

Ausblicke auf biologische Adsorptionserscheinungen.

Von

Friedrich Czapek.

Bis zur neuesten Zeit wurde das Feld der physikalisch-chemischen Biologie ausschließlich von der Lehre vom osmotischen Drucke, auf den Grundlagen der experimentellen Arbeiten W. Pfeffers und der Deduktionen von Van 't Hoff beherrscht. In dem Ausbau, welchen ihr die Arbeiten eines Arrhenius, Wilhelm Ostwald und Nernst gegeben haben, dient sie uns noch heute trotz mancher Einwände als feste Basis für die weitere Forschung auf dem Gebiete der Molekel und Ionen im Zustande der Lösung. Die Kolloidchemie hat uns aber ein neues Gebiet erschlossen, in welchem besonders die Eigenschaften jener Teilchen zu erforschen sind, deren Größenordnung zwischen den größten bekannten Molekeln und den bereits mikroskopisch sichtbaren Körperpartikeln (den Mikronen) liegt. Innerhalb des Reiches der Kolloide enden die Anwendungen der Lehre vom osmotischen Druck, und wir treten hinüber zur Vorherrschaft der Grenzflächen- und Kapillarphänomene, unter deren wichtigste Tatsachen diejenigen gehören, welche wir als „Adsorptionserscheinungen“ zusammenfassen.

Es ist angesichts der überragenden Bedeutung, welche die Kolloide für den Aufbau und die Funktionen der lebenden Zelle besitzen, unmittelbar klar, welche Wichtigkeit den biologischen Adsorptionserscheinungen zukommt. Die folgenden Ausführungen sollen den Umfang dieser Phänomene schärfer feststellen und das Interesse auf einige allgemein beachtenswerte Gesichtspunkte in der Adsorptionsbiologie hinlenken.

I.

Der Begriff „Adsorption“ hat manche Wandlung im Laufe der Zeit erfahren. Er ist eigentlich von der „Absorption“ der Gase durch Flüssigkeiten ausgegangen, welche Henry in seiner grund-

legenden Untersuchung 1803 klarge stellt hat: Erscheinungen, die wir heute einfach als Lösung der Gase in Flüssigkeiten beschreiben, und die voll in das Reich des osmotischen Druckes fallen. Wie bekannt, fand Henry, daß bei konstanter Temperatur die Konzentration des in der Flüssigkeit gelösten Gases im Lösungsgleichgewichte direkt proportional ist dem Drucke im Gasraum. Es ist also für jede Temperatur der Quotient aus der in der Flüssigkeitsvolumeneinheit gelösten Gasmenge und dem Drucke im Gasraum eine konstante Größe. Da wir mit Van't Hoff für gelöste Stoffe die strenge Geltung des Boyle-Mariotteschen Gesetzes annehmen, so läßt sich der Henrysche Satz unmittelbar auf die Lösungsverteilung eines in zwei aneinandergrenzenden, nicht mischbaren Flüssigkeiten löslichen Stoffes übertragen. Dieses Gesetz begründeten Berthelot und Jungfleisch 1872 allgemein für Lösungen, und Nernst stellte 1891 in seinen Untersuchungen über den „Verteilungssatz“ die exakte Beziehung dieser Erscheinungen zu der Lehre vom osmotischen Drucke her.

Die Frage, ob das Gesetz von Henry auch für jene Fälle gilt, wo Gase von porösen festen Körpern aufgenommen werden, legte sich bereits 1814 Th. de Saussure zur Beantwortung vor. Seine Untersuchung ergab mit Sicherheit, daß hier jener Satz nicht gilt. Infolgedessen hat man in der Folge das Verschlucken von Gasen durch poröse und feingepulverte feste Körper als „Adsorption“ von der Gasaufnahme in Flüssigkeiten unterschieden. Obwohl im Laufe der Zeit quantitative Versuche über derartige Vorgänge mehrfach angestellt wurden, ließ eine allgemeine theoretische Behandlung derselben bis zur neuesten Zeit auf sich warten, da Wilhelm Ostwald und besonders H. Freundlich einfache Wege zur Vergleichung solcher Erscheinungen auffanden. An Stelle der linearen Abhängigkeitsbeziehung zwischen Gasdruck und Lösungskonzentration im Henry-Satze sehen wir bei der Gasaufnahme durch feste Körper allgemein auffallend starke Wirkungen bei Anwendung geringer Konzentrationen des „Adsorbendums“ und kleiner Mengen des „Adsorbens“, und relativ schwache Effekte bei Verwendung sehr großer Quantitäten.

Dies läßt sich leicht an der Adsorption von Jod durch feste Stärke nachweisen. Bringt man in einer Serie von Röhrchen verschieden große Stärkemengen, von $\frac{1}{2}$ Messerspitze bis zur 6fachen Menge, mit 5 ccm Wasser und 5 ccm gesättigtem Jodwasser zusammen und schichtet das gleiche Volum Toluol darüber, so erkennt

man an der Färbung des Toluols, daß die kleinsten Stärkemengen nicht viel weniger Jod fixiert haben wie die mittleren Mengen; erst sehr große Stärkemengen nehmen wieder merklich mehr Jod auf, wie das Blässerwerden der gefärbten Toluolschicht anzeigt.

In diesen starken Wirkungen kleiner Adsorbensmengen haben wir die erste bedeutsame Erscheinung vor uns, welche an biologische Adsorptionen geknüpft ist. So wird es möglich, daß die Pflanzenwurzeln aus äußerst verdünnten Nährlösungen sich hinreichend mit den nötigen Stoffen versorgen können, was nach einem proportionalen Verhältnis in der Stoffaufnahme in viel ungünstigerem Maße der Fall sein würde. Mit dieser Eigenart der Adsorptionsvorgänge hängen andererseits die bedeutenden Wirkungen kleinster Giftmengen, wie Kupfersalzen, Anilinfarben, zusammen, welche so überraschend stark sind, daß einst C. Nägeli dieselben als „oligodynamische Erscheinungen“ und Phänomene ganz besonderer Art kennzeichnen wollte. Die Adsorption der Gase durch feinverteilte feste Körper zeigt uns aber auch noch eine zweite wichtige Eigenschaft von Adsorptionsvorgängen durch ihre Abhängigkeit vom Feinheitsgrade des Adsorbens, d. h. von der Größe der Berührungsfläche des Adsorbens mit dem Adsorbendum.

Für die Systeme „Gas-Flüssigkeit“ und „Gas-Porösfester Körper“ ist die Unterscheidung zwischen Lösungsgesetz und Adsorptionsgesetz ohne weiteres leicht möglich. Hingegen bestehen häufig Zweifel, namentlich bei den Biologen, wie jene Fälle zu deuten seien, in welchen kolloide Lösungen als Lösungsmittel oder Adsorbentien auftreten. Bis in die letzten Jahre wurden die Lösungsverteilungen auf eine echte Lösung und ein flüssiges Kolloid allgemein als Spezialfälle des Henry-Berthelotschen Prinzipes aufgefaßt, und H. H. Meyer und Baum z. B. waren bei ihren so wichtigen Untersuchungen über die Aufnahme der Narkotika in die Zelle dieser Anschauungsweise derart sicher, daß sie es in manchen Fällen für unnötig hielten, sich durch die Bestimmung des Löslichkeitsquotienten für Fett und Wasser in stark verschiedenen Konzentrationsbereichen genau zu vergewissern, ob der Verteilungssatz tatsächlich gilt. Nicht anders wurde die Jodstärke durch Küster nach dem Verteilungsprinzip als „feste Lösung“ gedeutet. Da es immerhin vorkommt, daß die Abhängigkeit zwischen Lösungsquotient und Konzentration bei konstanter Temperatur innerhalb kleinerer Konzentrationsintervalle nur geringe Abweichungen von einem Mittelwerte zeigt, so versteht man, wie

solche Versuchsergebnisse als mit dem Henry-Satze übereinstimmende Tatsachen betrachtet werden konnten. In allen diesen Fällen lehrt jedoch die umfassende Verfolgung der Löslichkeitsbeziehungen, daß die Isothermen keine linearen, sondern angenähert parabolische Abhängigkeitsfunktionen darstellen. Sie folgen derselben Beziehung, welche H. Freundlich aus den Chappuisschen Beobachtungen über Gasadsorption durch Kohle abgeleitet hat. Die pro Volumeinheit aufgenommene Substanzmenge ist hier überall nicht der ersten Potenz, sondern einer echten Bruchpotenz der zurückbleibenden Substanzkonzentration proportional, wobei der Potenzexponent oft um 0,5 liegt. Daher findet man häufig angenähert die Relation $c = k \cdot \sqrt[n]{c_1}$. Allgemein wird diese Beziehung

in der Form $c = k \cdot c_1^{\frac{1}{n}}$ wiederzugeben sein, wobei n meist Werte zwischen 1 und 5 annimmt. Diese empirische Feststellung wäre ein Behelf zur Unterscheidung von echter Lösungsverteilung und Adsorption. Ein zweites Mittel zur Charakterisierung der Adsorptionsvorgänge in Flüssigkeiten wäre die experimentelle Größenänderung der Grenzfläche zwischen Dispersionsmittel und dispersem Stoff. Bei Kolloidlösungen läßt sich der Dispersitätsgrad häufig durch Zusätze oder andere Beeinflussungen ändern und so die Grenzfläche verringern oder vergrößern. Doch fehlen diesbezügliche Experimentaluntersuchungen noch ganz, und es liegen die Verhältnisse hierbei so wenig übersichtlich, daß wir diese Methode der Adsorptionsuntersuchung noch nicht weiter berücksichtigen können.

