DIE
ANOMOGENE OBERFLÄCHENSpannung
DES
LEBENDEN ZELLEIBES.

ZUR ERWIDERUNG AN M. HEIDENHAIN.

VON
L. RHUMBLER,
GÖTTINGEN.

Mit 3 Textfiguren.

In seiner jüngst erschienenen Abhandlung „Ableitung der Oberflächenkräfte etc.“ (D. Zeitschr. Heft 79/80, 1904. S. 197—314) bringt Martin Heidenhain über meine letzten zellmechanischen Untersuchungen eine Reihe von haltlosen Äusserungen, die im Nachstehenden eine sachgemässe Zurückweisung erfahren sollen.

Heidenhain nennt S. 211 meine letzten Arbeiten ein Zerrbild physikalischer Betrachtungsweise zunächst ohne jede weitere Begründung; erst auf S. 277 folgt sie in folgender Form: „Dass Roux auf eine „anomogene“ Spannung der sich berührenden Furchungszellen schloss, war, wie sich späterhin gezeigt hat, sehr ungünstig für die weitere litterarische 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 Rhumbler eine kolossale Verwirrung angerichtet. Siehe dessen Arbeit über den Aggregatzustand und die physikalischen Besonderheiten des Protoplasmas¹⁾. 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 Auslegung des sogen. Gesetzes von der Konstanz des Randwinkels zu stande gekommen . . .“

¹⁾ In: Zeitschrift für allgemeine Physiologie. 1902. Bd. I, S. 279—388 und Bd. II, S. 183—340.

„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.“

Zunächst ist gegen die letzte Bemerkung Einspruch zu erheben. Es ist durchaus nicht notwendig, dass lokal differente Unterschiede in der Oberflächenspannung einer Flüssigkeit, die an eine andere nicht mischbare Flüssigkeit angrenzt, zur Entstehung reissender Oberflächenströme führen; „reissend“ sind diese Spannungsausgleichsströmungen überhaupt nur, wenn es sich um die Grenzfläche sehr leichtflüssiger Medien handelt. Bettet man einen Tropfen Ricinusöls in 80 % igen Alkohol ein, so entstehen (an der Bewegung von zufälligen oder absichtlich zugefügten Verunreinigungen leicht festzustellende durch partielle Lösung und anomogene Beimengungen des Öls verursachte) Oberflächenströme im Tropfen, die sich bei einem frischen Tropfen etwa so langsam wie diejenigen innerhalb einer kuglig kontrahierten *Amoeba blattae* vollziehen, mit dem Alter des Tropfens aber immer noch langsamer werden, keinesfalls also reissend eventuell aber äusserst langsame sind ¹⁾).

So lang die Strömungen andauern ist natürlich die Zusammensetzung und hiermit auch die Spannung innerhalb der Oberflächenschicht als anomogen anzunehmen. Die Strömungen streben zwar die Spannungs- und Kompositionsanomogenitäten auszugleichen, bei sehr zähflüssigen Medien gelingt ihnen das aber nur ganz allmählich. Anomogene Spannungen der Oberfläche kön-

¹⁾ In einem Tropfen mehrere Jahre alten Ricinusöls oder auch in einem Tropfen, der mehrere Stunden schon in Alkohol gelegen hat, werden die Strömungen von geradezu für direkte Beobachtung unerträglicher Langsamkeit, man kann sie oft nur noch mit Hilfe eines Mikrometers durch periodische Lagebestimmungen der verschobenen Verunreinigungen konstatieren.

nen demnach selbst in nicht lebenden Flüssigkeiten längere Zeit hindurch bestehen. Die lebende Substanz aber wird durch ihre chemischen Umwandlungen im Inneren noch in weit höherem Grade prinzipiell — so lang das Leben dauert — dazu befähigt sein, Spannungs- und Kompositionsanomogenitäten in ihrer Oberfläche trotz ihres flüssigen Zustandes aufrecht zu erhalten, denn, was im einen Moment an Anomogenitäten in der Oberfläche verschwindet, kann im anderen Moment durch das Getriebe des Lebens wieder neu erzeugt werden. Zudem aber wird die Fähigkeit, Anomogenitäten im Innen- und Oberflächenbau des Protoplasmas aufrecht zu erhalten, durch den schaumigen Aufbau der lebenden Substanz, wie er von Bütschli zuerst entdeckt und dann bekanntlich von sehr vielen anderen Forschern — von M. Heidenhain allerdings nur in wenig Fällen in unzureichendem Grade, in anderen überhaupt nicht — auf weiten Untersuchungsgebieten bestätigt werden konnte, in besonders günstiger Weise durch zwei Faktoren gefördert. Der eine Faktor ist darin gegeben, dass jeder einzelne Schaumraum sich gegebenen Falls zu einem besonderen chemischen Laboratorium ausbilden kann, worauf Hofmeister vor einiger Zeit besonders hingewiesen hat, so dass Schaumkammer von Schaumkammer verschieden werden kann. Der zweite aber darin, dass die Schaumwände des lebenden Zellinhaltes kolloidaler Natur sind. Kolloide diffundieren innerhalb anderer Kolloide nur äussert schwer, oder praktisch überhaupt nicht. Es ist also durchaus physikalisch möglich, dass beliebig viel durch lokal differenten Chemismus entstandene Anomogenitäten schon während des Wachstums der lebenden Substanz in den Wabenwänden erzeugt und aufrecht erhalten werden, weil die während des Wachstums neu eingeschobenen kolloidalen Bestandteile sich mit den früher dagewesenen nicht diffusionell vermengen werden. Diese beiden Faktoren beziehen sich zwar in erster Instanz nur auf die Erhaltungsmöglichkeiten chemischer Differenzen im flüssigen Struktur-

bau der lebenden Substanz, da aber unter sonst gleichen Umständen die Oberflächenspannung von der chemischen Natur der flüssigen Substanzen abhängig ist, so müssen mit den chemischen Anomogenitäten in zweiter Instanz auch solche in den Oberflächenspannungen einhergehen, und wenn die ersteren längere Zeiten hindurch oder sogar dauernd Bestand bewahren können, so müssen es auch die letzteren.

