

Die Stufenleiter der Organisationshöhe der Tiere¹.

Von R. HESSE, Berlin.

Wenn man früher Entwicklungsreihen innerhalb des Tierreichs aufstellte, so waren die leitenden Gesichtspunkte immer nur die Entwicklung der Formen und die stammesgeschichtliche Herleitung der Gruppen des Systems. Die Funktion, die ja das notwendige Korrelat der Form ist, wurde dabei nie mit in die Betrachtung einbezogen. Solche rein morphologische Einstellung ist einseitig und gibt ein unvollkommenes Bild. Jetzt, wo die physiologisch-anatomische Betrachtungsweise immer mehr an Geltung gewinnt, ist es wohl an der Zeit, auch einmal die fortschreitende Leistungsfähigkeit der Organismen in ihrer Entfaltung zu untersuchen. Die anatomische Grundlage läßt sich auch da nicht entbehren. Denn die *Verrichtungen*, die Funktionen, sind durch die ganze Tierreihe, ja durch die Reihe aller nicht chlorophyllbesitzenden Lebewesen die gleichen; die *Einrichtungen* aber, an die diese Verrichtungen gebunden sind, die Baupläne der tierischen Organisation, sind mannigfach verschieden.

Die Gleichheit der Verrichtungen ergibt sich daraus, daß die Grundlagen der Lebenserscheinungen und damit die notwendige Reihenfolge der Vorgänge für alle Tiere die gleichen sind. Die in den Lebensäußerungen zutage tretende Energie muß durch Zerlegung komplizierter chemischer Verbindungen, der Nährstoffe, gewonnen werden. Solche Stoffe müssen also zunächst beschafft werden (Nahrungsaufnahme); sie müssen löslich gemacht und dem Körper einverleibt werden (Verdauung und Resorption); sie müssen zu möglichst ausgiebiger Energiegewinnung unter Sauerstoffaufnahme gespalten werden (intermediärer Stoffwechsel und Atmung), und die dabei zurückbleibenden Schlacken und die entstehenden Stoffwechselprodukte wie Kohlensäure und Ammoniakderivate müssen als überflüssige und oft sogar schädliche Stoffe aus dem Körper entfernt werden, oft nach vorheriger Entgiftung (Defäkation, Exkretion). Das sind die Grundzüge der Lebensfunktionen bei der Amöbe und der Hefezelle wie beim Menschen, und, wie die Nährstoffe überall ähnlich sind, so zeigen auch die Mittel des Nahrungsabbaus und die dabei auftretenden Zwischenstufen oft eine überraschende Ähnlichkeit.

Die Einrichtungen aber, in und an denen sich diese grundlegenden Vorgänge abspielen, sind überaus verschieden. Die tierischen Lebewesen sind Maschinen, in denen gebundene chemische Energie frei gemacht und zu Lebensleistung nutzbar gemacht wird, zu Bewegung, Reizleitung, Wärme u. a. Die von Menschen erfundenen Ma-

¹ Im Auszuge aus den Sitzungsberichten der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Phys.-math. Klasse. 1929. III.

schinen, in denen chemische Energie in Bewegung umgesetzt wird, erfahren innerhalb desselben Grundplanes sehr verschiedene Grade des Aufbaues und der Vollkommenheit, z. B. die Kolbendampfmaschinen, und weichen dabei in den Einzelheiten des Bauplans je nach ihrer Verwendung sehr voneinander ab. Es können aber auch durch Einbeziehung neuer Prinzipien der Energieverwendung weitere Fortschritte gemacht werden, z. B. durch Dampfturbinen oder Explosionsmotoren. Das alles geht Hand in Hand mit wesentlichen Änderungen in der „Morphologie“ der Maschine. Ganz ebenso hängen die morphologischen Abänderungen in den Bauplänen der Tiere aufs engste mit den Einzelheiten der *Energiegewinnung und der Energieverwertung* zusammen. Mit der fortschreitenden Differenzierung des Bauplans tritt im allgemeinen auch eine Vervollkommnung in der Energetik des Tierkörpers ein, gründlichere Freimachung der in den Nährstoffen vorhandenen Energie und deren nutzbringendere, sparsamere Verwendung. Das Ergebnis solcher „Verbesserungen“ ist Intensivierung der Lebensleistung. Und wie im Handel und Wandel eine Maschine allmählich durch die andere überlegene verdrängt wird, so verdrängt in der Tierreihe ein Bauplan den anderen: die Fische stechen die Tintenfische aus, die Knochenfische verdrängen die Schmelzschupper, die Säugetiere überwiegen über die Reptilien — infolge der überlegenen Leistungsfähigkeit des Bauplans. Die Schritte solcher Vervollkommnung in der Tierreihe wollen wir einmal in großen Zügen verfolgen.

Der erste große Schritt ist der vom Protisten zum vielzelligen Tier, dem Metazoon, von der Einzelzelle zum Zellenstaat. Den Übergang bilden Protistenkolonien, bei denen die einzelnen Partner der Kolonie völlig gleichwertig sind (*Pandorina*); sie sind bei den wiederholten Teilungen der Mutterzelle beieinander geblieben. Der Vorteil, der ihnen daraus erwächst, besteht darin, daß ihre motorischen Kräfte sich addieren, die Bewegungshindernisse aber, die aus der Reibung an dem umgebenden Wasser erwachsen, durch relative Verkleinerung der Oberfläche vermindert werden. Das gibt also die Möglichkeit, die Bewegungsleistung zu steigern oder bei gleicher Leistung die Körpermaschine weniger abzunutzen und damit ihre Dauer zu verlängern. Der Vorteil ist verhältnismäßig klein; aber auch das Opfer, durch das er erkauft wird, ist gering: die Zelle gibt ihre Freiheit auf; sie ist an die Kolonie gebunden auf Gedeih und Verderb.

Ein wesentlicher Fortschritt kommt erst zustande, wenn zwischen den Zellen der Kolonie

eine Arbeitsteilung eintritt. Die Zellen sind dann nicht mehr gleich, sie übernehmen verschiedene Leistungen und werden dadurch auch morphologisch verschieden. Die wichtigste Arbeitsteilung ist die zwischen generativen und somatischen Zellen, Keimzellen und Körperzellen (*Volvox*). Während bei der gewöhnlichen Protistenkolonie jede Zelle sich in gleicher Weise vermehren und zur Grundlage einer neuen Kolonie werden kann, kommen hier von der Gesamtheit der Zellen nur einzelne für die Erhaltung der Art in Betracht; diese wachsen als Keimzellen stärker heran auf Kosten der anderen, die ihnen Nährstoffe geben. Und während sie so in neuen Generationen weiterleben könnten, sind die anderen, die Körperzellen, rettungslos dem Tode verfallen. An der Wiege des Zellenstaates steht der Verlust von Freiheit und Gleichheit der Zellen und die „*Erfindung des obligaten Todes*“. Die Protisten sind potentiell unsterblich; jedes Individuum kann zwar sterben (durch Unglücksfall), es muß aber nicht sterben und kann in seinen Teilstücken weiterleben. Auch für die Metazoen gilt das „*omne vivum ex vivo*“. Potentielle Unsterblichkeit als Grundlage der Kontinuität des Lebens muß auch ihnen zukommen; aber sie ist auf die generativen Zellen, auf die Keimzellen, beschränkt. Dieses Prinzip, gewisse Zellen zugunsten bevorzugter Geschwister zu benachteiligen, hier dem sicheren Tode auszuliefern, erweist sich weiter auch innerhalb des Keimplasmas als fruchtbar. In vielen Fällen werden zahlreiche Nachkommen der Urkeimzelle eines Individuums wieder zu Sklaven einer geringeren Zahl bevorzugter Geschwister, der Gameten, degradiert, denen sie als Nährzellen und Follikelzellen entsprechend assimilierte Nährstoffe liefern, wobei sie selbst sich abnutzen und schließlich sterben. Der ganze Körper des vielzelligen Tieres, das, was wir als Individuum bezeichnen, hat schließlich für die Fortdauer des Lebens keine andere Bedeutung als die, Sklave der Keimzellen zu sein, sie aufzuzammen und ihnen zu gedeihlicher weiterer Entwicklung zu verhelfen.

Zwischen den Körperzellen tritt eine weitere Arbeitsteilung ein. Wenn auch jede von ihnen die für das Leben nötigen Grundleistungen der Ernährung, Bewegung und Reizbarkeit in gewissem Ausmaße behält, so übernimmt sie für die Gesamtheit doch nur bestimmte Teilleistungen. Sie wird dadurch auch in ihrer inneren Einrichtung und ihrer äußeren Gestalt beeinflusst, sie bekommt *funktionelle Gestalt*, die sie für ihre Leistung geeigneter macht. Das ist das Wesentliche an der histologischen Differenzierung. Durch Spezialisierung werden im Zellenstaat wie im Menschenleben vollkommener Leistungen erzielt.

Der erste Schritt der Arbeitsteilung äußert sich morphologisch in der Bildung der Keimblätter. Die einfache Hohlkugelform von *Volvox* ist bei den Metazoen als Blastula eine vorübergehende Entwicklungsstufe. Durch Einwachsen eines Teiles der Hohlkugelwand entsteht, wie durch eine Ein-

stülpung, ein doppelwandiger Organismus, die Gastrula, mit Arbeitsteilung zwischen äußerem und innerem Keimblatt, wobei das äußere die Hauptmasse der Bewegungsleistungen, die Reizaufnahme und die Sauerstoffaufnahme, übernimmt, das innere die Nahrungsaufnahme. Die Zellen des äußeren Keimblatts geben Sauerstoff an die des inneren ab und erhalten von diesen Nährstoffe. Da die beiden Keimblätter dicht aneinander liegen, sind die Strecken für diese Stoffwanderung kurz. Die Exkretion besorgt jede Zelle für sich; jede grenzt ja unmittelbar an die Außenwelt und kann ihre Stoffwechselprodukte dorthin entleeren. Der Bauplan der Gastrula ist unverändert erhalten in dem Tierkreis der Coelenteraten. Diese einfachsten Metazoen haben also nur 2 Hauptorgane, die Haut und den Darm, der nur eine Öffnung nach außen hat. Ein überaus fruchtbares, die Tiere im Gegensatz zu den Pflanzen kennzeichnendes Prinzip kommt in diesem Bauplan zum ersten Male zur Anwendung, die Bildung innerer Oberflächen; es wird auch weiterhin immer aufs neue verwandt. Von den Protisten her ist bei den Coelenteraten die intracelluläre Verdauung beibehalten, die Aufnahme der Nahrungspartikel in das Innere der Darmzellen. Verdauungsfermente kommen nur bei Berührung größerer Nahrungstücke mit der Darmwand in jene hinein und bringen sie zum größeren Zerfall; in den Darmraum kommt kein Ferment, er ist noch ganz Außenwelt.

Im übrigen ist bei diesem Zellenstaat die Arbeitsteilung im einzelnen noch sehr gering. Die Muskelelemente sind noch nicht selbständige Bildungen, sondern Anhänge der Epithelzellen. In den Nesselzellen, die die mikroskopischen Waffen der Coelenteraten enthalten, sind nebeneinander drei verschiedene Organellen vorhanden, ein Sinnesorganell (das Cnidocil), Muskelorganellen und ein Drüsenorganell, die Kapsel selbst, Einrichtungen, die bei den höheren Metazoen auf drei verschiedene, miteinander zu einer funktionellen Einheit verbundene Zellsorten verteilt sein würden.

Neue Notwendigkeiten ergeben sich, wenn sich zwischen äußeres und inneres Keimblatt Zellmassen als mittleres Keimblatt trennen einschieben. Diese Zellen entspringen aus weitergehender Arbeitsteilung. Muskelelemente lösen sich aus dem Verbands der primären Keimblätter und vervielfältigen sich; Nervenzellen und Keimzellen sind in der Tiefe besser geschützt als in den oberflächlichen Epithelien. Die Festigkeit des Körpers wird dadurch vergrößert, seine Beweglichkeit vermehrt, seine Reaktionsfähigkeit durch Sonderung von peripherem und zentralem Nervensystem vervielfältigt. Aber die vegetativen Verhältnisse dieser mittleren Zellmassen, ihre Ernährung und Exkretion, stehen unter neuen Bedingungen. Die Zellen des mittleren Keimblatts grenzen nirgends an die Oberfläche; für die Beschaffung von Nahrung und Sauerstoff sind sie auf die Oberflächenzellen angewiesen. Jene Stoffe gelangen von den Aufnahmestellen, dem Darm-

epithel und dem Körperepithel, zu den Gebrauchsstellen auf dem Wege der Diffusion. So ist es ja auch bei den Coelenteraten; aber da liegen die Aufnahme- und Verbrauchsstellen dicht beieinander, die Diffusionsstrecken sind kurz. Bei den Tieren mit mittlerem Keimblatt sind sie voneinander durch Zellmassen getrennt. Diffusion ist aber ein überaus langsamer Vorgang. Um die Stoffwechselfvorgänge zu beschleunigen, gilt es daher, die Diffusionsstrecken nach Möglichkeit zu verkürzen.

Daraus ergibt sich die Erklärung für den Bau der Plattwürmer. Die Atmung geschieht durch die gesamte Oberfläche; die Abflachung des Wurmkörpers ermöglicht es, daß alle Binnenzellen nahe der Oberfläche liegen. Bei kleinen Würmern ist keine Stelle des Körpers weit von der Darmoberfläche entfernt, der Darm ist ein einfacher Schlauch. Wenn aber der Wurm größer ist, ist auch sein Darm ausgebreitet; er reicht vielfach verästelt durch den ganzen Körper und bringt die Nahrung bis in die fernsten Winkel, so daß keine Zelle weit von der Nahrungsquelle liegt. Die ernährungsbedürftigen Organe, besonders die Geschlechtsorgane, dehnen sich durch den ganzen Körper aus und halten sich in unmittelbarer Nähe des Darms. Bei kleinen Formen sind die Gonaden noch leidlich kompakte Scheiben; denn als kleine Körper haben sie an sich im Verhältnis zu ihrer Masse eine relativ große Oberfläche. Aber bei größeren Arten verästeln sich die Gonaden vielfach oder zersplintern in kleine Bläschen, so daß die nahrungsaufnehmende Oberfläche wirksam vermehrt wird. Eine besondere Einrichtung ist für die Exkretion durchgeführt. Diese sehr beweglichen Tiere haben einen starken Stoffwechsel; die Abfallprodukte des Stoffwechsels aber sind Gifte für den Körper, die bei langsamer Diffusion an den Nachbarzellen Unheil anrichten könnten; so ist hier eine neue innere Oberfläche geschaffen, ein System feiner, vielverzweigter Röhren, die sich durch den ganzen Körper erstrecken und mit ihren Endzellen, den Protonephridien, die Exkretstoffe aufnehmen und nach außen befördern. All das ermöglicht erst die Bildung des mittleren Keimblatts mit ihren Vorteilen.

