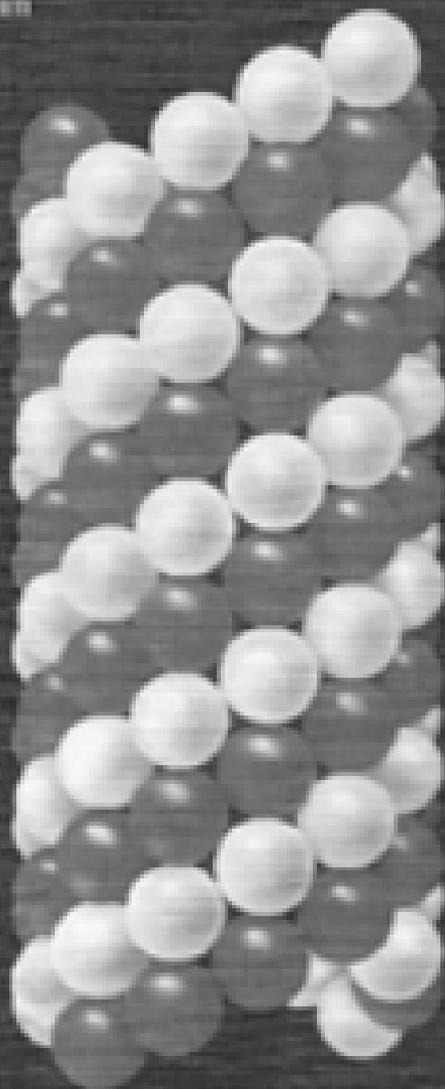


mannheimer forum

Ein Panorama der
Naturwissenschaften

75/76

Boehringer Mannheim
GmbH, Mannheim





mannheimer forum

75/76

Ein Panorama
der Naturwissenschaften

zusammengestellt und redigiert von
Prof. Dr. HOIMAR V. DITFURTH

Boehringer Mannheim GmbH, Mannheim



Mannheimer Forum 75/76
Erschienen in der Studienreihe
Boehringer Mannheim

- © Boehringer Mannheim GmbH, Mannheim
Alle Rechte vorbehalten
Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet

Herstellungsleitung: Hilmar Vogt, Mannheim
Buch Design und Grafik: Erwin Poell, Heidelberg
Papier: Papierfabrik Scheufelen, Oberlenningen
Satz und Druck: Mannheimer Morgen
Großdruckerei und Verlag GmbH, Mannheim
Bindearbeiten: Hollmann KG, Darmstadt

*TITELBILD: Strukturmodell eines »Skelettstabes«
der Zelle: Globuläre Protein-Einheiten bilden einen
Mikrotubulus, der sich beliebig verlängern oder
verkürzen kann. Mikrotubuli spielen in der Dynamik
lebender Zellen eine wichtige Rolle
(s. Seiten 76 und 78).*

Vorwort

Mit einem gewissen Stolz können wir unseren Lesern in diesem Jahr als Eröffnungsbeitrag einen Aufsatz von SIR KARL POPPER präsentieren, dem bedeutendsten lebenden Wissenschaftstheoretiker. Sein Thema ist die klassische Frage des Pilatus. PETER SITTE erörtert in seinem Beitrag physiologische und evolutionistische Aspekte anhand neuester molekularbiologischer und elektronenoptischer Erkenntnisse über die Feinstruktur der Zelle. KENNETH H. HSÜ berichtet aus erster Hand über eine revolutionierende geologische Entdeckung, und der abschließende Aufsatz von WOLFHARD SCHLOSSER setzt die »Tradition« der bisherigen Bände dieser Reihe insofern fort, als er einem astronomisch-archäologischen Thema gewidmet ist.

Die Zuschriften, die uns nach dem letztjährigen Vorwort erreichten, haben uns gezeigt, daß unsere Leser diese regelmäßige Einbeziehung archäologischer Themen zu begrüßen scheinen. Wir werden das auch bei der Themenauswahl für die kommenden Bände berücksichtigen.

Hoimar v. Ditfurth

Inhalt

- Karl R. Popper**
**Von den Quellen unseres Wissens
und unserer Unwissenheit** 9

*Läßt sich »Wahrheit« erkennen? Können wir wissen,
ob unser Wissen »wahr« ist? Welche Wege führen zu
»wahrer« Erkenntnis?*

- Peter Sitte**
**Zelluläres und Molekulares:
Biologie der Minimal-Organismen** 55

*Biochemische und elektronenoptische Befunde eröffnen
neue Einblicke in den Feinbau der Zellorganelle und da-
mit in den Zusammenhang von Struktur und Funktion.*

- Kenneth J. Hsü**
Als das Mittelmeer eine Wüste war 119

*Bericht über eine Forschungsreise, die zu einer revolutio-
nierenden geologischen Entdeckung führte.*

- Wolfhard Schlosser**
Sterne und Steine 173

*Urtümliche Formen der Astronomie und Zeitbestimmung
von der Steinzeit bis heute.*

»Von allen politischen Ideen ist der Wunsch, die Menschen vollkommen und glücklich zu machen, vielleicht am gefährlichsten. Der Versuch, den Himmel auf Erden zu verwirklichen, produzierte stets die Hölle«. Der Mann, der, in Anlehnung an einen Ausspruch Hölderlins, dieses politische Glaubensbekenntnis formulierte, SIR KARL RAIMUND POPPER, wurde 1902 in Wien geboren. Nach eigenem Zeugnis wurde er mit 13 Jahren Marxist, bis er 4 Jahre später ein Schlüsselerlebnis hatte: bei einer unbewaffneten Demonstration, an der er teilnahm, wurden einige junge Arbeiter von der Polizei erschossen.

Die Erschütterung durch dieses Erlebnis wurde für Popper zum Anlaß, die Frage zu untersuchen, ob es Lehren, Gedankensysteme oder wissenschaftliche Erkenntnisse gebe, deren Wahrheit so eindeutig bewiesen werden könne, daß die Forderung berechtigt sei, sie bedingungslos anzuerkennen und um jeden Preis (notfalls auch den des eigenen Lebens) zu verfechten. 15 Jahre später legte er, noch als Hauptschullehrer in Wien, in seinem Buch »Logik der Forschung« die Antwort nieder, die er gefunden hatte. Er begründete, warum sich die Wahrheit selbst einer wissenschaftlichen Aussage in Wirklichkeit niemals positiv beweisen lasse, und gab die Kriterien an, an denen wissenschaftlicher Fortschritt unter diesen Umständen gemessen werden könne.

Das Buch zählt heute zu den Grundlagen der modernen Wissenschaftstheorie und »verschlug« (Popper) den 32jährigen in die Universitätslaufbahn. Kurz nach der Veröffentlichung emigrierte der Autor. Von 1936 bis 1945 lehrte er als Philosoph an der Universität von Neuseeland, anschließend bis zu seiner 1969 erfolgten Emeritierung an der Londoner Universität. Die in diesen Jahren veröffentlichten Bücher und Aufsätze ließen den 1965 geadelten Emigranten im englischen Sprachgebiet zu dem am meisten beachteten und wohl auch einflußreichsten zeitgenössischen Philosophen werden und verschafften ihm darüber hinaus den Ruf des führenden Wissenschaftstheoretikers unserer Zeit.

In der Bundesrepublik ist Poppers Bedeutung außerhalb der philosophischen Fakultäten noch kaum erkannt worden. Erst in letzter Zeit beginnt das Interesse an diesem vielseitigen und anregenden Denker auch bei uns in verschiedenen Kreisen zu erwachen. Eine der Ursachen dieser befremdlichen Verzögerung ist vielleicht in dem Umstand zu sehen, daß Popper anläßlich einer inzwischen 15 Jahre zurückliegenden Auseinandersetzung mit Vertretern der »Frankfurter Schule« das vereinfachende Etikett eines »Positivisten« umgehängt wurde, eine Rubrizierung, die auch dadurch nicht zutreffender geworden ist, daß sie seitdem ein Autor vom anderen übernimmt. Wie unsinnig sie in Wirklichkeit ist, zeigt auch der hier vorgelegte Aufsatz, der ursprünglich als Vortrag für die Britische Akademie ausgearbeitet wurde und den Popper auf Wunsch der Redaktion für dieses Jahrbuch übersetzt und revidiert hat. In ihm unterzieht der Autor (wie schon bei zahlreichen früheren Gelegenheiten) gerade die verschiedenen Spielarten des Empirismus einer schonungslosen Kritik.

Von den Quellen unseres Wissens und unserer Unwissenheit

Karl R. POPPER

*Daraus folgt, daß die Wahrheit sich selbst
offenbart.* Benedictus DE SPINOZA

*Jeder Mensch besitzt einen unfehlbaren
Prüfstein, der es ihm ermöglicht . . . , die
Wahrheit vom bloßen Schein zu unterscheiden.*
John LOCKE

*. . . Wir sind nicht imstande, an etwas zu
denken, was wir nicht vorher empfunden
haben, sei es durch unsere äußeren oder un-
sere inneren Sinne.* David HUME

Der Titel meines Aufsatzes wird, fürchte ich, empfindliche Ohren verletzen. Denn obwohl man von den Quellen des Wissens sprechen kann, und auch von den Quellen des Irrtums, so klingt doch die Phrase »Quellen der Unwissenheit« vielleicht ein wenig befremdend. »Unwissenheit ist doch etwas Negatives: Ein Nicht-Vorhandensein von Wissen. Aber kann denn ein Nicht-Vorhandensein eine Quelle haben?« So fragte mich ein Freund, als ich ihm den Titel mitteilte. Etwas verlegen, improvisierte ich eine Erklärung. Ich setzte ihm auseinander, daß ich diesen absonderlich klingenden Titel deshalb gewählt hatte, weil mir darum zu tun war, durch seine Formulierung die Aufmerksamkeit auf eine Anzahl bisher unbeachtet gebliebener philosophischer Theorien zu lenken. Zu diesen gehöre nicht nur die Lehre, daß die *Wahrheit offenbar ist* (das heißt, klar zu Tage liegend und unverkennbar), sondern auch die *Verschwörungstheorie der Unwissenheit*: eine Theorie, die besagt, daß die Unwissenheit oder der Irrtum nicht bloß ein Nicht-Vorhandensein von Wissen ist, sondern das Werk

von finsternen Mächten, Quellen von unreinen und bössartigen Einflüssen, die unsern Geist vergiften und vernebeln und uns einen Widerstand gegen alle Erkenntnis einpflanzen.

Ich bin nicht sicher, ob diese Erklärung meinen Freund befriedigte; jedenfalls schwieg er. Die Leser dieses Aufsatzes haben zu einer Erwiderung nicht die Gelegenheit. So kann ich nur hoffen, ihre etwaigen Bedenken soweit beschwichtigt zu haben, daß sie mir gestatten, am andern Ende anzufangen; das heißt, mit den Quellen unseres Wissens. Auf die Quellen unserer Unwissenheit werde ich aber bald zurückkommen und auch auf die Verschwörungstheorie der Unwissenheit, die ich soeben erwähnt habe.

I

Das philosophische Problem, das ich in diesem Beitrag untersuchen möchte und das ich nicht nur zu untersuchen, sondern auch zu lösen hoffe, spielt eine wichtige Rolle in dem alten Streit zwischen den philosophischen Schulen Großbritanniens und denen des europäischen Kontinents: zwischen dem klassischen Empirismus von BACON, LOCKE, BERKELEY, HUME und MILL, und dem klassischen Rationalismus oder Intellektualismus von DESCARTES, SPINOZA und LEIBNIZ. In diesem Streit verteidigten die Engländer die Ansicht, die letzte Quelle aller Erkenntnis sei die Beobachtung; und ihre Gegner, die Quelle der Erkenntnis sei die intellektuelle Anschauung von klaren und deutlichen Vorstellungen.

Die meisten dieser Fragen sind heute noch weit offen. Der Empirismus hat nicht nur von England aus, wo er noch immer die herrschende Meinung ist, Amerika erobert: er wird heute auch in Europa weitgehend für die wahre Theorie der Erkenntnis gehalten. Und der Intellektualismus von DESCARTES ist leider nur allzu oft in die eine oder die andere der modernen Formen des Irrationalismus verdreht worden.

Ich will hier versuchen zu zeigen, daß die Gegensätze dieser beiden Schulen, des Empirismus und des Rationalismus, weniger groß sind als ihre Berührungspunkte, und daß beide Schulen irren. Ich glaube, daß ihre Lehren falsch sind, obwohl ich mich selbst in einem gewissen Sinn als einen Empiriker und auch als einen Rationalisten bezeichnen könnte. Denn obwohl ich überzeugt bin, daß sowohl die Beobachtung wie auch der Intellekt eine

wichtige Rolle zu spielen haben, so glaube ich, daß diese Rollen ganz andere sind als die, die ihre klassischen Vertreter ihnen zugeschrieben haben. Im besondern möchte ich versuchen zu zeigen, daß *weder Beobachtung noch Intellekt Quellen der Erkenntnis* sind – in dem Sinn, in dem dies behauptet wurde und noch behauptet wird.

II

Unser Problem gehört ins Gebiet der Erkenntnistheorie oder Wissenschaftslehre, also in ein Gebiet, das in dem Ruf steht, der abstrakteste, wenn nicht der abstruseste und überhaupt irrelevanteste Teil der Philosophie zu sein. Zum Beispiel fürchtete David HUME, einer der größten Denker auf diesem Gebiet, daß seine eigenen Schlußfolgerungen so abstrakt seien, so abstrus und so irrelevant für das wirkliche Leben, daß keiner seiner Leser ihnen mehr als eine Stunde lang Glauben schenken würde.

KANTS Einstellung war eine ganz andere. Er meinte, die Frage: »Was können wir wissen?« sei eine der drei wichtigsten philosophischen Fragen überhaupt. Einen ähnlichen Standpunkt scheint auch Bertrand RUSSELL einzunehmen, obwohl er in seinem philosophischen Temperament HUME näher steht als KANT. Ich stimme RUSSELL zu, wenn er behauptet, erkenntnistheoretische Anschauungen hätten große praktische Bedeutung für die exakten Naturwissenschaften, für die Ethik und sogar für die Politik; und daß der erkenntnistheoretische Relativismus, die Lehre, es gebe keine objektive Wahrheit, und der erkenntnistheoretische Pragmatismus, die Lehre, daß Wahrheit gleichbedeutend sei mit Nützlichkeit, mit autoritären und totalitären Ideen aufs engste verknüpft seien (Bertrand RUSSELL, *Let the People Think*, 1941, S. 77ff.).

Diese Ansichten von RUSSELL sind nicht unbestritten. Einige moderne Philosophen lehren die gänzliche Unwirksamkeit und praktische Bedeutungslosigkeit aller echten Philosophie, und man muß annehmen, daß damit auch die Erkenntnistheorie gemeint ist. Sie behaupten, es liege im Wesen der Philosophie, daß sie keine Folgen von praktischer oder auch nur theoretischer Bedeutung haben könne und sie könne daher weder Wissenschaft noch Politik beeinflussen. Ich dagegen glaube, daß Ideen etwas Mächtiges

und Gefährliches sind und daß sogar Philosophien hie und da so etwas wie Ideen hervorgebracht haben. Und ich bin fest überzeugt, daß diese moderne Lehre von der Ohnmacht aller Philosophie mit den Tatsachen im Widerspruch steht.

Die Sache ist im Grunde recht einfach. Die liberale Weltanschauung, das heißt der Glaube an die Möglichkeit eines Rechtsstaats, an gleiches Recht für alle, an allgemeine grundlegende rechtliche Prinzipien und an eine freie Gesellschaft, ist durchaus vereinbar mit der Einsicht, daß Richter nicht allwissend sind, daß sie über die Tatsachen im Irrtum sein können und daß, praktisch gesehen, kaum je in einem individuellen Rechtsstreit absolute Gerechtigkeit verwirklicht wird. Aber ein solcher Glaube an die Durchführbarkeit eines Rechtsstaats und an die Möglichkeit von Freiheit und Gerechtigkeit ist kaum vereinbar mit einer Erkenntnistheorie, die lehrt, daß es objektive Tatsachen überhaupt nicht gebe: weder in diesem speziellen Falle, noch in einem andern; und daß der Richter sich über die Tatsachen schon deshalb gar nicht irren könne, weil man Tatsachen ebensowenig falsch beurteilen könne wie richtig.

III

Die große Freiheitsbewegung, die in der Renaissance begann und die nach den Wirren der Reformationszeit und der Religions- und Bürgerkriege zu jenen freien Gesellschaftsformen führte, unter denen heute die angelsächsischen Völker leben, war von einem einzigartigen erkenntnistheoretischen Optimismus getragen: von dem optimistischen Glauben, daß der Mensch die Kraft habe, die Wahrheit zu erfassen und Wissen zu erwerben.

Das Kernstück dieser neuen optimistischen Auffassung von der Möglichkeit der Erkenntnis ist die Lehre, daß die *Wahrheit offenbar ist*. Die Wahrheit mag vielleicht verschleiert sein; aber sie kann sich uns enthüllen. Und wenn sie sich nicht von selbst enthüllt, kann sie von uns enthüllt werden. Es mag nicht immer leicht sein, den Schleier zu heben; aber wenn die Wahrheit vor uns steht, nackt und unverhüllt, so haben wir die Gabe, sie zu erkennen, sie von der Falschheit zu unterscheiden, und zu wissen, daß sie die Wahrheit ist.

Die moderne Wissenschaft und Technik verdankt ihre Entste-

hung dieser optimistischen Erkenntnistheorie, die ihre wichtigsten Vorkämpfer in BACON und in DESCARTES hatte. Sie lehrten, daß niemand es nötig habe, sich auf eine Autorität zu berufen, da jeder Mensch die Quellen der Erkenntnis in sich trage: entweder in seiner Fähigkeit zur sinnlichen Wahrnehmung, die ihm eine sorgfältige Beobachtung der Natur ermögliche, oder in seiner Fähigkeit zur intellektuellen Anschauung, die es ihm ermöglicht, Wahres von Falschem dadurch zu unterscheiden, daß er alle Ideen ablehnt, die nicht von seinem Intellekt klar und deutlich wahrgenommen werden.

Der Mensch kann die Wahrheit erkennen: daher kann er frei sein. Hier haben wir die Gedankenbrücke vor uns, die den erkenntnistheoretischen Optimismus mit den Ideen des Liberalismus verbindet.

Im umgekehrten Fall ist es ganz ähnlich. Der Zweifel an der menschlichen Vernunft, an der Fähigkeit des Menschen, die Wahrheit zu erkennen, ist fast immer aufs engste verknüpft mit einem tiefen Mißtrauen an der Natur des Menschen. Historisch steht der erkenntnistheoretische Pessimismus daher im Zusammenhang mit der Lehre, daß der Mensch im Grunde seines Herzens verdorben ist. Er führt darum leicht zur Forderung nach der Verankerung von machtvollen Traditionen und Autoritäten, die die Menschen vor den Folgen ihrer Torheit und Verworfenheit bewahren können. (Eine großartige Darstellung dieser Theorie und der Bürde, mit der sie die Träger der Autorität belastet, findet sich in der berühmten Episode vom Großinquisitor in DOSTOJEWSKIS »Die Brüder Karamasow«.)

Der Gegensatz zwischen erkenntnistheoretischem Pessimismus und Optimismus deckt sich im wesentlichen mit dem zwischen erkenntnistheoretischem Traditionalismus und Rationalismus. (Den Ausdruck Rationalismus verwende ich hier in einem Sinn, in dem er im Gegensatz zum Irrationalismus steht; das heißt in einem Sinn, der sowohl den Intellektualismus des DESCARTES wie auch den Empirismus umfaßt.) Denn den Traditionalismus können wir als die Ansicht auffassen, daß es eine objektive und klar erkennbare Wahrheit nicht gibt, und daß wir daher nur die Wahl haben zwischen der Autorität der Überlieferung und dem Chaos. Der Rationalismus aber hat für die Vernunft und für die empirische Wissenschaft immer das Recht beansprucht, jede Überliefe-

rung und jede Autorität kritisch zu überprüfen und sie abzulehnen, wenn sie auf Unvernunft, Vorurteil oder Zufall gegründet war.

IV

Es ist beunruhigend, daß selbst die Lehren der reinen Erkenntnistheorie durchaus nicht so rein sind, wie man vielleicht glauben sollte (und wie ARISTOTELES tatsächlich dachte), und daß sie oft unbewußt von politischen Ideen und utopischen Träumen beeinflusst sind: eine Warnung für jeden Erkenntnistheoretiker. Aber was kann man dagegen tun? Als Erkenntnistheoretiker gibt es für mich nur ein Ziel: den Problemen der Erkenntnistheorie auf den Grund zu gehen und sie auf ihre Wahrheit zu prüfen, gleichgültig, ob diese Wahrheit mit meinen politischen Überzeugungen übereinstimmt oder nicht. Aber die Frage ist eben, ob nicht die Gefahr besteht, daß meine politischen Hoffnungen und Anschauungen mich unbewußt beeinflussen.

Nun bin ich aber nicht nur ein angehender Empirist und Rationalist, sondern auch ein Liberaler (im englischen Sinn dieses Wortes). Aber eben weil ich ein Liberaler bin, bin ich überzeugt, daß es für einen Liberalen kaum etwas Wichtigeres gibt als die Ideen, auf die seine liberale Weltanschauung sich gründet, einer radikalen kritischen Prüfung zu unterwerfen.

Im Zuge einer solchen kritischen Prüfung wurde mir die Rolle klar, die gewisse erkenntnistheoretische Theorien in der Entwicklung der liberalen Ideen gespielt haben, insbesondere der erkenntnistheoretische Optimismus in seinen verschiedenen Formen. Als Erkenntnistheoretiker mußte ich diese Theorien als unhaltbar ablehnen. Das zeigt, daß unsere Wünsche und Hoffnungen durchaus nicht die Resultate unseres Denkens bestimmen müssen; und daß wir in der Suche nach Wahrheit am besten damit beginnen, die Ansichten, die uns am meisten bedeuten, einer strengen Kritik zu unterwerfen. Manchen wird das vielleicht als pervers erscheinen; aber nicht denen, die nach der Wahrheit suchen und sich vor ihr nicht fürchten.

V

Bei meiner Beschäftigung mit der optimistischen Erkenntnistheorie und deren Zusammenhang mit gewissen liberalen Ideen stieß ich auf einen Komplex von Theorien, die oft stillschweigend akzeptiert werden, obwohl sie meines Wissens bisher weder von Philosophen noch von Historikern diskutiert oder auch nur bemerkt worden sind. Die wichtigste dieser Theorien ist die Lehre, daß die Wahrheit offenbar ist. Die seltsamste ist jene Verschwörungstheorie der Unwissenheit, die ein bizarrer Auswuchs der Theorie von der offenbaren Wahrheit ist.

Wie man sich erinnern wird, verstehe ich unter der Lehre, daß die Wahrheit offenbar ist, die optimistische Überzeugung, daß die Wahrheit, wenn sie nackt und unverhüllt vor uns gestellt wird, immer als Wahrheit erkannt wird. Wenn sich die Wahrheit nicht selbst offenbart, genügt es, daß sie ent-hüllt oder ent-deckt werde. Ist das geschehen, so bedarf es weiter keiner Argumente. Wir haben Augen, um die Wahrheit zu sehen, und das »natürliche Licht« der Vernunft, um sie zu erhellen.

Das ist der Kernpunkt der Lehre von DESCARTES und auch der von BACON. DESCARTES verteidigte seine optimistische Erkenntnistheorie als eine notwendige Folge der Lehre von der *veracitas dei*: was wir klar und deutlich als wahr erkennen, *muß* wahr sein; denn sonst würde Gott uns täuschen. Die Wahrheitsliebe Gottes bringt es mit sich, daß die Wahrheit unverkennbar ist und offenbar. BACONS Theorie ist im Grunde ähnlich. Man könnte sie als die Doktrin von der *veracitas naturae* bezeichnen, oder von der Wahrhaftigkeit der Natur. Die Natur ist ein offenes Buch. Wer reinen Sinnes darin liest, kann es nicht mißverstehen. Nur der, dessen Sinn von Vorurteilen getrübt ist, kann in *Irrtum* verfallen.

Wie meine letzte Bemerkung andeutet, schafft die Lehre, daß die Wahrheit offenbar ist, das Bedürfnis, den Irrtum zu erklären. Der Besitz der Wahrheit bedarf keiner Erklärung. Aber wie ist es möglich, in Irrtum zu verfallen, wenn die Wahrheit offen zutage liegt? Die Antwort lautet: durch unsere sündhafte Weigerung, die offenbare Wahrheit zu sehen; oder weil unser Geist von Vorurteilen erfüllt ist, die falsche Erziehung und Überlieferung uns eingepägt haben; oder weil andere böse Einflüsse unseren Geist, der ursprünglich rein und unschuldig war, verdorben haben. So kann

die Unwissenheit das Werk dunkler Mächte sein, die sich gegen uns verschworen haben, um uns in Unwissenheit zu erhalten, um unseren Geist mit falschen Lehren zu vergiften, und um uns zu verblenden, so daß wir die offenbare Wahrheit nicht sehen können. Solche Vorurteile und solche bösen Mächte sind dann eben die Quellen unserer Unwissenheit, unseres Irrtums.

Die Verschwörungstheorie der Unwissenheit in ihrer marxistischen Form ist bekannt: die kapitalistische Presse unterdrückt die Wahrheit und füllt die Gehirne der Arbeiterschaft mit falschen Ideologien. Die wichtigste dieser Ideologien ist natürlich die der Religion. Es ist merkwürdig, wie wenig originell diese marxistische Theorie ist. Die Figur des Dunkelmannes, des trügerischen Pfaffen, der das Volk in Unwissenheit hält, war im 18. Jahrhundert eine beliebte Schablone und, wie ich fürchte, eine der Inspirationen des Liberalismus. Man kann die Theorie aber noch weiter zurückverfolgen zu dem Glauben der Protestanten an eine papistische Verschwörung der römischen Kirche oder, in England, zu dem entsprechenden Glauben der protestantischen Sekten in bezug auf die anglikanische Staatskirche.

Dieser sonderbare Glaube an eine Verschwörung folgt fast unausweichlich aus der optimistischen Überzeugung, daß das Wahre und daher auch das Gute in einem ehrlichen Kampf siegen muß. »Lasset nur Wahrheit und Falschheit miteinander ringen: wer hat je erlebt, daß die Wahrheit im offenen, ehrlichen Kampf unterlegen wäre?« (MILTONS *Aeropagitica*. Oder man denke an das französische Sprichwort: *La vérité triomphe toujours*.) Als daher MILTONS Wahrheit unterlag, konnte er daraus nur die eine Folgerung ziehen, daß der Kampf eben nicht offen und ehrlich gewesen sei. Wenn die offenbare Wahrheit nicht den Sieg behält, muß sie in tückischer Weise unterdrückt worden sein. Man sieht, daß eine tolerante Haltung, die sich auf den optimistischen Glauben an den unausweichlichen Sieg der Wahrheit gründet, sehr leicht erschüttert werden kann. Denn ein solcher Glaube kann leicht in eine Verschwörungstheorie umschlagen, die mit einer toleranten Haltung schwer vereinbar ist.

Ich will nicht behaupten, daß in dieser Verschwörungstheorie nie ein Körnchen Wahrheit gesteckt hat. Im wesentlichen war sie aber ein Mythos, ebenso wie die Theorie von der offenbaren Wahrheit, aus der sie herauswuchs, ein Mythos war.

Denn die Wahrheit ist, in Wahrheit, oft sehr schwer zu finden, und selbst wenn man sie gefunden hat, geht sie nur allzu leicht wieder verloren. Irrtümer haben oft ein ganz erstaunlich zähes Leben, sie können aller Erfahrung zum Trotz Jahrtausende überdauern, mit oder ohne Verschwörung. In der Geschichte der Naturwissenschaften, und ganz besonders in der Geschichte der Medizin, ließen sich eine Menge interessanter Beispiele finden. Ein gutes Beispiel ist die Verschwörungstheorie selbst, der falsche Glaube, daß alles Schlimme, das geschieht, dem bösen Willen einer bösen Macht entspringt. Dieser Glaube hat sich in mehr als einer Form bis heute erhalten.

Die optimistische Erkenntnistheorie von BACON und DESCARTES kann also nicht wahr sein. Aber das merkwürdigste an dieser Geschichte ist, daß diese falsche Erkenntnislehre der Ausgangspunkt einer geistigen und moralischen Revolution war, die in der Geschichte einzig dasteht. Sie ermutigte die Menschen, selbst zu denken. Sie gab ihnen die Hoffnung, daß es möglich ist, sich und andere durch Wissen von Knechtschaft und Elend zu befreien. Sie machte die Entstehung der modernen Naturwissenschaft möglich. Sie wurde die Grundlage des Kampfes gegen Zensur und Gewissenszwang. Aus ihr entsprang das puritanische Gewissen, der Individualismus, der Glaube an Menschenwürde; der Drang nach allgemeiner Bildung, und eine neue Vision einer freien Gesellschaft. Sie führte zum Bewußtsein der Verantwortung des Menschen für sich selbst und seine Mitmenschen, zu dem Streben, nicht nur das eigene Los, sondern auch das der anderen zu verbessern. Wir haben hier ein Beispiel dafür, daß eine verfehlte Idee eine Fülle von Gutem erzeugen kann.

VI

Diese verfehlte Erkenntnislehre hat aber auch verhängnisvolle Folgen gehabt. Die Lehre, daß die Wahrheit offenbar ist – daß jeder sie sehen kann, der den Willen hat, sie zu sehen – hat zu allen möglichen Formen des Fanatismus geführt. Denn nur wer ganz und gar verworfen ist, kann sich weigern, die offenbare Wahrheit anzuerkennen: die Verschwörer gegen die Wahrheit haben jedenfalls guten Grund, die Wahrheit zu fürchten.

Die Theorie, daß die Wahrheit offenbar ist, erzeugt aber nicht

bloß Fanatiker – Menschen, die von der Überzeugung besessen sind, daß jeder, der die offenbare Wahrheit nicht anerkennt, vom Teufel besessen sein müsse – sie kann auch, wenngleich weniger direkt als eine pessimistische Erkenntnislehre, zu einer autoritären Auffassung von der Gesellschaft führen. Das kommt davon, daß die Wahrheit im allgemeinen eben nicht offenbar ist. Daher bedarf die angeblich offenbare Wahrheit dringend nicht nur ständiger Auslegung und Bestätigung, sie bedarf auch stets *neuer* Auslegungen und *neuer* Bestätigungen. Dazu braucht man eine Macht, eine Autorität, die sozusagen von Tag zu Tag feststellt und öffentlich verkündet, was als offenbare Wahrheit zu gelten hat; und mit der Zeit wird die Autorität das willkürlich und zynisch tun. Unter solchen Umständen werden sich dann manche Erkenntnistheoretiker von ihrem früheren Optimismus enttäuscht abwenden und auf der Basis einer pessimistischen Erkenntnislehre ein großartiges autoritäres Lehrgebäude errichten. Ich glaube, daß PLATON, der größte aller Erkenntnistheoretiker, ein Beispiel ist für eine solche tragische Entwicklung.

VII

PLATON spielt eine entscheidende Rolle in der Vorgeschichte der Lehre DESCARTES' von der *veracitas dei*, der Lehre, daß unsere intellektuelle Anschauung uns nicht täuscht, weil Gott wahrhaftig ist und uns nicht täuschen wird; oder anders ausgedrückt, daß unser Intellekt eine Quelle der Erkenntnis ist, weil Gott eine Quelle der Erkenntnis ist. Diese Lehre ist schon sehr alt. Wir können sie ohne Schwierigkeiten bis HOMER und HESIOD zurückverfolgen und sogar noch weiter.

Wenn Gelehrte und Historiker sich auf Quellen berufen, so erscheint uns das ganz natürlich; aber es überrascht vielleicht, zu finden, daß dieser Brauch von den Dichtern herrührt. Aber so ist es. Die griechischen Dichter berufen sich auf ihre Quellen, und die Quellen ihres Wissens sind göttlicher Natur. Es sind die Musen. »Die griechischen Sänger«, so bemerkt Gilbert MURRAY, »verdanken den Musen nicht nur, was wir ihre Inspiration nennen würden, sondern auch ihre Kenntnis der Tatsachen selbst. Die Musen sind »allgegenwärtig und allwissend« . . . HESIOD . . . betont immer wieder, daß sein Wissen von den Musen stammt. Ge-

weiß erkennt er auch andere Quellen der Erkenntnis an . . . Aber meistens befragt er die Musen . . . HOMER tut das gleiche, zum Beispiel für den Schiffskatalog.«

Wie aus diesem Bericht hervorgeht, pflegten sich die Dichter nicht nur auf göttliche Quellen ihrer Inspiration zu berufen, sondern ebenso sehr auf göttliche Quellen ihres Wissens – auf göttliche Zeugen, die für die Wahrheit des Erzählten bürgen.

Beide Ansprüche finden wir auch bei den Philosophen HERAKLIT und PARMENIDES. HERAKLIT scheint sich selbst für einen Propheten gehalten zu haben, der »rasenden Mundes redet, . . . vom Gott getrieben«; das heißt von ZEUS, der Quelle aller Weisheit. PARMENIDES stellt gleichsam die Verbindung her zwischen HOMER und HESIOD auf der einen Seite und DESCARTES auf der anderen. Der Leitstern, der ihn inspiriert, ist die Göttin DIKE, die HERAKLIT als die Wächterin der Wahrheit preist. Für PARMENIDES ist sie die Wächterin und Hüterin des Schlüssels der Wahrheit, und die Quelle all seines Wissens. Aber die Ähnlichkeit zwischen den Lehren des DESCARTES und denen des PARMENIDES geht über den Glauben an die Wahrhaftigkeit der Gottheit hinaus. Zum Beispiel lehrt den PARMENIDES die Göttin, die ihm für die Wahrheit bürgt, daß er sich bei der Unterscheidung des Wahren vom Falschen ausschließlich nur auf seinen Intellekt verlassen darf; das heißt, daß er den Gesichts-, Gehör- und Geschmacksinn ausschließen muß. Und sogar das Grundprinzip seiner Physik, die er, genau wie DESCARTES, auf seine intellektualistische Erkenntnislehre gründet, stimmt mit dem von DESCARTES überein: beide glauben an die Unmöglichkeit eines Vakuums und an die Notwendigkeit einer »vollen« Welt.

In PLATONS *Ion* wird ähnlich scharf unterschieden zwischen göttlicher Eingebung – der göttlichen Raserei des Dichters – und den göttlichen Quellen, dem göttlichen Ursprung aller wahren Erkenntnis. PLATON gibt zu, daß die Dichter inspiriert sind; aber hinsichtlich der Tatsachen, die sie zu wissen vorgeben, lehnt er jede Berufung auf göttliche Autorität ab. Nichtsdestoweniger spielt die Lehre vom göttlichen Ursprung unseres Wissens eine entscheidende Rolle in PLATONS berühmter Theorie der *Anamnese*, eine Theorie, die jedem Menschen den Besitz göttlicher Quellen der Erkenntnis zuspricht. (Die Erkenntnis, um die es sich hier handelt, ist die Erkenntnis des *Wesens*, der wahren *Natur* einer

Sache, nicht so sehr das Wissen um bestimmte historische Ereignisse.) PLATON erklärt im *Menon*, daß es keine Dinge gibt, die unsere unsterbliche Seele nicht kennt, aus der Zeit vor der Geburt. Denn da alle Naturen wesensverwandt und einander ähnlich sind, so muß auch unsere Seele allen andern Naturen wesensverwandt sein. Sie kennt sie alle. Wenn wir geboren werden, vergessen wir; aber es ist uns möglich, uns zu erinnern und, wenn auch nur teilweise, unser Wissen wiederzugewinnen: wenn wir die Wahrheit wieder vor Augen haben, dann erkennen wir sie wieder. Alles Erkennen ist daher ein Wieder-Erkennen: Ein Wiederfinden, ein Sich-erinnern an das Wesen und die wahre Natur der Dinge, wie wir sie einst kannten.