Das Vorhandensein der Spannungsanomogenitäten in einer lebenden lokal differenzierten flüssigen Oberfläche, die wir uns als ein Mosaik verschiedener flüssiger Kolloide vorzustellen haben, von denen jedes seine eigene Kapillaritätskonstante besitzen kann, hat nun zur Folge, dass unser anomogenes Oberflächenmosaik nicht an die Herstellung mathematischer Minimalflächen wie Kugelform und Laplace'sche Schaumflächen (also an die Oberflächenformen homogener Flüssigkeiten) gebunden ist, sondern ganz verschiedene Oberflächenformen je nach der Verschiedenheit der Kapillaritätskonstanten benachbarter Oberflächenteilchen vorübergehend oder dauernd annehmen kann¹⁾. Die lokal differenzierte flüssige Oberfläche hat also einen viel grösseren Gestaltenreichtum vor der homogenen Oberfläche voraus. Die Verschiedenheit der Gestaltung anomogener Oberflächen in Ruhe befindlicher Zellen ergibt sich daraus, dass im Gleichgewichtszustand, also bei nicht fliessenden Plasmen, jedes kolloidale Mosaikteilchen in der Oberfläche genau ebensoviel kontraktive Spannung aufbringen muss als seine Nachbarteilchen; denn hätte es weniger, so würde es von den benachbarten Mosaikteilchen auseinandergerissen, hätte es mehr, so würde es die umliegenden Mosaikteilchen auseinanderreißen, und zwar bis zur vollständigen Zerstörung, da die Oberflächenspannung [im Gegensatz zu elastischen Spannungen] von der Grösse der

1) Oberflächenformen die allerdings stets so klein bleiben, als sie „angesichts der Anomogenitäten“ irgend sein können, und in diesem Sinne von Driesch treffend als „relative Minimalflächen“ bezeichnet worden sind.

gespannten flüssigen Flächen unabhängig ist¹⁾. Das Aufbringen des erforderlichen Masses von Spannung für jeden Flüssigkeitsanteil des Oberflächenmosaiks ist nur durch entsprechende Krümmungen der Mosaikteilchen möglich — denn sobald sich eine flüssige Oberfläche krümmt, tritt zu der gewöhnlichen Oberflächenspannung bezw. zum Normaldruck der sog. Krümmungsdruck hinzu und es kann jetzt durch konvexe oder konkave Ausbiegungen der einzelnen Mosaikflächen die erforderliche „Einheitlichkeitsspannung“ trotz der verschiedenen Kapillaritätskonstanten benachbarter Mosaikflächen erreicht und dauernd aufrecht erhalten werden.

Man sieht, auf welch' schlechten Füßen M. Heidenhains Behauptung steht: dass anomogene Spannungen der Oberfläche nur momentan existenzfähig seien.

Was nun weiter die von Heidenhain als ganz ausserordentliche Verirrung verurteilte Theorie der Entstehung der Foraminiferengehäuse anlangt, die nun gar ausser der verpönten anomogenen Spannung noch mit einer total willkürlichen Aus-

1) Diese Thatsache, die in jedem grösseren Physikbuch klar dargestellt zu sein pflegt, ist von M. Heidenhain (l. c., S. 223—224) sehr unklar reproduziert worden. Zuerst zeigt Heidenhain durch das allbekannte Experiment mit dem viereckigen Drahtrahmen, der eine beweglich verschiebbare Seite besitzt, dass man eine in diesem Rahmen ausgespannte Seifenwasserlamelle, deren Spannung man durch Anhängen eines bestimmten Gewichtes an die verschiebbare Rahmenseite equilibriert hat, durch Hin- und Herschieben der beweglichen Rahmenseite beliebig vergrössern oder verkleinern kann, ohne dass die Lamelle aus dem Zustande des Gleichgewichts herauskommt. Dann lesen wir, dass nach Verringerung des an die verschiebbare Rahmenseite angehängten Gewichtes die Lamelle sich zusammenzieht und hierbei „ein Teil der Oberfläche verschwindet“, so dass man den Eindruck gewinnen muss, kleineren Gewichten könnte durch kleinere Lamellen und grösseren Gewichten durch grössere Lamellen das Gleichgewicht gehalten werden, was vorher richtig bestritten wurde. Die Sache liegt natürlich so, dass die Lamelle bei Anhängen des kleineren Gewichtes nicht bloss einen Teil der Oberfläche verschwinden lässt, sondern dass die ganze Lamelle von den Oberflächenkräften einkassiert wird, so dass sich das Seifenwasser schliesslich nur noch als kapillare Schicht zwischen den dicht aneinandergezogenen Rahmenseiten findet.

legung des sogenannten Gesetzes von der Konstanz des Randwinkels arbeiten soll, so ist hierauf Nachfolgendes zu erwidern:

Das betreffende Gesetz lautet; Unter gleichbleibenden Aussenbedingungen schneidet ein und dieselbe einheitlich homogene Flüssigkeit eine von ihr berührte feste Wandart stets unter dem gleichen Winkel, ganz einerlei, welche Lage die berührte Wandstrecke auch haben mag. Dieser unter gleichen Bedingungen stets gleiche Winkel ist der Randwinkel.

Ich sehe zunächst nicht ein, wo hier auch nur die Möglichkeit einer willkürlichen Auslegung der Konstanz des Randwinkels gegeben sein soll; jedenfalls hat Heidenhain es unterlassen mitzuteilen, worin die mir vorgeworfene Willkür in der Auslegung der Randwinkel bestehen soll. Diese wohlfeile Art der Kritik ohne Begründung sollte man nicht in Abhandlungen verwenden, die für wissenschaftlich gelten sollen.

Bei dem Kammerbau der polythalamen Foraminiferen, für die ich die Gültigkeit des Randwinkelgesetzes nachgewiesen habe, fliesst der durch Wachstum vergrösserte Plasmaleib, wenn er in der bislang erzeugten Schale nicht mehr Platz genug hat, aus der Mündung der Schale hervor und scheidet dann auf der Oberfläche des vorgeflossenen Plasmateiles neue Schalensubstanz ab, die nach ihrer Erstarrung die Wand einer neuen Kammer darstellt. Bei dieser Kammerbildung fliesst die vortretende Sarkode von der Mündung aus, physikalisch gesprochen, als eine berührende Flüssigkeit über eine gleiche Art von Wänden, nämlich über die alten Schalenteile, die in ihrer Komposition gleichmässig bleiben, hin. Bei gleichen Aussenbedingungen ist daher zu erwarten, dass die gleiche Sarkode desselben Individuums bzw. derselben Species bei der jedesmaligen Kammerbildung¹⁾ mit gleichem Randwinkel über die älteren Schalenteile hinfliesst und dass sie nun darum auch ihre neuen Wände,

1) Die Kammerbildung vollzieht sich periodisch jedesmal dann, wenn der Weichkörper in entsprechender Weise angewachsen ist.

die ja auf ihrer flüssigen Oberfläche zur Abscheidung kommen, in den verschiedenen Kammern stets mit demselben Randwinkel auf die Wand der alten Schalenteile ansetzt.