So ist der Bauplan der Plattwürmer dem der Coelenteraten an Leistungsfähigkeit weit überlegen. Aber auf der anderen Seite sind ihm durch Mängel der Organisation gewisse Grenzen gesetzt. Der Körper muß dünn und flach sein — nur so ist die sauerstoffaufnehmende Oberfläche groß genug für die sauerstoffverbrauchende Zellmasse. Die Größenausdehnung eines solchen Körpers ist beschränkt; sonst droht die Gefahr der Zerreißen auf unebenem Untergrund. Auch die größten freilebenden Plattwürmer sind daher nur wenige Zentimeter lang und breit. Wo freilich entsprechender Schutz geboten ist, kann auch der Plathelminthenkörper bedeutende Ausdehnung erreichen; Bandwürmer werden bis 9 m lang.

Diese Schranken werden gebrochen durch eine neue Lösung des Diffusionsproblems mit der

„Erfindung“ des Blutkreislaufs. Nicht eine Körperflüssigkeit an sich ist etwas Neues, Befreiendes, sondern der Umtrieb dieser Flüssigkeit im Körper in bestimmten Bahnen mit Hilfe von Muskelkraft. Im System der Blutbahnen tritt die wirksamste Entfaltung innerer Oberflächen auf. Die „Blutgefäße“ dringen in alle Teile des Körpers ein, und ihr Inhalt, das Blut, wird zum Stoffwechselvermittler. Ein Stoff braucht nur eine kurze Strecke durch Diffusion zurückzulegen, um bis zum nächsten Blutgefäß zu gelangen; dort wird er vom Blut aufgenommen und durch den ganzen Körper geführt. Der Sauerstoff von der Hautoberfläche, die Nährstoffe von der Darmoberfläche werden so mit Beschleunigung zu den Verbrauchs- und Speicherstellen gebracht; die Exkretstoffe gelangen ebenfalls in das Blut und kommen so zu den besonderen Ausscheidungsstellen. Der Blutkreislauf befördert den Stoffaustausch um so mehr, je weiter seine Bahnen durch den Körper verbreitet sind und je reicher die Oberflächenentwicklung in ihnen ist. Ein solcher Blutkreislauf tritt zum ersten Male in einfacher Form bei den Schnurwürmern auf, um nirgends mehr zu fehlen. Und sofort sind die Beschränkungen, die der Diffusionsnot entspringen, gefallen. Die Würmer können dick und drehrund werden, sie erreichen Längen von 13 m und mehr; in ihrem Körper werden die Nephridien auf enge Stellen an einem Hauptblutgefäß lokalisiert. Diffus verteilt bleibt zunächst nur die Atmung. Sobald auch diese an beschränkte Stellen mit dünner Wandung und großer Oberfläche gebunden wird, sobald außen Kiemen oder im Körperinneren Tracheen oder Lungen auftreten, dann braucht die übrige Hautoberfläche nicht mehr durchlässig zu sein; es kann zur Bildung des Gehäuses bei Schnecken, des Hautpanzers bei Gliederfüßlern, der Hornschicht der Haut bei Wirbeltieren kommen; das sind die Schutzeinrichtungen gegen das Vertrocknen, die das Verlassen des heimatlichen Wassers und den Übergang zum Luftleben gestatten und damit zur Grundlage der gewaltigen Fortschritte werden, die mit dem Luftleben verknüpft sind. Bei Arthropoden wird außerdem der Panzer zum Bewegungs-skelett, das der Muskulatur feste Ansatzpunkte bietet und ihre Leistungen erst zu voller Wirksamkeit bringt. Die überlegene Organisation der Arthropoden, zu denen 4 Fünftel der bekannten Tierarten gehören, konnte erst entstehen, nachdem der Blutkreislauf „erfunden“ war — das wird auch dadurch nicht widerlegt, daß auf dem Höhepunkt ihrer Ausbildung die Tracheenatmung wieder vom Blut unabhängig wird.

Aber noch ein weiterer Fortschritt ist im Bauplan der Schnurwürmer verwirklicht. Der Darm, der bisher nur eine Öffnung nach außen hatte, die sowohl der Nahrungsaufnahme wie der Entleerung unverdaulicher Stoffe dient, bekommt eine zweite Öffnung am entgegengesetzten Ende: eine folgenreiche Neuerung, die „Erfindung“ des Afters. Der Fortschritt in der Ausnutzung der

Nahrung, der damit gegeben wird, ist leicht zu verstehen. Früher bildete die Füllung des Darmes eine Grenze für die Aufnahme neuer Nahrung, und wenn Raum dafür geschaffen wurde, dann lagen die am meisten ausgenutzten Nahrungsmassen am tiefsten, und mit ihnen mußten ungenügend verbrauchte entfernt werden; Aufnahme und Entleerung gingen in entgegengesetzter Richtung. Jetzt ist die Möglichkeit gegeben, daß ein einheitlicher Nahrungsstrom durch den ganzen Darm zieht; je mehr sich der Darminhalt dem After nähert, um so mehr sind ihm die wertvollen Stoffe entzogen, und die Entleerungen sind nährstofffrei. Zugleich ist damit freies Feld für eine andere Neuerung geschaffen. Bisher fand die Verdauung in den Zellen des Darmepithels intracellulär statt; jetzt werden verdauende Fermente in den Darmraum entleert, lösen dort die verdaulichen Stoffe auf, und diese werden resorbiert. Der Darm hat aufgehört, in dem Maße wie früher Außenwelt zu sein. Schließlich ist durch diesen gerichteten Nahrungsstrom die Grundlage für Lokalisation der Darmfunktionen gegeben, die freilich erst allmählich vollständig verwirklicht wird. Am Anfang des Darms wird die Vorbereitung der Nahrung lokalisiert; dort geschieht die Sekretion der Verdauungssäfte, die schließlich in der Hauptsache im Magen und in der Bauchspeicheldrüse stattfindet; im mittleren Teil des Darms spielt sich die Resorption ab, und der Endteil dient nur der Formung der Kotballen.

Aber noch sind bei den Schnurwürmern die Bedingungen für eine solche Arbeitsteilung nicht ganz erfüllt. Der Darm ist in das Körperparenchym eingebettet und wird durch die Kontraktionen der Muskulatur bei der Lokomotion in Mitleidenschaft gezogen; andererseits ist er auf diese selbe Muskulatur für die Beförderung der Nahrungsmassen angewiesen. Er hat noch keine Unabhängigkeit und Selbständigkeit im Körper erreicht; ihm fehlt noch die Eigenmuskulatur zur planmäßigen Beförderung seines Inhalts durch Peristaltik. Diese Unabhängigkeit bekommt der Darm durch die „Erfindung“ der Leibeshöhle. Schon bei den Schnurwürmern liegen zu beiden Seiten des Darms Hohlräume reihenweise angeordnet, die Binnenräume der in regelmäßigen Abständen wiederkehrenden Gonaden, der Eierstöcke bzw. Hoden. Diese Hohlräume erweitern sich, die einander entsprechenden Paarlinge über und unter dem Darm verschmelzen miteinander, die hintereinandergelegenen Höhlen verdrängen das trennende Parenchym bis auf dünne Muskelscheidewände; so kommt es zur Bildung einer gekammerten Leibeshöhle, die Darm und Bauchmark umgreift und in deren Epithelauskleidung das Keimepithel liegt. Das ist der Fall bei den Ringelwürmern. Wenn dann im Laufe der Entwicklung die Leibeshöhle einheitlich wird durch Verschwinden der Septa (wie schon bei Sipunculoiden und vor allem bei Arthropoden), dann ist auch die Möglichkeit gegeben, den Darm durch

Schlingenbildung über Körperlänge zu verlängern, damit seine resorbierende Fläche sehr wirksam zu vergrößern und die Grundlage für äußerste Ausnutzung der Nahrung zu erreichen. Auf solchem Standpunkt sind die Insekten und — vielleicht auf anderem Wege — die Wirbeltiere angelangt.

Die letzte Steigerung, durch die eine weitere Intensivierung der Ernährung möglich wird, ist die mechanische Vorbereitung der Nährstoffe durch Zertrümmerung, die „Erfindung“ des Kauens. Diesen Fortschritt finden wir nur bei den Arthropoden einerseits, bei den Vögeln und Säugetieren andererseits. Ganz wenige andere Tierformen haben Andeutungen davon; sie können Muscheln knacken oder raschelnd Bruchstücke der Nahrung abkratzen; ein richtiges Kauen haben wir nur bei den Genannten. Hier geschieht es auf dreierlei Weise: Die Arthropoden kauen mit ihren Vorderkiefern, einem umgewandelten Beinpaar. Die Vögel kauen, soweit sie Pflanzenfresser sind, mit ihrem Muskelmagen, dessen Wirkung sie durch aufgenommene Mahlsteine erhöhen. Die Säuger kauen mit den Kiefern, die eine besonders ausgebildete Zahnbewaffnung tragen; andere Wirbeltiere haben Fangzähne, die durch Lücken getrennt sind; bei den Säugern schließen sich Zähne gleicher Art lückenlos zu höheren Einheiten zusammen, die als Klingen, Feilen, Quetschen in den Dienst der Nahrungszertrümmerung treten. Die Folgen dieser Neuerung sind sehr weitgehend. Der nächste Fortschritt ist die Erweiterung des Speisezettels; das Kauen ermöglicht die volle Ausnutzung der pflanzlichen Nahrung. Nur sehr selten wird bei Metazoen ein Ferment angetroffen, das Zellstoff löst. In den Zellen der höheren Pflanzen sind das Protoplasma und die ihm eingelagerten Kohlehydrate und Fette von einer Cellulosemembran umschlossen, und das Eindringen der Verdauungsfermente wird dadurch sehr verzögert. Wenn aber diese Membranen mechanisch gesprengt werden, wenn das kompakte pflanzliche Parenchym zu einer mehligten Masse mit großer Oberfläche zermahlen wird, dann gehen die Verdauungsprozesse schnell und gründlich voran. So ist eine gewaltige Nahrungsquelle der Ausbeutung erschlossen worden; die Pflanzenfresser gedeihen und bilden ihrerseits die Grundlage für die Existenz der Tierfresser.

Die schnelle Verarbeitung der so vorbereiteten Nahrung ermöglicht bei überschüssig vorhandenem Nahrungsvorrat eine beschleunigte Energieproduktion in der Zeiteinheit, die hinausgeht über die für Ortsbewegung, Nervenleitung und andere Betriebserfordernisse notwendigen Ausgaben. Das ist die Vorbedingung dafür, daß ein Teil der Energie dem Tierkörper als Wärme zugeführt wird. Die Eigenwärme wiederum beschleunigt die Ausnutzung der Nahrung, da die Geschwindigkeit des Reaktionsablaufs bei der Verdauung nach dem VAN'T HOFFSchen Gesetz mit einer Temperaturzunahme von 10° auf das Doppelte bis Dreifache steigt. Dieser Circulus ist es, auf dem die Eigen-

wärme bei Vögeln und Säugern beruht (L. DOEDERLEIN). Aber nur Lufttiere konnten eigenwarm werden, weil Luft die Wärme schlecht leitet. Wasser als guter Wärmeleiter würde dem Körper zuviel Wärme entziehen (erst sekundär konnten eigenwarme Tiere, durch Speckpolster thermisch isoliert, ins Wasser gehen). Durch die Eigenwärme wurde das Tier in weitem Maße von Temperaturerniedrigung in der Umgebung unabhängig und instand gesetzt, beständig seine volle Lebensintensität zu entfalten. Bei Nacht und im Winter, wo wechselwarme Lufttiere wie Frösche, Reptilien und Wirbellose in Starre liegen und ihrer Selbst- und Arterhaltung nicht nachgehen können, ist das eigenwarme Tier unbehindert, wenn es nur genug Nahrung, d. h. Heizstoff, hat. Ein Fink, der 20 Jahre alt wird, lebt viel mehr als eine Schlange oder ein Laubfrosch, die ebenso alt werden.

Aber diese Unabhängigkeit hat ihre Kehrseite; sie wird erkauft durch Abhängigkeit von reichlicher Nahrung. Das eigenwarme Tier ist von der Nahrung viel mehr abhängig als das wechselwarme. Insekten, Frösche, Schlangen können monatelang hungern; für Eigenwarme ist Hunger schnell tödlich. Nur solche, die zeitweise wieder in den wechselwarmen Zustand übergehen können, die Winterschläfer wie Murmeltier, Siebenschläfer, Fledermäuse, können länger ohne Nahrungsaufnahme bleiben. Aber ihre Gesamtleistung ist um das vermindert, ihre Lebensfülle ist geringer als bei anderen.