Diese Theorie besagt, daß unsere Seele sich in einem göttlichen Zustand der Allwissenheit befindet, solange sie noch nicht geboren ist, und daß sie ein Teil der göttlichen Welt der Ideen ist, der Wesenheiten und der »Naturen«, an der sie Anteil hat. Die Geburt des Menschen ist sein Sündenfall, der Verlust eines natürlichen oder göttlichen Zustandes des Wissens; und daher ist sie der Ursprung und die Ursache seiner Unwissenheit. (Hierin liegt vielleicht der Keim des Gedankens, daß Unwissenheit nicht Unschuld sondern Sünde ist, oder doch der Sünde verwandt.)

Es ist klar, daß diese Lehre von der *Anamnese* und die Lehre vom göttlichen Ursprung unserer Erkenntnis eng miteinander verknüpft sind. Gleichzeitig besteht aber auch ein enger Zusammenhang zwischen der Lehre von der *Anamnese* und der Lehre, daß die Wahrheit offenbar ist: denn wenn wir, auch in unserem elenden Zustand der Erinnerungslosigkeit, die Wahrheit *sehen*, dann können wir nicht umhin, sie als solche zu erkennen. Durch den Akt der Erinnerung, der *Anamnese*, wird die Wahrheit erneut zu dem, was unvergessen und unverborgten ist (*alethes*): Sie ist offenbar – sie liegt klar zu Tage.

SOKRATES zeigt das in einer wunderschönen Stelle im *Menon*, indem er einem jungen ungeschulten Sklaven hilft, sich an den Beweis für einen Spezialfall des pythagoräischen Lehrsatzes »zu erinnern«. Hier haben wir in der Tat eine optimistische Erkenntnistheorie vor uns, und die Wurzel der Cartesianischen Lehre. Es scheint, daß sich PLATON im *Menon* dieses überaus optimistischen Charakters seiner Theorie bewußt war, denn er beschreibt sie als

eine Lehre, die die Menschen anspricht zu lernen, zu forschen und Entdeckungen zu machen.

Aber PLATON muß Enttäuschungen erlebt haben; denn im Staat (und auch im *Phaedros*) finden wir die Ansätze einer pessimistischen Erkenntnislehre. In dem berühmten Gleichnis von den Gefangenen in der Höhle lehrt er, daß die Welt unserer Erfahrungen nichts ist als ein Schatten, eine Spiegelung der wirklichen Welt. Und er zeigt uns, daß selbst wenn einer der Gefangenen aus der Höhle entkommt und der wirklichen Welt gegenübersteht, er fast unüberwindliche Schwierigkeiten haben würde, diese Welt zu erfassen und zu verstehen – von den Schwierigkeiten, sie seinen zurückgebliebenen Gefährten verständlich zu machen, ganz zu schweigen. Diese Schwierigkeiten, die sich dem Verständnis der wirklichen Welt entgegenstellen, sind fast übermenschlich, und nur die Wenigen (ja kaum die) können zu jenem gottähnlichen Zustand der Erkenntnis der wirklichen Welt durchdringen – zum gottähnlichen Zustand wahrer Erkenntnis, zur *Episteme*.

Diese Lehre ist eine pessimistische Theorie in bezug auf fast alle Menschen, wenn auch nicht für alle Menschen ohne Ausnahme. (Denn sie besagt, daß die Wahrheit dennoch von einigen wenigen – den Auserwählten – erreicht werden kann: was diese Auserwählten anlangt, ist die Lehre sogar noch viel optimistischer als die Lehre, daß die Wahrheit offenbar ist.) In den *Gesetzen* erörtert PLATON ausführlich die autoritären und traditionalistischen Schlußfolgerungen aus dieser seiner pessimistischen Theorie.

So finden wir also schon im Werke PLATONS den ersten Umschwung von einer optimistischen zu einer pessimistischen Erkenntnistheorie. Aus diesen beiden Theorien gingen zwei Anschauungen über Staat und Gesellschaft hervor, die zueinander in diametralem Gegensatz stehen: auf der einen Seite ein alle Tradition und Autorität ablehnender, revolutionärer und utopischer Rationalismus wie der von DESCARTES, und auf der andern Seite ein Glaube an Autorität und Tradition.

Diese Entwicklung mag mit der Tatsache zusammenhängen, daß man die Idee eines erkenntnismäßigen Sündenfalls sowohl im Sinne der optimistischen Lehre von der *Anamnese* als auch in einem pessimistischen Sinne auslegen kann.

Im Sinne dieser zweiten Auslegung verdammt jener »Sündenfall« alle Sterblichen – oder fast alle – zum Dunkel der Unwissenheit.

Es kann wohl sein, daß in dem Höhlengleichnis ein Echo anklingt an eine noch ältere Fassung desselben Gedankens (ebenso vielleicht in jener Stelle im *Staat*, die vom Untergang der Stadt handelt, in der die Musen und ihre Lehren nicht mehr geachtet werden). Ich denke an die Lehre des PARMENIDES, daß die Meinungen der Sterblichen nichts sind als Wahn und Blendwerk und daß sie einer verfehlten Übereinkunft oder Konvention entspringen. (Diese Lehre stammt ihrerseits vielleicht von der Doktrin des XENOPHANES, daß alles menschliche Wissen bloß ein Raten ist, und daß auch seine eigenen Theorien im besten Falle nur *der Wahrheit ähnlich* sind.) Die verfehlte Übereinkunft oder Konvention ist sprachlicher Natur: sie besteht darin, daß Dingen, die es nicht gibt, *Namen gegeben werden*. Die Idee eines Sündenfalls der Erkenntnis kommt, wie Karl REINHARDT meinte, vielleicht in jenen Worten der Gottheit zum Ausdruck, die den Übergang darstellen vom Weg der Wahrheit zum Weg der täuschenden Meinung:

Aber auch hören sollst Du wie es kam, daß die täuschende Meinung alles durchdringen konnt', mit Notwendigkeit Geltung erlangend . . .

Und so will ich Dir nun diese Welt, die ganz Schein ist, erklären, so daß Du nimmermehr von den Begriffen der Menschen verführt wirst.

Obwohl der Sündenfall alle Menschen betrifft, so kann dennoch durch einen Akt der Gnade dem Auserwählten die Wahrheit enthüllt werden – sogar die Wahrheit über die unwirkliche Welt des Scheins: die Welt der Täuschungen, Meinungen, konventionellen Vorstellungen und Entscheidungen der Sterblichen; jene Welt des Scheins, die dazu bestimmt ist, für wirklich gehalten und gebiligt zu werden.

Die Offenbarung, die PARMENIDES zuteil geworden war, und seine Überzeugung, daß es den wenigen Auserwählten möglich sei, sicheres Wissen zu erlangen über die unveränderliche Welt der ewigen Wirklichkeit, aber auch über die unwirkliche und sich ständig ändernde Welt der Täuschung und des Scheines, der Wahrheitsähnlichkeit (*verisimilitudo*), war einer der wichtigsten Einflüsse auf PLATONS Philosophie. Schwankend zwischen Hoffnung, Verzweiflung und Resignation kehrt er immer aufs neue zu diesem Thema zurück.

VIII

Was uns nun hier interessiert ist aber die optimistische Erkenntnistheorie PLATONS, die Theorie der Anamnese im *Menon*. Ich glaube, daß sie nicht nur den Keim der Cartesianischen intellektualistischen Theorie der Erkenntnis enthält, sondern auch den Keim der aristotelischen Theorie der Induktion, und auch den der Induktionstheorie BACONS.

Denn *Menons* junger Sklave wird durch SOKRATES' geschicktes Fragen dazu gebracht, sich zu erinnern und jenes vergessene Wissen zurückzugewinnen, das seine Seele vor der Geburt besaß, im Zustand der Allwissenheit. Ich glaube, daß ARISTOTELES mit seiner Behauptung, SOKRATES sei der Erfinder der induktiven Methode, auf jene berühmte sokratische Methode anspielt, die PLATON im *Theaitetos* die »Hebammenkunst« oder *Mäeutik* nennt. Wie mir scheint, verstanden sowohl ARISTOTELES als auch BACON unter »Induktion« weniger den Schluß von den singulären Beobachtungen auf allgemein gültige Gesetze, als vielmehr eine Methode, uns zu dem Punkt zu führen, von dem wir das Wesen oder die Natur einer Sache unmittelbar anschauen und wahrnehmen können. Aber gerade das ist ja, wie wir gesehen haben, auch das Ziel der Mäeutik des SOKRATES: ihr Ziel ist, uns zur *Anamnese* zu verhelfen; und die Anamnese ist eben jener Vorgang, durch den wir die wahre Natur einer Sache erschauen – ihr Wesen, mit dem wir vor unserer Geburt vertraut waren, das heißt vor unserem Sündenfall. Die Ziele von Mäeutik und Induktion sind daher identisch. (Nur nebenbei möchte ich erwähnen, daß nach ARISTOTELES das Ergebnis der Induktion – die unmittelbare Anschauung des Wesens einer Sache – durch eine Definition dieses Wesens ausgedrückt werden sollte.)

Betrachten wir diese beiden Methoden etwas genauer. Die »Hebammenkunst« des SOKRATES besteht im wesentlichen darin, daß er Fragen stellt, die darauf abzielen, Vorurteile zu zerstören, vorgebliches Wissen, das oft der Tradition entstammt oder das gerade Mode ist; und mit falschen Antworten aufzuräumen, die ihren Grund in grundloser Sicherheit haben. SOKRATES selbst gibt nicht vor, zu wissen. Seine Haltung hat ARISTOTELES wie folgt gekennzeichnet: »SOKRATES stellte Fragen, aber gab keine Antworten; denn er gestand, daß er nichts wisse«. Die Mäeutik des So-

KRATES ist daher nicht eine Kunst, die darauf abzielt, uns bestimmte Anschauungen zu lehren, sondern eine, die danach strebt, die Seele des Menschen dem Wahn zu entreißen und sie von Scheinwissen und Vorurteilen zu befreien. Dies erreicht sie, indem sie uns lehrt, unsere eigenen Überzeugungen kritisch anzuzweifeln.

Eine grundsätzlich ähnliche Vorgangsweise bildet aber auch einen Bestandteil von BACONS Methode der Induktion.

IX

Der Rahmen von BACONS Induktionstheorie ist wie folgt: Im *Novum Organum* unterscheidet er zwischen einer richtigen und einer falschen wissenschaftlichen Methode. Die richtige Methode nennt er *interpretatio naturae*, was gewöhnlich mit »Interpretation der Natur« übersetzt wird; und die falsche Methode *anticipatio mentis*, gewöhnlich übersetzt mit »Vorwegnahme des Geistes oder der Phantasie«. Obwohl diese Übersetzungen trivial richtig zu sein scheinen, so sind sie doch ganz irreführend. Was BACON unter *interpretatio naturae* versteht, ist, meine ich, *das Lesen, oder vielleicht noch besser, das Buchstabieren im Buch der Natur*. (In einer berühmten Stelle seines *Il Saggiatore*, Sektion 6, die MARIO BUNGE mir freundlicherweise wieder ins Gedächtnis rief, spricht GALILEI von »jenem großen Buch, das uns vor Augen liegt – ich meine, die Welt«.)

Das Wort »Interpretation« hat heute entschieden eine subjektivistische oder relativistische Tönung. Wenn wir etwa davon sprechen, wie Rudolf SERKIN die Waldstein-Sonate »interpretiert« hat, so bringen wir damit gleichzeitig zum Ausdruck, daß es mehrere Interpretationen gibt, von denen SERKINS Interpretation nur eine ist. Wir wollen damit nicht etwa sagen, daß wir SERKINS Interpretation für die beste, die richtigste, den Intentionen BEETHOVENS am nächsten kommende halten. Aber auch wenn wir uns nicht vorstellen können, daß es eine bessere geben könnte, so zeigt doch unsere Verwendung des Wortes »Interpretation«, daß wir uns des Bestehens anderer Interpretationen, oder Lesarten, bewußt sind, und die Frage offen lassen, ob vielleicht eine oder mehrere von diesen denselben Anspruch auf Autorität haben. Ich habe hier »Lesart« als ein Synonym für »Interpretation« ge-

braucht, nicht nur, weil die Bedeutung der beiden Worte sehr ähnlich ist, sondern auch weil »Lesen« und »Lesart« einen ähnlichen Bedeutungswandel mitgemacht haben wie Interpretieren und Interpretation; nur daß in diesem Falle beide Bedeutungen noch lebendig sind. Wenn ich sage: »Ich habe eben Peters Brief gelesen«, verwende ich das Wort im gewöhnlichen, objektiven Sinn. Aber wenn ich sage: »Ich lese diese Stelle ganz anders«, gebrauche ich eine spätere, mehr subjektivistische und relativistische Bedeutung des Wortes lesen«; nämlich »Meine Lesart dieser Stelle ist ganz anders«.

Ich behaupte nun, daß die Bedeutung des Wortes »Interpretation« einen ähnlichen Wandel mitgemacht hat, allerdings mit dem Unterschied, daß der ursprüngliche Sinn des Wortes (anscheinend war er »denen, die des Lesens unkundig sind, vorzulesen«) so gut wie ganz verschwunden ist. Eine Bemerkung wie »Der Richter muß das Gesetz interpretieren« betont, heutzutage, daß seine Auslegung einen gewissen Spielraum hat. Zu BACONS Zeiten aber hätte man damit sagen wollen, daß der Richter die Pflicht habe, das Gesetz so zu lesen, wie es geschrieben steht, und es richtig, das heißt in der einzig richtigen Art und Weise, auszulegen und anzuwenden. »*Interpretatio juris* (oder *legis*)« bedeutet entweder diese Tätigkeit, oder die, dem Laien das Gesetz auszulegen oder, wenn nötig, zu übersetzen. Es läßt dem Interpreten des Gesetzes keinen Spielraum: jedenfalls nicht mehr als einem beeideten Dolmetscher bei der Übersetzung einer Urkunde.

Daher ist es irreführend, von BACONS »Interpretation der Natur« zu reden: der Ausdruck sollte durch einen anderen ersetzt werden, etwa: »die Natur (richtig) lesen« – analog dem »richtigen Lesen des Gesetzes«. Das, was BACON sagen wollte, dürfte wohl am besten wiedergegeben werden durch »das Buch der Natur lesen wie es ist«, oder vielleicht noch besser »das Buch der Natur buchstabieren«. Worauf es ankommt, ist, daß die gewählte Formulierung die *Abwesenheit jeder Interpretation im modernen Sinn* zum Ausdruck bringen muß. Und ganz besonders darf die Formulierung nichts enthalten, das die Vorstellung eines Versuchs einschließen könnte, die Natur und was in ihr offenbar zu Tage liegt, unter Heranziehung von nichtoffenbar zu Tage liegenden Gründen zu »interpretieren« und insbesondere von Hypothesen. Das würde dann eben eine *anticipatio mentis* in BACONS Sinne sein.

(Ich halte es für unrichtig, BACON die Lehre zuzuschreiben, daß seine Methode der Induktion zu Hypothesen oder spekulativen Vermutungen führen könne; denn Induktion in BACONS Sinne führt zu sicherer Erkenntnis und nicht zu bloßer Vermutung.) Die Bedeutung von BACONS *anticipatio mentis* erhellt vielleicht am besten ein Zitat von LOCKE: »Men give themselves up to the first anticipations of their minds«, »die Menschen geben sich den erst-besten vorgefaßten Ideen hin«; denn hier haben wir ja eine beinahe wörtliche Übernahme des BACONSCHEN Ausdrucks. Und es geht daraus klar hervor, daß *anticipatio* so viel heißt wie »Vorurteil« oder sogar »Aberglauben«. Wir können auch den Ausdruck *anticipatio deorum* heranziehen, der so viel bedeutet wie naive oder primitive oder abergläubische Gedanken über die Götter. Die Sache wird noch klarer, wenn wir bedenken, daß das Wort »Vorurteil« aus dem Rechtswesen stammt: und daß es BACON war, der das Verbum *to prejudge* – d. h. »vor-urteilen« im Sinne einer pflichtwidrig vorweggenommenen ungünstigen Entscheidung einer Rechtssache – in die englische Sprache einführte (nach dem Oxford English Dictionary).

Die beiden Methoden BACONS sind daher: erstens »das Lesen, Wort für Wort, im offenen Buche der Natur«, das zum Wissen, zur *epistēmē* führt; und zweitens »das Vorurteil, die Vorwegnahme im Geiste, die das Urteil über die Natur in unberechtigter Weise vorwegnimmt und oft falsche Urteile fällt«, die zu *doxa* führt, zu bloßem Raten und Vermuten, und zum Mißverstehen des Buches der Natur.

Diese zweite Methode, die BACON verwarf, ist tatsächlich eine Methode der Interpretation, im heutigen Sinne des Wortes. Es ist die Methode der Hypothesenbildung oder der theoretischen Vermutung (eine Methode, die ich, nebenbei gesagt, mit Überzeugung befürworte).

Wie können wir uns aber vorbereiten, um mit BACON das Buch der Natur getreulich und richtig zu lesen? BACONS Antwort ist: Wir müssen unseren Geist reinigen von allen vorgefaßten Meinungen, Vermutungen, Annahmen und Vorurteilen. Diese Reinigung des Geistes verlangt von uns, daß wir allen möglichen Idolen oder falschen Göttern entsagen, und uns von allgemein akzeptierten falschen Ansichten und Glaubenssätzen freimachen. Denn durch diese werden unsere Beobachtungen verfälscht. Aber wir müssen,

wie SOKRATES, Ausschau halten nach allen möglichen Gegenbeispielen, um uns mit ihrer Hilfe von unseren Vorurteilen loszumachen, und insbesondere von unseren Vorurteilen bezüglich jener Gegenstände, deren Wesen und wahre Natur wir zu erkennen streben. Wir müssen, wie SOKRATES, durch eine solche Reinigung unseres Intellekts unsere Seele darauf vorbereiten, das ewige Licht der Wesenheiten und Naturen der Dinge zu erblicken, unsere unreinen Vorurteile müssen durch den Appell an Gegenbeispiele ausgetrieben werden.

Erst nachdem unsere Seele auf diese Weise gereinigt wurde, können wir daran gehen, das Buch der Natur, das heißt, die offenbare Wahrheit, getreulich und gewissenhaft zu lesen.

Zusammenfassend bin ich der Ansicht, daß BACONS Methode der Induktion (ebenso wie die des ARISTOTELES) grundsätzlich dasselbe ist wie die Mäeutik des SOKRATES: eine geistige Disziplin, eine Vorbereitung durch Ausmerzungen aller Vorurteile, die uns in die Lage versetzt, die offenbare Wahrheit zu erschauen oder das offene Buch der Natur zu lesen.

DESCARTES' Methode des systematischen Zweifels ist im Grunde genau dasselbe: ihr Sinn ist, alle falschen Vorurteile, die den Geist trüben, zu zerstören, um so zu einer unerschütterlichen Grundlage der evidenten Wahrheit zu kommen.

Damit wird es nun aber auch ziemlich verständlich, warum die optimistische Erkenntnislehre im Zustande des Wissens den natürlichen, reinen Zustand des Menschen sah, den Urzustand des unschuldigen, unverdorbenen Auges, welches die Wahrheit erblicken kann; im Gegensatz zum Zustand der Unwissenheit, der eine Folge des Schadens ist, den das unschuldige Auge beim Sündenfall des Menschen erlitten hat. Dieser Schaden, diese Blindheit also, kann teilweise dadurch geheilt werden, daß man sich einer Reinigung unterzieht. Und wir sehen nun auch, daß diese Erkenntnistheorie, sei es in ihrer cartesischen oder in ihrer baconischen Form, eine wesentlich religiöse Lehre bleibt: eine Lehre, in der die Autorität Gottes die Quelle aller Erkenntnis ist.

Man könnte vielleicht sagen, daß BACON, im Anschluß an die Lehre Platons von den göttlichen Wesenheiten, der göttlichen Natur aller Dinge, und im Anschluß an die traditionelle griechische Gegenüberstellung von Natur (die wahrhaft ist) und menschlicher Konvention (die trägt) in seiner Erkenntnistheorie die Na-

tur an die Stelle von Gott setzt: Darin ist wohl auch der Grund zu suchen, warum wir uns reinigen müssen, bevor wir uns der Göttin *Natura* nähern dürfen: Wenn wir unsern Geist von Vorurteilen gereinigt haben werden, werden auch unsere Sinne, so unverlässlich sie auch oft sein mögen, rein und klar werden (PLATON glaubte freilich, unsere Sinne seien immer trügerisch und nicht verbesserungsfähig). Die Quellen der Erkenntnis müssen rein gehalten werden, denn jede Trübung macht sie zu Quellen des Irrtums.

X

Aber trotz des religiösen Charakters ihrer Erkenntnistheorien sind die Angriffe, die BACON und DESCARTES gegen Vorurteile und gegen leichtsinnig oder gedankenlos übernommene Ansichten richteten, Ausdruck einer echten anti-autoritären und anti-traditionalistischen Haltung. Denn beide verlangen von uns, daß wir alle Meinungen verwerfen, außer denen, von deren Wahrheit wir uns selbst überzeugen konnten. Und ihre Angriffe waren bewußt gegen Autorität und Tradition gerichtet. Sie waren eine Phase des zeitgenössischen Krieges gegen die Autorität des ARISTOTELES und die Traditionen der Scholastik: Menschen, die imstande sind, selbst die Wahrheit zu erkennen, bedürfen derartiger Autoritäten nicht mehr.

Und doch glaube ich nicht, daß es BACON und DESCARTES gelungen ist, ihre Erkenntnistheorien von Autorität freizumachen; nicht so sehr weil sie an eine religiöse Autorität appellierten – an die Natur oder an Gott – sondern aus einem tieferen Grund.

Trotz ihrer individualistischen Tendenzen wagten sie es nicht, an unser *kritisches* Urteil zu appellieren, an das Urteil jedes einzelnen, wer er auch sei. Sie fürchteten vielleicht, daß dies zu Subjektivismus und Willkür führen könnte. Aber was immer der Grund gewesen sein mag, sie konnten sich nicht von der autoritären Denkweise freimachen, so sehr sie auch danach strebten. Sie konnten nur die eine Autorität – die Autorität des ARISTOTELES und die Autorität der Bibel – durch die andere ersetzen. Beide appellierten an neue Autoritäten, der eine an *die Autorität unserer Sinne*, der andere an *Autorität unseres Intellekts*.

Das bedeutete aber, daß es ihnen nicht gelang, eine Lösung zu finden für das große Problem, zuzugeben, daß unser Wissen eine

menschliche, nur allzu menschliche Angelegenheit ist, ohne gleichzeitig zuzugeben, daß alles Wissen nichts ist als subjektive Meinung und Willkür.

Und doch war dieses Problem von den Philosophen des Altertums nicht nur gestellt, sondern auch gelöst worden; zuerst, wie es scheint, von XENOPHANES und später von DEMOKRIT und von SOKRATES (besser vom SOKRATES der *Apologie* als von dem des *Menon*). Die Lösung besteht in der Erkenntnis, daß wir alle, als Individuen wie als Gesamtheit, irren können und in der Tat oft irren, daß aber die Idee des menschlichen Irrtums und der menschlichen Fehlbarkeit die *Idee der objektiven Wahrheit* in sich schließt: sie ist die Norm, die regulative Idee, die wir eben oft nicht erreichen. Die Lehre von der Fehlbarkeit des Menschen gehört daher *nicht* zur pessimistischen Erkenntnistheorie. Denn diese Lehre besagt, daß es möglich ist, nach der objektiven Wahrheit zu suchen, wenn wir auch in vielen Fällen weit in die Irre gehen. Und sie besagt, daß, wenn wir die Wahrheit respektieren, wir nach ihr suchen müssen, indem wir nach unseren Irrtümern suchen: durch unermüdliche rationale Kritik und durch Selbstkritik.

ERASMUS von Rotterdam bemühte sich, diese Lehre wieder zu beleben – jene wichtige und einfache Lehre des SOKRATES: »Erkenne Dich selbst, und sei Dir klar darüber, wie wenig Du weißt«. Aber diese Lehre wurde von dem Glauben verdrängt, daß die Wahrheit offenbar ist, und durch die neue Selbstsicherheit für die in verschiedener Weise LUTHER und CALVIN, oder auch BACON und DESCARTES beispielgebend waren.

Es ist hier wichtig, sich klar zu machen, was auf der einen Seite DESCARTES und auf der andern SOKRATES, ERASMUS und MONTAIGNE unter »Zweifel« verstanden. Während SOKRATES menschliches Wissen und menschliche Weisheit bezweifelt, und jede Anmaßung von Wissen und Weisheit zurückweist, zweifelt DESCARTES zwar an allem – um trotz allem schließlich in den Besitz *absolut sicherer Erkenntnis* zu gelangen. Denn er entdeckt, daß ein grenzenloser, universeller Zweifel ihn dazu führen würde, die Wahrfähigkeit Gottes anzuzweifeln – und das wäre absurd. Nachdem er so bewiesen hat, daß universeller Zweifel absurd sein müsse, kommt er zu dem Schluß, daß sichere Erkenntnis und Weisheit für den Menschen möglich sind. Er kann im Lichte der natürlichen Vernunft zwischen klaren und deutlichen Ideen, die von Gott

stammen, und allen anderen Ideen, deren Quelle unsere eigene, getrübe Einbildungskraft ist, unterscheiden. Der Cartesianische Zweifel ist, wie man sieht, nichts anderes als ein mäeutisches Instrument, um ein Wahrheitskriterium zu finden und so schließlich doch einen Weg, um Wissen und Weisheit zu erwerben. Im Gegensatz dazu besteht für den SOKRATES der *Apologie* die erreichbare Weisheit in dem Bewußtsein unserer Grenzen, im Wissen, wie wenig wir wissen – und zwar jeder von uns.

Diese Lehre von der menschlichen Fehlbarkeit war es, die von NICOLAUS CUSANUS und ERASMUS von Rotterdam (der sich auf SOKRATES beruft) wiederbelebt wurde. Und diese »humanistische« Lehre war es auch, die NICOLAUS und ERASMUS, MONTAIGNE und LOCKE und VOLTAIRE, und nach ihnen John Stuart MILL und Bertrand RUSSELL zum Grundstein ihrer These von der Toleranz machten (im Gegensatz zu der optimistischen Theorie vom notwendigen Sieg der Wahrheit, auf die MILTON sich berief). »Was ist Toleranz?« fragt VOLTAIRE in seinem »Philosophischen Wörterbuch« und er gibt selbst die Antwort: »Sie ist die notwendige Folge unseres Mensch-Seins. Wir sind alle fehlbar und leicht dem Irrtum verfallen; lasset uns daher Nachsicht üben gegenüber unseren Torheiten. Das ist das erste Grundprinzip des natürlichen Rechts.«

Ich schlage vor, die »kritische« oder »humanistische« Erkenntnistheorie der optimistischen und der pessimistischen Theorie gegenüberzustellen.

XI

BACON und DESCARTES setzten also die Beobachtung und den Intellekt als neue Autoritäten ein, und zwar in jedem einzelnen Menschen. Aber dabei spalteten sie den Menschen in zwei Teile, einen höheren Teil, der Autorität besaß für die Wahrheitsfindung – nach BACON die Sinne, nach DESCARTES der Intellekt – und einen niedrigeren Teil. Dieser niedrigere Teil ist unser eigentliches, alltägliches Ich, der alte Adam in uns. Denn wenn die Wahrheit offenbar ist, dann sind eben immer »wir selbst« für unsere Irrtümer verantwortlich. Wir selbst mit unseren Vorurteilen, unserer Nachlässigkeit und unserem Starrsinn sind die Schuldigen. Wir selbst sind die Quelle unserer Unwissenheit.

Wir sind also in einen menschlichen Teil und einen übermenschli-

chen Teil gespalten. Der menschliche Teil, das sind »wir selbst«, die Quelle unserer fehlbaren Ansichten (*doxa*), unserer Irrtümer und unserer Ignoranz; der übermenschliche Teil, seien es die Sinne oder der Intellekt, ist die Quelle des wahren Wissens (*epistēmē*). Er hat eine fast göttliche Autorität über uns.

Aber so geht es nicht. Denn wir wissen, daß die bewundernswerten physikalischen Theorien von DESCARTES eben doch nicht wahr sind, obwohl sie ausschließlich auf Ideen basieren, die für seinen Intellekt klar und deutlich waren und die daher autoritativ und wahr hätten sein sollen. Und was gar die Sinne und ihren Anspruch anlangt, eine autoritative Quelle der Erkenntnis zu sein, so wurde ihre Unverläßlichkeit schon von den alten Griechen erkannt; ja sogar schon vor PARMENIDES, zum Beispiel von XENOPHANES und HERAKLIT und, natürlich, auch von DEMOKRIT und PLATON.

Es ist sonderbar, daß diese Lehre der Alten von den modernen Empiristen, einschließlich der Phaenomenalisten und Positivisten, beinahe ganz ignoriert worden ist. Und doch ist es so. In den meisten Problemen, mit denen Positivisten und Phaenomenalisten sich beschäftigen, und in den Lösungen, die sie vorschlagen, wird sie nicht beachtet. Der Grund dafür liegt in jener Zweiteilung des Ichs. Sie glauben, daß es nicht unsere Sinne sind, die sich täuschen, sondern immer »wir selbst«, die in der *Deutung* dessen irren, was uns durch unsere Sinne »gegeben« ist. Unsere Sinne sprechen die Wahrheit, aber wir können irren; zum Beispiel, wenn wir versuchen, das, was sie uns mitteilen, in Worte zu kleiden, in *Worte einer konventionellen von Menschen erfundenen, höchst unvollkommenen Sprache*. Der Fehler liegt in unserer sprachlichen Beschreibung, denn diese kann durch Vorurteile verfälscht sein.

So lag also die Schuld bei der Sprache, einem Produkt der Menschen. Aber dann entdeckte man, daß in einem bedeutsamen Sinne die Sprache selbst auch etwas »gegebenes« ist: daß sie die Weisheit und Erfahrung vieler Generationen verkörpert, und daß sie nicht verantwortlich gemacht werden kann, wenn wir sie mißbrauchen. Auf diese Weise wurde die Sprache nun auch ihrerseits zu einer wahrhaftigen Autorität, die uns nicht täuschen konnte. Wenn wir der Versuchung unterliegen, die Sprache zu eitlerem Gerede zu mißbrauchen, dann sind wir selbst schuld an der Verwir-

rung, die daraus entsteht. (Denn die Sprache ist ein eifersüchtiger Gott und wird den nicht ungestraft lassen, der ihre Worte mißbraucht.)

Dadurch, daß man *uns selbst* und unserer Sprache (beziehungsweise unserem Mißbrauch der Sprache) die Schuld zuschiebt, kann man die göttliche Autorität der Sinne (und sogar der Sprache) aufrechterhalten. Aber dies ist nur dadurch möglich, daß man die Kluft zwischen dieser Autorität und »uns selbst« erweitert: zwischen den reinen Quellen, aus denen uns autoritative Erkenntnis zuströmt über jene wahrhafte Göttin – die Natur – und unserem schuldhaften, unreinen Selbst: zwischen Gott und Mensch. Wie ich schon andeutete, stammt die Idee von der Wahrfähigkeit der Natur, die wir, wie mir scheint, bei BACON finden, von den alten Griechen; sie ist implizit in der klassischen Gegenüberstellung zwischen *Natur* und (menschlicher) *Konvention* enthalten, die, nach PLATON, auf PINDAR zurückgeht; dieser Gegensatz wurde von PARMENIDES und einigen Sophisten (z. B. HIPPIAS) und teilweise auch von PLATON selbst, gleichgestellt dem Gegensatz zwischen göttlicher Wahrheit und menschlichem Irrtum, oder sogar Falschheit. Unter dem Einfluß BACONS spielte die Lehre, daß die Natur göttlich und wahr ist, und daß aller Irrtum und alle Falschheit zurückzuführen ist auf den trügerischen Charakter unserer menschlichen Konventionen, noch lange eine wichtige Rolle; nicht nur in der Philosophie, in der Wissenschaftstheorie, und in der Politik, sondern auch in den bildenden Künsten. Diese Lehre beeinflusste zum Beispiel die hochinteressanten Theorien von John CONSTABLE über Natur, Naturwahrheit, Vorurteil und Konvention, die E. H. GOMBRICH in seinem Buch *Kunst und Illusion* zitiert. Sie spielt auch in der Geschichte der Literatur und in der Musikgeschichte eine Rolle.

XII

Beruhet vielleicht die merkwürdige Theorie, daß die Wahrheit einer Behauptung dadurch entschieden werden könne, daß wir ihren *Quellen* – also ihrem *Ursprung* – nachforschen, auf einem logischen Denkfehler, der aufgeklärt werden kann? Oder müssen wir uns damit zufriedengeben, religiöse Ideen zur Erklärung heranzuziehen, oder psychologische Ideen – etwa die einer Nachwir-

kung der elterlichen Autorität? Ich glaube, daß man hier tatsächlich einen logischen Fehler erkennen kann, der zusammenhängt mit der engen Analogie zwischen dem Sinn, der *Bedeutung*, unserer Worte, Ausdrücke und Begriffe einerseits und der *Wahrheit* unserer Sätze oder Behauptungen andererseits.

Daß die Bedeutung oder der Sinn unserer Wörter etwas mit ihrer Geschichte oder ihrem Ursprung zu tun hat, ist leicht einzusehen. Logisch betrachtet, ist ein Wort ein konventionelles Zeichen. Psychologisch gesehen ist es ein Zeichen, dessen Sinn sich aus Gebrauch und Herkommen oder aus dem Zusammenhang ergibt. Logisch betrachtet, muß der Sinn eines Wortes tatsächlich einmal durch einen Beschluß festgesetzt worden sein – durch eine Art Urdefinition oder Urkonvention, gleichsam durch einen primären oder konstituierenden Gesellschaftsvertrag. Psychologisch gesehen steht der Sinn eines Wortes fest, wenn wir zum ersten Male lernen, es zu gebrauchen; das heißt, wenn wir unsere Sprachgewohnheiten und Assoziationen zum ersten Male formen.

Wir können daher bis zu einem gewissen Grad Verständnis haben für ein deutschsprachiges Schulkind, das sich über die überflüssige Verkehrtheit der englischen Sprache beklagt, in der »Gift« soviel bedeutet wie »Geschenk«, während das Deutsche so viel natürlicher und einfacher ist, da hier »Gift« eben Gift bedeutet – also etwas ganz anderes als ein Geschenk. Das Kind mag sich durchaus im klaren darüber sein, daß die Benennung von Dingen etwas willkürliches, konventionelles ist, und doch nicht einsehen, warum die ursprüngliche Konvention – das heißt die von ihm ursprünglich erlernte – nicht allgemein gültig ist. Sein Irrtum besteht eigentlich nur darin, daß es vergißt, daß es verschiedene in gleicher Weise verbindliche ursprüngliche Konventionen geben kann. Aber haben wir nicht schon alle unwillkürlich ähnliche Fehler gemacht? Sicher haben die meisten von uns sich schon bei einem Gefühl des Staunens ertappt, daß in Frankreich schon ganz kleine Kinder perfekt französisch sprechen können.

