sekretion aus einem Kolloidgemisch erfolgt und daß jedes Sekretions- und Exkretionsprodukt nicht nur Wasser, sondern ebenfalls Kolloide und Salze enthält von der Art, die auch in dem betreffenden sezernierenden Gewebe enthalten sind. Auch im Harn befindet sich ja ganz normalerweise eine Reihe nichtdialysabler Substanzen, die den sog. „kolloiden Stickstoff“ enthalten. Ganz das gleiche beobachten Sie bei der Synäresis. Auch hier ist das ausgeschiedene Serum nicht nur Wasser, sondern eine Kolloidlösung mit Salzen in Verhältnissen, die keineswegs identisch zu sein brauchen mit den Konzentrationen im ausscheidenden Gel, und ebenso variiert auch hier sowohl Menge als auch Zusammensetzung des Serums je nach der Art der Gallerte, nach Art und Menge der in ihr enthaltenen Zusätze usw.¹¹⁵). Insbesondere aber auch — und das ist wohl der allerwichtigste Punkt — wird auch eine solche synäretische Flüssigkeitsabscheidung nicht entscheidend bestimmt durch die osmotischen oder hydrostatischen Druckverhältnisse, sondern durch „im Innern“ der Gallerte gelegene Kräfte, die Kräfte nämlich, welche die „inneren Zustandsänderungen“ hervorrufen usw. Ich muß mich mit diesen Andeutungen hier begnügen.

Ein anderes physiologisches Problem, das grade in neuster Zeit besonders viel Beachtung gefunden hat, ist z. B. das der vitalen Färbung, d. h. der Farbstoffspeicherung von lebenden Zellen. Hier hat sich mit immer größerer Deutlichkeit herausgestellt, daß in erster Linie der Dispersitätsgrad der Farbstoffe ihre Aufnahme bestimmt¹¹⁶). In der Regel werden nur molekulare oder hochdisperse Farbstoffe aufgenommen; die Plasmahaut wirkt gleichsam als Ultrafilter. Im Anschluß hieran möchte ich gleich noch einige Worte über die so vielfach gebrauchten Methoden der Färbung und Fixierung von toten Geweben vom kolloidchemischen Standpunkte sagen. Die Biologen wurden vor ca. 20 Jahren in nicht geringen Schrecken versetzt, als der Botaniker A. Fischer darauf hinwies, daß ein großer Teil durch Fixierung und Färbung erhaltener Struktur „künstlich“ wäre, insofern als durch die verwandten Re-

agenzien mannigfaltige Dehydratations- und Koagulationsprozesse, kurz kolloide Zustandsänderungen nachträglich in den Geweben hervorgerufen werden. Nun ist es zweifellos richtig, daß in vielen Fällen solche Kunstprodukte zu Täuschungen über die Strukturen der lebenden Gewebe geführt haben. Auf der anderen Seite ist es aber ebenso irrtümlich zu glauben, daß die Resultate dieser Methoden deshalb außerhalb jeden Zusammenhanges mit den lebenden Strukturen stehen und keinerlei Schlüsse auf diese gestatten. Eine rationale Fixier- und Färbetechnik kann nämlich ohne weiteres in Reagenzrohrversuchen den Sinn der Änderungen feststellen, welche die Fixier- und Färbemittel z. B. auf das stark hydratisierte Gemisch der Biokolloide ausübt, und auf Grund solcher Versuche kann man hier, ebenso wie in jeder anderen Naturwissenschaft, mit Recht extrapolieren. Gleichzeitig ergeben aber solche vergleichende Experimente, wie sie in mustergültiger Form z. B. von G. Mann angestellt wurden¹¹⁷⁾, die kolloidchemischen Bausteine für eine rationale Histologie. Denn es ist ja einleuchtend, daß auch die normalen Mikrostrukturen der lebenden Gewebe die Resultate der Zustandsänderungen der Biokolloide sind, und das Studium der Einzelheiten von Zustandsänderungen der Eiweißsole im Reagensglas oder auf den Objektträgern kann auf diese Weise zur Erklärung der Entstehung normaler Strukturen ausgiebigst benutzt werden.

