DIE ALLGEMEINE
ABLEITUNG DER OBERFLÄCHENKRÄFTE

UND DIE
ANWENDUNG DER THEORIE DER OBERFLÄCHENSpannung
AUF DIE
SELBSTORDNUNG SICH BERÜHRENDER FURCHUNGSZELLEN.

VON
Prof. Dr. MARTIN HEIDENHAIN,
TÜBINGEN.

Mit 17 Abbildungen im Text.

Es mag auf den ersten Anblick hin auffällig erscheinen, dass der Autor mit einer Arbeit auf dem Plan erscheint, welche das entwicklungsmechanische Gebiet streift. Daher mag es zunächst erlaubt sein, dies Vorhaben in den Augen des Lesers hinreichend zu begründen und zu diesem Behufe mag es gestattet sein etwas weiter auszuholen.

Einleitung.

Theorie der Gewebe, Protoplasmatheorie und Molekulartheorie.

Seit einer langen Reihe von Jahren habe ich mich mit der allgemeinen Gewebelehre beschäftigt. Seitdem nun unsere Väter in den vierziger und fünfziger Jahren dieses Thema in Angriff nahmen und die histologischen Grundbegriffe ausbildeten, haben die Zeiten sich sehr geändert. Schwann's Theorie, welche die Zelle auch für tierische Gewebe als Grundlage der Betrachtung nahm, war dem Ursprunge nach weniger eine morphologische Strukturtheorie, welche sich auf den fertigen Zustand, vielmehr eine genetische Theorie, die sich auf die Entwicklung bezog. Gleichwohl sah die Folgezeit in der Zelle gleichsam den elementaren Baustein auch des

fertigen Körpers, — eine offenbare Anlehnung an die Botanik, welche zum mindesten bei Betrachtung der höher entwickelten tierischen Geschöpfe unzutreffend, ja fast ohne allen Wert ist.

Die alten Autoren der vierziger Jahre waren nun offenbar des Glaubens, dass sie bei ihren praktischen und theoretischen Untersuchungen über die Zusammensetzung der Gewebe auf dem Boden der exakten Naturwissenschaften ständen; denn mit dem Begriffe der cellulären Theorie der Gewebe verbanden sie (wenigstens im Anfang) die mehr oder weniger deutlich ausgesprochene Vorstellung, dass die Zelle gleichsam das organische lebendige Molekül sei. Denn die Zelle war in den lebenden Geweben die letzte Einheit, die man hatte. Und so fiel die histologische Theorie der Gewebe gewissermassen mit der Molekulartheorie zusammen; daher war der Name der »Elementarbestandteile« für die Zellen passend und die letzteren selbst waren auf dem Boden der organischen Naturwissenschaften dasselbe, was in der Physik und Chemie die Moleküle waren. Die damaligen Autoren hatten also in der Tat, wenn sie auf der Theorie der cellulären Zusammensetzung der Gewebe fussten, »histologische« Elementarbestandteile, welche der Leistung der Mikroskope insofern adäquat waren, als sie mittelst derselben aufgesucht und betrachtet werden konnten.

Allein die Sachlage musste sich ändern, sobald man erkannte, dass die Zelle selbst doch nicht jenen elementaren Charakter an sich trägt, den man im Anfang ihr zuzuschreiben geneigt war. Die Zelle erschien wiederum in sich zusammengesetzt und man fing an neue feinere »histologische« Elementarbestandteile in ihrer Leibessubstanz zu suchen. Man übertrug die Hypothese von der Existenz besonderer »histologischer« Elementarbestandteile, welche der Leistung des Mikroskopes adäquat sein sollten, gleichsam von dem Inhalt der Gewebe auf den Inhalt der Zelle. Diese unter sich wesensgleichen morphologischen oder histologischen Elementarteile des Plasmas glaubten die einen unter

dem Bilde von Fäserchen (Filartheorie), die anderen als Granula (Bioblastentheorie), noch andere als Bläschen (Wabentheorie) wahrzunehmen. Unter diesen so bezeichneten theoretischen Vorstellungen muss der Wabentheorie in gewisser Beziehung eine besondere Stellung eingeräumt werden, da eine Wabe im groben Sinne des Wortes kein diskreter morphologischer Elementarbestandteil sein kann. Und doch ist einerseits das Bläschen, wenn es als Basis einer histologischen Theorie genommen wird, ebenso gut eine elementare Formvorstellung, wie das Fäserchen oder das Granulum, und andererseits kann jedem Bläschen bei genauerem Eingehen auf die Physik der Dinge eine gewisse Individualität zugeschrieben werden, weil jedes derselben im Sinne der Theorie von einer physikalisch wirkamen Oberflächenschichte eingeschlossen ist, also als ein physikalisches und physiologisches Individuum betrachtet werden darf.

Die allgemeine Entwicklung der theoretischen Auffassungen ist also offenbar darin gegeben, dass man allgemein zu jeder Zeit nach besonderen morphologischen oder histologischen Elementarteilen der Gewebe suchte. Anfangs nun, nach dem Aufkommen der Schwannschen Theorie, sah man in der Zelle diesen gesuchten Elementarteil. Nachdem man aber das lebendige Protoplasma kennen gelernt hatte, sah man dieses als den wesentlichen Bestandteil der Gewebe an, und da es zusammengesetzt sein musste, suchte man in diesem selbst nach unter sich gleichwertigen Elementargebilden. Auf diese Weise kam es zur Entwicklung der modernen Plasmatheorien unter der Aegide ihrer Führer: Flemming, Altmann, Bütschli.

Es hat sich nun herausgestellt, dass dieser ganze Vorstellungskreis sehr viel Irrtümliches enthält. Hier füge ich hinzu, dass bisher, also etwa seit einem halben Jahrhundert, eine konsequente Durchbildung der Theorie der Gewebe nicht angestrebt wurde, und eben aus diesem Grunde lässt sich nur schwer fixieren, welches denn eigentlich zu jeder Zeit die herrschenden theoretischen

Vorstellungen oder die allgemeinen Überzeugungen in Bezug auf die Theorie der Gewebe gewesen sind. Man beschäftigte sich vorzugsweise mit Detailarbeiten. Die einen Autoren gingen wenigstens in Bezug auf einige Punkte voraus, andere blieben zurück; und unter Umständen finden sich in gleichzeitigen Schriften Vorstellungen vertreten, die der inneren Entwicklung der Dinge nach um Jahrzehnte auseinander liegen. Das Eine ist aber vollständig sicher, dass sich der Begriff der »histologischen« Elementarbestandteile immer mehr fixierte und dass mit der Vervollkommnung der Mikroskope und der übrigen Technik jene Elementarbestandteile immer mehr nach der Richtung des Kleinen hin zurückverlegt wurden.

Mit dieser Entwicklung sind mehrere Grundirrtümer verbunden gewesen.

Erstlich verlor die celluläre Theorie der Gewebe (so weit ich sehen kann) sehr bald ihren genetischen Charakter. Man bezog sie auf den fertigen Körper und bei allen höheren Geschöpfen fielen die Grundsubstanzen des Bindegewebes gleichsam aus der Theorie heraus. Diese Auffassung der Gewebe, welche später, nach dem Aufkommen der Darwinschen Theorie, gestützt auf die Vorstellung von der allgemeinen natürlichen Descendenz aller Zellen sich dahin verallgemeinerte, in dem Körper auch der höher entwickelten Geschöpfe einen »Zellenstaat« zu sehen, trug mithin von vornherein den Charakter einer einseitigen Schablone an sich, weil in dieser Theorie die Grund- oder Inter-cellularsubstanzen des Stützgewebes keinen Ort hatten. Überhaupt kann man sich dahin ausdrücken, dass die Inter-cellularsubstanzen in der Theorie der Gewebe seit Schwann jederzeit eine mystische Rolle gespielt haben. Der ältere Virchow, welcher wohl eingesehen hatte, dass die Inter-cellularsubstanzen ein schwacher Punkt der Gewebetheorie seien, sah sich veranlasst, in den fünfziger Jahren des abgelaufenen Jahrhunderts die Formel auszugeben, dass diese Substanzen als ein

Produkt der Zellen kein eigenes Leben hätten, sondern dass ihr Leben nur erborgt oder entlehnt von den Zellen sei.

Allein diese Formel, auf Grund deren die Intercellularsubstanzen einstweilen passend untergebracht erschienen, ist offenbar unrichtig, da nach meinen Untersuchungen wenigstens bei den Bindegewebsfibrillen und elastischen Fasern ein eigenes Vermögen der Assimilation, des Wachstums und der Vermehrung durch Längsspaltung nachweisbar ist.

Aber auch abgesehen von der Nichtberücksichtigung der Binde-substanzen war die Lehre vom Zellenstaat, welche mit der cellulären Theorie der Gewebe dem Begriffe nach zusammenfällt und nur ein fortentwickelter praegnanter Ausdruck der letzteren ist, eigentlich von vornherein auf höher entwickelte Geschöpfe unanwendbar. Denn diese Lehre vom Zellenstaat setzt unter sich gleichwertige Individuen voraus; es muss aber im Gegensatz hierzu anerkannt werden, dass bei weitem nicht alle aus den Zellen hervorgehenden Formbestandteile des menschlichen und tierischen Körpers den Charakter als Zellen dauernd bewahren und dass sie daher auf dem definitiven Zustande ihrer Entwicklung keineswegs mehr alle unter einander gleichwertig sind. Ein Leukocyt, eine quergestreifte Muskelfaser, ein Neuron und ein rotes Blutkörperchen haben etwa so viel Ähnlichkeit miteinander wie beispielsweise eine Laus, ein Elephant, ein Seestern und ein Hydroidpolyp. Mit anderen Worten: Ich kann es mit meiner Auffassung von wissenschaftlicher Präzision und Genauigkeit nicht vereinigen, dass in der Theorie der Gewebe die kolossalen Differenzen vieler ursprünglich aus Zellen hervorgehender Formbestandteile unberücksichtigt bleiben. In den Geweben sind vielmehr sehr verschiedenartige Abkömmlinge von Zellen vereinigt, welche sehr verschiedenen Reihen der Entwicklung und sehr verschiedenen Stufen der Organisation entsprechen. Demgemäß ist der fertige Körper eines höher entwickelten Geschöpfes in erster Linie eine Association

ungleichwertiger Formbestandteile, welche nur teilweise noch als Zellen bezeichnet werden dürfen. Die spezifische Selbstständigkeit solcher Zellenderivate geht beispielsweise bei den quergestreiften Primitivbündeln aus dem eigenen Vermögen der Fortpflanzung unmittelbar hervor; freilich, dass die Primitivbündel sich durch Spaltung vermehren ist eine Tatsache, die in den Lehrbüchern der Histologie gleichsam geflissentlich, weil unbequem, verschwiegen wird.

Weiterhin musste die Lehre von der Existenz besonderer morphologischer Elementarindividuen, nachdem sie in neuerer Zeit auf das Zelleninnere, auf das Protoplasma, übertragen worden war, einen vollständigen Schiffbruch erleiden. Diese Lehre schliesst die gänzlich irrige Annahme in sich ein, dass die kleinsten überhaupt zu unterscheidenden Teile des Protoplasmas mit bewaffnetem Auge von einander differenzierbar sein müssen. Von dieser falschen Prämisse aus kam man zu verschiedenen morphologischen Strukturtheorien des Protoplasmas, und auf Grund dieser Theorien fand ein Auseinanderfall in verschiedene Schulen statt, welche sich gegenseitig bekämpften. Gilt es freilich als Dogma, dass das Protoplasma überall morphologisch in unter sich gleichwertige Teile zerlegbar sein müsse, zwingt man sich unnützer Weise dazu, allüberall in das Plasma morphologisch diskrete Teile gleicher Art hineinzusehen, so muss man, falls diese Voraussetzung der morphologischen Auflösbarkeit des Plasmas an sich unrichtig ist, zu falschen Resultaten kommen; dann gelangt man mit Sicherheit von verschiedenen Objekten, verschiedenen Methoden, verschiedenen Gesichtspunkten ausgehend zu widerstreitenden histologischen Strukturtheorien, welche nicht in Übereinstimmung zu bringen sind.

Die Praxis der Dinge hat nun längst gezeigt, dass das Protoplasma nicht überall mikroskopisch auflösbar ist, und man kann auf Grund der Bedingungen der Untersuchung mit Recht

behaupten, dass man auch in aller Zukunft das Plasma nicht durchaus und überall in morphologisch unterscheidbare Elementarteile wird auflösen können. Daher habe ich mir schon seit langem klar gemacht und es öffentlich vertreten, dass die Lehre von der Existenz besonderer »histologischer« oder morphologischer Elementargebilde, welche gleichsam für das Mikroskop gemacht, d. h. dessen Leistung angepasst sind, unmöglich richtig sein kann.

Vielmehr kann man auf dem gesamten Gebiete der Naturwissenschaften einschliesslich der Gewebelehre in letzter Linie immer wieder nur zu den nämlichen Elementarteilen kommen, und wenn diese auf dem Gebiete der Physik und Chemie in Molekülen und Atomen gegeben sind, so muss das Gleiche auch in der Histologie, auf dem Boden der Gewebe- und der Plasmatheorie der Fall sein.

Wir können also die Annahme besonderer histologischer Elementargebilde nicht gelten lassen. Eine durchgreifende allgemeine morphologische Strukturtheorie des Protoplasmas, welche sich auf das angebliche Vorhandensein wesensgleicher, morphologischer(oder »histologischer«) Elementargebilde stützt, ist unmöglich. Es kann garnicht denkbar möglich sein, dass neben den materiellen Elementargebilden der Physik und Chemie, neben Molekülen und Atomen, in der Gewebelehre noch besondere Elementargebilde sollten herauskonstruiert werden können, welche die rein äussere Bedingung der mikroskopischen Sichtbarkeit erfüllen. Vielmehr ist es das Natürlichste und Wahrscheinlichste, dass der Unterschied zwischen mikroskopischen und metamikroskopischen oder molekularen Strukturgebilden ebenso gleitend oder fliessend und ebenso subjektiv (anthropomorph) ist, wie der Unterschied zwischen makroskopischen und mikroskopischen Strukturgebilden.

Wie die Gewebe schon bei oberflächlicher Zergliederung als eine Association ungleichwertiger Bestandteile erscheinen (Zellen, Muskelfasern, Neuronen, Bindegewebsbündel etc. etc.), so ist auch die Zelle selbst offenbar eine Association ungleichwertiger Organisationsstufen. Denn wir haben in der Zelle teils nebeneinander, teils ineinander geschachtelt: Kern, Chromosomen, Chromatinkügelchen, Mikrocentren, Zentralkörper, Chlorophyllkörner und andere Chromatophoren, fibrilläre Differenzierungen verschiedener Art, Granula (letztere teils mit, teils ohne eigene innere Organisation), Protoplasmamikrosomen und noch viele andere hier nicht aufgezählte Produkte der Differenzierung. Von diesen Gebilden charakterisieren sich die einen deutlich als Individuen, indem sie das eigene Vermögen der Fortpflanzung durch Spaltung besitzen; solche Körper existieren in der Zelle teils neben und bis zu gewissem Grade unabhängig von einander, teils treten sie als Individuen niederer Ordnung zu organisierten Verbänden oder Individuen höherer Ordnung zusammen. Dies letztere Verhältnis ist am leichtesten beim Kern erkennbar. Denn offenbar sind schon die drehrunden Chromatinkügelchen fortpflanzungsfähige Individuen einer niederen Ordnung; aus ihnen bilden sich die spaltungsfähigen Chromosomen und diese selbst setzen den Kern (in seinen wesentlichen Teilen) zusammen, welcher selbst wiederum teilungsfähig ist. Jedoch muss wohl angemerkt werden, dass in den Aufbau der Individuen oder organisierten Verbände höherer Ordnung ganz gewöhnlicher Weise plasmatische Bestandteile mit eintreten, die für sich selbst betrachtet morphologisch nicht mehr auflösbar, homogen sind (beim Kern z. B. die verbindende Linsubstanz).

Die Grundlage aller sichtbaren Strukturen und aller diskreten morphologischen Formbestandteile der Zelle ist aber sicherlich das anscheinend homogene, morphologisch nicht mehr auflösbare, molekular organisierte Protoplasma, das sogn. »intakte« Protoplasma von Altmann.

Viele Zellen, besonders diejenigen von geringer Grösse, haben anscheinend homogene Zelleiber. Durch Vergleich (z. B. kleiner und grosser Leukozyten) lässt sich am Objekte selbst zeigen, dass bei ihnen die tatsächlich vorhandene Struktur auf molekularem Gebiete liegen muss. Strukturen, welche im Anfang auf molekularem Gebiete angelegt waren, können durch Wachstum die Schwelle des mikroskopisch Sichtbaren überschreiten. Daher geht die mikroskopisch sichtbare Struktur an vielen Stellen gleichsam in sich selbst unmerklich auf das molekulare Gebiet über; so konnte ich zeigen, dass die angeblichen histologischen Elementarfibrillen in den Muskeln (auch im Bindegewebe) nichts anderes sind als ungleichwertige, weil ungleich dicke Bündel von »Molekularfibrillen«.

Fassen wir uns also zusammen, so können wir sagen, dass die wahren Einheiten der Gewebetheorie und implicite auch der Plasmatheorie nur die »lebendigen Moleküle« der Physiologen sein können. Diese besitzen an sich das Vermögen der Assimilation, des Wachstums und der Vermehrung durch Teilung. Auf dieser Basis begründet sich ein gewisses Prinzip der Organisation, welches darin zu suchen ist, dass eine Mehrzahl der kleinsten lebenden Teile unter Annahme einer gemeinsamen morphologischen und physiologischen Verfassung und unter Vermittlung von Wachstum und Teilung zu kleinsten morphologisch sichtbaren Individuen zusammentreten, welche ihrerseits wiederum einem ähnlichen Prozess der Organisation unterliegen können, woraus Organisationsstufen eines höheren Ranges resultieren. In der Zelle selbst aber haben wir schliesslich einen organisierten Verband von Individuen oder Organisationsstufen verschiedener Art, in welchen Ausdruck wir die meist vorhandenen homogenen oder nur molekular organisierten Plasmamassen mit einschliessen können. Die Zellen selbst wiederum entwickeln sich nach den verschiedensten Richtungen und unter ihrem Einfluss, bzw. mit ihrer Beteiligung entstehen die sogen.

Interzellulärsubstanzen, die aber offenbar wenigstens teilweise selbst wiederum die Fähigkeit der Assimilation, des Wachstums und der selbsttätigen Vermehrung besitzen. Mithin setzt sich der Körper der höher organisierten Geschöpfe aus sehr verschiedenartigen Formbestandteilen zusammen, deren gemeinsame Grundlage in der molekularen Konstitution der lebenden Masse und deren spezifischen Eigenschaften zu suchen ist.

Mithin muss es die Aufgabe des modernen Mikroskopikers sein, sich mit der Molekulartheorie zu befassen und auf diesem Gebiete kann eine Tätigkeit nach den verschiedensten Richtungen hin stattfinden. Nachdem ich mich in den letzten Jahren vielfach mit chemischen Dingen beschäftigt habe, möchte ich für meinen Teil wohl glauben, dass zwischen chemischer und histologischer Struktur mit der Zeit gewisse Parallelen sich werden finden lassen. Einstweilen dürfte indessen die Beschäftigung mit den auf dem Gebiete der Physik liegenden Molekularkräften nützlicher sein. Hier haben wir das grosse Gebiet der elastischen Kräftewirkungen, welche, wie allgemein bekannt, sowohl auf dem Gebiete der Bindesubstanzen (von Ebner), als auch auf dem Gebiete des Protoplasmas (M. Heidenhain schon von 1892 an) Richtung, Ordnung und Differenzierung des lebenden Materiales bewirken.

Mit dieser meiner These, dass zwischen den durch elastische Spannung bewirkten Differenzierungen der Bindesubstanz und sehr vielen Differenzierungen des Protoplasmas eine nähere Parallele besteht, stehe ich in einem gewissen Gegensatz zu denjenigen Forschern, welche bezüglich der Plasmastruktur in erster Linie nicht diejenigen physikalischen Molekularkräfte in Anspruch nehmen wollen, welche typisch sind für den festen Aggregatzustand, die vielmehr von den bei flüssigen Körpern in besonders charakteristischer Weise sich äussernden Molekularkwirkungen ihren Ausgang nehmen (Bütschli, Berthold u. A.).

Die Behauptung, dass die Strukturfestigkeit tierischer Zellen aus der elastischen Spannung¹⁾ der Protoplasmastruktur zu erklären sei, ist von mir zuerst näher begründet worden (1895); überhaupt habe ich zuerst die Strukturfestigkeit protoplasmatischer Körper als ein besonderes Problem behandelt (schon 1894). Ebenso habe ich zuerst unter allen Autoren darauf hingewiesen, dass das protoplasmatische Struktursystem des quergestreiften Muskels und analoger Zellstrukturen (z. B. Darmepithelzellen) in demselben Sinne aufzufassen sei, wie die geordneten Systeme der Druck- und Zugkurven der Knochenspongiosa (d. h. dass es sich auch in diesen Fällen um Spannungstrajektorien handle; zuerst 1896, dann 1899). [Diese theoretischen Entdeckungen am Protoplasma gingen Hand in Hand mit weitgehenden Studien über Knochenspongiosa, für welche meine ausführliche Demonstration über die Struktur des Beckens zu Kiel im Jahre 1898 ein Beleg ist.]

Ferner zeigte ich (1897), dass die Stränge beweglichen Protoplasmas in Pflanzellen, welche, weil sie das Phänomen der Körnchenströmung zeigen, von einigen Autoren für flüssiger Natur gehalten werden, von den feinsten bis zu den größten straff gespannt sind, ein Spannungsphänomen, welches nur durch elastische Spannung im engeren Sinne erklärbar ist, durch Oberflächenspannung dagegen nicht, weil letztere, wenn sie irgend einen höheren Wert hätte, die Plasmafäden in Kügelchen zerlegen müsste.

Weiterhin habe ich diejenigen fibrillären Differenzierungen des Zellinhaltes, deren Vorhandensein unmittelbar auf die richtende Wirkung elastischer Spannungen zurückzubeziehen ist, mit einem besonderen wissenschaftlichen Namen belegt

¹⁾ Über den Einfluss elastischer Spannung auf Form und Differenzierung der Protoplasmastrukturen habe ich seit 1890 in vielen meiner Schriften mich geäußert. Siehe darüber das Lit.-Verz.

(Tonofibrillen, Tonomitom 1899, auch 1900), dies mit der ausgesprochenen Absicht hierdurch die besondere Aufmerksamkeit des wissenschaftlichen Publikums wachzurufen, weil ich nämlich wohl wusste, dass hier Tatsachen von ganz allgemeiner Verbreitung vorliegen, welche ein unübersteigliches Hindernis für die Verifikation der Hypothesen der biologischen Theoretiker der Oberflächenspannung sein würden.¹⁾ Trotzdem hat Rhumbler kürzlich versucht, die von mir vertretenen Anschauungen über Strukturfestigkeit der Zellen, meine Theorie der intravitalen Spannung plasmatischer Systeme (von 1895), meine Aufstellungen über das Vorkommen von Kurven maximaler Zug- und Druckwirkungen in Plasmastrukturen auf der Grundlage der Oberflächenspannung neu zu entwickeln. Indessen scheitert dieser Versuch an zwei Umständen. Erstlich findet man, dass die Überschneidungen protoplasmatischer Struktursysteme, wenn Spannung die Ursache einer bestimmten Orientierung im Raume ist, immer rechtwinklige sind, und zweitens handelt es sich in diesen Fällen gewöhnlicher Weise um permanente Strukturen, d. h. um solche, welche nicht bloß von zeitweiliger Existenz sind. Beides ist aber in flüssigen Schäumen unmöglich.

Nun ist es aber offenbar immer sehr nützlich, wenn man sich auf das Gründlichste über den theoretischen Fundus der Gegner orientiert, und da, wie schon hervorgehoben, ein moderner Theoretiker der allgemeinen Anatomie ohnehin gezwungen ist, sich mit Molekularstrukturen und Molekularkräften verschiedener Art zu befassen, so habe ich Veranlassung genommen das Wesen der Oberflächenkräfte, von welchen Bütschli

¹⁾ In der Tat haben in neuerer Zeit einige Autoren (Maziarski, Wera Polowzow, Studnicka) ihre Aufmerksamkeit den Tonofibrillen zugewendet. In der Arbeit von Maziarski über den Ansatz der Muskeln an die Cuticula bei Crustaceen dürfte das schönste Beispiel dieser Art enthalten sein.

und seine Anhänger ausgehen, allermöglichst genau zu studieren. Dies hätte ich in Rücksicht auf mein Arbeitsgebiet schon um der Wabentheorie willen tun müssen. Ferner aber haben, von den Zoologen und Botanikern abgesehen, auch einige Physiologen aus der Lehre von der Oberflächenspannung Nutzen zu ziehen versucht, indem zuerst Verworn, später Jensen¹⁾ und last not least Bernstein die Lehre von der Bewegung der lebendigen Substanz auf dieser Basis zu begründen suchten. Nun ist aber die Lehre von der Bewegung so innig verknüpft mit der Frage nach dem feineren Aufbau des Protoplasmas, dass beide Gebiete an vielen Punkten gleich-

1) Jensen sagt mit Bezug auf den „Aggregatzustand“ des Protoplasmas: „Hierin vertritt der weitaus grösste Teil der Protoplasmaforscher wie M. Schultze, Haeckel, Kühne, Berthold, Bütschli, Verworn, Schaudinn, Rhumbler, Jensen und viele andere die bei näherer Sachkenntnis nicht mehr anzuzweifelnde Ansicht, dass die protoplasmatische Grundmasse, im besonderen auch diejenige der rhizopoiden Zellen, eine mehr oder minder zähe Flüssigkeit sei.“ „Den genannten Anschauungen werden die schon etwas veralteten Annahmen eines festen Aggregatzustandes und besonderer Molekularstrukturen nach Art der Micellarstruktur, wie sie von Flemming, Schenck, M. Heidenhain, Hörmann und anderen verfochten werden, nicht mehr das Feld streitig machen können.“ Es ist notwendig diese unbedachten Äusserungen niedriger zu hängen. Die Behauptung, dass „der weitaus grösste Teil der Protoplasmaforscher“ die „Grundmasse“ des Plasmas für flüssig hält, ist positiv unrichtig. Diese Ansicht ist nur bei einer kleinen Gruppe von Gelehrten verbreitet und Jensen's Äusserung zeigt nur, dass er von der Ausdehnung der Plasmaliteratur keine Kenntnis hat. Die „nähere Sachkenntnis“, ist ferner meiner Meinung nach auch bei denjenigen Plasmaforschern verbreitet, welche der gegenteiligen Ansicht sind, deren Schriften aber von Jensen nicht gewürdigt werden. Auch dürfte die Lehre von dem sogen. „festen“ Aggregatzustand keine „veraltete Annahme“ sein, sondern sie ist einstweilen noch die herrschende und sehr wohl begründete Lehre der Anatomie und der Physiologie. Meiner Meinung nach dürften alle Anatomen, alle Neurologen und der weitaus grössere Teil der Physiologen dieser Überzeugung sein. Sachlich werde ich diesen Punkt ein and Mal behandeln.

sam in Eins zusammenfallen. Man ist also heutzutage verpflichtet, auch im Hinblick auf die Kontraktionstheorie sich mit den Oberflächenkräften zu beschäftigen. Allein ich bin noch von einer dritten Seite her auf eben dieses Gebiet aufmerksam geworden. Es ist nämlich die Adsorption offenbar nichts anderes als eine übrigens genau zu bezeichnende Komponente der Oberflächenkräfte. Da nun die Adsorption eine gewisse nicht zu unterschätzende Rolle in der Theorie der histologischen Färbungen spielt, die letztere aber von jeher und gerade in der jüngst vergangenen Zeit der Gegenstand meiner besonderen Aufmerksamkeit war, so ergab sich für mich ein persönlicher Grund mehr, dem Studium der Oberflächenkräfte Zeit und Arbeit zu widmen. Was schliesslich die im Titel dieser Arbeit genannte Rouxsche »Zellenzusammenfügung« (»Cytarme«) betrifft, so bin ich erst während und infolge einer planmässigen Durcharbeitung der gesamten Lehre von der Kapillarität darauf aufmerksam geworden, dass gerade an diesem Beispiel die Einwirkung der Oberflächenkräfte auf protoplasmatische Körper in einer relativ einfachen und durchsichtigen Weise aufgezeigt werden kann. Es erschien daher nützlich, das Beispiel der Rouxschen Cytarme in den Vordergrund der weiteren Behandlung zu stellen, ein Entschluss, den ich im einzelnen wie folgt zu begründen vermag.