Aber auch die graphische Kennzeichnung der Reaktions-Isotherme ist für Adsorptionen nicht immer eindeutig zu geben. Wenn wir nach dem Vorgange von Nernst, auf den weiter unten entwickelten Prinzipien fußend, den Verteilungssatz für die Löslichkeit eines Stoffes in zwei aneinandergrenzenden sich nicht mischenden Lösungsmitteln allgemein in seiner Gültigkeit prüfen, so dürfen wir das Gesetz in seiner einfachen Form nur dann als zutreffend ansehen, wenn in beiden Lösungsmitteln eine bestimmte Menge der löslichen Substanz gleich viele gelöste Teilchen bildet. Bilden sich jedoch in dem einen Lösungsmittel einfache Molekel, in dem anderen Doppelmoleküle, so wird das Lösungsgleichgewicht nicht durch die Beziehung $c_1/c_2 = k$ wiedergegeben werden. Man wird vielmehr statt c_2 , da in dem betreffenden Lösungsmittel die Zahl der normalen Molekel nach dem Dissoziationsgesetz der

Quadratwurzel aus der Konzentration proportional ist, $\sqrt{c_2}$ einzuführen haben, und die konstante Beziehung muß lauten: $c_1/\sqrt{c_2} = k_1$. Formal ist dies aber dieselbe Relation, wie sie annähernd für viele Adsorptionsvorgänge gefunden wird. Da überdies bei der experimentellen Feststellung von Verteilungsgleichgewichten infolge der niemals vollständig auszuschließenden partiellen Mischung beider Lösungsmittel Ungenauigkeiten nicht zu vermeiden sind, so ist es begreiflich, daß die Abgrenzung von Lösungs- und Adsorptionsvorgängen in flüssigen Medien große praktische Schwierigkeiten darbieten kann. Die Erkenntnis dieses Sachverhaltes hat v. Georgievics in jüngster Zeit veranlaßt, auch die erwähnten Effekte von Molekularagggregation in Lösungen aus dem Gebiete der echten Lösungserscheinungen auszuschließen und dem Reiche der Adsorptionserscheinungen zuzuteilen. Wir werden uns jedoch diesem Vorgehen ebensowenig anschließen können, wie der in der Biologie sehr häufig unterlaufenden Vermengung typischer Adsorptionsvorgänge mit der Lösungsverteilung.

Es wäre daher nach einem anderen brauchbaren Mittel zur Scheidung der Bereiche von Löslichkeit und Adsorption Umschau zu halten. Wir verweisen auf die Anwendung des Nernstschen Prinzipes der relativen Löslichkeitserniedrigung. Der Henry-Satz läßt sich, wie Nernst zeigte, direkt auf die gegenseitige Löslichkeit zweier Flüssigkeiten, die sich nicht in jedem Verhältnis mischen, anwenden. Grenzt etwa eine Ätherschicht an Wasser, so gilt offenbar für die Löslichkeit des Äthers in Wasser dasselbe Verhältnis, als wenn sich Ätherdampf im Wasser verteilen würde, d. h. die im Wasser lösliche Äthermenge ist dem jeweiligen Dampfdrucke des Äthers proportional $L = k \cdot P$. Ist nun eine im Äther gelöste Substanz vorhanden, so ändert sie die Löslichkeit des Äthers in Wasser so, daß die nunmehrige Löslichkeit $L_1 < L$. Wir bezeichnen den Quotienten $\frac{L-L_1}{L_1}$ mit Nernst als relative Löslichkeitserniedrigung. Wenn, wie oben angenommen, der Henry-Satz gilt, so muß $\frac{L-L_1}{L_1} = k \cdot \frac{P-P_1}{P_1}$, wo $\frac{P-P_1}{P_1}$ die relative Dampfdruckerniedrigung der Lösung bedeutet. Nach dem Raoult'schen Satz ist aber $\frac{P-P_1}{P_1} = \frac{n}{N}$, wobei n die Zahl der Moleküle des gelösten Stoffes und N die Molekelzahl des Lösungsmittels ist. Daher muß $\frac{L-L_1}{L_1}$ ebenfalls $= \frac{n}{N}$ (Nernst), oder

wenn wir die den Molekülzahlen bei gleicher osmotischer Leistung reziproken Molekulargewichte M und M_1 einführen, so wird die relative Löslichkeitserniedrigung $\frac{L-L_1}{L_1} = \frac{M \text{ (Lösungsmittel)}}{M_1 \text{ (gelöste Substanz)}}$

So gibt uns die relative Löslichkeitserniedrigung eine einfache Beziehung zum Molekulargewichte des Zusatzstoffes. Diese Ableitung gilt zunächst für Nonelektrolyte. Ist der Zusatzstoff in seinem Lösungsmittel dissoziiert, so hat man unter Benutzung der Umrechnungs-

formel $\alpha = \frac{P-P_0}{(n-1)P_0}$, wobei P der beobachtete, P_0 der theoretische

osmotische Druck, n die Zahl der aus einem Molekel entstehenden Ionen und α der Dissoziationsgrad ist, die Ionisierung zu berücksichtigen.

Umgekehrt müssen Salzzusätze zu Wasser auch die Löslichkeit des Wassers im Äther mit derselben Abhängigkeit vom Molekulargewicht herabdrücken, was man schon durch die dilatometrische Vergleichung des Äthervolumens erkennen kann. Stoffe von hohem Molekulargewicht werden die geringste Löslichkeitserniedrigung erzeugen, und von Kolloiden wird man eine solche Wirkung praktisch nicht mehr erwarten dürfen.

Kommt es aber in einem bestimmten Fall doch vor, daß ein Kolloidzusatz die Löslichkeit der einen Flüssigkeit a in der angrenzenden Flüssigkeit b herabsetzt, so kann ein solches Verhalten nicht durch den Henry-Satz erklärt werden, und wir haben eine neue Erscheinung der Affinität zwischen Kolloid und Flüssigkeit a vor uns, die nicht zu den Löslichkeitserscheinungen gehört, sondern als Adsorption aufzufassen ist.

Bis zu einem gewissen Grade läßt sich ein solcher Effekt durch den folgenden Versuch veranschaulichen. Eine Serie Reagenzgläser enthält Wasser auf Chloroform geschichtet in gleichen Mengen, und in jeder Probe die gleiche Menge Jod auf beide Lösungsmittel verteilt. Fügt man nun zu diesen Proben die gleichen prozentischen Mengen von NaCl , CaCl_2 , AlCl_3 , Rohrzucker hinzu, wobei man eine Vergleichsprobe ohne Zusatz läßt, so ist zu beobachten, daß sich das Chloroform nach NaCl -Zusatz am dunkelsten durch Jod anfärbt, etwas weniger in der Probe mit CaCl_2 , noch weniger in der AlCl_3 -Probe; die Probe mit Zuckerzusatz unterscheidet sich hinsichtlich der Verteilung des Jod praktisch nicht mehr von der Probe ohne Zusatzkörper. Diese Erscheinung folgt also dem Molekulargewicht des Zusatzkörpers. Man

müßte demnach, wenn kein neuer Faktor hinzutritt, erwarten, daß alle Kolloide, welche wir unserem System Jodwasser-Jodchloroform hinzufügen, die Verteilung nicht beeinflussen. Dies ist aber nur insoweit richtig, als keine Adsorption von Jod durch den Zusatzkörper stattfindet. Fügen wir Dextrin zu, so erfolgt eine weitere Verarmung der Chloroformphase an Jod gegenüber der zusatzfreien Probe, und noch mehr äußert sich dieser Effekt beim Hinzufügen von Stärke- oder Eiweißlösung. Dieses Phänomen läßt sich vom Standpunkte des Henry-Nernstschen Prinzipes nicht mehr erklären. Wir brauchen eine neue Vorstellung, um die Affinität der kolloidhaltigen wässerigen Phase zum Jod zu beschreiben, nämlich den Begriff der Adsorption. Solche Versuche lassen sich unmittelbar dazu benutzen, um die Jodbindung durch ein gelöstes Adsorbens analytisch zu bestimmen. Eine lineare Abhängigkeit der Jodaufnahme vom Molekulargewicht der Zusatzsubstanz existiert in diesem Bereiche nicht mehr. Wohl aber hat die Kolloiddispersität einen großen Einfluß, und jeder Faktor, welcher die Grenzflächen- ausdehnung zwischen Jodlösung und Kolloid herabsetzt, drückt auch die Adsorption herab. Ebenso lassen sich die Adsorptionsvorgänge stören, wenn man einen Stoff hinzufügt, welcher vom Kolloid stärker adsorbiert wird als die erst vorhandene Substanz. Wir müssen diese Erscheinungen der Adsorptionsverdrängung noch später eingehend würdigen. Diese so gewonnene klare Abgrenzung von Lösungs- und Adsorptionserscheinungen hat auch den Vorteil, daß sie uns zeigt, wie wenig zum Adsorptionsbegriff der Charakter der Irreversibilität gehört. Da man häufig bei der Adsorption von Farbstoffen, Eiweißkörpern, Fermenten usw. durch feste Adsorbentien findet, daß der adsorbierte Stoff gar nicht mehr oder nur stark verändert vom Adsorbens getrennt werden kann, so ist der Adsorptionsbegriff in der Biologie nicht selten willkürlich auf solche nicht umkehrbare Prozesse eingeschränkt worden. Primär dürfte wohl jede Adsorption sowie jeder Lösungsvorgang reversibel sein. Da aber an den Grenzflächen eine bedeutende Konzentrations- resp. Druckerhöhung herrscht, so unterlaufen hier leicht Veränderungen des adsorbierten Stoffes, welche dazu führen, daß die Substanz nicht mehr intakt wiedergewonnen werden kann. Solche Folgeerscheinungen sind wohl von dem eigentlichen Adsorptionsprozeß physikalisch zu sondern.