Wenn also das Kauen die Unterlage für die Eigenwärme bei Lufttieren ist, weshalb sind dann die kauenden Insekten nicht ebenfalls eigenwarm? Durch Bewegung können sie Wärme produzieren; man fühlt an einem frisch vom Flug gefangenen Schwärmer, wenn man ihn in der Hand hält, daß er wärmer ist als die umgebende Luft. Ja, viele im Frühjahr fliegende Insekten wie Hummelfliegen (*Bombylius*), Pelzbienen, Hummeln sind behaart und können durch die isolierende Luftschicht im Pelz die Bewegungswärme länger zusammenhalten; gerade diese Einrichtung ermöglicht es den Hummeln, hoch ins Gebirge und weit nach Norden zu gehen. Aber Eigenwärme kann sich hier nicht halten wegen der im Verhältnis zur Masse übergroßen Oberfläche. Eine Honigbiene von 0,1 g Gewicht hat eine Oberfläche von 1,98 qcm. Nach RUBNERS Versuchen produziert ein eigenwarmes Tier (Hund) auf 1 qm seiner Oberfläche in bestimmter Zeit eine konstante Wärmemenge, etwa 1200 Calorien, mag es groß oder klein sein. Das kleine Tier mit seiner relativ größeren Oberfläche muß also mehr Wärme produzieren im Verhältnis zu seiner Masse als das große; bei einem großen Hund von 20 kg Gewicht kommen auf 1 kg Masse 45 Calorien. Eine Biene müßte unter gleichen Bedingungen 2376 Calorien auf 1 kg Masse produzieren, um ihre Eigenwärme konstant zu halten. Eine so ungeheure Leistung ist nicht möglich. Die geringe Körpergröße der Insekten aber wird erzwungen durch das Außenskelett;

dieses müßte, um die nötige Festigkeit zu besitzen, für größere Tiere so enorm schwer werden, daß ihre motorische Kraft dafür nicht ausreicht (LEUCKART).

Und trotzdem gibt es ein Insekt, das zeitweilig eigenwarm ist, das ist die Biene — aber nicht die Einzelbiene ist eigenwarm, sondern „der Bien“, wie der westfälische Imker das ganze Volk bezeichnet. Nur im Stock sind sie eigenwarm; sie heizen ihre Wohnung. Im Winter, wenn im Stock die Temperatur unter 13° sinkt, setzen sie die Heizung in Gang. Sie hängen als dichter Haufen mit geringer Oberfläche, als Traube, an der Decke des Stockes. Wenn die Traube ganz auf 13° abgekühlt ist, werden die Bienen unruhig, die Traube lockert sich, sie bewegen sich und nehmen aus ihren Vorräten Nahrung auf, und in Zeit von 1 Stunde hebt sich die Temperatur auf 25°, und die Traube setzt sich wieder an. Die zu äußerst sitzenden „Hautbienen“, radiär mit dem Kopf nach innen orientiert, kriechen, wenn sie abgekühlt sind, ins Innere der Traube, und andere kommen an ihre Stelle und so fort, bis die Traube wieder auf 13° durchkühlt ist; das dauert etwa 22 Stunden; dann setzt ein neuer Heizsprung ein. Völlig gleichwarm aber ist der Stock im Frühjahr zur Brutzeit; die Bienen halten dann die Temperatur auf beständig 34—35°, ganz unabhängig von der Außentemperatur. Auch hier, wie bei den eigenwarmen Wirbeltieren, ist ständige Versorgung mit Nahrung die Grundbedingung für die Wärmerzeugung. Nahrungsvorräte für erwachsene Tiere, wodurch die Biene und manche Ameisen vor anderen Insekten ausgezeichnet sind, finden so ihre Erklärung im Zusammenhang des Bienendaseins.

Solche Reihen von Vervollkommnungen in den Funktionen, wie hier für den Stoffwechsel eine vorgeführt wurde, lassen sich auch für das Nervensystem und für den Bewegungsapparat aufstellen. Bei jenem ist es die zunehmende Zentralisierung und Staffelnung (Überordnung), bei diesem die Entwicklung eines (äußeren oder inneren) Bewegungsskeletts als Ansatz für die Muskeln, was den Fortschritt bedingt. Aber die Reihenfolge der Tierformen in den verschiedenen Reihen ist nicht gleich; die Reihen verlaufen nicht parallel; sie überkreuzen sich vielfach. So kommt es, daß sich nicht irgendeine Tierform als die vollkommenste bezeichnen läßt; die einen erreichen in dieser, die anderen in jener Hinsicht den Gipfel der Ausbildung. So ist auch der Mensch nicht etwa ein Ausbund aller Vollkommenheiten; in vielen Leistungen wird er von anderen Tieren übertroffen. Aber er ist Großhirnspezialist, und dieser Steigerung seiner nervösen Leistungen verdankt er seine Erfolge im Kampf ums Dasein. Mag ihn der Adler in der Schärfe des Sehens, der Fisch im Schwimmen und Tauchen, das Pferd in der Geschwindigkeit des Laufs, der Vogel im Flug übertreffen, er baut seine Fernrohre, seine Schiffe und Unterseeboote, seine Autos, seine Flugzeuge und gewinnt; er sieht, schwimmt, taucht, rennt und fliegt — mit dem Großhirn.

Flüssige Sterne.

Von JOHANNES PICHT, Berlin-Potsdam.

Flüssige Sterne! Unter dieser Überschrift erschienen in jüngster Zeit in den Monthly Notices verschiedene Arbeiten¹ des bekannten englischen Mathematikers und Astrophysikers J. H. JEANS, in denen er im Anschluß an früher von ihm veröffentlichte Arbeiten² zu zeigen sucht, daß man die Sterne oder doch wenigstens die weitaus größte Zahl der Sterne in ihrem Inneren nicht — wie bisher stets geschehen — als ideal gasförmig, sondern als flüssig bzw. halbflüssig betrachten muß. Nachfolgend soll über diese Arbeiten, die auch den Hauptinhalt der Kapitel IV und V des Buches „Astronomy and Cosmogony“ bilden, zusammenfassend berichtet werden. Wir wollen indessen gleich vorausschicken, daß die Überlegungen, die JEANS anstellt, oft sehr hypothetisch und zweifelhaft sind, so daß wir dem Endergebnis — so genial und befriedigend es auch zu sein scheint — vorläufig nicht allzu viel Bedeutung beimessen dürfen. Doch gerade dies ist Grund und Rechtfertigung dafür, über diese JEANSSchen Arbeiten hier kritisch zu berichten, da bei der großen Bedeutung und der Autorität von JEANS die Gefahr nur zu nahe liegt, daß seine Folgerungen und Ergebnisse als der Wirklichkeit entsprechende Tatsachen anerkannt werden, zumal es für viele schon zeitlich nicht möglich sein wird, die Originalarbeiten in allen Einzelheiten kritisch zu verfolgen. Wir werden trotz der großen Bedenken, die wir oft gegen die einzelnen Schritte, Folgerungen oder Begründungen haben, und auf die wir jeweils hinweisen werden, bei unserer Berichterstattung doch immer wieder dem Gang der Originalarbeiten folgen.

I. Stabilitätsbetrachtungen für gasförmige Sterne.

(Warum gasförmige Sterne nicht stabil sind.)

Um zu zeigen, daß die bisherige Annahme eines in seinem Inneren idealgasförmigen Sternes nicht berechtigt ist, untersucht JEANS zunächst, ob ein gasförmiger Stern gegenüber kleinen Störungen hinreichend stabil ist, um existieren zu können. Zu diesem Zwecke setzt er voraus, daß der Stern Kugelgestalt besitzt und auch Kugelgestalt behält, wenn er sich ausdehnt oder zusammenzieht, und daß überdies im ganzen Innern des Sternes Kugelsymmetrie herrscht, so daß Temperatur T und Dichte ϱ nur Funktionen von r , der Entfernung vom Kugelmittelpunkt, sind, also von der Richtung als unabhängig angenommen werden. Unter diesen Annahmen lassen sich folgende Gleichungen aufstellen:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{1}{\varrho} \frac{d}{dr} \left(p_G + \frac{1}{3} a T^4 \right) - \gamma \frac{M_r}{r^2} \quad (1)$$

$$\varrho C_v \frac{dT}{dt} - \left(p_G + \frac{4}{3} a T^4 \right) \frac{1}{\varrho} \frac{d\varrho}{dt} = \varrho G - \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 H). \quad (2)$$

¹ Monthly Notices 87, 400–414 (1927); 87, 720 bis 739 (1927); s. a. J. H. JEANS, Astronomy and Cosmogony. Cambridge 1928.

² Monthly Notices 85, 914–933 (1925).

Ersetzen wir in beiden Gleichungen die linken Seiten durch Null, so stellt die erste von ihnen die Bedingung für mechano-dynamisches, die zweite die Bedingung für thermo-dynamisches Gleichgewicht dar. Die neu auftretenden Größen haben folgende Bedeutung: p_G bezeichnet den Gasdruck, a die universelle (STEFANSche) Gaskonstante vom Betrage $7,64 \cdot 10^{-15}$ erg cm⁻³ grad⁻⁴ (oder: g cm⁻¹ sec⁻² grad⁻⁴, da ja erg = g cm⁺² sec⁻²), so daß

also $a T^4$ die Strahlungsenergie pro cm³ und $\frac{1}{3} a T^4$

den Strahlungsdruck p_R darstellt. γ ist die Gravitationskonstante (= $6,66 \cdot 10^{-8}$ g⁻¹ cm³ sec⁻²), M_r diejenige Teilmasse des Sternes, die sich innerhalb der Entfernung r von seinem Mittelpunkt befindet. C_v ist die volumkonstante spezifische Wärme pro Masseneinheit von Materie und Strahlung gemeinsam und hat die Dimension erg g⁻¹ grad⁻¹, stellt also die Wärmemenge dar, die notwendig ist, um die Masseneinheit um 1° zu erwärmen, wenn das Volumen der Masseneinheit konstant gehalten wird. Hierbei ist auch der Strahlung eine gewisse Masse zugeordnet, nämlich

eine Masse vom Betrage $\frac{a T^4}{c^2}$, wo c die Lichtgeschwindigkeit, also die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Strahlung bezeichnet. H ist der Betrag der nach außen fließenden Strahlungsenergie pro Flächeneinheit und Zeiteinheit. Da ein Stern dauernd große Mengen von Energie in den interstellaren Raum hinaus ausstrahlt, ohne dabei sichtlich seine Temperatur zu ändern, so muß angenommen werden, daß im Innern des Sternes dauernd neue Strahlungsenergie erzeugt wird, etwa durch Umwandlung von Materie in Strahlung. Es sei vorläufig noch offen gelassen, auf welche Art diese Energieerzeugung vor sich geht. Ihr Betrag pro Masseneinheit und Zeiteinheit sei G . Die Dimension von G ist erg g⁻¹ sec⁻¹, die von H dagegen erg cm⁻² sec⁻¹. Die erste der beiden angegebenen Gleichungen sagt aus, daß auf die im Abstande r vom Kugelmittelpunkt vorhandene Masseneinheit ϱv (= 1 g; v ist also das von der Masseneinheit eingenommene Volumen, und — abgesehen von der Dimension — gleich der reziproken Dichte) eine

Kraft K wirkt, die sich aus 3 Anteilen $v \frac{d}{dr} p_G$, $v \frac{d}{dr} p_R$, $\gamma \frac{M_r \varrho v}{r^2}$ zusammensetzt, von denen

die beiden ersten nach außen, der dritte nach innen, d. h. zum Sternmittelpunkt hin gerichtet ist. Dieser dritte Anteil ist die Gravitationskraft auf die Masseneinheit ϱv , herrührend von denjenigen Teilen des Sternes, deren Entfernung vom Kugelmittelpunkt $\leq r$ ist. Der erste Kraftanteil rührt vom Gasdruck, der zweite vom Strahlungsdruck her¹. Heben sich die 3 Anteile gegenseitig auf,

¹ Ein vierter Kraftanteil — die von der Rotation des Sternes herrührende Zentrifugalkraft, die gleichfalls

so ist Gleichgewicht vorhanden, andernfalls erfährt die Masseneinheit eine Beschleunigung

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{K}{\rho v}.$$

Die zweite Gleichung sagt aus, daß der Überschuß der in der Zeit dt von der Masseneinheit ρv erzeugten Energie $\rho v G dt$ über die Energie

$$v \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 H) dt,$$

die in der Zeit dt durch Ausstrahlung aus dem von der Masseneinheit eingenommenen Volumen v diesem verloren geht, dazu verwandt wird, die Temperatur zu erhöhen und das Volumen zu vergrößern. Hierbei ändert sich die innere Energie der Strahlung und des Gases. Außerdem ist bei der Volumenvergrößerung eine Arbeit gegen den von außen auf das Volumen wirkenden Druck zu leisten. Die zur Bestreitung dieser Arbeit benötigte Energie ist $(p_g + p_R) dv$. Nun ist mit einer Volumvergrößerung bei Konstanthaltung der Masse eine Dichteabnahme verbunden, so daß wir (— da $\rho v = \text{const} (= 1)$ ist —) dv ersetzen können durch $-v \frac{d\rho}{\rho}$. Die zur Überwindung des äußeren Druckes aufgewandte Energie wird demnach $-(p_g + \frac{1}{3} a T^4) v \frac{d\rho}{\rho}$. Um die Änderung der inneren Energie von Materie und Strahlung zu berechnen, können wir Temperatur- und Volumänderung in zwei getrennten Schritten vorgenommen denken, wobei dann jeweils die eine der beiden Größen als konstant zu betrachten ist. Da die innere Energie eines idealen Gases nur von der Temperatur abhängt, vom Volumen also unabhängig ist, so ist mit der temperaturkonstanten Volumänderung nur eine Änderung der inneren Energie $a T^4 v$ der Strahlung um den Betrag $a T^4 dv$ verbunden, wofür wir — s. o. — auch schreiben dürfen $-a T^4 v \frac{d\rho}{\rho}$. Bei der volumkonstanten Temperaturänderung ändert sich die innere Energie der Strahlung und des Gases zusammen um den Betrag $C_v \rho v dT$, da ja C_v die spezifische Wärme von Gas + Strahlung war. Fassen wir diese drei Beträge zusammen, so erhalten wir die pro Masseneinheit verbrauchte Energie, die gleich ist dem oben angegebenen Überschuß

$$\left[\rho v G - v \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 H) \right] dt,$$

der in der Zeit dt erzeugt über die in dieser Zeit ausgestrahlte Energie, also die zweite der beiden Gleichungen.