Schließlich erscheinen diese und verwandte kolloidchemische Untersuchungen aber auch geeignet, Beiträge zu einer Wissenschaft zu liefern, von der ich allerdings nur mit gewissem Zögern spreche, obschon sie eigentlich die Krone aller Biologie ist. Ich meine hiermit die synthetische Biologie, die Wissenschaft von der künstlichen Darstellung der Lebewesen. Ich möchte Sie darauf aufmerksam machen, daß wir längst gewöhnt sind, seit der synthetischen Darstellung des Harnstoffs durch Liebig und Wöhler, von einer synthetischen Biochemie zu sprechen. Es ist uns ganz geläufig, daß wir auch im Laboratorium Stoffe und Reaktionen herstellen können, die wir sonst nur im lebenden Organismus antreffen. Einen sehr viel unklarereren Standpunkt aber haben wir gewöhnlich gegenüber der natürlichen Schwesterwissenschaft, gegenüber einer synthetischen Biophysik. Wenn es uns gelingt, amöboide Bewegung an Tropfen reiner Flüssigkeiten oder auch an Kolloidgemischen hervorzurufen, wenn es uns gelingt, für den Gehäusebau oder für die Nahrungsaufnahme von Protozoen usw. analoge Phänomene in unbelebten Systemen zu finden, so reden wir meist von „Nachahmungen“ der

betreffenden Vorgänge und drücken hiermit vielfach eine ganz unberechtigte Geringschätzung dieser Versuche aus. Derartige Versuche sind aber Experimente der synthetischen Biophysik und haben genau dieselbe wissenschaftliche Bedeutung, wie sie etwa die Synthese des Harnstoffs oder die Katalyse durch kolloide Metalle für die synthetische Biochemie besitzt. Ebenso wie die Chemie, so muß auch die Physik der organisierten Substanz in Einzelvorgänge zerlegt und durch allmähliches sukzessives Aufbauen wieder zu einer synthetischen Biologie vereinigt werden. Freilich kann eine solche wissenschaftliche Synthese nur durch systematische Untersuchungen zum Erfolg führen; es ist z. B. unwissenschaftlich, Niederschlagsformen als primitive synthetische Organismen anzusprechen, wenn diese Produkte nur in ihrer Form mit gewissen Organismen übereinstimmen. Ein synthetisch dargestelltes Lebewesen muß natürlich alle fundamentalen Kennzeichen der organisierten Substanz auf einmal zeigen. Wohl aber besteht kein Zweifel darüber, daß die Kombination chemischer und physikalischer Einzelvorgänge von der Art, wie wir sie bei Organismen beobachten, ein durchaus wissenschaftliches Problem darstellt und daß fernerhin besonders für die noch relativ vernachlässigte Biophysik die Kolloidchemie schon jetzt überreichliche Hilfsmittel und Anregungen bietet.

Es bleibt mir schließlich noch die Aufgabe, Ihnen einen kurzen Überblick über die Anwendungen der Kolloidchemie auf medizinischem Gebiete zu geben. Es ist einleuchtend, daß auch hier die Anwendungen ebenso zahlreich sein müssen wie in der Biologie normaler Organismen, da ja auch die pathologischen Erscheinungen sich an demselben kolloiden Grundmaterial abspielen wie die normalen Lebensprozesse. Ebenso wie einmal die normale kausale Biologie völlig durchdrungen, ja völlig neu geschrieben werden muß mit den Begriffen der Kolloidchemie, so werden auch die pathologischen Wissenschaften in allen ihren Zweigen von den Ergebnissen der Kolloidchemie beeinflußt werden. Es ist mir unmöglich, ähnlich ausführlich wie bei den vorangehenden Besprechungen über die verschiedenen kolloidchemischen Anwendungen in der Medizin zu sprechen. Nur ein paar besonders interessante Fälle seien herausgegriffen.

Im engsten Zusammenhange mit der Frage nach der Natur der Wasserbindung im normalen Organismus steht natürlich das Problem der Entstehung von exzessiven Flüssigkeitsanhäu-