Adsorptive Vorgänge werden nach dem Gesagten nur unter Beteiligung von solchen gelösten Teilchen als Adsorbens stattfinden,

welche oberhalb der Größenordnung von Molekülen liegen, also von Amikronen oder Submikronen. Das Adsorbendum können natürlich sowohl Ionen, als Molekel, als Molekularverbände darstellen. Es ist bisher noch nicht bestimmt worden, bei welcher Teilchengröße die Adsorptionswirkungen aufhören. Doch würde sich die Beobachtung der abnehmenden Jodbindung durch die aus Stärke hydrolytisch abgespaltenen Kohlenhydrate: lösliche Stärke-Amylodextrin - Erythro-dextrin - Achroodextrin zur Verdeutlichung dieses Zusammenhanges eignen, insofern nicht die Abnahme der Jodbindung noch von anderen Umständen als von der Teilchengröße abhängt. Auch die von Zsigmondy eingeführte „Goldzahl“ der Kolloidlösungen gewährt Anhaltspunkte dafür, welchen Grad die adsorptiven Wirkungen erreichen. Die Bestimmung der adsorbierten Jodmenge durch Stärkelösung verschiedener Konzentration würde sich ferner dazu eignen, um Adsorptionsintensität und Teilchengröße zu verfolgen, wenn nicht der Umstand hindernd in den Weg träte, daß sich die Teilchengröße von Kolloidlösungen mit steigender Verdünnung ändern kann.

So spielen die Adsorptionserscheinungen in kolloiden Lösungen dieselbe Rolle, welche den wahren Lösungserscheinungen in osmotischen Lösungen zukommt. Daraus erhellt die fundamentale Bedeutung der Adsorptionsphänomene für die sich in den kolloiden Medien der Zelle abspielenden Vorgänge.

II.

So wie das Reich der Adsorption in den osmotisch wirksamen echten Lösungen seine Grenze findet (bereits in semikolloiden Lösungen dürften wahre Lösungsphänomene die Hauptrolle spielen), so stößt es auf der anderen Seite an die Oberflächenerscheinungen an, welche sich als Kapillaritätsphänomene, Oberflächen-Verdichtungserscheinungen, Hautbildungen usw. ohne nennenswerte Grenzflächenentfaltung einstellen. Wir wollen diese Erscheinungen als „Porenadsorption“ der „Kolloidadsorption“ zur Seite stellen. An der Porenadsorption treten zwei Kardinalsymptome der Adsorptionsphänomene ohne weiteres klar hervor: 1. Die Steigerung der Geschwindigkeit des Vorganges und die Erhöhung der adsorbierbaren Quanten mit der Vergrößerung der wirksamen Oberfläche durch Zerkleinern des festen Adsorbens; 2. Die Konzentrationssteigerung oder Druckerhöhung der adsorbierten Substanz in der

Grenzschicht, welche zur Kondensation von Dämpfen oder rascher Verbrennung von Gasen Anlaß geben kann. Die Abhängigkeit der adsorbierten Substanzmenge von der Konzentration im umgebenden Medium bei konstanter Temperatur wird auch hier durch die Beziehung $c = k c_1^{\frac{1}{n}}$ angenähert wiedergegeben. Setzt man nach Freundlich statt c den Quotienten aus der adsorbierten Substanzmenge durch die Menge des Adsorbens $\left(\frac{x}{m}\right)$ und wendet die Adsorptionsgleichung in der logarithmierten Form: $\log \left(\frac{x}{m}\right) = \frac{1}{n} \log c_1 + \log k$ an, so lassen sich alle experimentell bestimmbareren Daten der Isotherme graphisch in einer geraden Linie wiedergeben.

Bayliss hat gezeigt, daß die Adsorption von Kongorot durch Filtrierpapier weitergeht, wenn man das Adsorbens allmählich zusetzt, als wenn die ganze Menge auf einmal zugesetzt wird. Diese äußerlich an den aus der Serobiologie her bekannten Danysz-Effekt erinnernde Erscheinung ist insofern noch weiterer Untersuchung bedürftig, als man nicht weiß, ob es sich sicher um eine Verschiebung des Endzustandes handelt, oder ob nicht doch nur eine Geschwindigkeitsänderung der Reaktion vorliegt.

Da sich allgemein Stoffe, welche die Oberflächenspannung ihres Lösungsmittels gegen Luft herabsetzen, nach den thermodynamischen Untersuchungen von Willard Gibbs an der Oberfläche anreichern, so haben wir zu erwarten, daß besonders kapillaraktive Substanzen der Porenadsorption unterliegen. Dies läßt sich für Alkohole, Ester, Ketone, Fettsäuren usw. durch Kohlenpulver-Adsorption experimentell leicht bestätigen. Michaelis und Rona haben auch nachgewiesen, daß ein stärker kapillaraktiver Stoff dem Gibbsschen Theorem entsprechend alle schwächer aktiven Substanzen von der Grenzfläche des Adsorbens entfernt (Adsorptionsverdrängung). Diese Erfahrung läßt sich auch dazu benutzen, um adsorbierte kapillaraktive Stoffe unbekannter Natur hinsichtlich des Grades ihrer Oberflächenaktivität genauer zu bestimmen. Sie müssen nämlich von allen stärker kapillaraktiven Stoffen bei einer bestimmten Konzentration, welche eben der kritischen Grenzflächenspannung entspricht, verdrängt werden. Alles dies sind Fälle von positiver Adsorption.

Andererseits hat man bei Stoffen, welche die Oberflächenspannung ihres Solvens erhöhen, eine Verminderung der Konzentra-

tion an der Grenzfläche zu erwarten: eine negative Adsorption, wie sie voraussichtlich bei Salzlösungen und Kohle erfolgt.

Im Pflanzenorganismus hat die Porenadsorption vor allem eine Bedeutung bei der Aufnahme, Festhaltung und Speicherung von Wasser. Damit im Zusammenhange findet sich eine große Zahl von Strukturen ausgebildet, welche man als Porenadsorptions-Mechanismen, Poren-Mechanismen, zusammenfassen kann. Schon den biologischen Typus des Moospolsters kann man hierzu rechnen, wie sich derselbe auch bei Luftalgen, Flechten, manchen Pilzen, aber auch bei phanerogamen Hochgebirgspflanzen und einzelnen Xerophyten in bekannter Art ausgebildet findet. Dicht nach den Radien einer Halbkugel gelagerte Stämmchen mit zahlreichen kleinen Blättchen gewähren bei einer minimalen Außenfläche des Polsters innerhalb der Porenräume eine gewaltige Grenzfläche, welche zur kapillaren Speicherung periodisch reichlich zur Verfügung stehenden Wassers dient. Aber auch der Hyphenfilz von Pilzen und Fucaceen mag als Porenadsorptions-Mechanismus gedeutet werden, da der Aufbau dieses Gewebes mit seinen vielen Hohlräumen viel weniger für einen Austausch wässriger Lösungen direkt von Zelle zu Zelle, als zwischen den Zellreihen im kapillaren Hohlräumssystem spricht. Als intracelluläre Porenadsorptions-Mechanismen sind die Spiralfaserzellen der Sphagnumarten, die Velamenzellen der Orchideenluftwurzeln, sowie die Wandverdickungen aller Gefäße und Tracheiden (deren unvollkommenste Erscheinung die Zäpfchenrhizoiden der Marchantiaceen darstellen) zusammenzufassen. Der Verholungsprozeß, der so gewöhnlich die Wände derartiger Zellen betrifft, bedingt geringere Quellbarkeit der Membran, was für die Einengung des Wasserstromes auf die leitenden Kapillarröhrengebilde von ökologischer Bedeutung ist.

Besteht die Rolle der Porenmechanismen im Wasserhaushalte der Pflanze wesentlich in regulierenden, den periodischen Feuchtigkeitsüberschuß und Feuchtigkeitsmangel ausgleichenden Funktionen, so mag in anderen Fällen die erhöhte Konzentration des Adsorbendums an den Grenzflächen biologisch wichtig werden. So wäre zu erwägen, ob nicht der Bau des Schwammparenchyms der Laubblätter mit der Funktion der Kohlensäureaufnahme aus der Luft derart zusammenhängt, daß man die erhöhte Kohlensäurekonzentration an den Grenzflächen nicht außer acht lassen darf.

III.

Im Stoffwechsel der Pflanze spielt jedoch nur die Kolloidadsorption eine dominierende Rolle. Hier sind wieder zwei Erscheinungsgruppen zu würdigen: die Adsorptionserscheinungen an den Zellwänden und die Adsorptionserscheinungen im Zellplasma und dessen Kontenten. Sie entsprechen den physikalischen Typen der Geladsorption und der Adsorption in Solen. Pflanzliche Zellhäute sind allgemein dort am wasserreichsten und am stärksten quellungsfähig, wo es auf einen intensiven Stoffaustausch ankommt. Dies ist nicht nur für Löslichkeitsbeziehungen und Diffusionsgeschwindigkeiten, sondern auch für die Adsorption in Membranen von ausschlaggebender Bedeutung. Nicht immer sind hier Lösung und Adsorption scharf getrennt worden. Besonders für den Gasdurchtritt durch Zellhäute hat man noch gar nicht die Rolle von Adsorptionen in Erwägung gezogen, sondern hat solche Vorgänge wesentlich als Lösungsphänomene angesehen, welche dem Henryschen Satze unterworfen sind. Immerhin legt uns die Tatsache, daß gerade die am stärksten koerziblen Gase von der Zellmembran am leichtesten aufgenommen werden, den Gedanken nahe, daß möglicherweise der ganze Prozeß als Gasadsorption aufzufassen ist. Einschlägige Untersuchungen fehlen aber noch.