Unter gewissen vereinfachenden Annahmen lassen sich diese Gleichungen nun weiter behandeln. JEANS macht folgende Voraussetzungen: Der Stern befinde sich zunächst in einem Gleichgewichtszustand. Irgendeine Störung möge ihn aus diesem der Gravitationskraft entgegenwirkt — ist bei JEANS vernachlässigt.

Gleichgewichtszustand herausbringen, ihn also in einen gestörten Zustand überführen, wobei angenommen werde, daß die Störung sich sehr schnell durch das ganze Sterninnere hindurch ausbreitet oder — anders formuliert — im ganzen Sterninnern nahezu gleichzeitig einsetzt. Dies ist z. B. verwirklicht, wenn die Störung durch Atomzerfall oder durch erhöhte Ausstrahlung, an der alle Massenteilchen in relativ gleicher Weise beteiligt sein werden, veranlaßt wird.

Es werden weiter noch zwei Annahmen gemacht, von denen die eine die Dichteverteilung, die andere die Temperaturverteilung im Sterninnern als Funktion des Abstandes r vom Sternmittelpunkt betrifft. Es wird angenommen, daß das von der Masseneinheit eingenommene Volumen v proportional ist der dritten Potenz von r , also $v = \text{const } r^3$. Dem entspricht dann — wegen $\rho v = 1$ — sofort

$$\rho = \text{const } r^{-3}.$$

Hinsichtlich der Temperatur T wird vorausgesetzt, daß ihre Änderung beim Fortschreiten längs r proportional ist dem Quotienten aus T und r selbst,

$$\text{also} \quad \frac{dT}{dr} = \text{const } \frac{T}{r}.$$

Dies ist gleichbedeutend mit

$$T = \text{const } r^{\text{const}}.$$

Es sei darauf hingewiesen, daß beide Annahmen einen ganz bestimmten Sternaufbau voraussetzen, der in keiner Hinsicht vor anderen gleichfalls möglichen Arten des Sternaufbaues eine Vorberechtigung hat. Die Ergebnisse, zu denen JEANS gelangt, können demnach nach Ansicht des Referenten auch nur Gültigkeit beanspruchen für einen entsprechend aufgebauten Stern. Sie ohne besondere Prüfung zu verallgemeinern, ist weder berechtigt noch erlaubt.

Würde der Stern sich vollkommen wie ein ideales Gas verhalten, so würde die bekannte Gasgleichung gelten $p_g = \frac{\mathfrak{R}}{\mu} \rho T$, wo $\mathfrak{R} = 8,26 \cdot 10^7$ $\text{cm}^2 \text{sec}^{-2} \text{grad}^{-1}$ die absolute Gaskonstante, bezogen auf ein Gas vom Molekulargewicht 1, und μ das mittlere Molekulargewicht des betr. Gases bedeutet; μ ist eine reine Zahl. Um jedoch auch Abweichungen vom idealen Gasgesetz in die Untersuchungen mit einzubeziehen, setzt JEANS den Gasdruck p_g proportional zu $\rho^{1+s} T$, also

$$p_g = \text{const } \rho^{1+s} T.$$

Hier ist zu bemerken, daß durch diesen Ansatz nur eine bestimmte Abweichung vom idealen Gasgesetz erfaßt wird. Außerdem gilt bei Abweichungen vom idealen Gasgesetz die zweite der Grundgleichungen nicht mehr streng, da bei temperaturkonstanten Volumänderungen die innere Energie nichtidealer Gase nicht mehr — wie oben angenommen — unverändert bleibt.

Das Verhältnis des Gasdruckes zum Strahlungsdruck im Gleichgewichtszustand sei durch λ bezeichnet, wobei zunächst λ noch eine Funktion

von r sein kann. Der Wert der einzelnen Variablen im Gleichgewichtszustand sei durch den Index 0, im gestörten Zustand durch den Index', der Unterschied beider Werte durch ein vorgesetztes Δ gekennzeichnet, so daß z. B.

$$r' = r_0 + \Delta r; T' = T_0 + \Delta T.$$

Die Art der JEANSSchen Berechnung beruht nun darauf, daß er für die gestörten Werte der Variablen gleichfalls wie für die ungestörten Werte die Gültigkeit der oben angegebenen Annahmen voraussetzt, so daß also die ursprünglich an der Stelle r_0 befindliche Masse der Dichte $\rho_0 = \text{const}_1 r_0^{-3}$ und der Temperatur $T_0 = \text{const}_2 r_0^{\text{const}_3}$ durch die Störung an die Stelle r' gebracht, dort die Dichte $\rho' = \text{const}_1 r'^{-3}$ und die Temperatur $T' = \text{const}_2 r'^{\text{const}_3}$ hat.

Denn nur dann lassen sich die von JEANS benutzten Dimensionsrechnungen durchführen. Nach Ansicht des Referenten sind aber diese Gültigkeitsvoraussetzungen nicht nur nicht berechtigt, sondern für das vorliegende Problem sogar falsch. Denn sie schließen ja die Voraussetzung in sich ein, daß der Stern unendlich ausgedehnt ist und im Mittelpunkt die Dichte ∞ sowie den Druck ∞ besitzt.

Setzen wir indessen die JEANSSche Annahme bzw. Rechenart als annähernd richtig voraus, so ergibt sich unter Berücksichtigung, daß der ungestörte Zustand ein Gleichgewichtszustand sein sollte, für den gestörten Zustand die Beziehung

$$\frac{d^2 r'}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2} (\Delta r) = \frac{\gamma M_r}{r_0^2} \left[\frac{\lambda + 4}{\lambda + 1} \frac{\Delta T}{T_0} + \frac{\lambda + 4 - 3s\lambda}{\lambda + 1} \frac{\Delta r}{r_0} \right]. \quad (3)$$

Fordern wir, daß auch der gestörte Zustand ein mechano-dynamischer Gleichgewichtszustand sein soll, so muß $\frac{d^2 r'}{dt^2} = 0$ sein, d. h. die auf der rechten Seite stehende eckige Klammer muß verschwinden:

$$\frac{\Delta T}{T_0} = - \frac{\lambda + 4 - 3s\lambda}{\lambda + 4} \frac{\Delta r}{r_0} \quad (3^*)$$

Für ideale Gase, für die ja $s = 0$ ist, besagt dies (bei $\lambda = f(r, T)$), wo f eine beliebige Funktion bezeichnet), daß

$$\frac{\Delta T}{T_0} = - \frac{\Delta r}{r_0} \quad \text{d. h.} \quad rT = \text{const} \quad (4a)$$

sein muß. Es ergibt sich also so das bekannte LANESche Gesetz. Ist dagegen $s \neq 0$ (Abweichung vom idealen Gaszustand), so müssen wir, um (3*) integrieren zu können, über λ eine bestimmte Annahme machen. Setzen wir mit JEANS λ durch das ganze Sterninnere als konstant voraus, so ergibt sich als Bedingung dafür, daß der gestörte Zustand wieder ein Gleichgewichtszustand ist, die Beziehung

$$\frac{\Delta T}{T_0} = - \left(1 - \frac{3s\lambda}{\lambda + 4} \right) \frac{\Delta r}{r_0} \quad (4b)$$

d. h. $r^{1 - \frac{3s\lambda}{\lambda + 4}} T = \text{const.}$

Rein formal ist dies mit der den Ableitungen zugrunde liegenden Annahme $T = \text{const } r^{\text{const}}$ verträglich. Beachtet man aber den Wert des Exponenten von r , so erkennt man leicht, daß (4b) mit den zugrunde liegenden Annahmen nicht verträglich ist. Da JEANS an späterer Stelle von dieser Beziehung (4b) Gebrauch macht, so sei der Widerspruch etwas genauer aufgezeigt. Bezeichnen wir in der Ansatzgleichung $T = \text{const } r^{\text{const}}$ den konstanten Exponenten vorübergehend durch c , so ergibt sich aus den Annahmen über ρ , T und p_g unter Hinzuziehung der Gleichung

$$p_g = \frac{1}{3} a T^3 \quad \text{für} \quad \lambda = \frac{p_g}{p_R} \\ \lambda = \text{const } r^{-3(1+s+c)}.$$

Damit — wie oben für $s \neq 0$ vorausgesetzt — $\lambda = \text{const}$, muß $c = -(1+s)$, d. h.

$$r^{1+s} T = \text{const}. \quad (5)$$

Betrachten wir indessen λ nicht als konstant, sondern als Funktion von r , so läßt sich aus (3*) nicht (4b) folgern.

Die Aussage (5) ist mit (4b) nur verträglich, wenn entweder $s = 0$ oder $\lambda = -1$ ist. Für $s = 0$ erhalten wir das LANESche Gesetz und die Gültigkeit der idealen Gasgesetze. Die Aussage $\lambda = -1$ würde bedeuten, daß Strahlungsdruck und Gasdruck vom gleichen Betrage aber entgegengesetzter Richtung sind. Dies ist physikalisch sinnlos, da es ein Verschwinden der Gravitationskraft voraussetzen würde.

Die Beziehung (3) ist — Gültigkeit der zu ihr führenden Annahmen vorausgesetzt — eine notwendige aber nicht hinreichende Bedingung für die Stabilität eines Sternes, da die zweite Grundgleichung, die die thermo-dynamischen Beziehungen zum Ausdruck bringt, bisher nicht berücksichtigt wurde. Um diese zweite Grundgleichung weiter behandeln zu können, müssen noch einige Annahmen gemacht werden. Für die Energieerzeugung pro Zeit- und Masseneinheit setzt JEANS

$$G = \text{const } \rho^\alpha T^\beta,$$

wo α und β konstant sind. Ändert sich (— wie oben —) $\rho = \rho_0$ um $\Delta \rho$ in ρ' und $T = T_0$ um ΔT in T' , so wird sich $G = G_0$ um ΔG in G' ändern, wo

$$\frac{\Delta G}{G_0} = \alpha \frac{\Delta \rho}{\rho_0} + \beta \frac{\Delta T}{T_0} = -3\alpha \frac{\Delta r}{r_0} + \beta \frac{\Delta T}{T_0}. \quad (6)$$

Der Energietransport, d. h. die Ausstrahlung H pro Zeit- und Flächeneinheit, muß proportional dem Gradienten der inneren Energie der Strahlung, also proportional zu

$$\frac{d}{dr} (a T^4) = 4 a T^3 \frac{dT}{dr},$$

und umgekehrt proportional dem Produkt aus dem Absorptionskoeffizienten k und der Dichte der durchstrahlten Materie sein. Der Absorptionskoeffizient k ist dadurch bestimmt, daß eine Strahlungsintensität J nach Durchlaufen eines Weges x

in Materie der Dichte ρ gesunken ist auf den Betrag $J' = J e^{-k \rho x}$. Wir erhalten so

$$H = \text{const} \frac{T^3 dT}{k \rho dr}.$$

Den Absorptionskoeffizienten k nimmt JEANS als proportional zu $\frac{\rho}{T^{3+n}}$, wobei er sich an eine Formel von KRAMERS anlehnt, die dieser für die Absorption der Röntgenstrahlen in Materie aufgestellt hat, und die JEANS näherungsweise für die Strahlungsvorgänge im Sterninnern übernehmen zu können glaubt, da beide nahezu gleiche Wellenlänge haben. Nach der KRAMERSschen Formel müßte n den Wert 0,5 haben. Führen wir für k den angeschriebenen Wert in den Ausdruck für H ein, so wird

$$H = \text{const} \left(\frac{T^3}{\rho}\right)^2 \frac{dT}{dr} T^n. \quad (7)$$

Unter Berücksichtigung, daß der Ausgangszustand ein Gleichgewichtszustand war, ergibt sich mit den angegebenen Ausdrücken für G und H sowie den bereits oben eingeführten Annahmen über ρ und T aus der thermo-dynamischen Grundgleichung (2):

$$\begin{aligned} C_v \frac{dT'}{dt} + (3p'_0 + 4aT'^4) \frac{1}{r' \rho'} \frac{dr'}{dt} &= \\ = C_v \frac{d(\Delta T)}{dt} + (3p_{00} + 4aT_0^4) \frac{1}{r_0 \rho_0} \frac{d(\Delta r)}{dt} &= \\ = G_0 \left[(\beta - 7 - n) \frac{\Delta T}{T_0} - (3\alpha + 7) \frac{\Delta r}{r_0} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Damit auch der gestörte Zustand ein thermodynamischer Gleichgewichtszustand ist, muß der in der eckigen Klammer stehende Ausdruck verschwinden:

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{3\alpha + 7}{\beta - 7 - n} \frac{\Delta r}{r_0}. \quad (8^*)$$

Dies gibt:

$$\begin{aligned} r \frac{3\alpha + 7}{\beta - 7 - n} T &= \text{const} \\ \text{oder:} \quad r \frac{3\alpha + \beta - n}{\beta - 7 - n} T &= \text{const}. \end{aligned} \quad (9)$$

Für $s = 0$ (idealer Gaszustand) lautete die mechano-dynamische Gleichgewichtsbedingung des gestörten Zustandes:

$$rT = \text{const}. \quad (4a)$$

Die Bedingungen (9) und (4a) sind miteinander identisch, wenn $3\alpha + \beta - n = 0$, d. h. $3\alpha + \beta = n \approx 0,5$ (und $\beta \neq 7 + n$). Für $s \neq 0$ hatten wir bereits oben gesehen, daß (4b) im Widerspruch zu den Annahmen steht, daß also der gestörte Zustand bei Gültigkeit der Annahmen nicht selbst wieder ein Gleichgewichtszustand sein kann.