Die Konstanz der Randwinkel der Sarkode muss sich in einer Konstanz derjenigen Winkel dauernden Ausdruck verschaffen, mit welchen sich die Kammerwände innerhalb jeder Kammer auf die Wände der vorausgehenden Kammer ansetzen. Diese Ansatzwinkel müssten in allen Kammern unter sich gleich sein, wenn die Foraminiferensarkode eine homogene Flüssigkeit wäre; Homogenität für sie anzunehmen ist aber angesichts der histologisch nachweisbaren Differenzierung im Plasmabau der Foraminiferen nicht erlaubt. Es zeigt sich vielmehr, dass die Sarkode an verschiedenen Stellen einen verschiedenen Bau besitzt, und physikalische Folge davon muss sein, dass jede lokal eigenartige Stelle der Sarkode auch einen besonderen Randwinkel und einen entsprechenden Kammeransatzwinkel für sich hat¹⁾, der jedesmal da zum Ausdruck kommen muss, wo der betreffende Sarkodeteil sich bei der jeweiligen Kammerbildung an frühere Wandteile anlegt.

Wir haben also nicht eine durchgehende Gleichheit der Randwinkel des Kammeransatzes zu erwarten, sondern eine gruppenweise Gleichheit derselben in der Weise, dass nur homolog gelagerte Randwinkel, die jeweils von der gleichen Sarkodepartie erzeugt worden sind, einander gleich sind. Diese Erwartung bestätigt sich nun, wie ich gezeigt habe, durch den grossen Kreis der Polythalamien hindurch in geradezu verblüffendem Grade. Die Figur A wird das Gesagte als ein Beispiel für viele näher erläutern.

Nun könnte man denken, dass die Beschränkung der Konstanz der Randwinkel auf homologe Stellen nicht notwendig

¹⁾ Weil jede Art von Flüssigkeit unter gleicher Bedingung einen Randwinkel für sich hat und die Sarkodeoberfläche als ein Mosaik verschiedener Flüssigkeiten wegen ihrer Anomogenitäten anzusehen ist.

eine Folge der Flüssigkeitsmechanik zu sein brauche, sondern dass sie irgend einer besonderen vitalen Fähigkeit zuzuschreiben sei, die nach einem gewissen inhärenten Bauplan an bestimmten Stellen auch bestimmte Lagerungsverhältnisse ihrer Baumaterialien, unter ihnen auch die Randwinkel, schafft. Diesen Einwurf habe ich aber durch den Nachweis gänzlich — und wie

Fig. A.

Schema, soll die Erzeugung verschieden grosser Randwinkel durch die anomogen strukturierte Sarkode einer Pulvinulina veranschaulichen. Die Anomogenität der Sarkode ist durch verschiedene Musterung derselben in den drei letzten Kammern wiedergegeben. Der punktierte Sarkodeteil (das jeweils der Mündung M zunächst liegende Mündungsplasma) erzeugt einen Winkel von 90° [siehe die Winkel mit schwarzer Füllung im Scheitelpunkt], der durch Kreuzstrichzeichnung veranschaulichte Sarkodeteil einen kleineren Randwinkel von nur 60° [siehe die Winkel mit Kreuz].

Alles Nähere in der Originalarbeit. Vergr: ca. 75 fach.

ich bislang geglaubt hatte, allgemein überzeugend — entkräftet, dass die Verteilung der verschiedenen Gleichheitskategorien der Ansatzwinkel keine willkürliche ist, über die eine der Physik enthobene oder mit veränderlichen Mitteln arbeitende vitale Gestaltungsmechanik frei nach den Gesetzen der Variation und

Kombination etwa verfügen könnte, sondern dass sich überall eine feststehende Anordnung der verschiedenen Gruppen unter sich gleicher Randwinkel nach deutlich erkennbaren physikalischen Gesetzen ergibt und zwar nach physikalischen Gesetzen, die sich wieder als aprioristische Forderungen vom Boden der Hydromechanik aus ohne vitale Beihilfe von selbst ergeben.

Fliesst die flüssige kammerbauende Sarkode über die alten Schalenteile hin, so ist auf Grund der kontraktiven Oberflächenspannung des vorfliessenden Sarkodeteils zu erwarten, dass die Sarkode auf den berührten verschiedenen Flächenarten der alten Schalenteile stets unter geringstem Oberflächenverbrauch vorfliesst, weil die kontraktiv gespannte Oberfläche sich nicht weiter ausdehnen lassen wird, als zur Weiterführung ihrer Randwinkel auf der „Flussfläche“ unbedingt notwendig ist; die flüssige Oberfläche verliert beim Vorfliessen trotz ihrer Anomogenität, die Eigentümlichkeit aller anderen flüssigen Oberflächen nicht, unter allen Umständen so klein zu bleiben als irgend möglich. (Minimalflächengesetz.) Die kammerbauende Sarkode muss daher, wenn sie den Gesetzen der Flüssigkeiten unterworfen ist, von der Mündung aus über diejenigen Ebenen, Krümmungsflächen und winklig zusammenstossenden Flächen der alten Schalenteile hinfliessen, auf denen sie am leichtesten, d. h. „unter denkbar geringster Vergrösserung ihrer eigenen Oberfläche“, die von ihrer Anomogenität geforderten Randwinkel vorschieben kann.

Also nicht in der Konstanz homologer Randwinkel an und für sich, sondern in der Verbindung dieser Randwinkelkonstanz mit „minimalem“ Oberflächenzusatz beim Vorfliessen liegt die Stärke des Beweises für den „flüssigen“ Zustand der kammerbauenden Sarkode.