Als ich an die Lehre von der Kapillarität heranging, glaubte ich, dass ich die Sache ohne grosse Schwierigkeit bewältigen würde, da ich ja nicht ohne einige Kenntnis des Gegenstandes war. Erst die genaue Durcharbeitung zeigte mir, dass dies Kapitel ungemein schwierig ist; schwierig werden die Dinge aber immer dann, wenn sie anfangen unklar und undurchsichtig zu werden, und dies ist hier in hohem Grade der Fall. Nach einem langwierigen Studium bin ich zu der Überzeugung gekommen, dass die Lehre von der Kapillarität erst in ihren Anfängen begriffen ist, dass die physikalischen

Grundlagen noch nicht so weit ausgearbeitet worden sind, um eine Anwendung auf biologische Erscheinungsweisen leicht und mit einiger Sicherheit möglich zu machen. Beweis genug hierfür sind die letzten Arbeiten Rhumblers, die nur als ein Zerrbild physikalischer Betrachtungsweise gelten können.

Die Lehre von der Oberflächenspannung hat sich noch nicht so weit fixiert, dass betreffs ihrer Grundlagen zwischen den Physikern Übereinstimmung herrschte. Daher dürfte man auch nicht zwei Lehrbücher der Physik auffinden, welche nur in nebensächlichen Dingen miteinander in Streit lägen. Dies soll kein Misstrauensvotum an die Adresse der Physik sein; denn der einzelne Forscher ist nicht dafür verantwortlich, dass die physikalische Ausarbeitung des in Frage kommenden Kapitels im ganzen noch nicht zu einhelligen Resultaten geführt hat. Es liegt dies eben in der Schwierigkeit der Sache. Vielmehr muss mit Bewunderung anerkannt werden, dass einzelne Physiker geradezu ihr ganzes Leben daran gesetzt haben, um auf diesem Gebiete das Mögliche zu erreichen, und es sind auch im Hinblick auf viele einzelne Fragen glänzende Resultate erzielt worden.

Meiner Meinung nach sollte indessen jeder Forscher auf biologischem Gebiete, welcher die Oberflächenkräfte in seiner Disziplin zu verwerten gedenkt, sich zunächst davon überzeugen, wie gefährlich dieser Boden für den Nicht-Physiker ist. Wenn schon die Physiker selbst in der Theorie der Kapillarscheinungen von einander differieren, wobei naturgemäß nicht mehrere Personen gleicher Weise im Recht sein können, also Fehler der Betrachtung hier und dort vorliegen müssen, wie sollte es dann dem Laien möglich sein, auf diesem Gebiete sich ohne Entgleisung zu bewegen.

Ich glaube, dass jeder Fachgenosse sich ohne weiteres davon wird überzeugen können, dass der physikalische Boden noch nicht soweit bereinigt ist, dass eine Verwertung der Be-

griffe und Formeln der Kapillaritätstheorie in der Biologie ohne weiteres stattfinden kann. Ich schlage dem Leser dieser Zeilen, welcher sich für den Gegenstand interessiert, vor, eine Stichprobe zu machen, und die Erklärung einer Kapillarerscheinung einfachster Art bei verschiedenen Autoren nachzusuchen. Als solche nenne ich die Erhebung oder Depression eines Flüssigkeitsspiegels an einer vertikalen Wand: man lese der Reihe nach die Handbücher von Pfaundler (Müller-Pouillet), Violle und Chwolson, und wenn man sich nun überzeugt hat, dass die Erklärung dieses einfachen Phänomens auf ganz verschiedenen Grundlagen gegeben wird, dann lese man weiterhin noch über die Erhebung oder Depression einer Flüssigkeit in einer Kapillare. Es ist selbstverständlich, dass die Steigung an einer Wand und die Steigung in einer Kapillare dasselbe Phänomen sind, dass es sich nur um zwei verschiedene Spezialfälle, welche aus dem nämlichen Gesetze abgeleitet werden müssen, handeln kann. Und doch wird man wiederum finden, dass die Erscheinungen in Kapillarröhren auf anderer Basis abgehandelt werden als der erstere Fall. Wenn der Leser so weit gediehen ist, wird er vermutungsweise meine Ansicht teilen, beziehungsweise wenigstens begreifen, dass wir alle Ursache haben, mit der Anwendung der Theorie der Oberflächenkräfte in der Biologie nicht allzusehr zu eilen.

Nun liegt aber die Sache so, dass es bereits eine grosse Anzahl biologischer Schriften gibt, welche mit den Oberflächenkräften arbeiten. Daher hat meiner Meinung nach der Biologe in erster Linie die Verpflichtung zu sagen, an welches Handbuch der Physik, bzw. an welchen Autor er sich bei seinen Ableitungen halten will. Denn es kann z. B. nicht gleichgiltig sein, ob ich in allen Stücken Quincke folge oder Mensbrugghe, zwei Autoren, die in grundlegenden Beziehungen Gegensätze vorstellen. Bei so beschaffener Lage hatte ich für meinen Teil den Wunsch, mir aus dem Studium physikalischer

Schriften ein eigenes Glaubensbekenntnis herauszubilden, und ich habe dies getan. Ich habe mir für mein Bedürfnis eine (private) Ausarbeitung über die gesamte Kapillaritätslehre hergestellt, an welche ich mich einstweilen gelegentlich der Abgabe von Urteilen in biologischen und histologischen Schriften halten werde. Für heute ist es nur mein Wunsch, bei meinen Fachgenossen einen treffenden Eindruck davon hervorzurufen, wie schwierig diese Dinge sind, und zu diesem Behufe möchte ich in diesem Aufsatz die allgemeine Ableitung der Oberflächenkräfte voranschicken.

In zweiter Linie würde es sich darum handeln, diese Ableitung an irgend einem biologischen Beispiel zu exemplifizieren. Die Rouxschen Beobachtungen über Zellenzusammenfügung eignen sich nun meiner Meinung nach darum, weil sie so genau und gründlich geschildert worden sind und weil es sich offenbar hier um einen relativ einfachen Fall der Wirkung von Oberflächenkräften handelt. Die Fragen der Protoplasmastruktur und der Bewegung sind im Vergleich hierzu sehr viel schwieriger; ich werde mich über diese und ihr Verhältnis zu den Oberflächenkräften erst in späteren Abhandlungen genauer auslassen.

Weiterhin möchte ich sogleich noch folgendes hinzufügen. Die Natur des uns beschäftigenden Gegenstandes bringt es mit sich, dass ich an der physikalischen Auffassung Roux's Ausstellungen zu machen habe. Ich halte mich aber in der Tat eben nur am die rein physikalische Seite der Sache, während ich die Folgerungen auf die Entwicklungsmechanik berufeneren Autoren überlasse. Es kommt mir eben weniger auf die Entwicklungsmechanik, vielmehr darauf an zu prüfen, in welcher Art die Oberflächenkräfte an der gemeinschaftlichen Grenze der Zelle und eines zweiten wässrigen Mediums sich betätigen.

Nunmehr lasse ich jene elementare Ableitung der Oberflächenkräfte in extenso folgen, an welche ich mich in meinen

ferneren Arbeiten zu halten gedenke. Diese Ableitung gebe ich absichtlich ausführlich, weil ich bemerkt zu haben glaube, dass die vorhandenen sachlichen Schwierigkeiten und die Lücken der Theorie in den kurz gefassten Ableitungen der physikalischen Lehr- und Handbücher nicht auffällig genug werden.

Erster Hauptteil.

Elementare Ableitung der Oberflächenkräfte.

Die Lehre von der Kapillarität im weitesten Sinne umfasst eine grosse Reihe von Erscheinungen, welche der Annahme nach sämtlich zurückführbar sind auf die Massenanziehung kleinster Teilchen. Es handelt sich also in letzter Linie um Molekularkräfte, um die **Anziehungskräfte**, welche zwischen den Molekülen herrschen; jene treten bei festen und flüssigen Körpern für uns zunächst unter dem Bilde der »Kohäsion« in die Erscheinung, während bei gasförmigen Medien diese Kohäsion so gering ist, dass es ganz besonderer Untersuchungen bedarf, um ihre Gegenwart auch dort festzustellen.

Begrenzen sich nun zwei Medien an einer gemeinschaftlichen Trennungsfläche, so resultieren aus der allgemeinen Kohäsion Teilkräfte besonderer Art, welche zu besonderen Wirkungen führen. Diese besonderen Wirkungen sind bekannt als: 1. Oberflächenspannung (Tangentialspannung); 2. Krümmungsdruck; 3. Adsorption; 4. Adhäsion; 5. Kapillarität.

Wir besprechen zunächst einleitend und beispielsweise die Grunderscheinungen, welche Veranlassung zu den aufgezählten Unterscheidungen gegeben haben.

Die Erscheinungen der **Oberflächenspannung** bieten der Auffassung keine besonderen Schwierigkeiten dar, sobald auf eine Ableitung aus den Molekularkräften Verzicht geleistet wird. Seit etwa einem Jahrhundert (Thomas Young 1805) weiss man, dass eine Flüssigkeitsoberfläche, wenn sie von einem gasförmigen Medium (bezw. einem Vakuum) begrenzt wird, in einem Zwangszustande befindlich ist, durch welchen eine Verkleinerung der Oberfläche intendiert wird. Diesen Zwangszustand bezeichnet man als Oberflächenspannung (besser: Tangentialspannung, da der Ausdruck Oberflächenspannung von verschiedenen Schriftstellern in verschiedenem Sinne gebraucht wird.); hierdurch soll zum Ausdruck gebracht werden, dass die Flüssigkeitsoberfläche einer Kräftewirkung unterliegt, welche am ehesten der elastischen Spannung eines gedehnten Kautschukhäutchens vergleichbar ist. Und wir wollen sogleich hinzufügen, dass auf diesem nicht eben gerade sehr treffenden Vergleiche ein grosser Teil der Kapillaritätslehre beruht.

Von der Existenz dieses permanenten Zwangszustandes kann man sich leicht an Seifenlamellen überzeugen. Man biegt sich zunächst einen rechteckigen Rahmen aus dickem Nickelindraht zusammen; an der einen Ecke wird man passender Weise die überstehenden Drahtenden zu einem Handgriff vereinigen. Ferner bringt man in dem Rahmen ein bewegliches, äusserst feines Querdrähtchen an, ebenfalls aus Nickelin; die Befestigung des letzteren beiderseits an den Längsdrähten des Rahmens kann vermittelt weiter spiraliger Umrollungen erfolgen. Nunmehr taucht man den Rahmen in eine Seifenlösung und erzeugt eine Flüssigkeitslamelle, welche sich von dem Querdrähtchen ausgehend in dem Rahmen nach beiden Seiten hin ausspannen wird. In diesem Falle halten sich die beiden Teile der Flüssigkeitslamelle zu beiden Seiten des Querdrähtchens das Gleichgewicht, da der Wert ihrer Spannung beiderseits identisch ist. Erhebt man also den Rahmen zur Vertikalen, so fällt das

Querdrähtchen der Schwere folgend herunter. Zerstört man nun aber den unteren Teil der Flüssigkeitslamelle, indem man dieselbe mittelst Fliesspapier aufsaugt, so wird das Drähtchen von dem oberen Teile der Lamelle sofort entgegen der Schwere bis zum anderen Ende des Rahmens emporgehoben. Zerstört man nunmehr auch den oberen Teil der Flüssigkeitslamelle, so fällt das Drähtchen wiederum herunter. Bedingung des Versuchs ist selbstverständlich, dass das Gewicht des Drähtchens nicht zu gross ist.

Man kann sich ferner noch auf eine andere primitive Weise von dem Vorhandensein der Oberflächenspannung überzeugen. Zu dem Behufe bestreut man einen Wasserspiegel mit *Lykpodium* und setzt einen Tropfen Alkohol hinein. Da der Wert der Oberflächenspannung beim Alkohol geringer ist als beim Wasser, so findet kein Gleichgewicht zwischen den Flächen Wasser/Luft und Alkohol/Luft statt; vielmehr zieht sich die Fläche Wasser/Luft mit Gewalt zusammen und der Alkoholtropfen erleidet eine entsprechende Ausbreitung über den Flüssigkeitspiegel hin. Hierbei wird das *Lykpodium* mit grosser Geschwindigkeit nach allen Richtungen hin auseinandergedrängt. Mithin führen Differenzen im Werte der Oberflächenspannung mit Leichtigkeit zu heftigen Strömungserscheinungen.

Eine Flüssigkeitsoberfläche ist also in der Tat gewissermassen in dem Zustand einer inneren Spannung begriffen, welche mit der Spannung einer Kautschukmembran verglichen werden kann. Dieser Vergleich ist nicht völlig zutreffend, aber er ist unausweichlich, weil eine andere irgendwie mit Vorteil verwertbare Analogie bisher nicht aufgefunden werden konnte. Somit beruht die Lehre von der Oberflächenspannung allerdings zum grossen Teil auf dem Vergleich mit einer gespannten Membran. Diese Spannung ist innerhalb einer Flüssigkeitsoberfläche jedesmal nach allen Raumesrichtungen hin die nämliche, gleichgültig wie gross die Membran ist; sie ist gebunden an die oberste Flüssig-

keitsschichte, welche eine sehr geringe Dicke hat. Diese Dicke ist genau gleich der maximalen Entfernung, über welche hin ein Molekül noch merklich anziehend zu wirken vermag (ca. $0,05\mu$). Wir werden diese Schichte fernerhin als das **wirksame Flüssigkeitshäutchen** bezeichnen. Bei einer Seifenlamelle hätten wir demnach, da zwei Oberflächen vorhanden sind, eine Verdoppelung der wirksamen Flüssigkeitsschichte und demnach auch die doppelte Spannung.

Die Oberflächenspannungen verschiedener Flüssigkeiten haben einen sehr verschiedenen Wert. Der letztere wird gewöhnlich ausgedrückt in Milligramm-Millimetern, d. h. man bestimmt dasjenige Gewicht in Milligrammen ausgedrückt, welches der Spannung einer Flüssigkeitsoberfläche von 1 mm Seitenlänge (linearer Ausdehnung) das Gleichgewicht zu halten vermag. Dieser Wert ist bei gleicher Temperatur für die nämliche Flüssigkeit unveränderlich und wird daher als Kapillaritätskonstante bezeichnet. Man setzt für diese in den Formeln gewöhnlich den Buchstaben α oder F (auch T).

Einige Kapillaritätskonstanten:

Quecksilber gegen Luft	. .	45,0
Wasser	» » . .	7,5
Olivöl	» » . .	3,8
Alkohol	» » . .	2,6

Was den sogenannten **Krümmungsdruck** anlangt, so ist derselbe nur eine Komponente der Oberflächenspannung, welche dann auftritt oder wirksam werden kann, wenn der Flüssigkeitsspiegel gewölbt ist. Dieser Krümmungsdruck ist bei konvexer Oberfläche gegen das Innere der Flüssigkeit gerichtet, bei konkaver Oberfläche gegen die Richtung der Konkavität, also gegen die Luft, wenn Luft und Flüssigkeit in Berührung stehen. Die Wirkungsweisen des Krümmungsdruckes sind allgemein bekannt, populär. Jede Seifenblase veranschaulicht die in Frage stehenden

Gesetzmäßigkeiten. Denn die Wand der Blase übt einen entsprechenden Druck auf die eingeschlossene Luft aus, welche gegebenen Falls unter der Wirkung dieses Druckes nach aussen entweichen wird.

Wie die Seifenblase sich kuglig abzurunden sucht, ist dies ebenso der Fall, bei jedem in sich abgeschlossenen frei suspendierten Flüssigkeitsquantum: Die wirksame Oberflächenschicht sucht sich ad maximum zusammenzuziehen und da die Kugeloberfläche die kleinstmögliche ist, so strebt die Flüssigkeitsmasse der Kugelgestalt zu. Plateau hat gezeigt, dass in Alkohol von gleicher Dichte schwerelos suspendierte Ölmassen von bedeutendem Volumen sich zur Kugel abrunden, trotzdem in diesem Falle der Wert der Oberflächenspannung minimal ist; er erhielt Ölkugeln bis zu vielen Zentimeter Durchmesser.

Die Erscheinungen der **Adsorption** sind eine offenbare Folge derselben Molekularkräfte, aus denen die Erscheinungen der Oberflächenspannung, des Krümmungsdruckes, der Adhäsion und der Kapillarität (im engeren Sinne) hervorgehen. Ich halte es nicht für richtig, dass in den Lehr- und Handbüchern der Physik die Vorgänge der Adsorption nicht mit den übrigen Oberflächenkräften zusammen behandelt werden. Denn die Bedingungen für die Realisierung von Adsorptionsvorgängen sind in praxi ausserordentlich häufig gegeben und so ist die Adsorption fast ebenso verbreitet wie die Oberflächenspannung. Stehen beispielsweise flüssige oder feste Medien in Berührung mit Luft, so treten auch immer Adsorptionswirkungen ein; letztere durchkreuzen aber nachgewiesenermaßen (Quincke) die Wirkungen der Oberflächenspannung, und so muss die Adsorption bei der theoretischen Behandlung der Oberflächenkräfte von vornherein mit in Rechnung gezogen werden.

Unter Adsorption verstehen wir allgemein die Anziehung und Kondensation von Teilen eines 2. Mediums auf der Oberfläche eines 1. Mediums. Es sind also z. B. alle

freien der Luft ausgesetzten Oberflächen von einer adsorbierten (verdichteten) Gasschichte bedeckt, welche die Bestandteile der Atmosphäre enthält, jedoch in anderer Zusammensetzung als in dieser selbst. Es zeigen sich mithin bei der Adsorption selbst Auswahlerscheinungen, welche mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit darauf zurückgeführt werden können, dass die Oberflächen höherer Spannung die Tendenz haben in Oberflächen niederer Spannung überzugehen. Wenn also ein Flüssigkeitsspiegel aus der Atmosphäre auf sich selbst eine Gasschichte kondensiert, so wird einmal die Kapillarkonstante sinken (wie dies vielfach schon beobachtet wurde); zweitens aber würden die Bestandteile der kondensierten Gasschichte derart beschaffen sein, dass der verhältnismässig niedrigste Wert der Oberflächenspannung (wenigstens nach und nach) erreicht wird.

Die Erscheinungen der Adsorption sind leicht zu beobachten. Bläst man eine Seifenblase auf, so bedeckt sie sich sofort mit einer adsorbierten Gas- (Dampf-) Schichte, da die Molekularkräfte unmittelbar sofort in Wirksamkeit treten. Schlägt man daher eine zweite Seifenblase gegen die erste, so berühren sie sich nicht, da die kondensierten Gasschichten das Zusammenfliessen der Blasen verhindern. Die Blasen prallen vielmehr von einander ab, wie elastische Bälle. Versuche dieser Art sind allgemein bekannt (siehe Boys: Seifenblasen.) Noch schöner lässt sich die in Frage stehende Tatsache unter folgender Form demonstrieren. Man lässt in ein sehr grosses flaches Gefäss frisches Wasser einlaufen, so dass also der Flüssigkeitsspiegel ganz rein ist. Alsdann lässt man auf letzteren eine Seifenblase niederfallen; diese wird in den meisten Fällen an dem Flüssigkeitsspiegel abprallen, wie ein Gummiball vom Erdboden. Es kommt gelegentlich vor, dass die Seifenblase 5—6 mal hintereinander ricochettiert, ehe sie platzt. Auch hier ist die Ursache der Erscheinung in der zwischengeschalteten adsorbierten Gasschichte zu suchen.

Die Adsorption auf den Oberflächen fester Körper tritt in äusserstem Grade hinderlich hervor bei den Versuchen über das Ansteigen von Flüssigkeiten in Kapillarröhren. Daher kochen die Physiker die Glasröhren mit Kalilauge und Schwefelsäure aus, ziehen dann die Kapillaren vor der Flamme aus und schmelzen letztere an beiden Enden zu, um das Herzutreten der Luft zu verhindern.

Die Adsorptionen von Gasen auf fein verteilten staubartigen Körpern, wie z. B. Platinmoor, oder auf fein-porösen Körpern, wie Holzkohle, sind allgemein bekannt; sie gehen mit grosser Geschwindigkeit und mit grosser Heftigkeit vor sich. Ebenso allgemein bekannt sind die Adsorptionen auf feste Körper aus flüssigen Medien, wie z. B. die Bindung der Farbstoffe in wässriger Lösung durch Tierkohle. In allen diesen Fällen handelt es sich um Molekularanziehungen, welche dem Ursprunge nach von derselben Art sind, wie die Kohäsionskräfte, wenn auch oft chemische Wirkungen in zweiter Linie hinzutreten.¹⁾

Unter **Adhäsion** versteht man vor allen Dingen die Molekularanziehungen, welche zwischen der Oberfläche eines festen und eines flüssigen Mediums stattfinden. Haftet hierbei die Flüssigkeit an der Oberfläche des festen Körpers in der Weise, dass sie sich auf demselben auszubreiten sucht oder ist sie wenigstens durch gewöhnliche mechanische Mittel nicht ohne Rest von der Oberfläche des festen Körpers zu entfernen, so spricht man von Benetzung. Wasser und Quecksilber adhäririeren beide auf Glas; Wasser benetzt, Quecksilber nicht. Man statuiert aber auch eine Adhäsion zwischen den kongruenten Flächen zweier fester Körper; so z. B. würden 2 Metalle mit absolut ebener Oberfläche, wenn man sie fest aufeinander drückte, aneinander mit einer gewissen Kraft adhäririeren.

1) Vergl. meinen Artikel zur Theorie der histologischen Färbungen in der Encykloplädie der mikroskop. Technik.

Die Begriffe der Adhäsion und der Adsorption scheinen viel Verwandtschaftliches zu haben. Bei der Adsorption denkt man gewöhnlich an die Kondensation von Gasen auf der Oberfläche fester Körper oder an die Bindung von Farben auf Tierkohle; hier ist die Vorstellung einer stattfindenden Verdichtung das Wesentliche. Es ist aber ganz gut möglich, dass auch bei jeder Adhäsion eine derartige Verdichtung in der Oberflächenschicht des adhärierenden Körpers statt hat, so z. B. hat Langergren (zitiert nach Chwolson) behauptet, dass die bei Benetzung pulverförmiger Körper zu beobachtende Wärmeentwicklung auf eine entsprechende Kondensation des Wassers zurückzuführen sei; diese Kondensation würde ausserordentlich hohen Drucken, bis zu 6000 Atmosphären, entsprechen.

Bei der Adhäsion wiederum denkt man gewöhnlich nur an die Benetzung und Ausbreitung flüssiger Körper auf festen Oberflächen. Es wäre aber auch sehr wohl möglich, die Adsorption von Gasen auf festen Körpern und besonders das erstaunlich feste Haften dieser Gasschichten als eine Erscheinung der Adhäsion zu betrachten. Dies sind Dinge, auf welche einstweilen nur vorübergehend aufmerksam gemacht werden soll.

Die Erscheinungen der **Kapillarität** im engeren Sinne schliesslich umfassen die Vorgänge der Erhebung oder der Depression von Flüssigkeiten in kapillaren Räumen, besonders in den Kapillarröhren selbst. Diese Vorgänge wiederum stehen in allerengstem Anschluss an die Vorgänge der Adhäsion. Man pflegt z. B. die kapillare Erhebung des Wassers an einer vertikalen Wand ganz gewöhnlich als eine Adhäsionserscheinung aufzufassen; in der Tat ist aber dieses Problem dem Prinzip nach identisch mit dem Problem der Erhebung des Wassers in einer Kapillarröhre.

Behufs Gewinnung einer Grundlage für alle weiteren Betrachtungen würde es offenbar zweckmässig sein, das Grundphänomen der Oberflächenspannung aus den Molekularanziehungen abzuleiten. Dies ist aber eine ungemein schwierige Aufgabe, welche in irgendwie vollständiger Weise noch niemals gelöst wurde. Was uns tatsächlich durch massenhafte Beobachtungen und durch eine ausserordentlich grosse Anzahl von Versuchen bekannt geworden ist, das ist in erster Linie der Spannungszustand an der freien Oberfläche von Flüssigkeiten, wenn sie in Berührung mit Luft sind. Denken wir uns der Einfachheit halber zunächst eine ebene Flüssigkeitsoberfläche, so ist der Zwangszustand derselben sicherlich prototypisch für alle Molekularwirkungen an freien Oberflächen und man muss daher von dieser Erscheinung ausgehen. Wir wollen daher wiederum zur Betrachtung einer ebenen Seifenlamelle zurückkehren, um die bei dieser auftretenden Erscheinungen etwas näher zu zergliedern.

Fig. 1.

Sei $A B C D$ (Fig. 1) ein ebener Metallrahmen, dessen Seite $C D$ mit Führung beweglich ist, so wird ein in ihm enthaltenes Seifenhäutchen sich zusammenzuziehen suchen. Wir haben also

den Ausdruck der Wirkung einer Kraft, zu deren Versinnlichung allüberall der Vergleich mit einer gespannten elastischen Membran herbeigezogen wird. Dieser Vergleich kann nicht wörtlich genommen werden. Wenn wir nämlich durch ein angehängtes entsprechend gewähltes Gewicht P die Spannung der Lamelle äquilibrieren (was übrigens nur theoretisch gedacht ist), so können wir nunmehr die bewegliche Rahmenseite beliebig im Auf und Ab verschieben, ohne dass die Lamelle aus dem Zustande des Gleichgewichtes herauskommt. Es ist eben die Spannung der Lamelle nach allen Richtungen hin die nämliche, wie gross oder wie klein dieselbe auch in jedem Augenblicke sein mag. Also haben wir hier total andere Verhältnisse wie bei einer Kautschukmembran; bei einem Kautschukfaden würden die ausgeübten Widerstände (das heisst die Spannung) um so mehr wachsen, je grösser die Längsdilatation ist und innerhalb der Elastizitätsgrenze würde die Verlängerung selbst sowie die Spannung proportional der wirksamen Kraft sein. Hiervon ist im Falle der Oberflächenspannung gar keine Rede und dies haben eine Reihe von Autoren übersehen, welche die Kräfte der Kontraktilität durch Oberflächenspannung zu erklären suchten. Denn die Elastizität kontraktile Gebilde (z. B. eines tetanisirten Muskels) ist eine absolut andere als diejenige flüssiger Membranen (oder gar flüssiger Fibrillen!). Es mögen also im Falle der Oberflächenspannung in letzter Linie elastische Kräfte vorliegen, dieselben äussern sich aber in anderer Art als bei einer gespannten Kautschukmembran.

Ziehe ich in unserem Falle der Fig. 1 die bewegliche Rahmenseite herunter, so leiste ich Arbeit. Der Effekt der Arbeit ist die Vergrösserung der Oberfläche. Meine Arbeit erscheint mithin in der neugebildeten Oberfläche als potentielle Energie wieder. Ist F die Kapillaritätskonstante, so ist das

Produkt aus F und der Oberflächenvergrößerung die Summe der potentiellen Energie, welche ich durch meine Arbeit der Flüssigkeitslamelle hinzugefügt habe. Dies Verhältnis zwischen Arbeit und potentieller Energie der Oberfläche ist ganz ungemein wichtig bei Beurteilung der verschiedenartigen Leistungen der Oberflächenspannung. Wenn ich nun zweitens das Gewicht P , mit welchem ich die Lamelle ins Gleichgewicht brachte, um ein Minimum erleichtere, so wird die Lamelle sich zusammenziehen; in diesem Falle verschwindet Oberfläche, der vorhandene Vorrat an potentieller Energie verringert sich und es wird eine entsprechende Menge von Arbeit geleistet, welche eventuell aus der Hebung des Gewichtes berechnet werden könnte. Wir können also sagen, dass, wenn Arbeit geleistet wird, die potentielle Energie der Fläche entsprechend abnehmen muss. Es wird nun hierbei entweder ein Teil der Oberfläche verschwinden oder es wird eine Oberfläche von höherer Spannung in eine solche niederer Spannung übergehen. Man kann aber auch sagen, dass eine Oberfläche, welche nicht abnimmt und deren Kapillaritätskonstante sich nicht verändert, auch keine Arbeit leisten kann. Umgekehrt wird man, wenn wir den Fall einer Arbeitsleistung durch Oberflächenspannung vor uns haben, den Sitz der arbeitenden Kraft dort suchen, wo die Fläche reduziert wird oder wo die spezifische Spannung abnimmt.

Die Vorgänge in der Seifenhaut lassen sich ferner durch folgende Betrachtungen noch etwas näher präzisieren. Wenn ich durch meine Arbeit die Seifenhaut vergrößere, so besteht der eigentliche Prozess jedesfalls darin, dass Moleküle aus der Tiefe an die Oberfläche geschafft werden. Umgekehrt, wenn die Seifenhaut sich verkleinert, treten wiederum Moleküle aus der Oberfläche in die Tiefe zurück. Es liegen nun zwei Möglichkeiten vor, welche eventuell auch einer Kombination fähig sind. Entweder es herrscht in der Richtung der Flüssigkeits-

oberfläche innerhalb der wirksamen Schicht und parallel zu derselben als primär wirkende Kraft eine Anziehung, bezw. ein Druck zwischen den Teilchen, welcher dieselben zu nähern strebt, gegen welchen ich arbeiten muss, um die Oberfläche zu vergrössern. In diesem Falle würden die aus der Tiefe auftretenden Moleküle gewissermassen die Lücken füllen, wenn ich die Oberfläche gewaltsam auseinanderzerre. Oder aber es herrscht eine primäre Kraft, welche die an der Oberfläche liegenden Moleküle in die Tiefe zieht; dann muss ich gegen diese Kraft arbeiten, wenn ich die Oberfläche vergrössern will, und ich kann dies nur mittelbar tun, indem ich die Teilchen an der Oberfläche durch die von mir ausgeübte Zugkraft von einander entferne. [Die Vorstellung, dass in der Oberflächenschicht eine Kraft vorhanden ist, welche die Teilchen nach der Tiefe niederzieht, ist von van der Waals gelegentlich der Ableitung seiner »Zustandsgleichung« entwickelt worden; in den Lehr- und Handbüchern der Physik wird beim Kapitel »Oberflächenspannung« dieser Sache keine Erwähnung getan.