fungen im Organismus, wie wir sie in den pathologischen Erscheinungen des Ödems in seinen verschiedenen klinischen Abarten vor uns haben. Wie bei der Wasserbindung im normalen Organismus, so spielen auch bei der Entstehung des Ödems die Gewebeskolloide die Hauptrolle, wie in den fundamentalen Untersuchungen von Martin H. Fischer dargetan worden ist¹¹⁸). Es sind die Änderungen der wasserbindenden Fähigkeiten dieser Kolloide, welche den in einem Gewebe vorhandenen Flüssigkeitsbetrag auch in pathologischen Fällen bestimmen, und zwar erscheint wiederum der mächtige quellungsfördernde Einfluß von Säuren der Hauptfaktor bei der Entstehung des Ödems zu sein, wenn schon möglicherweise auch die hydratisierenden Effekte proteolytischer Fermente im gleichen Sinne wirken können (W. Gies). Eine solche abnorme Säureproduktion oder -retention kann in den meisten Fällen von Ödem als primäre ätiologische Ursache nachgewiesen oder angenommen werden. Zum Beispiel entstehen Säuren, falls man die normalen Oxydationsvorgänge durch gewisse Gifte, durch Unterbindung der Zirkulation wie beim Stauungsödem, durch anatomische Veränderungen der Zirkulationsorgane infolge von Infektionen usw. hindert, aber es entstehen auch Ödeme, wenn wie bei einem Floh- oder Bienenstich lokal Ameisensäure in das Gewebe gebracht wird. In der Tat kann man „künstliche Flohstiche“ sehr gut herstellen, wenn man mit einer mit Säure gefüllten Injektionsnadel in eine Gelatineplatte hineinsticht und letztere dann quellen läßt (Dem.)¹¹⁹). Die Richtigkeit der Schlußfolgerung, daß in der Tat die wasserbindende Eigenschaft der Gewebeskolloide und ihre Variationen den normalen wie den pathologischen Flüssigkeitsgehalt bestimmt, kann man aber noch in folgender Weise demonstrieren (Dem.). Ich habe hier noch dieselben Versuche stehen, in denen ich Ihnen den Einfluß von Elektrolyten auf die Quellung von Gelatineplatten zeigte. In denselben Lösungen habe ich nun ganze Organe, Schafsaugen und Froschbeine, einige Stunden quellen lassen, und bei näherer Betrachtung werden Sie sich überzeugen, daß der Einfluß dieser Elektrolyte auf die Quellung der Organe vollkommen parallel geht mit dem Einfluß auf die Quellbarkeit der Gelatineplatten. In Säure und Alkali finden Sie, verglichen mit dem Versuch in reinem Wasser, eine mächtige Zunahme der Größe der Organe, d. h. der von ihnen aufgenommenen Wassermenge, während in Magnesiumsulfat eine ausgesprochene Schrumpfung eingetreten ist (Fig. 31). Beim Betasten z. B. der in Säure gequollenen Organe mit der Pinzette

werden Sie deutlich die charakteristischen mechanischen klinischen Kennzeichen ödematöser Organe wahrnehmen. Ich will nur kurz darauf hinweisen, daß ebenso wie bei Gelatine und Fibrin eine Kombination von Säure und Salz quellungshindernd oder entquellend wirkt, und daß dieser Effekt für die Therapie solcher Ödeme erfolgreich benutzt worden ist¹²⁰). Es ist gelegentlich gegen diese kolloidchemische Ödemtheorie eingewandt worden, daß in klinischen Fällen nicht so sehr das von den Zellen selbst gehaltene Übermaß von Flüssigkeit charakteristisch ist als die Menge freier Flüssigkeit, welche sich in den Gewebspalten und Körperhöhlen ansammelt. Aber auch diese, meist in späteren Stadien auftretende Erscheinung

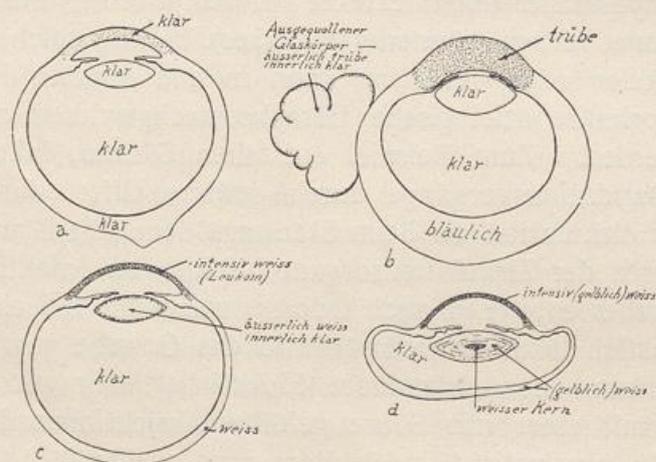


Fig. 31.

Quellung von Schafsäugen nach Martin H. Fischer.

a) norm. Auge; b) in HCl; c) in HCl + Mg(NO₃)₂; d) in HCl + FeCl₃.

entspricht durchaus der Kolloidtheorie. Die spontane Ausscheidung solcher Flüssigkeiten, welche bekanntlich vielfach reichlich Eiweiß enthalten, erscheint kolloidchemisch als eine verstärkte Synäresis, die direkt zu erwarten ist, falls ein Gel primär reichlichere Wassermengen aufgenommen hat als normal. Ich teilte Ihnen ja mit, daß die Menge ausgeschiedener Flüssigkeit auch bei einer Gelatinegallerte zunimmt mit der Verdünnung derselben.