Um die Stabilität des Sternes zu sichern, ist es indessen nicht unbedingt erforderlich, daß der gestörte Zustand selbst wieder ein Gleichgewichtszustand ist. Es genügt vielmehr, daß der gestörte

Zustand eine solche Abweichung vom Gleichgewichtszustand darstellt, daß die hierdurch verursachte innere Bewegung des Sternes ihn in einen neuen Gleichgewichtszustand überführt. Um die diesbezügliche Bedingungsungleichung aufzustellen, haben wir mit JEANS und VOGT¹ aus (3) und (8) ΔT zu eliminieren. Wir erhalten so für Δr eine Gleichung der Form

$$\frac{d^3}{dt^3}(\Delta r) + B \frac{d^2}{dt^2}(\Delta r) + C \frac{d}{dt}(\Delta r) + D \Delta r = 0. \quad (10)$$

Hier bezeichnen B, C, D von Δr unabhängige Koeffizienten. Die Gleichung führt für Δr zu zeitlich veränderlichen Lösungen, deren Zeitfaktor die Form $e^{\nu t}$ hat, wo ν der entsprechenden Gleichung genügt

$$\nu^3 + B\nu^2 + C\nu + D = 0. \quad (11)$$

Damit die Stabilität des Sternes gewährleistet ist, muß bei reellem ν die Größe ν selbst, bei komplexem ν der Realteil von ν negativ (oder Null) sein. Denn das heißt ja, daß die durch $e^{\nu t}$ angegebene Bewegung bzw. Schwingung mit wachsender Zeit abnimmt (oder doch wenigstens nicht zunimmt). Fordert man mit JEANS, daß alle drei aus (11) ergebenden Werte von ν negativen Realteil haben, so ist die hierfür notwendige und hinreichende Bedingung, daß $BC > D > 0$.

Nach Ansicht des Referenten ist indessen die von JEANS zugrunde gelegte Forderung wohl hinreichend, nicht aber notwendig für die Stabilität des Sternes. Es genügt vielmehr, daß wenigstens ein sich aus (11) ergebender Wert von ν negativen Realteil hat, oder — anders formuliert — daß nicht alle drei ν -Werte positiven Realteil besitzen, damit ein Stern stabil sein kann. Natürlich ist die Stabilität hierdurch nicht gesichert, sondern nur als möglich erwiesen. (Ob in einem solchen Fall der Stern stabil oder instabil ist, wird von gewissen anderen Faktoren abhängen.)

Die JEANSSche Bedingung $BC > D > 0$ ist gleichbedeutend mit den folgenden beiden Ungleichungen

$$3\alpha + \beta - n < (3\alpha + 7) \frac{3p_{00} + 4aT_0^4 - \rho_0 C_v T_0}{3p_{00} + 4aT_0^4}, \quad (12a)$$

$$3\alpha + \beta - n > - (3\alpha + 7) \frac{3s\lambda}{\lambda + 4 - 3s\lambda}. \quad (12b)$$

Hierbei wird indessen noch vorausgesetzt, daß $\lambda + 4 - 3s\lambda > 0$ ist. Die möglichen Werte der Konstanten α, β, n sind durch diese Bedingungsungleichungen derart eingeschränkt, daß $3\alpha + \beta - n$ innerhalb eines bestimmten Intervalls liegen muß, dessen Länge sich ergibt zu:

$$(3\alpha + 7) \left[\frac{3p_{00} + 4aT_0^4 - \rho_0 C_v T_0}{3p_{00} + 4aT_0^4} + \frac{3s\lambda}{\lambda + 4 - 3s\lambda} \right]. \quad (13)$$

Die angegebene Bedingung $BC > D > 0$ verlangt also, daß dieses Intervall (13) positiv ist.

Während in (12b) nur reine Zahlen auftreten, enthält (12a) — und daher auch (13) — noch die

¹ VOGT, Astr. Nachr. 232, 1, Nr. 5545 (1928).

physikalischen Größen p_0, ρ_0, T_0, C_v . Das Verhältnis von Gasdruck zu Strahlungsdruck im Gleichgewichtszustand sei wie oben durch λ bezeichnet. γ sei das Verhältnis der druckkonstanten zur volumkonstanten spezifischen Wärme von Materie plus Strahlung, also $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$. Für ideale Gase ist $\gamma = 5/3$. Während nun bei Behandlung der mechanodynamischen Grundgleichung eine evtl. Abweichung vom idealen Gaszustand dadurch berücksichtigt wurde, daß

$$p_G = \text{const } \varrho^{1+s} T$$

gesetzt, d. h. ein Faktor ϱ^s hinzugefügt wurde — aus Dimensionsgründen unterscheidet sich die Proportionalitätskonstante von p_G vom Werte $\frac{\Re}{\mu}$ noch um einen weiteren Faktor, der die Dimension $g^{-s} \text{cm}^{3s}$ und den Absolutwert 1 hat — benutzt JEANS hier für p_G den Ansatz

$$p_G = NR T (1 + \xi) = \frac{\Re}{\mu} \varrho T (1 + \xi)$$

Hier ist N die Zahl der in der Volumeinheit enthaltenen Atome, Elektronen oder Atomreste und hat die Dimension cm^{-3} , R die BOLTZMANNsche Konstante = $\Re \cdot$ Masse des Wasserstoffatoms = $1,372 \cdot 10^{-16} \text{ g cm}^2 \text{ sec}^{-2} \text{ grad}^{-1}$. Sollen beide Ansätze für p_G miteinander verträglich sein, so ist ξ als veränderlich zu betrachten, $\xi = f(\varrho) \geq 0$. Für ideale Gase verschwindet ξ .

Statt (12a) erhalten wir jetzt die gleichfalls nur noch reine Zahlen enthaltende Ungleichung:

$$3\alpha + \beta - n < (3\alpha + 7) \cdot \lambda \frac{3\gamma - 4 + 3\xi(\gamma - 1)}{3(\gamma - 1)(1 + \xi)(\lambda + 4)} \quad (12c)$$

während sich für den Bereich (13) ergibt:

$$(3\alpha + 7) \cdot \lambda \left[\frac{3\gamma - 4 + 3\xi(\gamma - 1)}{3(\gamma - 1)(1 + \xi)(\lambda + 4)} + \frac{3s}{\lambda + 4 - 3s\lambda} \right] \quad (14)$$

Für ideale Gase ($s = \xi = 0$) geht dies über in:

$$(3\alpha + 7) \cdot \lambda \frac{3\gamma - 4}{3(\gamma - 1)(\lambda + 4)} \quad (14a)$$

Diese Formeln zeigen: Ist der Strahlungsdruck gegenüber dem Gasdruck zu vernachlässigen ($\lambda = \infty$), so ist $3\alpha + 7 > 0$ vorausgesetzt) (14) nur, wie oben gefordert, positiv, wenn $\gamma > 4/3$.

Da für ideale Gase $\gamma = 5/3$ ist, so muß $3\alpha + 7 > 0$ sein, da ja der Bereich (14a) positiv sein muß, um die Stabilität eines Sternes zu gewährleisten ($\alpha > -2 1/3$).

Im allgemeinen Falle ($s, \xi > 0$) bleibt bei $3\alpha + 7 > 0$ und $\gamma > 4/3$ der Bereich (14) stets positiv. VOGT¹ folgert hieraus, daß gasförmige Sterne stets möglich sind, sowohl wenn die idealen Gasgesetze gelten als auch bei Abweichung von diesen, während JEANS aus der Tatsache, daß mit abnehmendem Werte von λ der Bereich (14) immer mehr zusammenschumpft, die Folgerung zieht, daß

Sterne großer Masse nicht mehr gasförmig sein können, da nach seiner Ansicht bei diesen der Gasdruck gegenüber dem Strahlungsdruck sehr gering, λ also sehr klein wird. So soll bei Sternen von 80 Sonnenmassen λ etwa den Wert 0,29, bei Sternen von 240 Sonnenmassen den Wert 0,15 haben. Die entsprechende Länge des Bereiches (14a) würde dann, wenn $\gamma = 5/3$ gesetzt wird, 0,034 ($3\alpha + 7$) bzw. 0,018 ($3\alpha + 7$). Nach JEANS ist es sehr unwahrscheinlich, daß die Konstanten α, β, n gerade so beschaffen sind, daß $3\alpha + \beta - n$ in diesen kleinen Bereich hineinfällt, gasförmige Sterne also stabil sein sollten.

Aus (12b) und (12c) folgt für $s = \xi = 0$, d. h. für ideale Gase, daß — bei $\lambda = 0,45$ und $\gamma = 5/3$ — stets $0 < 3\alpha + \beta - n < 0,05(3\alpha + 7)$. Für $s, \xi > 0$ werden die beiden Grenzen von $3\alpha + \beta - n$ etwas weiter auseinander rücken, die untere Grenze wird also etwas negativ, die obere (positive) etwas größer. JEANS folgert hieraus, daß $3\alpha + \beta - n$ und daher auch $3\alpha + \beta$ nur kleine negative oder positive Werte annehmen kann.

II. Betrachtungen über die Art der Energieerzeugung.

Diese Schlußfolgerung benutzt JEANS nun, um über die Art der Energieerzeugung, die proportional zu $\varrho^\alpha T^\beta$ angenommen war, gewisse Aussagen zu machen. Man kann zunächst an zwei verschiedene Arten der Energieerzeugung denken, an eine solche, die ähnlich der Radioaktivität ist, also wie diese einen einatomigen Prozeß darstellt, und an eine solche, die durch Zusammentreffen von einem Atom mit anderen Atomen, mit freien Elektronen oder mit Strahlung eingeleitet wird. Diese letzte Art der Energieerzeugung wird aber in irgendeiner Weise abhängen von der Dichte und Temperatur, da sie ja das Zusammentreffen eines Atoms mit anderen Partikeln erfordert und dies durch Dichte und Temperatur bedingt ist. $3\alpha + \beta$ wird daher voraussichtlich hier ≥ 3 sein, und dies ist nach JEANS ein nicht mehr zulässig großer Wert, so daß er diese Art der Energieerzeugung von vornherein ausschließen zu können glaubt. Auch die Annahme von EDDINGTON, daß die Energie frei wird dadurch, daß sich leichtere Elemente zu schwereren vereinigen, etwa 4 Wasserstoffelemente zu einem Heliumelement, würde für $3\alpha + \beta$ den Wert 9 ergeben, da die Häufigkeit, mit der die 4 H-Atome pro Masseneinheit zusammenkommen, der dritten Potenz der Dichte proportional ist. Es kommt also nach JEANS auch diese EDDINGTONsche Hypothese nicht in Frage. Nach H. N. RUSSELL soll die Energieerzeugung im allgemeinen sehr gering sein und nur bei einer gewissen kritischen Temperatur T_k ziemlich plötzlich einsetzen. Dies erfordert aber, daß G proportional zu $\left(\frac{T}{T_k}\right)^\beta$ und β eine große Zahl ist, was gleichfalls nach der JEANSSchen Forderung betr. $3\alpha + \beta$ nicht sein darf. Es scheidet demnach nach JEANS auch diese „Schießpulverhypothese“ von RUSSELL aus dem Bereich der Möglichkeit aus. JEANS selbst neigt der Ansicht zu, daß die Energie-

¹ VOGT, a. a. O.

erzeugung ein einatomiger Prozeß ist, ähnlich dem radioaktiven Zerfall, da ja die Begriffe Dichte und Temperatur für ein Einzelatom keine Bedeutung haben, die Energieerzeugung daher hier von Dichte und Temperatur unabhängig, also $3\alpha + \beta = 0$ wäre.

Ein solcher atomarer Zerfall kann zunächst einmal rein spontan erfolgen. Es ist aber auch die Möglichkeit zu prüfen, ob er durch einfallende thermodynamische Strahlung veranlaßt werden kann. Soll dies der Fall sein, so muß deren Wellenlänge so klein sein, daß das zugehörige Strahlungsenergiequant gleich ist der bei dem Atomzerfall frei werdenden Energie. Hieraus läßt sich demnach die Temperatur berechnen, die erforderlich ist, um einen atomaren Zerfall durch Strahlung zu veranlassen bzw. zu beschleunigen. Es ergibt sich eine Temperatur von 120000 Millionen Grad. Entsprechend läßt sich auch die Temperatur berechnen, die notwendig ist, um durch Strahlungsquanten Materie (Elektron, Proton) zu vernichten. Hierfür ergibt sich der Wert von etwa $7\frac{1}{2}$ Billionen Grad. Denn erst bei dieser Temperatur tritt Strahlung, deren Energiequant den erforderlichen Wert von etwa 0,0015 erg hat, in merkbarer Menge auf. Da derartig hohe Temperaturen nicht als vorhanden angenommen werden können, so folgert JEANS, daß die Energieerzeugung im Sterninnern ein rein spontaner Prozeß und von der dort herrschenden Temperatur auch quantitativ völlig unabhängig ist. Da ein spontaner Zerfall besonders bei den schweren Elementen auftritt, so ist zu schließen, daß diejenigen Sterne, die pro Masseneinheit den größten Betrag an Strahlungsenergie aussenden, die massigsten und jüngsten Sterne sind, daß man aber aus der Strahlungsenergie nicht auf hohe oder niedrige innere Temperatur bzw. auf den Wert der mittleren Dichte schließen darf. Diese Folgerungen sollen nach JEANS mit den astronomischen Beobachtungen übereinstimmen.