Wenn wir uns nun auf den Versuch einer Ableitung des molekularen Zustandes der wirksamen Oberflächenschicht einlassen, so muss zunächst betont werden, dass eine solche Ableitung nur in allgemeinen Umrissen möglich ist. Der Umstand selbst, dass man den molekularen Zustand der Oberflächenschicht nicht genau und scharf zu präzisieren vermag, schliesst es in sich ein, dass, um ein hartes Urteil Chwolson's zu wiederholen, der gesamten Kapillaritätslehre die eigentliche wissenschaftliche Basis fehlt. Dies sollte man sich immer vor Augen halten, wenn man den Versuch macht, diese Lehre auf die Biologie zu übertragen; denn die Anwendung physikalischer Gesetze, welche einstweilen nur empirisch genauer bestimmt sind, auf die lebendigen Organismen muss den Grad der allgemeinen Unsicherheit bedeutend erhöhen. Denn im lebenden Körper treten viele Kräfte zu Tage, die wir nicht vollständig

auf chemische und physikalische Wirkungen zu reduzieren vermögen. Es ist daher kaum zu übersehen, inwieweit die Wirkungen der Kapillarität mit der spezifischen Betätigung der lebendigen Massen zusammenfallen, inwieweit beiderlei Kraftäusserungen sich durchkreuzen und hemmen.

Bei der allgemeinen Ableitung der Oberflächenspannung geht man im Anschluss an Laplace von Massenanziehungen (Kohäsionskräften) aus. Diese Anziehungen der Massenteilchen wirken nur über geringe Entfernungen; Laplace nahm seinerzeit an, dass die Abstände, über welche hin die Anziehungskräfte sich zu äussern vermögen, verschwindend gering, nicht messbar seien. Indessen sind uns die kleinsten Dinge durch die Verbesserungen der Instrumente und Untersuchungsmethoden im Lauf der letzten 100 Jahre immer näher und näher gerückt und man hat daher versucht genauer zu bestimmen, wie gross die Entfernung ist, über welche hin die molekularen Anziehungskräfte sich noch merklich äussern. Dieser Abstand r gleich dem Radius der molekularen Wirkungssphäre wird gewöhnlich mit Quincke zu $0,05 \mu$ angenommen. Dieser Wert hat für die Mikroskopie ein ganz besonderes Interesse, denn die Formeln der Kapillaritätslehre (speziell die Formel für den Krümmungsdruck) sind offenbar unter der Annahme entwickelt worden, dass die Flüssigkeitsmassen, für welche sie Geltung haben sollen, Oberflächen besitzen, deren zugehörige Krümmungsradien im Verhältnis zum Radius der Wirkungssphäre sehr gross sind. Nun will aber Bernstein diese Formeln anwenden auf die Muskelfibrillen, deren Durchmesser er im äussersten Falle auf $0,2 \mu$ annimmt. So wäre hier der Radius der Fibrille ($0,1 \mu$) gleich dem Durchmesser der Wirkungssphäre!! Ob unter diesen Umständen die an relativ grossen Objekten gewonnenen Erfahrungen der Physiker, bezw. die aus diesen abgeleiteten Formeln ohne weiteres auf das feinste Detail der Mikroskopie übertragbar

sind, müsste noch näher geprüft werden. Ich bin meinstenfalls nicht davon überzeugt.

Der Wirkungsbereich eines Moleküls O im Innern einer Flüssigkeit (Fig. 2a) kann durch eine Kugeloberfläche vom Radius r umschrieben gedacht werden. Diese Wirkungssphäre wird zugleich alle diejenigen Moleküle enthalten, welche noch einen merklichen Einfluss auf O durch Anziehung ausüben. Ferner können wir uns, um eine zweckdienliche Anschauung der Sache zu ermöglichen, vorstellen, dass alle zwischen O einerseits und den die Sphäre erfüllenden Molekülen andererseits ausgeübten Anziehungskräfte sich in der Richtung der Radien ordnen. Hierbei folgen wir einem von mir anderwärts zu

Fig. 2a.

Fig. 2b.

anderen Zwecken gegebenen allgemein bekannten Schema. Wegen der Symmetrie der Figur ergibt sich, wie man bemerkt, unmittelbar, dass die im Inneren einer Flüssigkeit auf ein Molekül ausgeübten Anziehungskräfte nach allen Richtungen hin paarweise einander gleich und entgegengesetzt sind.

Hier setzte nun die ältere Theorie von Laplace ein und sagte aus, dass diese Anziehungskräfte, da sie nach allen

Richtungen hin einander gleich und entgegengesetzt sind, einander aufheben; so findet man es auch fast überall in den Lehr- und Handbüchern. Diese Kräfte sind indessen weit davon entfernt sich (allgemein gesprochen) »aufzuheben« (elles se détruisent, — sagen französische Autoren); vielmehr bewirken sie die Kohäsion der Flüssigkeitsmasse und ohne sie würden die Flüssigkeitsmoleküle nach allen Richtungen hin auseinanderstieben. Wurde also gesagt, dass diese Anziehungskräfte im Inneren der Flüssigkeit »sich aufheben«, so kann damit nur gemeint sein, dass sie keinen Einfluss auf die Bewegung des Moleküls im Zentrum der Wirkungssphäre haben. Dies kann nur insofern richtig sein, als das betrachtete Molekül, von sich aus der Wärmebewegung unterliegend, bezüglich der letzteren von jenen Anziehungskräften keine Veränderung erfährt. Also wird das in Schwingungen begriffene Molekül mit Beziehung auf jene Kräfte gedacht gleichsam aus einer stabilen Gleichgewichtslage in die andere übertreten.

Dennoch ist eine gewisse Bewegungstendenz, welche durch die Kohäsionskräfte ausgelöst oder unterhalten wird, vorhanden. Es muss nämlich beachtet werden, dass in einer Flüssigkeit alle Moleküle gegeneinander beweglich oder verschieblich sind. Auf dieser Basis kommt man zu folgenden eigentlich selbstverständlichen Überlegungen. Zwischen den Molekülen der Wirkungssphäre und dem zentral gelegenen Molekül besteht eine gegenseitige Anziehungskraft: die Kohäsion. Halbieren wir die Sphäre der Anziehung durch eine beliebige Ebene ab (Fig. 2b), so können wir ferner sagen, dass das Molekül O mit einer Kraft $\frac{C}{2}$, deren Grundlage die Anziehungskräfte der halben Wirkungssphäre sind, sich seinem nächsten in der Richtung der Symmetrieaxe O c gelegenen Nachbar O₁ zu nähern sucht. Da aber auf diesen Nachbar in der Richtung gegen O von der ihm selber zugehörigen Wirkungs-

sphäre die gleichen Anziehungskräfte ausgeübt werden, so sucht auch dieser sich dem Molekül O mit der Kraft $\frac{C}{2}$ zu nähern. Zwischen beiden Nachbarmolekülen wird also eine Anziehung oder ein Druck $\frac{C}{2} + \frac{C}{2} = C$ wirksam sein. Mithin werden sämtliche im Inneren der Flüssigkeit gelegenen Moleküle mit der Kraft C sich zu nähern suchen. Haben wir also ein in sich abgeschlossenes Flüssigkeitsquantum, also z. B. einen schwebenden Wassertropfen, so wird die Richtung der allgemeinen Anziehung der Teile oder ihre immanente Bewegungstendenz gegen den Massenmittelpunkt gehen.

Die bisherige Betrachtung kann nur Geltung haben für alle Moleküle, welche mindestens den Abstand r (gleich dem Radius der molekularen Wirkungssphäre) von der Oberfläche haben. Für die innerhalb des wirksamen Flüssigkeitshäutchens gelegenen Moleküle ändert sich indessen der Wert der Kohäsion und wir betrachten deshalb eine Reihe von Moleküle O₁, O₂, O₃, und s. f., welche der freien Oberfläche immer mehr und mehr genähert liegen. Beginnen wir mit dem Molekül O, (Fig. 3),

Fig. 3.

welches das erste Molekül jenseits der unteren Grenze der Oberflächenschicht vorstellen soll¹⁾, so wird dieses in der Richtung nach abwärts (normal zur Oberfläche) mit dem vollen Wert $\frac{C}{2}$ angezogen werden, da dasselbe eine halbe Wirkungssphäre unter sich hat. Zwischen ihm und seinem Nachbar diesseits der Grenze wird also immer noch der Cohäsionsdruck $\frac{C}{2} + \frac{C}{2} = C$ herrschen. In der Richtung nach oben (aussen) hin hat indessen das Molekül O, nicht mehr eine vollständige halbe Wirkungssphäre vor sich, da die letztere von der Begrenzungsebene der Flüssigkeit durchschnitten wird. Vielmehr fallen diejenigen Moleküle fort, welche bei vollständiger Sphäre den über den Flüssigkeitsspiegel hinausragenden Raum erfüllen würden. Daher ist die Kraft, mit welcher das Molekül O, von der unvollständigen Hälfte der Wirkungssphäre in der Richtung der Normalen gegen das nächste Molekül O,, hin angezogen wird, nicht mehr gleich $\frac{C}{2}$, sondern nur noch gleich $\frac{C}{2} - x$. Da wir nun festgestellt haben, dass die Bewegungstendenz der Kohäsionskräfte gegen die Tiefe der Flüssigkeit, bzw. gegen den Massenmittelpunkt geht, so wäre es offenbar irrig, sich vorzustellen, dass das Molekül O, mit der Kraft $\frac{C}{2} - x$ gegen die Flüssigkeitsoberfläche emporgehoben wird. Vielmehr bewirkt diese zwischen O, und den Molekülen der unvollständigen Sphärenhälfte bestehende Anziehung, dass die letzteren einen entsprechenden Bewegungsantrieb nach abwärts erhalten; hierbei muss man sich vergegenwärtigen, dass die in der Kugelschicht a b c d enthaltenen Moleküle ja keineswegs an der Flüssigkeitsoberfläche irgendwie fixiert sind;

¹⁾ In Fig. 3 bedeutet F die Oberfläche der Flüssigkeit, W die Dicke des wirksamen Flüssigkeitshäutchens.

wenn also zwischen dem Molekül O , und einem beliebigen Molekül m in der Kugelschichte eine gegenseitige Anziehung besteht, so muss diese dazu führen, dass das Molekül m eine entsprechende Bewegungstendenz nach abwärts erfährt, denn m ist vergleichsweise beweglich, O , hingegen ist ebenso vergleichsweise unbeweglich, wegen der Verknüpfung aller Kohäsionskräfte in der Richtung auf den Massenmittelpunkt. Haben wir also zwischen dem zentralen Molekül O , und denen der Kugelschichte $a b c d$ eine gegenseitige Anziehung $\frac{C}{2} - x$, so kann der Effekt derselben meiner Auffassung nach etwa dadurch beschrieben werden, dass man sagt, es bestehe ein Druck $\frac{C}{2} - x$, welcher den oberen Teil der Wirkungssphäre gewissermaßen in der Richtung der Normalen dem Molekül O , zu nähern suche. Da nun das nächstgelegene Molekül $O_{,,}$ wiederum mit der ganzen Kraft $\frac{C}{2}$ nach abwärts gezogen wird, weil ihm in der Richtung auf die Tiefe eine vollständige halbe Wirkungssphäre zugehört, so wird zwischen O , und $O_{,,}$ im ganzen der Kohäsionsdruck $\frac{C}{2} + \frac{C}{2} - x = C - x$ wirksam sein.

Denken wir uns fernerhin auch um $O_{,,}$ die Sphäre der Anziehung auskonstruiert, so stellt sich für unsere Überlegung heraus, dass diesmal der Ausfall der disponiblen Anziehungskräfte noch grösser sein wird, als bei der Betrachtung von O ,, da die Wirkungssphäre je näher das Molekül der Oberfläche liegt, um so mehr ausserhalb des Bereiches der Flüssigkeit fallen wird. Mithin wird zwischen $O_{,,}$ und einer über ihr gelegenen, zugehörigen Kugelschicht a, b, c, d ,, welche kleiner ist als $a b c d$, eine Anziehung $\frac{C}{2} - x$, herrschen, wobei $x, > x$ ist. Da nun das in der Richtung der Normalen folgende Molekül $O_{,,}$,

abermals mit der Kraft $\frac{C}{2}$ gegen die Tiefe gezogen wird, so wird der gesamte Kohäsionsdruck zwischen $O_{,,}$ und $O_{,,,}$ gleich $\frac{C}{2} + \frac{C}{2} - x_1 = C - x_1$, kleiner als $C - x_1$ sein.

Betrachten wir auf die gleiche Weise die in der Richtung der Normalen hintereinander folgenden Moleküle $O_{,,,}$, $O_{,,,,}$ und so fort, so werden die zugehörigen Kohäsionsdrucke gleich $C - x_2$, $C - x_3$, $C - x_4$ und so fort sein, wobei $x_1 < x_2 < x_3 < x_4$ etc. ist. Die Kohäsionsdrucke nehmen also in der Richtung auf die freie Oberfläche fortwährend ab und sinken schliesslich bis auf den Wert $\frac{C}{2}$. Man könnte sich nun einfacher und kürzer dahin ausdrücken zu sagen: In der Richtung auf die freie Oberfläche nehmen die anziehenden Massen bis auf die Hälfte ab (gemessen durch Konstruktion der Wirkungssphären), also sinkt der Kohäsionsdruck gleichfalls bis auf die Hälfte.

Was wird nun hieraus zu folgern sein? Sicherlich eine entsprechende Auflockerung der oberflächlichen Flüssigkeitsschichte. Mithin schliesse ich mich in dieser Beziehung an Mensbrugghe, Violle und einige andere Autoren an, welche eine Verdichtung der freien Flüssigkeitsoberfläche, wie sie manche Forscher herleiten wollten, nicht anerkennen; eine solche Verdichtung ist in der Tat unmöglich.

Laplace leitete für eine ebene Flüssigkeitsoberfläche folgende Molekularwirkungen ab. Haben wir ein Molekül $O_{,,}$ dessen Wirkungssphäre teilweise ausserhalb der Flüssigkeit zu liegen kommt (Fig. 3), so entspricht der zum Ausfall kommenden Kalotte $c d f$ auf der andern Seite die gleichgrosse Kalotte bei e . Nun sind in der zwischen beiden Kalotten liegenden Kugelschichte alle auf O wirkenden Anziehungskräfte paarweise einander gleich und entgegengesetzt; also heben sie einander auf (?). Dagegen werden die Anziehungskräfte des Raumes bei e nicht

kompensiert; sie ergeben mithin eine gegen die Tiefe der Flüssigkeit gerichtete Resultante, welche senkrecht zur Flüssigkeitsoberfläche wirkt. Summiert man alle diese Resultierenden aus allen übereinander gelegenen Wirkungssphären, so erhält man eine Kraft K , welche normal zur Oberfläche steht und einen ausserordentlich hohen Wert besitzt. Diese Kraft, der »Normaldruck«, sollte nun nach der Ansicht einiger Forscher die oberflächliche Flüssigkeitsschicht komprimieren. Indessen ist dies nicht möglich, da, die Existenz der Kraft K vorausgesetzt, dieser Druck sich nach hydrostatischen Gesetzen gleichmäfsig in der Flüssigkeit fortpflanzen müsste. Mithin wäre eine Verdichtung der oberflächlichen Flüssigkeitsschicht auf Grund der Kraft K ohnehin nicht möglich. Allein auch die Ableitung der Kraft K ist anfechtbar. Meiner Meinung nach begeht man einen Fehler, wenn man bei Betrachtung der Wirkungssphären überall dort, wo Symmetrie statt hat, auf eine »Kompensation« der Kräfte schliesst, welche gar nicht vorliegt. Der eigentliche Fehlgriff scheint mir hierbei darin zu liegen, dass bei der Laplaceschen Art der Betrachtung die Peripherie der Wirkungssphäre gleichsam als fest gegeben angesehen wird, was nicht der Fall ist; vielmehr sind alle Flüssigkeitsteilchen verschieblich und durch Verknüpfung aller Kohäsionskräfte pflanzt sich die Wirkung derselben über alle einzeln begrenzbaren Sphären hinaus bis an die Oberfläche des Flüssigkeitsspiegels fort. Wir kommen also zu keiner »Kompensation« der Kräfte, und nur, wenn man eine solche zulässt, lassen sich im Gegensatz hierzu »nicht kompensierte« Kräfte konstruieren, welche sich zu dem Normaldruck K zusammensetzen sollen. Vielmehr ist wohl selbstverständlich, dass auch im Inneren einer Flüssigkeit die Kohäsionskräfte fortwährend tätig sind und dass sie der alleinige Grund der Zusammenballung einer Flüssigkeitsmasse sind. Es kann keine besondere Kraft K geben und es würde auch irrig sein, selbige als Kohäsionsdruck zu bezeichnen, wie manchmal ge-

schehen ist. Wir haben vielmehr im Innern der Flüssigkeit eine Kraft C , welche entgegen der Wärmebewegung die Moleküle zu einer Masse vereinigt und welche naturgemäss gegen die freie Oberfläche hin unter Auflockerung des Molekulargefüges abnimmt.

Mensbrugghe hat das Verdienst, die Nichtexistenz der Laplaceschen Kraft K auch experimentell bewiesen zu haben.

Nunmehr kommen wir dazu, diejenigen Kräfte zu betrachten, welche in dem wirksamen Flüssigkeitshäutchen parallel zur Begrenzungsebene wirksam werden, Betrachten wir zu diesem Behufe nebenstehende Fig. 4 (oder Fig. 5 a), so halte ich mit Vielle für sicher, dass der Kohäsionsdruck innerhalb der Ebenen parallel zur Oberfläche von der Tiefe zur Höhe aufsteigend allerdings abnimmt,

Fig. 4.

aber in geringerem Grade als in der Richtung normal zur Oberfläche. Untersuchen wir nämlich sämtliche in der Richtung normal zur Oberfläche übereinander liegenden Moleküle, indem wir den Globus, welcher die Wirkungssphäre vorstellt, langsam von der Tiefe zur Oberfläche aufsteigend denken, so bemerken wir sofort, dass schon von dem ersten Augenblicke an, in welchem die Begrenzungsebene der Flüssigkeit den Globus schneidet, gerade solche Flüssigkeitsmassen in Fortfall kommen, bei denen die Komponenten der Anziehung senkrecht zur Oberfläche des Flüssigkeitsspiegels relativ sehr gross, die entsprechenden Komponenten parallel zur Flüssigkeitsoberfläche dagegen verhältnismässig klein sind (vergl. Fig. 5 a). Die An-

ziehungen oder Kohäsionsdrucke normal zur Oberfläche erscheinen daher in stärkerem Grade verringert als diejenigen parallel zur Oberfläche. Diese Ungleichheit der zum Ausfall kommenden Komponenten normal und parallel zur Oberfläche wird allmählich geringer, je mehr wir die Wirkungssphäre der Oberfläche genähert denken. Aber erst die zu den Molekülen der obersten Schichte gehörige halbe Sphäre liefert in der Richtung senkrecht und tangential gleiche Komponenten der Anziehung. Daher würden nach dieser Kalkulation die Anziehungen oder Kohäsionsdrucke parallel zur Oberfläche grösser sein als senkrecht zur Oberfläche. Violle führt aus, dass diese so berechnete Differenz der Kohäsionsdrucke das Phänomen der Oberflächenspannung erzeugt.¹⁾

Bei der Ableitung der Oberflächenspannung müssen wir fordern, dass wir mit Denknotwendigkeit zu einer permanenten Zwangslage der Oberflächenschicht kommen, welche kein Prinzip der Selbststeuerung in sich trägt. Ich für meinen Teil hege keinen Zweifel, dass die bisherige Ableitung eines in zwei Richtungen verschiedenen Kohäsionsdruckes der Forderung eines mit Denknotwendigkeit einzusehenden Zwangszustandes entspricht. Die Ursachen, welche letzteren bedingen, sind nicht aufhebbar oder veränderlich, sondern sie sind unveränderlich dieselben. Sie sind gegeben allein in den Anziehungskräften einerseits und in der Begrenzung der Flüssigkeit durch eine Oberfläche andererseits. Der augenblickliche Zustand des Gleichgewichts eines endlichen Flüssigkeitsspiegels kann daher nur dadurch zu stande kommen, dass derselbe mit seinem Rande an einem festen Körper adhärirt. In diesem Falle wird durch die Adhäsion der Überdruck in der einen Richtung kompensiert. Ist aber der Flüssigkeitsspiegel in sich geschlossen, wie bei

¹⁾ Das Prinzip obiger Ableitung ist aus Violle entnommen, auf den ich mich stütze. Indessen ist die Ableitung bei diesem Autor so kurz gehalten, dass sie mir anfangs kaum verständlich erschien.

einem Tropfen, so ist die Wirkung der Oberflächenspannung zunächst unbeschränkt; daher muss die Oberfläche sich fort-dauernd verkleinern, so lange bis durch Auftreten einer neuen Gegenkraft Gleichgewicht eintritt. Dies wird im allgemeinen dann der Fall sein, wenn der Tropfen Kugelform erreicht hat, wobei die gesuchte Gegenwirkung in der Inkompressibilität der eingeschlossenen Flüssigkeitsmasse gefunden werden muss.

Oben (S. 224 f.) war bereits davon die Rede, dass zwei Ableitungen der Oberflächenspannung möglich sind, welche wahrscheinlich auf einer Betrachtung verschiedener Kräftewirkungen basieren, sodass eventuell zweierlei Wirkungsweisen sich in dem gemeinsamen Endeffekte der Oberflächenspannung superponieren. Hierauf möchten wir der Vollständigkeit halber kurz zu sprechen kommen.

Es ist keine Frage, dass die typischen Erscheinungen der Oberflächenspannung bei flüssigen Medien statt haben, wenn-gleich wahrscheinlich ist, dass analoge Molekularwirkungen auch an der Oberfläche fester und gasförmiger Medien zu stande kommen. Immerhin aber müssen die typischen Erscheinungen der Oberflächenspannung von flüssigen Medien abgezogen werden und es ist daher nicht mehr als billig, dass der flüssige Aggregatzustand des Mediums mehr, als im vorstehenden bisher geschehen ist, in Betracht gezogen werde. Der flüssige Aggregatzustand ist jedoch dadurch ausgezeichnet, dass die Moleküle alle gegen einander aktiv beweglich und verschieblich sind. Sie haben in Folge der Energie ihrer Wärmeschwingungen keine konstante mittlere Gleichgewichtslage und treten bei ihren Bewegungen sozusagen aus dem Bereiche einer Anziehungssphäre in das Bereich einer zweiten Sphäre über.

Betrachten wir nunmehr die Veränderungen eines einzelnen Moleküls innerhalb der wirksamen Oberflächenschichte im Verhältnis zur umgebenden Masse. Das Molekül ist erstlich in Bewegung begriffen und zweitens sind die in jedem Zeitmoment

zwischen ihm und der umgebenden Masse ausgeübten Anziehungen in der Richtung nach der Tiefe grösser als in der Richtung nach der Oberfläche; hieraus muss offenbar ein Bewegungsantrieb erfolgen, welcher nach der Tiefe der Flüssigkeit gerichtet ist. Mithin erschliesst sich hieraus eine Abwanderung der Flüssigkeitsmoleküle aus der Oberflächenschichte in das Innere der Flüssigkeit; wir haben eine Zugkraft nach der Tiefe, in der Richtung normal zur Oberfläche, und derselben muss ein Druck parallel zur Flüssigkeitsoberfläche entsprechen, womit wir wieder bei der Oberflächenspannung angelangt sind. Bei der ersteren Ableitung liess sich die Oberflächenspannung aus der Differenz der Kohäsionsdrucke in den Richtungen horizontal und vertikal zur Oberfläche entwickeln; bei der letzteren Ableitung benutzt man nur das Wachstum der Molekularanziehungen in der Richtung von der Oberfläche zur Tiefe. Ich bin daher überzeugt, dass bei der Entstehung der Oberflächenspannung zweierlei Wirkungsweisen sich superponieren.

Soll ein Molekül von der Tiefe nach der Oberfläche gebracht werden, so muss gegenüber jenem »Zuge nach der Tiefe« eine gewisse Summe von Arbeit aufgewandt werden. Dies ist das Moment, welches in der van der Waalschen Zustandsgleichung Berücksichtigung gefunden hat.¹⁾ Dieser Gelehrte hielt jene Anziehung aus der Tiefe der Flüssigkeit für identisch mit der Kraft K von Laplace. Diese Identifizierung möchten wir nicht anerkennen, da die Kraft K von Laplace sich weder theoretisch ableiten, noch experimentell irgendwie dartun lässt (Mensbrugghe). Die Kraft K soll eine Summe von Anziehungen oder ein Druck sein, welcher in der Oberflächenhaut erzeugt wird und sich der Tiefe der Flüssigkeit mitteilt nach hydrostatischen Gesetzen. Hierhingegen ist der innerhalb der Oberflächenschichte nach der Tiefe hin wirksame Zug offenbar nichts

¹⁾ Vergl. die entsprechenden Abschnitte in Nernst's theoretischer Chemie.

anders als jene Differenz von Kräften, die sich aus dem Umstande entwickelt, dass die Kohäsion C in der Richtung der Normalen von der Tiefe nach der Oberfläche hin abnimmt. Diese Differenz von Kräften lastet nicht als Druck auf der Tiefe der Flüssigkeit, sondern umgekehrt: die Oberflächenschicht wird um diesen Druck entlastet.

Es ist ein offenkundiger Fehler der gewöhnlich in den Lehrbüchern der Physik gegebenen Ableitung der Oberflächenspannung, dass man nur ein einzelnes Medium betrachtet, welches gewissermaßen durch einen vollkommen leeren Raum, sagen wir, durch Nichts, begrenzt wird. Viel richtiger dürfte es sein, die Ableitung sofort auf die gegenseitige Begrenzung zweier Medien auszudehnen.

Wird ein dichteres Medium D (von stärkerer Molekularkraft) von einem weniger dichten Medium L (von geringerer Molekularkraft) begrenzt, so bleiben die Verhältnisse für das dichtere Medium im wesentlichen die gleichen wie vorher.

Betrachten wir ein beliebiges Molekül (Fig. 5a) innerhalb der wirksamen Schicht von D , so können wir uns wiederum die

Fig. 5.

von der Sphäre ausgehenden Anziehungen in der Richtung der Radien orientiert denken. Dadurch nun, dass der über die Trennungsebene hinausragende Teil der Sphäre in ein zweites Medium L zu liegen kommt, wird die Molekularkraft der

Sphäre im ganzen erhöht: es wachsen die auf das central gelegene Molekül ausgeübten Anziehungen sowohl in der vertikalen, wie in der horizontalen, doch stärker in der ersteren Richtung, denn in der letzteren. In Folge dessen wird erstlich im Vergleich zu früher die Differenz der Kohäsionskräfte in den Richtungen parallel und normal zur Oberfläche kleiner werden, und zweitens wird desgleichen auch jene Abnahme der Kohäsionskräfte, welche entlang der Normalen durch die wirksame Schichte hindurch bis zur Trennungsebene gemessen wird (s. S. 236 f.), ebenso verkleinert werden, (woraus eine Abnahme des »Zuges nach der Tiefe« resultieren muss). Also muss die Oberflächenspannung des Mediums D ihrem Werte nach sinken; es wird nunmehr die Arbeit, die ein Molekül zu leisten hat, wenn es aus der Tiefe des Mediums D nach dessen Oberfläche gelangen will, entsprechend verringert sein.

Einfacher noch ist folgende Betrachtungsweise. Die Oberflächenspannung des Mediums D ist abhängig von der Differenz der Molekularkräfte des Mediums D und des Mediums L. Der Wert der Molekularkraft der beiden Medien hängt nun wesentlich von ihrer Dichte ab; sei also die Molekularkraft von D gleich $d D$, die von L gleich $d L$, so hatten wir also bisher nur den Grenzfall $d L = 0$ (den Fall also, wo kein Medium L vorhanden war) betrachtet, welcher die grösste Oberflächenspannung ergibt; der andere Grenzfall $d L = d D$ führt zu einer vollständigen Aufhebung der Oberflächenspannung, welche somit gleich Null wird. Zwischen beiden Grenzfällen bleibt die Betrachtungsweise für das Medium D prinzipiell fortwährend die gleiche, nur dass, je mehr $d L$ sich $d D$ annähert, der Wert der Oberflächenspannung immer mehr sinkt.

Der Fall $d L = d D$ würde sich realisieren, wenn man zwei Tropfen des gleichen Mediums in vollkommene Berührung bringt; dann wird die Oberflächenspannung auf Null sinken und die Tropfen verschmelzen.