Bei der Betrachtung der in Säure gequollenen Augen erhalten Sie übrigens das häufige klinische Bild eines Glaukoms mit Kornealtrübung; neben der Schwellung des Augapfels tritt auch eine intensive Trübung der Kornea auf (siehe Fig. 31). Kolloidchemisch gesprochen, handelt es sich hier um eine Säurekoagulation

von Biokolloiden, die durch die gewählten Säurekonzentrationen nicht stärker hydratisiert, sondern gerade umgekehrt dehydratisiert und koaguliert werden. Da die Gewebe aus einem Gemisch sehr verschiedenartiger Kolloide bestehen, so ist ein derartiger doppelter Effekt kolloidchemisch leicht verständlich. Wie ebenfalls Martin H. Fischer ausgeführt hat, treten solche kombinierte Quellungs- und Koagulationsprozesse auf in vielen Fällen von Nephritis¹²¹⁾. Auch die Art der therapeutischen Behandlung solcher Fälle durch Einführung von Salzlösungen insbesondere alkalischer Natur, wie sie seit den Fischerschen Untersuchungen vielfach mit dem größten Erfolge vorgenommen worden ist, basiert auf den kolloidchemischen Wirkungen dieser Salze. Die quellungsfördernde und koagulierende Wirkung der in den Geweben befindlichen Säuren wird ebenso wie im Reagensglasversuch durch diese Salze herabgesetzt.

Nur angedeutet sei, daß neuerdings auch die Entzündung als kolloidchemisches Problem behandelt worden ist¹²²⁾, daß die unbekannt Substanz, welche den Kropf hervorbringt, sich zweifellos in kolloidem Zustande befindet¹²³⁾, daß wir in den Immunitätsreaktionen ein schier unübersehbares Anwendungsgebiet haben, in dem die gegenseitigen Sorptionen und Fällungen der Immunkörper unter sich wie mit den Geweben und ihren Bestandteilen eine Hauptrolle spielen, daß verheißungsvolle Ansätze zu einer kolloidchemischen Theorie der Narkose vorliegen¹²⁴⁾ usw. usw. Kurz will ich auch darauf hinweisen, daß eine ganze Anzahl z. B. anorganischer Kolloide zu therapeutischen Zwecken verwendet werden, wie kolloider Schwefel bei Hautkrankheiten, kolloides Quecksilber und Quecksilbersalze bei Syphilis, kolloides Nickel bei Genickstarre und ganz besonders kolloides Silber in der Chirurgie zur antiseptischen Behandlung von Wunden sowie in der inneren Medizin gegen Infektionskrankheiten wie Gonorrhöe, Blennorrhöe usw. In der Augenheilkunde ist das kolloide Silber z. B. fast ganz an die Stelle des früher gebrauchten Silbernitrats getreten usw. Von einer ganz modernen Anwendung kolloider anorganischer Verbindungen will ich Ihnen zum Schluß noch ein paar Worte sagen, das ist die Anwendung von kolloidem Palladiumhydroxydul gegen Fettleibigkeit¹²⁵⁾. Die Behandlung geschieht durch lokale hypodermale Injektion in die Körperpartien, die man etwas reduziert zu sehen wünscht und soll erfreulicherweise von äußerst angenehmen, sog. euphoristischen Empfindungen begleitet sein. —

Meine Herren, ich muß hier wohl mit der Aufzählung der An-

wendungen der Kolloidchemie auf andere Wissenschaftsgebiete abbrechen. Ich tue dies mit der Hoffnung, daß Sie durch meinen heutigen Vortrag überzeugt worden sind von der Kargheit dessen, was ich Ihnen in einer einzigen Vorlesung bieten kann gegenüber den unzähligen Anwendungen und Anwendungsmöglichkeiten, die es noch gibt und die ich noch nicht berührt habe. Ich glaube, daß jeder von Ihnen mir aus seinem Spezialgebiete sofort ein Problem nennen könnte, das einer kolloidchemischen Bearbeitung fähig ist und das ich nicht mitgenannt habe. Vermutlich ist aber schon heute ein einzelner überhaupt nicht mehr in der Lage, den Reichtum der wissenschaftlichen Anwendungen der Kolloidchemie auch nur in erster Annäherung in seinem ganzen Umfange zu überblicken.