**Zeitschrift:** Prisma : illustrierte Monatsschrift für Natur, Forschung und Technik
**Band:** 4 (1949)
**Heft:** 2

**Artikel:** Elektrische Supraleitung
**Autor:** Braunbek, W.
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-653483

**Nutzungsbedingungen**
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

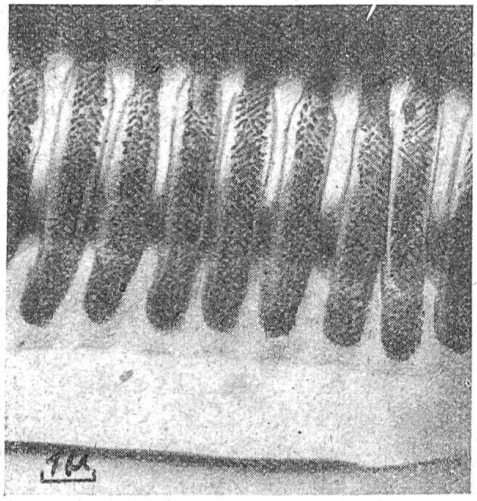
**Conditions d'utilisation**
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 13.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

Schale offenbart sich erst, wenn die Diatomee nach dem Abdruckverfahren des Verfassers abgebildet wird. Bei diesem mittelbaren Verfahren wird nicht das Objekt selbst in das Elektronenmikroskop gebracht, sondern eine feine



*Das Lack-Abdruckbild einer kleinen Pinnularia-Art (6000fach vergrößert) läßt ihr Kammersystem mit den Poren erkennen*

nur wenige Hunderttausendstel Millimeter dicke Lackhaut, die die Reliefform des Objektes hat. Das hier wiedergegebene Abdruckbild der Pinnularia Diatomee ist dabei in folgender Weise gewonnen worden:

Die Diatomeen wurden auf eine Glasplatte gestreut und mit einer sehr verdünnten Zaponlacklösung übergossen. Dabei überzieht sich nicht nur die Oberfläche der Diatomeen mit Lack, sondern der Lack tritt auch in die Hohlräume und Poren ein und überzieht diese nach dem Verdunsten des Lacklösungsmittels ebenfalls mit einer festen dünnen Lackhaut. Wird nun mit Flußsäure behandelt, so löst sich die Diatomeenschale auf, nur der unlösliche Lackabdruck bleibt übrig und kann im Elektronenmikroskop abgebildet werden. Dabei sind wie bei einem Glasmodell nicht nur die Oberfläche der Diatomeenschale, sondern auch ihr innerer Aufbau zu erkennen. Unsere auf diese Weise erhaltene Abdruckaufnahme zeigt, daß in der Diatomeenschale wurstähnliche nach innen offene Kammern vorliegen, die durch sehr feine Poren (im Abdruckbild erscheinen sie als schwarze Stäbchen) mit der äußeren Oberfläche verbunden sind.

Es wäre müßig, nach Sinn und Zweck dieser eigenartigen Strukturvariationen zu fragen. Vielleicht sind sie nur Launen der Natur, vielleicht steckt auch ein tieferer Sinn dahinter. Die Schönheit der kleinen Kunstwerke wird dem Beschauer allein schon die Erfüllung von Sinn und Zweck bedeuten.