Flüssigkeitsaufnahme und Flüssigkeitsdurchtritt durch Zellmembranen stehen in so enger Beziehung zu den Quellungserscheinungen, daß man in denselben nur Modifikationen des Quellungszustandes sehen kann. Trotz der großen theoretischen Fortschritte, welche die Lehre von der Quellung seit den grundlegenden Versuchen von F. Hofmeister über die „mechanischen Affinitäten“ von Salzlösungen zu quellenden Leimplatten und seit den gedankenreichen Ausführungen von K. Spiro über „physikalische Selektion“ gemacht hat, ist es derzeit noch sehr schwierig, die Bereiche von Löslichkeits- und Adsorptionsbeeinflussungen in quellbaren Gelen auseinander zu halten. Dies liegt zum Teil an unseren unzureichenden Kenntnissen über die physikochemische Natur quellbarer Gele. Immerhin scheint Wo. Pauli im Recht zu sein, wenn er meint, daß zwischen Gelen und Solen keine wesentliche Differenz bestehen kann mit Ausnahme der bei Gelen relativ geringen Verschieblichkeit der Teilchen, von der wir aber nicht wissen, wie sie zustande kommt. Daß in den Gelen Schwamm- oder Netzstrukturen im Sinne der von Bütschli begründeten

„Wabentheorie“ als besondere Eigentümlichkeit vorkommen, wird durch die fortschreitende kolloidchemische Erforschung der Gele immer unwahrscheinlicher. Es erscheint mir richtiger, die Physikochemie der Gele und Sole von gemeinsamen Gesichtspunkten aus zu behandeln. Die von F. Hofmeister entdeckte Quellungsbeeinflussung von Leimplatten durch Salze ist zweifellos ebenso als ein Löslichkeitsphänomen, eine „lyotrope Erscheinung“ im Sinne von H. Freundlich, zu deuten, wie die in vieler Hinsicht sehr analog vor sich gehende Aussalzung von Eiweiß-Solen. Denn alle jene Neutralsalze, welche am stärksten eiweißfällend wirken: die mehrwertigen Kationen einerseits, andererseits die Anionen der Schwefelsäure, Zitronensäure, Weinsäure, setzen die Quellung am stärksten herab. Andererseits haben Rhodanide, Chloride, Nitrate, welche nur schwach eiweißfällend wirken, einen mehr minder ausgeprägt quellungsfördernden Einfluß.

Man kann solche Vergleiche sehr anschaulich und ziemlich genau mit Hilfe einer kleinen Wage anstellen, welche unterhalb der kleinen zur Aufnahme der Tariiergranaten dienenden Schälchen eine Vorrichtung zum Befestigen von Gallertwürfelchen besitzt. Tariert man zwei in Wasser gequollene Gallertwürfelchen genau aus und läßt dieselben an der Wage befestigt in die zu vergleichenden Salzlösungen eintauchen, so lassen sich nach genügend langer Zeit, sobald man die Gefäße mit den Salzlösungen beseitigt hat, die Gewichtsunterschiede ohne weiteres feststellen. Tauchte eines der Würfelchen in Wasser ein, das andere in Salzlösung, so erfährt man den Grad der Vermehrung oder Verminderung der Quellung.

Auch die Farbstoffaufnahme durch gequollene Gelatine zeigt uns dadurch, daß sie (bei Methylenblau und Gelatine) umso stärker eintritt, je wasserreicher das Gel ist, daß es sich um Lösungserscheinungen handelt. Es fällt auf und scheint dieser Ansicht zu widersprechen, daß sich gequollene Gelatine mit Methylenblau oder Methylviolett bei Gegenwart von Sulfatlösung (welche die Quellung herabsetzt, also die Gelatine wasserärmer macht) viel stärker anfärbt, als Gelatine mit rein wässriger Farbstofflösung. Hingegen nimmt Gelatine, welche in Rhodankalium stark gequollen ist, aus einem anderen Lösungsmittel Methylenblau nur sehr wenig auf. Daß es sich trotzdem in solchen Fällen um lyotrope Wirkungen und nicht um Adsorptionsverdrängungen handelt, ersieht man daraus, daß auch aus einer Methylenblau-Chloroformlösung mehr Farbstoff in Sulfatlösung übertritt als in reines Wasser. Dies sind

demnach alles Fälle von Lösungsverteilung. (Versuche von Dr. Helene Nothmann-Zuckermandl.)

Wie aber Wo. Pauli für die Eiweiß-Sole gezeigt hat, daß man die Adsorptionserscheinungen mit Neutralsalz-Ionen nur bei Anwendung möglichst elektrolytfreier Kolloidlösung und verdünnter Salzlösung rein zur Anschauung bringen kann, so ist es offenbar auch bei den quellbaren Gelen. Deren Analogie mit den Solen äußert sich auch hier in vollkommener Weise. Wenn eine Eiweißlösung durch wochenlange aseptische Dialyse von den vorhandenen Elektrolyten möglichst weitgehend befreit wird, so gewinnt sie nach Paulis Erfahrungen eine Reihe charakteristischer Eigenschaften: leichte Koagulierbarkeit, geringe Viskosität und großen elektrischen Leitungswiderstand. Fügt man ein wenig Säure oder Alkali hinzu, so ändern sich diese Eigenschaften sehr stark: die Gerinnungsfähigkeit nimmt ab, Viskosität und Leitfähigkeit hingegen wachsen bis zu einem Maximum. Aus diesen Gründen spricht Pauli von nicht ionisiertem und von Ioneneiweiß. Das unelektrische Eiweiß zeigt nun viel ausgeprägter Adsorption von Neutralsalz-Ionen als das Ionen-Eiweiß, welches in vieler Hinsicht den echten Lösungen näher steht und lyotrope Erscheinungen in den Vordergrund treten läßt. Die Versuche von R. Chiari aus Paulis Institut haben gezeigt, daß die ausdialysierte Gelatine manche Vergleichspunkte mit dem unelektrischen Eiweiß bietet. Ein Hinzufügen von sehr wenig Säure oder Alkali bewirkt außerordentliche Steigerung der Quellung. Voraussichtlich wird auch bei der unelektrischen Gelatine die Salzionenadsorption am stärksten sein, während die elektronegativ aufgeladene Säuregelatine und die elektropositive Alkaligelatine vor allem Adsorptionserscheinungen mit entgegengesetzt geladenen anderen Kolloiden aufweisen wird.

Im ganzen läßt sich demnach nicht voraussetzen, daß die Zellhaut-Gele wichtige adsorptive Funktionen im Stoffwechsel ausüben. Sie werden vielmehr gelöste Stoffe wahllos dem Zellplasma zuführen, um so leichter, je stärker ihr Quellungsgrad ist. Nur im Laufe langer Zeit werden Adsorptionen relativ stark wirksamer mehrwertiger Ionen zu erreichen sein. So häufen sich in alten Zellmembranen Kalzium und Magnesium, besonders aber auch Eisen und Mangan an. Da Verdrängung durch stärker adsorbierbare Substanzen nicht möglich ist, so bleiben diese Stoffe in ungestörter Bindung liegen.

Hingegen müssen wir eine biologische Rolle jenen adsorbierten Elektrolyten zuschreiben, welche bei der intrazellulären Abscheidung von Gelen in Adsorptionsverbindung ausfallen. So ist es durch die Studien von Samec wahrscheinlich geworden, daß Elektrolyt-Adsorptionen, und zwar Phosphationenbindung, beim Unlöslichwerden der Amylumkolloide eine gewisse Bedeutung besitzen.

Schließlich haben wir auch die Bindung von kolloiden Lösungen durch Gele zu den Adsorptionserscheinungen zu rechnen. Derartige Vorgänge kommen u. a. in Betracht bei der Aufnahme von Enzymen durch feste Kolloide. Es ist wohlbekannt, wie empfindlich der Nachweis von Pepsin geführt werden kann durch Adsorption desselben an mit Salzsäure imprägnierten Fibrin- oder Elastin-flockchen, selbst in der verdünntesten Lösung. Auch die Färbungen von Zellwänden sind als Adsorption kolloider gefärbter Materialien aus der Gruppe der Tannoide, Phlobaphene usw. zu betrachten. Selbst hochmolekulare Alkaloide wie das Berberin können in Gelmembranen festgehalten werden. So wirkt die Adsorption hier wenigstens im Dienste der Stoffverteilung in der Pflanze und zur Festlegung anderwärts nicht mehr verwertbarer Körperbestandteile.

Wenigstens in gewissem Maße müssen wir unsere Betrachtungen über Gel-Adsorption auch auf die Adsorptionswirkungen durch Kolloide des Humusbodens und auf die Erreichung der hier adsorbierten Stoffe durch die nahrungsuchende Pflanze ausdehnen. Zweifellos wird es bei der Gewinnung stark adsorbierbarer Substanzen, wie der Ammonium-Ionen darauf ankommen, die Adsorptionsverbindungen derselben nach dem Verdrängungsprinzip zu lösen. Dabei kommt die elektronegative Ladung der Membrankolloide der Wurzelhaare, die „Säureausscheidung der Wurzeln“ wesentlich in Betracht, um jene wichtigen Kationen für die Pflanze zu sichern. Es ist nicht erst nötig eine Säurewirkung durch Wurzelsekrete und Diffusion auf Distanzen hinaus zu entfalten, sondern die hochquellbaren elektronegativ aufgeladenen Zellmembranen erfüllen hier wohl voll den Zweck, die Umsetzung der Bodenbestandteile zu erreichen. Daß es nicht auf förmliche Säuresekretion ankommt, scheint aus der Erfahrung hervorzugehen, daß wohl die angepreßt wachsenden Wurzeln auf Lackmuspapier Rötung erzeugen, die ausgeschiedenen Flüssigkeitstropfen jedoch nicht sauer reagieren. Dies wäre durch Adsorptionswirkung elektronegativer Zellwandkolloide zu erklären.