Ich habe nun an Beispielen, die aus allen Familien der polythalamen Foraminiferen entlehnt sind, gezeigt¹⁾, dass sich die mathematisch-physikalische Voraussage im Kammerbau der Foraminiferen überall erfüllt erweist, und zwar nicht nur für normale Fälle, sondern auch bei Schalenregenerationen, die besonders dadurch interessant und in unserem Sinne beweisend sind, als bei ihnen die vor der Regenerationsperiode liegende Regelmässigkeit im Aufbau der Schale im Regenerat vollständig verlassen und zu ganz neuartigen Kammerformen bzw. Kammeranordnungen geführt werden kann, die sich unter exakter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden Bruchränder mit grosser Bestimmtheit im voraus auf Grund der namhaft gemachten Faktoren angeben lassen bzw. nach ihrem Aufbau²⁾ als notwendig nachweisen lassen. Ich kann mir nur denken, dass M. Heidenhain meine diesbezüglichen Ausführungen nicht verstanden hat, was ich nicht ändern kann und will, da ich meine diesbezüglichen physikalisch-mathematischen Ableitungen nicht noch elementarer darzustellen weiss, als dies früher geschehen ist und mir auch sonst nirgends ein gleiches Nicht-verstandensein entgegengetreten ist.

Im übrigen mache ich besonders darauf aufmerksam, dass ich nicht schlichthin alle Plasmaarten für durchaus „flüssig“ angesehen wissen möchte, sondern nur diejenigen, für die ich das „Flüssigsein“ durch die in meiner Arbeit geschilderten Experimente dargethan habe, wenn ich auch keinen Augenblick zweifle, dass sich bei ähnlichen Untersuchungen auch der eigentliche Plasmaleib von noch ganz ausserordentlich viel anderen

1) Vergl. ausser meiner bereits oben angeführten Arbeit: Rhumbler, Die Doppelschalen von Orbitolites und anderen Foraminiferen, vom entwickelungsmechanischen Standpunkt aus betrachtet. In: „Arch. Protistenkunde“ V. 1. 1902, S. 193—296; Taf. 7, 8 und 17 Textfiguren.

2) Wenn es sich um Exemplare handelt, die als regenerierte zufällig unter erbeutetem Material aufgefunden worden und in der Litteratur näher beschrieben und abgebildet worden sind.

Zellen als „flüssig“ in dem von mir definierten Sinne¹⁾ erweisen wird.

Ich wiederhole hier die Schlusssätze meiner Arbeit: (loc. cit. S. 320): „Trotzdem erinnern wir uns hier zum Schlusse wieder an das, was wir eingangs gesagt haben, dass bei den Kolloiden fest und flüssig kein prinzipieller, sondern nur ein gradueller Unterschied ist (cf. Verworn: „Allgemeine Physiologie“ 3. Auflage, Jena 1901, S. 568) und dass temporäre und lokale Verfestigungen innerhalb der lebenden Substanz nicht ausgeschlossen sind, auch wenn sich die lebende Zellinhalts-substanz in vielen Fällen mit physikalischer Genauigkeit als flüssig erwiesen hat; auf lokale Verfestigungen der Zelloberfläche sind wir bereits bei den späteren Embryonalzellen gestossen, temporäre Verfestigungen könnten etwa durch Übertreten des Hyaloplasmas in den gelatiniierten Zustand und Wiedertzurück-treten in den flüssigen durch lokale temporäre Flüssigkeitsent-ziehungen entstehen. . .“

„Wir halten uns nach den (loc. cit.) vorliegenden Unter-suchungen nur zu folgender Verallgemeinerung berechtigt: Der lebende Zellinhalt 1. Protoplasmaströmung zeigender Zellen, 2. derjenige amöboider Zellen und 3. derjenige der Eier und früher Embryonalzellen besitzt einen flüssigen Aggregatzustand und hat die mechanischen Besonderheiten eines anomogen kom-ponierten Schaumgemenges“²⁾.

¹⁾ Als „flüssig“ bezeichne ich jede Substanz, die [zunächst unter der Voraussetzung, dass sie eine „einheitliche“ ist, also kein Gemenge im Sinne der Physik darstellt] a) ohne „innere“ Elastizität von messbarer Grösse und b) ohne merkbare Kompressibilität [bei gewöhnlichen Drucken], c) den Kapil-laritätsgesetzen unterworfen ist. Heidenhain hat es nicht für der Mühe wert gehalten zu sagen, was er unter „flüssig“ versteht. Wie wenig eindeutig und wie wenig feststehend der Begriff des „Flüssigen“ in der Physik ist, das geht aufs neue wieder aus O. Lehmanns allen Zellmechanikern empfehlens-wertem Buche „Flüssige Krystalle“ (Leipzig 1904) hervor.

²⁾ Ich mache hier darauf aufmerksam, dass sich unter den von mir ge-nannten Zellarten die Muskelzellen nicht befinden und dass ich mich über die Wirkung der Oberflächenspannungskräfte bei der Muskelkontraktion (Bern-

Obgleich ich nicht die Absicht habe, die 114 Seiten umfassende theoretische Arbeit Heidenhains im einzelnen durchzukritisieren, möchte ich doch zu einzelnen Punkten, soweit sie die in meinen Arbeiten vertretenen Anschauungen berühren bzw. befehlen, noch einige Bemerkungen machen.

Auf S. 286 wendet sich Heidenhain gegen die Anwendung des Begriffes des „Kolloidalen“ auf das Plasma; weil dieser Begriff chemisch ganz ungleichartige Stoffe (z. B. Lösungen von Eisenoxyd, von Silber oder Gold, von Eiweiss oder Leim, Gerbsäure, Saffranin etc.) umfasse. Hierauf ist zu bemerken, dass der Begriff des Kolloidalen ein rein physikalischer ist, der die hochmolekularen Körper umfasst, welche für gewöhnlich nicht kristallisieren und durch tierische Membranen nicht merklich diosmieren. Wir sagen im Gegensatz zu Heidenhain gerade deshalb, weil der Begriff des Kolloidalen keinerlei Folgen für die chemische Komposition der Stoffe in sich trägt, können wir ihn auch für das Plasma in Anwendung bringen; ja wir müssen es, wenn wir das Plasma physikalisch rubrizieren wollen, denn das Plasma besitzt alle Eigenschaften, die wir den kolloidalen Körpern zuschreiben.