Natürlich lächeln wir über diese unsere eigene Naivität. Aber wir lächeln nicht über den Polizisten, der entdeckt, daß »Martin Schmidt« mit seinem *wahren Namen* »Stephan Müller« heißt – und doch handelt es sich auch hier um einen Überrest des magischen Glaubens, daß wir Macht gewinnen über einen Menschen – oder über einen Gott oder einen Dämon – sobald wir seinen *wah-*

ren Namen erfahren (wenn wir seinen Namen aussprechen, können wir ihn heraufbeschwören).

Jedenfalls gibt es einen alltäglichen und auch logisch vertretbaren Sinn, in dem die wahre, die eigentliche Bedeutung eines Wortes identisch ist mit seiner ursprünglichen Bedeutung; wenn wir ein Wort verstehen, verstehen wir es, weil wir es richtig gelernt haben – von einer echten Autorität, von jemandem, der der Sprache mächtig war. Es ist also das *Problem der Bedeutung* oder *des Sinns eines Wortes* tatsächlich eng verknüpft mit dem Problem der autoritativen Quelle, oder dem Ursprung, der Herkunft, unseres Sprachgebrauchs.

Mit dem *Problem der Wahrheit eines Satzes*, einer Aussage über eine Tatsache, steht die Sache anders. Denn jeder kann sich irren, was Tatsachen anlangt – selbst auf Gebieten, auf denen man erwarten sollte, daß er eine »Autorität« ist: man kann sich über sein eigenes Alter irren oder über die Farbe eines Mantels, den wir soeben klar und deutlich gesehen haben. Und was den Ursprung eines Satzes anlangt, so kann eine Behauptung sehr wohl *falsch* gewesen sein, als sie zum ersten Male gemacht wurde (und zum ersten Male richtig – das heißt so, wie sie gemeint war – verstanden wurde). Ein Wort hingegen kann, wenn es überhaupt verstanden wird, nur *richtig*, mit dem ihm eigenen Sinn verstanden werden. Wenn wir also den Unterschied betrachten zwischen der Art und Weise, in der der Sinn eines Wortes einerseits und die Wahrheit eines Satzes andererseits mit ihrer Herkunft oder ihrem Ursprung verknüpft sind, so werden wir kaum in Versuchung kommen, zu glauben, daß die Frage des Ursprungs mit dem Problem der Wahrheit viel zu tun haben kann. Es besteht jedoch eine enge Analogie zwischen Bedeutung oder Sinn auf der einen Seite und Wahrheit auf der andern Seite. Und es gibt eine philosophische Schule – ich habe sie »Essentialismus« genannt oder »Wesensphilosophie« – die Sinn und Wahrheit so eng miteinander zu verknüpfen sucht, daß die Versuchung, beide gleich zu behandeln, fast unwiderstehlich wird.

Um das kurz zu erklären, möchte ich auf mein Diagramm der Ideen eingehen (s. S. 35), und zwar auf die Beziehung zwischen seiner linken und seiner rechten Seite.

Wie sind die beiden Seiten dieser Aufstellung miteinander verbunden? Auf der linken Seite finden wir das Wort *Definitionen*.

IDEEN

**Bezeichnungen
oder Ausdrücke
oder Begriffe**

Wörter

sinnvoll

ihr Sinn

Definitionen

**undefinierte
Begriffe**

das heißt

können
formuliert werden
durch

die

sein können
und

kann durch

zurückgeführt
werden auf

**Sätze
oder Aussagen
oder Theorien**

Behauptungen

wahr

ihre Wahrheit

Ableitungen

**unableitbare
Grundsätze**

ihren Sinn

wenn wir versuchen,
auf diese Weise

eindeutig festzu-
legen (statt bloß
auf anderes zurück-
zuführen), so führt
das zu einem
unendlichen Regreß

ihre Wahrheit

Aber eine Definition ist eine Art von *Satz oder Aussage*, und sie gehört daher gerade zu jenen Dingen, die wir auf der rechten Seite vorfinden. (Das tut übrigens der Symmetrie unserer Aufstellung der Ideen keinen Abbruch: denn *Ableitungen* gehen auch über das hinaus, was wir oben auf derselben, rechten Seite vorfinden – nämlich Sätze oder Aussagen: ebenso wie eine Definition eine *Folge von Worten* ist, und nicht ein einzelnes Wort, so ist eine Ableitung eine *Folge von Sätzen* und nicht ein einzelner Satz.) Aber die Tatsache, daß Definitionen, die links stehen, nichtsdestoweniger Sätze oder Aussagen sind, legt den Gedanken nahe, daß sie einen Zusammenhang zwischen den beiden Seiten herstellen. Daß dem so ist, ist eine der Grundanschauungen jener Philosophie, die ich »Essentialismus« oder »Wesensphilosophie« genannt habe. Der Essentialismus – das gilt besonders für die aristotelische Form dieser Lehre – ist der Überzeugung, eine Definition sei eine Aussage über das innere Wesen, über die *Natur* einer Sache. Gleichzeitig stellt sie jedoch auch die *Bedeutung* eines Wortes fest, eben des Wortes, das die Wesenheit benennt. (Zum Beispiel sind sowohl DESCARTES als auch KANT der Meinung, daß das Wort »Körper« – oder »physischer Körper« – etwas bezeichnet, das seinem Wesen nach Ausdehnung besitzt.)

Überdies glauben ARISTOTELES und die anderen Essentialisten, daß Definitionen *Prinzipien* oder *Grundsätze* sind: Das heißt, daß sie Ur-Aussagen sind, aus denen andere Aussagen abgeleitet werden können (etwa: alle Körper sind ausgedehnt) und daß sie die Grundlage aller Beweisführung bilden. Nach dieser Theorie sind die Definitionen die Grundlage der Naturwissenschaft. Es ist zu beachten, daß in diesem speziellen Argument, obwohl es einen wichtigen Teil des essentialistischen Lehrgebäudes ausmacht, vom »Wesen« (oder von der »Essenz«) der Dinge nicht gesprochen werden muß. Das erklärt, daß es von manchen nominalistischen Gegnern des Essentialismus, wie etwa HOBBS oder auch SCHLICK verwendet wurde.

Wir können jetzt, glaube ich, die Logik des Gedankengangs verstehen, der die Frage nach der *Wahrheit* einer Tatsachenfeststellung auf die Frage nach ihrem *Ursprung* zurückzuführen sucht. Denn wenn die Suche nach dem ursprünglichen Sinn uns helfen kann, den *wahren Sinn* eines Wortes oder Ausdrucks festzustellen, dann muß dasselbe auch für die *wahre Definition* seines We-

sens gelten und daher für jene grundlegenden Prinzipien, die ihrerseits Wesensbeschreibungen oder Sätze über die Natur der Dinge sind, und die allen unseren Beweisführungen, und damit unseren naturwissenschaftlichen Erkenntnissen, zugrunde liegen. Und daraus scheint dann hervorzugehen, *daß es tatsächlich autoritative Quellen unserer Erkenntnis gibt.*

Aber wir müssen uns im klaren sein, daß der Essentialismus irrt, wenn er behauptet, daß Definitionen zu unserer *Kenntnis von Tatsachen* beitragen können (obwohl Definitionen, sofern sie Entscheidungen oder Konventionen sind, von unserer Kenntnis der Tatsachen beeinflußt werden, und obwohl sie, sofern sie zum geistigen Rüstzeug unserer Theorien beitragen, den wissenschaftlichen Fortschritt beeinflussen können). Sobald wir eingesehen haben, daß Definitionen uns niemals sachliche Auskunft über das »Wesen« geben können, oder über die »Natur der Dinge«, sehen wir auch die Stelle, an der die scheinbare fälschliche Verkettung zwischen den beiden Problemen, dem des Ursprungs und dem der Wahrheit einer Tatsachenfeststellung, auseinanderbricht; eine Verkettung, die die Wesensphilosophie herzustellen bestrebt war.

XIII

Ich will aber nunmehr diese mehr oder minder historischen Betrachtungen beiseite lassen, und mich den Problemen selbst und ihrer Lösung zuwenden.

Was hier in diesem Abschnitt folgt, kann man als einen Angriff auf den *Empirismus* beschreiben, wie ihn zum Beispiel HUME in klassischer Weise formuliert hat: »Wenn ich Dich frage, warum Du an eine bestimmte Tatsache glaubst . . . mußt Du mir einen Grund sagen; und dieser Grund wird irgendeine andere Tatsache sein, die mit der ersten in Verbindung steht. Aber da man auf diese Weise nicht unbegrenzt, *ad infinitum*, fortfahren kann, mußt Du schließlich bei einer Tatsache anlangen, die Deinem Gedächtnis oder Deinen Sinnen gegenwärtig ist; oder Du wirst zugeben müssen, daß Dein Glaube völlig unbegründet ist.«

Die Frage nach der Geltung des Empirismus kann folgendermaßen formuliert werden: Ist Beobachtung die letzte Quelle unserer Naturerkenntnis? Und wenn nicht, worauf gründet sich unsere Erkenntnis? Was sind ihre Quellen?

Diese Fragen bleiben bestehen – ungeachtet dessen, was ich über BACON gesagt habe, und unabhängig davon, ob ich BACONS Philosophie etwa durch meine Erörterungen für ihre Anhänger und für andere Empiristen weniger anziehend gemacht habe.

Das Problem von den Quellen unserer Erkenntnis ist kürzlich wie folgt formuliert worden: Wenn Du eine Behauptung aufstellst, mußt Du sie rechtfertigen; und das bedeutet, daß Du imstande sein mußt, die folgenden Fragen zu beantworten:

»Woher weißt Du das? Auf welche Quelle stützt sich Deine Behauptung?«

Nach Ansicht der Empiristen sind diese Fragen weiterhin gleichbedeutend mit:

»Welche Wahrnehmungen, beziehungsweise Erinnerungen an Wahrnehmungen, liegen Deiner Behauptung zugrunde?«

Ich finde diese Kette von Fragen ganz und gar unbefriedigend. Erstens gründen sich die meisten unserer Behauptungen ja gar nicht auf Wahrnehmungen, sondern auf alle möglichen andern »Quellen«. Auf die Frage »Woher weißt Du das?« ist die Antwort: »Ich las es in der *Times*«, oder: »Ich las es in der *Encyclopaedia Britannica*« wohl eher zu erwarten, und auch eher überprüfbar, als die Antwort: »Ich habe es wahrgenommen«, oder »Ich weiß es auf Grund einer Wahrnehmung, die ich vor vier Jahren machte«.

Aber der Empirist wird weiter fragen: »Aus welchen Quellen hat denn die *Times*, oder die *Encyclopaedia Britannica*, ihre Information? Siehst Du denn nicht, daß, wenn man der Sache nur lange genug nachgeht, man schließlich doch zu *Berichten über Beobachtungen von Augenzeugen* kommen muß (die von manchen als »Protokollsätze«, und von Dir selbst als »Basissätze« bezeichnet wurden)? Ich will gerne zugeben«, so wird der Empirist fortfahren, »daß Bücher oft von andern Büchern abgeschrieben werden; oder daß, zum Beispiel, ein Historiker mit Dokumenten arbeitet. Aber letzten Endes müssen doch diese anderen Bücher, oder diese Dokumente, auf Beobachtungen gegründet gewesen sein. Denn sonst müßten wir sie als Dichtungen bezeichnen, oder als Erfindungen, oder geradezu als Lügen, aber nicht als glaubwürdige Zeugnisse. Das ist es, was wir Empiristen sagen wollen, wenn wir behaupten, daß die Wahrnehmung die letzte Quelle unserer Erkenntnis sein muß.«

Das ist, im wesentlichen, die Verteidigung des Empirismus, wie sie auch heute noch von einigen meiner positivistischen Freunde ins Feld geführt wird.

Ich will versuchen, zu zeigen, daß diese Argumente um nichts stichhaltiger sind als BACONS Argumente: daß die Entscheidung der Frage nach den Quellen der Erkenntnis gegen die Empiristen ausfällt; und schließlich, daß diese ganze Frage nach den letzten Quellen – Quellen, an die man appellieren kann wie an eine höhere Instanz oder eine höhere Autorität – falsch gestellt ist und auf einem Irrtum beruht.

Zuerst will ich zeigen, daß wir auch durch noch so gründliches Befragen der *Times* und ihrer Reporter niemals zu jenen Beobachtungen von Augenzeugen gelangen werden, an deren Existenz der Empirist glaubt. Denn es wird sich herausstellen, daß mit jedem Schritt, den wir unternehmen, die Zahl der dadurch notwendig werdenden weiteren Schritte lawinenartig anwächst.

Nehmen wir zum Beispiel eine Behauptung, für die man normalerweise sich mit der Antwort »Ich habe es in der *Times* gelesen« zufriedengeben würde; sagen wir: »Der Premierminister hat beschlossen, einige Tage früher als beabsichtigt nach London zurückzukehren.« Nehmen wir für einen Augenblick an, daß jemand diese Meldung anzweifelt und herausfinden möchte, ob sie wahr ist. Was wird er unternehmen? Wenn er Zugang zur Kabinettskanzlei hat, dann ist die einfachste Methode ein telefonischer Anruf. Und wenn die Kanzlei die Meldung bestätigt, dann ist die Sache erledigt.

Mit anderen Worten: der Nachforschende wird, wenn irgend möglich, die gemeldete Tatsache selbst zu überprüfen trachten, und nicht die Quellen der Meldung ausfindig zu machen suchen; während nach der Analyse der Empiristen die Behauptung »Ich habe es in der *Times* gelesen« nur der erste Schritt ist in einem Rechtfertigungsverfahren für eine ursprüngliche Behauptung, das darin besteht, daß wir die letzten Quellen aufdecken. Was ist nun der nächste Schritt?

Es gibt mindestens zwei nächste Schritte. Der eine beruht auf der Überlegung, daß der Satz »Ich habe es in der *Times* gelesen«, selbst wieder eine Behauptung ist, und daß wir also fragen müßten: »Woher weißt Du, daß Du es in der *Times* gelesen hast und nicht, sagen wir, in einer Zeitung, die sehr ähnlich aussieht wie die

Times?« Der andere Schritt ist, die *Times* nach den Quellen ihrer Information zu befragen. Die Antwort auf die erste Frage würde vermutlich lauten: »Aber ich habe doch nur die *Times* abonniert, und sie wird jeden Morgen geliefert.« (Das führt weiter zu einer Unzahl von Fragen nach letzten Quellen, die wir im Augenblick nicht verfolgen wollen). Auf die zweite Frage würden wir, nehmen wir an, vom Chefredakteur der *Times* die Antwort erhalten: »Wir wurden vom ersten Sekretär des Premierministers angerufen«. Wenn die Empiristen recht haben, sollten wir jetzt weiter fragen: »Welcher Herr in Ihrer Redaktion hat die Nachricht entgegengenommen?« und sodann von dem betreffenden Herrn einen Bericht über seine »Beobachtung« verlangen. Wir müßten ihn aber natürlich auch fragen: »Was ist der Grund Ihrer Annahme, daß die Stimme, die Sie hörten, die des ersten Sekretärs war?« Und so weiter.

Es ist leicht einzusehen, weshalb diese langweilige Kette von Fragen nie zu einem Ende kommen kann. Der Grund ist natürlich, daß jeder Zeuge in seinem Bericht weitgehend Gebrauch machen muß von seiner Kenntnis von Personen, Verhältnissen, Örtlichkeiten, Sprachgewohnheiten, Sitten usw. Er kann sich nicht bloß auf seine Augen und Ohren verlassen; besonders dann nicht, wenn sein Bericht eine Behauptung bestätigen soll, deren Bestätigung wichtig ist. Das bringt es aber mit sich, daß immer wieder neue Fragen über die Quellen jener Elemente seines Wissens entstehen, die nicht auf unmittelbarer Wahrnehmung beruhen.

Das ist der Grund, warum das Programm, alle Tatsachenfeststellungen auf ihren letzten Ursprung zurückzuverfolgen, undurchführbar und logisch unmöglich ist. Es führt zu einem unendlichen Regreß. (Die Theorie, daß die Wahrheit offenbar ist, schneidet diesen Regreß ab. Darin liegt vermutlich, wenigstens zum Teil, das Bestechende an dieser Theorie.)

Ich möchte noch bemerken, daß der Einwand, den ich hier vorgebracht habe, eng verwandt ist mit einem andern Argument, das ich vertrete – nämlich daß jede Beobachtung eine *Interpretation* im Lichte unseres theoretischen Wissens in sich schließt, oder anders ausgedrückt, daß ein rein auf Beobachtung gegründetes Wissen – ein Wissen das keinerlei Theorie enthält – völlig unfruchtbar und uninteressant wäre, falls es so etwas überhaupt geben kann. Aber ganz abgesehen von der tödlichen Langeweile, die der empiri-

rischen Erkenntnislehre anhaftet, ist zu bemerken, daß die Forderung, nach den letzten Quellen zu suchen, dem gesunden Menschenverstand ins Gesicht schlägt. Denn wenn wir eine Behauptung anzweifeln, dann ist es doch das normale Verfahren, sie wenn möglich direkt zu überprüfen, und nicht, ihre Quellen ausfindig zu machen. Und wenn die Prüfung zu unabhängigen Bestätigungen führt, so werden wir nicht selten die Behauptung akzeptieren, ohne uns darum zu kümmern, woher sie stammt.

Natürlich ist das nicht immer so. Die Überprüfung einer *historischen* Behauptung besteht immer darin, sie zu ihren Quellen zurückzuverfolgen. Aber nur selten sind die vorhandenen Quellen Berichte von Augenzeugen.

Es ist klar, daß kein Historiker das Zeugnis von Urkunden kritiklos akzeptieren wird. Er untersucht ihre Echtheit, ihre Unvoreingenommenheit und andere Probleme, wie etwa die Rekonstruktion älterer Quellen. Gewiß wird gelegentlich auch die Frage auftauchen: war der Chronist gegenwärtig, als sich diese Ereignisse zutrug? Aber für den Historiker ist das eigentlich kein typisches Problem. Er wird sich sicher Gedanken machen über die Verlässlichkeit eines Berichtes, aber das wird nur selten auf die Frage hinauslaufen, ob der Verfasser einer bestimmten Urkunde ein Augenzeuge des beschriebenen Ereignisses war – selbst wenn wir annehmen, es handle sich um eine Begebenheit, die der Beobachtung zugänglich war. Ein Brief, in dem steht: »Ich habe mir die Sache gestern anders überlegt«, kann außerordentlich wichtiges historisches Beweismaterial darstellen, obwohl natürlich die Änderung von Vorsätzen oder Entschlüssen nicht beobachtbar ist (und selbst dann, wenn wir auf Grund anderer Indizien den Verdacht hegen, daß der Schreiber nicht die Wahrheit sagte).

Und was die Bedeutung von Augenzeugen anlangt – die ist doch fast ausschließlich auf gerichtliche Verfahren beschränkt, wo man sie einem Kreuzverhör unterwerfen kann. Die meisten Anwälte wissen nur allzugut, daß sich Augenzeugen oft irren. Experimente, die darüber angestellt worden sind, haben erstaunliche Resultate ergeben. Selbst wenn Zeugen sich Mühe geben, einen Vorfall so zu schildern, wie er sich ereignete, machen sie oft viele Fehler, und wenn sich eine plausible, dem Zeugen zusagende Deutung anbietet, dann wird in der Mehrzahl der Fälle die Wahrnehmung durch die Deutung verzerrt.

HUMES Ansichten über die historische Erkenntnis waren anders. »... wir glauben«, schreibt er im *Treatise* »daß Caesar im Senat an den *Iden des März* ermordet wurde... weil diese Tatsache durch das übereinstimmende Zeugnis der Geschichtsschreiber bestätigt wird, die alle diesem Ereignis diesen bestimmten Platz in Raum und Zeit zuweisen. Hier sind bestimmte Zeichen oder Buchstaben vor unseren Augen oder in unserem Gedächtnis gegenwärtig... und wir erinnern uns, daß diese Zeichen als Symbole für bestimmte Vorstellungen gebraucht wurden; und diese Vorstellungen existieren entweder im Geist von Personen, die bei diesem Ereignis unmittelbar anwesend waren und sie direkt von ihm empfangen; oder sie leiten sich ab von der Zeugnenschaft anderer Personen, die sich vielleicht selbst wieder auf die Zeugnenschaft dritter stützten, bis wir schließlich zu jenen gelangen, die Augenzeugen und Zuschauer des Ereignisses waren.«

Mir scheint, daß diese Ansicht zu dem unendlichen Regreß führen muß, der oben beschrieben wurde. Denn das entscheidende Problem ist natürlich, ob wir das übereinstimmende Zeugnis der Geschichtsschreiber akzeptieren können, oder ob es abzulehnen ist; etwa deshalb, weil sie sich alle auf eine gemeinsame unverlässliche Quelle stützen. Die Berufung auf Buchstaben, die in unserem Gedächtnis oder vor unseren Augen gegenwärtig sind, hat weder für dieses noch für irgend ein anderes für die Geschichtsschreibung relevantes Problem Bedeutung.

Mein Argument gegen den naiven Empirismus wurde von Mark TWAIN vorweggenommen. Er erzählt uns, daß ihm anlässlich seiner ersten Anstellung als Berichterstatter eingeschärft wurde, *persönliches Wissen* und von ihm selbst verifizierte Meldungen scharf von bloßen Gerüchten zu unterscheiden; und so schrieb er: »Eine Frau, die sich als die Ehefrau des Herrn James Jones ausgibt, und von der berichtet wird, daß sie eine führende Rolle im gesellschaftlichen Leben unserer Stadt spielt, hat anscheinend gestern was man eine Jause nennt für eine Anzahl von angeblichen Damen gegeben. Die Gastgeberin behauptet, die Frau eines hier wohlbekannten Rechtsanwaltes zu sein.«

Wie man sieht, war sich Mark TWAIN ganz klar, daß die verifikationistische Theorie von den Erkenntnisquellen zu lächerlichen Folgen führt – und zu einem unendlichen Regreß.

XIV

Was sind nun aber wirklich die Quellen unserer Erkenntnis? Ich glaube, die Antwort auf diese Frage lautet: Es gibt Quellen der verschiedensten Art, aber *es gibt keine Erkenntnisquelle, die Autorität besitzt.*

Es ist durchaus möglich, zu sagen, daß die *Times* eine Quelle unseres Wissens ist, oder die *Encyclopaedia Britannica*. Vielleicht können wir sagen, daß ein Aufsatz in der *Physical Review* mehr Autorität besitze und mehr den Charakter einer Quelle habe als etwa ein Artikel über dasselbe Problem in der *Times* oder in der *Encyclopaedia*. Aber es wäre ganz falsch zu sagen, die Quelle des Aufsatzes in der *Physical Review* müsse zur Gänze, oder auch nur zum Teil, Beobachtung gewesen sein. Die Quelle mag vielleicht die Entdeckung eines Widerspruchs in einer anderen Arbeit gewesen sein, oder vielleicht die Entdeckung, daß eine bestimmte experimentelle Anordnung geeignet ist, eine in einer anderen Arbeit enthaltene Hypothese zu überprüfen. Derartige Entdeckungen, die keine Beobachtungen enthalten, sind dennoch »Quellen« in dem Sinne, daß sie zur Vermehrung unseres Wissens beitragen. Natürlich leugne ich nicht die Möglichkeit, daß ein Experiment oder eine Beobachtung einen Beitrag – und vielleicht einen wichtigen Beitrag – zur Vermehrung unseres Wissens leisten kann. Aber ein Experiment ist nie eine *letzte* Quelle. Denn es muß immer *überprüft* werden. Wie in dem Beispiel von der Meldung in der *Times* werden wir normalerweise nicht die Augenzeugen eines Experiments weiter befragen, sondern wir werden, wenn wir das Resultat bezweifeln, das Experiment wiederholen, oder jemand anderen mit dessen Wiederholung beauftragen.

Der grundlegende Fehler, der von der philosophischen Theorie von den letzten Quellen unseres Wissens begangen wird, ist, daß sie nicht zwischen der Frage nach dem Ursprung und der Frage nach der Gültigkeit unterscheidet. Ich gebe zu, daß in der Geschichtswissenschaft diese beiden Fragen nicht selten zusammenhängen. Die Frage nach der Gültigkeit einer historischen Behauptung wird manches Mal ausschließlich oder doch hauptsächlich durch die nach dem Ursprung gewisser Quellen entschieden. Aber im allgemeinen sind diese beiden Fragen grundverschieden; und im allgemeinen wird die Gültigkeit einer Behauptung oder

einer Information nicht dadurch überprüft, daß wir ihren Quellen oder ihrem Ursprung nachgehen. Gewöhnlich prüfen wir sie direkt, indem wir den Inhalt der Behauptung, das heißt die behaupteten Sachverhalte selbst, einer kritischen Untersuchung unterwerfen.

Die Fragen des Empiristen: »Woher weißt Du das? Was ist die Quelle Deiner Behauptung?« sind daher falsch gestellt. Sie sind nicht etwa bloß ungenau oder nachlässig formuliert, sondern sie beruhen auf einer *völligen Verkennung* des Problems. Sie sind so gestellt, daß sie eine Antwort in einem autoritativen Sinn herausfordern.

XV

Man könnte sagen, daß die bestehenden Systeme der Erkenntnistheorie als Resultat von einfachen Antworten, »ja!« und »nein!«, auf Fragen nach den Quellen unseres Wissens entstanden sind. Sie kommen gar nicht auf den Gedanken, die *Fragen selbst und ihre Berechtigung anzuzweifeln*. Diese Fragen werden vielmehr als ganz natürlich betrachtet, und niemand scheint zu bemerken, daß diese Fragen nicht harmlos sind.

Das ist interessant, denn es ist klar, daß diesen Fragen eine autoritäre Tendenz innewohnt. Sie haben große Ähnlichkeit mit jener Frage, die eine der traditionellen Grundlagen der philosophischen Staatslehre ist, der Frage: »Wer soll herrschen?« Diese Frage verlangt nach einer autoritären Antwort: etwa »die Besten« oder »die Weisesten«, oder »das Volk«, oder »die Mehrheit«. (Sie verleitet übrigens auch zu solchen albernen Alternativfragen wie: »Wer soll herrschen, die Kapitalisten oder die Arbeiter?«, die analog sind zu der erkenntnistheoretischen Frage: »Was ist die letzte Quelle unserer Erkenntnis? Der Intellekt, oder die sinnliche Wahrnehmung?«) Diese politische Frage ist falsch gestellt und die Antworten, die sie hervorruft, sind nicht nur autoritär, sondern auch paradox. Man sollte eine ganz andere Fragestellung an ihre Stelle setzen, etwa: »*Was können wir tun, um unsere politischen Institutionen so zu gestalten, daß schlechte oder untüchtige Herrscher (die wir natürlich zu vermeiden suchen, aber trotzdem nur allzu leicht bekommen können) möglichst geringen Schaden anrichten?*« Ich glaube, daß wir ohne eine solche Ände-

rung in unserer Fragestellung niemals hoffen können, zu einer vernünftigen Theorie des Staates und seiner Einrichtungen zu kommen.

In ganz ähnlicher Weise kann man die Frage nach den Quellen unserer Erkenntnis durch eine andere Frage ersetzen: Die traditionelle Frage war und ist noch immer: »Welches sind die besten Quellen unserer Erkenntnis, die verlässlichsten Quellen – Quellen, die uns nicht in die Irre führen werden und an die wir, wenn wir im Zweifel sind, als eine letzte Instanz appellieren können?« Ich schlage vor, davon auszugehen, daß es solche ideale und unfehlbare Quellen der Erkenntnis ebensowenig gibt wie ideale und unfehlbare Herrscher, und daß *alle* »Quellen« unserer Erkenntnis uns manchmal irreleiten. Und ich schlage vor, die Frage nach den Quellen unserer Erkenntnis durch eine ganz andere Frage zu ersetzen: »Gibt es einen Weg, Irrtümer zu entdecken und auszuschalten?«

Wie so viele autoritäre Fragen, so ist auch die Frage nach den Quellen der Erkenntnis eine Frage nach der *Herkunft*. Sie fragt nach dem Ursprung unserer Erkenntnis in dem Glauben, daß die Erkenntnis sich durch ihren Stammbaum legitimieren könne. Die (oft unbewußte) metaphysische Idee, die ihr zugrunde liegt, ist die einer rassistisch reinen Erkenntnis, einer unverfälschten Erkenntnis, einer Erkenntnis, die sich von der höchsten Autorität, wenn möglich von Gott selbst ableitet, und der daher die Autorität eines eigenen Adels innewohnt. Meine abgeänderte Fragestellung: »Was können wir tun, um Irrtum aufzudecken?« ist der Ausfluß der Überzeugung, daß es solche reine, unverfälschte und unfehlbare Quellen nicht gibt, und daß man die Frage nach Ursprung und nach Reinheit nicht mit der Frage nach Gültigkeit und nach Wahrheit verwechseln darf. Die Ansicht, die ich hier vertrete, ist alt und geht auf XENOPHANES zurück. Schon XENOPHANES wußte, daß, was wir Wissen nennen, nichts ist als Raten und Meinen – *doxa* und nicht *episteme* –, wie wir aus seinen Versen ersehen:

*Nicht vom Beginn an enthüllten die Götter uns Sterblichen alles;
aber im Laufe der Zeit finden wir suchend das Bess're.*

*Sichere Wahrheit erkannte kein Mensch und wird keiner erkennen
über die Götter und alle die Dinge, von denen ich spreche.*

*Sollte einer auch einst die vollkommenste Wahrheit verkünden,
würfte er selbst es doch nicht: es ist alles durchweht von Vermutung.*

Und doch wird die traditionelle Frage nach den autoritativen Quellen unseres Wissens auch heute noch gestellt – sehr oft sogar von Positivisten und anderen Philosophen, die überzeugt sind, daß sie gegen Autorität revoltieren.

Die richtige Antwort auf meine Frage: »Auf welche Weise haben wir Aussicht, Irrtum zu erkennen und auszuschalten?« scheint mir zu sein: »Durch *Kritik* an den Theorien und Vermutungen anderer und – falls wir uns dazu erziehen können – durch *Kritik* an unseren eigenen Theorien und spekulativen Lösungsversuchen.« (Eine solche Kritik der eigenen Theorien ist zwar höchst wünschenswert, aber nicht unerlässlich; denn wenn wir nicht selbst dazu imstande sind, werden sich andere finden, die es für uns tun.) Diese Antwort faßt eine Einstellung zusammen, die man »Kritischen Rationalismus« nennen könnte. Es ist eine Anschauungsweise, eine Haltung und eine Überlieferung, die wir den Griechen verdanken. Sie unterscheidet sich grundlegend vom »Rationalismus« oder »Intellektualismus«, die DESCARTES und seine Schule proklamierten und sogar auch von KANTS Erkenntnislehre. Jedoch auf dem Gebiete der Ethik und sittlicher Erkenntnis kommt KANTS Prinzip der Autonomie dieser Einstellung sehr nahe. Dieses Prinzip drückt seine Einsicht aus, daß wir niemals das Gebot einer Autorität, und sei sie noch so erhaben, als Grundlage der Ethik anerkennen dürfen. Denn wenn wir uns dem Befehle einer Autorität gegenübersehen, so steht es immer bei uns, kritisch zu urteilen, ob es moralisch oder unmoralisch ist, diesem Befehl zu gehorchen. Es kann sein, daß die Autorität die Macht hat, ihre Befehle durchzusetzen, und daß wir machtlos sind, Widerstand zu leisten. Aber wenn es uns physisch möglich ist, unsere Handlungsweise zu bestimmen, so können wir uns der letzten Verantwortung nicht entziehen. Denn die kritische Entscheidung liegt bei uns: wir können dem Befehl gehorchen oder nicht gehorchen; wir können die Autorität anerkennen oder sie verwerfen. KANT hat diese Idee mutig auch auf das Gebiet der Religion angewendet; er schreibt: »Denn in welcherlei Art auch ein Wesen als Gott von einem andern bekannt gemacht und beschrieben worden, ja, ihm ein solches auch (wenn das möglich ist) selbst erscheinen . . . möchte, so muß er diese Vorstellung doch allererst mit seinem Ideal zusammen halten um zu urtheilen, ob er befugt sei, es für eine Gottheit zu halten und zu verehren.«

In Anbetracht dieser kühnen Erklärung erscheint es eigentlich seltsam, daß KANT in seiner Wissenschaftslehre nicht dieselbe Haltung des kritischen Rationalismus einnahm, einer kritischen Suche nach dem Irrtum. Es erscheint mir klar, daß nur etwas KANT davon abgehalten hat, diesen Schritt zu tun: seine Anerkennung der Autorität NEWTONS auf dem Gebiete der Kosmologie, die ihrerseits darauf beruhte, daß NEWTONS Theorie den strengsten Prüfungen mit fast unglaublichem Erfolg standgehalten hatte. Wenn diese Deutung KANTS richtig ist, dann ist der kritische Rationalismus (und ebenso der kritische Empirismus), den ich verfechte, nichts anderes als eine Vervollständigung der kritischen Philosophie KANTS. Sie wurde erst durch Albert EINSTEIN möglich, der uns lehrte, daß NEWTONS Theorie trotz ihres überwältigenden Erfolges vielleicht doch falsch sein könnte.

Meine Antwort auf die Frage: »Woher weißt Du das? Was ist die Quelle, die Grundlage Deiner Behauptung? Welche Beobachtungen liegen ihr zugrunde?« ist also: »Ich sage ja gar nicht, daß ich es *weiß*: meine Behauptung war nur als Vermutung gemeint. Auch wollen wir uns nicht um die Quelle oder die Quellen kümmern, aus denen meine Vermutung entsprungen sein mag; es gibt viele mögliche Quellen, ich bin mir keineswegs über alle im klaren. Auch haben Ursprung und Herkunft nur wenig mit der Wahrheit zu tun. Aber wenn Dich das Problem interessiert, das ich mit meiner Vermutung versuchsweise lösen wollte, dann kannst Du mir einen Dienst erweisen; versuche, sie so scharf wie es Dir nur möglich ist, zu kritisieren! Und wenn Du Dir ein Experiment ausdenken kannst, dessen Ausgang, Deiner Meinung nach, meine Behauptung widerlegen könnte, so bin ich bereit, Dir bei dieser Widerlegung zu helfen, soweit es in meinen Kräften steht.«

Genaugenommen gilt diese Antwort allerdings nur, wenn es sich um eine naturwissenschaftliche Behauptung handelt und nicht etwa um eine historische. Denn wenn die versuchsweise aufgestellte Behauptung sich auf etwas Historisches bezieht, so muß sich jede kritische Erörterung ihrer Richtigkeit natürlich auch mit Quellen befassen – wenn auch nicht mit »letzten« und »autoritativen« Quellen. Aber im Grunde würde meine Antwort, wie wir ja gesehen haben, dieselbe bleiben.

XVI

Es ist nun wohl an der Zeit, die erkenntnistheoretischen Resultate unserer Diskussion zusammenzufassen. Ich will sie in die Form von 10 Thesen kleiden:

1. Es gibt keine letzten Quellen der Erkenntnis. Jede Quelle, jede Anregung ist uns willkommen; aber jede Quelle, jede Anregung ist auch Gegenstand kritischer Überprüfung. Soweit es sich aber nicht um historische Fragen handelt, pflegen wir eher die behaupteten Tatsachen selbst zu prüfen, als den Quellen unserer Informationen nachzugehen.