Eine weit ausblickende Untersuchung von Baumann und Gully hat erst vor wenigen Jahren die fundamentale Bedeutung von Gel-Adsorptionen für den Stoffwechsel des Erdbodens gebührend gewürdigt. Es ist nun allerdings nicht entschieden, ob man berechtigt ist das Vorhandensein von kolloidalen „Humussäuren“ im Boden vollständig in Abrede zu stellen, wie dies die beiden genannten Forscher taten. Aber wenn es auch solche hochmolekulare Säuren im Boden gibt, so spielen Adsorptionsverbindungen derselben mit anderen Bodenkolloiden eine weitaus bedeutungsvollere Rolle, als man bisher angenommen hatte, und auch die Bindung basischer Bodenbestandteile ist augenscheinlich nur zum geringen Teile salzartiger Natur, vielmehr zum größten Teile Ionenadsorption durch elektronegative Kolloide. Deshalb ist es begreiflich, daß man in der praktischen Moorkultur durch Adsorptions-sättigung mit Kalk für die Aufnahme der Metallkationen durch die Pflanze viel günstigere Bedingungen schafft, und hierdurch erfolgreiche Feldwirtschaft anbahnt.

IV.

Kolloidadsorption durch flüssige kolloide Adsorbentien ist mit Unrecht bisher meistens nur da in Betracht gezogen worden, wo es sich um irreversible oder reversible Fällungserscheinungen, Ausflockungen, handelt; es muß betont werden, daß auch Lösungsadsorptionen zu berücksichtigen sind. Schon die Sättigung kolloider Flüssigkeiten mit Gasen wird man dahin zu prüfen haben, ob hier der einfache Henry-Satz gilt, oder ob vielmehr aus stark verdünnten Gasen relativ stärkere Aufnahme stattfindet, als unter erhöhtem Gasdrucke. Solche im Absorptiometer leicht ausführbare Versuche fehlen aber noch, und so ist es unentschieden, ob die Gassättigung kolloidaler Zellflüssigkeiten als reine Lösungserscheinung oder als Gasadsorption zu deuten ist. Ebenso ist es unbekannt, wie solche Erscheinungen von der Konzentration der Sole abhängen und wie etwa Salzzusätze zum Kolloid die Gasaufnahme zu fördern oder zu hemmen imstande sein mögen.

Im übrigen wird man hinsichtlich der Adsorptionserscheinungen in Kolloidflüssigkeiten einmal durch den Grad der Dispersität, und dann durch die lyophile Natur der Sole grundsätzliche Differenzen zu erwarten haben.

Es wird sich empfehlen, die Adsorptionen durch Suspensioide von jenen zu trennen, welche sich an Emulsoiden abspielen.

Suspensioide Kolloidflüssigkeiten, in denen ultramikroskopisch auflösbare Partikel: „Submikronen“ eine Hauptrolle spielen und bei denen die lyophilen Eigenschaften zurücktreten, werden uns typisch durch Platinsol, Goldsol und andere Metallsole vertreten. Sole dieses Typus fehlen auch in der lebenden Zelle nicht, doch wird der kolloidchemische Charakter des lebenden Protoplasma wesentlich durch die lyophilen Emulsoide bestimmt. Wie die Metallsole oder feinst verteiltes Mastixharz zeigen, gibt es hier stetige Übergänge zu den mikroskopisch auflösbaren Suspensionen nicht mehr kolloidaler Natur. Auch nach ihrem physikalischen Verhalten sind die Suspensioide ultramikroskopisch feine Suspensionen fester Partikel in einer Flüssigkeit. Bei intravitalen Gerbstofffällungen in Pflanzenzellen durch Koffein lassen sich innerhalb des Zellraumes alle möglichen Übergänge zwischen grob tröpfchenartigen Fällungen bis zu mikroskopisch nicht mehr auflösbaren Ausscheidungen, je nach der Konzentration der vorhandenen Gerbstoffmenge beobachten. Bei geringen Gerbstoffquantitäten sieht man mikroskopisch nur die braunrote Farbe von Suspensoiden in durchfallendem Licht, ohne die Partikel selbst unterscheiden zu können. Im Zellsaft dürften manche kolloide Kontenta in derartiger Verteilung vorkommen, was noch näherer Untersuchung bedarf. Aller Wahrscheinlichkeit nach werden auch in Milchsäften ultramikroskopisch auflösbare Kolloidpartikel neben der groben Tröpfchensuspension (Emulsion) vorkommen.

Bei allen solchen Kolloiden spielen nun Adsorptionen eine große Rolle. Besonders bekannt ist die Erscheinung, daß Suspensioide durch kleine Elektrolytmengen ausgeflockt werden, ein Verhalten, das sie mit nichtkolloiden Suspensionen teilen. Hierbei spielt die elektrische Ladung der Kolloidpartikel und jene der zugesetzten Ionen eine entscheidende Rolle, indem sich nach dem von Hardy aufgestellten Grundsatz stets nur ungleichnamig geladene Partikel und Ionen ausfällen. Das Phänomen wird nach Hardy und Bredig als elektrokapillare Erscheinung aufgefaßt. In dem Momente, in welchem Elektronneutralität hergestellt wird, erreicht die Oberflächenspannung an der Kolloidgrenzfläche ihr Maximum, und es wird die bei der Koagulation stattfindende Oberflächenverkleinerung und die Absonderung des Kolloids am schnellsten stattfinden. Umgekehrt wird jeder Faktor, welcher die Potentialdifferenz zwischen Kolloidpartikeln und Dispersionsmittel erhöht, die Adsorption fördern. Dementsprechend koaguliert der

aus elektronegativen Harzkolloiden bestehende Milchsaft auf Zusatz von verdünntem Ammoniak oder anderen elektropositiven Ionen, beziehungsweise elektropositiven Kolloiden.

In allen solchen Suspensoiden ist das Quantum der dispersen Substanz, wie von den Edelmetallsolen bekannt ist, äußerst gering gegenüber der Masse des Dispersionsmittels. Deswegen werden auch kaum die durch ihre Menge bedeutungsvollen Plasmasubstanzen vorherrschend in einer derartigen Verteilung in der lebenden Zelle zu erwarten sein.

Einer eingehenden Betrachtung bedürftig sind bestimmte Adsorptionserscheinungen zwischen Suspensoiden und Emulsoidkolloiden lyophiler Natur, die man als „Bildung von Schutzkolloiden“ bezeichnet, weil die Stabilität des sonst leicht veränderlichen Suspensoids hierdurch bedeutend erhöht wird. Wie bekannt, benutzt man organische Sole mit Vorteil bei der Herstellung von dauerhaften kolloiden Metalllösungen oder Solen von Hydroxyden oder Sulfiden. Die „Einhüllungshypothese“, wie sie sich zurzeit des meisten Beifalles erfreut, nimmt an, daß das Emulsionskolloid Schutzhüllen um die Submikronen des anderen Kolloids bildet, wobei es sehr wichtig ist, daß das Schutzkolloid Lösungsaffinitäten zum Dispersionsmittel besitzt, welche dem anderen Kolloid abgehen.

Ein wichtiges physiologisches Beispiel hierfür sind die Fett-emulsionen. Während es nicht gelingt, in ganz reinem Wasser neutrales Fett in mehr als Spuren zu verteilen und bald Entmischung erfolgt, ist die Herstellung einer dauerhaften Emulsion ohne weiteres möglich, wenn man etwas Alkali zufügt und so ein geringes Quantum von wasserlöslichem Seifenkolloid erzeugt. Auch im Protoplasma sind offenbar die zahllosen mikroskopisch und ultramikroskopisch unterscheidbaren Tröpfchen durch solche Schutzkolloide in ihrem dispersen Zustand erhalten. Derartige „Schutzhüllenbildungen“ wären nicht möglich, wenn nicht Adsorptionsaffinitäten zwischen den beiden Kolloiden vorhanden sein würden. Man darf annehmen, daß auch hier der elektrische Ladungssinn entscheidet und daß nur ungleichnamig elektrische Teilchen die Adsorptionsverbindung eingehen. Im Neutralfett dürften Spuren vorhandener freier Fettsäuren hinreichen, um das Kolloid negativ aufzuladen; adsorbiert werden daher die elektropositiv geladenen Alkaliseifen. Das amphotere Eiweiß wird in der Zelle sehr ausgiebig zu Adsorptionen an elektronegative und elektropositive Sus-

pensionskolloide verwendbar sein und auf diese Art eine große Rolle als Schutzkolloid spielen.

Ein Fall von Schutzkolloidwirkung liegt auch wahrscheinlich in der blauen Jodstärke vor. Da alle Einwirkungen, welche wie Alkoholzusatz, Jodkalium die Dispersität des Stärkekolloids herabsetzen, auch einen roten Färbungsumschlag der Jodstärkelösung herbeiführen, so kann man annehmen, daß sich dabei die Größe der Jodteilchen verringert, bis sie endlich die Größenordnung der Molekel erreicht und die braunrote Farbe der Jodjodkaliumlösung oder Jodtinktur auftritt. Analog den Goldsolen hat das gröber kolloid verteilte Jod eine blauviolette Färbung und die Stärke hat nur die Funktion, die Vereinigung der Partikel des kolloiddispersen Jod als „Schutzkolloid“ zu verhindern. In dieser Anschauungsweise wäre es begründet für Glykogen oder Erythrodextrin, die Jod mit braunroter, beziehungsweise weinroter Farbe lösen, eine geringere Schutzkolloidwirkung anzunehmen, die in der höheren Dispersität begründet ist. Schließlich wird im Achroodextrin die Teilchengröße der Kohlenhydratlösung so gering, daß eine Schutzkolloidwirkung nicht mehr zustande kommen kann. Dem Gesagten ist zu entnehmen, daß man nur mit Vorsicht aus einer roten Jodreaktion eines Kohlenhydrates auf dessen Identität mit Glykogen oder Amylodextrin schließen darf, da man ja in jeder Stärkelösung eine rote Jodreaktion in beliebiger Intensität durch Jodkaliumzusatz erzeugen kann.