*Dr.-Ing. Hans Mahl, Wildsteig*

# Elektrische Supraleitung

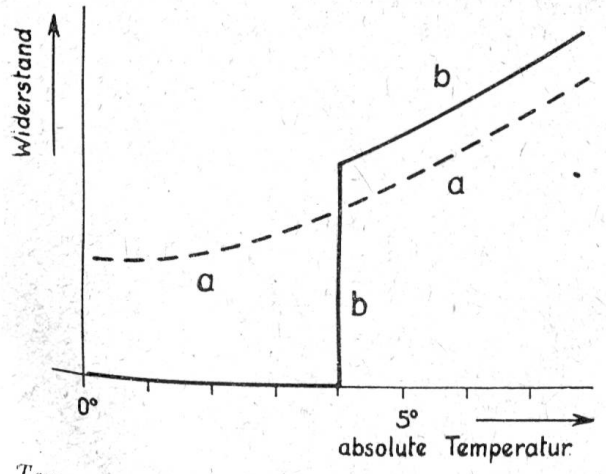
Die Elektrotechnik unterscheidet zwischen Leitern, die dem Strom einen geringen Widerstand entgegensetzen, und Nichtleitern oder Isolatoren, die einen hohen elektrischen Widerstand besitzen. Gäbe es keine Leiter, sondern nur Isolatoren, so gäbe es auch keine Elektrotechnik. Weder elektrische Bahnen noch elektrisches Licht, weder elektrische Werkzeugmaschinen noch elektrische Öfen, weder Telephon noch Telegraph oder Radio wären dann möglich, und unsere Kenntnis von der Elektrizität würde sich auch heute noch auf die Erscheinungen der Reibungselektrizität beschränken, die schon den alten Griechen bekannt waren. Gäbe es aber keine Isolatoren, sondern nur gute Leiter, so wüßten wir ebenfalls nichts von der Elektrizität; denn dann würde jede elektrische Energie abfließen; eine elektrische Ladung ansammeln zu wollen, würde dann ebenso aussichtslos sein wie mit einem Sieb Wasser zu schöpfen.

Zu den Leitern des elektrischen Stromes zählen vor allem die Metalle. Sie leiten den Strom von allen Stoffen weitaus am besten und werden durch den elektrischen Strom chemisch nicht verändert. Aber es gibt unter ihnen noch beträchtliche Unterschiede. Während das unter den reinen Metallen am schlechtesten leitende Metall, das Wismut, nur eine Leitfähigkeit von 0,8 besitzt, hat das am besten leitende, das Silber, eine solche von 63, also das achtzigfache. Als glücklichen Zufall dürfen wir es ansehen, daß wir im Kupfer mit der Leitfähigkeit 58 ein so gut leitendes und dabei nicht allzu seltenes Metall haben. Wie behindert wäre die Elektrotechnik, wenn es zum Beispiel kein besser leitendes Metall als Eisen mit der Leitfähigkeit 10 gäbe. Welche Möglichkeiten müß-

ten sich ihr andererseits erschließen, wenn Stoffe existierten, die hundert- oder gar tausendmal besser leiteten.

Nun treten solch hohe Leitfähigkeiten bei allen reinen Metallen im Gebiet sehr tiefer Temperaturen tatsächlich auf. Die angegebenen Leitfähigkeitswerte gelten nämlich für die „Normaltemperatur" von 20° Celsius. Mit sinkender Temperatur erhöhen die Metalle ihre Leitfähigkeit ganz bedeutend. Bei minus 150° Celsius zeigt Kupfer statt 58 schon eine Leitfähigkeit von 185, bei minus 250° Celsius bereits weit über 1000. Die wissenschaftliche Forschung war besonders an der Frage interessiert, was geschieht, wenn wir uns immer mehr dem absoluten Nullpunkt, der Temperatur von minus 273° Celsius, nähern. Die Untersuchung dieser Frage führte zu einer der größten Überraschungen der physikalischen Forschung, zur Entdeckung der Supraleitfähigkeit.