Die Wirkung der Überschichtung zweier Medien für das zweite Medium L herauszurechnen ergibt keinerlei Schwierigkeiten. Nehmen wir an, wir hätten es mit zwei Flüssigkeiten zu tun. Dann würde das Medium L im absoluten Vakuum für sich allein gewiss eine positive (kontraktive) Oberflächenspannung besitzen. Fügen wir nun das Medium D hinzu, so haben wir den Fall, dass die zu jedem Molekül der wirksamen Schicht von L gehörigen Sphären zum Teil in ein dichteres Medium zu liegen kommen (Fig. 5 b und c). Wenn also L für sich allein, ohne D, eine Auflockerung des Molekulargefüges in der wirksamen Flüssigkeitshaut zeigen würde [wegen der Abnahme der Kohäsion in der Richtung auf die Oberfläche (s. S. 232)], so kann dies nunmehr, bei Gegenwart von D gewiss nicht der Fall sein, denn die Kohäsionskräfte nehmen in Folge der Überlagerung mit einem dichteren Medium in der Richtung auf die gemeinsame Trennungsebene zu. Man muss daher auf eine Verdichtung der wirksamen Schichte von L schliessen. Diese Verdichtung wird um so stärker ausgesprochen sein, je grösser der Unterschied der Dichten beider Medien und je leichter komprimierbar das Medium L ist. Das wirksamste Resultat wird man daher haben, wenn das Medium D fest (oder flüssig), das Medium L gasförmig ist; diese Kondensation der Gase an der Oberfläche fester (und flüssiger Körper) wird allgemein als **Adsorption** (s. S. 218 f.) bezeichnet.

Wir hatten bisher nur festgestellt, dass in dem Medium L die Kohäsion gegen die Trennungsfläche hin wächst. Es fragt sich nun aber, wie die Veränderung der Kohäsionskräfte in Ebenen parallel zur Grenzfläche ausfallen wird. Aus den räumlichen Verhältnissen der schematisch vorgestellten Wirkungssphären folgt aber nach Analogie unserer früheren Betrachtungen ohne weiteres (vergl. Fig. 5 c), dass die Kohäsionsdrucke auch in Ebenen parallel zur Oberfläche wachsen, wenngleich in geringerem Grade als in der Richtung normal zur Ober-

fläche. Hieraus kann man ein Bestreben des Mediums L, sich auf dem Medium D auszubreiten folgern, d. h. eine negative oder expansive Oberflächenspannung. Diese expansive Spannung wird fernerhin auch dadurch mit verursacht werden, dass wegen der Wärmebewegung der Moleküle alle gegen die Oberfläche gerichteten Komponenten dieser Bewegung eine Beschleunigung, alle entgegengesetzten Komponenten eine Verlangsamung erfahren müssen. Es besteht also ein permanenter Zug auf die Moleküle in der Richtung gegen die Trennungsebene, was auch für sich allein schon ein Bestreben der Ausbreitung oder Expansion des Mediums L zur Folge haben müsste.

Diese Ableitung von Expansionskräften im zweiten oder weniger dichten Medium scheint mir ein ungemein wichtiger Punkt zu sein, zumal in den Lehrbüchern der Physik meist nur von einer »gemeinschaftlichen« Spannung längs der Trennungsfläche die Rede ist. Dass eine derartige expansive oder negative Oberflächenspannung der theoretischen Ableitung nach sicher vorhanden sein muss, geht aus dem blossen Vergleiche unserer konstruktiven Schemata unmittelbar hervor. Betrachten wir nämlich nebeneinander Fig. 5a und c, so leiten wir aus a in Übereinstimmung mit der Berechnungsweise der Physiker (Violle) für das dichtere Medium D eine kontraktive oder positive Spannung ab; es muss dann aber für ein »zugeordnetes« Molekül im Medium L (welches den gleichen Abstand von der Trennungsfläche haben soll; wie das erstbetrachtete Molekül in D) wegen der vollkommenen Analogie der räumlichen Verhältnisse der Wirkungssphäre auch eine analoge Betrachtungsweise möglich sein, nur dass alle Relationen der Anziehungskräfte sich umgekehrt verhalten wie im ersteren Falle, d. h. wo vorher die stärkeren Anziehungen waren, sind jetzt die schwächeren u. s. f. Daher verkehrt sich die vorher positive (kontraktive) Spannung im zweiten Medium in eine negative oder expansive Spannung.

Ich stimme also auf Grund meiner Überlegungen insofern mit Mensbrugghe überein, als auch dieser Autor für viele Fälle der Berührung zweier Medien dem einen derselben eine expansive Spannung zuschreibt. Eine solche expansive Spannung wird besonders dann reell zur Beobachtung gelangen, wenn ein flüssiges und ein festes Medium sich begrenzen; in diesem Falle bringt nur die Spannung des flüssigen Mediums sichtbare Wirkungen hervor, während der feste Körper, da seine Moleküle unverschieblich sind, sich indifferent verhält. Will man sich Beispiele zur Illustration dieses Falles vergegenwärtigen, so muss man natürlich das Quecksilber als flüssiges Medium von vornherein ausnehmen, da seine Molekularkraft enorm gross ist. Man denke vielmehr an Wasser oder Alkohol als Medium L im Verhältnis zu Glas als Medium D. In diesem Falle ist die Wirkung der Molekularkraft des Glases derart, dass hierdurch dem flüssigen Medium eine expansive Spannung erteilt wird.

Van der Mensbrugghe hat nun schon vor 30 Jahren und späterhin wiederholt versucht für die gegenseitige Einwirkung zweier Medien entsprechende Formeln aufzustellen, aus welchen die gemeinschaftliche Spannung an der Trennungsebene, sei sie positiver oder negativer Natur, ermittelt werden kann. Die Ableitungen van der Mensbrugghe's, obwohl anscheinend einfach, sind indessen schwieriger Natur und ich muss daher den Leser auf die Originalabhandlungen des Autors verweisen.

Es sei mir ferner erlaubt, die Frage der **gemeinschaftlichen Spannung** an der Trennungsebene mit kurzen Worten zu erläutern.

Im Prinzip wird sich diese Frage offenbar darum drehen, wie gross die algebraische Summe aus der positiven und negativen Spannung beider Medien ist. Hierbei müssen wir wiederum die beiden möglichen Ableitungsweisen der Oberflächenspannung berücksichtigen. Gehen wir zunächst auf die Kohäsionsdifferenzen ein, welche in der Richtung normal zur Oberfläche in beiden

Medien abgeleitet werden können. Ist die Kohäsion im Medium D gleich C, im Medium L gleich C_1 , so wird der entsprechende Druck an der Trennungsfläche (sehr genau gleich) $\frac{C}{2} + \frac{C_1}{2}$ sein, da die Wirkungssphäre an dieser Stelle zur Hälfte von dem einen, zur Hälfte von dem anderen Medium erfüllt wird. In der Richtung auf das Flüssigkeitsinnere nimmt der Kohäsionsdruck zu beim Medium D um

$$C - \left(\frac{C}{2} + \frac{C_1}{2} \right),$$

beim Medium L ab um

$$\left(\frac{C}{2} + \frac{C_1}{2} \right) - C_1.$$

In beiden Fällen resultiert als Differenz

$$\frac{C}{2} - \frac{C_1}{2}.$$

Hieraus scheint hervorzugehen, dass die Antriebe, welche die in Bewegung begriffenen Moleküle in Medium D nach der Tiefe, in Medium L nach der Oberfläche hin erfahren, in Summa beiderseits gleich gross sind, sodass die hieraus abzuleitende positive oder negative Spannung beiderseits gleich gross sein müsste. Indessen ist mir die Sachlage in diesem Falle unübersichtlich und ich möchte daher diese Schlussfolgerung auf sich beruhen lassen. Es genügt zu wissen, dass wir bei der Betrachtung von dieser Seite her keinesfalls zu einem Überwiegen der negativen Spannung kommen.

Wir wenden uns ferner zu jener Ableitung der Oberflächenspannung, welche die Differenz der Kohäsionskräfte in den Richtungen normal und parallel zur Oberfläche betrachtet. Wir hatten oben (pag. 241) hergeleitet, dass zwei zugeordnete Moleküle diesseits und jenseits der Trennungsfläche (welche den gleichen Abstand von der letzteren haben), wegen der vollkommenen Analogie der räumlichen Verhältnisse ihrer Wirkungssphären auch eine analoge Betrachtungsweise zulassen, und wir fügen nun

hinzu, dass bei beiden Molekülen die für die Richtungen normal und parallel zur Trennungsfläche berechnete Differenz der Anziehungskräfte, welche die Oberflächenspannung verursacht, offenbar identisch ist, wobei jedoch der berechnete Überdruck das eine Mal, beim Medium D parallel, das andere Mal, beim Medium L, in der Richtung normal zur Oberfläche wirksam ist, woraus im ersten Falle auf eine positive, im zweiten auf eine negative Oberflächenspannung geschlossen wurde. Hieraus folgt jedoch nicht, dass der Wert der positiven und negativen Spannung beiderseits in Summa gleich sei, vielmehr ist zu berücksichtigen, dass im Medium L, da es weniger dicht angenommen wurde, überhaupt sehr viel weniger Wirkungssphären auskonstruierbar sein werden als im Medium D. Nicht jedes Molekül von D hat im Sinne der obigen Redeweise ein zugeordnetes Molekül im Medium L. Daher muss der Wert der positiven Partialspannung des Mediums D grösser sein als der Wert der negativen Spannung in L. Es würde also unter gewöhnlichen Umständen die gemeinschaftliche Spannung zweier Medien immer positiv oder kontraktiv (nach Analogie der Kautschukhaut) sein.

Es ist klar, dass, wenn nur die Dichten der beiden Medien ausschlaggebend wären, eine einfache Beziehung zwischen der physikalisch bestimmbaren, gemeinschaftlichen Oberflächenspannung einerseits und der expansiven Spannung des Mediums L samt den in Betracht kommenden (ebenfalls bekannten) Dichten der beiden Medien andererseits auffindbar sein müsste. Nun kennen wir zwar theoretisch nur die Wirkungen der Massenanziehung als Ursache der Oberflächenspannung; in praxi aber ergibt sich, wie wir noch sehen werden, eine durchgreifende einfache Beziehung zwischen den beobachteten Oberflächenspannungen einerseits und den ins Spiel kommenden Massen nicht.

Soweit meine allgemeine Ableitung der Oberflächenkräfte. Ich habe in derselben diejenigen Anschauungen niedergelegt, die ich mir nach dem Studium physikalischer Schriften habe bilden müssen. Die in dieser Darstellung enthaltene Verquickung mit der Theorie der Adsorption entspricht meiner fortdauernden Beschäftigung mit der Theorie der Färbungen. In der Anerkennung expansiver Spannungen stimme ich mit *Mensbrugghe* überein und glaube, dass die Zukunft diesem Autor recht geben wird.

Es mag nun erlaubt sein mit Bezug auf obige Ableitung noch einmal die speziellen Verhältnisse der Oberflächenkräfte zu besprechen, welche sich herausbilden bei gegenseitiger Begrenzung:

1. fester und gasförmiger,
2. flüssiger und gasförmiger,
3. fester und flüssiger,
4. zweier flüssiger Körper.

Bei **gegenseitiger Begrenzung fester und gasförmiger Körper** ist die Hapterscheinung diejenige der Adsorption oder Kondensation des Gases auf der Oberfläche des festen Körpers (s. S. 240). Die Dichte der kondensierten Gasschichte nimmt hierbei offenbar über die Dauer der Zeit hin erheblich zu und schliesslich ist die fixierte Gasmasse durch künstliche Mittel nur sehr schwer entfernbar. Man kann sich vielleicht von der Wirkung des festen Körpers auf ein gasförmiges Medium am besten eine Vorstellung machen, wenn man sie vergleicht mit den analogen Wirkungen der Gravitation (Schwerkraft) auf die Atmosphäre. Wie die Erde durch ihre Anziehungskraft die Atmosphäre auf ihrer Oberfläche fixiert und verdichtet, so übt jeder feste Körper auf die umgebende Gas- und Dämpfmasse eine Anziehungskraft aus, welche zur Bildung einer Verdichtungsschichte führt.

Da die Erscheinungen der Adsorption ganz allgemeiner Natur sind und überall zu Tage treten, so muss man dieselben

bei Untersuchungen über Oberflächenspannung, Kapillarität etc. überall mit in Rechnung ziehen.

Die Adsorption beeinträchtigt unter anderem in starkem Grade die eigentlichen Kapillaritätserscheinungen und sie ist daher oft von ausschlaggebender Bedeutung bei Versuchen über das Ansteigen von Flüssigkeiten in Kapillarröhren. Am störendsten scheint sie zu sein bei Bestimmung der Kapillarkonstanten an der gemeinschaftlichen Trennungsebene **flüssiger und gasförmiger Körper**.

Es ist eine bekannte Erscheinung, dass die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten, welche mit Luft in Berührung stehen, binnen kurzer Zeit abnimmt. Dies erklärt sich meiner Meinung nach auf Grund von Adsorption (vielfache Beispiele besprochen bei Quincke). Wie erinnerlich (s. S. 239) hängt nämlich die an der Trennungsfläche zweier Medien auftretende Molekularwirkung ab von der Differenz der Dichten beider Körper; sinkt nun durch Adsorption die Differenz der Dichten, so muss auch der Wert der Oberflächenspannung sinken.

Ich bin der Meinung, dass bei Flüssigkeiten, welche einigermaßen leicht verdampfen, die durch Adsorption fixierte Schichte wesentlich aus dem Dampf des flüssigen Mediums besteht. Hierauf deutet unter anderem die interessante von Quincke (1870, pag. 84) erörterte Tatsache hin, dass bei der Methode der Bestimmung der Kapillarkonstante durch Tropfenfall, die Konstante um so kleiner gefunden wird, je langsamer die Tropfen fallen. Quincke führt dies darauf zurück, dass die Tropfen auf ihrer Oberfläche Substanzen kondensieren, »welche in Dampfform in der Atmosphäre enthalten waren«; diese Substanzen betrachtet er offenbar mehr als zufällige Beimengungen der Luft. Er berichtet unter anderem auch (1870, pag. 71), dass die Spannung einer Quecksilberoberfläche sinkt, wenn man einen Tropfen Steinöl, Alkohol oder Äther in die Nähe setzt; diese Dämpfe werden

nach Quincke's Meinung adsorbiert und wiederum zu einer Flüssigkeitsschichte kondensirt

Dass Seifenblasen sich nicht berühren, wenn man sie gegeneinander schlägt, oder dass sie auf einen Wasserspiegel auffallend über diesen tanzend sich hinweg bewegen, möchte ich damit erklären, dass die adsorbierte Gas- oder Dampfschichte zugleich ein Ausbreitungsbestreben (negative Spannung) besitzt (s. S. 240 f.). Ich wüsste wenigstens nicht, warum es sonst so schwierig sein sollte, die zwischen-zwei Seifenblasen befindliche Gasschichte wegzudrücken.

Bei Besprechung der **gegenseitigen Begrenzung fester und flüssiger Körper** ist die wichtigste Frage diejenige der *Adhäsion* (vergl. S. 220 f.). Unter Adhäsion versteht man gewöhnlich den Widerstand, den zwei in Berührung befindliche Medien ihrer Losreissung entgegensetzen. Die Adhäsion ist danach eine Kraft, deren Richtung senkrecht zur Berührungsfläche zweier Medien orientirt ist. Da nun Adhäsion und Oberflächenspannung beide Wirkungen derselben Molekularkräfte sind, so müssen sie auch in einer näheren gesetzmässigen Beziehung stehen.

Nun ist zu beachten, dass bei gegenseitiger Begrenzung fester und flüssiger Körper die in dem festen Körper etwa vorhandene Oberflächenspannung keine direkte (motorische) Wirkung haben kann, da die Theilchen des festen Körpers gegeneinander unverschieblich sind. Wenn also der feste Körper durch seine Molekularkraft den flüssigen Körper beeinflusst, so können allein die in der flüssigen Oberflächenschichte bestehenden Spannungen eventuell in Bewegungserscheinungen zum Ausdruck kommen.

Dieser Punkt bedarf nun zunächst der näheren Besprechung, da Quincke und ihm folgend viele Autoren der Meinung sind, dass auch entlang einer festen mit der Luft in Berührung befindlichen Fläche eine Spannung vorhanden sein kann, welche ähnlich wie bei einer flüssigen Oberflächenschichte als *Zugkraft*

wirkt. Wenn wir also z. B. einen Wassertropfen auf einer Glasplatte aufruhend denken (Fig. 6), so lässt Quincke eine Gleichung zwischen drei positiven Spannungen gelten:

$$\alpha_1 = \alpha_{1,2} + \alpha_{2,3} \cos \vartheta.$$

Hierbei ist α_1 die Spannung der freien Glasoberfläche, $\alpha_{1,2}$ die Spannung Glas/Wasser, $\alpha_{2,3}$ die Spannung Wasser/Luft. Damit sind wir an einem Punkte angekommen, welcher für die Lehre von der Oberflächenspannung eine eminente Bedeutung hat.

Fig. 6.

Denn wenn man eine positive Spannung α_1 , »Glas«, nicht anerkennt, kommt man mit Notwendigkeit auf die Existenz von Expansivkräften an der Grenze fester und flüssiger Körper.

Die Quinckesche Vorstellungsweise, nach welcher man eine wirksame (!) Spannung fester Oberflächen anerkennt, ist in manche Lehrbücher übergegangen (Warburg, Chwolson). Doch äussert Chwolson bereits eine gerechtfertigte Kritik, indem er sagt, es könne sich bei Konstatierung einer wirksamen Oberflächenspannung in der Grenzschichte eines festen Körpers einstweilen nur um eine Analogie handeln; dagegen bezweifelt er die Realität einer solchen Spannung. Doch fügt er hinzu, man könne vielleicht eine solche Spannung in der Gas-schichte annehmen, welche die Glasfläche bedeckt.

Der Grund, warum excellente Autoren, wie Quincke, Warburg, Chwolson, innerhalb einer festen Oberflächenschichte

eine aktiv wirksame Zugspannung gelten lassen wollen, ist darin zu suchen, dass viele Phänomene an den Grenzflächen fester und flüssiger Körper, besonders aber das in jedem Lehrbuch durchgesprochene Grundphänomen der Erhebung einer Flüssigkeit an einer vertikalen Wand, nur erklärbar sind entweder durch Annahme der in Frage stehenden kontraktiven Spannung fester Oberflächen oder durch Anerkenntnis negativer (expansiver) Spannungen.

Ich für meinen Teil möchte mich dahin entscheiden, dass eine positive Spannung σ_1 in der Glasoberfläche, welche als Zugkraft wirkt, wie in den Gleichungen von Quincke, Warburg etc. überhaupt nicht angenommen werden darf. Zwar wird aller Wahrscheinlichkeit nach eine solche Spannung in der Glasfläche selbst wohl existieren; wie sie aber kontraktiv oder ziehend auf die übergelagerte Wasserschichte einwirken soll, bleibt mir unfasslich. Den Ausweg Chwolson's, der Gasschichte über dem festen Körper eine positive Spannung zuzuschreiben, halte ich für verfehlt. Dieser letzteren Meinung bin ich selbst lange Zeit hindurch gewesen, und zwar ehe ich Chwolson's Buch kannte. Allein das Ensemble aller Erscheinungen und die Kenntnis Mensbrugghescher Schriften hat mich definitiv davon wieder abgebracht. Mir scheint vielmehr, dass, wenn überhaupt, der Gasschichte nur eine negative oder expansive Spannung zugeschrieben werden darf (vergl. oben pag. 247).

Dass Mensbrugghe für alle flüssigen Medien, welche nicht eine ausnahmsweise hohe Molekularkraft besitzen (Quecksilber), im Recht ist, geht aus folgender Betrachtung hervor.

Nehmen wir an, wir hätten eine gutgereinigte Glasplatte, so wird eine dünne Wasserschichte auf dem Glase liegen bleiben ohne sich zusammenzuziehen oder sich weiterhin auszubreiten. Stellen wir (und mit Recht!) eine wirksame Spannung σ_1 (Glas!)

in Abrede, so bleibt uns als Gleichgewichtsbedingung füglich nur übrig:

$$\alpha_{2,3} \cos. \vartheta - \alpha_{1,2} = 0.$$

Also muss die Spannung $\alpha_{1,2}$ (Glas/Wasser) der Richtung nach negativ oder expansiv sein; denn wäre $\alpha_{1,2}$ gleichfalls positiv, so wäre ein Gleichgewicht keineswegs vorhanden und infolge der alleinigen Wirkung zweier gleichsinnig gerichteter Kräfte müsste die Wasserschichte sich zusammenziehen.

[Ich meinerseits glaube, dass die Gleichgewichtsbedingung ergänzt werden muss durch Einführung einer expansiven Spannung $\alpha_{1,3}$ (Glas/Luft), welche ihren Sitz in der auf der Glasplatte lagernden Gasschichte hat; dann kämen wir zu dem Ausdruck:

$$\alpha_{2,3} \cos \vartheta + \alpha_{1,3} = \alpha_{1,2}.]$$

Kommen wir also auf die Frage der Adhäsion zurück, so lässt sich folgendes sagen. Zwar wird unter Adhäsion gewöhnlich nur der Widerstand verstanden den zwei Körper ihrer senkrechten Abreissung entgegensetzen. Handelt es sich aber um ein festes und ein flüssiges Medium, wobei letzteres das erstere benetzt (wie übrigens in allen gewöhnlichen Fällen), so ist mit der reinen Adhäsion untrennbar ein Expansionsbestreben des flüssigen Mediums auf dem festen verbunden. Denn die Molekularkraft, welche den Adhäsionsdruck in der Richtung normal zur Oberfläche erzeugt, erzeugt auch den Kohäsionsdruck parallel zur Oberfläche; da letzterer dem ersteren unterlegen ist, so folgt hieraus die expansive Natur der gleichzeitig bestehenden Oberflächenspannung. Begrenzt also ein flüssiger Körper einen festen, so ist das Betreiben der Expansion ein notwendiges Korrelat der Adhäsion.

Mensbrugghe hat über eine Reihe von Erfahrungen berichtet, welche nur unter Annahme einer Expansivkraft bei Begrenzung fester und flüssiger Körper erklärbar sind; speziell hat Mensbrugghe auch ausgeführt, dass das Problem der

kapillaren Erhebung des Wassers an einer vertikalen Wand nur auf Grund einer expansiven Oberflächenspannung lösbar ist und hierin hat der Autor, wie mir scheint, vollkommen Recht. Denn gerade dieses Problem, welches sehr einfach und geradezu grundlegend für die gesamte Kapillaritätslehre ist, wird aller Orten unzureichend behandelt und nur bei Violle, welcher die Anschauungen Mensbrugghes übernommen hat, findet sich eine unser Kausalitätsbedürfnis befriedigende Fassung der Aufgabe. Meiner Meinung nach ist auch bei Erhebung von Flüssigkeiten in unbenetzten Kapillarröhren die expansive Spannung zwischen Glas und Flüssigkeit die treibende Kraft.¹⁾

Schliesslich kommen wir zu einer kurzen Besprechung der Verhältnisse bei **gegenseitiger Begrenzung zweier flüssiger Medien**. Hier hatten wir für das eine Medium eine positive, für das zweite eine negative, für beide zusammen eine gemeinschaftliche positive oder kontraktive Spannung hergeleitet (vergl. pag. 242 ff.).

Deuten nun irgend welche Tatsachen darauf hin, dass bei Begrenzung zweier flüssiger Medien das eine ein Bestreben der Expansion besitze? Hier möchte ich hervorheben, dass wir zunächst eine vollständige Analogie zu dem Versuch mit den beiden Seifenblasen haben, welche trotz kräftigen Aneinanderschlagens sich nicht berühren. Schon Plateau hatte angegeben, dass in Alkohol schwerelos suspendierte Ölmassen, wenn sie zur Vereinigung gebracht werden sollen, zunächst nicht in einander verfliessen. Da die in diesem Falle entwickelten Oberflächenkräfte enorm gering sind, versuchte ich es mit Quecksilbertropfen

1) Ich habe, um mich zu orientieren, viele Versuche über Oberflächenspannung gemacht, auch solche über das Ansteigen von Flüssigkeiten in Kapillarröhren. Hierbei habe ich eine Reihe von Beobachtungen machen können, welche das Vorhandensein einer expansiven Spannung Glas/Wasser weiterhin bestätigen. Da ich kein Physiker bin, stehe ich einstweilen von einer Veröffentlichung dieser Beobachtungen ab.

unter Alkohol. Ich brachte einen etwas grösseren Quecksilbertropfen in eine flache Glasschale mit ebenem Boden und teilte ihn unter Alkohol in sehr viele kleine Teile. Es zeigte sich, dass die Tröpfchen, wenn sie gegeneinander liefen, häufig von einander abprallten. Lagen indessen mehrere so nahe bei einander, dass sie einen dauernden Druck auf einander ausübten, so verflossen sie binnen kurzer Zeit vollständig. Offenbar wurde die anfangs zwischengeschaltete Alkoholschicht durch die gegenseitige Pressung leicht und vollständig weggedrückt. Nunmehr zerhackte ich einen Quecksilbertropfen unter Alkohol in viele kleine Teile und streute die Tröpfchen auf dem Boden des Gefässes so aus, dass sie nicht in Berührung standen. Als nach 24 Stunden das Präparat untersucht wurde, wollten die Tröpfchen durch Neigung der Schale einerseits zu einem Haufen zusammengetrieben, sich überhaupt nicht mehr vereinigen. Nunmehr zerkleinerte ich die Masse noch mehr wie vorher und konnte jetzt (nach Herstellung frischer Oberflächen) abermals beobachten, dass vielfache Vereinigungen unter den Tröpfchen zu stande kamen.

Diese Erscheinungen kann ich nur darauf zurückführen, dass sich die Quecksilbertröpfchen je länger um so vollständiger mit einer kondensierten Alkoholschicht umgeben, welche gleichzeitig Expansionsbetreiben besitzt. Es würde sonst garnicht zu verstehen sein, warum die Quecksilbertröpfchen, nachdem sie einige Zeit unter Alkohol zugebracht haben, nicht mehr miteinander in Berührung treten wollen. Für meine Ansicht spricht auch, dass die gemeinschaftliche Kapillarkonstante von Quecksilber und anderen Flüssigkeiten mit der Zeit abnimmt (Quincke). Denn hieraus kann geschlossen werden, dass die mit Quecksilber in Berührung stehenden Flüssigkeiten auf dessen Oberfläche kondensiert werden, womit ein Expansionsbestreben verbunden sein muss.

Die Erscheinungen der gemeinschaftlichen Oberflächen-

spannung an der Grenze zweier Flüssigkeiten sind am ausgiebigsten und besten durch Quincke studiert worden. Für die Biologie kommen hauptsächlich die Phänomene der Ausbreitung in Betracht, welche besonders durch Bütschli bei Gelegenheit der Bewegung amöboider Protoplasmen benutzt worden sind. Diesen Gegenstand haben wir keine Veranlassung näher zu betrachten, da alle Lehrbücher der Physik in übereinstimmender Weise die gleichen Lehrsätze (meist im direkten Anschluss an Quincke) entwickeln.

Das oberste Prinzip der Kapillaritätstheorie ist jedesfalls die Massenanziehung. Es verlohnt sich daher die Frage, ob die für die Oberflächenspannung durch Beobachtung gefundenen Werte in einem erkennbaren Verhältnis zu den Massen, bezw. spezifischen Gewichten stehen.

Würden zwei in Berührung befindliche Medien die gleiche Dichte besitzen, so dürfte zwischen ihnen keine Oberflächenspannung auftreten, falls die Dichte allein ausschlaggebend wäre; wäre die Differenz der Dichten sehr gering, so müsste auch die Oberflächenspannung sehr gering sein. Dies letztere trifft zu in dem Fall der Plateauschen Versuche mit Ölmassen, welche »schwereelos« in Alkohol von annähernd gleicher Dichte suspendiert waren. Quincke machte eine diesbezügliche Bestimmung und fand die Dichte

des Olivenöls zu 0,91599

des Alkohols zu 0,92307,

die Oberflächenspannung gleich 0,6934 mgr/mm.

Wäre umgekehrt die Differenz der Dichten zweier Medien sehr gross, so müsste auch die gemeinschaftliche Oberflächen-

spannung sehr gross sein; dies trifft naturgemäss immer dann zu, wenn das eine der Medien Quecksilber ist.

Vergleichen wir nun eine Reihe von Kapillarkonstanten bezüglich ihres Verhältnisses zum spezifischen Gewicht, so zeigt sich, dass der Einfluss des letzteren eben nur ganz im allgemeinen bemerkbar wird.

Kapillarkonstanten nach Quincke (aus Luftblasen) geordnet nach dem spezifischen Gewichte.

Flüssigkeit	Spezif. Gew.	α	Siedepunkt.
Chloroform	1,4878	3,120	61,2
Schwefelkohlenstoff . . .	1,2687	3,274	46
Glycerin	1,2535	7,348	
Wasser	1	8,253	100
Rizinusöl	0,9633	3,830	
Leberthran	0,9251	3,391	
Mandelöl	0,9173	3,515	
Olivenöl	0,9152	3,760	
Rüböl	0,9151	3,348	
Rapsöl	0,9130	3,340	
Benzol	0,8985	3,123	80,4
Terpentinöl	0,8867	3,033	150—175
Steinöl	0,7977	3,233	
Alkohol	0,7904	2,354	78,4
Äther	0,7200	1,740	35

Aus dieser Aufrechnung ersehen wir, dass die Massen allein gewiss nicht ausschliesslich bestimmend sind für den Wert der Oberflächenspannung; es müssen zum mindesten eine Reihe von Nebenumständen hinzukommen, die das Resultat in hohem Grade beeinflussen. Von diesen Nebenumständen lassen sich einzelne genauer bezeichnen.