Die Schutzwirkung bei Fettkolloiden zeigt sich sehr augenfällig in den Veränderungen von Nährgewebszellen während der Keimung. In ungekeimten Samen ist das Fett in kolloider Form im Plasma verteilt und wird offenbar durch Schutzkolloide in kolloiddisperser Form erhalten. Sobald aber durch das Eingreifen fettspaltender Enzyme freie Fettsäuren in erheblicherer Menge auftreten, wird die Isoelektrizität gestört und das Schutzkolloid ist nicht mehr ausreichend, um das Zusammenfließen der submikronischen Tröpfchen zu hindern: die Fetttropfen werden mikroskopisch sichtbar. Der Prozeß schreitet nun weiter bis zur völligen Entmischung von Fett und dem übrigen Zellinhalte. Auch im ruhenden Nährgewebe gelingt es, durch Wasserzusatz zu den Schnitten, die Schutzkolloide zu entfernen und die nämliche Entmischungswirkung eintreten zu lassen.

V.

Emulsoid-Sole, d. i. kolloide Lösungen amikronischer Dispersität und lyophilen Charakters, spielen im lebenden Protoplasma als aufbauende Faktoren die allergrößte Rolle. Die Lebenserscheinungen der Zelle sind wesentlich durch die physikalischen Eigenschaften solcher Bestandteile bestimmt. Die Emulsoide umfassen das Grenzgebiet der Kolloide gegen die echten Lösungen, welche dem Gasgesetz unterworfen sind. Sie gehen stetig über in Lösungen von größerem osmotischen Druck und hoher Dispersität (Semikolloide) und schließlich in molekulardisperse Lösungen. Ein gewisser Teil der Partikel in den Solen selbst dürfte bereits in den Bereich der Größenordnung der Einzelmolekel fallen. Die Feststellung von Adsorptionserscheinungen unterliegt hier oft bedeutenden Hindernissen durch den stark lösungsartigen Charakter solcher Kolloidflüssigkeiten, welcher durch die große Affinität der Kolloidpartikel zum Lösungsmittel bedingt ist. So ist es, wie bekannt, nicht mehr möglich, Eiweißlösungen durch kleine Elektrolytmengen zu floccen und nur große Salzmengen scheiden durch ihre Einwirkung auf das Dispersionsmittel das Eiweiß aus. Dies sind rein lyotrope Wirkungen. Es sei nochmals erwähnt, daß die quellbaren Gallerten von Leim oder Kohlenhydraten ganz parallele Erscheinungen in ihrem Verhalten zu Neutralsalzen aufweisen, so daß sich solche Gallerten und lyophile Emulsoide physikalisch sehr nahe stehen, sowie andererseits lyophobe Suspensoide und die porös-amorphen festen Ausscheidungen von festem unquellbarem Kolloid, die man auch hier als Gele bezeichnet.

Wir wollen die Kolloidadsorptionen an Emulsoiden nach der Art der adsorbierten Stoffe in Ionen-, Molekular- und Kolloidadsorptionen gliedern.

Das Studium der Ionenadsorption in Eiweiß-Solen hat im Anschlusse an die Arbeiten von Hardy besonders in den Untersuchungen von Wo. Pauli zu bemerkenswerten Anschauungen in der Physikochemie der Proteine geführt. Wenn man eine native Eiweißlösung durch Dialyse möglichst von beigemengten und reversibel adsorbierten Elektrolyten befreit, so gewinnt das Präparat Eigenschaften, welche es in charakteristischer Weise von dem ursprünglichen Eiweiß unterscheiden. Der elektrische Leitungswiderstand wächst enorm an, die Viskosität sinkt bis auf ein bestimmtes Minimum, und die Koagulierung durch Erhitzen oder

durch Alkohol ist viel ausgeprägter und leichter zu erreichen als beim nativen Eiweiß. In diesem „unelektrischen Eiweiß-Sol“ ist der Ionengehalt bis auf einen minimalen Betrag an negativen Ionen zurückgegangen und praktisch ist solches Eiweiß Nonelektrolyt. Fügt man zu solchem Eiweiß eine Spur Lauge oder Säure hinzu, nur bis zum Betrage von 1—3 Millimol, so ändert das Sol seine physikalischen Eigenschaften bedeutend. Außer dem Eintritt einer ausgeprägten elektrischen Leitfähigkeit, welche uns das Entstehen von Ionen anzeigt: Eiweiß-Anionen bei Laugenzusatz, Eiweiß-Kationen bei Säurezusatz, beobachtet man eine enorme Erhöhung der Viskosität und eine Verringerung der Koagulationsfähigkeit durch Hitze oder Alkohol. Dieser Zustand wird ionisiertes Eiweiß genannt. Beide Zustände sind reversibel ineinander überzuführen, wenn die Säure oder Lauge nur in sehr geringer Konzentration und nicht zu lange Zeit eingewirkt hat.

Von Interesse ist es, daß sich im lebenden Plasma Veränderungen hervorrufen lassen, welche augenscheinlich dem Übergang von unelektrischem in Ioneneiweiß entsprechen. Versuche von Dr. Böresch in unserem Laboratorium zeigten, daß in ausgetretenem Protoplasma von *Vaucheria* (welches in passend konzentrierter Van't Hoff-Lösung relativ sehr lange seine normale Beschaffenheit behält) kleine Alkalizusätze eine deutliche Quellung erzeugen, die sich durch Auftreten von Tröpfchen in Brownscher Bewegung verrät. Diese Veränderung geht nach Auswaschen des Alkali nach einiger Zeit zurück. Wahrscheinlich hat man hier elektro-negatives (Alkali) Eiweiß aus unelektrischem Plasmaeiweiß erzeugt, ein Vorgang, der reversibel ist.

Aus verschiedenen Gründen ist anzunehmen, daß im Protoplasma sowohl unelektrische als ionisierte Eiweiß-Sole vorkommen, und von dem relativen Mengenverhältnisse beider Stoffgattungen müssen die physikalischen Eigenschaften des Zellprotoplasmas in hohem Maße beeinflußt werden.

Nonelektrolyteeiweiß und Ionenprotein unterscheiden sich auch in sehr bestimmter Weise hinsichtlich der Adsorption von Salzionen. Da das Ionenprotein in seinen Eigenschaften viel mehr lösungs-ähnlich ist, als das unelektrische Eiweiß, so darf man voraussetzen, daß in dem letzterem die Ionenadsorption viel ausgeprägter möglich ist. So ist es auch tatsächlich gefunden worden. Setzt man zu ausdialysiertem Eiweiß eine geringe Menge von Neutralsalz, so wird die Koagulationstemperatur merklich erhöht und die Viskosität

erniedrigt (Wo. Pauli). Das Salzeiweiß ist dann stabiler als das salzfreie Nonelektrolyteiweiß. Da sehr geringe Salzmengen bei der Herbeiführung dieser Veränderung relativ viel wirksamer sind als größere, so ist die Annahme einer Salzeiweißadsorptionsverbindung nahegelegt, womit auch sonst alle Momente bei solchen Erscheinungen stimmen. Nur Elektrolyte, nicht aber Nichtleiter (Zucker, Harnstoff) sind in diesem Sinne wirksam. Während bei den Albuminen sowohl das Nonelektrolyteiweiß wie die Salzadsorptionsverbindungen löslich sind, ist das Nonelektrolyt-Globulin unlöslich und dessen Ionenadsorptionsverbindungen wasserlöslich. Es ist also möglich, daß Salzionen in der Zelle durch die Bildung von Globulinadsorptionsverbindungen bestimmte Eiweiß-Sole des Plasmas konstituieren helfen. Fügt man viel Salz zur Lösung eines Nonelektrolyteiweiß, so tritt außer der Adsorption die als Aussalzung bekannte Fällungserscheinung ein, welche mit echten Adsorptionen nichts mehr zu tun hat.

Wenn man zu Ioneneiweiß, z. B. Säureprotein, kleine Zusätze von Neutralsalz fügt, so beobachtet man, wie Pauli zeigte, Sinken der Viskosität, Förderung der Hitzeegerinnung und Alkoholgefällbarkeit, demnach Veränderungen, welche nicht anders als durch Rückgang der Ionisierung zustande kommen können. Die Zahl der elektronutralen Eiweißteilchen vermehrt sich und diese adsorbieren die zugesetzten Salzionen.