Die Versuche hatten zunächst ergeben, daß die Steigerung der Leitfähigkeit im allgemeinen eine Grenze hat. Man erreicht zwar einen sehr hohen Leitfähigkeitswert, oder wie man auch sagen kann, einen sehr niedrigen Wert des elektrischen Widerstandes, der sich dann aber bei weiterer Abkühlung nicht mehr ändert (siehe Kurve a der Abbildung). Dieser „Restwiderstand" hängt stark vom Reinheitsgrad des Metalls ab. Bei reinen Metallen ist er sehr niedrig; so konnte man bei einer sehr reinen Kupferprobe eine Leitfähigkeit von 200 000 erreichen, die also mehr als 3000mal so groß ist wie die Leitfähigkeit bei gewöhnlicher Temperatur. Nicht alle Metalle jedoch zeigen dieses Verhalten. Schon ganz zu Anfang der Untersuchung der Metall-Leitfähigkeit bei extrem tiefen Temperaturen fand im Jahre




*Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes*
*a Normales Metall, b Supraleiter*

1911 Kamerlingh-Onnes, daß Quecksilber zwar zunächst bei immer weiterer Abkühlung, wobei es sich bereits im festen Zustand befindet, seinen Widerstand stetig verringert, daß dann aber bei einer ganz bestimmten Temperatur, und zwar bei 4,1° absolut (das heißt 4,1° über dem absoluten Nullpunkt, also etwa minus 269° Celsius), etwas ganz Rätselhaftes geschieht: Der Widerstand des Quecksilbers sinkt plötzlich auf einen so niedrigen Wert ab, daß überhaupt kein Widerstand mehr zu messen ist (siehe Kurve b der Abbildung). Man sagt dann, das Quecksilber ist „supraleitend" geworden.

In rascher Folge wurden nunmehr weitere supraleitende Metalle entdeckt; alle besitzen eine ganz charakteristische „Sprungtemperatur", bei welcher der elektrische Widerstand verschwindet. Immer weitere „supraleitende" Metalle werden gefunden, und es ist eine heute noch umstrittene Frage, ob bei genügend starker Senkung der Temperatur — man ist bereits bis auf kleine Bruchteile eines Grades an den absoluten Nullpunkt vorgedrungen — alle Metalle supraleitend werden. Bis heute kennen wir unter den reinen Metallen allerdings erst neunzehn Supraleiter, von denen die bekanntesten mit ihren Sprungtemperaturen hier angegeben seien:

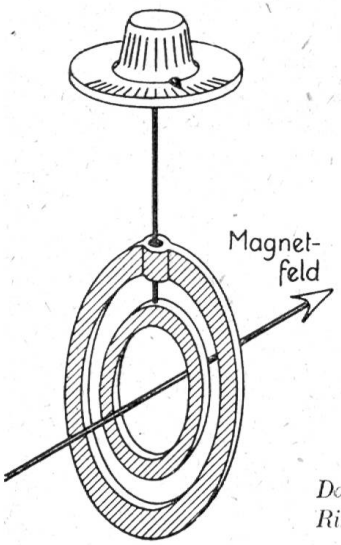
| Metall | Sprungtemperatur (absolut) |
|---|---|
| Niobium | 9,2° |
| Blei | 7,3° |
| Quecksilber | 4,1° |
| Zinn | 3,7° |
| Aluminium | 1,1° |
| Zink | 0,8° |
| Hafnium | 0,35° |

Niobium und Hafnium sind zwar durchaus keine sehr bekannten Metalle; sie sind aber angeführt, weil sie unter den reinen Metallen die höchste und die niedrigste Sprungtemperatur, soweit sie heute bekannt ist, aufweisen.

Aber nicht nur reine Metalle, sondern auch viele Legierungen werden supraleitend, und unter ihnen merkwürdigerweise auch solche, die ausschließlich aus Metallen zusammengesetzt sind, die selbst nicht in den supraleitenden Zustand versetzt werden können, wie zum Beispiel eine Legierung aus Gold und Wismut. Sogar manche Verbindungen von Metallen mit Stickstoff, Kohlenstoff, Schwefel, Silizium und Bor werden supraleitend. Diese Verbindungen haben im Normalzustand einen viel höheren Widerstand, also eine geringere

Leitfähigkeit als die Metalle. Trotzdem hat man gerade unter ihnen solche gefunden, die den supraleitenden Zustand leichter, das heißt bei viel höheren Sprungtemperaturen annehmen. Den Rekord hält gegenwärtig das im Jahre 1941 als supraleitend entdeckte Niobiumnitrid, das bereits bei $17^0$ abs. supraleitend wird, in einem Temperaturgebiet also, das schon mit flüssigem Wasserstoff erreichbar ist und nicht die äußerst subtile Handhabung des flüssigen Heliums notwendig macht.