Es entspricht unserer Ableitung und ist auch von Quincke wenigstens in einer früheren Arbeit (1870) hervorgehoben worden, dass die Kapillarspannung immer herabgesetzt wird, wenn auf der Flüssigkeitsoberfläche Dämpfe (Gase) adsorbiert werden. Später hat dieser Autor der in Rede stehenden Erscheinung eine eigene Untersuchung gewidmet (1877, pag. 568 ff.) und geglaubt »die Abnahme der Oberflächenspannung der Flüssigkeit mit der Zeit als ähnlich den Erscheinungen der elastischen Nachwirkung bei festen Körpern« auffassen zu müssen. Angesichts der grossen Schnelligkeit und der Energie, mit welcher Adsorption an Oberflächen verschiedener Art statt hat, angesichts der Tatsache, dass selbst bei Berührung flüssiger Medien offenbar analoge Erscheinungen statt haben (cf. oben Quecksilbertropfen und Alkohol), möchten wir bei der Erklärung der Abnahme der Kapillarkonstante durch Adsorption stehen bleiben. Ist dies richtig, dann werden die Zahlen, welche für die Oberflächenspannung bei Berührung der Flüssigkeit mit Luft gefunden werden, eine sehr verschiedene Bedeutung haben. Denn die leicht verdampfenden Medien werden in einer durch Adsorption festgehaltenen ungemein dichten Dampfhülle gleichsam schwimmen. Man wird also in diesem Falle die Spannung zwischen dem flüssigen Medium und der Dampfhülle messen. Auf diese Weise scheint es mir erklärlich, dass z. B. die Oberflächenspannung von Chloroform und Schwefelkohlenstoff im Verhältnis zum spezifischen Gewicht zu klein gefunden wird.

Genauer stimmt die Forderung, dass zu einer grösseren Dichte auch eine grössere Oberflächenspannung gehören muss, nur für Lösungen von Salzen. Quincke hat sich ein sehr grosses Verdienst dadurch erworben, dass er die wässrigen und alkoholischen Lösungen von Salzen genauer untersuchte. Er fand »dass bei derselben Konzentration die Stoffe mit kleinerem Äquivalentgewicht einen besonders hohen Wert der Oberflächenspannung zeigen«, und die nähere Betrachtung lehrte ihn, »dass

die Kohäsion (Oberflächenspannung — Ref.) nahezu proportional der Anzahl y von Salzäquivalenten zunimmt, die in der betreffenden Lösung mit 100 Äquivalenten Wasser verbunden sind«. »In der Tat lassen sich bei den Chloriden die Beobachtungen an Kapillarröhren nahezu durch die Gleichung

$$(\alpha) = 7 \text{ mgr, } 35 + 0,1783 y,$$

die Beobachtungen an flachen Luftblasen nahezu durch die Gleichung

$$\alpha = 8 \text{ mgr, } 30 + 0,1870 y$$

darstellen«. »Äquivalente Mengen verschiedener Chloride (von gleichen Chlorgehalt) zu derselben Menge Wasser gebracht, gaben Salzlösungen von nahezu gleicher Kohäsion oder Oberflächenspannung«.

Hieraus geht mit vollständiger Deutlichkeit hervor, dass bei gleicher Dichte die Moleküllzahl wesentlich in Betracht kommt. Hiermit kommt zur Geltung, dass die Oberflächenkräfte Molekularkräfte sind. Der Fall der Salzlösungen ist darum vergleichsweise so einfach und übersichtlich, weil *ceteris paribus* nur der Salzgehalt sich ändert.

Es ist nun ausserordentlich auffallend und für die Biologen von grösstem Interesse, dass nach den Bestimmungen Quinckes bei wässrigen Lösungen colloidaler Körper der Wert der Oberflächenspannung sich erniedrigt. Dies geht aus folgenden Quinckeschen Zahlen mit genügender Deutlichkeit hervor (s. umstehende Tabelle).

Besonders merkwürdig ist, dass Seifenlösungen, obwohl sie ja viele Kapillarerscheinungen in prachtvoller Weise zeigen, vergleichsweise eine sehr geringe Oberflächenspannung besitzen. Da die Gerbsäurelösung eine starke Erniedrigung der Oberflächenspannung aufweist, so ist anzunehmen, dass die wässrigen Lösungen ungemein vieler ähnlicher aromatischer Verbindungen (z. B. der Anilinfarben) ebenfalls niedrige Werte der Ober-

	Spezif. Gew.	"
Wasser	1	8,253
Hühnereiweiss	1,0365	5,934
	1,0384	5,370—4,913
Venetianische Seife	0,9983	2,681
	0,9992	2,672
	1,0009	2,563
Gerbsäure (10%)	1,0352	5,857
Arab. Gummi (20%)	1,0708	7,603
Hausenblase (sehr verdünnt) . . .	1	6,790
Gelatine " "	1	7,277
Agar-Agar " "	1	7,842

flächenspannung ergeben werden. Die starke Erniedrigung der Kapillarspannung bei Hühnereiweiss kann uns ferner einen Hinweis darauf geben, was wir bei den eiweisshaltigen Körpersäften, auch beim Protoplasma zu erwarten haben. Schliesslich zeigen die Zahlen für Hausenblase und Gelatine, dass der Zusatz geringer Mengen kolloidaler Körper selbst ohne wesentliche Veränderung des spezifischen Gewichtes genügt, um den Wert der Oberflächenspannung sehr merklich herabzudrücken. Die Molekularkraft des Mediums nimmt also bei Zusatz kolloidaler Körpersogleich ab. Diese Bemerkung scheint mir äusserst wichtig zu sein bei Beurteilung der Art und des Wertes der Oberflächenspannung Protoplasma/Wasser.

Mit der Frage des **Krümmungsdruckes** habe ich in dieser Schrift keine Veranlassung mich näher zu beschäftigen. Es seien daher nur einige wesentliche Punkte kurz hervorgehoben.

Begrenzen sich zwei flüssige Medien in gekrümmter Oberfläche, so äussert sich die gemeinschaftliche Oberflächenspannung durch einen Druck, welcher in der Richtung der Radien der Krümmung ausgeübt wird. Dieser Druck (Krümmungsdruck)

wird als positiv gerechnet bei konvexer, als negativ bei konkaver Oberfläche. Zur Berechnung der Grösse dieses Druckes sind zwei verschiedene Formeln abgeleitet worden, welche auf den ersten Blick hin identisch zu sein scheinen, es aber dennoch nicht sind. Die Verschiedenheit der Formeln beruht auf der Verschiedenheit der Ableitungen. Die eine derselben, welche von Laplace herrührt:

$$p = K \pm \frac{H}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} \right)^1,$$

ist offenbar in beiden Gliedern $\left[K \text{ und } \frac{H}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} \right) \right]$ wegen unrichtiger Ableitung anfechtbar, eine Überzeugung, zu der ich zunächst auf Grund eigener Überlegung gekommen war, welche jedoch durch die Lektüre der Schriften Mensbrugghes vollständig gefestigt wurde.

Da die Grösse K überhaupt nicht existent ist (siehe oben pag. 232 f.), so bleibt als Rest der Ausdruck

$$p = \alpha \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} \right),$$

welcher (unter Verzicht auf die ursprüngliche Ableitung von Laplace) aus der Oberflächenspannung (Tangentialspannung) sicher und gut in elementarer Weise entwickelt werden kann; die Ableitung dieser zweiten Formel trifft man in verschiedenen Varianten bei verschiedenen Schriftstellern, in wahrhaft eleganter Form jedoch bei Chwolson (wobei man davon absehen muss, dass dieser Autor den Ausdruck $\pm \alpha \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} \right)$ wiederum verquickt mit dem Laplaceschen K).

¹⁾ p = Krümmungsdruck, K die schon weiter oben besprochene Konstante, $\frac{H}{2}$ eine zweite Konstante, welche angeblich mit der Konstante α identisch sein soll, R und R_1 die beiden Hauptkrümmungsradien eines kleinsten Flächenstückes.

Hier füge ich hinzu, dass es Geschmackssache ist, ob man sich als Biologe um die Ableitung solcher Formeln kümmern will oder nicht; ich für meinen Teil würde nicht zufriedengestellt sein, wenn ich Formeln brauchen müsste, deren Ableitung ich nicht kenne oder nicht zu übersehen vermag.

Ferner möchte ich darauf aufmerksam machen, dass in den Lehr- und Handbüchern der Physik eine offenbare Unsicherheit betreffs des gegenseitigen Verhältnisses von Krümmungsdruck und Oberflächenspannung besteht, eine Unsicherheit, welche ebenso in die biologischen Schichten übergegangen ist. Bei dem Problem der Erhebung einer Flüssigkeit an einer vertikalen Wand wird z. B. der Krümmungsdruck des gewölbten Flüssigkeitsspiegels (der Regel nach) nicht in Betracht gezogen, vielmehr betrachtet man nur die reinen Tangentialkräfte; umgekehrt pflegt man bei der Erhebung von Flüssigkeiten in Kapillarrohren nur den Krümmungsdruck des konkaven Meniscus zu betrachten, während man die Erörterung der Tangentialkräfte (z. B. die Spannung Glas/Flüssigkeit bei Erhebung im unbenetzten Kapillarrohr¹⁾ oder die Spannung der adhärierenden hohlzylindrischen Flüssigkeitsschichte im benetzten Kapillarrohr) ausser acht lässt.

Aus dem Gesagten erhellt, dass die Kapillaritätslehre nach der gedachten Richtung hin wohl noch einer Bereinigung fähig ist. Meiner Meinung nach wird die Unsicherheit der Auffassung des gegenseitigen Verhältnisses von Tangentialspannung und Krümmungsdruck durch mehrere besondere Umstände bewirkt, deren einer darin begründet ist, dass in der Tat gelegentlich Krümmungsdruck und Tangentialspannung ohne Schaden bei der Auffassung eines bestimmten physikalischen Phänomens

¹⁾ Ein unbenetztes Kapillarrohr nenne ich eine solches, welches nicht benetzt wurde, ehe der Versuch begann; ein benetztes Kapillarrohr wird gewöhnlich dadurch erhalten, dass man die benetzende Flüssigkeit durch Emporziehen des Rohrs zurückfallen lässt.

miteinander vertauscht werden können. Da dieser Punkt event. auch bei biologischen Untersuchungen in Betracht kommt, mag ein einfaches Beispiel zur Illustration dienen.

Sei in Fig. 7 A ein kurzes, stumpfes Pseudopodium gegeben, welches zylindrisch ist und eine halbkugelig abgerundete Endfläche besitzt. Es besteht die Voraussetzung, dass das Gebilde

Fig. 7.

durch Oberflächenspannung sich in der Richtung der Axe zusammenzieht. Frage ist: welches ist die Kraft, die im ersten Momente der Zusammenziehung als wirksam anzusehen ist? Hier sind offenbar mehrere Möglichkeiten der Berechnung gegeben: entweder wir nehmen an, der Krümmungsdruck der halbkugeligen Endfläche sei das wirksame, oder wir halten die Tangentialspannung der Zylindermantelfläche für die wirkende Kraft, oder wir könnten eventuell auch annehmen, dass beide Kräfte sich in der Wirkung superponieren.

Das Letztere halte ich für falsch, denn die Oberflächenspannung ist uns nur einmal als wirksame Kraft gegeben,

denn wir haben nur eine Oberfläche, innerhalb deren die Spannung nach allen Richtungen hin gleich ist. Wir dürfen die Kraft also nur entweder als Tangentialspannung aus der Zylindermantelfläche oder als Krümmungsdruck aus der halbkugeligen Endfläche berechnen. In beiden Fällen kommt man naturgemäß zu dem gleichen Resultate.

Ist R der Radius der halbkugeligen Endfläche, so ist der von der Flächeneinheit ausgeübte Krümmungsdruck

$$p = \frac{2\alpha}{R}.$$

Der in der Richtung der Axe ausgeübte Gesamtdruck beträgt indessen

$$p_1 = \frac{2\alpha}{R} \cdot R^2 \pi,$$

denn der Grundkreis der Halbkugel $R^2 \pi$ ist zugleich die Projektion der Halbkugel in der Richtung der Axe. Die gesamte wirksame Kraft ist also (im ersten Moment)

$$p_1 = 2\alpha \cdot R \pi.$$

Oder aber wir gehen von dem Zylindermantel aus, dann kommen wir zu demselben Werte, denn die Spannung der Zylinderfläche ist gleich α . Diese Kraft wirkt aber am ganzen Umfange des Zylinders, welcher gleich $2 R \pi$ ist; also wird die wirksame Gesamtkraft wiederum sein:

$$p_1 = \alpha \cdot 2 R \pi.$$

Genau denselben Fall haben wir bei der benetzten Kapillare (Fig. 7 B), denn man kann die Triebkraft, welche die Flüssigkeitssäule hebt, berechnen entweder aus dem Krümmungsdruck des Meniscus oder aber man geht von der Oberflächenspannung der die Kapillarwand benetzenden Flüssigkeitsschichte aus. Beide Wege führen zu dem gleichen Ziele und man erhält identische Werte der wirksamen Kraft.

Ein anderes ist die Frage, ob einer der beiden Betrachtungsweisen im konkreten Falle der Vorzug zu geben sei. Bei der

Kapillare kann die Entscheidung nicht schwer fallen, denn wenn man eine stark gefärbte Flüssigkeit aufsteigen lässt, so sieht man ohne weiteres, dass es die flüssige Wandschichte ist, welche sich zusammenzieht und die nachfolgende Flüssigkeitssäule hebt. Ausserdem ist die aufgewandte potentielle Energie, berechnet aus der Oberfläche der flüssigen Wandschichte, genau gleich der Arbeit, welche durch die Hebung der Flüssigkeit geleistet wird. In anderen Fällen dürfte indessen die Entscheidung, ob man besser von der Tangentialspannung oder besser von dem Krümmungsdruck ausgehen soll, nicht so einfach sein.

Den inneren Grund, warum in den beiden gedachten Fällen Tangentialspannung und Krümmungsdruck mit einander vertauscht werden können, glaube ich durch folgende Betrachtungsweise klar legen zu können. Legen wir durch die Axe der Kapillare in Fig. 7 B eine Ebene, so erhalten wir von der Flüssigkeitsoberfläche eine Durchschnichtsfigur (Fig. 8 A), welche aus einem Halbkreise besteht, dessen Enden in zwei gerade, einander parallele Linien auslaufen; der Halbkreis entspricht dem Meniscus, die parallelen Linien der hohlzylindrischen flüssigen Wandschichte. Das schematisch angenommene Pseudopodium (Fig. 7 A) wird natürlich die gleiche Durchschnichtsfigur ergeben.

Diese Durchschnichtsfigur (Fig. 8 A) kann man in Vergleich setzen mit einem gespannten Faden (mathematisch gedacht: ohne Dicke), welcher über zwei Rollen läuft (Fig. 8 B). Heisse das Gewicht, welches den Faden spannt, p , so wird diese Spannung p genau der Tangential- oder Oberflächenspannung α in den vorher betrachteten Fällen entsprechen. Daher wird im Zustand des Gleichgewichtes das durch den Flaschenzug gehobene Gewicht $P = 2p$ sein. Der Anhänger P würde im Fall der Kapillare dem Gewicht der Flüssigkeitssäule entsprechen. Es ist nun klar, dass wir bei der physikalischen Betrachtung die Spannung der beiden Längsfäden ersetzt denken können durch

den Druck, welchen der halbkreisförmige Teil $a b c$ der Fadestrecke auf die Rolle ausübt. Der Druck auf die Rolle würde aber analog sein dem Krümmungsdruck. Mithin dürfte aus dieser Analogie deutlich hervorgehen, wie es zu verstehen ist,

Fig. 8.

dass einige Autoren vorwiegend mit dem Krümmungsdruck, andere mit der Oberflächenspannung arbeiten und doch zu dem nämlichen Resultate kommen. Mit diesen Auseinandersetzungen ist allerdings der Gegenstand nicht erschöpft, da die Hervordrängung bald des einen bald des anderen Prinzipes Einseitigkeiten der Betrachtung zur Folge hat, welche gelegentlich störend wirken. Doch ist hier nicht der Ort auf weitere Details einzugehen; hiermit endigen wir unsere allgemeinen physikalischen Betrachtungen.

Zweiter Hauptteil.

Die Selbstordnung (Cytotaxis) sich „berührender“ Furchungszellen erklärt als Wirkungsweise der Ober- flächenspannung.

Wir wenden nunmehr die Theorie der Oberflächenspannung auf die Selbstordnung sich berührender Furchungszellen an und geben zunächst einen kurzen Auszug aus der Rouxschen Beschreibung dieses sehr bemerkenswerten Phänomens. Hierbei lassen wir soweit wie möglich den Autor selber sprechen.

Roux schreitet bei seiner Beschreibung von den einfacheren zu den komplizierteren Fällen fort und beschreibt demgemäss zunächst das Verhalten nur zweier Zellen, S. 287 ff.

»Isolierte Furchungszellen der zerrissenen Morula und Blastula des Frosches, welche sich punktuell berühren, geschehe letzteres zufällig oder in Folge von aktiver Selbstnäherung (Cytotropismus), können sich in mannigfach verschiedener Weise verhalten

»Wenn die Zerschneidung oder Zerreissung des gefurchten Eies in filtriertem Hühnereiweiss oder in $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{2}$ % iger Kochsalzlösung bei einer Wärme von 20—27° C. und gleich am Anfang einer rechtzeitigen Laichzeit erfolgt, so findet bei den meisten der . . . nach der Isolierung rasch annähernd kugelförmig werdenden Zellen im Laufe von 5—10 Minuten ein ausgedehntes flächenhaftes Sichaneinanderfügen der sich berührenden Zellen statt, welches manchmal noch mit besonderen Gestaltänderungen verbunden ist« (Fig. 9¹).

¹) Die Rouxschen Figurenbezeichnungen wurden mit den fortlaufenden Figurenbezeichnungen dieser Arbeit vertauscht.

»Dieses flächenhafte Sichaneinanderlegen der Zellen sei kurz als „Zusammenfügung der Zellen“ (*Cytarme*) bezeichnet.«

Fig. 9.

»Die Cytarme erfolgt (von oben gesehen) gewöhnlich, aber nicht immer, nach beiden Seiten vom ersten Berührungspunkte aus gleichmäfsig, also »gleichseitig« und kann verschiedene Grade erreichen und dann stehen bleiben oder auch sich wieder lösen«

»Ist die Zusammenfügung von zwei und mehr Zellen soweit fortgesetzt, dass an der Zellengrenze keine Furche mehr besteht (s. Fig. 9), die freie Oberfläche ungebrochen von einer Zelle auf die andere übergeht, so heisse die Zusammenfügung eine *vollkommene*, die Anordnung eine *geschlossene*«

»Ist noch eine Furche an der Zellgrenze vorhanden (Fig. 10), so ist die Zusammenfügung eine unvollkommene, die *Anordnung eine* (mehr oder weniger) *offene*«

»Die *v o l l k o m m e n e* Zusammenfügung ist das Gewöhnliche bei den von uns verwendeten lebenskräftigen Zellen.«

»Zwei einander gleichgrosse Zellen bilden dabei zu meist eine in Richtung der mittleren Verbindungslinie beider Zellen noch etwas längliche Gestalt (Fig. 9 a). Eine fast vollkommen kugelförmige Form habe ich nur bei ungleich grossen Zellen (Fig. 9 b) gesehen.«

»Die Berührungsfläche beider Zellen ist meist eben (Fig. 9 a, 10 a), anscheinend selbst bei sehr verschiedener Grösse der beiden Zellen; diese Art der Verbindung heisse „ebene Zusammenfügung“.

»Doch kommt es auch vor, dass die eine Zelle stark gerundet bleibt, an welcher sich die andere Zelle ausgedehnt an sie anschliesst: „gewölbte Zusammenfügung“ (Fig. 9 d, f, 10 b, c, d).«

Fig. 10.

»Wenn die Zellen sehr ungleich gross sind, und besonders, wenn eine kleinere Zelle pigmentiert ist, kommt es vor, dass sie sich nicht so stark flächenhaft verbreitert, um die Möglichkeit einer kugeligen Rundung des Komplexes zu gewähren; dies ist wohl zugleich der Grund, dass in diesen Fällen die grössere Zelle ein halsartig verjüngtes Übergangsstück bildet (s. Fig. 9 e und 10 e).«

Weitere instruktive Bilder werden bei der Zusammenfügung von 3 Zellen erhalten (S. 392—394 bei Roux).

»Liegen die drei sich punktuell berührenden Zellen in einer geraden Reihe, also die Mittelpunkte der Zellen in einer geraden Linie, so liefert die Abplattung zunächst eine gerade Zellenreihe mit Formverhältnissen, wie sie auch aus Seifen-

blasen gebildet vorkommen (s. Fig. 11 a).« Die entsprechende geschlossene Anordnung sieht man in Fig. 11 b. Lagen die drei Zellen anfänglich im Bogen, so erhält man auch eine gebogene Zellreihe (11 c und d).

Fig. 11.

«Sind dagegen drei (oder mehr) Zellen so geordnet, dass jede Zelle zwei (oder mehr) Zellen berührt, so liegt eine Anordnung vor, die verdient, von der einfachen Zellreihe durch eine kurze Bezeichnung unterschieden zu werden; sie heisse daher „Zellkomplex“

«In einem »Komplex« aus drei (oder mehr) punktuell sich berührenden Zellen (s. Fig. 12 a) platten sich die Zellen gleichfalls gewöhnlich aneinander ab, und zwar meist derartig, dass bald der anfängliche Hohlraum in der Mitte schwindet und die drei Berührungsflächen in einer Kante zusammenstossen, also eine »Dreiflächenkante« bilden (Fig. 12 b—d), ähnlich wie bei Seifenblasen. Bei letzteren werden die Winkel, welche die drei Berührungsflächen miteinander bilden, durch die relative Grösse der Blasen bestimmt (ist unrichtig, d. Ref.). Bei unseren Zellen können die Winkel diesem Verhalten auch entsprechen; doch kommen auch alle denkbaren Abweichungen davon vor, siehe z. B. Fig. 12 b, wo die grosse Zelle einen Winkel von fast 180° bildet und Fig. 12 d, wo die kleinste Zelle

dasselbe tut« . . . Lebenskräftige Zellen erreichen gewöhnlich auch in diesen Fällen das Stadium der vollkommenen Zusammenfügung, bei welchem eine vollkommene oder annähernde

Fig. 12.

Kugelform des »Komplexes« erreicht wird, ohne dass sich einzelne Zellen durch einspringende Winkel an den Nachbarzellen absetzen.

Auch bei Zusammenfügung von 4 und mehr Zellen konnten analoge Vorgänge und Anordnungen beobachtet werden. Die hierbei bisweilen entstehenden Vierflächenkanten können von langer Dauer sein (s. Fig. 13 und 14).

Fig. 13.

Fig. 14.

Sehr merkwürdig sind die besonderen Anordnungen des Pigmentes, welche mit der Zellenzusammenfügung verbunden sind. Bei den mit »Rindenpigment« versehenen Zellen der Morula und Blastula, deren Struktur als leicht veränderlich gelten kann, zeigt sich folgendes Verhalten (S. 404 bei Roux):

»An den von zwei Seiten her von Zellen berührten Zellen einer einfachen Zellenreihe häuft sich das Pigment allmählich in der Mitte der freien Oberfläche unter Freilassung eines parallel konturierten Saumes neben der Nachbarzelle an und bildet daher ein »die Zelle ringsumziehendes« Äquatorband (s. Fig. 15 a). Aus der parallelen Konturierung des pigmentfreien Zellrandes

Fig. 15.

ergibt sich, dass das dunkle Äquatorband die Gestalt der Zelle wiederholt; dass es selber parallel konturiert ist, wenn die betreffende Zelle parallele Berührungsflächen mit den Nachbarn bildet (Fig. 15 e), dass es dagegen keilförmig erscheint (Fig. 15 c), wenn die beiden Berührungsflächen nach einer Seite konvergieren, wenn also die Zelle keilförmig gestaltet ist.«

»An den Endzellen der einfachen Reihe findet sich schliesslich das Pigment zumeist gegen die Mitte der freien Oberfläche, also am distalen Ende angehäuft, und zwar bei grösseren, also jüngeren Zellen (von der Morula) stammend noch auf eine grössere Fläche verteilt (Fig. 16 b), bei kleineren älteren Zellen der Blastula an beschränkter Stelle dichter zusammengehäuft, die dann auch besonders vorspringt«

Fig. 16.

Im einzelnen zeigen sich hierbei vielerlei Abweichungen von diesen Regeln; indessen kommt es uns hier nur auf die typischen Fälle, auf die typischen Bilder an.

Roux teilt dann ferner mit, dass bereits zusammengefügte Zellen sich auch von selbst wieder trennen können (Cytochorismus), entweder durch Abkuglung einer oder zweier sich berührender Zellen oder auch durch spaltförmige Trennung. Es sind offenbar neu hinzutretende Ursachen, insbesondere »Änderungen der Qualitäten« der Zellen (Roux), welche diesen Effekt bedingen (Zellentod, Kontraktion etc.) und daher haben wir unsererseits kein besonderes Interesse an dieser Sache.

Ferner hat Roux besonders ausführlich die von ihm beobachtete Tatsache behandelt, dass während der Zellenzusammenfügung auch gleitende Verschiebungen der Zellen gegeneinander vorkommen, sogen. »Cytolisthesis«. Dieses Zellengleiten kann dazu führen, dass selbst verhältnismässig grosse im Anfang ungeordnete Komplexe von Zellen allmählich sich zur Gesamtform einer Kugel zusammenschliessen. Mehrere Arten von Zellengleiten werden unterschieden. Berühren sich zwei Zellen punktuell oder flächenhaft, so kann 1. der Fall stattfinden, dass die in Bewegung begriffene Zelle sich nur um ihren Schwerpunkt dreht; 2. kann hierbei gleichzeitig auch eine Verlagerung des Schwerpunktes statt haben; 3. kann die Verlagerung der Zelle auch als einfaches Gleiten ohne Drehung derselben um den Schwerpunkt zu stande kommen; eine analoge Unterscheidung gilt für die gleitende Bewegung von Zellkomplexen.

Das Zellengleiten ist, wie wir später sehen werden, prinzipiell dasselbe wie die Zellenzusammenfügung; es ist daher auch hier nicht nötig, weitere Einzelheiten zu berichten.

Roux hat ferner in einer ausführlichen theoretischen Erörterung zu bestimmen versucht, welchen **eventuellen** Anteil die Wirkung der Oberflächenspannung bei der Selbstordnung der Furchungszellen hat. Er will die Wirkung der Oberflächenkräfte, wie ausdrücklich hervorgehoben zu werden verdient, einstweilen nur als möglich ansehen und behandelt diese Frage als Problem.

Diese langwierige theoretische Diskussion Roux's bewegt sich sozusagen auf unrichtiger Fährte, wie in kurzem dargetan werden soll.

Hat man, wie Roux, eine ergebnisreiche biologische Untersuchung hinter sich und wünscht man fernerhin die Formeln und Begriffe der Physik auf diese in Anwendung zu bringen, so sollte man, scheint mir, zunächst scharf und genau feststellen, welches die physikalischen Bedingungen waren, unter denen die in Frage kommenden biologischen Vorgänge sich abspielten; denn nur auf diesem Boden kann sich dann ergeben, ob von seiten der Physik bereits Ergebnisse vorliegen, welche direkt auf biologische Prozesse bezogen werden können. In unserem Falle sollte man doch wohl zunächst fragen: welches ist die Natur der sich begrenzenden Medien? Kann hieraus vermutungsweise auf die Existenz einer Oberflächenspannung geschlossen werden und wo haben wir den materiellen Träger derselben zu suchen?

Roux fällt aber gleichsam mit der Türe ins Haus; der Autor spricht sogleich von »Blasenspannung«, von der »Plateauschen Oberflächenspannung«, den »Plateauschen Gesetzen«, dem »Plateauschen Prinzip der kleinsten Oberflächen-

spannung« etc. Nach welcher Richtung hin der angestrebte Vergleich mit anorganischen Objekten sich bewegt, bleibt dem Leser zunächst unklar.

Jedoch ergibt sich alsbald, dass Roux unter Oberflächenspannung lediglich den Krümmungsdruck versteht. Wir unsererseits wollen dagegen mit Quincke und den meisten deutschen Autoren den Begriff der »Oberflächenspannung« mit demjenigen der Tangentialspannung identifizieren, deren Maß die Kapillaritätskonstante « ist.