An lebenden Zellen lassen sich verschiedene dieser Ionenadsorptionen beobachten und erläutern. Szücs zeigte, daß Pflanzenzellen in Gegenwart sehr verdünnter Lösungen von Aluminiumchlorid keine Schädigungen durch sonst unbedingt letale Konzentrationen von Kupfersalzen erfahren, weil das dreiwertige Al-Ion stärker adsorbiert wird als die Cu-Ionen. Mit Al-Ionen gehen die Kolloide des Cytoplasmas von *Spirogyra* starre Adsorptionsverbindungen ein, welche jede plasmolytische Kontraktion verhindern, so daß Fluri gemeint hatte, daß Aluminiumsalze das Cytoplasma durch Permeabilitätserhöhung unplasmolysierbar machen. Auch diese Adsorptionserscheinung ist reversibel. Ferner ist Ionenadsorption bei der Aufnahme von Alkaloidbasen und von vielen Anilinfarben in lebende Zellen nach den Ermittlungen von Szücs vorauszusetzen. Immerhin ist es bei den Farbstoffen, wie Methylviolett oder Methylenblau, nicht leicht, Lösungs- und Adsorptionserscheinungen im Zellplasma auseinanderzuhalten. Endler, welcher diese Verhältnisse unter meiner Leitung eingehend studierte, konnte

aber doch herausfinden, daß die Beeinflussung der Aufnahme von Methylenblau durch gleichzeitig anwesende verdünnte Salzlösungen bei saurer Reaktion entgegengesetzt verläuft, wie bei alkalischer Reaktion, was bei reinen Löslichkeitsbeeinflussungen nicht zu erwarten wäre. Es dürfte sich somit wesentlich um Adsorptionsverdrängung von Farbstoff- und Salzionen handeln. Da die Umkehrung der Fällungsreihe der Salze gerade bei einer Säurekonzentration von 1 Mol auf rund 7000 Liter erfolgt, so kann man daraus einen Rückschluß auf die Lage des isoelektrischen Punktes, auf Ladungssinn und Ladungsquantität der Plasmakolloide ziehen. Allerdings stirbt das Zellplasma bei Erreichung dieser Säuregrenze stets ab und es ist nicht möglich, dasselbe reversibel elektropositiv aufzuladen.

An die Feststellung der Ionenadsorption und der Bedeutung derselben für die Untersuchung der Plasmakolloide knüpfen sich manche fundamentale Fragen der Zellphysiologie, vor allem das Problem, wie Aufnahme von Elektrolyten und Durchtritt derselben in das Zellinnere zustandekommt. In der Pflanzenphysiologie wird dieser Vorgang meist als Lösungsdiffusion behandelt. Diese Vorstellung verliert ihre unbeschränkte Gültigkeit sofort mit dem Nachweise, daß das Cytoplasma Nonelektrolyt-Proteine mit ausgeprägter Salzadsorption enthält. Ferner müßte die Salzaufnahme im Falle einer Diffusion echter Lösungen umso schneller erfolgen, je kleiner das Molekulargewicht der aufzunehmenden Salze ist, während wir den Versuchen von Eudler und von Szücs entnehmen müssen, daß umgekehrt die mehrwertigen Ionen der hochmolekularen Salze bei der Aufnahme bevorzugt werden. Dementsprechend werden ferner die am stärksten eiweißfällenden Anionen der lyotropen Reihe: Sulfate, Tartrate und Zitate am schnellsten in die Zellen aufgenommen. Besonders bei Zellen, welche mit sehr verdünntem Kaliumcyanid oder Ammoniak behandelt worden sind, konnte Krehan in hierorts angestellten Untersuchungen die verstärkte Aufnahme der Sulfate und zweiwertigen Kationen in die Zelle sehr leicht an der auffällig erhöhten plasmolytischen Grenzkonzentration von Salzen mit solchen Ionen erkennen. Aus allen diesen Erfahrungen wäre der wichtige Grundsatz abzuleiten, daß bei Salzaufnahme in lebende Zellen die Ionenadsorption in den Plasmakolloiden den entscheidenden Faktor darstellt, konform den auch von Pauli geäußerten Ansichten über die Stoffaufnahme in Zellen. Dies erklärt uns die Erscheinung, weshalb Salzionen mit hohem

Adsorptionswert wie Ca, Al, NH_4 , aber auch Alkaloid-Kationen rasch in die Zelle eindringen, während Kalium- oder Natriumhydroxyd relativ langsam permeieren.

Die großen Differenzen im Adsorptionswert der Salzionen legen uns ferner nahe, die Folgerung zu ziehen, daß das Leben der Zelle sehr stark von einer geeigneten Mischung der außerhalb der Zelle gebotenen Ionen abhängt, von einem „physiologischen Ionengleichgewicht“. Die wohlbekannte Erscheinung des Ionen-Antagonismus muß voraussichtlich Ionen von verschiedenem Adsorptionswert betreffen, und große Mengen schwächer adsorbierbarer Ionen werden durch kleine Mengen stark adsorbierbarer Ionen zu äquilibrieren sein. So ist es tatsächlich der Fall mit Natrium und Kalzium oder mit den Chlor- und Sulfationen. Die Vant 't Hoffsche Mischung, das „künstliche Seewasser“, ist nichts anderes als eine Gemeinschaft von Neutralsalzen, welche zum Plasmaeiweiß im Adsorptionsgleichgewicht stehen, d. i. seinen Ionengehalt durch Adsorptionsverdrängung in keiner Weise ändern. Solche Wirkungen sind in der Pflanzenphysiologie bei jedem plasmolytischen Versuch zu gewärtigen, und streng genommen sollte die Untersuchung des osmotischen Zelldruckes mittels plasmolytischer Methoden ausschließlich mit der Vant 't Hoffschen Salzmischung und nicht mit reinem Kaliumnitrat oder Natriumchlorid vorgenommen werden.

VI.

Die Adsorption von Nonelektrolyten durch gelöste Kolloide ist theoretisch noch sehr wenig studiert worden. Ansätze finden sich erst in jüngster Zeit in den Untersuchungen von S. Loewe über die Aufnahme von Farbstoffen, Alkaloiden, Chloroform durch Fette. Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen keinen Zweifel darüber, daß es sich in solchen Fällen nicht um Lösungsgleichgewichte und Lösungsverteilung handelt, sondern um typische Adsorptionen. Bekanntlich hat schon 1899 H. H. Meyer für die Erscheinungen der Narkose an Tieren die Ansicht ausgesprochen, daß hierbei der Fettgehalt des Zentralnervensystems als lösendes Agens eine hervorragende Rolle spielt. Er faßte die Verteilung der Narkotika im Körper geradezu als einen Fall des Berthelotschen Verteilungssatzes auf und maß die narkotische Wirkung der einzelnen Substanzen nach der Größe der Quotienten aus deren Löslichkeiten in Fett und in Wasser, unter der Annahme, daß für jeden Stoff

dieser Quotient bei einer bestimmten Temperatur unabhängig von der Konzentration eine konstante Größe sei. Wenn man jedoch die Verteilung der Narkotika auf Fett und Wasser in weit verschiedenen Konzentrationsbereichen prüft, so gelangt man, wie Loewe zeigte, zum Ergebnis, daß der Quotient $C_{\text{Fett}}/C_{\text{Wasser}}$ nicht dem Henry-Berthelotsehen Satze gemäß konstant ist, sondern für niedere Konzentrationen relativ höhere Werte, für hohe Konzentrationen relativ niedere Werte im Vergleiche zur Proportionalitätsregel annimmt. Es folgen vielmehr die Konzentrationen in Fett und in Wasser, wie es sonst bei Adsorptionsvorgängen der Fall ist, einer annähernd parabolischen Abhängigkeitsbeziehung. Schon vor längerer Zeit hat J. Traube auf ein weiteres beachtenswertes Moment aufmerksam gemacht, welches sich gleichfalls nicht aus der Annahme einer Lösungsverteilung erklären läßt. Die narkotische Wirkung homologer Alkohole und Ester nimmt nämlich in demselben Verhältnis zu, wie die Kapillaraktivität dieser Stoffe, so daß in Molen ausgedrückt von jedem höheren Glied einer Reihe nur der dritte Teil der Konzentration des nächst niederen Gliedes genügt, um Narkose hervorzurufen. Damit war ausdrücklich auf eine Beteiligung von Grenzflächenphänomenen im Protoplasma bei der Narkose hingewiesen.

Für Pflanzenzellen hat, wie wohlbekannt, E. Overton auf die wichtige Tatsache zuerst aufmerksam gemacht, daß Plasmolyse durch eine große Zahl von organischen Verbindungen nicht zu erreichen ist, offenbar deshalb, weil die Plasmahaut für jene Substanzen in hohem Maße durchlässig ist. Overton betonte, daß gerade solche Stoffe ein derartiges Verhalten zeigen, welche, wie Alkohole, Ester und andere Narkotika oder wie Alkaloide, in Fetten gut löslich sind, und er suchte deshalb diese Permeabilität der Plasmahaut für solche Substanzen durch die Annahme fettartiger Bestandteile im Protoplasma verständlich zu machen. Hier wollen wir darauf hindeuten, daß das reichliche Permeieren jener Stoffe auf starke Adsorbierbarkeit derselben an Plasmakolloide zu beziehen ist, und daß jene Substanzen gerade solche sind, welche als stark kapillaraktiv und stark adsorbierbar bekannt sind. Dabei spielt ein Prinzip mit, welches Willard Gibbs dahin formuliert hat, daß in Systemen, worin gelöste Substanzen enthalten sind, welche die Oberflächenspannung des Lösungsmittels herabsetzen, jene Stoffe sich an der Oberfläche ansammeln müssen, welche die stärkste Erniedrigung der Oberflächenspannung bedingen. Deshalb müssen

sich in kolloiden Systemen die kapillaraktiven gelösten Stoffe vor allem an den Grenzflächen ansammeln, d. h. an diesen positiv adsorbiert werden. In der Tat sind höhere Alkohole, Fettsäuren und andere stark kapillaraktive Stoffe durch Kohlenpulver stark adsorbierbar, und dem Gibbsschen Satze entsprechend, kann man eine solche Substanz durch Hinzufügen einer stärker kapillaraktiven Substanz von den Grenzflächen verdrängen. So wird die Bestimmung der Oberflächenspannung zu einem wichtigen Hilfsmittel in der Adsorptionsforschung.