Eine merkwürdige Erscheinung, zu der die Supraleitung führt, ist die des Dauerstromes. Man kann in einem geschlossenen Metallring durch Hineinstecken oder Herausziehen eines Magneten, allgemein also durch Änderung der Stärke eines Magnetfeldes, einen Induktionsstrom erzeugen. Hat der Metallring dabei Zimmertemperatur, so klingt der Strom, ohne weiteren Antrieb sich selbst überlassen, infolge der „Reibung" der Elektronen im Metall in Bruchteilen einer Sekunde auf den Nullwert ab, und seine Energie verwandelt sich in Wärme. Man erhält also nur einen ganz kurz dauernden Stromstoß. Befindet sich der Me-



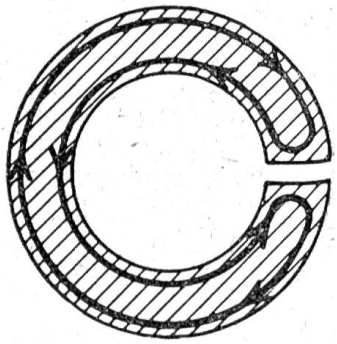

*Dauerstromversuch mit zwei Ringen*

tallring aber im Zustand der Supraleitung, so ist kein elektrischer Widerstand, also auch keine „Reibung" der Elektronen mehr vorhanden. Der einmal angeregte Strom fließt ohne Stromquelle dauernd fort. Man hat solche Ströme viele Stunden lang beobachtet und konnte mit den feinsten Meßmethoden während dieser Zeit auch nicht die geringste Abnahme ihrer Stärke feststellen. Erhöht man dagegen die Temperatur des extrem gekühlten Ringes über den Sprungpunkt, so ist der Strom sofort verschwunden.

Die Stärke eines derartigen Dauerstroms kann man so messen, daß man zu gleicher Zeit in zwei konzentrischen Ringen, von denen der eine an einem Torsionsfaden drehbar aufgehängt ist, durch Abschalten eines Magnetfeldes Dauerströme erzeugt. Die beiden Ströme üben dann aufeinander Kräfte aus, die versuchen, die beiden Ringe in der ursprünglichen gegenseitigen Lage zu halten. Sucht man den einen aus seiner Lage herauszudrehen, so braucht man dazu eine Kraft, die bei einer bestimmten Ablenkung der Verdrillung der Aufhängung des drehbaren Rings entspricht. Durch derartige Versuche konnte nachgewiesen werden, daß die Abnahme der Stromstärke unter jeder meßbaren Grenze bleibt, und dies bedeutet, daß im Zustand der Supraleitung das Metall einen mindestens hundert Billionen mal kleineren Widerstand besitzt als Silber bei Normaltemperatur.

Bei diesen Dauerströmen gibt es weitere Merkwürdigkeiten. Wählt man zum Beispiel an Stelle zweier konzentrischer Ringe einen Ring und eine Kugel, so verhalten sich diese genau so wie zwei Ringe. Trotz der Supraleitung kann man also die Kugel offenbar nicht „unter ihrem Dauerstrom durchdrehen". Die Stromfäden des einmal in ihr erzeugten Dauerstroms liegen in ihr fest. Nimmt man statt eines geschlossenen einen aufgeschnittenen Metallring, so erhält man ebenfalls Kraftwirkungen, die denen eines Dauerstroms entsprechen. Dies ist zunächst völlig unverständlich. Man kam aber darauf, daß hier der Dauerstrom den Stromlinien wie in der Abbildung folgt, was zu ähnlichen Kraftwirkungen führt wie bei einem Dauerstrom in einem geschlossenen Ring.