Nun würde es für den Leser Roux's, nachdem er die erste Orientierung gewonnen hat, gleichwohl möglich sein, ein klares Verständnis der Abhandlung zu gewinnen, wenn der Autor unter der allgemeinen Bezeichnung der »Plateauschen Prinzipien« lediglich die bekannte (Laplacesche) Formel für den Krümmungsdruck verstünde, mit welcher Plateau arbeitete und welche er durch das Experiment zu begründen versuchte; es wäre dies der Ausdruck:

$$p = K \pm \frac{H}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right).$$

Aus dieser Formel nämlich würde man die Eigenschaften wenigstens aller gekrümmten Flüssigkeitsoberflächen ableiten können, ja man könnte den Versuch wagen, auch die »Cytarme« und die »Cytolisthesis« mit dieser Formel in Einklang zu bringen. Roux bezieht aber offenbar fortwährend den Ausdruck »Plateausche Gesetze« auf den Spezialfall der Seifenblasen, welchen er des Vergleichs halber immer wieder und wieder benutzt. Auf der anderen Seite versäumt aber Roux den Nachweis, dass der spezielle Fall der Seifenblasen in irgend eine nähere Analogie zu dem Verhalten der Furchungszellen gebracht werden kann; dies wäre ja nur möglich, wenn die physikalischen Bedingungen hier und dort wenigstens annähernd die nämlichen wären. Dies ist aber keineswegs der Fall, und daher ist es auch wieder ganz ohne Belang, dass der Autor bei

den Furchungszellen massenhafte Abweichungen von dem Verhalten der Seifenblasen auffindet. Dies ist vielmehr selbstverständlich.

Man verstehe also recht: Es kann das Verhalten der Seifenblasen aus der Laplaceschen Grundformel abgeleitet werden und es könnten eventuell auch die Roux'schen Beobachtungen einem Versuche der Ableitung aus dieser Formel unterzogen werden. Aber es können gewiss auch Hunderte von anderen Spezialfällen aus jener Formel verständlich gemacht werden, wie man z. B. auch das Ansteigen einer Flüssigkeit in einer Kapillare aus jener Formel abzuleiten pflegt. Allein es ist durchaus nicht notwendig, dass die aus jener Formel abzuleitenden speziellen Fälle unter sich in direkter Analogie stehen. Daher wird auf Grund der Roux'schen Erörterungen niemand einsehen können, warum viele direkte Analogien zwischen Seifenblasen und Furchungszellen von vornherein angenommen oder wenigstens vermutet werden.

Hier füge ich hinzu, dass ich massenhafte Versuche mit Seifenblasen und flüssigen Seifenlamellen gemacht habe und über die physikalische Seite der Sache genügend orientiert bin.

Die Lage wird ausserdem dadurch erschwert, dass Roux annimmt, die Winkel, welche die Seifenlamellen miteinander bilden, seien durch die relative Grösse der angrenzenden Blasen bestimmt. Es ist dies ein Verstoss gegen die physikalischen Grund-Prinzipien der Blasenspannung und hierdurch wird der Wert aller Äusserungen Roux's über die Dreiflächenkante in ihrer Bedeutung für die Theorie der Zellenzusammenfügung und der Furchung zweifelhaft, denn die Sachlage steht so, dass selbst das massenhafte Vorkommen von Dreiflächenkanten in zelligen Geweben überhaupt nicht irgendwie beweisend für die Wirksamkeit von Oberflächenspannung ist (was gewiss auch Roux nicht angenommen hat). Ja man könnte aus dem Vorkommen von Dreiflächenkanten nicht einmal vermutungsweise

auf die Wirkung von Oberflächenkräften schliessen, **ausser wenn** sämtliche Winkel ohne Rücksicht auf die Grösse der anstossenden Blasen durchgängig gleich 120° sind.

Sind aber die eingeschlossenen Winkel ungleich gross, so ist das einzige, was im äussersten Falle gesagt werden kann, dass die Dreiflächenkanten der Theorie der Blasenspannung nicht widersprechen: sind die eingeschlossenen Winkel ungleich, so müsste man darauf reflektieren, die Kapillaritätskonstanten in den verschiedenen Lamellen ungleich gross anzunehmen.

Im übrigen wolle man noch auf folgendes acht haben. Ein Rhombendodekaeder zeigt Winkel von 120° ; dies ist eine Form, welche gewiss häufig mit grösserer Annäherung bei Zellen vorkommt, welche zu einem grösseren Komplex zusammengeschlossen einer allseitig gleichmässigen Pressung ausgesetzt sind. Nun ist es möglich, einen Komplex von Bleikugeln durch äussere Pressung so zu behandeln, dass jede Kugel in die Form eines Rhombendodekaeders übergeht. In diesem Falle würde man innerhalb der ganzen Masse nur noch Dreiflächenkanten haben, obwohl von »Blasenspannung« in diesem Falle nicht die Rede ist.

Mithin ist hieraus zu ersehen, dass selbst wenn ein Komplex von Zellen ausschliesslich Dreiflächenkanten mit eingeschlossenen Winkeln von 120° zeigt, dennoch ein besonderer Beweisgang nötig wäre, um zu zeigen, dass es Oberflächenspannung war, welche diese Formengebung bedingte.

Es geht nun aus der Rouxschen Arbeit offenbar hervor, dass er die Zellen selbst um des angestrebten Vergleichs willen als Analoga der Seifenblasen ansieht; für eine solche Parallele dürften wir indessen meiner Meinung nach in Wahrheit keinen Anhalt haben. Eher würde ich — unter dem Gesichtspunkte der Oberflächenspannung — einen soliden Flüssigkeitstropfen als physikalisches Analogon einer Furchungszelle betrachten. Diese

Analogie mit dem Flüssigkeitstropfen hat ja auch Roux in einer späteren Arbeit äusserst geschickt benutzt.

Jedesfalls sitzt nach Roux die wirksame Oberflächenspannung in der Oberfläche der Zelle selbst, also etwa in deren Rindenschicht, und da sich nun viele Abweichungen von dem Verhalten der Seifenblasen zeigen, so meint Roux, dass, wenn überhaupt die Oberflächenspannung zur Erklärung der beobachteten Phänomene herangezogen werden solle, dann die Oberflächenspannung der Zelle nicht homogen sein dürfe, vielmehr müsse die wechselvolle Art der Erscheinung auf eine »anomogene« Spannung zurückgeführt werden. (Roux, pag. 440 ff.)

»Alle die erwähnten Gestaltungen können durch die Oberflächenspannungen »vollzogen« werden, sofern die Oberflächenspannungen der einzelnen Zellen, resp. einzelner Stellen der Zellen entsprechend verschiedene sind, und wenn diese Spannungen selber zeitlich wechseln, und sofern noch allerhand Vorbedingungen wie leichte Umgestaltbarkeit des Zellinhaltes und leichte Verschiebbarkeit der Zellen erfüllt sind.«

»Diese örtliche und zeitliche Verschiedenheit der Oberflächenspannungen muss aber, so weit durch sie »typische«, das heisst bei den Individuen derselben Art, resp. bei den Nachkommen derselben Eltern stets in gleicher Weise wieder gebildete Gestaltungen hervorgebracht werden, selber eine »typische« sein.«

»Daher kommt auch bei der »Vermittlung« der bezüglichen typischen organischen Gestaltungen durch »Oberflächenspannung« wieder die »typische Besonderheit« (die sogenannte individuelle, besser personelle Beschaffenheit oder Spezifikation) der einzelnen Zellen wieder voll zur Geltung. . . .

»An die Stelle des Herrschens der einfachen physikalischen Komponente der Spannung homogener Oberflächen tritt somit wieder als das die Anordnung und die Gestalt der Zellen und die »normale« Gestaltung der aus ihnen gebildeten Komplexe Beherrschende die **Individualität der Zelle** nebst den aus dem Zusammensein solcher Zellen sich ergebenden, gestaltenden Wirkungen.«

»Erst mit diesen Annahmen wird es überhaupt möglich, die Oberflächenspannung für die Ableitung der mannigfachen Erscheinungen der Selbstordnung der Zellen heranzuziehen.«

In seiner »Zusammenfassung« am Schluss der Arbeit sagt Roux, dass es möglich, ja in gewissem Mafse wahrscheinlich sei, dass die verschiedenartigen von ihm beobachteten Gestaltungen und Zellwanderungen durch Oberflächenspannungen vermittelt seien, und zwar durch die Spannungen anomogener, in ihrer Qualität örtlich und zeitlich wechselnder Oberflächen.

Zu dieser Ableitung einer anomogenen Spannung verschiedener Stellen der Zelloberfläche möchte ich folgendes bemerken:

1. Der Gedanke Roux's, dass die Spannung in den Berührungsflächen der Furchungszellen entweder Null werden muss oder wenigstens so gering, dass sie gegenüber der Spannung der freien Oberflächen nicht mehr in Betracht kommen kann, ist vollkommen richtig. Roux sagt darüber pag. 444:

»Wenn an den Berührungsflächen der Zellen die Spannung aufhörte, und bloss an der freien Oberfläche eines Komplexes die Oberflächenspannung erhalten bliebe, und wenn diese Oberflächenspannung von einer Zelle auf die andere sich fortsetzte, so würde der ganze Komplex gleichsam von einer einzigen Haut umschlossen, welche sich möglichst zu kontrahieren strebt und daher den ganzen Komplex der Kugelform nähert, eine Bildung, die den von uns häufig gesehenen »vollkommen geschlossenen Anordnungen« entspricht.«

Diesem Gedankengange hätte der Autor nachgehen müssen. Da aber der Ausgangspunkt der theoretischen Untersuchung nicht genügend gesichert war, so konnte dieser an sich richtige Gedankengang auch nicht in richtiger Weise fruktifiziert werden.

Wenn zwei Oberflächen identischer Medien sich direkt berühren, so ist die Oberflächenspannung zwischen ihnen gleich Null; dieser Fall liegt bei den Furchungszellen vor. Es kommen an den sich berührenden Flächen nur noch die in der Zellrinde etwa vorhandenen elastischen Spannungen in Betracht.

2. Aus der von mir hier betonten Tatsache, dass bei direkter Berührung zweier Zellen die Oberflächenspannung an der Berührungsfläche Null werden muss, kann selbstverständlich nicht geschlossen werden, dass die Oberflächenspannung der Zellen »anomogen« geworden ist. Denn da eine Spannung an der gemeinschaftlichen Berührungsfläche fehlt, so ist diese Fläche, unter dem Gesichtspunkt der Theorie der Oberflächenspannung betrachtet, gleichsam als nicht vorhanden anzusehen, während die gesamte übrige, noch mit dem äusseren Medium in Berührung stehende Oberfläche die nämliche (homogene) Spannung besitzen würde wie zuvor.

Dass Roux auf eine »anomogene« Spannung der sich berührenden Furchungszellen schloss, war, wie sich späterhin gezeigt hat, sehr ungünstig für die weitere literarische Entwicklung, denn wenn auch Roux selbst bei seinem bekannten Scharfsinn einen massvollen Gebrauch von dieser Idee einer »anomogenen« Spannung machte, so hat doch eben diese Idee bei Rumbler eine kolossale Verwirrung angerichtet. Siehe dessen Arbeit über den Aggregatzustand und die physikalischen Besonderheiten des Protoplasmas. Die dort produzierte Theorie der Entstehung der Foraminiferengehäuse ist eine ganz ausserordentliche Verirrung, und diese ist nur auf Grund des Begriffes der »anomogenen« Spannung in Verbindung mit einer total willkürlichen Aus-

legung des sogen. Gesetzes von der Konstanz des Randwinkels zu stande gekommen.

Dieses Prinzip der »anomogenen« Spannung ist, solange nichts Tatsächliches über das Vorkommen solcher »anomogenen« Spannungen ausgemacht werden kann, überhaupt gar kein Prinzip, wenn nicht ein Prinzip der Willkür, und als solches sehen wir es bei Rhumbler auftreten. Dieses Prinzip gestattet, wie sich jetzt schon gezeigt hat, jedem Autor beliebige Annahmen oder Mutmaßungen zur Erklärung beliebiger in der belebten Natur vorkommender Bewegungs- und Gestaltungsvorgänge.

3. Roux und ihm folgend Rhumbler, sowie auch andere Autoren haben übersehen, dass anomogene Spannungen der Oberfläche nur momentan existenzfähig sind. Denn sie müssten Veranlassung geben zur Entstehung reissender Oberflächenströmungen, welche dem Ausgleich jener ungleichen Spannungen dienen. In diesem Sinne hat auch Bütschli die ungleiche Spannung der Oberflächen zur Erklärung der Strömungserscheinungen des Protoplasmas und mittelbar zur Erklärung der Kriechbewegungen niederer Geschöpfe verwertet.

Hat aber Roux in jenen Zellen, welche seiner Mutmaßung nach anomogene Oberflächen in dem bezeichneten Sinne besitzen, jemals Strömungserscheinungen längs dieser Oberflächen gesehen?

Ich will es nun versuchen, dem Problem der Zellenzusammenfügung physikalisch näher zu treten, wobei ich die oben gegebene Ableitung benutze.

Gehen wir von dem Phänomen der Seifenblasen aus, so haben wir in diesem Falle Hohlkugeln, welche direkt unter gewöhnlichen Umständen überhaupt nicht zur Vereinigung, also auch nicht zum flächenhaften Aneinanderlegen zu bringen sind. Die Vereinigung gelingt nur dann, wenn an der einen Seifen-

blase unten ein Flüssigkeitstropfen hängt und wenn man mit diesem Tropfen die zweite Blase berührt.

Warum unter diesen Umständen die Vereinigung relativ leicht von statten geht, möchte ich nicht erörtern, da ich darüber zu keiner Klarheit kommen konnte.

Sind zwei Seifenblasen in Vereinigung getreten, so sind sie miteinander im eigentlichsten Sinne verschmolzen; sie verhalten sich gewissermaßen wie siamesische Zwillinge, denn die Substanz der trennenden Wand ist beiden Blasen gemeinsam. Ferner ist die innere Oberfläche der beiden Blasen entsprechend vergrößert, die Summe der äusseren Oberflächen indessen verkleinert.

Die Gesetze, nach denen die Zusammenfügung der Seifenblasen statt hat, lassen sich leicht entwickeln und man findet die entsprechenden Angaben in allen Lehrbüchern. Es muss der Druck innerhalb der einen Blase plus der Spannung der trennenden Wand gleich dem Druck in der zweiten Blase sein. Ausserdem dürfen immer nur 3 Flüssigkeitslamellen in einer Kante zusammenstossen und die Winkel zwischen den Lamellen müssen unter sich gleich sein (bei beliebiger Grösse der angrenzenden Blasen).

Das Beispiel der Furchungszellen ist nun dem der Seifenblasen durchaus unähnlich. Ich führe hierfür zunächst folgende Gründe allgemeiner Art ins Feld.

I. Die Zellen bestehen nicht aus »flüssiger« Materie, sondern ihre Substanz ist organisiert.

Ich will an diesem Orte den alten Streit darüber, ob die lebendige Materie als flüssig oder »fest« anzusehen sei, nicht erneuern. Ich will darüber nur wenige kurze Bemerkungen verlieren. Es hat sich in neuerer Zeit gezeigt, dass die bekannte Streitfrage besser nicht auf einen festen oder flüssigen Zustand der lebenden Masse gestellt wird, sondern dass es sich um die Frage der **Organisation** der lebendigen Materie handelt. Jenen

Zustand des Protoplasmas, den andere Autoren als flüssig ansehen (Plasma der Rhizopoden, Pflanzenzellen, Leukocyten etc.) möchte ich mit einem neuen Terminus technicus als den **mobilen Zustand** des Plasmas bezeichnen.

Er ist meiner Meinung und meinen Beobachtungen nach gekennzeichnet durch den schnellen Wechsel der Organisation.

Was die Furchungszellen anlangt, so möchte ich zunächst und wiederholt darauf hinweisen, dass sämtliche Versuche, welche sich auf »Furchung unter Pressung« beziehen, durch Veränderung der elastischen Spannung¹⁾ des Plasmas erklärlich sind (Spannungsgesetz 1895, 1897), und dass aus diesem Umstande allein schon die Organisation des Plasmas der Furchungszellen hervorgeht. Dass dieser organisierte Zustand, welcher von dem der Flüssigkeiten (einschliesslich der Emulsionen) himmelweit verschieden ist, bei Furchungszellen tatsächlich vorhanden ist, zeigt sich auch wiederum dadurch, dass, — selbstverständlicher Weise, — die von Roux beobachteten Erscheinungen auf der Basis der Annahme eines flüssigen Zustandes der Zellen total unerklärlich sind, wie sich sofort aus folgendem ergibt.

II. Seifenblasen (mit flüssiger Wand!) vereinigen sich unter gewöhnlichen Umständen nicht, sondern verhalten sich wie elastische Bälle, welche beim Zusammenschlagen voneinander abprallen. Werden sie unter bestimmten Bedingungen dennoch zur Vereinigung gebracht, so verschmilzt ihre Substanz unauflöslich.

Die Furchungszellen vereinigen sich im Gegensatz hierzu spontan; diese Vereinigung ist indessen eine äusserliche, die

¹⁾ Die Bezeichnung „elastische Spannung“ verstehe ich hier in engerem Sinne, indem ich es dahingestellt sein lasse, ob die Oberflächenspannung als elastische Spannung in weiterem Sinne bezeichnet werden darf.

Substanz der Zellen verschmilzt nicht. Der Umstand selbst, dass die Vereinigung der Zellen freiwillig eintritt, wobei die Zellen sich, gleichsam wie unter einem erheblichen äusseren Drucke, in hohem Grade gegen einander abplatten, doch aber nicht mit einander verschmelzen, beweist, dass es sich um eine totale Adaption der Zellen mit Verdrängung der zwischenliegenden Wasserschichte handelt. Bliebe nämlich die Wasserschichte erhalten, so würde es überhaupt gar keine Möglichkeit geben, auf Grund deren die Zellen lediglich durch Oberflächenkräfte sich vereinigen könnten.

Mithin ist in vorstehendem ein physikalischer Beweis für den »festen« Aggregatzustand, d. h. organisierten Zustand des Plasmas gegeben; denn wären diese Zellen flüssige Gebilde, so müssten sie ohne Grenze verschmelzen, sobald die Plasmen zweier Zellen sich direkt berühren.

Hierzu noch folgende Ausführungen:

Wäre eine feinste Wasserschichte zwischen je zwei gegeneinander abgeplatteten Furchungszellen vorhanden, so könnte die Abplattung nur auf dem gewöhnlichen mechanischen Wege einer äusseren Pressung bewirkt und unterhalten werden, denn die Summe aller Oberflächen aller Zellen, welche durch Abplattung sich zusammenfügen, ist erheblich grösser als die Summe aller Oberflächen ebenderselben, kugelig gedachten Zellen. Wären nun alle Oberflächen der zu einem Komplex vereinigten Zellen allseitig von Wasser umgeben, so müsste die Summe der potentiellen Energie der Fläche gewachsen sein. Da aber bei der Zellenzusammenfügung offenbar Arbeit geleistet wird, so muss die Summe der potentiellen Energie der Fläche im Gegentheil abnehmen. Dies kann nur dadurch geschehen, dass entweder das der Oberflächenspannung unterliegende Areal verkleinert wird, wobei aus der Abnahme der wirksamen Fläche die für die Arbeit der Zellenzusammenfügung notwendige Energie frei wird, oder das wirksame Areal nimmt nicht ab; dann muss

aber der Wert der Oberflächenspannung, d. h. die Kapillarkonstante entsprechend abnehmen.

Nun ist aber schlechterdings nicht einzusehen, warum der Wert der Spannung Plasma/Wasser abnehmen sollte. Es muss also die erste Alternative zutreffend sein: dass während der Zellenzusammenfügung das der Oberflächenspannung unterliegende Areal verkleinert wird. Da nun während des in Rede stehenden Prozesses die Gesamtoberfläche der Zellen (histologisch genommen) nicht verkleinert, sondern vergrößert wird, so folgt von selbst, dass die miteinander in Berührung tretenden Flächen unter völliger Verdrängung der umgebenden Wassermasse sich vereinigen: denn in diesem Falle ist der Wert der Oberflächenspannung der in Berührung stehenden Flächen gleich Null und auf diese Weise wird die wirksame Gesamtoberfläche Plasma/Wasser verkleinert, sodass mithin die geleistete Arbeit durch die Abnahme der Summe der potentiellen Energie der Fläche erklärbar wird.

Es würde zur Ergänzung noch nötig sein eine Erklärung darüber abzugeben, warum an den aufeinander liegenden Flächen der Furchungszellen eine totale Verdrängung der Wasserschichte gefolgert wird, warum nicht event. die Annahme einer teilweisen Verdrängung genügt. Die Antwort auf diese Fragestellung kann sich erst aus dem folgenden vollständig ergeben. Einstweilen wird folgendes genügen.

Eine »Berührung« in physikalischem Sinne unter dem Gesichtspunkte der Oberflächenspannung kann erst dann zugegeben werden, wenn der Abstand beider Zellen unter den doppelten Durchmesser der wirksamen Schichte sinkt. Man würde eine Berührung total nennen müssen, wenn der Abstand beider Zellen Null ist, man würde sie unvollständig nennen müssen, wenn die Entfernung beider Zellen unter dem Durchmesser der Wirkungssphäre sinkt ($0,1 \mu$). Sobald dies geschehen ist, verringert sich an dieser Stelle die Oberflächenspannung; die Folge

davon muss sein, dass die noch zwischengeschaltete Wasserschichte nach den Orten höherer Spannung abfließt. Also werden die Zellen sich so lange nähern, bis sie in totaler Berührung befindlich sind und dann wird an der Berührungsfläche die Oberflächenspannung Null sein.

Wir können also zusammenfassend sagen: Der Prozess der Zusammenfügung beginnt damit, dass zwei Zellen sich punktuell und direkt berühren; diese Berührung erst bewirkt, dass die Oberflächenkräfte wirksam werden können. Denn zwei im Wasser schwimmende kuglig abgerundete Zellen besitzen Minimalflächen; stossen dieselben bis zur völligen Berührung zusammen, so hat die nunmehr **gemeinsame** Oberfläche der beiden in Kontakt befindlichen Zellen den Charakter einer Minimalfläche **nicht mehr**; daher ist von jetzt an in der gemeinschaftlichen Oberfläche beider Zellen die Bedingung zur Wirksamkeit der Oberflächenkräfte gegeben, welche auf Herstellung einer neuen Minimalfläche hinwirken werden.

III. Die Furchungszellen sind im Sinne der hier vorliegenden physikalischen Betrachtung als Vollkugeln anzusehen; die Seifenblasen sind Hohlkugeln. Eine etwas dichtere Grenzschicht ist bei allen tierischen Zellen ohne Ausnahme, selbst bei den sogen. nackten Protoplasmen, mikroskopisch nachzuweisen. Sollte man in unserem Falle selbst annehmen, dass diese Grenzschicht eine freie innere Oberfläche besitzt, so würde diese Oberfläche doch begrenzt sein von eiweissreicher Materie und es ist infolgedessen so gut wie sicher, dass die Spannung dieser so herauskonstruierten inneren Oberfläche (welche der Innenfläche der Seifenblase analog zu denken wäre) praktisch äusserst gering, annähernd oder tatsächlich gleich Null sein würde. Der Umstand selbst, dass die Furchungszellen als Vollkugeln anzusehen sind, bedingt also das vollständige Verschwinden der Oberflächenspannung bei direkter Berührung, während bei Seifenblasen die trennende Wandschichte ihre Oberflächenspannung behält.

In obigem sind meiner Meinung nach die grundlegenden physikalischen Differenzen zwischen Seifenblasen einerseits und Furchungszellen andererseits, beide Objekte betrachtet unter dem Gesichtspunkte der Oberflächenspannung, genügend klar-gelegt worden. Alle sonst noch hervortretenden speziellen Differenzen des Verhaltens entwickeln sich auf der angegebenen Grundlage.

Begreiflicher Weise wird weiterhin die gesamte Beurteilung des Zustandekommens der Zellenzusammenfügung von der Frage nach der **Natur der Oberflächenspannung zwischen Protoplasma und Wasser** abhängen.

Viele Autoren haben schon versucht, aus den Sätzen über Oberflächenspannung Ableitungen auf physiologische Fragen zu geben; keiner von ihnen hat indessen die Frage nach der Natur der vorausgesetzten Oberflächenspannung aufgeworfen. Dieses Problem wird hiermit zum ersten Male behandelt.

In der Physik kennt man beim Kapitel der Oberflächenspannung mit Bezug auf die Begrenzung zweier Medien rücksichtlich der Frage ihres Aggregatzustandes eigentlich nur zwei Fälle: entweder sind beide Medien flüssig oder eines ist fest, das andere ist flüssig; wird hingegen eine Flüssigkeit durch einen gasförmigen Körper begrenzt, so wird der letztere bei fast allen Betrachtungen der Physiker gleichsam als nichtexistierend angesehen. Gehen wir nun auf die Zellenlehre über, so haben wir den Fall, dass das Protoplasma selbstverständlich nicht in gemeinem Sinne »fest« (d. h. starr) ist, etwa wie die Substanz einer gläsernen Kapillare, noch auch flüssig wie Wasser, sondern wir haben einen organisierten Körper vor uns, welcher schon auf Grund des Stoffwechsels in sich veränderlich ist. Diese Substanz ist ferner ihrer Struktur nach umbildungsfähig, d. h. sie ist zu mehr minder schnellen Änderungen ihrer Organisation

befähigt, eine Eigenschaft, die mangels näherer Bestimmungen unter den Begriff der Entwicklung, diesen im weitesten Sinne genommen, zu bringen ist. Hatten wir früher bei Begrenzung zweier Medien nur gesprochen von festen, flüssigen, gasförmigen Medien (wie Glas, Wasser, Luft), so haben wir nunmehr einen Körper anderer Art, welcher nicht starr wie Glas, auch nicht bedingungslos in sich verschieblich wie Wasser, sondern bis zu gewissem Grade **elastisch** (wie Kautschuk), jedoch — bei Überschreitung der Elastizitätsgrenze — **plastisch** oder modellierbar (wie Ton) und wahrscheinlich auch, unabhängig von aller Oberflächenspannung, **kontraktil** ist.

In der Physik haben wir ferner bei Begrenzung zweier Flüssigkeiten eine »gemeinschaftliche« Oberflächenspannung, indem angenommen wird, dass sich Sonderwirkungen der einzelnen Medien nicht geltend machen; bei Begrenzung eines festen (d. h. hier: starren) und eines flüssigen Mediums hingegen haben wir keine gemeinschaftliche Oberflächenspannung mehr, sondern es tritt nur die Spannung des flüssigen Mediums wirksam hervor. In diesem letzteren Falle differenziert sich also sozusagen die Rolle beider Medien: Die Wirksamkeit beider Medien fällt gewissermaßen auseinander, da die kleinsten Teile des einen Mediums unverschieblich sind.

Begrenzen sich nun Protoplasma und Wasser, so haben wir nur in letzterem eine unbedingte, in ersterem aber eine bedingte (bloss unter gewissen Umständen mögliche) Verschieblichkeit der Teile, und wir werden daraus folgern können, dass den beiden Medien Plasma/Wasser eine »gemeinschaftliche« Oberflächenspannung in dem Sinne etwa wie bei Öl und Wasser nicht zukommt; ebensowenig aber werden wir behaupten können, dass die Wirksamkeit beider Medien immer und unter allen Umständen auseinanderfallen müsse (wie bei der Oberflächenwirkung Glas/Wasser). Viel-

mehr wird hier eine Betrachtung und Beurteilung von Fall zu Fall notwendig sein.

Freilich geht nun meine Meinung dahin, dass diejenige Eigenschaft, welche das Plasma den festen Körpern nähert, nämlich seine auf innerer Organisation beruhende Zähigkeit immer als so gross anzunehmen ist, dass Sonderwirkungen der kapillaren Wasserschichte in der Begrenzung protoplasmatischer Flächen in vielen Fällen erwartet werden dürfen, besonders aber in einem solchen Falle wie dem der Furchungszellen, deren Substanz nicht zu den typisch »mobilen« Plasmen zu rechnen ist, obwohl die Furchungszellen ja amöboide Eigenschaften entwickeln können.

Welcher Art ist nun die Spannung Plasma/Wasser? Welches der beiden Medien hat die grössere, welches die geringere Molekularkraft? Auf welcher Seite liegt der Sitz der kontraktiven, auf welcher Seite der Sitz der expansiven Spannung? Es gibt hier nur eine mögliche Form der Betrachtung. Wir müssen uns daran halten, dass ein Zusatz kolloidaler Körper zu Wasser die Molekularkraft herabdrückt und dass daher die Molekularkraft des Plasmas im Verhältnis zu Wasser ebenfalls als verringert angesehen werden muss. Hiermit will ich durchaus nicht etwa sagen, dass Protoplasma als ein kolloidaler Stoff anzusehen sei; diese Bezeichnungsweise, welche mehrfach in modernen Schriften zu Tage getreten ist, halte ich vielmehr für äusserst verfehlt.