2. Die Fragen der Wissenschaftslehre haben mit Quellen eigentlich nichts zu tun. Was wir fragen, ist vielmehr, ob eine Behauptung *wahr* ist – das heißt, ob sie mit den Tatsachen übereinstimmt. (Daß wir hier mit dem Begriff der objektiven Wahrheit im Sinne einer Übereinstimmung mit den Tatsachen operieren können, ohne uns in Antinomien zu verstricken, wurde von Alfred TARSKI gezeigt.) Wir versuchen das, so gut es geht, herauszufinden, indem wir die Behauptung selbstkritisch untersuchen und prüfen; das kann direkt geschehen, oder auch durch eine Untersuchung oder Prüfung der aus der Behauptung fließenden Folgerungen.

3. Im Zuge einer solchen Untersuchung können alle nur möglichen Arten von Argumenten herangezogen werden. Eine der häufigsten Methoden ist, zu prüfen, ob zwischen unseren Theorien und unseren Beobachtungen kein Widerspruch besteht. Aber in anderen Fällen werden wir vielleicht untersuchen, ob unsere historischen Quellen in sich widerspruchsfrei sind, und ob sie miteinander übereinstimmen.

4. Die Tradition ist – abgesehen von Wissen, das uns angeboren ist – bei weitem die wichtigste Quelle unseres Wissens, sowohl in quantitativer wie in qualitativer Hinsicht. Den Großteil unseres Wissens haben wir durch Beispiel erworben, durch Erzählungen, durch das Lesen von Büchern oder dadurch, daß wir gelernt haben, Kritik zu üben, uns der Kritik anderer zu unterwerfen, sie zu akzeptieren und die Wahrheit zu respektieren.

5. Die Tatsache, daß die meisten Quellen unseres Wissens auf Tradition beruhen, zeigt, daß der Antitraditionalismus ohne jede Bedeutung ist. Diese Tatsache darf aber nicht als Stütze für den Traditionalismus angesehen werden; denn kein noch so kleiner

Teil unseres überlieferten Wissens (und sogar des uns angeborenen Wissens) ist davor gefeit, kritisch untersucht und gegebenenfalls umgestoßen zu werden. Trotzdem wäre ohne Tradition Erkenntnis unmöglich.

6. Erkenntnis kann nicht mit nichts beginnen – mit der *tabula rasa* – aber sie kann auch nicht von der Beobachtung ausgehen. Der Fortschritt unseres Wissens besteht in der Modifikation, in der Korrektur von früherem Wissen. Gewiß ist es manchmal möglich, durch eine Zufallsentdeckung einen Schritt vorwärts zu tun (etwa in der Archäologie), aber im allgemeinen hängt die Tragweite einer Entdeckung davon ab, ob wir durch sie in Stand gesetzt werden, bestehende Theorien zu modifizieren.

7. Pessimistische und optimistische Erkenntnistheorien sind etwa gleich weit von der Wahrheit entfernt. Von den beiden Theorien PLATONS entspricht das pessimistische Höhlengleichnis eher der Wahrheit als die optimistische Lehre von der *Anamnese* (obgleich zuzugeben ist, daß alle Menschen, so wie alle Tiere und sogar alle Pflanzen, angeborenes Wissen besitzen). Aber obwohl die Welt der Erscheinungen in der Tat nur eine Welt von Schatten an der Wand unserer Höhle ist, so streben wir doch stets, diese Schattenwelt zu transzendieren. Und obwohl die Wahrheit, wie DEMOKRIT sagt, in der Tiefe verborgen liegt, ist es uns möglich, sie in der Tiefe zu suchen. Es gibt kein Kriterium, an dem wir die Wahrheit erkennen können – und insofern müssen wir dem Pessimismus recht geben. Aber es gibt Kriterien, die (wenn wir Glück haben) es uns ermöglichen, Irrtümer und Unwahrheiten als solche zu erkennen. Klarheit und Deutlichkeit sind keine Kriterien der Wahrheit; aber Unklarheit und Verworrenheit können wohl Anzeichen des Irrtums sein. Ebenso sind Folgerichtigkeit und Widerspruchlosigkeit kein Beweis für Wahrheit, aber Mangel an Folgerichtigkeit und Selbstwiderspruch sind sichere Anzeichen des Irrtums. Und die Irrtümer, die wir als solche erkannt haben, scheinen mit einem schwachen Licht, das uns helfen kann, den Weg aus dem Dunkel unserer Höhle zu finden.

8. Weder die Beobachtung noch die Vernunft sind Autoritäten. Intellektuelle Intuition und intellektuelle Einbildungskraft sind von größter Bedeutung, aber sie sind unverläßlich: Sie mögen uns die Dinge mit größter Klarheit zeigen, und uns dennoch in die Irre

führen. Sie sind die Hauptquellen unserer Theorien, und als solche unersetzlich; aber die meisten unserer Theorien sind ja doch falsch. Die wichtigste Funktion von Beobachtung und logischem Denken, aber auch von intellektueller Intuition und Einbildungskraft liegt darin, daß sie uns bei der kritischen Prüfung jener kühnen Ideen helfen, die wir brauchen, um ins Unbekannte vorzudringen.

9. Klarheit ist ein Wert an sich; Genauigkeit und Präzision aber sind es nicht. Es hat keinen Sinn, genauer sein zu wollen, als es unsere Problemsituation verlangt. Sprachliche Präzision ist ein Irrlicht; und Probleme, die die Bedeutung oder die Definition von Worten zum Gegenstand haben, sind unwichtig. Die Tafel der Ideen auf Seite 35 hat daher, trotz ihrer äußeren Symmetrie, eine wichtige und eine unwichtige Seite: Die linke Seite – Wörter und ihre Bedeutungen – ist unwichtig, aber die rechte Seite – Theorien und die Probleme, die mit deren Wahrheit zusammenhängen – ist von der allergrößten Wichtigkeit. Wörter sind nur wichtig, insofern sie dazu dienen, unsere Theorien zu formulieren; und verbale Probleme sollten unter allen Umständen vermieden werden.

10. Jede Lösung eines Problems schafft neue, ungelöste Probleme; um so interessantere Probleme, je schwieriger das ursprüngliche Problem war und je kühner der Lösungsversuch. Je mehr wir über die Welt erfahren, je mehr wir unser Wissen vertiefen, desto bewußter, klarer und fester umrissen wird unser Wissen über das, was wir nicht wissen, unser Wissen über unsere Unwissenheit. Denn die Hauptquelle unserer Unwissenheit liegt ja darin, daß unser Wissen nur begrenzt sein kann, während unsere Unwissenheit notwendigerweise grenzenlos ist.

Wir ahnen die Unermeßlichkeit unserer Unwissenheit, wenn wir die Unermeßlichkeit des Sternhimmels betrachten. Die Größe des Weltalls ist zwar nicht der tiefste Grund unserer Unwissenheit; aber sie ist doch einer ihrer Gründe.

Ich glaube, daß es der Mühe wert ist, den Versuch zu machen, mehr über die Welt zu erfahren, selbst wenn alles, was bei dem Versuch herauskommt, nichts ist als die Erkenntnis, wie wenig wir wissen. Dieses Bewußtsein unserer gelehrten Unwissenheit kann uns in manchen Schwierigkeiten helfen. Es dürfte uns gut tun, uns manchmal daran zu erinnern, daß wir zwar in dem Wenigen, das

wir wissen, sehr verschieden sein mögen, daß wir aber in unserer grenzenlosen Unwissenheit alle gleich sind.

XVII

Ich bin fast am Ende. Aber zum Schluß möchte ich noch ein letztes Problem berühren.

Wenn wir uns nur ein wenig bemühen, so können wir oft in einer philosophischen Theorie, die wir als falsch ablehnen mußten, einen wahren Gedanken entdecken, der wert ist, die falsche Theorie zu überleben. Findet sich vielleicht ein solcher Gedanke in einer der Theorien von den letzten Quellen der Erkenntnis, die ich hier abgelehnt habe?

Ich glaube ja; es ist, glaube ich, der eine der beiden Hauptgedanken, die der Lehre von der übernatürlichen Herkunft unserer Erkenntnis zugrunde liegen. Den einen dieser beiden Gedanken halte ich für falsch, den anderen für wahr.

Falsch ist, daß wir unsere Erkenntnis oder unsere Theorien durch *positive Gründe rechtfertigen müssen*, das heißt durch Gründe, die imstande sind, unsere Theorien zu beweisen, zu erhärten, oder doch wenigstens wahrscheinlich zu machen: durch Gründe, die auf mehr hinauslaufen als darauf, daß die betreffenden Theorien bisher der Kritik standgehalten haben. Dieser falsche Gedanke führt weiter zu dem Schluß, daß wir an eine *letzte, unbedingte oder autoritative Quelle der Erkenntnis* glauben müssen, wobei allerdings offen bleibt, was der Charakter dieser Autorität ist: ob menschlich, wie etwa Beobachtung oder Vernunft, oder übermenschlich und übernatürlich.

Der zweite und richtige Gedanke, dessen große Bedeutung von Bertrand RUSSELL hervorgehoben wurde, besagt, daß kein Mensch dekretieren kann, was wahr ist; daß es unsere Pflicht ist, uns der Wahrheit unterzuordnen; und *daß die Wahrheit über jeder menschlichen Autorität steht*.

Wenn man diese beiden Gedanken verbindet, so kommen wir von ihnen fast unmittelbar zu der Schlußfolgerung, daß die Quellen, von denen unsere Erkenntnis sich herleitet, übermenschlich sein müssen: eine Schlußfolgerung, die nur allzu leicht zu einer moralischen Anmaßung führt, die sich berechtigt fühlt, Gewalt anzu-

wenden gegen alle, die sich weigern, die göttliche Wahrheit anzuerkennen.

Leider aber halten viele, die mit Recht diese Schlußfolgerung ablehnen, an dem ersten der beiden Gedanken fest – dem Glauben an die Existenz von letzten Quellen der Erkenntnis – und lehnen statt dessen den zweiten ab – die These, daß die Wahrheit über aller menschlichen Autorität steht. Dadurch gefährden sie aber die Idee der Objektivität der Erkenntnis und des Bestehens von allgemein gültigen Maßstäben der Kritik und der Rationalität.

Ich glaube, wir sollten den Gedanken von den letzten Quellen der Erkenntnis fallen lassen und zugeben, daß alle Erkenntnis menschlich ist; daß sie durchsetzt ist mit unseren menschlichen Irrtümern, unseren menschlichen Vorurteilen, mit unserem Sehnen und unserem Hoffen. Wir sollten uns damit zufriedengeben, nach der Wahrheit zu *suchen*, auch wenn sie uns immer unerreichbar bleiben sollte. Wir können zugeben, daß unsere tastenden Versuche oft inspiriert sind; aber wir müssen auf der Hut sein gegen den Glauben, wie stark er sich uns auch aufdrängen mag, daß dieser unserer Inspiration eine Art von Autorität zukommt, ob nun göttlich oder irdisch.

Wenn wir uns also zu der Ansicht bekennen, daß es im ganzen Bereich unseres empirischen Wissens, wie weit es auch ins Unbekannte vorgestoßen sein möge, keine Autorität gibt, die über jede Kritik erhaben ist, dann können wir ohne jede Gefahr an der Idee festhalten, daß die Wahrheit selbst jenseits aller menschlichen Autorität ist. Ja, wir können nicht nur, wir müssen an ihr festhalten. Denn ohne sie gibt es keine objektiven Maßstäbe der wissenschaftlichen Forschung; keine Kritik an unseren kühnen Lösungsversuchen; kein Tasten nach dem Unbekannten und kein Streben nach Erkenntnis.

Weiterführende Literatur:

POPPER, K. R.: Logik der Forschung, Wien 1934, Tübingen 1966.

POPPER, K. R.: Die offene Gesellschaft und ihre Feinde, London 1945, München 1957.

POPPER, K. R.: Objektive Erkenntnis (Gesammelte Aufsätze), Oxford 1972, Hamburg 1973.

Die Molekularbiologie ist im wesentlichen der Versuch, das Funktionieren lebender Organismen als Folge von chemischen und physikalischen Abläufen zu verstehen, die sich auf molekularer Ebene abspielen (ohne die biologischen Prozesse dabei etwa auf die molekularen Abläufe zu reduzieren!). Im Idealfall konvergieren bei diesem Ansatz elektronenmikroskopische und biochemische Befunde dergestalt, daß es möglich wird, aus einer bestimmten molekularen Struktur eine spezifische Funktion abzuleiten und diese als Grundlage einer makroskopisch faßbaren biologischen Leistung zu erkennen.

Von diesem Idealfall sind wir heute, von wenigen Ausnahmen abgesehen (molekulare Genetik, Eiweißsynthese), meist noch weit entfernt. Vor dem Hintergrund einer prinzipiellen Betrachtung der »Zelle« als dem universalen Bauelement aller lebenden Gewebe gibt PETER SITTE eine Übersicht über den heutigen Stand unseres Wissens vom Zusammenhang zwischen Struktur und Funktion am Beispiel einiger ausgewählter Zellorganelle.

Der Autor promovierte nach dem Studium der Biologie, Chemie und Physik mit einer Arbeit über die Feinstruktur von Zellwänden und erhielt bereits 1960 im Alter von 31 Jahren eine Professur für biologische Elektronenmikroskopie und Zellenlehre in Heidelberg. Seit 1966 hat er einen Lehrstuhl für Zellbiologie an der Universität Freiburg i. Br. inne. Sitte ist Mitglied der Akademie Leopoldina, Präsident der Deutschen Gesellschaft für Elektronenmikroskopie sowie der Deutschen Zellbiologischen Gesellschaft und Vizepräsident der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte.

Zelluläres und Molekulares: Biologie der Minimal-Organismen

PETER SITTE

*Alle Natur, von ihren frühesten, fast noch immateriellen und ihren einfachsten Formen bis zu den entwickeltesten und höchst lebendigen, sei immer versammelt geblieben und bestehe nebeneinander fort, – Sternnebel, Stein, Wurm und Mensch. Daß viele Tierformen ausgestorben seien, daß es keine fliegenden Echsen und keine Mammuts mehr gebe, hindere nicht, daß neben dem Menschen das gerade schon formbeständige Urtier fortlebe, der Einzeller, das Infusor, die Mikrobe, mit einer Pforte zur Einfuhr und einer zur Ausfuhr an ihrem Zell-Leib, – mehr brauche es nicht, um Tier zu sein, und um Mensch zu sein, brauche es meistens auch nicht viel mehr.**

1. Über die Kunst, lebende Systeme zu atomisieren

»Leben«, das bedeutet allemal Wandelbarkeit und Vielfalt der Form. Es ist schier unmöglich, sich von dieser Vielfalt, die uns in der Biosphäre umgibt, einen rechten Begriff zu machen. Der Fleiß mancher Forschergeneration hat gezeigt, daß sie weit erhaben ist über menschliche Gehirnkapazität und Imagination. Die Vielfalt der Lebensräume erscheint wieder und wieder gespiegelt in einer potenzierten Vielfalt von Organismen, deren Dimensionen von unterhalb der Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops bis zu den Riesentangen, den Sequoien und Eucalypten, den tonnenschweren Bartenwalen reichen.

Die Organismenvielfalt ganz zu erfassen, das würde uns aber nicht nur überfordern, sondern auch frustrieren. Bloßes Kategorisieren befriedigt nun einmal nicht, und so notwendig dergleichen auch in gewissen Phasen der Wissenschaftsentwicklung ist, es führt nicht zur geistigen Beherrschung der Natur. Vielmehr geht es darum,

* THOMAS MANN, »Bekenntnisse des Hochstaplers Felix Krull«, 3. Buch, 5. Kapitel. Die letzte Aussage der zitierten Passage wird später als »kaustischer Scherz« klassifiziert.

die allgemeinen Gesetze aufzudecken, nach denen diese Vielfalt sich entwickelte und uns heute präsentiert. Nur diese Gesetze als das aus der Formen- und Ereignisfülle abstrahierte Allgemeine erlauben uns die Intellektualisierung unserer Umwelt. Einige dieser Gesetzmäßigkeiten sind jedermann geläufig: man weiß um die Vorschriften, nach denen die genetische Information von Generation zu Generation weitergegeben wird, oder von der Veränderung dieser Information, der Mutation; schließlich von den Spielregeln der Evolution, nach denen die stammesgeschichtliche Entwicklung in jenen Jahrmilliarden abrollte, seit es Leben auf diesem Planeten gibt *. Und noch ein Gesetz ist uns allen im Grunde geläufig: daß alle, wirklich alle die so sehr verschiedenen Lebewesen aus Zellen bestehen. Es gibt Einzeller, Vielzeller – eben die ganze unüberblickbare Schar der Organismen. Aber sie alle haben das gemeinsam, daß sie zellulär organisiert sind. Bisher wurde nichts gesagt, was nicht jeder Gebildete weiß. Doch schon kann das Kombinationsspiel beginnen. Kern der Evolutionslehre ist ja ein einfaches Postulat, dessen Konsequenzen aber gewaltige Dimensionen haben, nicht zuletzt auch für uns Menschen: Viele, vielleicht sogar alle Organisationsformen sind letzten Endes miteinander verwandt, das heißt, ihre Evolution nahm einst von denselben urtümlichen Ahnen-Organismen ihren Ausgang. Es gibt ein eigenartiges Gefühl, wenn man am Mikroskop sitzt und mit diesem Bewußtsein ein Infusor verfolgt, wie es sich in einem Tropfen Tümpelwasser tummelt, Nahrung sucht, Feinden ausweicht, sich teilt oder mit seinesgleichen paart, um genetische Information aus dem Genschatz seiner Art auszutauschen. Dieser Einzeller zeigt alle Grundeigenschaften des Lebens: Bewegung und Reizbarkeit, Stoff- und Energiewechsel, Entwicklung und Fortpflanzung, Vermehrung und Vererbung. Dabei ist seine Körpermasse unvorstellbar gering. Sie entspricht nur gut einem Hunderttausendstel von einem Milliardstel der Körpermasse eines Erwachsenen. Der Unterschied beträgt, wenn man einmal von allem Qualitativen absieht, schon rein gewichtsmäßig etwa 13 Zehnerpotenzen. Und doch, die von der Evolutionstheorie postulierte Verwandtschaft läßt sich auch morphologisch gut begrün-

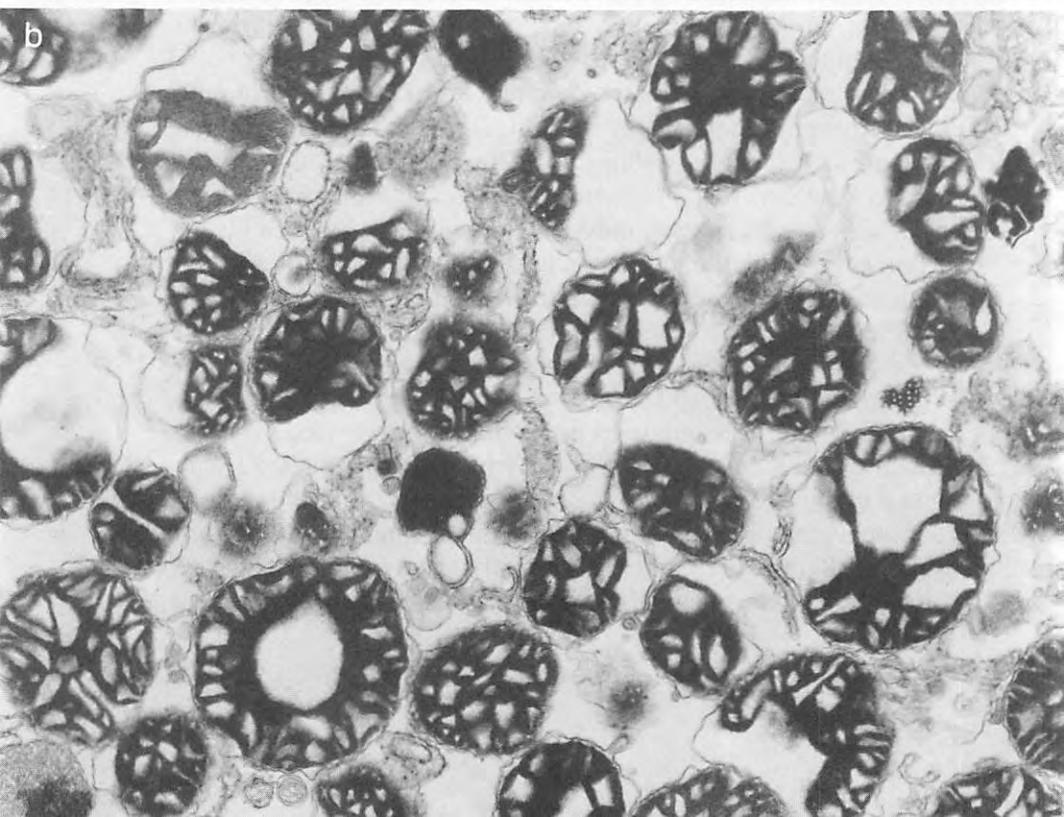
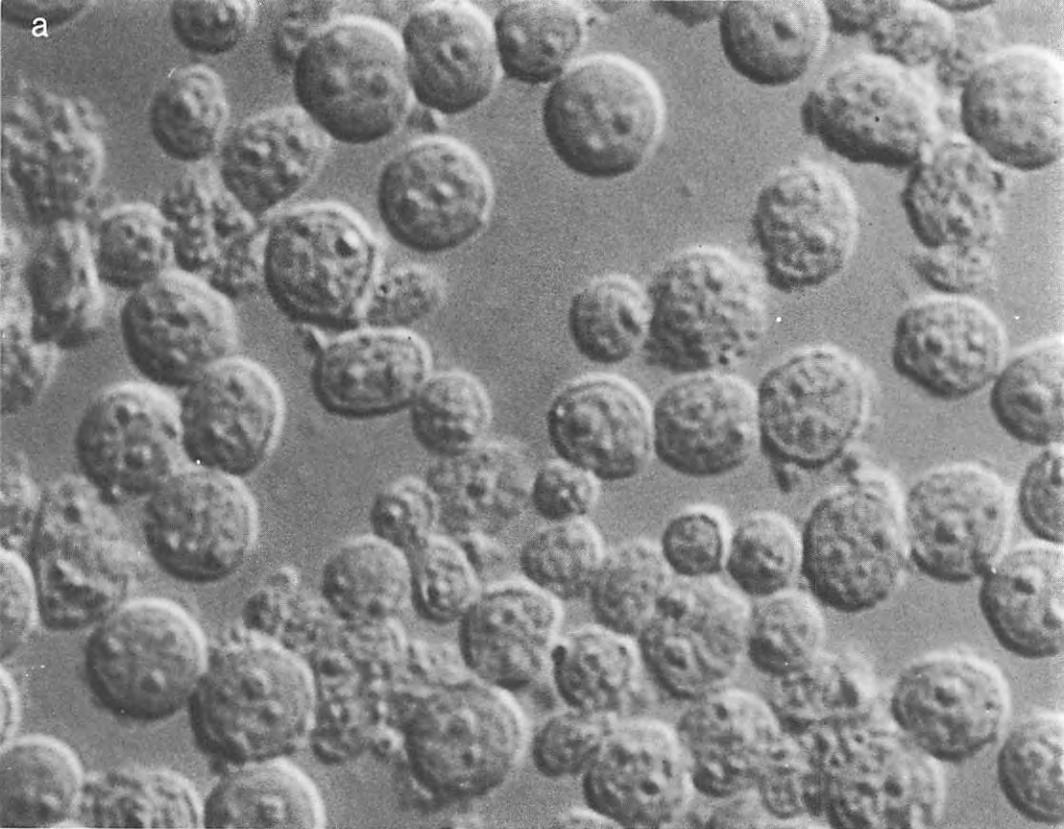
* Vgl. GÜNTHER OSCHKE, Das »Wesen« der biologischen Evolution. Mannheimer Forum 73/74, S. 9–50.

den. Denn die Zellen unseres Körpers sind der Zelle eines Infusors im prinzipiellen Aufbau sehr ähnlich. Die Homologie von Tieren und Pflanzen, jener nach ganz verschiedenen Richtungen evoluierten Zweige des Organismenstammbaumes, wurde in dem Moment offenbär, als es vor 130 Jahren gelang, die (damals ganz unerwartete) Homologie ihres Zellbaues aufzudecken. In all dem manifestiert sich ein weiteres allgemeines Gesetz: Der Übergang von makroskopischen zu mikroskopischen, nun gar zu elektronenmikroskopischen und molekularen Dimensionen ist mit einer Vereinheitlichung der Strukturen, mit einer Einschränkung der Formenvielfalt verbunden. Umgekehrt nimmt aber die Verbreitung dieser Strukturen zu: Spezielle Anpassungen treten zurück, der gemeinsame Ursprung wird sinnfällig.

Aber man muß sich vor allzu weitgehender Abstraktion hüten. So klein ein Infusor, eine Gewebezelle auch ist, es gibt doch noch viel kleinere Lebewesen, die ihrerseits wieder nur ein Promille der Masse eines Pantoffeltierchens, einer Euglene, einer Epithelzelle oder Hepatocyte erreichen. Zu diesen »ganz Kleinen« gehören die Bakterien. Eine mittlere Bakterienzelle ist gewöhnlich nicht größer als ein einziges Mitochondrion, also nicht größer als eines jener winzigen Kraftwerke der intrazellulären Atmung, wie sie zu Hunderten, ja Tausenden in jeder Protisten-, in jeder Gewebezelle vorkommen.

Gibt es vielleicht noch kleinere Zellen? Oder kann vielleicht eine Zelle in Komponenten zerlegt werden, die für sich allein noch lebens- und fortpflanzungsfähig sind? Diese Fragen sind zunächst einmal klar zu verneinen (wir werden später allerdings noch einmal auf sie zurückkommen müssen). »Die« Zelle hat sich bisher bei allen entsprechenden Untersuchungen als die kleinste, für sich allein lebensfähige Einheit erwiesen. Das hat ihr bekanntlich die Charakterisierung als »Elementar-Organismus« eingetragen.

Wir haben da ein großes Wort gelassen ausgesprochen, sogar etwas gelangweilt, denn so steht es schließlich schon lange in allen Lehrbüchern. Interessant wird es in der Tat erst wieder, wenn man sich einige Konsequenzen klarmacht, die nicht in allen Lehrbüchern stehen. Zunächst: Was passiert eigentlich bei einer Zellertrümmerung? Es ist heute keine besondere Kunst, Zellen schonend aufzubrechen und ihren Inhalt in geeigneten Medien zu fraktionieren, d. h. nach Organellen zu sortieren (Abb. 1). Die



Leistungsfähigkeit solcher subzellulärer Partikelpopulationen ist gewöhnlich sehr beträchtlich (sonst gäbe es die Biochemie nur in stark reduziertem Umfang): isolierte Mitochondrien atmen weiter; isolierte Chloroplasten erreichen die Photosyntheserate, die sie in lebenden Blattzellen hatten; in geeigneten Medien liegende Zellkerne replizieren DNS, bilden RNS und pumpen diese auch noch durch ihre Membranhülle nach außen – ganz wie in der intakten Zelle. Dennoch ist es bis heute niemandem gelungen, aus solchen Fraktionen wieder Zellen zusammenzubauen, die sich durch Teilung weiter vermehren könnten. Nun, vielleicht war man auf diesem Gebiete einfach noch nicht fleißig genug. Andererseits weiß man aber, daß Zellen auch dann nicht lange überleben, wenn man nur einzelne Organelle, z. B. den Zellkern, aus ihnen herausoperiert. Ersetzt man den entfernten Kern durch einen anderen (Kerntransplantation), dann läßt sich die Zelle kaum etwas anmerken; die Mikrochirurgie als solche schadet ihr also nicht. Läßt man aber die Zelle kernlos, dann treten nach und nach Störungen auf, schließlich stirbt sie ab – niemand vermag das aufzuhalten. Nicht nur im Labor, auch in der Natur werden übrigens allenthalben kernlose Zellen gemacht, und auch sie erweisen sich samt und sonders als relativ kurzlebig. Einen Extremfall in dieser Hinsicht markieren Säuger-Erythrocyten. Sie sind kernlos, sie enthalten nicht einmal Mitochondrien und überhaupt nur wenig von dem, was eine richtige Zelle ausmacht. Ihre Funktion im Blut erfordert ja auch nicht mehr als mit Hämoglobin gefüllte Membransäcke. Als Folge davon ist aber ihre (Über-)Lebensdauer auf etwa 3 Monate beschränkt, und das hat u. a. die Konsequenz, daß im Körper eines erwachsenen Mannes in jeder Sekunde etwa 10 Millionen von ihnen neu gebildet werden müssen (kein Druckfehler!).

Abb. 1: Fraktionen subzellulärer Partikel, gewonnen mit Hilfe der präparativen Ultrazentrifuge aus Gewebehomogenisaten. a) Zellkerne aus Rattenleber, 1600 × (Präparat: Prof. Dr. W. W. FRANKE, Interferenzkontrast-Aufnahme: Dr. H. FALK). b) Mitochondrien aus Rattenleber, elektronenmikroskopisch 23 000 × (Aufnahme: Dr. H. FALK). Isolierte Mitochondrien sehen anders aus als Mitochondrien in situ (vgl. Abb. 14, S. 84) – ihre Matrix ist stark verdichtet. Ihre biochemische Leistungsfähigkeit ist aber nicht wesentlich verändert. Diese Fraktion ist übrigens nicht ganz rein; z. B. sind links unten und oben rechts zwei »Uricosomen« zu sehen – vgl. auch dazu Abb. 14!

Das alles spricht eine klare Sprache: Die Zelle ist wirklich das kleinstmögliche Lebewesen. Es gibt übrigens ein noch viel überzeugenderes Argument. Wenn man sich in der belebten Natur noch so gründlich umsieht – man findet nichts, was alle Grundfunktionen lebender Systeme ausführen kann und nicht wenigstens den biologischen Wert, den Status einer Zelle hätte. Es ist bezeichnend, daß Viren und Phagen, nach Größe und Strukturkomplexität (Abb. 2) vom Range subzellulärer Partikel, nur innerhalb lebender Zellen vermehrt werden können. Als obligate intrazelluläre Parasiten müssen sie sich für ihren Vermehrungszyklus die Stoffwechsel-Fließbänder eines lebenden Systems »ausleihen«, weil sie selbst nur Teilfunktionen in einem solchen System besetzen können.

Es bleibt also dabei: Die Zelle ist das Minimal-Lebewesen. Weniger als eine Zelle – das ist zu wenig für ein lebendes System. Insofern gleicht also die Zelle für lebende Systeme dem, was für eine chemische Verbindung das Molekül ist oder für ein Element das Atom. Wir sehen, daß jene kleinste Einheit, die ohne Verlust entscheidender Systemeigenschaften nicht zertrümmert werden kann, bei den Lebewesen relativ sehr groß ist. Wenn man das Gewicht einer mittleren Bakterienzelle in Atomgewichtseinheiten (daltons) angibt, kommt man zur astronomischen Zahl von 10^{12} , und für typische Gewebezellen höherer Organismen erhöht sich diese Zahl noch einmal um den Faktor 1000.

Die These, daß die Zelle der Elementarorganismus sei, hat übrigens noch eine weitere Dimension. Bis jetzt haben wir nur eine untere Grenze markiert: weniger als eine Zelle genügt nicht. Gibt es auch eine obere Grenze? Der Begriff des Vielzellers ist geläufig, der Mensch selbst ist ja – auch – ein Metazoon. Es ist aber nicht von vornherein selbstverständlich, daß überzellige Organismen zugleich Vielzeller sind, und tatsächlich ist es auch nicht immer so (Abb. 3). Aus Gründen, die wir bestenfalls ahnen, ist die Evolution bei der Herausbildung makroskopischer Organismen kaum je den Weg der Zellvergrößerung gegangen, sondern den der Zellvervielfachung. Sie arbeitete, anthropomorph gesprochen, nach dem Baukastenprinzip (wie auch in vielen anderen Fällen, z. B. bei den Makromolekülen). Der Elefant besitzt nicht größere Zellen als die Maus, sondern mehr Zellen.

Dennoch ist auch im Vielzellergewebe die Zelle der kleinste Bau-

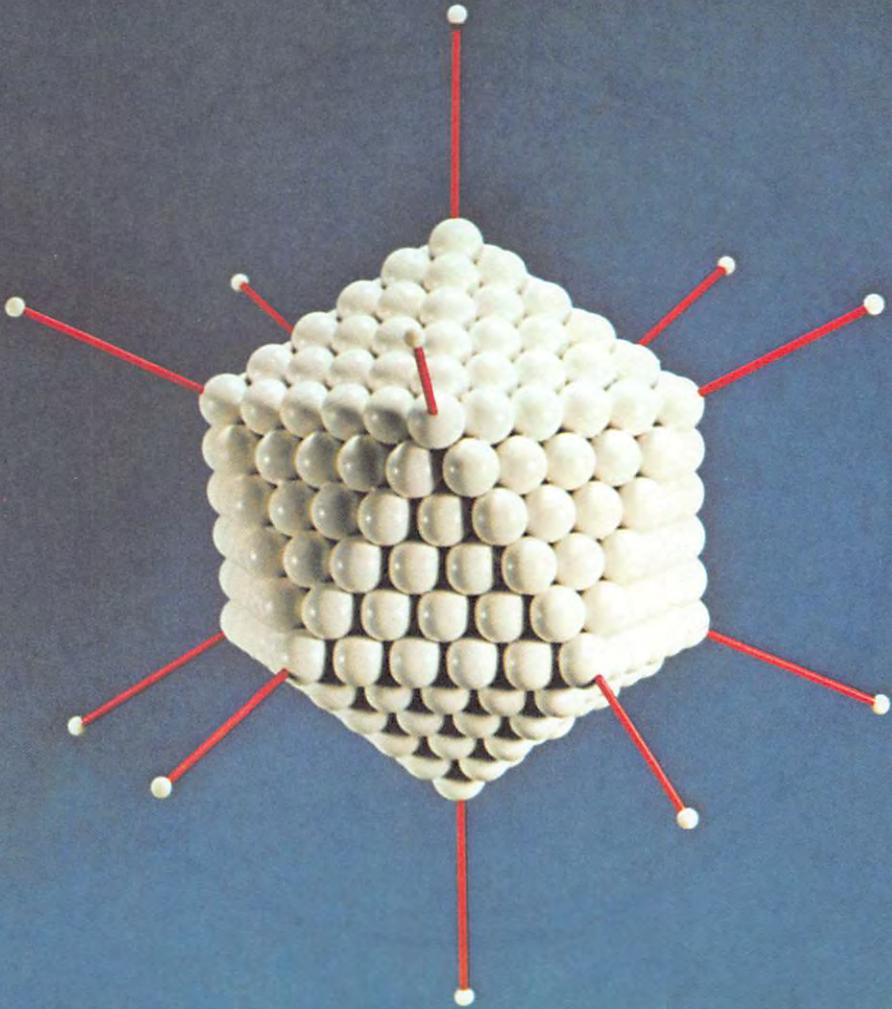


Abb. 2: Adenovirus. Die Proteinhülle (das »Capsid«) dieses Tumorstoffes besteht aus 252 symmetrisch angeordneten, globulären Proteinpartikeln. Der Durchmesser des gesamten Virusteilchens (»Virion«) beträgt nur knapp $\frac{1}{10000}$ mm = 100 Nanometer (nm). (Abgedruckt mit freundlicher Erlaubnis des Verlages Chemie, Weinheim, aus der Zeitschrift »Biologie in unserer Zeit«.)