An Pflanzenzellen läßt sich leicht zeigen, daß die tödliche Wirkung homologer Alkohole der oben genannten Regel von Traube entspricht. Die Wirkung nimmt mit dem Molekulargewicht in gleichem Schritte zu wie die Kapillaraktivität. Wie ich in früheren Arbeiten dargetan habe, läßt sich aber die Traubesche Regel für Pflanzenzellen zu dem wichtigen Satze erweitern, daß alle kapillaraktiven Lösungen ihre Giftgrenze in äquikapillaren Konzentrationen erreichen, sobald sie nicht besondere Giftwirkungen schon in geringeren Konzentrationen entfalten, was bei den Fettalkoholen, Ketonen, Estern der Fettreihe nur ganz vereinzelt der Fall ist. Stark fetthaltige Zellen folgen dieser Kapillaritätsregel nicht, sondern werden von den höheren Alkoholen erst in etwas höheren Konzentrationen bleibend geschädigt, als es nach der obigen Regel der Fall sein sollte. Diese Erfahrungen sprechen dafür, daß die Aufnahme und physiologische Wirkung aller dieser kapillaraktiven Stoffe wesentlich in das Gebiet der Grenzflächen- und Adsorptionserscheinungen fällt. In der Plasmahaut müssen Substanzen vorhanden sein, welche sich mit den Narkoticis beladen und durch diese Adsorptionserscheinungen schließlich jene Veränderungen erfahren, welche den unabwendbaren Tod der Zellplasmateile herbeiführen. Auf die Gründe, welche dafür sprechen, daß die bei solchen Adsorptionen wirksamen Plasmakolloide lipoidartiger Natur sind, womit bis zu einem gewissen Grade Overtons Anschauungen über die Gegenwart fettartiger Stoffe im Plasma bewahrt bleiben, kann hier nicht näher eingegangen werden. Es sei nur bemerkt, daß von einer geschlossenen Lipoidmembran im Sinne Overtons nicht die Rede sein kann, sondern das Fett in kolloiddisperser Form vorliegen dürfte. Auch läßt sich Overtons Meinung nicht halten, daß die Plasmalipoide den Weg der Stoffaufnahme in die Zelle darstellen. Es spricht vielmehr alles dafür, daß die Diffusion in die Zelle sich nur in hydroiden Medien ab-

spielt und auch die Narkotika nur soweit diffusionsfähig sind, als sie sich in den hydroiden Medien echt oder kolloidal lösen. Andererseits muß natürlich die Neigung dieser Stoffe, sich an den Grenzflächen der Plasmakolloide anzusammeln, eine rasche Diffusion und Ausbreitung der Narkotika in der Zelle unterstützen.

Daß beim Austausch wenig kapillaraktiver Nonelektrolyte, wie z. B. der Zuckerarten, wesentlich Adsorptionen mitspielen, ist nach dem Gesagten unwahrscheinlich. Indem solche Stoffe aber Alkaliverbindungen eingehen können, die ionisierbar sind oder komplexe Fettsäure- oder Eiweißverbindungen formulieren können, welche kapillaraktiv sind, so bieten sich viele Möglichkeiten, auch solche Substanzen in Ionenadsorption oder Molekularadsorption überzuführen, ein Prozeß, welcher reversibler Natur ist und allenthalben Zucker regenerieren lassen kann. Voraussichtlich liegt die ökologische Bedeutung der vielen Pflanzenglukoside ebenfalls auf diesem Gebiete, und als Säure- oder Phenolglukosid ist Zucker allenthalben fähig, an Elektro-Adsorptionen teilzunehmen.

VII.

Teilweise noch unvollkommen erforscht sind die Adsorptionserscheinungen zwischen gelösten Kolloiden untereinander. Am meisten ist bekannt von der durch elektrische Eigenschaften wesentlich bestimmten wechselseitigen Adsorption von Suspensoiden. Hingegen ist die Adsorption anderer flüssiger Kolloide durch lyophile Sole, welche Vorgänge umfaßt, die offenbar in großer Zahl und Mannigfaltigkeit im lebenden Zellinhalte stattfinden, nur wenig bekannt. Man darf von einer Reihe biologischer Erscheinungen voraussetzen, daß dieselben hier hingehören. Dies sind z. B. die Absättigungserscheinungen zwischen Enzymen und Antienzymen. Schon vor längerer Zeit konnte ich angeben, daß die durch Antienzym in ihrer Wirksamkeit gehemmte Wurzelspitzen-Oxydase wieder wirksam wird, wenn man die inaktivierte Lösung auf 62° C erwärmt. Dies beweist uns, daß keine Enzymzerstörung vorlag, sondern wahrscheinlich eine Adsorptionsverbindung, welche durch die Zerstörung des mehr thermolabilen Antienzyms wieder freies wirksames Enzym liefert. Allerdings sind jene Enzym-Antienzym-Bindungen streng spezifische Reaktionen, was sie von den gewöhnlichen Kolloidadsorptionen unterscheidet. Adsorptionsverbindungen dürften auch vorliegen, wenn sich Enzyme vom Zellplasma nicht

oder nur unvollkommen abtrennen lassen, also wo man nach dem heute üblichen Sprachgebrauche von „Endoenzymen“ spricht. Ob man das Recht hat, alle Agglutinationsreaktionen, Präzipitationsreaktionen, Antitoxin-Toxinbindungen in das Gebiet der Adsorptionserscheinungen einzubeziehen, muß noch abgewartet werden. Jedenfalls hätte man hier überall spezifisch verlaufende Adsorptionen vor sich, für welche die chemische Struktur, wahrscheinlich der sterische Aufbau (Konfiguration) von Wichtigkeit ist. Da die Kapillaraktivität bei Solen lyophiler Natur oft sehr ausgeprägt vorhanden ist, wie z. B. bei Alkalieweiß, so darf man vermuten, daß starke Adsorptionsaffinitäten hier vorkommen können. In der Tat läßt sich Eiweiß durch Kaolin und andere Adsorbentien binden, und ähnliches dürfte bei flüssigen Adsorbentien vorkommen, wenngleich derartige Fälle erst unzureichend studiert sind.

Solche reversible und irreversible Kolloidadsorptionen müssen ferner bei der Bildung von Grenzflächenmembranen im Protoplasma eine bedeutsame Rolle spielen. Durch die Adsorption von Salzionen, die speziell beim amphoteren Eiweiß weitgehende Bedeutung hat, nehmen die Sole den Charakter von elektrisch positiv oder negativ aufgeladenen Kolloiden an und müssen dementsprechend beim Eingehen von Adsorptionsverbindungen entgegengesetzt geladene Kolloide an sich reißen. Gewiß spielen elektrische Ladungsdifferenzen aber auch bei den Funktionen der Schutzkolloide eine wichtige Rolle. Es ist zu erwarten, daß ferner die Mengenverhältnisse beider Kolloide von Bedeutung sind, und im allgemeinen wird die Kolloidadsorptionsverbindung die Eigenschaften jenes Kolloids zeigen, welches im Überschusse vorhanden ist. So läßt sich verdünnte Eiweißlösung mit viel Mastixkolloid versetzt, wie Michaelis und Rona ausführten, ebenso wie Mastixsuspensoid allein, durch kleine Elektrolytmengen flocken, während das Mastixkolloid mit viel Eiweiß versetzt ein System von ausgeprägt lyophilen Eigenschaften darstellt. Daher kommt es zur Ausbildung mehrerer Fällungszonen bei niederer und höherer Elektrolytkonzentration.

Wahrscheinlich gehört die von Szücs im hiesigen Institute beobachtete Tatsache in den Kreis dieser Erscheinungen, daß die charakteristische starre Beschaffenheit des Zellplasmas durch Aluminiumsalze bei sehr geringer Al^{+++} -Konzentration eintritt, jedoch nicht bei höheren. Erst bei sehr hohen Al^{+++} -Konzentrationen sieht man wieder ein Starrwerden des Plasmas bewirkt werden. Sonst sind uns an der lebenden Zelle bisher einschlägige Fälle noch nicht

vor Augen gekommen. Wie man sieht, haben solche Erscheinungen manche Analogien mit Komplexbildungen bei chemischen Reaktionen.

Mit diesen Andeutungen müssen wir uns derzeit begnügen.

Gegenüber dem geschlossenen Aufbau der Lehre von den osmotischen Erscheinungen in der Zelle bietet die Zellkolloidchemie, wie aus unserer Darstellung hervorgeht, noch einen höchst unfertigen Zustand dar. Wir müssen darauf gefaßt sein, in der Lehre von den Adsorptionen im biologischen Substrat des Protoplasmas noch manches fallen zu sehen, worauf wir jetzt vielleicht große Hoffnungen setzen. Außerordentlich viel Arbeit wird noch zu leisten sein, um die verlässlichen physikalischen Fundamente zu schaffen, auf denen sich ein bleibender Bau als die Lehre von den Biokolloiden erheben soll.

Wichtig für die Physiologie bleibt aber die allgemeine Erkenntnis, daß nur von einer gründlichen physikalischen Erforschung des Lebenssubstrates dauernder und wahrer Fortschritt zu erhoffen ist.

Der Verfasser erinnert sich oft und dankbar eines Wortes aus dem Munde des Meisters der pflanzenphysiologischen Forschung, das er vor nunmehr zwanzig Jahren während seiner Arbeitszeit im Leipziger Institute im Laufe der vielen lehrreichen wissenschaftlichen Gespräche vernommen hat: daß in der Physiologie nichts sicher sei, was nicht dem Boden exakter physikalischer Methodik entprossen ist.

Prag, Juli 1914:

Pflanzenphysiologisches Institut der deutschen Universität.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahrbücher für wissenschaftliche Botanik](#)

Jahr/Year: 1915

Band/Volume: [56](#)

Autor(en)/Author(s): Czapek Friedrich

Artikel/Article: [Ausblicke auf biologische Adsorptionserscheinungen. 84-111](#)