Heidenhain behauptet weiter, damit eine Einordnung des Plasmas zu den Kolloiden überhaupt möglich sei, „muss der betreffende Körper im Plasma löslich sein. Dies ist aber gerade beim Plasma nicht der Fall.“ Auch diese Behauptung ist falsch; es giebt ausserordentlich viel Kolloide, die nicht in Wasser löslich sind; z. B. alle Harze, selbst manche Hydrogele (ohne Temperaturerhöhung) von starren Kolloiden, wie Glas etc.

stein) vorläufig jedes Urteils enthalte, so lange die Muskel noch nicht in gleicher Weise, wie ich dies für andere lebende Zellinhalte gethan habe, in Bezug auf die physikalischen Eigenschaften ihrer mikroskopischen Bestandteile genau untersucht sind, d. h. ob es im Muskel Bestandteile giebt, welche nicht bloss einigen, sondern sämtlichen Flüssigkeitskriterien genügen, wie und wo sie eventuell gelagert sind, wie sie sich bei Kontraktion und Erschlaffung des Muskels verhalten etc. etc.

gar nicht zu reden; von Wasserlöslichkeit ist in der physikalischen Begriffsbestimmung „kolloidal“ gar nicht die Rede.

Auf S. 298 stellt Heidenhain die Behauptung auf, dass die „physikalischen“ Bedingungen bei Anordnung von Schaumwänden (nach den Prinzipien der Blasenspannung) durchaus ver-

Fig. B.

Durch Druck auf das Deckglas und Klopfen mit der Nadel isolierte Blastomeren von *Triton taeniatus*. Unter den mehr oder weniger isolierten Zellen fand sich das abgebildete netzförmige Blastomeren-Aggregat, bei welchem die verbindende Kittmasse zu mehr oder weniger langen Fäden ausgezogen war, die erst ganz allmählich durchrissen. Vergr. ca. 100 fach.

schieden wären von denjenigen, unter denen die Furchungszellen mit ihren Kanten und Winkeln zusammenstossen. „Ein Komplex von Seifenblasen ist unter sich durchaus „verwachsen“. Die trennenden Scheidewände sind den Nachbarn gemeinsam und die Scheidewände besitzen Oberflächenspannung. In einem

Komplex von Furchungszellen bleiben die Zellen von einander isoliert und an den Berührungsflächen existiert keine merkliche Oberflächenspannung (S. 298).“ Natürlich waren die Autoren, die wie Driesch, Roux und viele andere die Blasenspannung zum Vergleich mit der Anordnung der Furchungszellen heranzogen, nicht so naiv, dass sie die von Heidenhain gemeinten Differenzen zwischen hier und dort übersehen hätten. Die Berechtigung des Vergleiches ist einmal darin gegeben, dass die Gleichgewichtsbedingungen von Flüssigkeitshäuten dieselben sind wie für massive Flüssigkeitsmassen¹⁾, wie Heidenhain aus Violle's „Lehrbuch der Physik“ (Berlin 1892, Seite 594), das er zu seinen molekular-theoretischen Erörterungen ja mehrfach verwendet hat, hätte ersehen können. Zudem ist es unrichtig, wenn Heidenhain die Blastomeren für mechanisch isoliert ansieht (Fig. B), sie werden vielmehr durch eine Kittmasse zu einem System zusammengehalten. Die Anordnung der Kittmasse kann man direkt mit derjenigen von Schaumwänden vergleichen; die Luftblasen des Schaumes werden dann in diesem Vergleiche durch die Substanz der Furchungszellen vertreten. Diese Vertretung von Luft durch die Furchungszellen ist darum zulässig, weil in beiden Fällen in ihren kleinsten Teilchen verschiebbare Körper vorliegen, wenn auch der Grad der Verschiebbarkeit bei der Luft ausserordentlich viel grösser ist, als bei dem Plasma, das wegen seiner Schaumstruktur und der Dickflüssigkeit seiner Komponenten nur längeren Druck- und Zugwirkungen durch gestaltliche Umformung gerecht werden kann und darum auch manchmal (bei raschen Blastomerteilungen oder sehr viskösem Plasma) den Minimalflächenforderungen nicht voll genügt.

Mehr Gewicht als bisher ist einem anderen Einwand, den Heidenhain gegen den flüssigen Aggregatzustand des Proto-

¹⁾ Von Schwerewirkungen, die ja auch bei der „Formgestaltung“ lebender Massen keine direkt mechanische Rolle spielen, abgesehen.

plasmas und seiner Bestandteile erhebt, zuzuschreiben; da der gleiche Einwand auch schon von anderer Seite (Loeb, Camillo Schneider u. a.) geltend gemacht worden ist, so muss ich ihn etwas eingehender behandeln.

Der Einwand lautet: „Das bewegliche Protoplasma der Pflanzenzelle ist im stande, enorm dünne Fäden von grosser Länge zu bilden, welche manchmal kaum sichtbar sind, ähnlich den Pseudopodien der feinsten Art bei Rhizopoden, eine Tatsache, die mit einer gleichzeitig bestehenden wirksamen Oberflächenspannung nicht zusammen zu reimen ist; denn eine jede Oberflächenspannung, die im Verhältnis zur Bildsamkeit des Protoplasmas einen merklichen Wert besässe, müsste nach physikalischen Gesetzen einen solchen Plasmafaden in eine Reihe von Kügelchen auflösen.“ Die physikalische Erfahrung, welche diesem Einwande zu Grunde liegt, heisst: ein Flüssigkeitsfaden kann an Länge seinen Umfang nicht übertreffen ($h < 2 r \pi$); diese Erfahrung ist an einer Reihe leichtbeweglicher ruhender Flüssigkeiten gewonnen; sie lässt sich aber keinesfalls auf alle Flüssigkeiten und auf alle Versuchsbedingungen ausdehnen.

Die Gründe, welche gegen eine Verallgemeinerung der Notwendigkeit des Zerfalls von Flüssigkeitsfäden in einzelne Tröpfchen sprechen, sind folgende: 1. Selbst dünnflüssige Substanzen wie Wasser vermögen in der Form langer dünner Säulen aufzutreten, wenn sie in fließender Bewegung sind, wie z. B. ein dünner Wasserstrahl beweist, den man unter dem Einfluss der Schwere aus einem Wasserhalm ausfliessen oder den man gegen den Einfluss der Schwere aus einem Spritzball oder einer dünnen Fontainespitze unter besonderer Druckwirkung heraus-spritzen lässt. Bei Flüssigkeiten, die in strömender Bewegung sind, gleichviel was der Grund der Bewegung sein mag, haben offenbar unter dem steten Wechsel der Molekülanordnung die Oberflächenspannungskräfte nicht genügend Zeit, die Tröpfchen-