Der Vorgang der Erzeugung der Energie ist nach JEANS demnach folgender: In irgendeinem schweren Atom fällt plötzlich — ohne unmittelbaren äußeren Anlaß oder, wenn man will, einfach deshalb, weil die Lebensdauer des Atomes zu Ende

ist — eines der dem Atomverband angehörenden Ringelektronen in den Kern hinein, trifft hier auf ein Proton, und durch den Zusammenprall werden beide, Elektron und Proton, vernichtet. Die hierbei frei werdende Energie hat den Betrag: Produkt aus Quadrat der Lichtgeschwindigkeit und Summe der Massen des Protons und des Elektrons. Dies ergibt den bereits oben genannten Energiebetrag von 0,0015 erg, der — in Strahlungsenergie umgesetzt — gleich ist einem Lichtquant der Frequenz $2,3 \cdot 10^{23}$, entsprechend einer Wellenlänge $1,3 \cdot 10^{-13}$ cm. Jedes von diesen so erzeugten Lichtquanten tritt nun seine Reise durch den Stern an, trifft dabei natürlich auf andere Atome und wird von diesen absorbiert und reemittiert oder auch gestreut (COMPTON-Streuung). Es gelangt so endlich nach außen, in den interstellaren Raum, wo es nunmehr nahezu ungehindert weiterfliegen kann, bis es auf andere Weltenkörper trifft. Zu beachten sind aber folgende Punkte: Es wird nur sehr selten eine solche Selbstvernichtung — und damit verbundene Strahlungserzeugung — eines schweren Atomes vorkommen, auf der Sonne z. B. etwa pro Stunde nur 1 auf 10^{17} Atome. Ferner wird der Prozeß der COMPTON-Streuung wesentlich häufiger auftreten als eine Absorption mit einer darauf folgenden Reemission, bei der die Frequenz der Strahlung unverändert bleibt. Es wird daher nur selten so durchdringende Strahlung zu uns gelangen können, wie sie oben durch die Frequenz $2,3 \cdot 10^{23}$ bzw. durch die Wellenlänge $1,3 \cdot 10^{-13}$ cm angegeben war. Dies wird nur dann der Fall sein, wenn der Geburtsort eines solchen Strahlungsquants ein sehr durchsichtiger Himmelskörper war, etwa irreguläre Nebelmassen, die äußeren Schichten der planetarischen Nebel, die Spiral- und andere außergalaktische Nebel. Von diesen Himmelskörpern wird daher die durchdringende Höhenstrahlung herrühren. Im allgemeinen aber wird durch wiederholte COMPTON-Streuung die Wellenlänge der Strahlung immer mehr wachsen, bis sie den Betrag hat, der vergleichbar ist mit der thermodynamischen Strahlung, die sich mit der jeweils herrschenden Temperatur im Gleichgewicht befindet.

(Schluß folgt.)

Besprechungen.

Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie. Band XII/1: Rezeptionsorgane II. Photorezeptoren I. Teil. Berlin: Julius Springer 1929. 741 S. und 238 Abbild. Preis geh. RM 69.—, geb. RM 77.—.

Es kann gar kein Zweifel bestehen, daß dieser wertvolle Band des großangelegten Handbuches nicht nur das Interesse der Biologen und Psychologen auf sich ziehen muß, sondern daß er von allgemeinerer Bedeutung für die naturwissenschaftliche Forschung überhaupt ist. Es werden ja darin Probleme behandelt, die auch den Chemiker, Physiker, Astronomen usw. tagtäglich beschäftigen, und zwar betrifft dies vornehmlich den Licht- und Farbensinn, auf welchem naturgemäß in diesem Bande das Schwergewicht liegt. Ein nicht zu unterschätzender Vorteil der Anordnung des Stoffes

liegt in der Behandlung der hierhergehörigen vergleichend physiologischen Fragen neben der — selbstredend — vornehmlichen Berücksichtigung des Menschen.

Beim Überblick der Reihe der Mitarbeiter müssen wir auch hier mit Trauer feststellen, daß im Laufe der Drucklegung der Tod große, unersetzliche Lücken gerissen hat, haben uns doch inzwischen C. v. HESS, H. KOELLNER und J. v. KRIS verlassen. Sie haben in ihren vorliegenden Beiträgen, die sie zum großen Teile noch selbst fertigstellen konnten, das letztemal zu uns gesprochen.

Man kann natürlich die Aufgabe eines Handbuchartikels in sehr verschiedener Weise auffassen; so sind auch die vorliegenden Beiträge stark different. Das liegt zum Teil wohl sicher in der Art des Stoffes, der

oft eine ganz bestimmte Behandlung vorschreibt, zum Teil aber in der Denkweise und dem Charakter des Verfassers. Im allgemeinen kann man aber wohl die vorliegende Anordnung als gelungen bezeichnen. Nur ist mit Bedauern festzustellen, daß zwei zugehörige Beiträge: Die elektrischen Erscheinungen am Auge und die Adaptation und das Dämmerungsehen in diesem Bande — offenbar aus redaktionellen Gründen — fortgelassen werden mußten.

R. HESSE behandelt in vorbildlicher Weise die zum Teil noch sehr primitiven Scheinrichtungen der Wirbellosen bis hinauf zum musivischen Auge. Man erhält bei der Lektüre ein gutes Übersichtsbild, wenn auch, was in der Natur der Sache liegt, mangels genügender Kenntnisse die physiologische Funktion dabei in den Hintergrund tritt. A. KÜHN bespricht den Phototropismus und die Phototaxis der niederen Tiere und versucht dabei besonders die Genese und den Zweck dieser Erscheinungen in den Mittelpunkt des Interesses zu rücken. Es ist recht günstig, daß daran der Beitrag von E. NUERNBERGK über den Phototropismus und die Phototaxis bei Pflanzen anschließt. Man erhält dadurch einen guten Einblick in die Ähnlichkeit und Verschiedenheit dieser Erscheinungen bei Tier und Pflanze. Es fällt auch in diesem Artikel wieder auf, daß sich die Beurteilung der Gesetzmäßigkeiten des Phototropismus und die vielleicht etwas zu weit gehenden theoretischen Deutungsmöglichkeiten fast ausschließlich auf Beobachtungen an einem Objekt, der Koleoptile des Hafers stützen.

G. GROETHUYSENS Dioptrik des Auges gibt eine glänzende Einführung in die schwierigen dioptrischen Probleme des Auges von seltener Klarheit und Einfachheit. Der Autor hat es, in begreiflich enger Anlehnung an GULLSTRAND, verstanden, ohne Voraussetzung besonderer mathematischer Kenntnisse, den vielleicht etwas spröden Stoff in fesselnder Weise darzustellen. Überall sind Anweisungen zu einfachen und doch genügenden Bildkonstruktionen und Berechnungen gegeben. Ein Vorzug des Artikels liegt in der Beigabe recht vollständiger Tabellen über die optischen Konstanten des Auges.

Der verstorbene Meister C. v. HESS behandelt die Akkommodation beim Menschen, die vergleichende Akkommodation und die Pupille, Gebiete, die einen Großteil seiner Lebensarbeit beanspruchten. Die Darstellung schließt sich eng an die bekannte Monographie v. HESS' in WINTERSTEINS Handbuch der vergleichenden Physiologie an. Bei der Besprechung der Pupille wird ein beträchtlich erRaum der von v. HESS gefundenen Wechselverengerung bei aufeinanderfolgender Belichtung mit verschiedenen Lichtern und den sich daraus nach v. HESS ergebenden Folgerungen für den Farbensinn eingeräumt.

A. JESS versucht, das Starproblem in engen Zusammenhang mit der Chemie der Linse zu bringen und weist auf die Fruchtbarkeit solcher Bemühungen hin.

E. GRAFES Iris- und Ciliar-Pharmakologie ist von dem Gedanken geleitet, eine möglichst vollständige Übersicht über Wirkungsart und Angriffsart der einzelnen Pharmaka zu geben. Sie bildet ein gutes Nachschlagewerk. Hervorzuheben ist die vorsichtige Zurückhaltung des Autors.

U. EBBECKE löst seine Aufgabe der Darstellung der zumeist altbekannten entoptischen Erscheinungen in übersichtlicher, klarer Weise. Man merkt, daß der Autor — wie er selbst schreibt — sich die Mühe genommen hat, alles an sich selbst nachzuprüfen.

R. DITTLER stellt kurz und klar die objektiven Lichtwirkungen an der Netzhaut dar: die Änderung der

chemischen Reaktion, die Färbbarkeitsänderungen, die Zapfen- und Stäbchenkontraktion, die Pigmentwanderung und die Veränderung des Sehpurpurs. Auf die wenig durchsichtigen Verhältnisse beim Menschen wird besonders aufmerksam gemacht. Aus der Art der Darstellung spricht die große Erfahrung des Autors auf diesem Gebiete.

Nun folgt der Licht- und Farbensinn mit einer teilweisen, oft noch stark divergierenden Paralleldarstellung von A. TSCHERMAK und I. v. KRIES. Sind sich zwar diese beiden Autoren häufig in der Bewertung des Tatsachenmaterials auch nicht einig, so scheint dem Referenten doch die Hauptursache der Diskrepanz in der methodischen Grundauffassung zu liegen. A. TSCHERMAK vertritt den rein subjektivistischen Standpunkt im Sinne erweiterter Anschauungen von E. HERING: „Die Lehre von den Lebenserscheinungen auf dem Gebiete des Gesichtssinnes muß, soll sie folgerichtig und mit fruchtbarem Nutzen vorgehen, ebenso wie die Sinnesphysiologie überhaupt mit der Untersuchung der bewußten Endwirkungen, mit der *Analyse der Gesichtsempfindungen* beginnen. Es gilt zunächst deren Ähnlichkeit und Verschiedenheit, die Koexistenzmöglichkeit der einzelnen Empfindungen oder Qualitäten, ihre zeitlichen und räumlichen Beziehungen festzustellen und daraufhin ihre übergroße Mannigfaltigkeit auf Relationsbeziehung zu einer bestimmten Anzahl von Elementarqualitäten zurückzuführen. Wir gelangen damit zu einer endogenen Kennzeichnung, zu einer kongenialen Ordnung, einem natürlichen System der Gesichtsempfindungen und erschließen eine analoge Gliederung auf physiologischem Gebiete, eine entsprechende Differenzierung des Gesichtssinnes überhaupt. Diese Betrachtungsweise und die darauf gegründete strenge experimentelle Methodik, welche allenthalben auf zahlenmäßige Charakterisierung — allerdings mangels eines psychophysischen Maßsystems nicht auf eigentliche Messung! — ausgeht, sei als *exakter Subjektivismus* bezeichnet. Dem kurz charakterisierten Standpunkt entsprechend rücken wir die Analyse der Photogenie der Reizeffekte am Auge, die Erfassung der Beziehungen zwischen Lichtreiz und Gesichtsempfindung, speziell Farbe, erst in zweite Linie und erachten für deren Erörterung die zunächst ganz unabhängige Deduktion eines Empfindungssystems als notwendige richtunggebende Voraussetzung. Dabei sei auch zunächst von dem räumlichen Charakter der Gesichtsempfindungen abstrahiert, indem diese vorläufig ohne Rücksicht auf ihre Lokalisation behandelt werden. Wir müssen aber auch jede Befangenheit durch physikalische Daten abstreifen, natürlich ohne andererseits gegen solche zu verstoßen — der Physik geben, was der Physik eigen ist, und der Physiologie vorbehalten, was ihr zugehört.“

Diesem mit eigenen Worten A. TSCHERMAKS gegebenen grundsätzlichen Standpunkte vermag sich nun J. v. KRIES (vgl. auch seine „Allgemeine Sinnesphysiologie“) und seine Schule nicht restlos anzuschließen; darin liegt meines Erachtens der Hauptgrund für die Tatsache, daß alte, ehemals sehr scharfe Gegensätze noch heute nicht überbrückt worden sind, wenn sie sich auch zweifellos schon verwischt haben.

TSCHERMAKS Artikel stellt eine außerordentliche Leistung dar; ein ungeheures Tatsachenmaterial mit sehr reichen Literaturangaben ist verarbeitet. Die Darstellungsweise ist manchenorts auch für den Fachmann recht schwierig und verlangt ein sehr genaues aufmerksames Studium. Der Leser wird vielerlei Neues finden und manche Anregungen erfahren. Besonders sei hingewiesen auf die in TSCHERMAKS Institut er-

hobene Feststellung von GOLDMANN, daß die übliche Rayleigh-Gleichung nur eine Farbtongleichung ist und zur vollständigen Gültigkeit auch an Sättigung einer Zumischung von weißem Licht zum monochromatischen Lichte bedarf, eine Tatsache, welche die strenge Gültigkeit der üblichen Eichungen des Spektrums in Frage stellt. Das Verdienst A. TSCHERMAKs beruht nicht in letzter Linie darauf, daß er durch seine Monographie eine Darstellung des Farbensinnes auf HERINGS Grundanschauungen fußend und weiterbauend gegeben hat, wie sie schon seit langem vermißt wurde.

Die *Theorie des Farbensehens* leitet A. TSCHERMAK mit einer Reihe von Fundamentaltatsachen ein, denen nach seiner Meinung prinzipiell jede Theorie gerecht werden muß. Es scheint aber, daß diese Fundamentaltatsachen wohl zum Teil nicht allgemein anerkannt werden. TSCHERMAK kritisiert die verschiedenen Modifikationen der Dreikomponentenlehre und geht dann auf die Vierfarbentheorien, speziell jene von HERING, ein. Der Duplizitätstheorie (v. KRIES) steht TSCHERMAK im allgemeinen ablehnend gegenüber. Rückblickend und ausbleichend gibt der Autor schließlich seine Auffassung im Sinne der Vierfarbentheorie, wobei er besonders darauf hinweist, daß es wichtiger ist, die großen Lücken durch Tatsachenmaterial auszufüllen als das Gebäude der Theorie weitgehend auszugestalten. TSCHERMAK bemerkt: „Im Anschluß an die Zonentheorie sei zwar nicht einfach zwischen peripheren und zentralen Einrichtungen unterschieden und für beide ein verschiedenes Differenzierungsprinzip (Dreigliedrigkeit dort, Viergliedrigkeit hier) angenommen, wohl aber sei die Unterscheidung getroffen zwischen dem wohl photochemischen Reizvermittler oder Photorezeptor einerseits, in welchem die entscheidende Lichtabsorption stattfindet, und dem erst durch diesen erregten nervösen Anteil oder Reagenten andererseits (Receptor-Reagenten-Theorie nach TSCHERMAK).“

J. v. KRIES behandelt in zwei kurzen Abschnitten die dichromatischen Farbensysteme und die Theorie des Tages- und Dämmerungsehens. Sie kennzeichnen so richtig die streng logische, überlegene Denkart des großen Meisters und seine überaus schlichte, dabei klare und überzeugende Darstellungsweise. Von wenig Literaturangaben beschwert zeugen diese Beiträge wieder von der reichen eigenen Erfahrung des Autors. Besonders in der Verteidigung der Auffassung seiner Duplizitätstheorie, deren Fruchtbarkeit sich wohl kaum bestreiten läßt, führt v. KRIES seine Feder mit nicht ungewohnter Schärfe. Wer spezielle Aufmerksamkeit dem Kapitel „Offene Fragen“ zuwendet, wird aber sofort erkennen, wie v. KRIES in vorbildlicher Weise die Tragweite von Theorien keineswegs überschätzt und in welcher zurückhaltender Weise er über die schwierigen Probleme denkt. Es muß jeden mit Schmerz erfüllen, daß uns dieser führende Geist mit seiner abgeschiedenen Klarheit verlassen mußte! Ein kaum zu ersetzender Verlust!