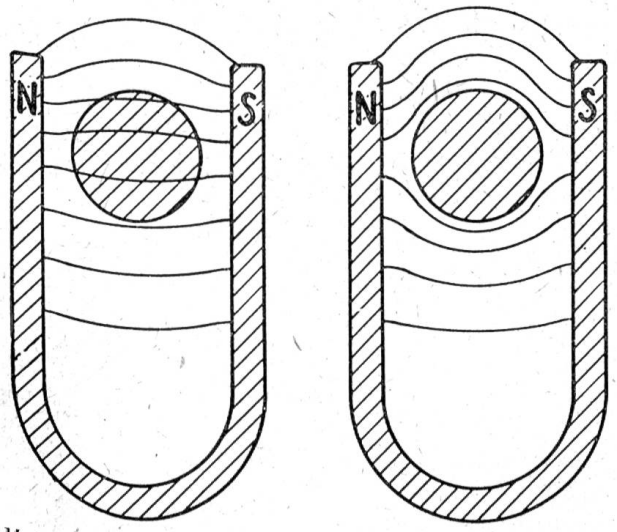
Durch stärkere Magnetfelder wird der supraleitende Zustand zerstört. Dies hat zur Folge, daß man keine beliebig starken Ströme durch einen Supraleiter schicken kann, da der Strom selbst ein Magnetfeld erzeugt, und so bei Überschreiten einer gewissen Stärke von sich aus den supraleitenden Zustand aufhebt. Die Emp-



*Stromlinien im aufgeschnittenen Ring*

findlichkeit der einzelnen Supraleiter gegen Magnetfelder ist jedoch sehr verschieden. Während bei manchen reinen Metallen schon Felder von weniger als 100 Gauß zur Zerstörung der Supraleitfähigkeit ausreichen, liegt diese Grenze bei einer auf etwa $2^0$ abs. abgekühlten Blei-Wismut-Legierung über 25 000 Gauß. Ein haarfeiner Blei-Wismut-Draht von nur einem Zehntel Millimeter Dicke kann bei $2^0$ abs. einen Strom von 500 Ampère ertragen, ohne sich im allergeringsten zu erwärmen, während derselbe Draht im gewöhnlichen, nicht supraleitenden Zustand durch den gleichen Strom momentan zerstäubt würde.

Eine ganz neue Erscheinung entdeckte Meißner im Jahre 1933. Nicht nur die elektrischen, sondern auch die magnetischen Eigenschaften der Supraleiter ändern sich am Sprungpunkt. Während die Kraftlinien eines Magneten durch eine normale, nicht eiserne Metallkugel nahezu völlig ungestört hindurchgehen, vermögen sie in einen Supraleiter nicht einzudringen, und werden bei Unterschreitung der Sprungtemperatur aus der Metallkugel völlig herausgedrängt. Ebenso sind in neuerer Zeit Änderungen der spezifischen Wärme und der Wärmeleitfähigkeit supraleitender Metalle unterhalb des Sprungpunktes gefunden worden, die weiteres Licht in die noch immer rätselhaften Erscheinungen bringen. Auch ist der Übergang vom normalen in den supraleitenden Zustand mit dem Auftreten einer kleinen Wärmemenge, ähnlich der Schmelzwärme beim Schmelzen oder Gefrieren, verknüpft.