teilung des Stromstrahles zu besorgen. 2. Es existieren eine ganze Reihe zähflüssiger kolloidaler Substanzen, deren Fähigkeit, sich zu langen Fäden ausziehen zu lassen, ihnen die Bezeichnung „fadenziehende Substanzen“ eingetragen hat¹⁾. Ich nenne hier nur die Schleimsubstanzen, die ja immer zum Vergleich mit lebenden Plasmamassen wegen ihrer physikalischen Eigenschaften herausgefordert haben. Zieht man einen Schleimfaden von geeigneter Beschaffenheit (z. B. Mundspeichel nach Zuckergenuss) zwischen den geöffneten Spitzen eines Zirkels aus, und drückt man dann die Zirkelspitzen allmählich zusammen, so verkürzt sich der Faden entsprechend und nimmtschiesslich bei stärkster Näherung der Zirkelspitzen wieder Tropfenform an. Er wird von der Oberflächenspannung bis zur Kugelgestalt zusammengezogen, aber nicht von ihr in Tropfen auseinandergesprengt. 3. Durch fädige Einlagerungen, deren gelegentliche Existenz im Plasma ich niemals bestritten habe²⁾, kann die fädige Ausziehbarkeit von Flüssigkeiten fast ins Unbeschränkte erhöht werden, ohne dass die eingelagerten Fäden

Fig. C.

Unteres Ende eines in Zusammenziehung begriffenen Schleimfadens aus der Stengelwunde von *Narcissus poeticus*. Im Inneren die langgestreckten Krystallnadeln. Vergr. ca. 100 fach.

1) Von diesen müssen jedoch hier diejenigen ausgeschlossen werden, die durch Festwerden ihrer Rinde sich bei längerer Dauer der Einwirkung der Oberflächenspannung entziehen, wie Glasfäden, erstarrte Leimfäden etc.

2) cf. Rhumbler: „Allgemeine Zellmechanik“ in: *Ergebn. Anat. u. Entwicklungsgesch.* (Merkel u. Bonnet) Bd. 8. 1899. S. 565 u. 566. Ich bestreite nur, dass die systemlose Zusammenmengung von Fäden und flüssiger Grundmasse an sich irgend einen der Zelle nutzbaren Mechanismus abzugeben vermöge.

selbst irgendwie von gleicher unbeschränkter oder auch nur von irgend einer der Längsausziehbarkeit des Fadens gegenüber commensurablen Länge zu sein brauchten. Derartige Verhältnisse trifft man z. B. bei dem Saftschleim an, der aus der Stengelwunde einer abgeschnittenen *Narcissus poeticus* austritt. Dieser Schleim lässt sich zu enorm dünnen Fäden ausziehen, die viele tausendmal so lang als dick sind, ohne dabei die Fähigkeit, sich beim Freilassen unter Wirkung der Oberflächenspannung zu einem kugeligen Tropfen zusammenzuziehen, zu verlieren. Mikroskopische Untersuchung zeigt, dass die Schleimmasse zahlreiche langgestreckte, wenn auch gegen die Fadenlänge verschwindend kleine Krystallnadeln enthält (wahrscheinlich Raphiden (Fig. C)). 4. Es ist in Erwägung zu bringen, dass auch die Existenz von Flüssigkeitslamellen, wie man sie mit Seifenwasser in einem Drahtrahmen bekanntlich ausspannen kann, im Grunde genommen dem sonst geltenden Gesetz zuwiderläuft, dass jede Flüssigkeit sich unter Gebieterschaft ihrer Oberflächenspannung in eine Form mit denkbar kleinster Oberfläche zusammenzieht. Man müsste auch hier erwarten, dass eine derartige Flüssigkeitslamelle sofort in einzelnen Tropfen auseinanderpränge, denn die Lamelle besitzt auf ihren beiden Flächen eine im Vergleich zu ihrer Masse ganz ausserordentlich grosse Oberflächenentfaltung, während die kugelige Tropfenform bekanntlich jedwedes gegebene Quantum von Masse mit einem Minimum von Oberfläche ausstattet. In der That lassen sich ja auch die meisten Flüssigkeiten nicht zu ähnlichen Lamellen ausdehnen, und nur der stete Umgang mit Seife (Bier) hat uns hier die an sich sehr merkwürdige Erscheinung weniger auffällig werden lassen.

Wenn sich aber geeignete Flüssigkeiten durch Unterstützung ihrer Ränder lange Zeit hindurch (unter geeigneten Umständen Tage lang) zu breiten Flächen auseinanderziehen und von der theoretisch zu erwartenden Kugelform zurückhalten lassen, ohne dass dabei die Oberflächenspannung

ausser Betrieb gesetzt oder ihre Wirkung in irgendwelcher Weise geschädigt würde, dann wird man mit Fug und Recht nicht erstaunen dürfen, dass es auch Flüssigkeiten giebt, die sich bei Unterstützung an zwei Endpunkten über lange Zeiträume hin in Fadenform halten lassen, ohne darum der Wirkung der Oberflächenspannung entzogen zu sein¹⁾.

Wie es bekannt ist, dass Flüssigkeitslamellen, die auf minimale Dünne (nahe dem doppelten Radius der molekularen Wirkungssphäre) ausgezogen sind, eine besondere Festigkeit erlangen, die an diejenige fester Membranen erinnert, so ist aus den gleichen physikalischen Gründen nicht unwahrscheinlich, dass auch „enorm dünn“ ausgezogene Flüssigkeitsfäden eine solche besondere Festigkeit erlangen, so dass selbst ein gewisser Spannungszustand der enorm dünnen, manchmal kaum sichtbaren, Plasmafäden keinen Gegenbeweis für ihre ev. flüssige Beschaffenheit abzugeben vermag.