Denn aus dem Begriff des »Kolloidalen« kann man keine Klasse von besonderen Körpern oder Stoffen machen. Lösungen von Eisenoxyd, von Silber oder Gold, von Eiweiss oder Leim, Gerbsäure, Safranin oder anderen hochmolekularen Anilinfarbstoffen diffundieren zwar alle samt und sonders nicht; deswegen haben aber dennoch Eiweiss, Silber, Safranin etc. wesentlich nichts miteinander zu schaffen. Daher würde es ohnehin keinen Wert haben, Protoplasma als einen kolloidalen Körper zu be-

zeichnen; damit dies aber überhaupt möglich sei, muss der betreffende Körper in Wasser löslich sein. Dies ist aber gerade beim Plasma nicht der Fall.

Ich sage also: das Plasma ist freilich kein kolloidaler Stoff; aber in Bezug auf die Grösse seiner Molekularverbände muss das Plasma ähnlich beurteilt werden wie die kolloidalen Körper. Ja vielleicht können wir die typischen Grundstoffe des lebenden Plasmas als hochmolekular in extremem Sinne auffassen. Da nun konstatiert ist, dass eine Lösung von hochmolekularen Körpern in Wasser von geringerer Molekularkraft ist als reines Wasser, so muss vermutungsweise, da nichts anderes übrig bleibt, angenommen werden, dass auch das Plasma im Verhältnis zu Wasser eine geringe Molekularkraft besitzt.

Begrenzen sich also Plasma und Wasser, so meine ich, muss die positive oder kontraktive Spannung auf der Seite des Wassers, die expansive Spannung auf Seiten des Plasmas sein, wenn diese Verhältnisse lediglich von physikalischen Verhältnissen aus beurteilt werden.

Nun ist aber die Furchungszelle in unserem Falle ein Körper mit organisierter Oberflächenschicht und ein Körper, dem in verschiedenen Zuständen ein mehr oder weniger hoher Grad von Turgor zugesprochen werden muss, sei es, dass dieser Turgor primär schon vorhanden war und etwa durch endosmotische Wirkung unterhalten wird, sei es, dass er unabhängig von der Oberflächenspannung auf eigener Kontraktilität des Zelleibes beruht. Dieser Turgor würde also in jedem Falle, wie man die Sache auch betrachten mag, durch eine mehr oder weniger deutlich hervortretende elastische Spannung der mikroskopisch sichtbaren Grenzschichte des Plasmas bedingt sein. Daher würde die durch die blosse Wirkung der Molekularkräfte verursachte expansive Spannung der physikalischen (direkt nicht mehr erkennbaren) Oberflächenschichte durch die

Wirkung des Turgors gleichsam zum Verschwinden gebracht oder überkompensiert werden.

Ich komme also für meinen Teil zu dem Schlusse, dass an der Zelloberfläche in beiden Medien nur kontraktile Kräfte tätig sind; vor allen Dingen konstatiere ich, dass ausserhalb der plasmatischen Grenzschicht ein kapillares Wasserhäutchen, eine »Kapillarröhle«, vorhanden ist, welches der Sitz einer positiven Oberflächenspannung ist.

Nunmehr wollen wir prüfen, ob wir auf der gewonnenen Basis zu einer physikalischen Erklärung der Roux'schen Cytrame kommen. Hierbei habe ich keineswegs die Absicht auf viele Einzelheiten näher einzugehen, da das Detail der Erscheinungen von den oftmals unkontrollierbaren Verschiedenheiten der einzelnen Zellen abhängt; es kann sich nur um eine grundsätzliche Erörterung handeln.

Stellen wir uns eine kuglige Zelle vor, welche isoliert in einer Flüssigkeit schwimmt, so würde der kuglige Zustand teilweise durch die blosse physikalische Oberflächenspannung bedingt sein, also abgesehen von einer eventuellen elastischen Spannung der organisierten Wandschicht (Turgor). Indessen beweist der Umstand selbst, dass nach meinen Erfahrungen gewisse einfache Zellformen wie Leukocyten, Samenzellen etc. nicht streng kugelförmig, sondern in der Richtung der von mir sogen. Zellenaxe verlängert sind, dass die Zellform auch in solchen denkbar einfachsten Fällen bis zu gewissem Grade von den physikalischen Kräften der Oberflächenspannung unabhängig ist.

Bei der kuglig abgerundeten Zelle bildet nun die wirksame Wasserhaut oder »Kapillarröhle« eine »Minimalfläche«. Berühren sich jedoch zwei Zellen punktuell unter Verdrängung der eingeschalteten Wasserschicht (so dass also zum mindesten an einer

kleinsten Stelle die Plasmen beider Zellen direkt aufeinander aufrufen), so verwandelt sich hierdurch (eo ipso) die wirksame Haut zweier Zellen in ein gemeinschaftliches Oberflächenhäutchen. Letzteres entspricht jetzt nicht mehr einer Minimalfläche. Aus diesem Grunde ist die materielle Möglichkeit einer weitergehenden Verkleinerung der gemeinsamen Kapillarahülle gegeben. Aus der Verkleinerung der wirksamen Oberfläche her würde aber eine gewisse Summe Energie frei verfügbar werden, welche in Arbeit umgesetzt werden kann. Diese verfügbare Energie würde absolut genommen sehr gering sein, relativ ist sie aber ziemlich gross, da zwei sich punktuell berührende Zellen im äussersten Falle nach Roux in Folge der Wirkung der Cytarme zu einer einzigen Kugel sich vereinigen.

In der Natur wird nun wohl auch der Fall vorkommen, dass zwei in direkter Berührung stehende kuglige Plasmakörper sich nicht zusammenfügen, sondern ihre Kugelgestalt behalten. Denn mit der Berührung selbst ist nur die materielle Möglichkeit einer gegenseitigen Zusammenfügung oder Abplattung gegeben. Es muss also eine besondere Gelegenheitsursache hinzukommen, damit der Prozess in Gang kommen kann. Da sich bei demselben die Oberfläche der einzelnen Zelle vergrössert, so sehe ich eine genügende Plastizität oder Bildsamkeit der Oberflächenschicht (und entsprechend auch der Plasmamasse des Zellinneren) als die spezielle Bedingung des Zustandekommens der Cytarme an.

Diese Plastizität der Oberfläche ist gewiss sehr verschieden bei verschiedenen Zellen. Bei den Froschblutkörperchen z. B. muss die körperliche Adaptionsfähigkeit als relativ gering veranschlagt werden. Bei den roten Blutkörperchen der Säuger und der Menschen indessen ist die Bildsamkeit schon erheblich grösser. Wenn daher in einem frischen Blutpräparate die sogen. Goldrollenform der roten Blutkörperchen zu stande kommt, so findet man hinterher, nach dem Wiederauseinanderfallen

der Körperchen¹⁾, einen grossen Teil derselben verbogen und verbildet vor, als dauernde Nachwirkung der mechanischen Pressung durch Wirkung der Oberflächenkräfte.

Ferner ist auch möglich (was ganz im Sinne der Auseinandersetzungen Roux's liegt), dass selbst bei einzelnen Zellen die Bildsamkeit oder Nachgiebigkeit des Zellkörpers an verschiedenen Stellen der Zelloberfläche verschieden gross ist, teils aus unübersichtlichen, teils aus übersichtlichen Gründen, wenn z. B. die oberflächlichen Zellen einer Morula bereits einseitig differenziert sind. Es ist leicht ersichtlich, dass aus solchen biologischen Verschiedenheiten der Zelloberfläche mannigfache Varianten der Cytarme herfliessen können.

Da die Zelloberfläche bei der Cytarme vergrössert werden muss, so arbeiten die Oberflächenkräfte gegen diejenigen Widerstände, welche einer Dehnung der Zelloberfläche entgegengesetzt sind. Diese Widerstände sind in dem einen oder anderen Sinne elastischer Natur, sei es, dass die elastischen Kräfte primär aus der Kohäsion der Teile hervorgehen, sei es, dass spezifische Kräfte der Kontraktilität vorhanden sind, welche jene Widerstände zeitweilig oder dauernd (während der Prozess vor sich geht) erhöhen.

Wenn nun die Zelloberfläche in vielen Fällen sehr bedeutend vergrössert, gedehnt wird, so ist nicht anzunehmen, dass diese Veränderung auf die Dauer innerhalb der Elastizitätsgrenze

¹⁾ An meinem eigenen Blute beobachte ich, dass die Geldrollen sehr bald wieder auseinanderfallen. Da eine gewisse Geschmeidigkeit der Oberfläche *conditio sine qua non* der Zusammenfügung ist, so führe ich das Auseinanderfallen auf den Verlust der Geschmeidigkeit, id est Gerinnung des Plasmas, zurück. Den Fall der Geldrollenbildung sowie einige verwandte Erscheinungen habe ich ausführlich behandelt in den „*Folia haematologica*“ herausgeb. von Pappenheim, Jahrg. 1904. Diese Arbeit befindet sich zur Zeit unter der Presse.

leibt. Meine Annahme würde also (für den uns vorliegenden Fall) keineswegs dahin gehen, dass, wenn man zwei gegeneinander abgeplattete Zellen wieder auseinandernehmen, sie voneinander trennen könnte, dieselben sofort wie ein deformierter Gaultschukball wieder in ihre frühere Form zurückkehren würden.

Vielmehr ist nach der Natur der Furchungszellen anzunehmen, dass die dauernde Wirkung der Oberflächenkräfte und die mit ihr verbundene fortschreitende Oberflächenvergrösserung auch eine dauernde materielle Änderung der Zelloberfläche hervorruft, welche gegebenen Falls nur durch entgegengesetzt gerichtete Veränderungen wieder rückgängig gemacht werden kann. Sind diese Voraussetzungen richtig, so wird bei der Dehnung der Zelloberfläche jeweilen hier und dort die Elastizitätsgrenze überschritten werden, so dass eine dauernde Veränderung in der Lage der Teile eintritt, welche der **Elastizität** des Protoplasmas entspricht.

Definition: ¹⁾ »Plastische Körper sind solche, welche dauernde Veränderungen erfahren können, ohne den stetigen Zusammenhang ihrer Teile aufzugeben, also solche, welche über die Elastizitätsgrenze hinaus ihren stetigen Zusammenhang bewahren.« »Plastizität für Längszug heisst Ductilität oder Geschmeidigkeit.«

Diese Definition verstehe ich wie folgt: Würden wir einen Messingdraht mit Gewichten belasten, so wird die bewirkte Veränderung innerhalb der Elastizitätsgrenze proportional dem Gewicht sein; wird die Elastizitätsgrenze überschritten, so wird das Metall duktil: Der Draht lässt sich ausziehen und während dieser Veränderung bewahren alle Teile ihren stetigen Zusammenhang. Ein gutes Beispiel für Geschmeidigkeit besitzen wir in solchen Metallen, welche vorzüglich walzbar sind; ein Stück Gold würde in vorzüglicher Weise sich auswalzen lassen und

¹⁾ Nach Auerbach, Kanon der Physik.

seine kleinsten Teile würden gleichsam unter der Wirkung eines walzenden Druckes eine »fliessende« Bewegung durchmachen, ohne dass der Körper aus dem festen Aggregatzustande und dem stetigen Zusammenhang der Teile heraustritt. Dieser physikalische Begriff der Geschmeidigkeit entspricht, wie ich glaube, in hohem Grade der Plastizität des Protoplasmas und ich behalte mir vor aus diesem Gesichtspunkte heraus eine ausführliche Theorie der mobilen Protoplasmen (der beweglichen Sarkode) zu geben.

In unserem Falle der Furchungszellen haben wir die Oberflächenkräfte als wirkende Gewalt, während ihr Objekt in erster Linie die Zelloberfläche und in Abhängigkeit davon auch die Masse des Zellinneren ist.

Im einfachsten Falle wird der Vorgang der Zellenzusammenfügung sich zweifellos wie folgt abspielen. Stellen wir uns einen ebenen Mittelschnitt zweier in punktueller Berührung befindlicher Zellen vor, so stossen die wirksamen Flüssigkeitshäutchen beider Zellen an dem Berührungspunkte in einem ungemein spitzen Winkel zusammen [Fig. 17] ¹⁾. Daher muss die von beiden Zelloberflächen her berechnete Oberflächenwirkung eine Resultierende R ergeben, welche das Flüssigkeitshäutchen aus jenem spitzen Winkel zwischen den beiden Zellen herauszuziehen sucht. Der Effekt dieser Wirkungsweise kann kein anderer sein als der, dass die Berührungsfläche beider Zellen unter Dehnung der Zellrinde und gleichzeitiger Verkleinerung der gemeinschaftlichen kapillaren Wasserhülle wächst (Fig. 17 A). Geht dieser Prozess von dem anfänglichen Berührungspunkte aus nach allen Richtungen hin mit gleichmäßiger Geschwindigkeit vor sich, so

¹⁾ In Fig. 17 ist die Kapillarröhre durch eine feine Linie parallel zur Zelloberfläche schematisch angegeben. Die beiden seitlichen Pfeile entsprechen der Oberflächenspannung, der mittlere giebt die Richtung der Resultante an.

haben wir eine gleichseitige Zellenzusammenfügung; geht der Prozess nach verschiedenen Richtungen hin mit ungleicher Geschwindigkeit vor sich, so werden wir eine ungleichseitige

Fig. 17.

Zusammenfügung haben. Eine solche wird leicht einmal zu stande kommen, wenn die Dehnungsmöglichkeit der Zelloberfläche (oder die Plastizität des Plasmas) an verschiedenen Stellen der Zelloberfläche verschieden gross ist.

Es ist klar, dass dieser Prozess früher oder später zu Ende kommen wird, je nachdem die Bildsamkeit oder Nachgiebigkeit der Plasmas eine dauernde ist oder von einem bestimmten Zeitpunkt an beschränkt (bezw. aufgehoben) erscheint. Bleibt die Bildsamkeit dauernd erhalten, so würde dies, wenn die Umstände im übrigen die gleichen bleiben, schliesslich zu der von Roux sogenannten »geschlossenen« Anordnung des Zellkomplexes führen, d. h. es würde der Prozess erst dann abgelaufen sein, wenn an der Stelle, an welcher die Flüssigkeitshaut von einer Zelle auf die andere übergeht, die Richtung der Kraft beiderseits identisch und die Resultierende der Kräfte gleich Null geworden ist; in diesem Falle geht die Flüssigkeitshaut von einer Zelle auf die andere ohne Brechung über (Fig. 17 B).

Zur Ergänzung des letzteren Gedankenganges ist noch folgendes hervorzuheben. Aus der schematischen Vergegenständlichung des Prozesses und ebenso aus den Abbildungen Roux's (Fig. 9) geht ohne weiteres hervor, dass im Beginne des Prozesses (Fig. 17 A) wesentlich nur die Zellrinde gedehnt wird; je weiter der Prozess indessen fortschreitet, in desto stärkerem Grade werden auch die inneren Plasmamassen auf Dehnung in Anspruch genommen (Fig. 17 B, Fig. 9 b). Es kann also der Fall gegeben sein, dass anfangs zwar die Oberflächenkräfte überwiegen, während früher oder später die aus dem Zellinneren her betätigten Widerstände die Oberflächenwirkung äquilibrieren. Dann bleibt der Prozess früher oder später stehen, und es kommt eventuell nur zu der sogenannten offenen Anordnung von Roux.

Ferner ist in Rechnung zu ziehen, dass bei ungleicher Grösse der zusammengefügtten Zellen (Fig. 9 b und e) sicherlich bei der kleineren Zelle die Widerstände des Zellinneren vergleichsweise früher in stärkerem Grade in Anspruch genommen werden als bei der grösseren Zelle. Daher kann unter Umständen die Bildsamkeit der kleineren Zelle bereits erschöpft sein,

während die der grösseren Zelle noch fortdauert, und auf diese Weise erhält man dann jene überraschenden Bilder, bei welchen die Gestalt der grösseren Zelle der Form der kleineren Zelle adaptiert erscheint (Fig. 9 e).

Kehren wir wieder zu dem einfachen Beispiele einer gleichseitigen Zusammenfügung von zwei gleichgrossen Zellen zurück (Schema Fig. 17 A), so würde es interessant sein zu wissen, welches die Veränderungen des Winkels sind, den die beiden Zellen während des Prozesses miteinander bilden. Es ist klar, dass schliesslich dieser Winkel grösser und grösser werden muss, während die gemeinschaftliche Resultierende der Oberflächenkräfte (R) abnimmt. Wir haben also neben dem vorhin besprochenen Wachstum der Widerstände des Plasmas auch eine Abnahme der wirksamen Kraft, ein Grund mehr für das Auftreten »offener« Anordnungen der Zellen im Sinne Roux's.

An welcher Stelle nun findet vorzugsweise die besprochene Dehnung der Zelloberfläche statt? Diese Frage lässt sich offenbar mit ziemlicher Sicherheit beantworten.

Vermutungsweise wird dort, wo der primäre Ort der Kräftewirkung sich findet, auch die Dehnung der Zelloberfläche (und der angrenzenden inneren Teile des Plasmas) am stärksten sein; das wäre also die Gegend an und rings um die Stelle herum, an welcher die Zellen sich berühren. Da die Grenzschicht der Zelle gewisslich in höherem Masse unter sich zusammenhängend ist, müsste indessen die Dehnung sich über die Zelloberfläche wohl in abnehmendem Grade vom Ort der Berührung aus fortpflanzen; vermutungsweise würde also die Dehnung um so geringer sein, je weiter man sich vom Orte der direkten Kräftewirkung entfernt. Mithin müsste der »distalste« Punkt der Zelloberfläche, derjenige Punkt, welcher der Berührungsfläche gegenüber liegt, der am wenigsten betroffene sein.

Diesen Voraussetzungen entspricht genau die von Roux beobachtete typische Verteilung des Rindenpigmentes der Zellen (Fig. 15 und 16). Unterzieht man die Zeichnungen Roux's einer sorgfältigen Betrachtung, so ergibt sich, dass die systematische Schraffierung der Zellen, durch welche der Autor die Verteilung des Rindenpigmentes zum Ausdruck zu bringen suchte, ebenso gut die relativen Dehnungen oder Vergrösserungen der Zelloberfläche vorstellen könnte, wie sie unmittelbar aus der Theorie folgen. Ist eine Zelle zu Anfang annähernd gleichmässig pigmentiert und vergrössert sich alsdann ihre Oberfläche in bestimmter gesetzmässiger Weise, wobei die Vergrösserung durch Einschiebung ungefärbter aus der Tiefe nachdringender Plasmateilchen erfolgt, so wird die Pigmentation schliesslich der Form der Oberflächenvergrösserung entsprechen: Je stärker an irgend einem Orte die Oberfläche zunahm, desto geringer wird die Pigmentation sein, oder: die Stärke der Pigmentation wird schliesslich von Ort zu Ort sich umgekehrt verhalten, wie die zugehörige Oberflächenvergrösserung. Freilich ist ferner zweitens möglich, dass die Pigmentverteilung zum Teil auch auf Grund einer Pigmentwanderung zu stande kommt; in diesem Falle würden die Pigmentkörnchen in der Richtung des Druckminimums ausweichen und es liesse sich allenfalls herleiten, dass senkrecht über der Richtung der stärksten Dehnung der Zellrinde und der angrenzenden Plasmamassen auch die Richtung des stärksten Druckes liegt, sodass entsprechend den Roux'schen Skizzen (Fig. 15 und 16) die Abwanderung der Pigmentkörnchen von den Berührungsflächen ausgehend in der Richtung auf den »distalsten« Punkt der Zelle statthaben würde. Hier möchte ich erwähnen, dass ich zuerst darauf aufmerksam gemacht habe, dass die Inhaltsbestandteile der Zelle, vor allem der Kern, aber auch Pigmente, Detritus u. dergl. die Neigung haben in der Richtung des geringsten Druckes auszuweichen (1894, 1895). Diese Beobachtung haben sich hinterher viele Autoren zu nutze gemacht (z. B. Rhumbler), ohne meiner zu gedenken.

Man vergleiche nun mit unseren Ausführungen die Abbildungen von Roux (hier Fig. 15 und 16) und man wird finden, dass die Orte, welche an die Berührungsflächen der Zellen angrenzen, welche also unserer Ableitung nach der relativ stärksten Oberflächenvergrößerung bzw. Dehnung unterlegen haben, relativ am wenigsten pigmentiert sind; dagegen findet eine Anhäufung des Pigmentes an demjenigen Pole der Zelle statt, welche der Trennungsebene der Zellen gegenüberliegt, also vom Orte der stärksten Dehnung am meisten entfernt ist. Haben wir also einen Komplex von 3 Individuen (Fig. 16 a), so sind die freien Scheitel der Zellen am meisten pigmentiert, bei einer Reihe von drei Zellen (Fig. 15 a) treffen wir das nämliche bei den beiden Endzellen, während folgerecht die eingeschlossene mittlere Zelle ein dunkles Äquatorband besitzt. Auf weitere Einzelheiten lohnt es nicht einzugehen; es genügt eine allgemeine Übereinstimmung der Theorie mit den empirischen Daten herausgefunden zu haben.

Das von Roux so ausführlich besprochene **Zellengleiten** (Cytolisthesis) scheint mir ein grösseres physikalisches Interesse nicht zu besitzen (vergl. S. 270). Denn nachdem einmal von uns festgestellt worden ist, dass zwei oder mehrere in Berührung befindliche Zellen von einer gemeinsamen Kapillarröhre eingeschlossen werden, ist es auch selbstverständlich, dass der zelluläre Inhalt dieser Wasserhülle so lange gegeneinander bewegt werden muss, bis die »wirksame« Gesamtoberfläche desselben möglichst klein geworden und ein allgemeiner Gleichgewichtszustand der Kräfte eingetreten ist. Dass hierbei die Zellen gewöhnlicherweise sich gegeneinander verschieben, ist selbstverständlich, und ebenso selbstverständlich ist, dass verschiedene Arten und Formen dieser Bewegung sich werden unterscheiden lassen, wie von Seiten Roux's geschehen ist. In eine nähere Analyse dieser Bewegungsformen einzutreten, lohnt indessen nicht, da die speziellen Bedingungen der

Bewegung fast überall mehr oder weniger zufällige sein werden, bedingt durch die zufällige Anfangsstellung der sich berührenden Zellen, durch den wechselnden Zustand ihrer zufälligen Oberflächenbeschaffenheit u. s. f.¹⁾

Weiterhin hat Roux die Kanten und Winkel, unter welchen die Furchungszellen nach ihrer Zusammenfügung zusammenstossen, einer Betrachtung unterzogen und konstatiert, dass die Grundprinzipien der Blasenspannung sich bei dieser Gelegenheit nicht verwirklichen.

Dies ist auch nicht zu verwundern, denn die physikalischen Verhältnisse liegen in beiden Fällen durchaus verschieden. Ein Komplex von Seifenblasen ist unter sich durchaus »verwachsen«, die trennenden Scheidewände sind den Nachbarn gemeinsam und diese Scheidewände besitzen Oberflächenspannung. In einem Komplex von Furchungszellen bleiben die Zellen von einander isoliert und an den Berührungsflächen existiert keine merkliche Oberflächenspannung. Vielmehr verhalten sich die Zellen wie mehr oder weniger elastische Bälle, welche durch eine äussere Kraft zusammengepresst werden.

Die einzelne freie Zelle für sich genommen hat gewiss ein Rundungsbestreben; dieses kann hervorgebracht werden 1. durch eine gewisse primäre Elastizität der Oberflächenschicht, oder 2. durch ein primäres Rundungsbestreben, welches aus dem Zellinneren stammt (z. B. bei zentrierten Zellen), oder 3. es kann dasselbe sekundär vermittelt sein durch Kontraktilität oder 4. es kann auch das Flüssigkeitshäutchen an der Oberfläche das Rundungsbestreben motivieren. Diesem Rundungsbestreben, wo es auch herkommen möge, wirkt bei Zusammenfügung zweier oder mehrerer Zellen die kapillare Wasserschichte der

¹⁾ Der von Roux sogen. Vorgang der „Cytolisthesis“ findet ebenso statt bei der rollenartigen Zusammenordnung der roten Säugerblutkörperchen; vergl. meinen diesbezüglichen Aufsatz in den *Folia haematologica*.

Oberfläche entgegen. Die Zellen werden also durch äussere Gewalt zusammengepresst. Daher kann der Fall der Seifenblasen zum Vergleich nicht herangezogen werden; vielmehr scheint mir in weit höherem Grade der Roux'sche Fall der in Alkohol suspendierten Öltropfen zutreffend zu sein, da diese durch den äusseren Zwang einer begrenzenden Gefässwand zusammengetrieben wurden¹⁾. Allerdings sind die physikalischen Bedingungen hier und dort nicht identisch, aber insofern das Prinzip des äusseren Zwanges beiderseits zutreffend ist, haben wir dennoch ein vergleichsweise hohen Grad von Übereinstimmung, welcher sich in dem Auftreten von Vierflächenkanten, verschiedener Winkelgrössen etc. dokumentiert.

Schluss.

Roux stellte seine Untersuchungen über Zellenzusammenfügung im Hinblick auf die Entwicklungsmechanik an; da ich nicht das gleiche Ziel verfolge, enthalte ich mich jedes Urteils über die entwicklungsmechanische Seite der Angelegenheit, indem ich berufeneren Autoren überlasse dies zu tun. Für mich speziell haben die Oberflächenkräfte vor allen Dingen darum ein Interesse, weil sie möglicher Weise im Sinne Bütschli's die Formengebung der Plasmastruktur beherrschen könnten.

¹⁾ Es ist kein Zweifel, dass an der gegenseitigen Begrenzungsfläche zweier Öltropfen eine Oberflächenspannung existiert; ich möchte indessen nicht darauf eingehen zu erörtern, ob die Spannung der zwischengeschalteten Alkoholschichte positiver oder negativer Natur ist. Denn Alkohol und Öl sind bis zu gewissem Grade ineinander löslich und unter diesen Umständen dürfte der Zustand der Oberflächenschichte, wie mir scheint, kaum näher bestimmbar sein.

Um hiervon zu reden, so bin ich der Meinung, dass bei den ausdifferenzierten Zellen höherer Geschöpfe von einem **beherrschenden** Einfluss in den allermeisten Fällen nicht die Rede sein kann; allenfalls könnte man behaupten, dass das Strukturbild solcher Zellen, bei denen Vakuolisierung eine erhebliche Rolle spielt (z. B. Talgdrüsenzellen) durch Oberflächenkräfte erzeugt werde¹⁾. Indessen ist nicht zu vergessen, dass diese Strukturbilder solche »passiver Prägung« sind, und dass die physiologisch interessante Struktur erst in den Plasmawänden selbst enthalten ist, welche die gedachten Vakuolen begrenzen.

Etwas anderes wäre schon die Frage, ob nicht die Oberflächenkräfte wesentlich betätigt sind bei der Formung der Strukturen in den mobilen, in sich beweglichen Plasmen niederer tierischer Geschöpfe, ferner der frühen Embryonalzellen und der Pflanzenzellen. Aber auch hier wird man zahlreiche spezifische Strukturerscheinungen finden, die durch Oberflächenspannung nicht im geringsten erklärt werden können.

Daher kann einstweilen meiner Meinung nach bloss folgender Satz Geltung haben: Wenn irgendwo organisiertes lebendes Plasma einen besonders hohen Grad von Geschmeidigkeit (siehe oben pag. 289 ff.) besitzt, dann ist die Möglichkeit gegeben, dass die plasmatische Substanz der gestaltenden Kraft der Oberflächenspannung unterliegt. Ich bin aber (übrigens mit Roux) der Meinung, dass die Oberflächenkräfte, wenn sie innerhalb des Protoplasmas eine ausschlaggebende, herrschende Rolle zu spielen berufen wären, alle spezifischen Gestaltungen des Lebens aufheben würden.

¹⁾ Bütschli meint, dass die Abkuglung der von Plasma umgebenen Vakuolen nur durch Oberflächenspannung erklärt werden könne. Ich bin der Ansicht, dass eine elastische Spannung der Vakuolenhaut ebenso hinreichend sein würde, die beobachtete Kugelform zu erklären.

Die Roux'sche Untersuchung über die Zellenzusammenfügung ist nun darum so wertvoll, weil sich hier zum ersten Male nahezu mit vollständiger Exaktheit nachweisen lässt, dass es Fälle gibt, bei welchen die Oberflächenkräfte einen wesentlichen Einfluss auf die Gestaltung plasmatischer Massen haben. Wir sehen Art und Form der Wirkung der Oberflächenkräfte vor uns und lernen kennen, dass der Grad der Geschmeidigkeit (Bildsamkeit) des Plasmas schlechthin maßgebend für den möglichen Einfluss der Oberflächenkräfte ist. Von hier ausgehend wird es vielleicht möglich sein auch andere kompliziertere Fälle richtig zu beurteilen. Der Fall der internen Protoplasmastruktur ist aber gewiss sehr kompliziert und fast alles, was über die Wirkung von Oberflächenkräften in dieser Beziehung gesagt worden ist, ist meiner Meinung nach — und ich kenne beinahe die gesamte Literatur — über das blosse Stadium der Vermutung nicht hinausgekommen.