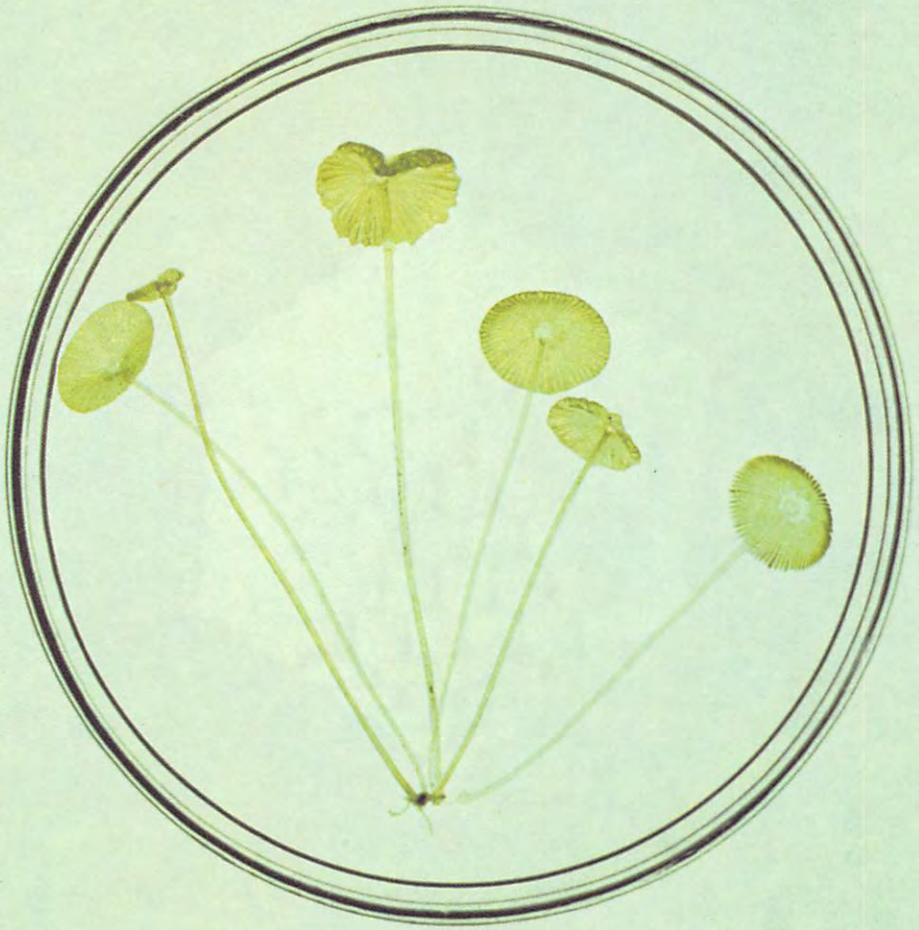


Abb. 3: Die Schirmalge *Acetabularia mediterranea*, von den Italienern »ombrelli di mare« genannt, wird mehrere Zentimeter groß. Dennoch besteht jedes Individuum nur aus einer einzigen Zelle. Aufnahme: W. HERTH. (Abgedruckt mit freundlicher Erlaubnis des Verlages Chemie, Weinheim, aus der Zeitschrift »Biologie in unserer Zeit«.)



Abb. 5: Ausschnitt aus einer quergestreiften Muskelfaser bei elektronenmikroskopischer Vergrößerung (schematisch). Die Längsachse der Faser verläuft im Bild vertikal, ebenso die Myofibrillen und die noch feineren Myofilamente (einzeln eingezeichnet nur in der median-längsgeschnittenen Myofibrille. Die dünneren Filamente bestehen aus Actin, die etwas dickeren aus Myosin. Die Actinfilamente sind in den Randzonen des Sarkomers, die Myosinfilamente dagegen in seinem Zentralbereich lokalisiert). Die Querstreifung resultiert aus einer Parallel- und Serienschaltung vieler Sarkomere. Die energieliefernden Mitochondrien (blau) sind vom massiv entwickelten kontraktilen Apparat an die Zellperipherie gedrängt. Die Sarkomeren (bzw. Myofibrillen) sind von netzig-verzweigten Membranschläuchen umspinnen. Diese bekommen in Höhe der Z-Streifen (= Grenzlinien zwischen den Sarkomeren innerhalb einer jeden Myofibrille im Bild horizontal verlaufend) Kontakt mit röhrenförmigen Einstülpungen der Plasmamembran (gelblich). Sie steuern den Kontraktionszustand des Muskels (vgl. dazu S. 85 und 87).

zogen von dichtgebündelten Myofibrillen, jede von feinen Membranschläuchen umspinnen, jede vielhundertfach längs gegliedert in zylindrische Sarkomere. Die Sarkomere sind in der gesamten Faser alle gleich lang und stehen bei benachbarten Fibrillen stets »im Register«. Daraus resultiert die charakteristische Querbänderung, die sich im Polarisierungsmikroskop als periodischer Wechsel stark anisotroper und fast isotroper (A- bzw. I-)Bänder präsentiert. Ein Sarkomer reicht definitionsgemäß von der Mitte eines I-Bandes bis zur Mitte des nächsten. Die solchermaßen als Grenzlinien etablierten Zentralscheiben der I-Bänder (Z-Streifen) sind strukturell markiert durch ein dichtes Geflecht eines Faserproteins, des α -Actinins. Von hier aus ragen zahlreiche Actin-Filamente gegen die Sarkomerenmitte hin, und zwischen ihnen sind in den A-Bändern die deutlich dickeren Myosin-Filamente aufgehängt. Führt man durch den Bereich der gegenseitigen Überlappung einen Querschnitt durch das Sarkomer, so kann man ein Strukturmuster höchster Regelmäßigkeit bewundern (Abb. 6): Sowohl Myosin- wie Actinfilamente bilden Sechseckmuster, die so ineinander verschränkt sind, daß jedes Actinfilament von 3 Myosinfilamenten umstellt ist, jedes Myosinfilament dagegen von 6 Actinfilamenten. Das Muster enthält also doppelt so viele Actin- wie Myosinfilamente. Dennoch ist das Massenver-

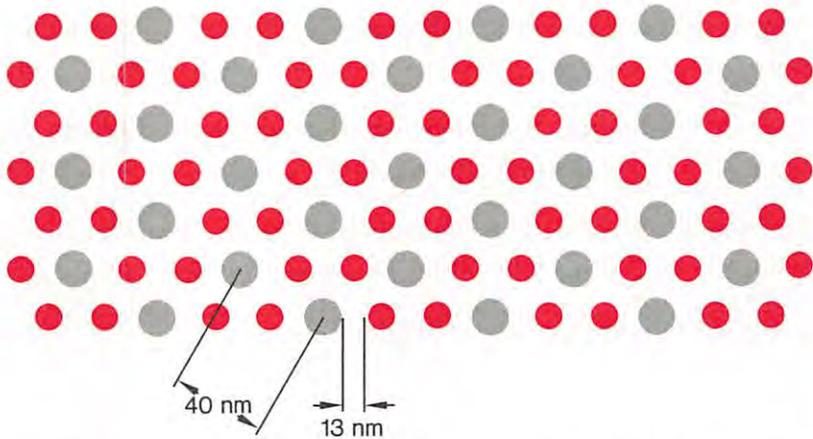


Abb. 6: Stark vergrößerter Querschnitt (schematisch) durch ein Sarkomer im Überlappungsbereich von Actin- (rot) und Myosin-Filamenten (grau).

hältnis Actin/Myosin in dieser Sarkomerenzone wegen der größeren Dicke der Myosinfilamente etwa 1 zu 4.

Das Sarkomer ist das in jeder quergestreiften Muskelzelle hundert- bis tausendfach wiederholte, in Serie geschaltete Funktionselement des chemomechanischen Energiewandlers, als den wir den Muskel charakterisiert haben: Hier kann unter Spaltung von ATP in ADP und Phosphat Kontraktionsarbeit geleistet werden. Dabei werden die I-Bänder schmaler und verschwinden schließlich ganz, während die A-Bänder ihre Breite beibehalten; auf diese Breite verkürzen sich die Sarkomere. Submikroskopisch spielt sich dabei folgendes ab: Die Myosinfilamente gleiten ohne Verkürzung tiefer zwischen die ebenfalls unverkürzten Actinfilamente hinein, bis sie an das Actinin-Geflecht der Z-Streifen stoßen. Zugleich berühren sich in diesem Zustand äußerster Kontraktion die gegeneinander gerichteten Enden der von benachbarten Z-Streifen ausgehenden Actinfilamente in der Sarkomerenmitte, sie können sich sogar leicht überlappen.

In der ganzen Art und Weise, nach der dieser »Gleitfaser-Mechanismus« funktioniert, spiegelt sich die Spezialisierung dieser Art von Muskeln wider: Ihre Konstruktion ist – anthropomorph gesprochen – angelegt auf hohe Kontraktionsleistung und damit auf hohe Kontraktionsgeschwindigkeit (denn Leistung ist Arbeit pro Zeit). Die Erreichung dieses Zieles wird erkaufte mit der Einschränkung der Kontraktion auf eine Richtung – parallele Bündelung der Fasern im Muskel, der Fibrillen in der Faser, der Filamente in der Fibrille – und durch ein beschränktes Ausmaß der Verkürzung.

Nach Abklärung der formalen Seite der Muskelkontraktion, die ohne Elektronenmikroskopie undenkbar gewesen wäre, waren die molekularen Mechanismen dieses Prozesses einer erfolgversprechenden Bearbeitung zugänglich geworden, zumal auch die Chemie von Actin und Myosin in der Zwischenzeit gute Fortschritte gemacht hatte. Von vornherein war klar, daß der Gleitfaser-Mechanismus auf einer delikaten Interaktion zwischen Actin und Myosin beruhen muß, da sich ja die Filamente selbst nicht verkürzen. Das Elektronenmikroskop zeigt denn auch »Querbrücken«, die von den Myosinfilamenten aus die nächstliegenden Actinfilamente erreichen. Sie mußten das Geheimnis der Kontraktion in sich bergen, und sie müssen hochdynamische Struktu-

ren sein – eine starre Verbindung zwischen Myosin und Actin wäre mit dem Gleitfaser-Modell unvereinbar. Was also sind diese Querbrücken, wie bewirken sie das teleskopartige Ineinanderrutschen der Filamente, wodurch werden sie aktiviert und inaktiviert?

Ein Teil dieser Fragen läßt sich beantworten auf Grund der molekularen Struktur der Myosinfilamente. Abb. 7a zeigt ein einzelnes Myosinteilchen. Dieses langgestreckte »Molekül« – in Wirklichkeit handelt es sich um ein Doppelmolekül mit einigen kleineren Begleitpolypeptiden mit dem respektablem Teilchengewicht von 470 000 daltons – ist in Kopf, Hals und Schwanz gegliedert, und zwar durch Lockerstellen in seiner sonst recht kompakten Struktur. An diesen Lockerstellen kann das Teilchen wie an Gelenken geknickt werden. Hier erfolgt auch der erste Angriff von Proteasen. Beispielsweise spaltet Trypsin (eine Endopeptidase) am Gelenk I zwischen Schwanz und Hals, so daß das Myosinteilchen in zwei ungleich große Bruchstücke zerfällt, LMM (Schwanz) und HMM (Kopf und Hals). Isolierte Schwanzstücke (LMM) zeigen keine Affinität zu Actin, bilden aber leicht mit ihresgleichen übermolekulare, faserige Aggregate. Dagegen lassen isolierte Köpfe keine entsprechende Aggregationstendenz erkennen, verbinden sich aber gerne mit Actin, und enthalten auch ATPase-Aktivität. Hier sitzt also der molekulare Energiewandler. Im Myosinfilament bilden die längs gebündelten Schwanzstücke eine Art Zentrалdocht und sorgen für den Zusammenhalt des Filaments, die Köpfe stehen einzeln seitlich ab (Abb. 7b). Sie entsprechen damit den vorhin erwähnten, dynamischen Querbrücken. Das Halsstück ermöglicht unter Verbiegung an Gelenk I ein verschieden weites, seitliches Ausschwenken des Kopfes. Das ist entscheidend wichtig für den Kontraktionsvorgang. Denn die in Abb. 6 für den Zustand der Erschlaffung angegebenen Abstände zwischen Actin- und Myosinfilamenten vergrößern sich bei Verkürzung der Sarkomere, weil das Sarkomerenvolumen bei der Kontraktion konstant bleibt; wird also die Länge verringert, müssen die Myofilamente seitlich auseinanderrücken. Interaktion bleibt aber trotzdem möglich – dank der ausschwenkbaren Halsstücke. Schnell noch ein Blick auf den Partner des Myosins, das Actin. Das Actinteilchen ist globulär. Actinmoleküle können sich nach Art einer Perlenkette linear zusammenlagern, und je 2 solcher

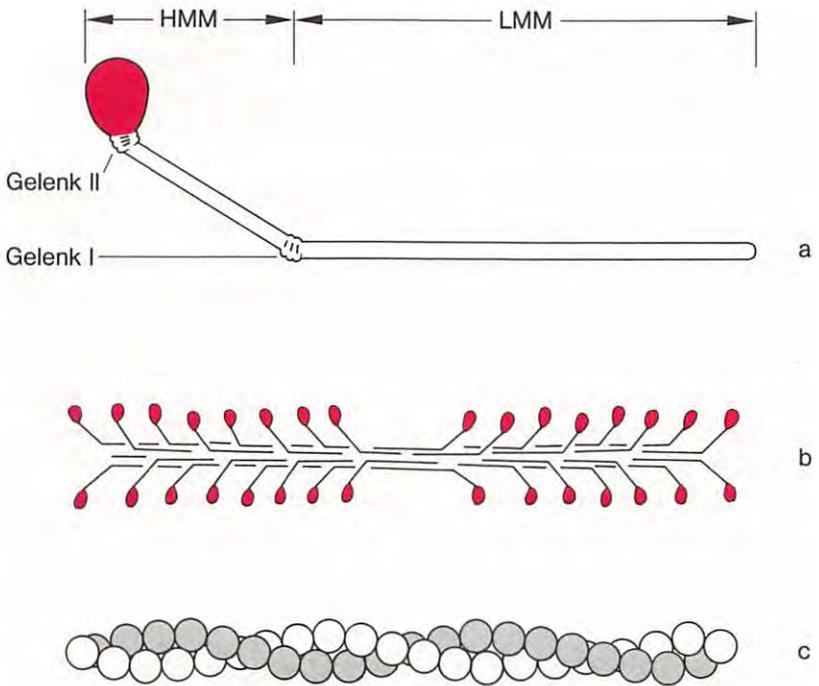


Abb. 7: Die molekularen Komponenten des kontraktiven Apparates quergestreifter Muskeln. a) Myosin-Teilchen (Gesamtlänge 145 nm). b) Myosin-Filament (schematisch, Vergrößerung geringer als in a und c); durch Zusammenbindung vieler Myosin-Teilchen mit ihren »Schwänzen« entsteht ein bipolares Übermolekül. c) Ausschnitt aus einem Actin-Filament; jedes der kugelförmigen Actin-Teilchen hat einen Durchmesser von 5,5 nm.

Ketten bilden, eng und steil umeinander gewunden, ein Actinfilament (Abb. 7c).

Betrachten wir jetzt den Funktionszyklus einer Querbrücke, wie man ihn heute – noch etwas hypothetisch – formulieren kann. Die Myosin-Köpfe tanzen durch Vermittlung der Halsstücke und der Gelenke I in schneller thermischer Bewegung an der Oberfläche der Myosinfilamente herum. Man schätzt, daß dabei jedes Köpfchen während jeder Millisekunde 4–10mal in unmittelbare Nähe eines gegenüberliegenden Actinfilaments gerät. Wird der Muskel gereizt, dann kommt es zur tatsächlichen Berührung, und das Myosinköpfchen komplexiert mit dem Actinteilchen, an das es

gerade anstößt. Diese Berührung löst nun aber eine Konformationsänderung an Gelenk II aus, das Köpfchen klappt gegenüber dem Halsstück aus der ursprünglichen 90°-Stellung in die 45°-Stellung um. Dadurch wird das Actinteilchen bzw. -filament um etwa 10 Millionstel mm weitergestoßen. Das ist sehr viel für eine molekulare Strukturänderung, aber wenig angesichts der etwa 5 Zehntausendstel mm, um die eine Querbrücke während der Kontraktion eines Sarkomers insgesamt wandern muß. Der Vorgang muß also wiederholt werden, und zwar gleich x -mal hintereinander, und dazu muß er zyklisierbar sein. Als makroskopischer Vergleich bietet sich das periodische Schrittmachen beim Gehen an. Wie wir dabei unsere Füße abwechselnd vom Boden abheben, nach vorne ziehen und erneut aufsetzen, so muß sich auch das Myosinköpfchen wieder vom Actin trennen, und Gelenk II muß wieder seine Ausgangskonfiguration annehmen. Ersteres wird durch das energische Dazwischentreten von ATP bewirkt: Dieses Mikromolekül lagert sich an das Köpfchen an und besetzt die aktive Stelle der Myosin-ATPase; es bewirkt dadurch eine drastische Verminderung der Affinität zum Actin. Kaum ist die Trennung der Partner erfolgt, wird das ATP von der ATPase gespalten und dadurch Gelenk II wieder »gespannt«. Damit kann der Zyklus (Abb. 8) von neuem beginnen. Der Vorgang erinnert formal an das Weiterziehen eines Filmstreifens im Kinoapparat oder an das Hochklettern eines Affen an einem Seil.

Zum Schluß dieser etwas vereinfachten Skizze von Struktur und Funktion quergestreifter Muskeln noch einige Zahlen. Pro Funktionszyklus einer Querbrücke werden im Mittel 1–2 ATP-Moleküle verbraucht. Sämtliche quergestreifte Muskeln eines Erwachsenen (inkl. Herzmuskel) benötigen pro Tag schätzungsweise 45 kg ATP. Das ist gut die Hälfte der – im wesentlichen von Mitochondrien durch Nahrungs-Veratmung – täglich hergestellten ATP-Menge (150–200 Mol ATP insgesamt). Für den, der sich lieber im Molekularen und Zellulären bewegt als in makroskopischen Dimensionen, sei ergänzt, daß ein gut trainierter Bizeps etwa 10^{13} Sarkomere enthält – diese Angabe erlaubt dem Beflissenen eine Fülle weiterer Berechnungen. Hier nur noch so viel, daß bei Muskeln, die auf Dauertätigkeit eingerichtet sind (Herzmuskel, Flugmuskel von Vögeln und Insekten), besonders leistungsfähige Mitochondrien auch zwischen die Myofibrillen ein-

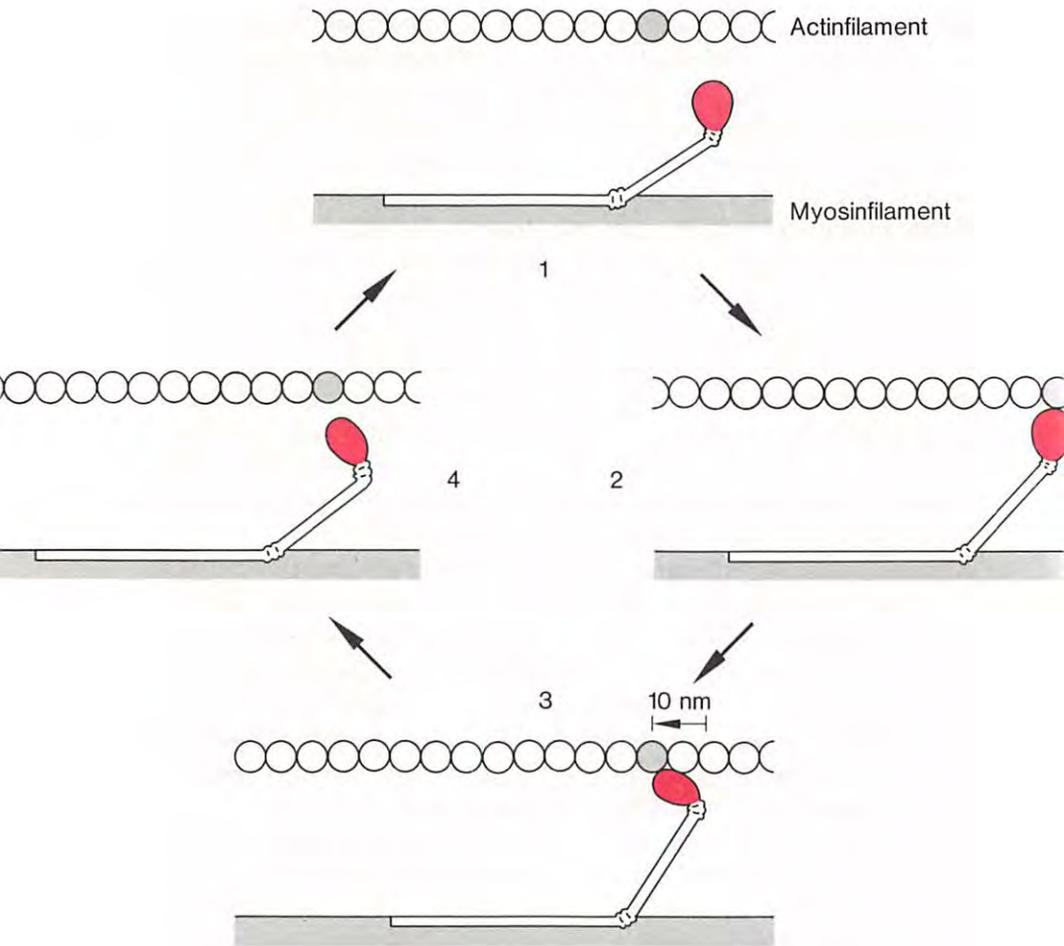


Abb. 8: Der molekulare Viertaktmotor der Muskelmaschine. 1. Takt: Actin und Myosin getrennt. 2. Takt: durch Verbiegung von Gelenk I bekommt Myosin-Kopf Kontakt mit Actin. 3. Takt: Myosin-Kopf kippt an Gelenk II um etwa 45° »nach hinten« und stößt dadurch das Actin-Filament um etwa 10 nm weiter. 4. Takt: Myosin-Kopf lagert ATP an und trennt sich vom Actin. Übergang zum 1. Takt: ATP-Spaltung bewirkt erneutes »Spannen« von Gelenk II – damit ist die Ausgangsposition wieder erreicht.

gebettet sind und so die ständige ATP-Nachlieferung sicherstellen. Man kann also schon im lichtmikroskopischen Schnittbild den Leistungscharakter eines Muskels diagnostizieren. Der Wirkungsgrad der Muskelmaschine beträgt zwischen 30 und 50%. Muskelzellen schneiden damit im Vergleich zu technischen Energiewandlern recht gut ab. Das Leistungsgewicht liegt bei etwa 40 cal/g, das entspricht etwa jenem von hochgezüchteten Kolbenmotoren, wie sie bei Sportflugzeugen Verwendung finden.

b) Glatter Muskel und Nicht-Muskel

Was läßt sich nun aus all dem für Bewegungen in Zellen ableiten, die nicht als Muskelzellen spezialisiert sind? Sehen wir uns zunächst, damit der Sprung nicht zu groß wird, glatte Muskelzellen an. Bei ihnen sind die Myosinfilamente nicht parallelisiert, und so gibt es weder Sarkomeren-Gliederung noch Querstreifung. Sie kontrahieren sich gewöhnlich langsam, das Ausmaß der Kontraktion kann aber sehr wesentlich über dem bei quergestreiften Muskeln liegen, und auch die Kontraktionsrichtung liegt nicht ein für allemal fest. Diese Zellen sind also weniger spezialisiert und vielseitiger als die hochgezüchteten quergestreiften Muskelfasern. Das Elektronenmikroskop zeigt in ihrem Plasma Ansammlungen von Actinfilamenten, statt der Myosinfilamente treten – zumindest bei Wirbeltieren – nur kurze Myosinaggregate auf. Diese funktionieren wie Zahnräder zwischen Zahnstangen, sie ziehen benachbarte Actinfilamente aneinander vorbei. Auch hier erfolgt die Kontraktion also nach einem Gleitfaser-Mechanismus.

Dasselbe gilt, wie sich inzwischen gezeigt hat, für sehr viele Arten zellulärer Kontraktilität und Motilität. Auch in Zellen, die dergleichen nur gelegentlich und nebenberuflich machen, kommen stets »Mikrofilamente« vor, die sich bei näherer Untersuchung als Actinfilamente erweisen. Auch läßt sich stets ein myosinartiges Protein isolieren, das ATP zu spalten und Bewegung in die Mikrofilamente zu bringen vermag. Es war nicht eben einfach, diese funktionalen Parallelen zu hochspezialisierten Muskelzellen aufzudecken. Denn die spärlichen Mikrofilamente bleiben im vierbildartigen Strukturenstrudel des Cytoplasmas so unsichtbar wie die Goldnadel im Heu. Aber einerseits gibt es einen einigermaßen spezifischen Hemmstoff für diese Art zellulärer Aktivität,

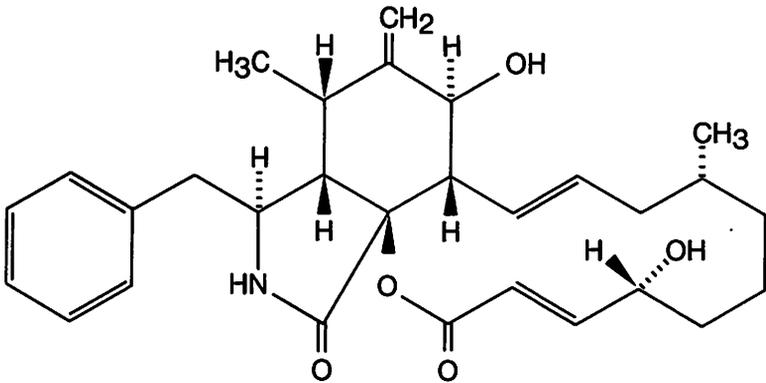


Abb. 9: Cytochalasin B (=»Phomin«), ein Stoffwechselprodukt gewisser Pilze, hemmt intrazelluläre Bewegungen schon in geringsten Konzentrationen.

das Cytochalasin B (Abb. 9). Es bringt Plasmaströmung, Vesikeltransport, Zellteilungen u. dgl. zum Stillstand. Andererseits hat man auch einen Trick entdeckt, mit dessen Hilfe die Mikrofilamente im elektronenmikroskopischen Schnittbild nachgewiesen werden können. Man überschwemmt die Zelle mit HMM, also mit Kopf- und Halsstücken von Myosinteilchen. Diese reagieren ganz spezifisch nur mit einem einzigen Molekültyp in Gottes weiter Natur – mit Actin. Die Komplexbildung erfolgt (mangels ATP) in 45°-Stellung. Die vielen, in immer gleicher Winkelstellung um das Mikrofilament herumgelagerten HMM-Partikel »dekorieren« es in sehr auffälliger Weise, es sieht aus wie eine Harpunenspitze.

Diese Methode hat übrigens noch einen besonders interessanten Aspekt. Man braucht, wenn man Mikrofilamente etwa bei Schleimpilzen oder Grünalgen oder Hefen oder . . . nachweisen will, nicht jedesmal erst das von diesen Organismen fabrizierte Myosin mühsam zu isolieren, sondern kann für die Dekoration getrost HMM aus Säugermuskeln verwenden. Denn das Actin ist bei Tieren, Pflanzen, Protisten so ähnlich, daß es überall in gleicher (noch dazu ja höchst spezifischer) Weise mit Säugermyosin zu reagieren vermag. Man erwäge, was diese Funktionsstabilität bei einem Protein, dessen Sequenz (beim Kaninchen) immerhin 374 Aminosäuren umfaßt, angesichts der Evolutions-Jahrmil-

liarden bedeutet. Kann man sich einen überzeugenderen Beleg für die Verwandtschaft aller Organismen dieser Erde wünschen? Man kann nicht. Aber wir müssen doch gleich einschränken: Bakterienzellen enthalten keine Mikrofilamente, kein Actin, kein Myosin. Dieser heute unter dem Begriff *Protoocyte* geführte Zelltyp der Bakterien und Blaualgen (ihrerseits als »Prokaryonten« zusammengefaßt, das entspricht den Spaltpflanzen = Schizophyten seligen Angedenkens) ist eben nicht nur kleiner, sondern auch insgesamt ganz anders organisiert als die Zellen der übrigen Organismen. Diese «Übrigen» – sie werden taxonomisch-systematisch als »Eukaryonten« zusammengefaßt (wir gehören natürlich auch dazu!) – sind durch ihren komplexeren Zellbau charakterisiert. Für Zellen des Eukaryonten-Typs wurde der Begriff *Eucyte* geprägt. In Tabelle 1 sind einige Unterschiede zwischen Proto- und Eucyte zusammengefaßt. Sie sind, wie man sieht, fundamen-

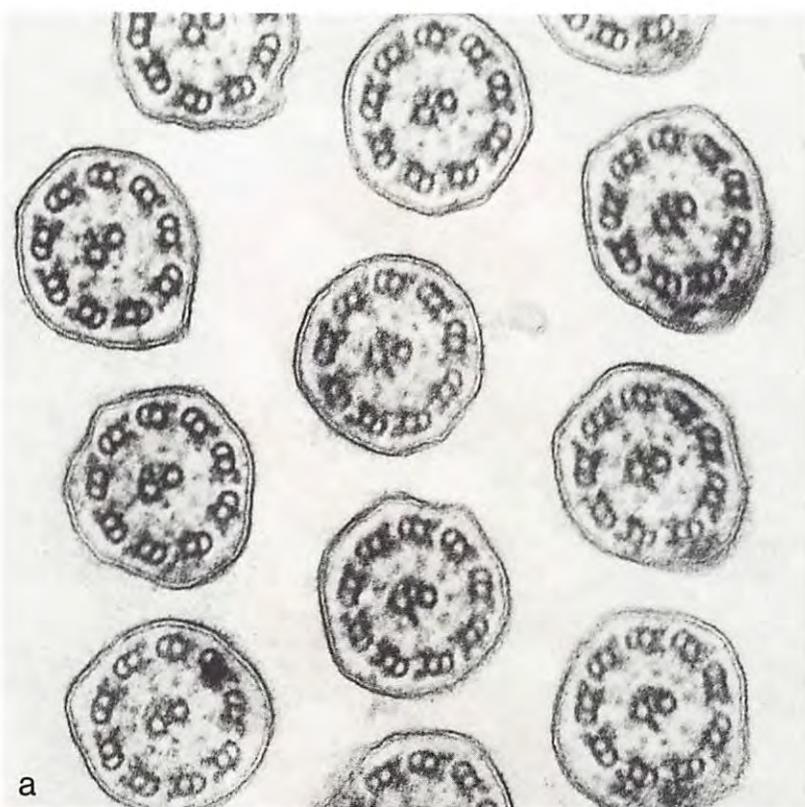
Tab. 1: Einige charakteristische Unterschiede zwischen *Protoocyte* und *Eucyte*.

	Protoocyte	Eucyte
Größe (mittl. Durchmesser, μm)	1,5	15
Zahl unterschiedlicher Kompartimente pro Zelle	1–3	> 4
ER und Kernhülle	–	+
Generationsdauer (Optimalbedingungen)	20 Min.	12–20 Stund.
Zellwand	mit Murein	ohne Murein
Membranen	Cardiolipin + Sterollipide –	Cardiolipin – Sterollipide +
Ribosomen: Größenklasse, in SVEDBERG-Einheiten	70 S	80 S
Hemmbar mit	Chloramphenicol	Cycloheximid
DNS-Gehalt (Nucleotidpaare pro Zelle, haploid)	10^6 – 10^7	10^8 – 10^{11} (Säuger: 5×10^9)
DNS, repetitive Sequenzen	–	+
Histone	–	+
Kontraktile Mikrofilamente	–	+
Flagellen: mit 20 Mikrotubuli	–	+

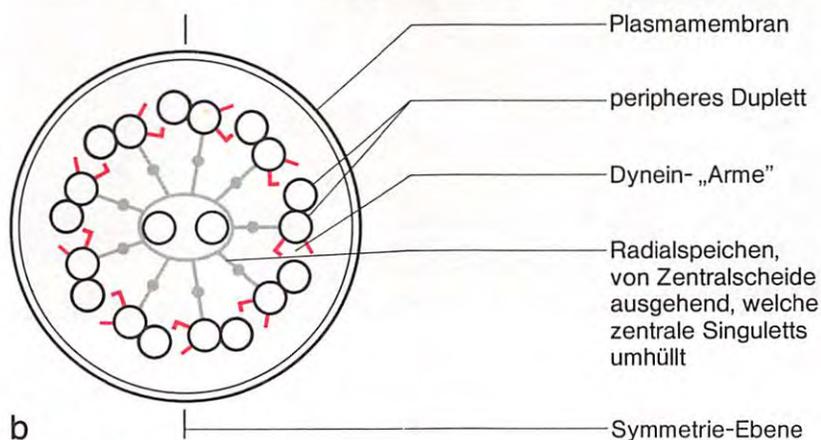
tal. Wir werden auf diese eigenartige Zweiteilung des Organismenreiches im 4. Abschnitt noch einmal zurückkommen. Doch zurück zur Motilität!

c) *Kontraktion ohne Actomyosin?*

Ja, auch das gibt es, und zwar auch bei Eukaryonten. Denn Geißeln und Cilien – zweifellos überaus effektive Bewegungsmaschinen – enthalten wahrscheinlich weder Actin noch Myosin. Ihr Feinbau ist (ein Beleg mehr für den monophyletischen Ursprung aller Eukaryonten) zwar recht komplex, dennoch überall im wesentlichen derselbe – Abb. 10 zeigt ihn. Die Geißelschäfte sind von der Plasmamembran überzogen und bergen in ihrem Inneren in regelmäßiger Anordnung 20 Mikrotubuli, elastische Röhren, aus einem globulären Protein, dem Tubulin, gebildet (Abb. 11). Sie sind komplexer gebaut und dicker als Actin- und Mikrofilamente. 18 der 20 Mikrotubuli sind paarweise über die Peripherie verteilt (Dupletts), die 2 restlichen flankieren symmetrisch die Ciliennachse (Singulets). Die gesamte Anordnung besitzt nur eine Symmetrieebene, was mit der Festlegung der Schlagrichtung zu tun hat. Wären Mikrotubuli kontraktile, so könnte der Cilienschlag durch einseitige, rhythmische Verkürzung der Dupletts erklärt werden. Sie sind es aber nicht: Niemand hat bisher rasche Kontraktionen von Mikrotubuli beobachten können, und Tubulin ist ohne ATPase-Aktivität, kann also den allgegenwärtigen Brennstoff der Zelle gar nicht umsetzen. Andererseits schlagen aber Cilien nur unter ATP-Verbrauch. So begann auch hier bald die Suche nach einer ATPase als dem entscheidenden Energiewandler. Und man fand sie, nachdem es gelungen war, Cilien in Gramm-Mengen zu isolieren. Zu diesem Zweck legt man zunächst Massenkulturen des Abwasserciliaten *Tetrahymena* an. (Dabei handelt es sich um ein Tier von unschätzbarem Wert, denn es vermag auch erwärmte Gewässer – etwa unterhalb von fließwassergekühlten Kernkraftwerken – biologisch vorzuklären; man betrachte also sein Portrait – Abb. 12 – mit gebührendem Respekt, zumal es auch ein Lieblingshaustier der modernen Zellbiologie ist, und das nicht nur im Zusammenhang mit Cilien.) Jeder solche Ciliat rudert also mit seinen ungezählten Cilien durch das Abwasser und tut das auch dann noch, wenn dem Kulturmedium durch



a



b

Abb. 10: Cilien-Querschnitte. a) Cilien von Tetrahymena, $110\,000\times$ (El.-mikr. Aufnahme: Dr. F. WUNDERLICH). b) Schema.