Man sieht, auch das Beste, was Heidenhain gegen den

¹⁾ Wie sich die Oberflächenspannung der flüssigen Lamellen darin kundgiebt, dass die Lamellen so klein als unter den Aufhängebedingungen irgend möglich zu werden streben (Laplace'sche Minimalflächen), so äussert sie sich bei fadenziehenden Flüssigkeiten darin, dass die Fäden zwischen ihren Aufhängepunkten so kurz wie möglich zu werden, d. h. also zu geraden Linien sich zusammenzuziehen streben; an Stelle des Minimalflächengesetzes der Flüssigkeitslamellen tritt bei aufgehängten Flüssigkeitsfäden das Minimalstreckengesetz. Ich beabsichtige in einer späteren Arbeit über die Mechanik der Karyokinese auf diese Verhältnisse näher zurück zu kommen, da ich der Überzeugung bin, dass sich die ganzen Umlagerungen des die Chromosomen führenden Liningerüsts (innerhalb des Kernes) während der Mitose auf Grund des Minimalstreckengesetzes mechanisch darstellen lassen, wobei die Aufhängefäden der Chromosomen die nach Minimalstrecken strebenden zähflüssigen Fäden darstellen. Nicht aufgehängte in einer anderen Flüssigkeit frei suspendierte Flüssigkeitsfäden werden sich in Fadenform aller Voraussicht nach nur dann halten lassen, wenn ihre Oberflächenspannung geringer ist als ihre Innenreibung. Ob solche flüssige Fäden in flüssiger Umgebung überhaupt prinzipiell undenkbar sind, wie ich früher mit Bütschli anzunehmen geneigt war, scheint mir nach dem Gesagten unter den genannten Bedingungen neuerdings zweifelhaft.

flüssigen Aggregatzustand des Plasmas vorzubringen vermochte, ist nicht stichhaltig.

Auf Seite 208 behauptet Heidenhain, ich hätte versucht, „seine“ Theorie der intravitalen Spannung plasmatischer Systeme (von 1895), „seine“ Aufstellung von maximalen Zug- und Druckwirkungen in Plasmastrukturen auf der Grundlage der Oberflächenspannung neu zu entwickeln. Das Einzige, was in diesem Sinne gedeutet werden könnte, ist die Thatsache, dass ich bekanntlich das Heidenhainsche Zellteilungsmodell dazu benutzt habe, die aus meiner Zellteilungstheorie abzuleitenden, aber in einer ganz anderen Weise als bei Heidenhain zu stande gekommenen Spannungen innerhalb des Zelleibes in ihren Wirkungen zu veranschaulichen.

Energisch muss ich mich aber dagegen verwahren, dass die „innere Zellspannung“, die ich an lebenden Blastomeren experimentell nachgewiesen habe, mit der von Heidenhain behaupteten „centrierten Spannung des ruhenden Zelleibes“ irgend etwas anderes gemeinsam habe, als das Wort Spannung. Heidenhain denkt sich bekanntlich auch die ruhende Zelle von einem, nach der Sphäre hin centrierten System elastisch gespannter Fäden durchzogen; wobei er sich durch Nebenannahmen über die Schwierigkeit hinweghelfen muss, dass bei der weitaus grössten Mehrzahl der Zellen von centrierten Fasern während des Ruhestadiums der Zelle absolut nichts zu sehen ist. Bei mir dagegen ist die „innere Zellspannung“ eine mechanische Notwendigkeit, eine Schaumspannung, die auf Grund des schaumigen alveolären Baues des Plasma in dem Zelleib ebenso mechanisch notwendig, wie in jedem anderen Schaum vorhanden sein muss; eine centrierte Anordnung der Alveolen, die an Heidenhains centriertes System im Ruhestadium erinnern könnte, ist zur Erklärung dieser inneren Schaumspannung weder notwendig, noch irgendwie (wegen Kraftvergeudung) wahrscheinlich. Die innere Schaumspannung beruht auf dem Verkleine-

rungsstreben jeder einzelnen Alveolenwand und lässt sich an jedem makroskopischen Schaum leicht dadurch demonstrieren, dass er künstlichen äusseren Deformationen durch Zug und Druck einen gewissen Widerstand leistet und ihnen gegenüber seine vorherige Form aufrecht zu erhalten sucht.

Die Schaumspannung erklärt ohne weiteres zwei Eigentümlichkeiten der lebenden Zelleibmasse; die Zelle verhält sich von aussen auf sie einwirkenden Zug- und Druckwirkungen gegenüber wie eine elastische (1) Masse, wenn diese Wirkungen nur kurze Zeit in Thätigkeit sind¹⁾, wie eine plastische (2) Masse dagegen, wenn die betreffenden Wirkungen von „längerer“ Dauer sind²⁾. Kurze Zeit gezogene oder gedrückte Furchungszellen kehren nach Aufhören des Zuges oder Druckes in ihre frühere Gestalt zurück, längere Zeit gedrückte oder gezogene Zellen modifizieren ihre Form nach Massgabe der Zug- und Druckverhältnisse.

Auch Heidenhain findet, ohne meinen experimentellen Nachweis der genannten Verhältnisse mit einem Wort zu erwähnen oder selbst irgendwelche neue oder alte Thatsachen als Beleg dafür anzuführen, dass das Protoplasma bis zu einem gewissen Grade **elastisch** (wie Kautschuk) — bei Überschreitung der Elastizitätsgrenze — **plastisch** oder modellierbar (wie Ton) ist. Wie man sieht, nimmt er aber eine andere Erklärung für die Erscheinung an, indem er sie auf Überschreitung der Elastizitätsgrenze des seiner Ansicht nach ja festen Plasmagerüstes zurückführt. Gegen diese Erklärung wäre an sich nichts ein-

1) Denn dann suchen die einzelnen durch den Zug oder Druck verzerrten Alveolenwände nach dem Auflösen der Zug- und Druckwirkungen ohne Veränderung ihrer Lagerung ihre alte Form nach dem Minimalflächen-gesetz wieder aufzunehmen, das ganze Alveolenwerk kehrt in die frühere Form wie eine zeitweilig deformiert gewesene elastische Substanz wieder zurück.

2) Dann werden nämlich nicht nur die einzelnen Alveolen deformiert, sondern die Alveolen verschieben sich gegeneinander und nehmen innerhalb der deformierten Aussenform neue Minimalflächenstellung an. Alles Nähere in meiner Originalarbeit.

zuwenden, wenn nicht der Annahme eines allgemein festen Zustandes des Plasmas an sich unumstössliche Schwierigkeiten entgegenständen.