Der Beitrag des verstorbenen H. KOELLNER, ergänzt von E. ENGELKING gibt einen guten Überblick über die angeborenen und erworbenen Anomalien des Farbensinnes. Er beleuchtet speziell die große Schwierigkeit dieses praktisch wichtigen Forschungsgebietes und deckt in vorteilhafter Weise die noch bestehenden großen Lücken auf.

F. WEIGERT gibt eine kurze Übersicht über die Tatsachen der Photochemie und sucht Zusammenhänge mit dem Farbsehen herzustellen. Es sind Anklänge an eine „Zukunftsmusik“, wie sich der Autor auch selbst nicht verhehlt. Doch scheinen Bestrebungen dieser Art manches zu versprechen.

Neu ist in einem Handbuche der Physiologie die Behandlung der Fragen der „Farbenkonstanz“ der Sehdinge in einem gesonderten größeren Artikel. A. GELB hat dies aber zu einem Vorzuge dieses Bandes gemacht. In vorteilhafter Weise entwickelt GELB nach kurzer Darlegung der Hauptfragen das Problem von HERING, HELMHOLTZ angefangen über KATZ, BÜHLER, KÖHLER, JAENSCH, KRAUSS usw. bis auf die neueste Zeit, in historischer Weise. Dadurch wird der allmähliche Wandel der Anschauungen recht klar. GELB hält mit Kritik nicht zurück und formuliert in den Schlußbetrachtungen seine eigene Auffassung. Doch steckt das ganze Problem offensichtlich noch in den Anfangsgründen und bedarf wohl, wie es scheint, aus dem Psychologischen heraus noch mancher Annäherung an das Physiologische. Ist man ja doch nur zu leicht geneigt, Dinge dort psychologisch zu deuten, wo man sie physiologisch kaum oder gar nicht übersehen kann. Deswegen ist wohl die Darstellung dieser Fragen hier vor allem dadurch von Nutzen, weil sie dem physiologischen Interessenkreise nähergerückt werden.

R. HESSE behandelt noch kurz die zweckmäßigen Scheinrichtungen der Dämmerungstiere.

A. KÜHN beschließt den inhaltsreichen Band mit einer sehr übersichtlichen Einführung über die Untersuchungen und Ergebnisse des Farbenunterscheidungsvermögens der Tiere, besonders der Fische und Bienen. Es wird dadurch besonders deutlich, einen wie großen Wandel die Anschauungen, speziell durch die Arbeiten von v. FRISCH, F. KNOLL, O. KOEHLER und A. KÜHN, gegenüber jenen von C. v. HESS erfahren haben.

M. H. FISCHER, Prag-Tetschen.

JANKE, ALEXANDER, und HEINRICH ZIKES, *Arbeitsmethoden der Mikrobiologie*. Ein Praktikum für Studierende an Hochschulen und zum Selbstunterricht mit besonderer Berücksichtigung der technischen Mikrobiologie. Dresden und Leipzig: Theodor Steinkopff 1928. XI, 183 S. und 127 Fig. 14 × 22 cm. Preis geh. RM 13.—, geb. RM 14.50.

Das Buch ist bestimmt für Gärungsphysiologen, Botaniker, Biochemiker, Pharmazeuten, landwirtschaftliche Bakteriologen und Mykologen, kurz für alle Forscher, die mit Mikroben und deren Leistungen in irgendeiner Hinsicht zu tun haben, und für die es bisher an einem kurz gefaßten Leitfaden gebrach. Es bringt in gedrängter Darstellung die gebräuchlichsten Methoden der Herstellung von mikroskopischen Präparaten, der Sterilisation, der Nährbödenbereitung, der Kultur, der Mikrobenzählung, des Studiums der chemischen Leistungen der Mikroben und der mikrobiologischen Untersuchung der Luft, des Wassers, des Bodens usw., sowie eine Anleitung zur Bestimmung von Bakterien, echten Pilzen, Algen und Protozoen. Die wichtigeren Geräte sind abgebildet, und ihr Gebrauch in klarer Weise erläutert. Die Rezepte und ihre Anwendung sind sehr präzise gefaßt. Die auf 8 Tafeln zusammengefaßten Abbildungen charakteristischer Formen von Bakterien, Pilzen, Algen und Protozoen sind gut ausgewählt, ansprechend wiedergegeben und genügen zur ersten Orientierung über die wichtigsten Gattungen. Eine namentlich für den Anfänger und außerhalb der Wissenschaft stehenden Techniker wertvolle Beigabe bildet die Erläuterung der biologischen Fachausdrücke.

J. GROSS, Neapel.

SHELLENBERG, ADOLF, *Krebstiere oder Crustacea II: Decapoda; Zehnfüßer* (14. Ordnung), in: DAHL, Tierwelt Deutschlands und der angrenzenden Meeresteile. 10. Teil. Jena: Gustav Fischer 1928. IV, 146 S. und 110 Abb. 17 × 26 cm. Preis RM 9.—. Auf eine allgemeine Einleitung, die die wichtigsten

Daten über Anatomie und Entwicklung der ganzen Gruppe bringt, folgt der die Systematik behandelnde Hauptteil der Arbeit. Er enthält Bestimmungsschlüssel und kurze Diagnosen der Unterordnungen, Familien und Gattungen, sowie eingehende Beschreibungen der Arten mit zahlreichen Mitteilungen über Entwicklung, Lebensweise, Verbreitung und wirtschaftliche Bedeutung, soweit solche vorhanden ist.

Besonders eingehend werden Hummer und Fluß-

krebe behandelt, unter letzteren namentlich auch der 1890 in Deutschland eingeführte amerikanische *Gamburus affinis*. Auch ein anderer Fremdling, die seit 1915 in der Unterelbe verbreitete chinesische Wollhandkrabbe (*Eriocheir sinensis*) erfährt eine ausführliche Besprechung. Aus der Ostsee werden im ganzen 12 Arten aufgeführt, aus dem Süßwasser 6. Die Zahl der Nordsearten ist beträchtlich größer, doch sind viele von ihnen eigentlich nur Irrgäste. J. GROSS, Neapel.

Geophysikalische Mitteilungen.

Die Wärmestrahlung der Erde I. G. C. SIMPSON hat in drei Abhandlungen die Ein- und Ausstrahlung für die Erde als Ganzes behandelt; den Anlaß dazu gab die Nachprüfung einer Arbeit von R. MÜGGE. Er beabsichtigt dabei nicht, den Strahlungszustand in Bodennähe zu untersuchen, was im allgemeinen der Gegenstand der experimentellen Arbeiten ist. Vielmehr will er berechnen, welche Strahlung eine gedachte, die ganze Erde und ihre Atmosphäre einhüllende Kugel nach oben und unten, unter mittleren Verhältnissen, durchsetzt.

Die Summe der Ein- und Ausstrahlung über die ganze Erdkugel muß natürlich gleich sein, weil sich die mittlere Erdtemperatur nicht merklich einseitig verändert. Dagegen wird über den einzelnen Teilen der Erde kein Gleichgewicht bestehen; über dem Äquator wird die Einstrahlung, über dem Pol die Ausstrahlung überwiegen. Daß trotzdem die mittleren Temperaturverhältnisse konstant sind, wird bekanntlich durch den großen horizontalen Wärmestrom bewirkt, der mit der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre und der Ozeane verbunden ist. Aus den Zahlen für Ein- und Ausstrahlung bekommt man deshalb auch quantitative Angaben über die Größe dieses Wärmestromes.

2. Theoretische Arbeiten dieser Art werden dadurch erleichtert, daß die Sonnenstrahlung und die von der Atmosphäre, den Wolken und der Erdoberfläche ausgesandte Strahlung sich ihrer spektralen Zusammensetzung nach völlig unterscheiden. Für einen schwarzen Körper der absoluten Temperatur T ist nach dem WIENschen Verschiebungsgesetz die Wellenlänge maximaler Emission (in $\mu = 10^{-3}$ mm ausgedrückt) gegeben durch $\lambda_{\max} = \frac{2880}{T}$. Das Maximum der Sonnenstrahlung

($T = 5700$) liegt also im Gelbgrünen bei $0,5 \mu$, das der Erdstrahlung ($T = 200-300$) dagegen weit im Ultraroten bei 14 bis 10μ . Zwischen 3 und 5μ emittieren weder Sonne noch Erde einen nennenswerten Bruchteil ihrer Gesamtstrahlung.

3. Über die Emission und Absorption der atmosphärischen Gase besteht in manchen Punkten noch Ungewißheit. SIMPSON hält sich an folgende Grundsätze: 1. Wenn eine Gasschicht von gleichförmiger Temperatur t_0 Strahlung der Wellenlänge λ vollständig absorbiert, so emittiert sie Strahlung dieser Wellenlänge genau so wie ein schwarzer Körper der Temperatur t_0 . 2. Wenn eine Gasschicht (Atmosphäre) auf einer schwarzen Fläche (Erdboden) der Temperatur t_0 ruht, und wenn die Temperatur im Gas von dieser Fläche nach außen auf die Temperatur t_1 abnimmt, so ist der auswärts gerichtete Strahlungsstrom der Wellenlänge λ seiner Größe nach begrenzt durch die entsprechenden Strahlungen zweier schwarzer Körper der Temperaturen t_0 und t_1 .

Für meteorologische Rechnungen wird im allgemeinen angenommen, daß die Absorption einer Gasschicht nur von der Zahl der Moleküle abhängt, die

in der Bahn des Strahls liegen. Es ist aber wahrscheinlich, daß die Absorptionsbanden auch von der Dichte des Gases abhängen, daß es also nicht gleichgültig ist, auf welchen Raum sich dieselbe Gasmenge verteilt. Das zeigt sich z. B. bei Wasserdampf zwischen 8,5 und 11μ : HETTNERs Laboratoriumsversuche bei Drucken von etwa einer Atmosphäre ergeben in diesem Bereich merkliche Absorption, auch wenn die Dampfmenge nur einer Schicht flüssigen Wassers von 0,3 mm Dicke entspricht; nach ABBOTT und ALDRICH ist dagegen die Atmosphäre auch dann noch völlig durchlässig für diese Wellenlängen, wenn der Weg des Strahls durch hundertmal mehr, aber in der Atmosphäre fein verteilten Wasserdampf hindurchführt.

In der ersten Abhandlung versuchte SIMPSON diese Schwierigkeit auf dieselbe einfache Weise zu umgehen, wie es in fast allen früheren Arbeiten geschehen ist. Er nahm also an, daß Wasserdampf der einzige Bestandteil der Atmosphäre sei, der langwellige Strahlung von der Art, wie sie von Körpern bei irdischen Temperaturen ausgesandt wird, absorbiert und emittiert; und weiter, daß der Wasserdampf in diesem Wellenbereich wie ein „grauer Körper“ absorbiert, also alle Wellenlängen gleich stark. Diese radikalen Annahmen führten zu Ergebnissen, die nicht einmal qualitativ befriedigten. Einen eigentlichen Fortschritt bringt erst die zweite Arbeit, in der die Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten von der Wellenlänge in Rechnung gestellt wird.

4. Die einfachen Gase der Atmosphäre (Stickstoff, Sauerstoff, Argon) senden bei irdischen Temperaturen keine merkliche Strahlung aus; nur Wasserdampf und Kohlendioxyd absorbieren und emittieren. Ozon wird mit Recht nicht berücksichtigt; man könnte sich etwa die Hüllfläche in 25 km Höhe denken, also hoch in der Stratosphäre, aber noch unterhalb des Ozons.

Aus Beobachtungen wird gefolgert, daß über jedem Quadratcentimeter an der Basis der Stratosphäre mindestens noch 0,03 g H_2O -Dampf und 0,06 g CO_2 vorhanden sind. Fig. 1 zeigt, welcher Bruchteil der

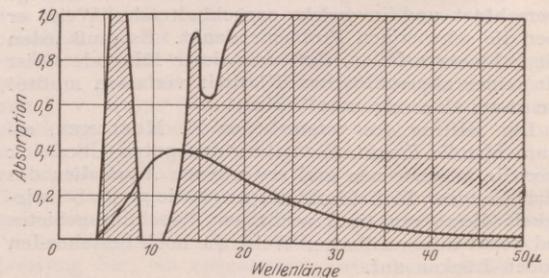


Fig. 1. Absorption an der Stratosphäre, und Strahlungskurve für einen schwarzen Körper bei $-53^\circ C$.

Strahlung verschiedener Wellenlängen durch diesen Gehalt der Stratosphäre absorbiert wird. Die schemati-

sierte Kurve vereinigt die Laboratoriumsversuche mit den amerikanischen Beobachtungen über die Absorption des Sonnenlichtes in der Atmosphäre. Der CO_2 -Gehalt bewirkt nur das scharfe Maximum der Absorption bei etwa 15μ ; alles andere ist die Wirkung des Wasserdampfes.

Zur Berechnung der ausgehenden Strahlung im Jahresmittel werden noch folgende Daten gebraucht: die Temperatur in der Stratosphäre, wachsend von -73° am Äquator auf -53° in 70° Breite; die Temperatur der Erdoberfläche, abnehmend von $+26^\circ$ am Äquator auf -22° in 70° Breite; die mittlere Bewölkung in Bruchteilen des Himmelsgewölbes (etwa 0,5) und die mittlere Temperatur der Wolken, die einheitlich zu -12° angenommen wird.