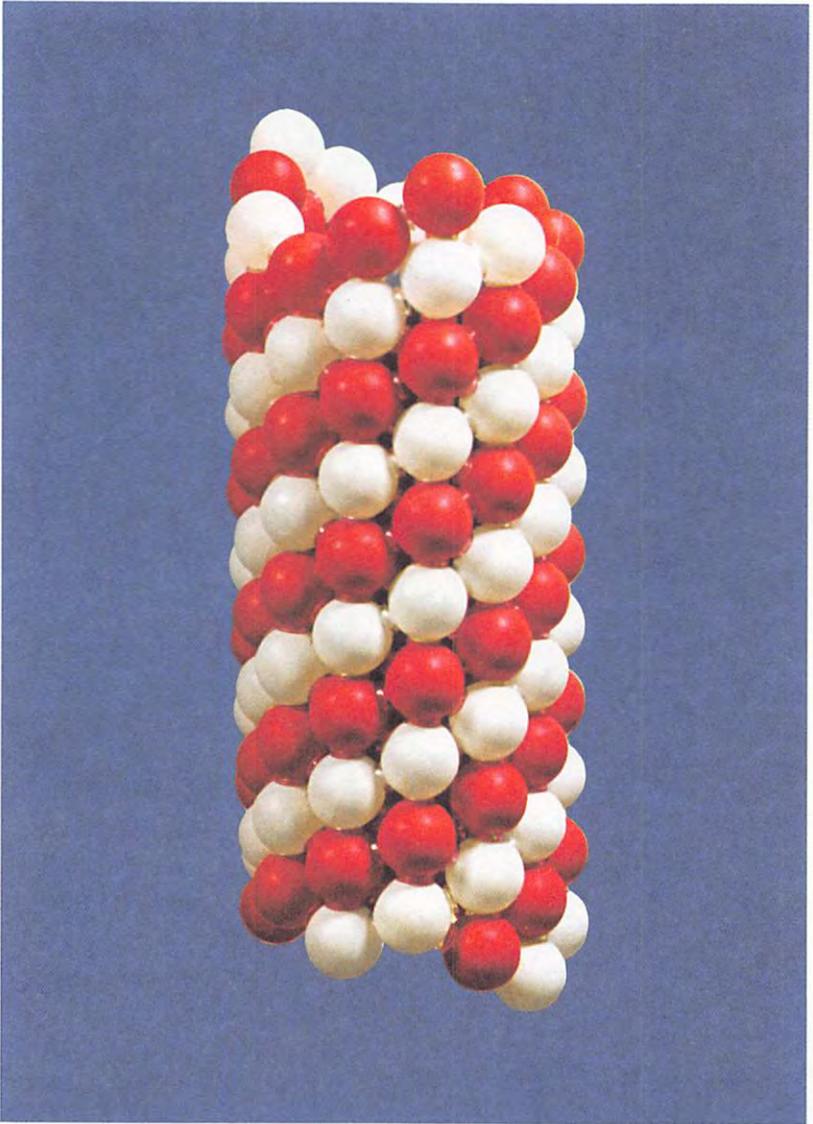


Abb. 11: Ausschnitt aus einem Mikrotubulus (Strukturmodell). Globuläre Tubulin-Einheiten (hier repräsentiert durch Tischtennisbälle) bilden eine Röhre von ca. 25 nm Durchmesser, wobei im Normalfall ausgerechnet 13 Kugeln auf einen Umlauf kommen. Die Länge der Mikrotubuli ist dagegen unbestimmt und kann jeweils den Bedürfnissen der Zelle angepaßt werden. Mikrotubuli finden sich nicht nur in Geißeln und Cilien, sondern z. B. auch in den Spindelfasern der Mitose.

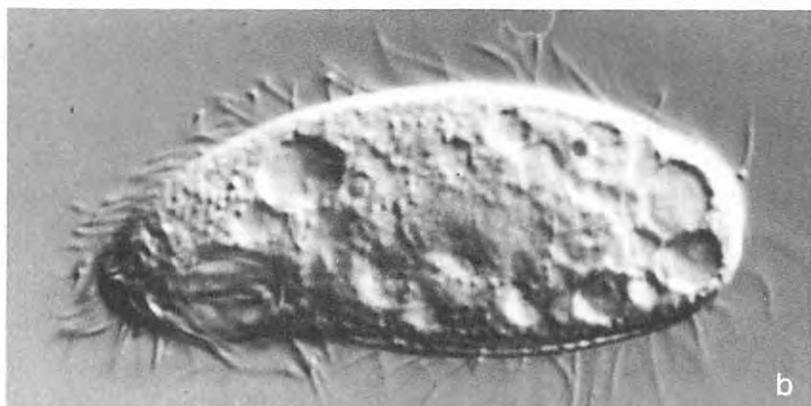


Abb. 12: *Tetrahymena pyriformis*. a) 500 \times ; b) 1200 \times . (Interferenzkontrast-Aufnahmen: cand. biol. W. NÄGEL.)

Chelatoren alle Calciumionen entzogen worden sind und ein Alkoholgehalt von 9% eingestellt wurde. (Man sieht, daß solche Primitivlinge über menschliche Promille-Berechnungen weit erhaben sein können.) Setzt man jetzt plötzlich Calciumionen im Überschuß zu, so brechen alle Cilien an ihrer Basis ab. Die solchermaßen glattrasierten Protisten sinken rasch nach unten, die isolierten Cilien bleiben ihres geringen Gewichtes und ihrer großen Oberfläche wegen im Medium suspendiert. Aus 50 l Kultur lassen sich etwa 0,5 g reine Cilien gewinnen, und damit kann die

Suche nach der Cilien-ATPase beginnen. Zuvor noch ein Hinweis für den Tierfreund: *Tetrahymena* überlebt die ganze Mißhandlung ohne weiteres, die Cilien werden rasch regeneriert.

Wenn man die Cilien durch Detergenzien ihrer Membranhülle beraubt und dann die Konzentration an zweiwertigen Kationen wieder herabsetzt, fallen zwei Fraktionen an, eine unlösliche (sie besteht aus den Dupletts und ist ohne ATPase-Aktivität) und eine lösliche. Die letztere kann ATP spalten; sie enthält das Tubulin der beiden Singulets und die als »Arme« bezeichneten Anhängsel der peripheren Dupletts. Diesen letzteren entstammt die ATPase-Aktivität. Das betreffende Protein – globulär, mit starker Tendenz zu kettenförmiger Aggregation – wurde *Dynein* getauft, um seine Rolle bei der Krafterzeugung wenigstens für humanistisch Gebildete sprachlich sinnfällig zu machen. Setzt man Dynein der unlöslichen Fraktion wieder zu, dann treten bei der elektronenmikroskopischen Kontrolle auch die »Arme« plötzlich wieder auf.

Aufgrund dieser Befunde kann man für den Cilienschlag eine Modellvorstellung entwickeln, die auf einen Gleitfaser-Mechanismus hinausläuft: Die Mikrotubuli spielen darin etwa die Rolle von Actinfilamenten, das Dynein – dessen Arme schon rein morphologisch an »Querbrücken« von Myofilamenten erinnern – jene von Myosinfilamenten. Durch die Aktivität des Dyneins werden die elastischen Dupletts aneinander vorbeigezogen, die Cilie wird dadurch gekrümmt, sie schlägt. Diese Hypothese hat in letzter Zeit sehr an Wahrscheinlichkeit gewonnen. Es gelang, Cilien während des Schlagens zu fixieren und ihre Spitzenregionen im Elektronenmikroskop darzustellen. Dabei zeigte sich, daß von den beiden Alternativen der Abb. 13 die zweite zutrifft, was nach dem Gleitfaser-Modell zu erwarten stand. Und bei Schwänzen von Seeigel-Spermien, deren achsennahe Strukturen durch kurze Behandlung mit Trypsin zerstört worden waren, ließ sich nach ATP-Zusatz das Auseinandergleiten der Dupletts im Dunkelfeld unmittelbar beobachten.

d) *Es geht auch ohne Fasergleiten*

Geißeln und Wimpern arbeiten also nach demselben Prinzip wie Muskeln und Mikrofilamente. Nur die beteiligten Proteine sind

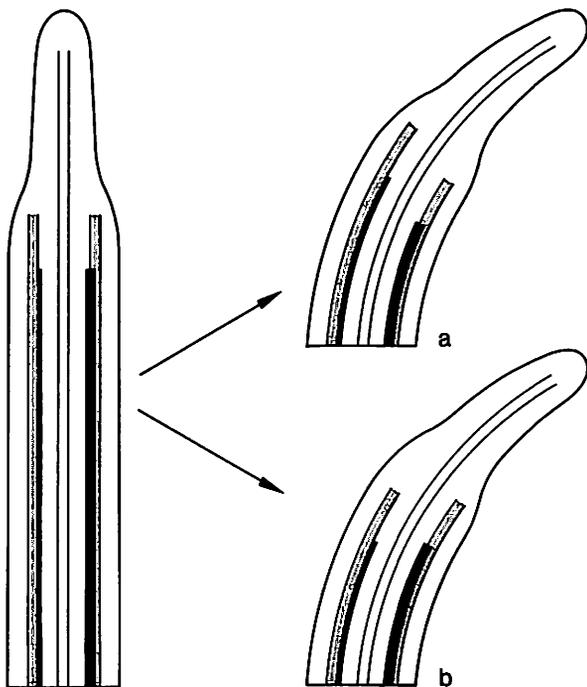


Abb. 13: Vorderes Cilienende während des Cilienschlages. a) Nach der Kontraktionshypothese ist zu erwarten, daß die peripheren Dupletts auf der Innenseite verkürzt sind. b) Nach der Gleitfaservorstellung scheinen dagegen die äußeren Dupletts verkürzt (in Wirklichkeit werden äußere und innere Dupletts ohne Verkürzung aneinander vorbeigezogen, woraus dieser Eindruck resultiert). Alternative b erwies sich als zutreffend. (Verändert n. P. SATIR, J. Cell Biol. 39, 1968, S. 79.)

andere. Tubulin vermag Myosin nicht zu binden, Mikrotubuli bilden mit HMM keine »Harpunenspitzen«. Umgekehrt bindet das Alkaloid der Herbstzeitlose (Colchicin) spezifisch an Tubulin, nicht aber an das (chemisch sonst nicht unähnliche) Actin. Bezüglich der Rollenverteilung beim Kontraktionsprozeß gibt es aber jedenfalls klare Entsprechungen: Dynein ist dem Myosin analog, Tubulin dem Actin. Es ist nicht einmal ausgeschlossen, daß sich Tubulin und Actin als verwandte, »homologe« Proteine erweisen werden, und vielleicht trifft dasselbe sogar für Myosin und Dynein zu.

Aber leider – die schöne Einheitlichkeit dieses Bildes trägt. Schon

heute wissen wir, daß das Gleitfasermodell keine universelle Gültigkeit beanspruchen kann. Zumindest im Falle der Bakteriengeißeln findet *kein* Fasergleiten statt. Procyten sind eben anders! Eine Bakteriengeißel ist so dünn wie ein einziger Mikrotubulus und kann schon deshalb mit einer Eukaryonten-Cilie nicht verglichen werden. Auch sonst nichts als Unterschiede: Die Geißel durchstößt mit einer komplizierten Basalstruktur die Plasmamembran und ragt in den extraplasmatischen, extrazellulären Raum hinaus. Sie ist aus einem einheitlichen Protein aufgebaut, dem Flagellin. Das Flagellin kann ATP nicht spalten; und beherrscht es diese Kunst, sie würde ihm wenig helfen, denn außerhalb der Plasmamembran, außerhalb der Zelle gibt es kein ATP. So kann man sich die schraubenförmigen Bewegungen der Bakteriengeißeln nur durch die Annahme deuten, daß im Bereich des Basalkornes unter ATP-Spaltung rhythmische, molekulare Strukturveränderungen erzwungen werden, die sich dann jeweils wie eine Welle bis zum Flagellenende hin fortpflanzen und einseitige Verkürzungen oder Streckungen – und damit die Flagellenbewegung – bewirken.

3. Die Metabolismus-Apparatur

a) Biochemie und Kompartimente

Urphänomene des Lebens haben beinahe definitionsgemäß die Eigenschaft, daß man überall auf sie stößt, wo immer man Lebendes näher ansieht. Das gilt von den Bewegungsvorgängen, aber auch vom Metabolismus, vom Energie- und Stoffwechsel. Keine Angst – es liegt mir fern, daß ich etwa den Leser durch eine Rekapitulation der schönen Stoffwechsel-Wandtafeln, die er ohnedies mit einem Blick zu übersehen gewohnt ist, langweile oder gar erschrecke. Nur bitte ich ihn, dieses Eine zu beachten: Unter den zahllosen Reaktionen des Zellmetabolismus gibt es viele, die sich gegenseitig stören. Wie können sie dennoch im Minimalorganismus nebeneinander ablaufen?

Die Antwort auf diese Frage lernt man heute gewöhnlich schon vor dem Erreichen mittlerer Reife: Jede Zelle (wir sollten limitieren: jede Eucyte) ist in ihrem Inneren durch zahlreiche Membranen in verschieden große Räume gegliedert, sie ist »kompartimentiert«. Metabolismus darf also gewiß nicht mit dem Zusam-

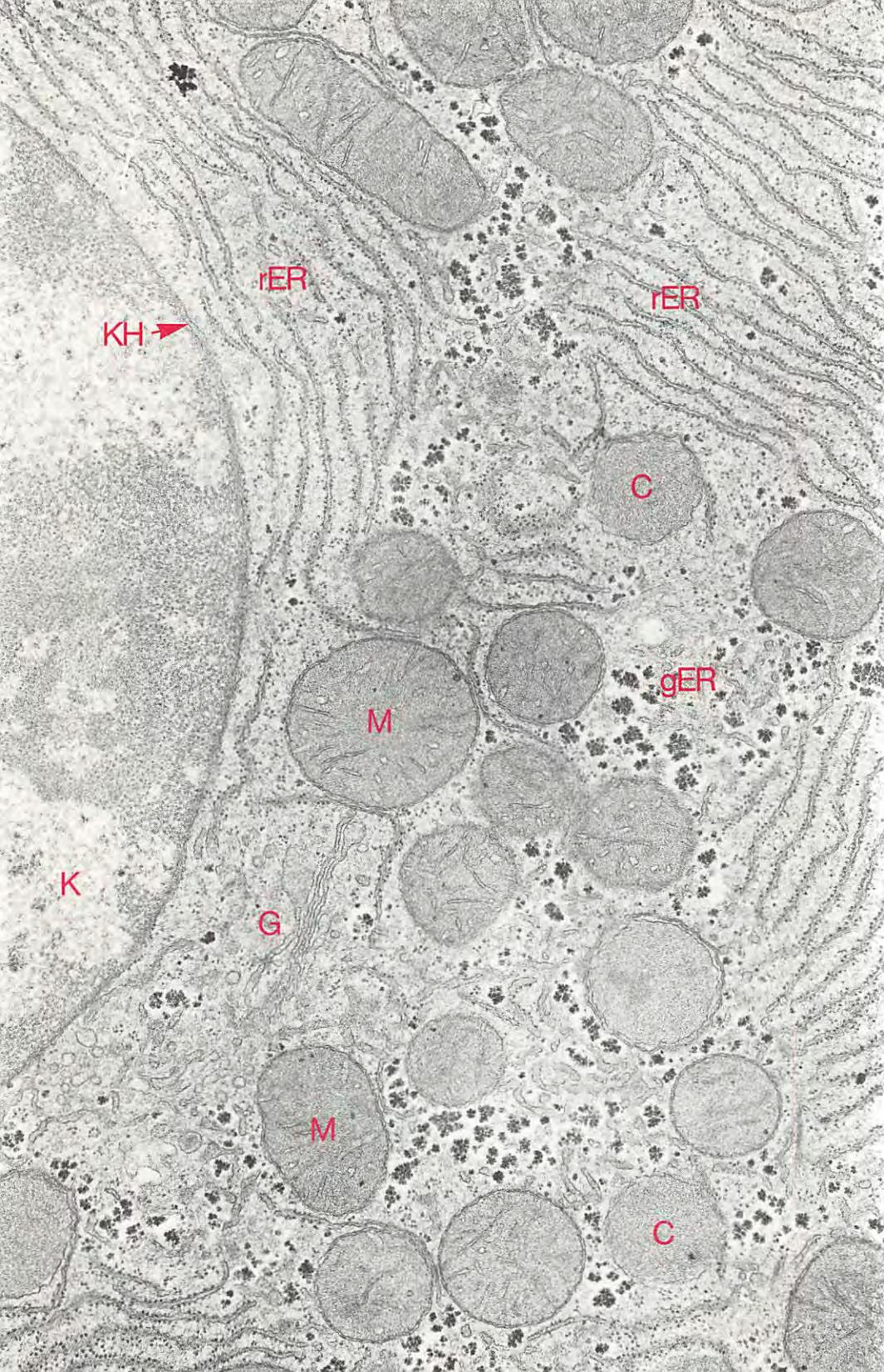
menkesseln eines Eintopfes verglichen werden, sondern eher mit raffinierter Küchenkunst, die sich zahlreicher, säuberlich getrennter Töpfchen bedient. Die Abbildungen 14 und 15 führen das Töpfchenarsenal einer Leberzelle vor. Die Leber kann bekanntlich besonders viel, und so sind Hepatocyten für eine Bestandsaufnahme zellulärer Reaktionsräume besonders geeignet. Beim Betrachten der Abbildungen und ihres Begleittextes behalte man bitte im Auge, daß es sich hier tatsächlich um Entsprechungen zu Metabolismus-Wandtafeln handelt. Auch hier tritt uns – etwas abstrakt – die allgemeine Struktur-Funktions-Beziehung entgegen. Zellkompartimentierung, das ist eine Art »gedruckte Schaltung« des Stoffwechsels!

Wenn ein Chemiker komplexe Reaktionen durchführt, bedient er sich einer Apparatur adäquater Komplexität. Er verteilt also Teilreaktionen auf getrennte Reaktionsgefäße und steuert den Gesamt Ablauf durch das Öffnen und Schließen von Verbindungsstücken. So auch die Zelle. Kompartimentierung bedeutet allemal Möglichkeit zur Steuerung, zur Kontrolle.

b) Divide et impera

Dieses Prinzip soll an einem Beispiel veranschaulicht werden, das wir schon kennen. Als von den Querbrücken zwischen Myosin- und Actinfilamenten die Rede war (S. 68 ff.), wurde auch die Frage gestellt, wodurch sie aktiviert und inaktiviert werden. Die Antwort darauf war aber zunächst unterschlagen worden (hatten Sie das bemerkt?). Jetzt holen wir sie nach.

Das Endoplasmatische Reticulum (die Abkürzung dieses schwerfälligen Terminus als »ER« ist eingebürgert und durchaus salonfähig) durchzieht mit flachen Doppelmembranen (»Zisternen«) oder auch in Form verzweigter Membranröhren gewöhnlich weite Bereiche der Zelle. Ihm gehört auch die Kernhülle zu, eine große, hohlkugelige Zisterne, die das Chromatin gegen das Cytoplasma abgrenzt. Der weiten Verbreitung dieses Membrangeflechtes und seiner Gestalt-Heterogenität entspricht eine erkleckliche Vielfalt von Funktionen. Häufig sind ER-Zisternen mit aktiven Ribosomen besetzt. In diesem Fall werden Sekretproteine synthetisiert. Daher ist diese Form, das »granuläre« ER oder Ergastoplasma, in den Zellen von Proteindrüsen und in Plasmazellen massiv entwick-



KH →

iER

iER

C

M

gER

K

G

M

C

kelt. Darüber wird noch zu sprechen sein. Im Moment interessiert aber die »agranuläre«, ribosomenfreie Ausbildungsform des ER mehr, die ein wahrer Alleskönner ist. Wir finden sie beteiligt am Glycogenabbau in der Leber, an der Sekretion der dabei anfallenden Glucose ins Blut, an den »Entgiftungsreaktionen« in der Leber, an der Lipid- und Steroidsynthese – in den Interstitialzellen des Hodens, in Zellen des Corpus luteum und in der Nebennierenrinde ist das ER daher imposant entwickelt; und immer wieder begegnet es uns dort, wo aktiver Ionen-transport in größerem Maßstabe stattfindet: in den Belegzellen des Magens, in den Salzdrüsen von Meeresvögeln, ja im sogenannten Nephridialplasma von Protozoen, wo es mit feinsten Kanälchen die Zuführungsgänge der kontraktilen Vacuole umspinnt. Und damit sind wir wieder beim Muskel angelangt: Jene vielfach verzweigten Membranschläuche, welche die Myofibrillen wie Ärmel einer Strickjacke umfassen, gehören zum agranulären ER. Und auch diese Membranen sind auf aktiven Ionen-transport spezialisiert, sie pumpen Calciumionen in das Innere der Schläuche. Daher ist im schlaffen Muskel das Calcium strikt kompartimentiert, es ist innerhalb der ER-Tubuli akkumuliert, während seine Konzentration im eigentlichen Cytoplasma (und damit auch im Bereich der Querbrücken) unter 10^{-8} molar ist, d. h. weniger als 0,000 000 04 %ig (Gew./Vol.). Unter diesen Umständen ist, auch und gerade wenn ATP zur Verfügung steht, jede Interaktion zwischen Myosin und Actin ausgeschlossen. Denn die Oberfläche der Actinfilamente ist von zwei zusätzlichen, regulatorischen Proteinen besetzt, Troponin und Tropomyosin. Das Tropomyosin deckt jene Stellen der Actinmoleküle, wo sich das Myosin ansetzen könnte, zu, wenig-

Abb. 14: Ultradünnschnitt durch eine Rattenleber-Zelle. K = Kern; KH = Kernhülle (doppelt); M = Mitochondrien; C = Cytosomen, von den Mitochondrien durch einfache Hüllmembran unterschieden (es handelt sich hier um »Uricosomen«, die den Abbau von Purinkörpern zu Harnstoff bewerkstelligen); G = ein Dictyosom des GOLGI-Apparates; ER = endoplasmatisches Reticulum; rER = »rauhe« Form – die ausgedehnten Zisternen sind dicht mit punktförmigen Ribosomen (»Protein-Nähmaschinen«) besetzt; gER = »glatte« Form, aus verzweigt-verschlungenen Tubuli gebildet. Die kräftig kontrastierten Flecken im Bereich des gER sind Glycogen. 26 000 ×. (Mit freundlicher Genehmigung der Japan Electron Optics Laboratory Co., Ltd., Tokyo, abgedruckt aus den »JEOL NEWS« 7 B, 1969, S 7.)



Abb. 15: Ausschnitt aus einer Rattenleber-Zelle, halbschemat. Vgl. Abb. 14. Zellkern links unten. Rechts unten: Zelloberfläche mit Mikrovilli, an Blutkapillare (rot) grenzend; hier erfolgt Stoffaufnahme durch Endocytose (vgl. Abb. 17). Oben Gallenkanal (rosa) zwischen zwei benachbarten Hepatocyt. Rauhes ER gelb, glattes ER ocker; GOLGI-Apparat und GOLGI-Vesikel grün; Cytosomen hellblau; Mitochondrien dunkelblau; Lysosomen violett; rechts der Bildmitte ein sekundäres Lysosom mit halbverdaulichem Mitochondrion (»Autophagen-Vacuole«, vgl. S. 95).

stens solange das mit ihm eng verbundene Troponin in der für Calciummangel typischen Konformation vorliegt. Das Troponin ist aber bezüglich der Calcium-Konzentration ein sehr empfindlicher Sensor. Steigt sie über einen kritischen Schwellenwert an (er liegt für Säugermuskeln bei $2,2 \times 10^{-7}$ molar), dann schnappt die Molekülstruktur des Troponins in einen anderen stabilen Zustand um und reißt dabei auch das Tropomyosin mit. Zeitgemäß formuliert lautet das so: Ca^{2+} wirkt als allosterischer Effektor über Troponin durch kooperative Wechselwirkung auf die Kettenkonformation des Tropomyosins so ein, daß die Myosinrezeptoren am Actinmolekül akzessibel werden. Wenn das einmal passiert ist, dauert es – wie wir gesehen haben – nur noch wenige Mikrosekunden, bis die ersten Querbrücken-Zyklen anlaufen. Der Muskel kontrahiert sich.

Die Steuerung des Kontraktionszustandes beruht also auf einem Calciumschalter. Das ER gibt seinen Calciumhort nur heraus, wenn der Muskel über die motorische Endplatte gereizt wird. Dann bricht ja das Membranpotential entlang der gesamten Plasmamembran schlagartig zusammen, und das wird über feinste Einstülpungen der Plasmamembran bis tief ins Zellinnere weitergemeldet, genauer gesagt, bis an jeden Z-Streifen hin (vgl. Abb. 5). Hier hat nun das ER Kontakt mit der Plasmamembran. Das Aktionspotential überträgt sich auf die ER-Tubuli und macht auch sie durchlässig für Ionen. Gemäß dem steilen, während der letzten Erschlaffungsphase durch aktiven Transport errichteten Konzentrationsgradienten strömen nun die Calciumionen sturzartig aus, ihre Konzentration im Bereich der Sarkomeren schießt über den Schwellenwert hinauf (bis auf etwa 10^{-5} molar). Wird der Muskel nicht weiter gereizt, dann baut die Plasmamembran ihr Ruhepotential wieder auf, die ER-Schläuche saugen sich mit Calciumionen voll, und der kontraktile Apparat ist stillgelegt, bis der nächste Impuls den Calciumschalter wieder umlegt.

c) Das Fließen von Membranen

Membranen sind nicht einfach Barrieren, es kann auf diesem oder jenem Wege allerhand durch sie hindurch. Das ist lebenswichtig. Denn wie schon die Zelle ein »offenes« System ist, angewiesen auf ständigen Stoffaustausch mit der Umgebung, so auch die mei-

sten Kompartimente – wir sahen es ja soeben. Es gibt nun aber Situationen im Leben der Zelle, in denen die gängigen Transportmechanismen überfordert sind. Daß selbst relativ große Moleküle, die etwa als Cosubstrate an vielerlei Reaktionen beteiligt sind (ATP, Coenzym A usw.), und um so mehr echte Substrate (Aminosäuren, Nucleotide, Monosaccharide) über spezifische Transportstellen durch Membranen geschleust oder gar gepumpt werden können, ist so geläufig, daß man sich (zu Unrecht) nichts Besonderes mehr dabei denkt. Wenn sich nun aber eine Amöbe oder ein Leukocyt ein ganzes Bakterium einverleibt, oder wenn sich Zellen aus Schleim- und Proteindrüsen Sekretgranula mikroskopischer Durchmesser ausverleiben, dann geht das nicht mehr mit normalem Membrantransport zu. Tatsächlich werden hier ganze Kompartimente transferiert, vereinigt, geteilt, neu etabliert oder aufgehoben – und das alles setzt die Fähigkeit der Kompartimente und ihrer Membranen voraus, sich unter gewissen Umständen so zu verhalten wie Fettaggen auf der Suppe, die man ja auch durch gekonntes Rühren in kleinere aufteilen oder zu größeren zusammenfließen lassen kann.

Jenes Organell, das Membranfluß sozusagen hauptberuflich betreibt, ist der Golgi-Apparat bzw. seine kleineren Funktionseinheiten, die Dictyosomen (Abb. 16). Bei ihnen handelt es sich um Zisternenstapel, die gewöhnlich an der Grenze lichtmikroskopischer Sichtbarkeit liegen. Golgi-Zisternen tragen, im Gegensatz zu den viel ausgedehnteren des ER, niemals Ribosomen – der Golgi-Apparat ist zur Proteinsynthese unfähig. Dennoch ist er es, der in Proteindrüsen die (Pro-)Sekretgranula entstehen läßt, und zwar durch Membranfluß. Das zeigt Abb. 17 schematisch, und gleich noch einiges mehr. Denn sie läßt dazu ein, den Weg eines Export-Proteins von seiner Entstehung bis zur Ausschleusung aus der Zelle zu verfolgen. Also: Synthese natürlich an aktiven Ribosomen, d. h. an solchen, die Mitglieder von Polysomen sind und die – da es sich um Export-Protein handelt – mit ihren größeren Untereinheiten an ER-Zisternen festsitzen. Man weiß heute, daß die wachsende Polypeptidkette ein Stück weit in einem Kanal der größeren Ribosomenuntereinheit geborgen ist. Dieser Kanal setzt sich bei ER-Ribosomen durch die Zisternenmembran hindurch fort, so daß die Polypeptidkette schon während ihrer Entstehung in das Innere der Zisterne gelangt. Das ist, wenn man so

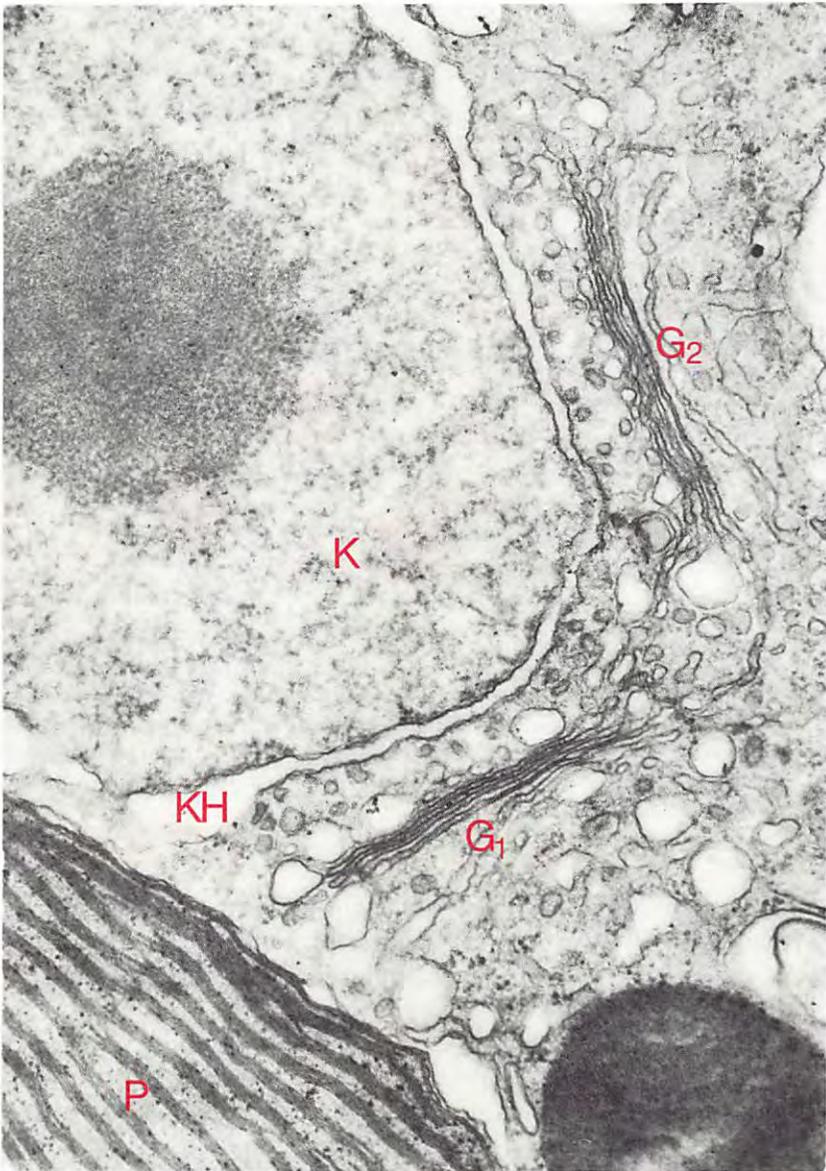


Abb. 16: Ausschnitt aus einer Zelle der Alge *Botrydium granulatum*. Bezeichnungen wie in Abb. 14; P = Chloroplast. G₁ und G₂ = in Nähe der Kernhülle liegende Dictyosomen, die über Vesikelströme von der Kernhülle (ER!) aus mit Proteinen und Membranstoffen versorgt werden. In der Umgebung der Dictyosomen zahlreiche GOLGI-Vesikel. 52 000 ×. (El.-mikr. Aufnahme: Dr. H. FALK.)

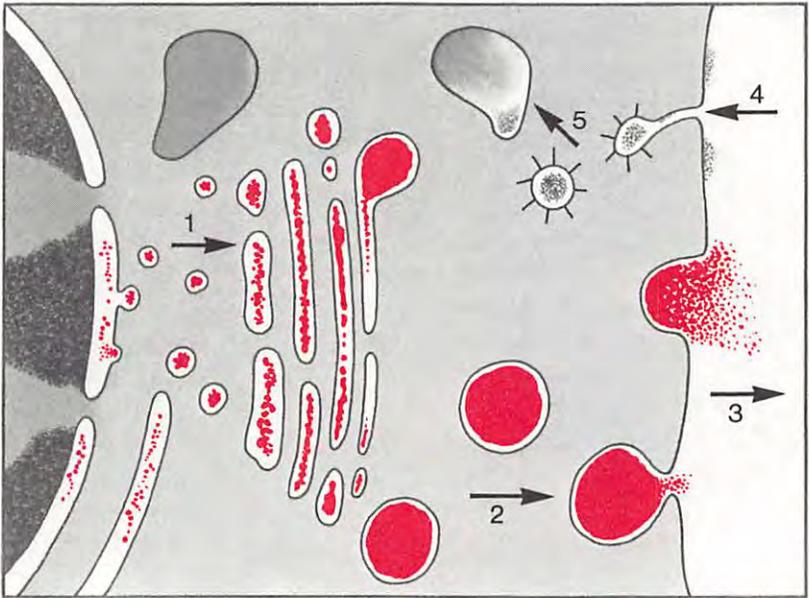


Abb. 17: Membranfluß. 1–3 = Bildung und Ausschleusung von Sekreten (farbig) aus der Zelle. 1 = Vesikelstrom von ER (Kernhülle) zu einem Dictyosom (Bildmitte; vgl. Abb. 16); 2 = GOLGI-Vesikel transportieren das eingedickte und veränderte Sekret zur Zelloberfläche (Plasmamembran, rechts); dort Ausschleusung durch Exocytose (3), die Vesikelmembranen gehen in der Plasmamembran auf; 4 = endocytotische Stoffaufnahme; 5 = Verdauung der aufgenommenen Stoffe in sekundären Lysosomen.

will, Membrantransport, jedenfalls ein Phänomen von geradezu symbolischer Bedeutung: Das Exportprotein ist von vornherein vom eigentlichen Cytoplasma durch eine Membran getrennt, es liegt schon vor seiner Geburt in einem nicht-plasmatischen Kompartiment!