*Meißner-Effekt. Die magnetischen Feldlinien werden aus dem Supraleiter herausgedrängt (rechte Abbildung). Links: Verhalten oberhalb des Sprungpunktes*

All diese Erscheinungen, die sich am Sprungpunkt der Supraleiter zeigen, drängen die Frage auf, was eigentlich im atomaren Aufbau oder mit den Elektronen eines Metalls vor sich geht, wenn es supraleitend wird, und wie wir diese merkwürdigen Dinge unter einem gemeinsamen Gesichtspunkt erklären können. Wir wünschen uns eine Theorie der Supraleitung und aller mit ihr zusammenhängenden Effekte. Dieser Wunsch ist indessen in den vergangenen fünfunddreißig Jahren unerfüllt geblieben. Es gibt kaum ein anderes Beispiel in der modernen Physik, in dem sich eine auffallende, experimentell neu entdeckte Erscheinung der theoretischen Deutung in gleicher Weise entzöge. Zwar ist es gelungen, die empirischen Tatsachen sowohl von der thermodynamischen als auch von der rein elektrischen Seite aus in ein befriedigend geschlossenes Formelsystem einzuordnen, das uns heute die mathematische Beherrschung des ganzen Gebiets gestattet. Diese „phänomenologische" Theorie ist vor allem durch v. Laue ausgebaut worden. Aber alle Versuche, das eigentliche Wesen der Supraleitung zu ergründen, auf Grund der sonst so erfolgreichen atomaren Theorien den Mechanismus der Supraleitung zu verstehen, sind lange fehlgeschlagen.

Erst in jüngster Zeit wird ein Weg sichtbar, der vielleicht zur Lösung des Rätsels führen kann. Heisenberg hat in Weiterentwicklung der quantentheoretischen Elektronentheorie der gewöhnlichen metallischen Leitfähigkeit eine Möglichkeit erkannt, der Supraleitung gerecht zu werden. Er selbst bezeichnet diese Möglichkeit zwar mehr als ein Programm denn als eine Theorie; immerhin ergeben sich schon so schöne Ausblicke — sogar die Größenordnung der Sprungtemperaturen läßt sich rechnerisch ermitteln — daß die Hoffnung begründet erscheint, eine schmerzliche Lücke im Gebäude der Theoretischen Physik möge sich hier schließen. Nach der Heisenbergschen Theorie besteht der supraleitende Zustand darin, daß die Leitungselektronen des Metalls, die auch den gewöhnlichen Stromtransport besorgen, und von denen bei sehr tiefen Temperaturen nur noch ein sehr kleiner Bruchteil frei, aber dafür sehr frei beweglich ist, daß sich diese Leitungselektronen in einen hochgeordneten Zustand begeben, der etwa der Anordnung von Atomen in einem Kristall entspricht. Dieser Zustand bildet sich zwar nur in Mikrobereichen aus, vermag aber auch da schon das Auftreten widerstandsloser Strom-

leitung zu erklären. Man hätte sich demnach den Übergang in den supraleitenden Zustand ähnlich wie den Übergang von einer flüssigen in eine kristalline Form, und zwar für die Leitungselektronen des Metalls, vorzustellen. Allzuheftige Temperaturbewegung der Metallatome zerstört diese hochgeordnete Form; daher ist die Supraleitung nur unterhalb gewisser, sehr niedriger Grenztemperaturen möglich. Ob sich diese Vorstellung in ihrer weiteren mathematischen Durchbildung bewährt, muß die Zukunft zeigen. Eine Illusion scheint sie zu vernichten: die vage Hoffnung, es könnte einmal gelingen, das Phänomen der Supraleitung bis zu normalen Temperaturen auszudehnen und eine Supra-Elektrotechnik darauf zu gründen, die keine Widerstands-Verluste mehr kennt. Aber wenn auch die Supraleitung für immer außerhalb des Bereichs technischer Anwendungen liegen sollte, so wird sie auf jeden Fall eine der merkwürdigsten Erscheinungen der neueren Physik bleiben.