5. Fig. 2 veranschaulicht an dem Beispiel wolkenlosen Himmels in 50° Breite, wie die Ausstrahlung be-

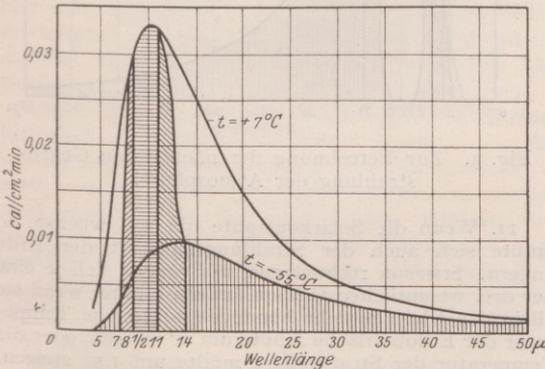


Fig. 2. Ausstrahlung in 50° Breite.

rechnet wird. Die mittlere Jahrestemperatur der Erdoberfläche ist dort $t = +7^\circ$, die Temperatur der Stratosphäre $t = -55^\circ$. $I(t, \lambda) \cdot d\lambda$ sei die Strahlung pro Quadratcentimeter und Min., die ein schwarzer Körper der Temperatur t im Wellenlängenbereich λ bis $(\lambda + d\lambda)$ aussendet. In Fig. 2 ist $I(t, \lambda)$ für die beiden Temperaturen dargestellt; λ ist dabei in μ ausgedrückt. Unbestritten sind die Bereiche $\lambda \leq 7 \mu$ und $\lambda \geq 14 \mu$; hier absorbiert der Wasserdampf in der Stratosphäre praktisch alles, so daß für die Ausstrahlung die entsprechenden vertikal schraffierten Teile der Kurve $I(-55^\circ, \lambda)$ maßgebend sind.

Zwischen $8,5$ und 11μ ist die Atmosphäre völlig transparent, so daß hier die Strahlung des Erdbodens $I(+7^\circ, \lambda)$ (horizontal schraffiert) nach außen gelangt. In den beiden Zwischengebieten wechselt die Absorption. Hier muß die Kurve der Ausstrahlung zwischen den beiden Kurven schwarzer Strahlung von $+7^\circ$ und -55° liegen. Die (schräg schraffierten) Anteile dieser Wellenlängen zur Gesamtausstrahlung wird man roh als das arithmetische Mittel der beiden Grenzkurven schätzen können. Die schraffierten Flächen zusammen ergeben die Gesamtausstrahlung $0,29 \text{ cal/qcm min}$.

Für bedeckten Himmel verläuft die Rechnung ganz ähnlich, indem an Stelle der Bodentemperatur die einheitliche Wolkentemperatur -12° eingesetzt wird. Dadurch wird die Gesamtausstrahlung gegenüber dem heiteren Himmel herabgesetzt, am Äquator von $0,32$ auf $0,21$, in 50° Breite von $0,29$ auf $0,25$, immer in der Strahlungseinheit $\text{cal pro qcm und Min}$.

6. Die Sonnenstrahlung, die den verschiedenen Breitenkreisen an der Grenze der Atmosphäre zukommt,

wird nach den ANGOTSCHEN Zahlen berechnet und gleichmäßig über Tag und Nacht verteilt. Die Solarkonstante (Sonnenstrahlung in mittlerer Erdentfernung) wird zu $1,953 \text{ cal/qcm min}$ angenommen. SIMPSON setzt den Teil, der von der Atmosphäre, den Wolken und der Erdoberfläche reflektiert wird, sogleich bei der Einstrahlung ab, so daß er überhaupt nicht in der Strahlungsbilanz erscheint.

Dabei wird der Einfachheit halber vorausgesetzt, daß dieser reflektierte Teil bei seinem Wege in der Atmosphäre überhaupt nicht verändert wird; wegen der ziemlich starken Banden im ultraroten Sonnenspektrum ist das natürlich nicht unbedenklich. Sehr unsicher sind auch die Schätzungen für die Albedo der Erde, d. h. für den Bruchteil der reflektierten Strahlung. SIMPSON nimmt die Albedo für Land und Meer einheitlich bei unbedecktem Himmel zu $0,17$, mit zunehmender Bewölkung wachsend auf $0,74$ bei ganz bedecktem Himmel.

7. Für das Jahresmittel leitet SIMPSON folgende Tabelle ab, deren einzelne Spalten bedeuten:

- a) solare Einstrahlung, nach Abzug der reflektierten Strahlung;
- b) ausgehende terrestrische Strahlung;
- c) Überschuß der Einstrahlung; alles in cal/qcm min .
- d) siehe unten.

Breite	a)	b)	c)	d)
Äquator	0,339	0,271	+ 0,068	0,00
10° . . .	0,334	0,282	+ 0,052	0,69
20° . . .	0,320	0,284	+ 0,036	1,24
30° . . .	0,297	0,284	+ 0,013	1,63
40° . . .	0,267	0,282	- 0,015	1,83
50° . . .	0,232	0,277	- 0,045	1,82
60° . . .	0,193	0,272	- 0,079	1,56
70° . . .	0,160	0,260	- 0,100	1,23
80° . . .	0,144	0,252	- 0,108	0,73
Pol . . .	0,140	0,252	- 0,112	0,00

Die Ausstrahlung ist auffallend gleichmäßig, was sich daraus erklärt, daß Boden- und Stratosphären-temperatur sich vom Äquator zum Pol entgegengesetzt ändern. R. MÜGGÈ hatte in seiner Arbeit angenommen, daß die Ausstrahlung lediglich von der Stratosphäre stamme, und hatte deshalb Werte erhalten, die vom Äquator ($0,20$) zum Pol ($0,45$) stark anstiegen.

Spalte c) besagt, daß innerhalb des Tropengürtels, bis 35° Breite, mehr ein- als ausgestrahlt wird, während in den gemäßigten und polaren Zonen durchweg die Ausstrahlung überwiegt. Das ist der Ausdruck für die schon eingangs erwähnte Tatsache, daß die Erdatmosphäre sich nicht in dem Zustand befindet, der von den Meteorologen gewöhnlich als Strahlungsgleichgewicht bezeichnet wird.

Der stationäre Zustand wird durch den horizontalen, polwärts gerichteten Wärmetransport des Wassers und der Luft aufrechterhalten. Aus der Strahlungsdifferenz (Spalte c) läßt sich die gewaltige Wärmemenge berechnen, die dabei über 1 cm eines Breitenkreises polwärts fließt; sie ist in Spalte d) in der Einheit $10^7 \text{ cal pro cm und Min}$. angegeben. Nimmt man an, daß der ganze Wärmeaustausch in einer Schicht von 20 km vertikaler Mächtigkeit stattfindet, so würden in 50° Breite durch eine ostwestlich stehende, senkrechte Fläche pro qcm und Min . im Mittel die Wärme 9 cal hindurchgehen, also 35 mal mehr als der auf- und abwärtsgerichtete Strahlungsstrom durch eine horizontale Fläche in derselben Breite. A. DEFANT hat den horizontalen Wärmestrom (in der Atmosphäre allein!) auf Grund ganz anderer Überlegungen berechnet, nämlich

aus den nach Norden und Süden gerichteten Windwegen in Potsdam und dem mittleren meridionalen Temperaturgradienten. Die Theorie des Austauschs von W. SCHMIDT ergab damals 100 cal/qcm min. Die Übereinstimmung mit der Zahl, die SIMPSON aus der Strahlungsbilanz für die ganze Zone gefunden hat, erscheint nicht so schlecht, wenn man bedenkt, daß im maritimen Klima von West- und Mitteleuropa Zirkulation und Wärmeaustausch lebhafter sind als im Durchschnitt des Breitenkreises.

Wohin es führt, wenn durch besondere, hartnäckige Wetterlagen der horizontale Wärmestrom längere Zeit unterbunden wird, hat der vergangene strenge Winter wieder einmal gelehrt.

Im Mittel über die ganze Erde müssen natürlich Ein- und Ausstrahlung gleich groß sein. Tatsächlich stimmen die Zahlen, die bei SIMPSON unabhängig voneinander berechnet sind, bis auf weniger als 2% überein. Bei der unsicheren Natur vieler Annahmen — namentlich über Bewölkung und Albedo — ist das besser als man erwarten konnte.

8. Eine weitere Möglichkeit zur Nachprüfung liegt darin, daß man dieselben Überlegungen, mit deren Hilfe die ausgehende Strahlung berechnet wurde, auch auf die nächtliche „effektive“ Ausstrahlung E in Bodennähe anwenden kann. Diese wird definiert als Differenz zweier Größen: die Strahlung S , die 1 qcm einer horizontalen schwarzen Platte von der Temperatur der umgebenden Luft oder der Erdoberfläche ausstrahlt, wird vermindert um die „Gegenstrahlung“ G , die dieselbe Fläche von 1 qcm vom Himmel empfängt. Die Strahlungsapparate gestatten, E zu messen; weil sich S aus der Temperatur nach dem Strahlungsgesetz berechnen läßt, ist damit auch $G = S - E$ indirekt gegeben, z. B. England (Oxford), klare Sommernächte, 0,47 = 0,60 - 0,13 (cal/qcm min.). SIMPSON kann zum erstenmal G theoretisch berechnen, weil die Gegenstrahlung nur vom Wasserdampf und der Kohlensäure emittiert wird. Wegen der starken Absorption gelangt bis zum Boden nur die Strahlung, die von einer verhältnismäßig dünnen Schicht von wenigen hundert Metern Höhe ausgesandt wird. Die Temperatur dieser Schicht kann man deshalb ohne großen Fehler gleich der Lufttemperatur am Boden ansetzen.

Nach dem zu Fig. 2 Gesagten wird es ohne weiteres verständlich sein, wie man die Gegenstrahlung als schraffierte Fläche in Fig. 3 findet. Horizontal schraffiert sind die strittigen Zwischengebiete $\lambda = 7-8\frac{1}{2}\mu$ und $11-14\mu$; hier wird die Gegenstrahlung (bei gleicher Temperatur) um so stärker sein, je größer der Dampfgehalt der Luft ist, je tiefer und wärmer also die emittierende Schicht liegt. Das bestätigt sich an den DINESSCHEN Monatsmitteln der Ausstrahlung bei klarem Himmel, die in Benson bei Oxford gemessen sind.

9. Nach SIMPSONS Daten sendet der Wasserdampf in der Stratosphäre nach oben und unten eine eigene langwellige Temperaturstrahlung von 0,12 cal/qcm min., also mehr als 43% der effektiven Sonnenstrahlung in unseren Breiten. Dieses Ergebnis weicht von den früheren Arbeiten ab, stimmt aber zu den Beobachtungen von ÄNGSTRÖM, der in Höhen von 4-5 km noch Gegenstrahlung von 0,13-0,16 maß.

10. In der dritten Arbeit ist die geographische Verteilung der Ein- und Ausstrahlung im Januar und Juli

bestimmt und auf Erdkarten dargestellt; außerdem sind für jeden Monat die Mittelwerte für 10°-Zonen berechnet. Auch hierbei ergibt sich, daß die ausgehende Strahlung zeitlich und räumlich recht gleichförmig ist, und daß sich, von kleinen ungewissen Betrag abgesehen, die Ein- und Ausstrahlung für die Erde als Ganzes zu jeder Jahreszeit das Gleichgewicht halten.

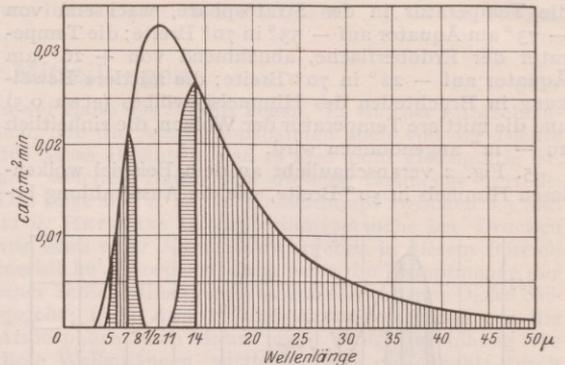


Fig. 3. Zur Berechnung der nächtlichen Gegenstrahlung der Atmosphäre.

11. Wenn die Solarkonstante um 1% wüchse, so müßte sich auch der Strahlungshaushalt der Erde ändern. SIMPSON rechnet aus, um wieviel sich je eine der drei wesentlichen Größen ändern müßte, wenn sie allein das Gleichgewicht herstellen sollte: die Temperatur der Erdoberfläche müßte um 2° steigen, oder die Temperatur der Stratosphäre müßte um 1,5° steigen, oder die mittlere Bewölkung müßte um 0,01 des ganzen Himmelsgewölbes zunehmen.

Die starke Wirkung einer verhältnismäßig schwachen Bewölkungszunahme ist damit zu erklären, daß sich zwar die Ausstrahlung etwas vermindert, daß aber gleichzeitig mehr Sonnenstrahlung reflektiert wird, was den Ausschlag gibt. SIMPSON hält es für möglich, daß die Eiszeit in unseren Breiten bei erhöhter Sonnenstrahlung eingetreten ist, indem sich die Zirkulation der Atmosphäre verstärkte und stärkere Bewölkung und stärkere Niederschläge eintraten. Kühle, trübe Sommer verhindern das Schmelzen, starker Schneefall im Winter ernährt die Gletscher.

Trotz vieler vereinfachender Annahmen entwickelt SIMPSON eine Auffassung vom Strahlungshaushalt der Erde, der gegenüber dem bisherigen Stand einen Fortschritt bedeutet. Auch verfeinerte Behandlung wird vermutlich die Ergebnisse in großen Zügen bestätigen.

J. BARTELS.

Literatur:

- G. C. SIMPSON, Mem. Roy. Meteor. Soc. London 2, Nr 16, 69-95 (1928); 3, Nr 21, 1-26 (1928); 3, Nr 23, 53-78 (1929); Diskussion: Quart. J. Roy. Meteor. Soc. London 55, 73-79 (1929).
R. MÜGGE, Z. f. Geophysik 2, 63-69 (1926); Meteorol. Z. 45, 316-317 (1928).
A. DEFANT, Geografiska Annaler (Stockholm) 209 bis 266 (1921).