Und nun beginnt die Membranfließerei. Das ER schnürt kleine, kugelige Teilkompartimente (Vesikel) ab, die zu Dictyosomen wandern und dort an der »Bildungsseite« in Golgi-Zisternen inkorporiert werden (vgl. Abb. 16). Hier werden die Sekretproteine häufig – vielleicht immer – durch Ankondensieren von Zuckerresten in Glycoproteine verwandelt. Der biologische Sinn dieser Veränderung ist wahrscheinlich bessere Wasserlöslichkeit, vielleicht auch bessere Erkennbarkeit der Exportproteine. Der Gol-

gi-Apparat ist jedenfalls reichlich mit Glycosyltransferasen ausgestattet, er beherrscht die Polysaccharidsynthese, sie kann sogar seine Hauptfunktion werden (z. B. bei Pflanzen, deren Zellwand-Polyosen zum guten Teil – Pektine, Hemicellulosen – aus dem Golgi-Apparat stammen; ähnliches demonstrieren die Schleim-produzierenden Zellen unseres Körpers, z. B. die Becherzellen des Dünndarmepithels). Nun werden die eingedickten Sekrete über Vesikelströme weiterverfrachtet. Am gitterförmig durchbrochenen Rand der Golgi-Zisternen blähen sich Prosekretgranula auf (Golgi-Vesikel), schnüren sich ab und wandern zur Zelloberfläche. Jetzt gilt es, den Inhalt des ganzen Pakets durch die Plasmamembran nach außen zu bringen, und wieder geschieht das durch Membranfluß: Die Sekretvesikel bekommen Kontakt mit der Plasmamembran, die sich berührenden Membranen verschmelzen, die Vesikelmembran geht in der Plasmamembran auf, und im Zuge dieser »Exocytose« gelangt der Vesikelinhalt nach außen, *ohne je die Plasmamembran passiert zu haben*. Ein wahrhaft genialer Trick!

Wir sehen: Membranfluß kann Membrantransport sehr wirkungsvoll ersetzen, zumindest ergänzen. Kompartimente brauchen nicht unmittelbar zusammenzuhängen, um ihre Inhalte auszutauschen – das kann auch über Vesikelströme erfolgen. Und da die Kompartimentinhalte keine einzige Membran zu passieren brauchen, kann es sich auch um Partikel mikroskopischer Größe handeln, für die es in keiner Biomembran spezifische Transportstellen gibt (auch sie müßten ja schon im Lichtmikroskop sichtbar sein).

Zwei Aspekte wollen besonders beachtet sein. Der erste ist der der Motilität, die auch hier wieder mitmischt. Lange Zeit konnte niemand sagen, wie die apparente Beweglichkeit der Vesikel zustande kommt und was die Vesikelströme lenkt. Heute wissen wir in vielen Fällen, daß Mikrofilamente beteiligt sind. Der zweite Aspekt ist der der Dynamik. Wer sich die Zellkompartimentierung, die »Metabolismus-Apparatur« als etwas Starres, Unveränderliches vorstellt, täuscht sich grundlegend; wobei freilich dieser Täuschung durch starre Schemata und bewegungslose elektronenmikroskopische Aufnahmen Vorschub geleistet wird. Könnten wir bei 100 000facher Vergrößerung in eine lebende Zelle hineinschauen, wir bekämen ein brodelndes Durcheinander

zu sehen. Einige Zahlen mögen das abschließend verdeutlichen. Polypeptidketten mittlerer Länge (200–400 Aminosäuren) werden in 1–3 Minuten synthetisiert. Man kann sie radioaktiv markieren und auf ihrem Weg durch die Zelle verfolgen. 4–10 Minuten nach Pulsmarkierung findet sich ein Aktivitätsgipfel im granulären ER, nach 20 Minuten durchläuft er den Golgi-Apparat, nach 40 Minuten beginnt die Sekretausschüttung aus der Zelle. (Diese Werte wurden für Verdauungsenzyme des Pankreas und für Serumalbumin der Leber ermittelt.) Die mittlere »Lebensdauer« von Golgi-Vesikeln wurde in ganz verschiedenen Zellen zu nicht mehr als 4 Minuten bestimmt. Aber den Geschwindigkeitsrekord für Membranfluß halten zur Zeit Vacuolen des Schleimpilzes *Physarum*. Man fand nämlich, daß aus dem Plasmodium dieses eigenartigen Organismus mit einer Mikropipette entnommene Plasmotropfen auch dann von einer regulären Plasmamembran umgeben sind, wenn sie sofort in Fixiermedium übertragen und dadurch abgetötet werden. Bei der näheren Untersuchung zeigte sich dann, daß auch dieses überraschende Faktum nicht auf Hexerei, sondern auf Membranfluß beruht. Fast schlagartig ordnen sich einige der allgegenwärtigen Schleimvacuolen peripher im Plasmotropfen an, verschmelzen seitlich miteinander und bilden so unter Abstoßung des außerhalb liegenden Plasmas eine neue, funktionierende »Zelloberfläche« (Abb. 18).

d) Die Lysosomen-Story

In der guten alten Zeit pflegte man zwischen Baustoffen und Betriebsstoffen der Zelle zu unterscheiden, und diese Zweiteilung hat auch heute noch ihren Sinn – man spricht etwa von Strukturmolekülen, Speichermolekülen, Metaboliten. Durch die Isotopentechnik ist freilich verdeutlicht worden, daß es zwischen diesen Gruppen fließende Übergänge gibt und daß auch besonders stabil erscheinende Bildungen einem ständigen, wenn auch besonders langsamen Umbau unterliegen, einem *Turnover*. Die apparente Strukturstabilität ist also meist keine absolute, sondern die eines Fließgleichgewichtes. Bedeutung und Sinn dieses Umstandes liegen auf der Hand: Leben ist überall auf Anpassung und Regulation angewiesen; und regulieren läßt sich nur etwas, in das steuernd eingegriffen werden kann, weil es in ständigem Flusse ist

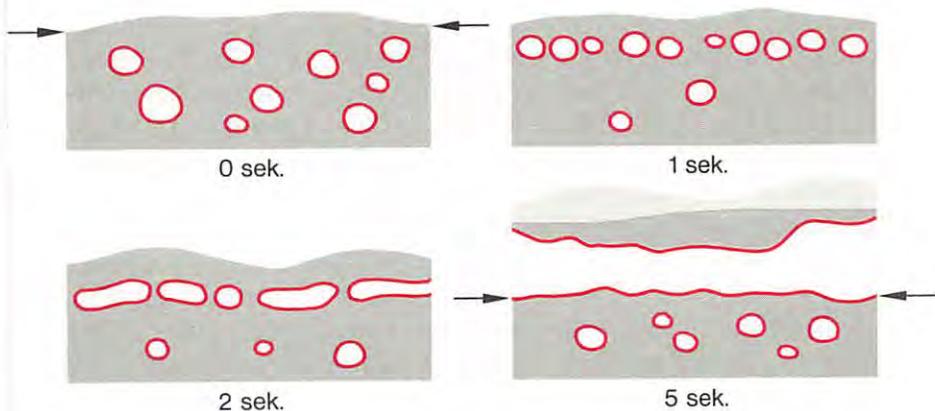


Abb. 18: Bildung einer neuen Plasmamembran um einen Plasmotropfen des Schleimpilzes *Physarum*. Unter der zunächst nackten Plasmaoberfläche (Pfeile) bildet sich eine Schicht seitlich miteinander verschmelzender Schleimvacuolen, und schon nach 5 Sekunden ist aus den Hüllmembranen dieser Vacuolen eine neue Plasmamembran entstanden (Pfeile). Beim Zerfall des Plasmodiums in Einzelzellen werden die Zellgrenzen auf ähnliche Weise gebildet, nur verläuft dieser Vorgang wesentlich langsamer. (Verändert nach K. E. WOHLFARTH-BOTTERMANN u. W. STOCKEM, *Roux' Archiv* 164, 1970, S. 331.)

– ein Vorgang, nicht ein Zustand. An einer unveränderlichen, fix etablierten Sache läßt sich nichts regulieren. Jedenfalls darf Heraklit von Ephesos mit seiner These, daß alles in steter Bewegung sei, der Zustimmung der Biologen sicher sein.

Der Turnover in der Zelle hat eine wichtige Konsequenz: Verdauung ist nicht notwendig ein extrazellulärer Vorgang, hydrolytischer Abbau findet vielmehr ständig auch in der lebenden Zelle selbst statt. Allenthalben lauern z. B. Nucleasen und machen »Kleinholz« aus nicht mehr benötigter Boten-RNS. Die ständig und wiederholt benützten RNS-Sorten (Ribosomen-, Transfer-RNS) müssen durch besondere Tricks, z. B. Methylierungen, gegen ihren Angriff geschützt werden. Ganz evident wird dies bei der Mobilisierung von Speicherstoffen und natürlich auch bei der Verdauung endocytierter Nahrungspartikel. Diese letztere erfolgt nicht irgendwo im Plasma, sondern in besonderen Kompartimenten, den Verdauungsvacuolen, heute oft als sekundäre Lysosomen bezeichnet (vgl. dazu noch einmal Abb. 17). »Primäre« Lysosomen sind prall mit Verdauungsenzymen gefüllte Vesikel,

die teils unmittelbar vom ER, teils vom Golgi-Apparat stammen und sich bei Bedarf durch Membranfluß mit einer »Freßvacuole« (Phago-, Endosom) vereinigen können und so eben ein sekundäres Lysosom, einen Zellmagen bilden. Das Enzymkomplement der Lysosomen ist reichhaltig, es umfaßt Nucleasen, Proteasen, Esterasen und Phosphatasen, Glycosidasen und Phospholipasen. Überraschenderweise fehlen aber gewöhnlich Enzyme für den Abbau von Kohlenwasserstoffketten. So bleiben in den sekundären Lysosomen oft unverdaute Kohlenwasserstoffe als Restkörper zurück, die entweder exocytiert werden oder in der Zelle selbst liegen bleiben. In die zweite Kategorie gehört das bekannte Alterspigment (Lipofuscin-Granula).

Die Lysosomen können als Musterpartikel der Zellkompartimentierung gelten. Was sie enthalten, ist für die Zelle zwar notwendig, zugleich aber auch gefährlich genug. Sie tut jedenfalls gut daran, die brisante Hydrolasen-Mischung unter Verschuß zu halten, säuberlich wegkompartimentiert vom Cytosol. Aber die Sache ist noch komplizierter, als sie zunächst scheint. Denn es muß ja verhindert werden, daß die Lysosomenmembran von innen her abgebaut und durchlöchert wird, und es muß weiterhin verhindert werden, daß die lysosomalen Proteasen über ihre Amtskollegen herfallen und sie vorzeitig zerstückeln, ein Problem, das sich ganz allgemein für Sekretgranula von Verdauungsdrüsen stellt. Aber gerade die Proteasen liegen in solchen Vesikeln in inaktiver Form vor, meist als wesentlich größere Proenzyme, die erst durch limitierte Proteolyse aktiviert werden müssen. Zusätzlich können noch Protease-Inhibitoren auftreten, oder es fehlen bestimmte Cofaktoren und seltene Ionen, die für die Wirkung unerlässlich sind, wie etwa Zink im Falle der Carboxypeptidase A. Viele dieser Zähmungsmöglichkeiten und noch einige weitere (z. B. ungeeignete pH-Werte im Vesikelinneren) basieren, wie man sieht, auf Kompartimentierung.

Lysosomen sind funktional definierte Kompartimente. Sie treten in vielerlei Gestalt auf und können ein breites Spektrum spezieller Funktionen übernehmen. Da ist z. B. das Acrosom, das den Bug von Spermienzellen besetzt hält und die Vereinigung mit der Eizelle ermöglicht, indem es deren Hülle lokal abbaut. Da gibt es besondere Lysosomen, die das von der Schilddrüse gebildete und zunächst intern gespeicherte Thyreoglobulin bei Bedarf wieder

abbauen und so die Schilddrüsenhormone freisetzen. Da gibt es Autophagen-Vacuolen, in denen untauglich gewordene Zellorganelle abgebaut werden. Man kann ihre Bildung durch Noxen induzieren und den Prozeß dadurch dem Experiment zugänglich machen. Bei jeder Entzündung spielen Lysosomen eine wichtige Rolle, indem sie biogene Amine (Histamin, Serotonin) aus ihren Speicherkompartimenten, den »Aminosomen«, freisetzen. Und wieder erstaunt die Schnelligkeit solcher Prozesse: Wenn man die Mitochondrien von Pantoffeltierchen ganz zart mit Janusgrün B vitalfärbt und dann die Population der Rotlichtstrahlung eines Impulslasers aussetzt, sind viele Mitochondrien geschädigt. Sie werden sofort von primären Lysosomen umstellt, in Autophagen-Vacuolen eingeschlossen und so weit wie möglich abgebaut, schließlich die dabei übrigbleibenden Restkörper exocytiert – und das alles in einer nur nach Minuten zählenden Zeitspanne!

Freilich gibt es auch Fehlleistungen, und sie können zu sehr bedenklichen Störungen in der Zelle führen. So ist es durch neuere Untersuchungen wahrscheinlich geworden, daß bestimmte Viren, die von Säugerzellen phagocytiert werden, überhaupt erst dadurch infektiös aufzutreten vermögen, daß Lysosomen ihre Hüllen abbauen und dabei die Virus-Nucleinsäure in Freiheit setzen. Noch bedenklicher ist die Rolle der Lysosomen bei Silikose. Die endocytierten Silikatpartikel bewirken in den Zellen der Staublung etwas ganz Ungewöhnliches: sie zerstören die Lysosomenmembranen. Damit passiert genau das, was normalerweise durch Kompartimentierung verhindert ist: Die Büchse der Pandora steht jetzt offen, die üblen Geister entweichen und fallen über die Zelle selbst her – Autolyse ist die Folge, möglicherweise noch nicht die schlimmste. Denn die saure DNase der Lysosomen hat die fatale Eigenschaft, DNS-Doppelhelizes komplett durchzuschneiden, also Zweistrangbrüche zu induzieren. Bei solchen Schäden ist das DNS-Reparatursystem der Zelle überfordert, denn es kann nur arbeiten, wenn *ein* Strang noch intakt ist; Doppelstrangbrüche können nicht geflickt werden. Nun ist andererseits ja je länger desto weniger zweifelhaft, daß die Transformation einer Zelle zur Krebszelle auf Veränderungen des genetischen Systems beruht – die Vererbbarkeit der Krebsdisposition, die Erzeugung von Krebs durch unnatürliche Genomkombinationen bei Zahnkärpflingen, die Virus- und Bakterien-Onkoge-

nese, der Nachweis von typischen Chromosomenanomalien in Tumoren, die Mutagenität der chemischen und physikalischen Carcinogene – das alles spricht insgesamt eine klare Sprache. Unter diesen Umständen kann es nicht überraschen, daß Silikose nicht selten zu maligner Entartung führt. Im Zusammenhang mit den Lysosomen fällt übrigens auf, daß viele Carcinogene – unter ihnen Benzpyren und Methylcholanthren – in Lysosomen akkumuliert werden, und daß viele Cocarcinogene die Membranpermeabilität erhöhen.

e) Von Größe und Gestalt der Kompartimente

Ein Kompartiment – das ist ein Irgendetwas mit einer ringsum geschlossenen Membranhülle. Die Membran mit ihren besonderen Eigenschaften und Fähigkeiten gehört nicht nur zur Definition eines jeden zellulären Reaktionsraumes, sie prägt ihn vielmehr in entscheidendem Ausmaße mit. Sie sorgt ja in einer meist recht spezifischen Weise dafür, daß da ein Inneres und eine Außenwelt entsteht, voneinander geschieden und verschieden. Schon die Zelle als Ganzes ist ein Kompartiment, die Plasmamembran seine charakteristische Hüllmembran. Und während der Evolution des Lebens auf dieser Erde fiel die »Erfindung« des Minimalorganismus mit jener der ihn umgrenzenden Membran zusammen – von da ab kann man von Zellen sprechen, von da an waren sie limitiert und damit definiert. Und zumindest bei größeren Zellen ist offenbar eine weitere Untergliederung der Zellmasse zweckmäßig – sonst hätte sich die Kompartimentierung der Eucyte nicht in so eindrucksvoller Weise, in solcher Vielfalt herausselektioniert. Man kann nun fragen, ob sich hinter dieser Vielfalt der Kompartimente – sie unterscheiden sich ja nicht nur funktionell, sondern auch nach Größe und Gestalt, was dem Elektronenmikroskopiker überhaupt erst ihre Identifizierung ermöglicht – ob sich also hinter ihrer Vielfalt nicht allgemeinere Gesetzmäßigkeiten verbergen. Das Problem kennt man längst aus anderen Dimensionsbereichen. Beispielsweise ist für Vielzeller die hautbedeckte Körperoberfläche etwa das, was für die Zelle und ihre Kompartimente die begrenzende Membran ist. Auch die Haut mit ihren besonderen Bildungen – Cuticulae, Chitinpanzer, Schuppen, Federn, Haare – grenzt ja den Organismus einerseits gegen seine

Umwelt ab, ermöglicht ihm aber zugleich lebenswichtige Wechselwirkungen mit dieser Umwelt. Große Festland-Warmblüter wie der Elefant können deshalb auf ein Haarkleid verzichten, weil bei ihnen das Verhältnis Oberfläche/Volumen (O/V) klein ist. Bei kleinen Warmblütern wird die Situation dagegen kritisch: sie besitzen mehr Oberfläche pro Volumen und bedürfen daher eines wärmestauenden Feder- oder Pelzmantels, um ihre Körpertemperatur konstant halten zu können. Bei den kleinsten Warmblütern (z. B. den Kolibris) ist schließlich die Grenze des Möglichen erreicht. Die kleinsten Vertreter dieser Gruppe können den Warmblüter-Status überhaupt nicht mehr konsequent durchhalten, sie verfallen über Nacht in Kältestarre und können – wie Insekten gleicher Körpergröße – erst dann wieder aktiv werden, wenn sich ihre Umgebung in der Morgensonne entsprechend erwärmt hat. Dieses Grenzfall-Beispiel zeigt auch, daß erst mit einer Körpergröße, die sehr weit über der durchschnittlichen Eucytengröße liegt, der O/V-Quotient und damit die Abhängigkeit von der Umgebung hinreichend klein geworden sind, daß dem Stoffwechsel die Thermostatierung des Körpers zugemutet werden kann. Analoge Beispiele aus dem Pflanzenreich betreffen etwa die Abkugelungstendenz bei Wüstenpflanzen (z. B. Kakteen). Die Einschränkung der Wasserabgabe an die trocken-heiße Luft arider Standorte kann nur durch eine radikale Einschränkung der transpirierenden Oberfläche gegenüber dem wasserspeichernden Volumen erreicht werden.

Nun, das alles begegnet uns wieder im Mikrokosmos der Zelle. Auch für die Eigenschaften und Leistungen der Kompartimente ist der O/V-Quotient wichtig, denn natürlich gilt auch hier, daß er bei gestaltgleichen Gebilden abnimmt, wenn sie sich vergrößern, und daß er bei volumengleichen Gebilden um so größer ist, je weiter sich deren Form von der Kugelgestalt entfernt. Zunächst leuchtet also ein, daß jene Kompartimente, deren Inhalt von der Umgebung isoliert werden soll, Kugelgestalt besitzen – Speichervacuolen, Sekretvesikel, Lysosomen sind geläufige Beispiele. Daß auch der Zellkern meist annähernd kugelig ist, kann als Zeichen für eine Barrierenfunktion der Kernhülle gelten. Überhaupt sind Kerne in unserem Zusammenhang besonders interessant, weil sie sich im Zuge bestimmter Entwicklungsprozesse unter Beibehaltung ihrer Form beträchtlich vergrößern. Außerdem

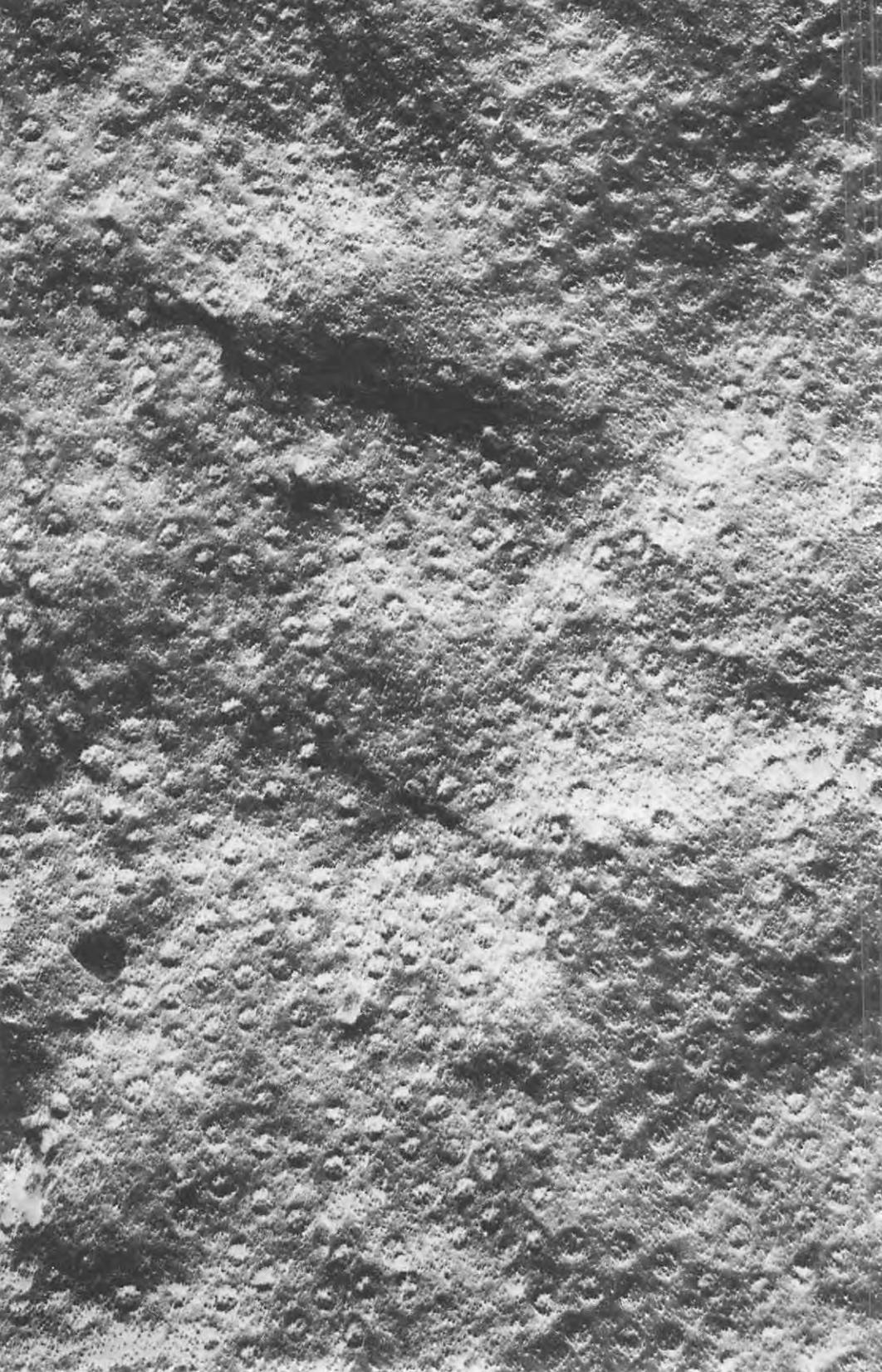
kann man die spezifischen Transportstellen in der Kernhülle, durch die der Austausch so vieler Makromolekülsorten zwischen Kern und Zellplasma erfolgt (u. a. Boten-RNS und Ribosomen-vorstufen hinaus, kernspezifische Proteine wie DNS- und RNS-Polymerase, Histone u. dgl. hinein), im Elektronenmikroskop *sehen*: Es sind die längst bekannten »Kernporen«, die man heute ihrer komplizierten Struktur wegen besser als Porenkomplexe bezeichnet (Abb. 19). Die Porendichte wechselt stark, sie ist gering bei kleinen und hoch bei großen Kernen (Tabelle 2). Nichts ande-

Tab. 2: Porendichte in der Kernhülle verschieden großer Zellkerne.

Objekt	Kerndurchmesser (μm)	O/V (cm^{-1})	Porenfrequenz (Porenkomplexe pro μm^2)
Hefe	3	5×10^4	7 bis 15
Säugerleber	8–10	8×10^3	15 bis 30
Große Kerne (Oocyten, Macronuclei von Ciliaten u. dgl.)	50	10^3	bis 100

res ist zu erwarten, wenn die Porenkomplexe als Pumpstationen des Stoffaustausches fungieren. Denn bei Kernvergrößerung wächst eben die transportierende Oberfläche nur mit der zweiten, das produzierende und konsumierende Volumen dagegen mit der dritten Potenz des Kerndurchmessers. Das O/V-Verhältnis wird also immer kleiner, die Verminderung der »relativen« Oberfläche muß durch entsprechende Verdichtung der Transportstellen kompensiert werden. Man kann leicht ausrechnen, daß diese Kompensationsmöglichkeit relativ bald erschöpft ist, da die Poren nicht beliebig dicht stehen können. Das führt dann zu dem zunächst paradox erscheinenden Zustand, daß große Kerne trotz einer weit höheren Porenzahl pro mm^2 Kernoberfläche eine viel geringere Porenzahl pro mm^3 Kernvolumen aufweisen als kleinere Kerne. Die Kernhülle als Pump- und Relaisstation wird also mit

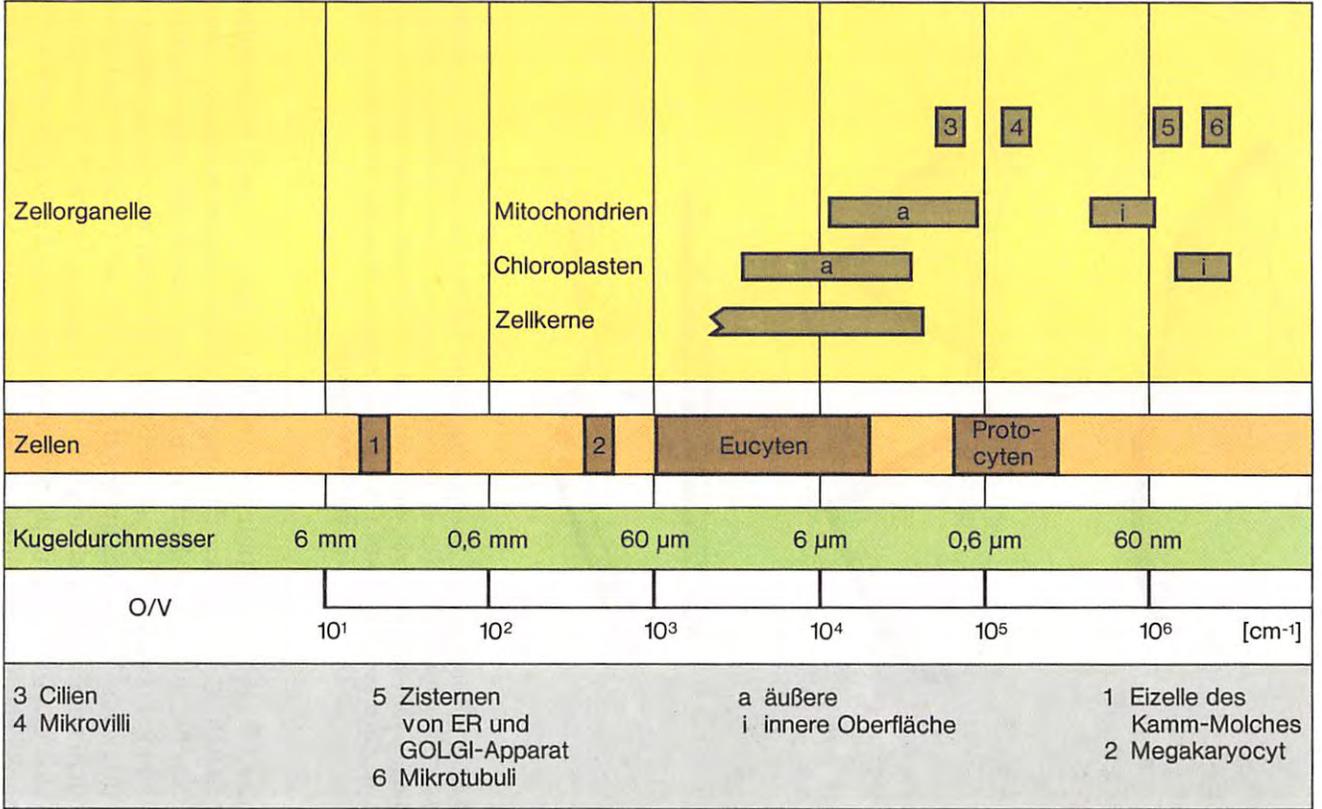
Abb. 19: Kernhülle des Macronucleus von Tetrahymena, Flächenansicht mit zahlreichen Porenkomplexen. Gefrierätzbild, 40 000 \times . (El.-mikr. Aufnahme: Dr. F. WUNDERLICH.)



zunehmendem Kerndurchmesser immer mehr insuffizient. Besonders große und aktive Kerne müssen die Kugelgestalt schließlich verlassen, es werden polymorphe oder segmentierte Rieskerne gebildet.

Für die Zelle insgesamt läßt sich aus ihrer Gestalt recht gut ablesen, ob sie mehr auf Isolation hin konstruiert ist (wie etwa Eizellen, die gewöhnlich groß und kugelig sind), oder aber auf Kommunikation hin. Im zweiten Fall kommt es zu auffälligen Oberflächenvergrößerungen, d. h. zu starken Abweichungen vom Kugelideal, so etwa bei dem aus Hunderten, ja Tausenden von Mikrovilli (Mikrozotten) bestehenden Bürstensaum resorbierender Epithelzellen oder den Dendriten von Neuronen. Im Zell-Innen geht die Sache gleich weiter. Beispielsweise überzieht die innere Membran der Mitochondrien einen von der Kugelgestalt weit entfernten Organellenkörper – auch hier, wo Atmungskette und ATP-Synthese ablaufen, diktieren höchste Aktivität und Stoffaustausch die Kompartimentgestalt. Die ungefaltete äußere Mitochondrienmembran ist dagegen wenig aktiv, zugleich besonders durchlässig – hier erübrigt sich Oberflächenvergrößerung. Bei aktiven Kompartimenten existiert nun offenbar so etwas wie ein Optimalwert für O/V (Abb. 20). Er liegt bei etwa $100\,000\text{ cm}^{-1}$. In diesem Bereich rangieren bezeichnenderweise auch die nicht durch interne Membranen kompartimentierten Bakterienzellen. Durch die Existenz eines solchen Optimalwertes (sie bedeutet ja eine zahlenmäßige Festlegung von O/V) sind nun aber zwei sonst ganz unabhängige Parameter korreliert, nämlich absolute Kompartimentgröße und Kompartimentform, wenigstens im Falle kugelig, allgemein »dreidimensionaler« Kompartimente. Die Zelle weicht dieser Einschränkung aus, indem sie – jedes elektronenmikroskopische Zellbild zeigt es – überwiegend flächig ausgebreitete oder gar dünn-röhrenförmige Kompartimente ausbildet. Man kann diese Zisternen und Tubuli näherungsweise als »zwei-« bzw. »eindimensionale« Kompartimente bezeichnen. Ihre O/V -Relation ist überraschenderweise von der absoluten Kompartimentgröße weitgehend unabhängig. Abb. 21 versucht zu zeigen, warum. Wenn eine Zisterne durch Querteilung in zwei

Abb. 20: Das Oberflächen- zu Volumen-Verhältnis (O/V) für Zellen und Zellorganelle, sowie – zum Vergleich – für Kugeln verschiedener Durchmesser.



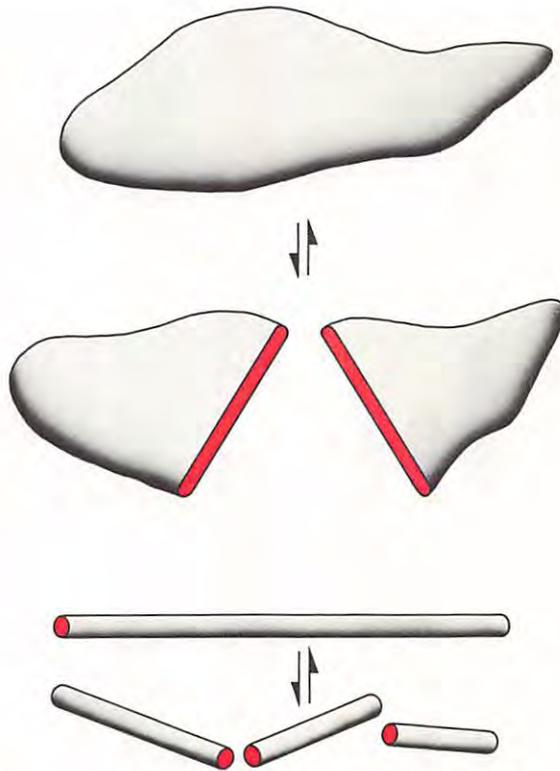


Abb. 21: Beim Zerteilen eines flächigen oder stabförmigen Gebildes ändert sich das O/V-Verhältnis praktisch nicht – als zusätzliche Oberflächen treten nur die farbig getönten Bereiche auf, die meist vernachlässigbar klein sind. Daher können z. B. Zisternen des ER oder Cilien fast beliebig wachsen oder schrumpfen, ohne daß sich ihr O/V-Quotient spürbar verschiebt.

gleiche Teilkompartimente zerfällt, ist das Volumen eines jeden genau halb so groß wie das ursprüngliche Zisternenvolumen; aber dasselbe gilt angenähert auch für die Oberfläche, denn die neu hinzugekommene Teilungsfläche macht in ihr nur einen geringen Anteil aus. Wenn sich umgekehrt zwei kleinere Zisternen zu einer flächenmäßig doppelt so großen vereinigen, bleibt O/V aus demselben Grunde ebenfalls etwa konstant, und Entsprechendes gilt natürlich auch für tubuläre Kompartimente. Das bedeutet: Die

Zelle kann ein- und zweidimensionale Kompartimente innerhalb weiter Grenzen wachsen oder schrumpfen lassen, sie trennen oder vereinigen, ohne zugleich den O/V-Wert zu verändern. Wäre dem nicht so, Membranfluß-Vorgänge hätten schwerlich die weite Verbreitung gefunden, die man tatsächlich beobachtet! Zum Abschluß dieses Exkurses über den Zusammenhang abstrakter Geometrie-Gesetze mit Zell-Realitäten noch ein Blick auf tubuläre, »eindimensionale« Gebilde, die freilich nicht als Kompartimente gelten können, weil ihnen eine ringsum geschlossene Membran fehlt. Da sind einmal die Mikrotubuli. Sie sind, wie wir sahen, Aggregate globulärer Tubulin-Einheiten. Durch die Bausteine ist zwar die molekulare Struktur und der Querdurchmesser, nicht aber die Länge der Tubuli präjudiziert. Gerade das macht sie zu so vielseitigen Werkzeugen im Dienste von Zellverformungen und Bewegungsvorgängen. Wir sehen nun, daß auch von ihrem O/V-Wert keine störenden Einschränkungen zu befürchten sind, es gibt bei ihnen keinen Proporz zwischen O/V und Länge. Dasselbe gilt, *mutatis mutandis*, auch für Cilien und Geißeln. Längst ist aufgefallen, daß ihr Querdurchmesser immer in der Gegend von $0,2\ \mu\text{m}$ liegt, während die Länge bis zu drei Größenordnungen variieren kann, von $2\ \mu\text{m}$ bis 2 mm. Während des Auswachsens einer Cilie bleibt ihr O/V praktisch konstant, wenn sie nur einmal über eine gewisse Ausgangslänge hinausgewachsen ist. Ein in dieser Hinsicht inverses Phänomen beobachtet man bei den vorhin erwähnten Mikrovilli: Sie sind gewöhnlich $0,1\ \mu\text{m}$ dick und wachsen über eine Länge von $1,5\ \mu\text{m}$ nicht hinaus. Abb. 22 läßt den Grund immerhin ahnen: Die Mikrozotte streckt sich, solange das O/V-Verhältnis durch Wachstum noch verschoben werden kann, und stellt ihr Wachstum ein, wenn es nichts mehr bringt. Wie vernünftig doch vieles abläuft, wo von Vernunft, wie es scheint, eigentlich nicht die Rede sein kann!