Die beweglichen Protoplasmen der Pflanzenzellen würden wohl mit am ehesten der geforderten Bedingung einer sehr hohen Geschmeidigkeit genügen. Ausserdem ist es in diesem Falle so gut wie sicher, dass eine Oberflächenspannung an der Begrenzung des Plasmas gegen die anorganische Vakuolenflüssigkeit **reell** existiert. Diese Spannung wird nach der Analogie der Furchungszellen positiver Natur sein und ihre materielle Unterlage haben wir zunächst in dem kapillaren Wasserhäutchen zu suchen, welches den plasmatischen Wandbelag und die Plasmastränge des Zellinneren bekleidet.¹⁾ Trotz dieser genau feststellbaren Sachlage sehen wir, dass dieses Plasma imstande ist enorm dünne Fäden von grosser Länge zu bilden, welche manchmal kaum sichtbar sind, ähnlich den Pseudopodien der feinsten

¹⁾ Von der hier tatsächlich vorhandenen Schaumstruktur des Plasmas wollen wir einstweilen absehen.

Art bei Rhizopoden, eine Tatsache, die mit einer gleichzeitig bestehenden **wirksamen** Oberflächenspannung nicht zusammenzureimen ist, denn eine jede Oberflächenspannung, die im Verhältnis zur Bildsamkeit des Plasmas einen merklichen Wert besässe, müsste nach physikalischen Gesetzen einen solchen Plasmafaden in eine Reihe von Kügelchen auflösen. Daher haben die Anhänger der Oberflächenspannungstheorie erklärt, dass feinste Plasmafäden, wie Pseudopodien, immer eine feste Axe besitzen müssten, eine Erklärung, die an sich, abgesehen von einigen wenigen wirklich beobachteten Ausnahmefällen (gewisse Radiolarien, Actinosphaerium) nur Mutmaßung ist und die ausserdem überhaupt nicht geeignet ist das Phänomen der Fädchenbildung irgendwie physikalisch verständlich zu machen, da nämlich beim Vorhandensein einer festen Axe die flüssige oder bildsame Rindensubstanz **dennoch** in eine Reihe von Tropfen zerfallen müsste, welche gleichsam wie Perlen auf der Axe aufgereiht sein würden. Versuche, welche dies physikalische Phänomen zeigen, sind ungemein leicht anzustellen, übrigens wohl auch jedem aus der Erfahrung bekannt. Ich rate einen dünnen Draht bei horizontaler Lage in flüssiges Paraffin einzutauchen und man wird beim Herausziehen desselben das Paraffin alsbald in Form erstarrter Perlen an dem Drahte hängen sehen.

Wir sehen also, dass auch bei sehr geschmeidigen Protoplasmen physiologische Wirkungsweisen sich betätigen, welche der Wirkung der Oberflächenkräfte entgegenarbeiten, bezw. dieselbe aufheben. Anders ist die Existenz feinsten Plasmafäden garnicht erklärlich.

Nun wissen wir durch Roux und durch viele andere Autoren (G. Andrews, His etc.), dass die Furchungszellen die Fähigkeit amöboider Bewegung besitzen. Die nämlichen Froschblastomeren, welche Roux bei seinen Versuchen benutzte, werden unter anderen Umständen zu Amöben. Meine Meinung

geht nun dahin, dass dies wieder ein Fall ist, bei welchem die Natur den physikalischen Oberflächenkräften entgegenarbeitet. Denn wir haben es hier ja doch so deutlich vor Augen, dass die physikalischen Kräfte für sich allein zur kugligen Abrundung führen, während die Kräfte des Lebens, d. h. diejenigen Kräfte, welche auf Organisation beruhen, die Pseudopodienbildung, id est: Mannigfaltigkeit der Formgestaltung verursachen.

Zwar haben ja die Theoretiker der Oberflächenspannung gerade die Pseudopodienbildung durch Änderung des Wertes der Oberflächenspannung erklären wollen. Man braucht nämlich nur an irgend einer Stelle der Zelloberfläche lokal den Wert von α (und damit auch den Krümmungsdruck) sinken zu lassen und man wird unserer Vorstellung nach eine Ausstülpung des Plasmas, eine Pseudopodienbildung bekommen. Aber eben diese Annahme einer Herabsetzung der Oberflächenspannung an bestimmten Orten ist wiederum rein willkürlicher Natur und würde wahrscheinlich wohl in erster Linie nicht zur Bildung eines Pseudopodiums, sondern zur Entstehung reissender Oberflächenströmungen führen.

Der Zufall hat es gewollt, dass unter allen Theorien der Pseudopodienbildung, welche auf der Basis der Oberflächenspannung entwickelt wurden, die am meisten ausgearbeitete, nämlich diejenige von Jensen, den physikalischen Grundtatsachen direkt widerspricht. Dieser Autor bringt die Ausstreckung der Pseudopodien mit einer Assimilation, die Einziehung oder Kontraktion derselben mit einer Dissimilation in Zusammenhang. Dies wird als physiologische Tatsache vorausgesetzt. Die Assimilation soll Verminderung der Molekülzahl des Mediums und infolge dessen Verringerung seiner Molekularkraft und damit auch angeblich eine Abnahme des Wertes der Oberflächenspannung bedingen; daher die Expansion des Plasmas, id est Pseudopodienbildung an der Stelle lokaler Assi-

milation. Umgekehrt soll die Dissimilation eine Vermehrung der Molekülzahl des Mediums, folglich Vermehrung der Molekularkraft und damit auch angeblich eine Erhöhung des Wertes der Oberflächenspannung sowie Kontraktion der expandierten Pseudopodien zur Folge haben.

Bei genauerer Berechnung stellt sich indessen heraus, dass unter Zugrundelegung der Jensenschen Annahmen genau der umgekehrte Effekt eintreten würde. Ich komme nämlich meines teils zu folgenden Schlüssen. Eine Vermehrung der Molekülzahl (einer wässerigen Lösung, bzw. hier eines wässerigen Gemisches im Sinne der Oberflächentheoretiker: Plasma) bewirkt nicht schlechthin eine Vermehrung der Oberflächenspannung; sind die in Betracht kommenden Moleküle kolloidaler Natur, so geht die Oberflächenspannung (bei Begrenzung des gedachten Mediums mit Luft) herunter. Aber sehen wir hiervon ab und nehmen wir an eine Vermehrung der Molekülzahl **in dem einen** der beiden sich begrenzenden Medien (Plasma/Wasser) würde eine Vermehrung der Molekularkraft **eben dieses** Mediums bedingen; so würde es eben doch sehr darauf ankommen, **welches** der beiden Medien eine Erhöhung der Molekularkraft erfährt.

Denn wir haben zwei Medien, D und L (siehe oben S. 238 ff.) von grösserer und geringerer Molekularkraft und erst aus der Differenz dieser Kräfte ergibt sich die Oberflächenspannung. Diese wird nun ihrem Werte nach wachsen, wenn die Molekülzahl, bzw. die Molekularkraft von D vergrössert wird. Denn nur in diesem Falle vermehrt sich die Differenz der Kräfte von D und L. Die Oberflächenspannung wird dagegen verringert werden, wenn wir die Molekülzahl (Molekularkraft) von L wachsen lassen, denn in diesem Falle nimmt die Differenz der Kräfte von D und L ab. Dass diese Argumentation richtig ist, ist leicht einzusehen; denn wir können ja die Molekularkraft von L so lange wachsen lassen, bis sie gleich derjenigen von D ist; in diesem Falle würde die Oberflächenspannung gleich Null sein.

In unserem Falle lässt Jensen bei der Kontraktion der Pseudopodien eine Dissimilation eintreten; dieses ist seine physiologische Voraussetzung. Es würde also die Molekularkraft des Plasmas in seinem Sinne sich erhöhen. Wenn diese aber wächst, so nähert sie sich der Molekularkraft des Wassers, welches das zweite Medium vorstellt, und die gemeinschaftliche Oberflächenspannung müsste sinken. Wenn daher Kontraktion und Dissimilation Hand in Hand gehen, dann ist auch sicher, dass die Änderung der Oberflächenspannung **nicht** die Ursache der Kontraktion ist. Das Gleiche gilt natürlich von dem Verhältnis der Assimilation und Expansion der Pseudopodien. Wird im Plasma assimiliert, so würde sich im Sinne Jensens die Molekülzahl des Plasmas verringern. Geschieht dies, so wächst die Differenz der Molekularkräfte der beiden begrenzenden Medien Plasma/Wasser und der Wert der Oberflächenspannung müsste steigen. Ist es also sicher, dass Assimilation und Expansion Hand in Hand gehen, dann ist auch sicher, dass die Änderung der Oberflächenspannung nicht die Ursache der Expansion des Plasmas ist.

Übrigens sind auch Bütschli und Rhumbler bei dem Versuch der Erklärung der amöboiden Bewegung durch Oberflächenspannung vollständig gescheitert. Bütschli musste in einem Nachtrage zu seinem grossen Plasmawerke die Unzulänglichkeit seiner Bewegungstheorie selber zugeben, während Rhumblers theoretische Vorstellungen, wenn überhaupt, nur für einzelne Amöbenarten passen, für andere dagegen nicht, und man ersieht hieraus ohne weiteres, was seine Theorie wert ist. Anbei sei hinzugefügt, dass auch der Bernsteinsche Versuch die Muskelkontraktion auf Oberflächenspannung zurückzuführen, missglückt ist. Denn aus den von diesem Autor aufgestellten Gleichungen geht direkt hervor, dass seine Schlussfolge unzureichend ist.

Ich bin also der Meinung, dass gerade im Falle der

amöboiden Bewegung (bei der Expansion) die vitalen Kräfte (wenn dieser Ausdruck erlaubt ist) der Oberflächenspannung entgegen arbeiten und dass dies gerade mit besonderer Klarheit aus dem Fall der amöboiden Furchungszellen hervorgeht, weil wir die Wirkung der Oberflächenspannung an diesen in Folge der Roux'schen Untersuchungen so genau kennen.

Oben schon sagte ich, dass alle spezifischen Formen des Lebens aller Wahrscheinlichkeit nach zu stande kommen, entgegen der Wirkung der Oberflächenkräfte. Es wird gut sein, hierfür einige ganz allgemeine Beweisgründe beizubringen.

Jede Differenzierung beruht, allgemein gesprochen, auf einer Sonderung protoplasmatischer Teile, während die Oberflächenkräfte, nach Analogie der vorstehenden Untersuchung beurteilt, auf eine Zusammenfügung derselben hinwirken. In diesem Sinne sind die Spaltung der Chromosomen, die Vermehrung der Muskelfibrillen durch Spaltung, die Teilung der Zentralkörper und anderer granulärer Elementargebilde, die Vermehrung der Spaltpilze, die Spaltung und Trennung zelliger Lamellen etc. sämtliche Lebensäusserungen, die den Oberflächenkräften entgegenwirken.

Der Umstand selbst, dass bei vielen Einzelligen (besonders Infusorien) die Oberfläche nicht geschmeidig, sondern fest ist, verhindert die Wirkung der Oberflächenkräfte und gestattet eine spezifische von dem Oberflächenminimum abweichende Formengebung. Das Gleiche gilt von den roten Blutkörperchen der Wirbeltiere. Die bikonkave Form der roten Blutkörperchen der Säuger ist darauf zu beziehen, dass eben hierdurch die Zusammenfügung der Körperchen zur sogen. »Geldrollenform« wenigstens unter den normalen Lebensumständen verhindert wird.

Die Existenz der Flimmercilien, Geisseln und der protoplasmatischen Härchenbesätze aller Art ist ein Beispiel der völligen Wirkungslosigkeit der Oberflächenspannung in diesen Fällen. Wenn fädige Differenzierungen festen Protoplasmas

in grosser Mannigfaltigkeit an den Zelloberflächen vorkommen, so ist nicht einzusehen, warum nicht ebensolche mehr oder minder feste Differenzierungen auch im Zellinnern vorkommen sollen.

Viele der in den Geweben vorkommenden Zellen weichen ferner bekanntlich von dem Oberflächenminimum ab. In den meisten dieser Fälle wird die spezifische Formengebung derselben durch äussere Pressung oder durch Gewebespannungen (Zugwirkung) bedingt. Diese Fälle würden also hier nicht in Betracht kommen. Es kommen aber auch freiliegende Zellen vor, welche nahezu ein Oberflächenmaximum darbieten wie Chromatophoren und Pigmentzellen. — Innerhalb der Epithelien müssten alle Zellen miteinander verschmelzen, wenn nicht mindestens ihre Oberfläche fest wäre.

Was ferner die Zellstrukturen anlangt, so sind alle ächten Kerngerüste Formen, sagen wir, eines Oberflächenmaximums. Die vielfach vorkommenden (tertiären) Gerüstformen des Protoplasmas, welche sich aus dem Ineinanderbrechen vielfacher Vakuolen herausbilden, wären (ebenso wie die Kerngerüste) alle unmöglich, wenn die Oberflächenspannung einen derartigen Wert hätte, dass sie wirksam werden könnte. Wären alle diese Gerüstformen flüssiger Natur, so müssten sie in Kügelchen zerfallen.

Schliesslich noch einige Worte über die primären Differenzierungen des Zellprotoplasmas. Es könnten die Zellstrukturen, auch wenn man histologisch sie als Wabenwerke auffassen wollte, in den meisten und wichtigsten Fällen dennoch nicht als flüssige Schäume betrachtet werden, weil parallelfasrige (oder überhaupt bestimmorientierte) Differenzierungen (z. B. in Muskeln, Axenzylindern, Epithelzellen) vorherrschen und in allen diesen Fällen die Schaumwände parallel einer bestimmten Richtung (parallel der Faserung) dicker sein müssten als in anderen Richtungen, was in physikalischen Schäumen unmöglich ist. Im Sinne der Schaumtheorie ferner müssten die Maschensysteme parallel der Faserrichtung gestreckt sein, was wiederum als

dauernde Struktureigentümlichkeit bei flüssigem Aggregatzustande des Plasmas physikalisch unmöglich ist; die meisten dieser Plasmafaserungen sind aber permanente strukturelle Einrichtungen des Körpers. Ferner müssten bei sehr langgezogenen Maschensystemen, wie sie oft vorkommen, die eingeschlossenen Bläschen oder Waben (des Enchylems) in kleinere Kügelchen zerfallen, da sie durch die Streckung selbst fadenartig verlängert werden. Dies müsste z. B. im Muskel statt haben, wenn seine Masse flüssig wäre; es geschieht dies aber nicht, weil die Substanz des Muskels fest ist.

Ebenso wären die massenhaften primären fädigen Differenzierungen des Plasmas (Myo-, Neuro-, Tonofibrillen) bei flüssigem Aggregatzustande unmöglich. Endlich ist die rechtwinklige Überschneidung protoplasmatischer Struktursysteme in Muskeln und Epithelzellen weit verbreitet, eine Strukturform, die wiederum bei flüssigem Zustande der lebenden Masse ausgeschlossen ist.

Dies wären also einige Daten zur Beurteilung des »Aggregatzustandes« des Protoplasmas. Späterhin werde ich diesen Gegenstand im Zusammenhang behandeln. Übrigens habe ich vor einer Reihe von Jahren (1899) über den Aggregatzustand des quergestreiften Muskels mich ausführlicher geäußert, doch ist zu meinem Bedauern keiner von den biologischen Theoretikern der Oberflächenspannung auf meine Auseinandersetzungen eingegangen.

Nach allen diesen Betrachtungen möchte ich noch anheimgeben zu überlegen, ob nicht in dem Roux'schen Falle der Furchungszellen die Wirkung der Oberflächenkräfte das normale Maß überschreitet. Es könnte eventuell möglich sein, dass, wenn eine Morula oder Blastula des Frosches mit Nadeln zerrissen wird und die Zellen auf diese Weise getrennt werden, eben hierdurch eine Art Shok des Protoplasmas produziert wird, welcher lähmend auf die natürliche Kontraktilität desselben einwirkt. So wäre denn die Möglichkeit gegeben, dass die

isolierten Furchungszellen in einer das normale Maß überschreitenden Weise der Wirkung der Oberflächenkräfte unterliegen. In diesem Sinne möchte ich es auffassen, dass nach der Vermutung Roux's das Hervortreten kontraktiler Kräfte wiederum zur Zellentrennung führen kann.

Schliesslich noch eins. Es ist nicht gesagt, dass überall **innerhalb** der Zelle an der Oberfläche differenzierter Strukturteile wirklich eine Oberflächenspannung existiert. Sobald Vakuolen von anorganischem Wasser im Plasma auftreten, wird man freilich an der Grenze Plasma/Wasser eine solche Spannung haben und folgerecht auch an allen Strukturteilen, die in wässriger Lösung von relativ hoher Molekularkraft suspendiert sind. Ganz anders aber liegt die Sache, wenn wie vielfach in tierischen Zellen, eine lebendige Grundmasse in der Zelle vorhanden ist, auf deren Basis Differenziationen statt haben (Leukocyten, Flimmerepithelien etc.). Mir wenigstens scheint es unzweifelhaft zu sein, dass besonders fädige Differenzierungen innerhalb einer solchen (plasmatischen) Grundmasse auftreten; es sind dies die Fälle vor allem, die technisch so schwer zu behandeln sind, weil die Grundmasse fast die gleichen färberischen Eigenschaften zeigt, wie die Differenzierungen selbst. In solchen Fällen dürfte eine merkliche Oberflächenspannung an der Begrenzung der Differenzierungen fehlen. Desgleichen ist mir sehr zweifelhaft, ob beim Auftreten geformter Granula im Plasma (Pigmentkörner, Zymogenkörner etc.) eine merkliche Oberflächenspannung an der Grenze des Granulum angenommen werden darf, denn diese Gebilde sind ja doch häufig in das Plasma geradezu eingebettet. Beim Wachstum der Granula und übrigens auch der Vakuolen würde eventuell die Annahme einer passiven Dehnung und Spannung der angrenzenden Plasmamasse genügen, um die rundliche Form zu erklären.

Tübingen, Winter 1903/4.

Literaturverzeichnis.

Über den Einfluss elastischer Spannung auf Form und Differenzierung und auf die Lebens Eigenschaften protoplasmatischer Strukturen siehe folgende meiner Schriften:

1. M. Heidenhain: Beiträge zur Topographie und Histologie der Kloake und ihrer drüsigen Adnexa bei den einheimischen Tritonen. S. 67 ff findet man Angaben über die Einwirkung interner Spannungen auf das Strukturbild vielwabiger Becken- und Kloakendrüsenzellen.
2. Derselbe: Über Kern und Protoplasma, Leipzig, W. Engelmann 1892. Enthält Angaben über den Einfluss der Gewebespannung auf die Kernstruktur, S. 112 f. und 132 f.
3. Derselbe: Neue Untersuchungen über die Zentralkörper und ihre Beziehungen zum Kern- und Zellenprotoplasma. Arch. f. mikr. Anat. Bd. 43, 1894. Diese Arbeit enthält die ersten ausführlichen Angaben über die systematische Spannung zentrierter Systeme (Spannungsgesetz), ferner wird S. 629 zum ersten Mal das Problem der Festigkeit oder Widerstandsfähigkeit lebender Protoplasmen aufgeworfen, auch wird darauf hingewiesen, dass beim Zelltode sich diese spezifische Festigkeit sofort verliert und die Zellen alsdann dem Gewebedruck folgen. Diese Erscheinungen werden in der nächsten Schrift auf elastische Spannung des lebenden Plasmas zurückgeführt.
4. Derselbe: Cytomechanische Studien. Roux's Arch. Bd. I. 1895. Diese Schrift ist ausschliesslich der elastischen Spannung des lebenden Plasmas gewidmet. Siehe vor allem Kap. V, S. 502 ff.. Theorie der intravitalen Spannung der plasmatischen Systeme; hier die Erklärung für die Strukturfestigkeit lebender Zellen. Ferner: ausführliche Erörterung des Spannungsgesetzes und Zurückführung der Erscheinungen der „Furchung unter Pressung“ auf Änderung der Protoplasmaspannung.
5. Derselbe: Ein neues Modell zum Spannungsgesetz der zentrierten Systeme, Verhandl. d. anat. Ges. 1896.

6. Derselbe: Neue Erläuterungen zum Spannungsgesetz der zentrierten Systeme. Morphol. Arb. VII, 1897. In dieser Arbeit findet sich S. 292 zum ersten Male in der Literatur der Vergleich protoplasmatischer Struktursysteme mit der Spongiosastruktur (Spannungstrajektorien!)
7. Derselbe: Einiges über die sogen. Protoplasmaströmungen. Würzburger Sitzungsberichte 1897. Hier findet sich S. 3 der Hinweis darauf, dass alle (angeblich flüssigen!) Protoplasmastränge in den Kürbiszellen von den feinsten bis zu den größten straff gespannt sind, so dass hier ein wahres Spannungsphänomen bei typisch mobilem Plasma vorliegt.
8. Derselbe: Über die Struktur der Darmepithelzellen. Arch. f. mikr. Anat. Bd. 54, 1899. Aufstellung des Begriffes der protoplasmatischen Widerstands fibrillen (Tonofibrillen, Tonomitom).
9. Derselbe: Struktur der kontraktile Materie I. „Ergebnisse“ von Bonnet und Merkel, Bd. VIII, 1899. Hier habe ich S. 49 f den Vergleich der Muskelstruktur mit der Spongiosastruktur wiederholt und eine Verallgemeinerung des Problems rücksichtlich der Protoplasmaarchitektur in die Wege geleitet. Siehe auch das Resumé S. 65 Punkt 6. Ebenso vergl. S. 16 die allgemeine Einteilung der Querstreifen: Die eine Klasse der Querstreifen wird repräsentiert durch Streifen, welche der Ausdruck eines allgemeinen Strukturprinzips sind, Streifen Z und M; sie lassen sich auf die auch sonst bei parallel-fasrigen protoplasmatischen Struktursystemen vorkommenden Querverbindungen zurückführen. Diese werden a. a. O. den Streckbandsystemen der Knochen-spongiosa d. h. also den mit der Richtung der maximalen Zugspannung übereinkommenden Knochenbälkchen gleichwertig gesetzt.
- 9b. Derselbe: Über die Zentralkapseln und Pseudochromosomen etc. Anat. Anz., Bd. XVIII, 1900.

In dieser Arbeit habe ich auf S. 544 Anmerk. aufs neue darauf hingewiesen, dass ich die senkrechte Überkreuzung protoplasmatischer Struktursysteme in demselben Sinne auffasse wie die Spongiosastruktur. Auch erklärte ich gegenüber Reinke meine Priorität in dieser Sache und acceptierte im Anschluss an letzteren Autor den Ausdruck „Spannungstrajektorien“ für das in Frage stehende Strukturverhältnis.
10. Derselbe: Über die Struktur des menschlichen Herzmuskels. Anat. Anz., Bd. XX, 1901. Vergl. über die in Betracht kommenden rein morphologischen Daten S. 42 bis 49.

11. Andrews, Gwendolen Foulke: The living substance, Journal of Morphology, Vol. XII, Suppl. 1897.
12. Auerbach, Felix: Kanon der Physik. Leipzig, Veit u. Comp. 1899.
13. Bernstein, Julius: Die Kräfte der Bewegung in der lebenden Substanz, Braunschweig, Friedr. Vieweg u. Sohn, 1902.
14. Boys, C. V.: Seifenblasen. Vorlesungen über Kapillarität. Deutsch von Dr. G. Meyer, Leipzig, Johann Ambr. Barth, 1893 [diese Schrift ist als Einleitung in das Studium der Kapillarität sehr zu empfehlen].
15. Bütschli: Untersuch. über mikroskopische Schäume und das Protoplasma. Leipzig, W. Engelmann 1892.
- 15a. Derselbe: Meine Ansicht über die Struktur des Protoplasma und einige ihrer Kritiker. Roux's Arch., Bd. XI, 1901.
16. Chwolson, O. D.: Lehrbuch der Physik, Bd. I, Braunschweig, Friedr. Vieweg u. Sohn, 1902.
Dieses Handbuch enthält die beste der bisherigen Darstellungen der Kapillaritätslehre.
17. His, Wilhelm: Protoplastastudien am Salmonidenkeim, Bd. XXV. Abh. d. math. phys. Kl. d. kgl. sächs. Ges. der Wiss. 1899.
18. Jensen, Paul: Die Protoplasmaabewegung. Ergebnisse der Physiologie, Jahrg. I, 1902.
19. Maziarski, M. Stan.: Recherches cytologiques sur les organes segmentaires des Vers terre. Arch. polonaises des sc. biologiques et médic. Vol. II, 1903.
20. Derselbe: Sur les rapports des muscles et de la cuticule chez les crustacés. Krakauer Anzeiger, 1903.
21. van der Mensbrugghe, G.: Sur la tension superficielle des liquides etc. Mém. couronnés et mém. des sav. étrang. publ. par l'acad. roy. de Belgique. T. XXXIV, 1870.
22. Derselbe: Sur les propriétés physiques de la couche superficielle libre d'un liquide et de la couche de contact d'un liquide et d'un solide. Bull. de l'acad. roy. de Belgique. 3. série, T. XVII, 1889.
23. Derselbe: Sur les phénomènes capillaires. Annales de l'association des Ingénieurs sortis des écoles spéciales de Gand, T. XXIII, 1901.
Die letzteren beiden Schriften eignen sich, weil leichtverständlich, für den Nichtphysiker!
24. Nernst, Walther: Theoretische Chemie, III. Auflage. Stuttgart, Ferd. Enke, 1900.

25. Pfaundler, Leop.: Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik, Bd I, Neue Auflage 1902.
26. Plateau, J.: Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires, T. I und II, 1873.
27. Polowzow; Wera: Über kontraktile Fasern in einer Flimmerepithelart und ihre funktionelle Bedeutung. Arch. f. mikr. Anat., Bd. 63, 1903.
28. Quincke, Georg: Über Emulsionsbildung und den Einfluss der Galle bei der Verdauung. Pflüger's Arch. Bd. 19, 1879.
29. Derselbe: Über Kapillaritätserscheinungen an der gemeinschaftlichen Oberfläche von Flüssigkeiten. Annalen der Physik und Chemie 5. Reihe, Bd. 19, 1870.
30. Derselbe: Über die Kohäsion von Salzlösungen. Ibidem. 6. Reihe, Bd. 10, 1877.
31. Derselbe: Über den Randwinkel und die Ausbreitung von Flüssigkeiten auf festen Körpern. Annalen der Physik und Chemie, herausgegeben von Wiedemann, N. F. Bd. II, 1877.
32. Derselbe: Über periodische Ausbreitung von Flüssigkeitsoberflächen etc. Ibidem. N. F., Bd. XXXV, 1888.
33. Rhumbler: Der Aggregatzustand und die physikalischen Besonderheiten des lebenden Zellinhaltes, Zeitschr. f. allgem. Physiol., Teil I, Bd. I; Teil II, Bd. II, 1902.
34. Derselbe: Mechanische Erklärung der Ähnlichkeit zwischen magnetischen Kraftliniensystemen und Zellteilungsfiguren. Roux's Arch., Bd. XVI, 1903.
35. Derselbe: Physikalische Analyse von Lebenserscheinungen der Zellen. Roux's Archiv. I. Bd. VII, 1898; II. Bd. IX, 1899; III. Bd. IX, 1899.
36. Derselbe: Versuch einer mechanischen Erklärung der indirekten Zell- und Kernteilung. Roux's Arch. Bd. III, 1896.
37. Roux, W.: Über die Bedeutung „geringer“ Verschiedenheiten der relativen Grösse der Furchungszellen für den Charakter des Furchungsschemas etc. Roux's Arch., Bd. IV, 1896.
38. Derselbe: Über die Selbstordnung (Cytotaxis) sich „berührender“ Furchungszellen des Froscheies durch Zellenzusammenfügung, Zellentrennung und Zellengleiten. Roux's Arch., Bd. III, 1896.
39. Studnicka, F. K.: Die Analogien der Protoplasmafasern der Epithel- und Chordazellen mit Bindegewebsfasern. Sitzungsber. d. böhm. Ges. d. Wiss. in Prag, 1902.
40. Violle J.: Lehrbuch der Physik. Erster Teil: Mechanik; zweiter Band. Berlin, Julius Springer, 1893.

41. Volkmann P.: Über die Molekularanziehung von Flüssigkeiten auf einander. Ann. der Physik und Chemie, N. F. Bd. XVI, 1882.
42. Warburg, Emil: Lehrbuch der Experimentalphysik, VI. Aufl., 1902.
43. Winkelmann: Handbuch der Physik, Bd. 1.
44. Wüllner, Adolph: Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. I, IV. Aufl. Leipzig, D. G. Teubner.
45. Fischer, Karl Tobias: Die geringste Dicke von Flüssigkeitshäutchen. Dissertation München 1897.
46. Weber, Rudolf H.: Über die Oberflächenspannung mit Öl bedeckter Wasseroberflächen und die Wirkungsweite der Molekularkräfte. Ann. der Physik. Vierte Folge, Bd. 4. 1901.
47. Jensen, O.: Über den Aggregatzustand des Muskels und der lebendigen Substanz überhaupt. Pflügers Arch., Bd. 80, 1900.
48. Derselbe: Untersuchungen über Protoplasmamechanik. Pflügers Arch. Bd. 87, 1901.
49. Derselbe: In Sachen des Aggregatzustandes der lebendigen Substanz. Pflügers Arch., Bd. 83, 1900.
50. Heidenhain, M.: Über die Oberflächenkräfte als Ursache der sogen. „Geldrollenform“ der roten Blutkörperchen und verwandte Erscheinungen. Folia haematologica, herausgegeben von Dr. A. Pappenheim. Jahrg. 1904.