Heidenhain hat diese Schwierigkeiten stillschweigend übergangen¹⁾. Ich nenne unter den in meiner früheren Arbeit näher ausgeführten folgende:

1. Die Strömungsgeschwindigkeit des Plasmas innerhalb der Zellen der Hauptachse von *Chara foetida* erweist sich einem von aussen lastenden Drucke bis zu sieben Atmosphären²⁾ gegenüber als völlig unabhängig. Überdeckt man das eine Ende einer solchen 2—3,5 cm langen Charazelle mit einem Deckglas, auf das man ein dem genannten Drucke entsprechendes Gewicht einwirken lässt, während man das andere Ende frei und ungedrückt unter dem Deckglas hervorragen lässt, so beobachtet man, dass die Geschwindigkeit der Plasmaströmung im gedrückten und ungedrückten Teil genau die gleiche und ebenso gross ist, als wenn auf die Zelle überhaupt kein besonderer Druck ausgeübt würde. Es ist nun absolut undenkbar, dass eine Substanz von auch nur ganz geringer Festigkeit sich unter einem derartig beträchtlichen Drucke genau ebenso rasch bewegen sollte, wie ohne eine besondere Druckzufuhr. Die erhöhte Reibung des gedrückten festen Gerüstwerkes müsste die Stromgeschwindigkeit unter der Druckstrecke ganz erheblich herabdrücken, auch wenn die Festigkeit des betreffenden Gerüstwerkes denkbar minimal angenommen würde. Dagegen ist der Befund ohne weiteres dadurch verständlich und notwendig zu erwarten, dass bei Flüssigkeiten die Innenreibung in weitesten Grenzen von

¹⁾ Ausser den obengenannten Einwüfen vergl. vor allem auch Bütschli (Arch. Entwicklungsmech. Bd. 11, S. 509—512), wo sich Bütschli direkt gegen Heidenhain wendet.

²⁾ Hörmann hatte früher schon auf Grund einer anderen Methode festgestellt, dass Druckschwankungen im Betrage bis zu zwei Atmosphären keine wahrnehmbare Wirkung auf die Strömung zur Folge hatte. Vergl. Hörmann: „Studien über die Protoplasmaströmung bei Characeen“. Jena 1898. S. 40.

den auf den Flüssigkeiten lastenden Drucken unabhängig ist. 2. In der Plasmaströmung der Charazellen können einzelne oder mehrere in der Strömung treibende Körperchen von vergleichsweise beträchtlicher Grösse durch zufällige Hindernisse oder äusserliche Eingriffe mitten in der Strömung festgehalten werden, so dass die Strömung seitlich an ihnen vorbeizieht, ohne dass eine irgend merkliche Verlangsamung der vorbeiziehenden Strömung eintritt. Auch das wäre bei der Anwesenheit eines irgendwie festen Gerüsts von auch nur minimaler Festigkeit innerhalb des strömenden Plasmas absolut undenkbar, während der flüssige Zustand der strömenden Masse das Verhalten sofort erklärt. 3. Man kann, wie O. Hertwig und neuerdings wieder Gurwitsch gezeigt hat, die Dotterkörperchen aus den oberen Eiteilen der Amphibieneier heraus in die unteren hinein centrifugieren, ohne dadurch den oberen Eiteil, der seine Teilungsfähigkeit behält, abzutöten; diese Möglichkeit verträgt sich nicht mit der Annahme eines Gerüsts von irgendwelcher Festigkeit; denn einmal ist das absolute Gewicht des Dotterkörperchens bei seiner Kleinheit so gering, dass ein Gerüst von auch nur minimaler Festigkeit die Dotterkörperchen in ihrer ursprünglichen Lagerung festhalten müsste und zum anderen müsste das Gerüst durch die centrifugierten Körperchen zerstört werden; ein flüssiger Zustand des Eiplasmas wird dagegen einerseits den centrifugierten Körperchen einen sehr viel geringeren Widerstand entgegensetzen und andererseits wird sich auch die zeitweise durch das Centrifugieren der Dotterkörperchen gestörte Struktur nach dem Passieren der Dotterkörperchen auf Grund der Schaumwaben-Gruppierungsgesetze wieder herstellen ¹⁾ (vgl.

¹⁾ Ich halte es für äusserst wahrscheinlich, dass man in ganz analoger Weise auch in einem künstlichen Schaum eingelagerte Körperchen aus ihrer ursprünglichen Lagerung herauscentrifugieren kann, ohne den Aufbau des Schaumes in irgendwelcher erheblichen Weise zu stören. Von dieser Wahrscheinlichkeit kann man sich leicht dadurch überzeugen, dass man mit einem Glasstab, nach allen Richtungen durch einen Seifenschaum (nicht gar zu rasch!) hindurchfahren kann, ohne die Lagerung der Schaumkammern zu alterieren.

hierzu die Abbildung bei Gurwitsch: „Morphologie und Biologie der Zelle.“ Jena 1904, S. 287. Fig 103). 4. Bringt man isolierte lebende Furchungszellen oder Aggregate derselben von einer ihrer Gallerthülle beraubten und künstlich zerteilten Amphibienblastula mit einer freien Wasseroberfläche in Berührung, so werden diese Furchungszellen augenblicklich mit grosser Vehemenz auseinandergerissen und die Blastomerensubstanz breitet sich als feinstes Häutchen auf der Wasseroberfläche aus (Rhumblér, loc. cit. S. 303). Dieses Verhalten entspricht genau demjenigen, das man von einer flüssigen Substanz nach dem zweiten Kapillaritätsgesetz erwarten muss; es wurde von mir auf Grund aprioristischer Erwartung aufgefunden; ich möchte aber wahrhaftig wissen, wie M. Heidenhain diese Ausbreitungserscheinung mit einem irgendwie festen Zustand der sich auf dem Wasserspiegel ausbreitenden Substanz in Verbindung bringen will.

Ich komme also zu folgendem Resultat: Keiner der von Heidenhain gegen den flüssigen Zustand der von mir untersuchten Zellinhalte und gegen die Möglichkeit einer anomogenen Oberflächenspannung erhobenen Einwände hat irgendwelche Beweiskraft.

Da Heidenhain eine Fortsetzung seiner Schrift über Oberflächenkräfte in Aussicht gestellt hat, so sehe ich mich ausserdem zu folgender Erklärung veranlasst: Sollte M. Heidenhain fortfahren, meine Arbeiten in ähnlicher — so wenig sorgsam begründeter, voreiliger — Weise anzugreifen, so fühle ich mich nicht verpflichtet, auf diese Angriffe weiterhin zu antworten. Wo Schroffheit der Polemik die mangelhafte Güte der Einwände ersetzen soll, da ist für die Klärung der umstrittenen Sache wenig Vorteil zu erwarten.

Zu einer Kritik der hier nicht berührten anderweitigen neuen Ansichten Heidenhains wird sich anderen Orts Gelegenheit bieten.