*Prof. Dr. W. Braunbek, Tübingen*

# Blumentiere

Goethes großartige Schau der Urpflanze, von deren im wesentlichen Blattnatur besitzendem Bauplan alle höheren Pflanzen abzuleiten seien, hat die Gedankengänge der Naturphilosophen wie die Untersuchungen der Biologen immer wieder aufs glücklichste befruchtet. Sei es zu Überlegungen derart, daß man hier die Ausgestaltung eines als Idee gegebenen Urbildes verfolgen könne, sei es zu Forschungen, ob die Urpflanze oder zum mindesten eine ihr nahestehende Form sich unter den heute lebenden oder den fossil überlieferten Pflanzen finden und die verwirrende „tausendfältige Mischung dieses Blumengewühls" auf unserer Erde sich genetisch, also in echten Verwandtschaftsbeziehungen auf sie zurückführen lasse. Auch an ein „Urtier" hat Goethe gedacht, als an ein Wesen, das, selbst noch undifferenziert, alle Potenzen der späteren unendlichen Mannigfaltigkeit des Tierreichs in sich trage. Allerdings hat er sich dabei, als Folge der damals noch allzu geringen Kenntnis gerade der niederen Tierwelt, auf die Wirbeltiere beschränkt. Heute, da man in über hundert Jahren zoologischer Forschung die niedersten wie die höchsten Tierformen gleichermaßen registriert wie erforscht hat, läßt sich in der Tat ein der Urpflanze entsprechendes Urtier als das „Urbild, das auch die seltenste Form im Geheimen bewahrt", zunächst in Gedanken bilden, dann in der Natur suchen und schließlich auch finden.

In Urpflanze wie Urtier muß sich, wie besonders der Mainzer Botaniker Wilhelm Troll sehr schön ausgeführt hat, das jeweilige „Gestaltungsprinzip" wesentlich erkennen lassen. Weil die Pflanze autotroph ist — das heißt wörtlich sich selbst ernährt, ihre organische Substanz nämlich mit Hilfe der Sonnenlichtenergie aus Anorganischem selbst aufbaut —, muß sie die unzähligen winzigen „Sonnenlichtfabriken" ihrer grünen Farbstoffkörperchen so weit als möglich ausbreiten, also eben ein Blattwesen sein. Im Gegensatz dazu ist das Tier heterotroph, das heißt, es ernährt sich von bereits fertiger organischer Substanz, wobei es gleichgültig ist, ob es diese von der Pflanze direkt erhält oder auf dem Umweg über ein anderes Tier. Zur Aufnahme dieser Nahrung, zu ihrer Aufschließung, zur Aufsaugung — Resorption — in den tierischen Körper aber bedarf es, sobald einmal die Stufe des Einzellers verlassen ist, eines Hohlraumes als Verdauungskanal, eines Darms.

Schon bei den Schwämmen kommt es zu einem ersten Ansatz solcher Hohlraumbildung: Ihr Blastula-Keim, eine hohle Zellkugel ganz und gar von der Organisationshöhe der Volvox-Kugeltierchen-Kolonie, stülpt sich zwar beim Festsetzen ein, doch kommt es noch nicht zur Bildung eines echten einheitlichen Darmkanals. Alle Tiere aber, die sich ihrem Bauplan nach über den noch nicht zur Gewebs- und Organdifferenzierung gelangenden, ein noch recht loses Zellagregat bildenden Typus des Schwammes erheben, zeigen in ihrer Keimesgeschichte eben jene Bildung eines verdauenden und Nahrung resorbierenden Urdarms in der Gastrula, wie Ernst Haeckel im Jahre 1872 diese Keimform benannt hat. Nicht immer freilich geschieht dies in so „klassisch"-einfacher Weise wie in dem abgebildeten Fall des berühmten Lanzettierchens Amphioxus-Branchiostoma, in dessen Embryonalentwicklung aus dem Volvox-Blastula-Stadium die Gastrula entsteht, als drücke man mit dem Daumen eine Höhlung in einen Ball. Viele der gro-