4. Die Zelle – »Atom« oder »Molekül« lebender Systeme?

Diese Frage klingt eigenartig, sie bedarf der Erläuterung. Knüpfen wir dabei an das in Abschnitt 1 Gesagte an. Die Zelle, wurde dort behauptet, ist im lebenden System allemal die kleinste Einheit, die nicht zertrümmert werden kann, ohne daß dabei ent-

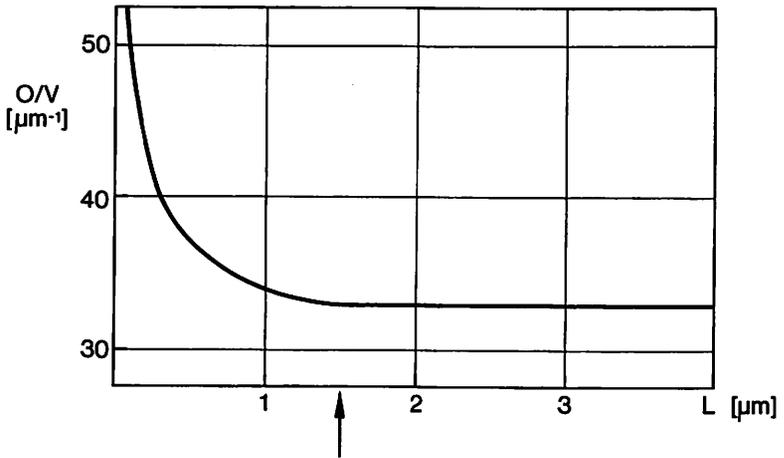


Abb. 22: Mikrovilli wachsen gewöhnlich so lange (Pfeil), bis ihre Länge L den Wert erreicht hat, ab dem sich O/V nicht mehr ändern würde.

scheidende Systemeigenschaften verlorengehen. Sie erscheint insoweit als das »Atomon« lebender Systeme. Unsere Überschrift zieht aber eben dies in Zweifel. Welche Alternative gibt es?

Wir haben im vorhergehenden Abschnitt von der Wandelbarkeit der Zellstrukturen gesprochen. Aber man soll kein Prinzip zu Tode reiten: Es gibt durchaus auch ruhende Pole in der Erscheinungen Flucht. Neben »Funktionsstrukturen«, die sich bei Bedarf aus anderen Zellkomponenten bilden und auch wieder verschwinden können (zu ihnen zählen Nucleolen, die Kernhülle, Dictyosomen, Lysosomen, Zellwände, Mikrofilamente, Mikrotubuli u. a. m.), gibt es andere, die in irgendeiner Ausbildungsform immer gegenwärtig sind und nur unter Vermittlung von ihresgleichen vermehrt, aber niemals neugebildet werden können. Diese Komponenten der Zelle besitzen also ihre eigene Kontinuität, sie sind *sui generis*. Einmal verloren, sind sie für immer verloren. Zu diesen »Autoreduplikanten« gehören die Chromosomen bzw. das Chromatin, und damit die Erbsubstanz, die DNS; aber auch die Mitochondrien, die Plastiden, vielleicht auch die Centriolen. Sehen wir uns Mitochondrien und Plastiden einmal genauer an.

Beide Organelle entstehen ausschließlich aus ihresgleichen durch Teilung oder Verschmelzung. Die Primitivevolution des Tierrei-

ches, aber auch die polyphyletische Entstehung der Pilze war mit einem irreversiblen Verlust der Plastiden verbunden. Von künstlich »apoplastidisch« gemachten Euglenen abstammende Individuen bleiben plastidenfrei und sind damit auf Heterotrophie fixiert. Bei Plastiden kennt man schon lange, bei Mitochondrien erst seit etwa 30 Jahren erbliche Defekte, deren Erbgang nicht jenem von Kerngenen entspricht – die »extrakaryotischen« Gene mendeln nicht. Das Rätselraten um ihre Natur fand ein Ende, als es gelang, sowohl aus Plastiden wie aus Mitochondrien DNS zu isolieren, die in wesentlichen Eigenschaften von der DNS des Chromatins abweicht. Sie ist beispielsweise nicht mit Histonen komplexiert, sondern »nackt«, wie jene der Prokaryonten; und wie diese ist sie daher auch besonders empfindlich gegenüber bestimmten Mutagenen, deren Moleküle sich zwischen die dichtgestapelten Basenpaare der DNS-Doppelhelix hineindrängen und sie auseinanderschieben (»interkalierende« Mutagene, z. B. Akriflavine, Äthidiumbromid). Plastidäre und mitochondriale DNS werden in den Organellen selbst repliziert, wobei sie nicht den Zeitgebern des Zellzyklus unterworfen sind. Sie werden auch transkribiert, d. h., die in ihnen gespeicherte Information kann abgegriffen und in RNS umgeschrieben werden. Ja sogar bestimmte Proteine werden gemäß dieser Information gebaut, und zwar an organelleigenen Ribosomen, die sich von den cytoplasmatischen erheblich unterscheiden. Sie sind kleiner und besitzen nur gut $\frac{3}{5}$ der Masse jener; und sie können in ihrer Aktivität durch bestimmte Antibiotica wie Chloramphenicol und Lincomycin gehemmt werden, während die cytoplasmatischen davon kaum gestört werden (die aber ihrerseits Cycloheximid nicht vertragen, das wiederum den Organellen-Ribosomen nichts macht). Auch alle diese Eigenschaften der Ribosomen haben übrigens die Organelle mit Bakterien gemeinsam, und spätestens hier muß man sich wohl fragen, ob diese eigenartigen Parallelen bloßem Zufall entspringen können. Aber gibt es für sie eine plausible Erklärung?

Da sich die »Erfindung« der Eucyte in nebelhafter Zeitenferne vollzog, wissen wir nichts über ihr Zustandekommen. Aber zum Glück können uns Beobachtungen an rezenten Organismen einige Fingerzeige für eine Rekonstruktion geben. Da gibt es beispielsweise eine Amöbe, *Pelomyxa palustris*, die überhaupt keine

Mitochondrien besitzt, aber als intrazelluläre Symbionten («Endosymbionten») Bakterien hält, welche die Zellatmung besorgen. In entsprechender Weise geht der primitive Pilz *Geosiphon pyriforme* eine Endosymbiose mit Blaualgen ein, die dann für ihn Photosynthese machen. Die Endosymbionten ähneln Chloroplasten nicht nur funktionell, sondern auch strukturell. Dergleichen läßt daran denken, daß Mitochondrien überhaupt auf ehemals freilebende Urbakterien zurückgehen, die zu Beginn des sogenannten Archaikums vor ca. 2 Milliarden Jahren – damals evoluierten die ersten Eukaryonten – in nicht atmende, größere Zellen nach Endosymbiose-Manier eingebaut wurden und seither in einem so exzessiven Ausmaß »domestiziert« worden sind, daß nur Reste ihrer ursprünglichen Eigenart übrigbleiben konnten. Dasselbe gälte dann, *mutatis mutandis*, für die Plastiden der grünen Pflanzen: Ihre Abstammung führte nach dieser *Symbionten-Hypothese* zurück auf einst freilebende Blaualgen, die seinerzeit der gärenden Ur-Eucyte den Übergang zur Autotrophie ermöglicht und damit einen gewaltigen Selektionsvorteil verschafft hätten. Dieser Prozeß müßte übrigens früher stattgefunden haben als die Inkorporation atmender Bakterien, denn der freie Sauerstoff der Erdatmosphäre (als Voraussetzung für Atmung) verdankt seine Existenz im wesentlichen der photosynthetischen Wasserspaltung grüner Organismen. Vor 1,5 Milliarden Jahren enthielt die Atmosphäre noch nicht einmal 1% O₂, im Ordovicium (–0,4 Jahrmilliarden) schätzungsweise erst 2%.

Die Symbionten-Hypothese, die andeutungsweise schon im vorigen Jahrhundert geäußert und bereits 1905 explizit formuliert wurde, kann in der Tat alle vorhin geschilderten Parallelen zwischen Prokaryonten und Mitochondrien bzw. Plastiden mit einem Schlag erklären, die sonst weitgehend unverständlich blieben. Die Konsequenzen für unser Bild von der Eucyte wären geradezu umstürzlerisch. Denn diese würde sich als Chimäre, als Produkt einer Vereinigung verschiedener Zelltypen darstellen, nicht als »Atom« jedenfalls der heutigen Vielzeller (die samt und sonders Eukaryonten sind – die Protocyte taugt nicht zum Baustein echter Vielzeller), sondern als »Molekül«, als heterogen zusammengesetztes Repetitionselement. Gewisse subzelluläre Partikel könnten demnach doch den Rang von Zellen haben (wenigstens gehabt haben), für sich Minimal-Organismen gewesen sein.

Unglücklicherweise gehört die Symbionten-Hypothese zu jenen Gedankenkonstruktionen, die sich einer experimentellen Prüfung weitgehend entziehen. Ihr Erklärungswert, vor allem ihr heuristischer Wert sind zweifellos beträchtlich; aber man darf auch nicht vergessen, daß sie unbewiesen ist. Und jedenfalls muß man weiterhin versuchen, prüfbare Konsequenzen aufzufinden. Solche Bemühungen haben mittlerweile gezeigt, daß die oben genannten Parallelen doch auch wieder begrenzt sind. Beispielsweise gelang es nicht, auf serologischem Wege eine engere Verwandtschaft zwischen Organellen- und Bakterien-Ribosomen nachzuweisen. Auch ist der DNS-Gehalt der in Frage stehenden Organelle gering im Vergleich zu dem heute freilebender Prokaryonten – Säuger-Mitochondrien enthalten nur etwa 0,5 % der DNS-Menge von Colibakterien. Deswegen kann auch nur ein kleiner Teil der typischen Organellen-Proteine in Mitochondrien und Plastiden codiert sein und synthetisiert werden. Noch bedenklicher ist, daß sich Gene für typische Organellen-Proteine fest eingebaut im Kern-Chromatin finden. Zu diesen Proteinen, deren Zusammenbau also vom Kern aus gesteuert und von Ribosomen des Cytoplasmas durchgeführt wird, obwohl sie sich zuletzt ausschließlich in Mitochondrien bzw. Plastiden finden, gehören DNS- und RNS-Polymerasen, das Cytochrom c, zumindest ein Teil der Proteine in organellspezifischen Ribosomen (!), auch viele Enzyme des Citrat- und Photosynthese-Zyklus. Ganz eigenartig ist die Situation bei bestimmten Multienzym-Komplexen der inneren Mitochondrienmembran; beispielsweise kommen Teilproteine der Cytochromoxidase aus den Mitochondrien selbst, andere müssen vom Cytoplasma beigesteuert werden. Dergleichen ist auf der Basis der Symbiontenhypothese nur schwer verständlich, denn das würde, nach unseren heutigen Kenntnissen, einen partiellen DNS-Transfer aus den protocytischen Endosymbionten in das große Genarchiv der Eucyte, den Zellkern, voraussetzen. Wie konnte er erfolgen? Warum ging er nur in dieser, nicht auch in der entgegengesetzten Richtung vor sich? Warum blieb er inkomplett? Zu diesen Fragen kann heute niemand etwas Vernünftiges sagen.

Trotz dieser Schwierigkeiten hat aber die Symbionten-Hypothese nichts von ihrer Bedeutung eingebüßt, weil es bis heute nicht gelang, eine irgendwie überzeugende Alternative zu formulieren.

Wie schwer das sein würde, sei noch an einem letzten, stark zugunsten der Symbionten-Hypothese sprechenden Faktum angedeutet. Sowohl Mitochondrien wie Plastiden besitzen eine porenlose, *doppelte* Membranhülle. So muß es sein, wenn sie wirklich Endosymbionten sind; denn diese können nicht anders als durch Endocytose in den Zellverband aufgenommen worden sein, und dann entspricht die äußere Membran einem Stück einstmals eingefalteter Plasmamembran der Wirts-Eucyte, die innere dagegen der Plasmamembran der aufgenommenen Proto-cyte. Eucyten- und Proto-cytenmembranen unterscheiden sich nun in ihrem Lipidspektrum dadurch, daß die ersteren stets Cholesterin, aber kein Cardiolipin enthalten, während es bei den letzteren genau umgekehrt ist (Abb. 23). Was man unter diesen Umständen nach der Symbionten-Hypothese zu erwarten hat, genau das ist auch wirklich der Fall: Die innere Mitochondrienmembran enthält Cardiolipin, aber kein Cholesterin, während die äußere Cholesterin, aber kein Cardiolipin enthält. Keine Hypothese, die das nicht ebenso zwanglos erklären kann wie die Symbionten-Hypothese, wird ihr Konkurrenz machen können.

5. Sichtbare und unsichtbare Zellstrukturen

Das bekannte, aus dem geisteswissenschaftlichen Bereich beige-steuerte Gleichnis von der Schale, die unsere Sinne in den Strom des Geschehens halten und die doch immer nur das daraus zu schöpfen gestattet, was sie eben fassen kann – dieses Bild trifft auch die Situation in den Naturwissenschaften. Hier sind zwar unsere Sinne potenziert durch komplexe Instrumente, immer komplexer, immer kostspieliger. Aber auch deren Fühler sind empfindlich nur für begrenzte Qualitäten der Umwelt, und nach wie vor gibt es in ihr Bereiche, die uns aus methodischen Gründen überhaupt nicht zugänglich sind. Solche »weiße Flecken« auf der Landkarte unserer Einsichten werden uns freilich nur dann bewußt, wenn man von irgendwoher an ihre Grenze stößt, wenn es gelungen ist, in ihrer Nachbarschaft Liegendes aufzudecken. Auch in der Zellbiologie von heute gibt es weiße Flecken in Fülle – das ist es ja schließlich, was sie spannend macht. Ein geläufiges Beispiel bieten etwa die Membranen der Zelle. Ihre Bedeutung ist

weit größer, als die kurze Begegnung mit ihnen im Zusammenhang mit der Kompartimentierung klargemacht haben mag. Denn außer als Zollgrenzen zwischen zellulären Reaktionsräumen dienen sie auch der geordneten Anheftung von funktionell sich nahestehenden Enzymen, als Sensoren für chemische Reize (Stichworte: Hormone, Antigene, Neurotransmitter), als Pigmentträger (und damit als Sensoren für Strahlungsreize), als ATP-Generatoren (Umkehrung von aktivem Transport), sie können zur Sicherheitsverpackung für Stoffwechselabfälle und Gifte werden, oder Zell-Zell-Erkennung bei Entwicklung und Zellkooperation vermitteln. Trotz dieser umfassenden Bedeutung – es ist tatsächlich kaum noch möglich, zelluläre Aktivitäten anzugeben, an denen sich Membranen nicht wenigstens mittelbar beteiligen –, trotz dieser Bedeutung also und trotz massiver Anstrengungen war es bis heute nicht möglich, die molekulare Architektur dieser lipoproteinischen Gebilde ganz zu enträtseln. Wir können die Positionen aller der weit über 10^3 Atome in komplexen Proteinmolekülen bis auf zehnmillionstel mm genau angeben, wir wissen in einigen Fällen, wie sich diese Positionen während enzymatischer Reaktionen oder allosterischer Effekte verschieben; aber niemand vermag zu sagen, wie die verschiedenen Proteine und Strukturlipide einer Biomembran im einzelnen angeordnet sind. Dazu wäre eine etwa 10^6 -fache Steigerung der optischen Auflösungskraft des Auges nötig, und in der Membranologie ist erst ein Faktor von 10^4 erreicht. So sind wir weiterhin gezwungen, uns über indirekte Argumente an das erstrebte Ziel heranzuarbeiten; wir sehen uns ungewohnterweise genötigt, die Struktur aus der Funktion zu erschließen, durch Induktion die Einsichten zu erlangen, von denen aus wir – wenn wir sie schon besäßen – so vieles deduzieren könnten.

In diesem abschließenden Kapitel unseres Essays über die moderne Zellbiologie soll nun aber von einem anderen, besonders bedeutsamen weißen Fleck die Rede sein, der die *Struktur der Erbanlagen* betrifft. Jedermann weiß um die Bedeutung der Gene für normale und abnorme Entwicklung und damit für das Schicksal eines jeden Organismus, auch jedes einzelnen Menschen. So ist unsere Ignoranz in diesem Bereich besonders störend. Und ist es nicht überraschend, daß wir gerade da so schlecht Bescheid wissen, wo doch einerseits die mikroskopische Struktur der Chromo-

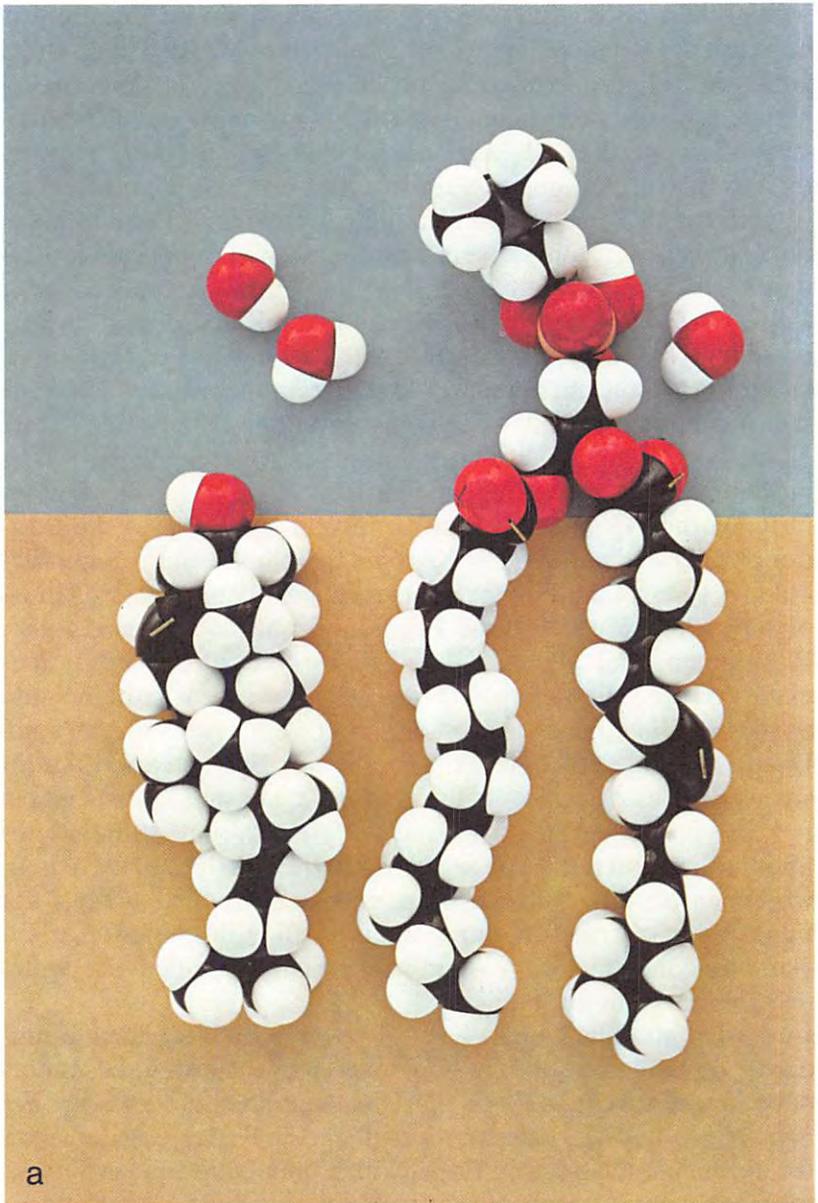
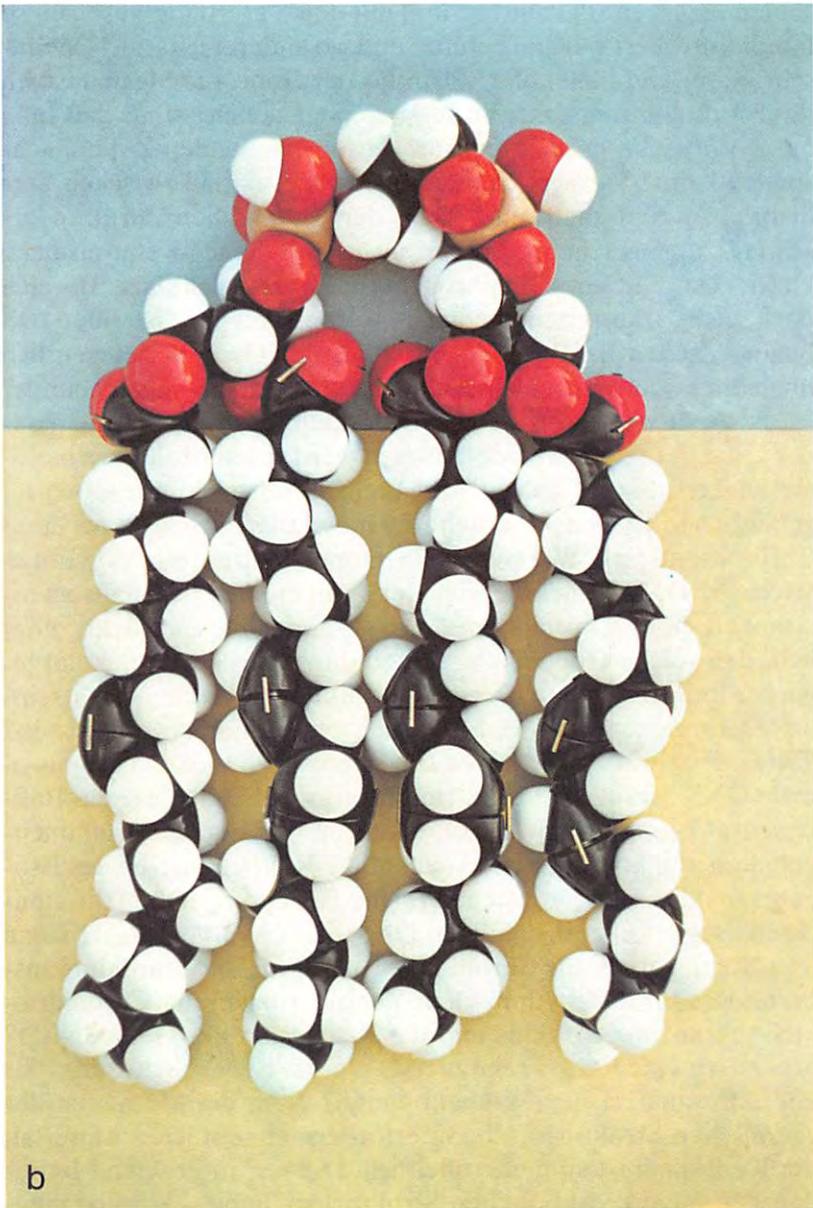


Abb. 23: Kalotten-Modelle von Membranlipiden. a) links Lecithin, rechts Cholesterin (darunter zwei Wassermoleküle). b) Cardiolipin. Die »polaren«, wasserlöslichen Molekülanteile über blauem, die »apolaren«, fettlöslichen über gelbem



b

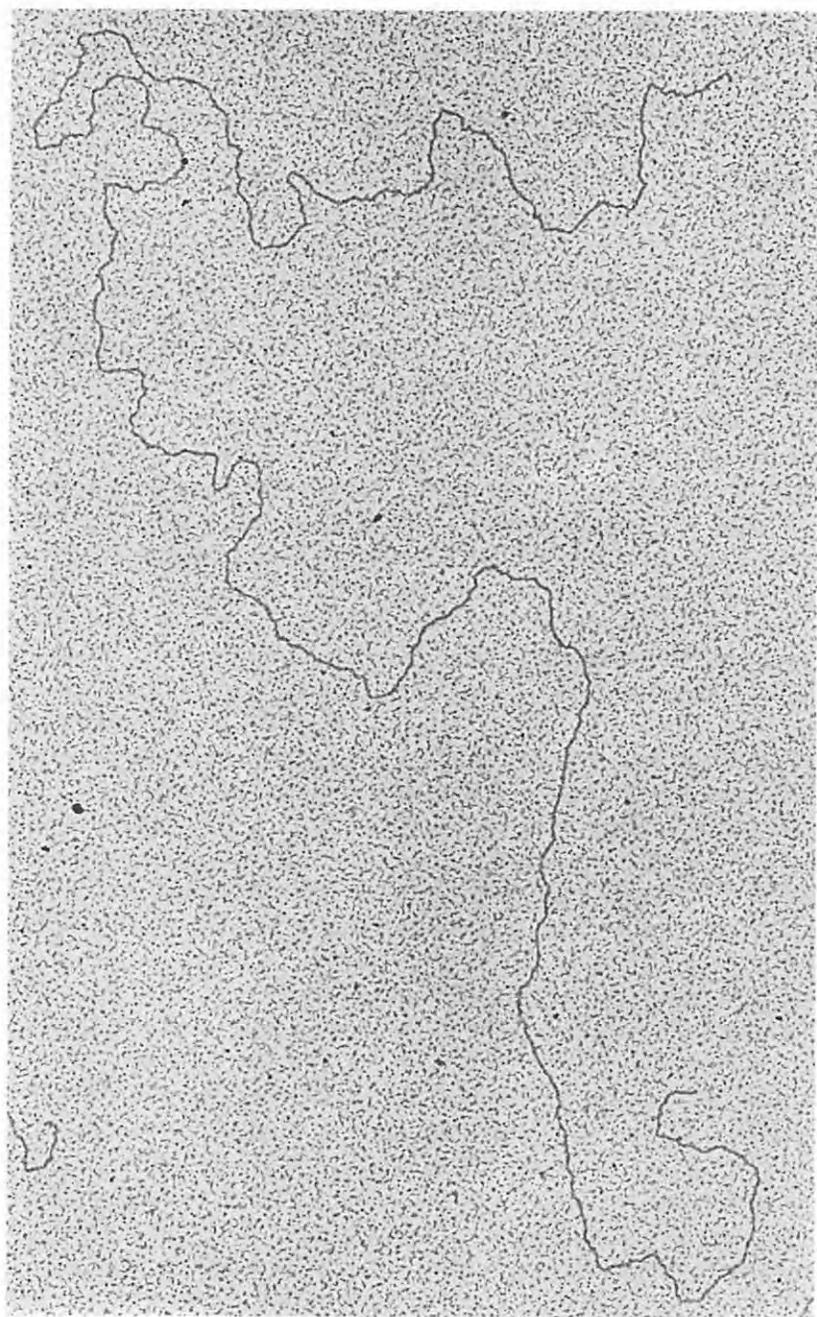
Hintergrund. Cholesterin ist ein »Marker« für Eukaryonten-Membranen, Cardiolipin entsprechend einer für Prokaryonten-Membranen. Überraschenderweise findet sich Cardiolipin auch in der inneren Membran der Mitochondrien.

somen längst gut bekannt ist und mit den Vererbungsgesetzen so famos korreliert werden konnte; und wo andererseits auch chemische Natur und molekulare Struktur der Gene, die Mechanismen ihrer Vermehrung und Wirkung so weit geklärt sind, daß man diese Vorgänge im Reagenzglas, fern der lebenden Zelle, nachspielen kann? Tatsächlich ist es aber eben so, daß zwischen dem lichtmikroskopischen und dem der chemischen Strukturfor- schung zugänglichen Dimensionsbereich eine Kenntnislücke klappt. Daß dieser submikroskopisch-übermolekulare Bereich noch nicht transparent gemacht werden konnte, ist über den phantastischen Erfolgen der molekularen Genetik gelegentlich übersehen worden – dem weißen Fleck entsprach ein blinder Fleck. Aber wir werden jetzt, wo die Zellbiologie mehr und mehr das Erbe der schon wieder klassisch werdenden Molekularbiologie engeren Sinnes antritt, hart konfrontiert mit unbeantwortet gebliebenen Fragen: Wie sieht die molekulare Architektur eines Chromosoms aus? Wie viele DNS-Doppelhelizes birgt es? Gibt es vielleicht DNS-Moleküle von der Länge eines Chromosomenstranges, eines Chromonema? Ist es, anders ausgedrückt, möglich, daß solche Doppelhelizes meterlang werden, Molekulargewichte im Bereich von Tausenden Milliarden Atomgewichtseinheiten erreichen, über 3 Milliarden Nucleotidpaare umfassen? Oder, wenn das zu verneinen ist: Wie lang sind dann chromosomale DNS-Stränge? Sind sie ringförmig geschlossen wie das Bakterien-»Chromosom« oder offenkettig? Wie sind sie zusammengehalten und koordiniert? Wie geht die Rekombination des Erbgutes in der Meiose vor sich? Welche Bedeutung haben die ständigen Begleiter kernständiger DNS bei Eukaryonten, Histone und Nichthistone, für Chromosomenstruktur und -funktion, insbesondere für die rhythmischen Veränderungen der Chromatinarchitektur im Zellzyklus und die Regulation der Genaktivität? Stellen wir eine letzte Frage zuerst: Warum ist es so schwierig, das alles einwandfrei herauszubekommen? Nun, die Methoden der chemischen Strukturfor- schung erfordern einheitliches Material; der Kerninhalt ist aber uneinheitlich. Die sog. indirekten Methoden der submikroskopischen Strukturfor- schung – Röntgenbeugung, Polarisationsmikroskopie u. dgl. – erfordern Objekte hoher Symmetrie; der Kerninhalt ist aber von äußerst niedriger Symmetrie. Bleibt noch die Elektronenmikroskopie; aber auch sie hat

hier mit besonderen Schwierigkeiten zu kämpfen, ganz abgesehen einmal davon, daß sie echte Lebendbeobachtung aus mehrerlei Gründen nicht erlaubt. Diese Schwierigkeiten ergeben sich letztlich aus der geringen Durchdringungskraft der Elektronenstrahlen. Sie zwingt den Elektronenmikroskopiker, seine Objekte – wenn er sich nicht mit der Darstellung ihrer Oberflächen begnügen will – in dünnste Scheiben zu zerlegen, die dann durchstrahlbar sind. (Ein normales Papierblatt wäre für seine Zwecke über 1000mal zu dick!) Es ist schwierig, aus Ultradünnschnitten die komplette, ursprüngliche Raumstruktur des Objektes zu erschließen. Im Falle des physiologisch aktiven Chromatins von Interphasekernen wird das fast unmöglich, wie man sich durch ein Gedankenexperiment veranschaulichen kann: Wenn aus einer langen Schnur durch Verdrillen ein dicker, dichter Knäuel gemacht wurde und aus ihm nun eine dünne Scheibe herausgeschnitten wird, wer vermöchte an diesem Schnitt noch zu beurteilen, ob ursprünglich eine lange Schnur oder viele kürzere Schnüre vorlagen?

Gewiß, man hat in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte gemacht. Man hat beispielsweise gelernt, Chromosomen so schonend zu isolieren und zu präparieren, daß sie doch als ganze beobachtet werden können. Überraschenderweise sind sie aus Strängen (oder einem einzigen Strang?) aufgebaut, der etwa 10mal so dick ist wie eine DNS-Doppelhelix. Darüber hinaus erlauben verschiedene Spreitungstechniken, isolierte DNS auf hauchzarte Proteinfilmte sozusagen aufzukleben oder sie in solche einzubetten und sie dann – nach geeigneter Kontrastierung – elektronenmikroskopisch zu beobachten (Abb. 24). Mit diesen Methoden konnte man bereits einzelne, aktive Gene sichtbar machen, wie ja überhaupt Ausweitungen der methodischen Möglichkeiten fast mit Zwangsläufigkeit wissenschaftliche Fortschritte nach sich ziehen. So kann man also hoffen, in nächster Zeit einige Durchbrüche zu erzielen. Ein erster ist kürzlich schon gelungen. Sehen wir uns ihn noch kurz an, gewissermaßen als »Happy-End« dieses Beitrages.

Seit vielen Jahren wird die Frage diskutiert, aus wie vielen Strängen das Chromonema besteht, jene feine Fadenstruktur des Chromatins, die an der Grenze lichtmikroskopischer Sichtbarkeit liegt und die durch Aufknäuelung und Faltung das dichte, typi-



sche Chromosom der Kernteilungsphasen ergibt. Die älteren Beobachtungsdaten zu dieser Frage ließen in ihrer Dürftigkeit Raum für zwei sich widersprechende Deutungen. Die »Einstrang-Hypothese« nahm an, daß hier tatsächlich nur *ein* Filament vorliege (nach der S-Phase vorübergehend zwei), während die »Vielstrang-Hypothese« an eine Art vieladriges Kabel dachte, sozusagen an ein polytänes Riesenchromosom *en miniature*. Eng verbunden mit der Diskussion um diese rivalisierenden Hypothesen war und ist die Frage, was man sich unter jenen »Strängen« chemisch vorzustellen habe, ob ununterbrochene, mit Protein beladene DNS-Doppelhelizes oder kürzere DNS-Abschnitte, die durch Proteinkupplungen längs zusammengehalten werden; oder schließlich Proteinfilamente, die DNS-Doppelschrauben als seitliche Anhängsel tragen.

Lange Zeit neigte die Mehrzahl der Fachleute dem Vielstrang-Modell zu. Es schien besser geeignet, ganzzahlige Multiplenreihen im DNS-Gehalt nahe verwandter Arten oder die gelegentlich beobachtbare Doppelsträngigkeit von Anaphase-Chromosomen zu erklären. Außerdem schien das Stränge-Wirrwarr im Interphasekern nicht mit ein- oder doppelsträngigen Chromonemen vereinbar. Gewisse Schwierigkeiten ergaben sich allerdings von vornherein für die Deutung von Rekombinationsprozessen während der Meiose und für die genetisch erwiesene Reinerbigkeit der Keimzellen, zumal nach künstlich ausgelösten Mutationen in der Elterngeneration. Aber erst um 1960 wurde das Vielstrang-Modell durch zwei verschiedenartige Experimente ernstlich erschüttert. Zum einen gelang an radioaktiv markierten Bohnen-Chromosomen der überzeugende Nachweis, daß die Chromosomenverdoppelung nach demselben semikonservativen Modus erfolgt wie die DNS-Replikation: Jede Tochterchromatide besteht zur Hälfte aus mütterlichem, zur Hälfte aus neugebildetem Material. Das war am einfachsten mit der Annahme erklärbar, daß jedes Chromosom vor der S-Phase des Zellzyklus aus einer einzigen DNS-Duplex besteht, danach aus zwei identischen. Dieses Er-

Abb. 24: DNS des Coliphagen T 3, gespreitet auf einem Film aus Cytochrom c. Der dunkle, verschlungene Strang stellt eine DNS-Doppelhelix dar, deren Molekulargewicht rund 25 Millionen Atomgewichtseinheiten beträgt. (Präparat und el.-mikr. Aufnahme: Dr. H. FALK.)

gebnis paßt also perfekt zu den Postulaten der Einstrang-Hypothese, während es durch die Vielstrang-Hypothese nicht ohne komplizierte Zusatzannahmen verständlich gemacht werden kann. Noch deutlicher fiel ein Experiment aus, bei dem die Schleifen von »Lampenbürsten-Chromosomen« (besonders stark aufgelockerte Bezirke meiotischer Chromosomen in Amphibien-Oocyten) enzymatisch abgebaut wurden. Durch Proteasen und RNase konnte zwar Begleitmaterial weggedaut werden, doch blieb ein »Zentraldocht« dieser Schleifen erhalten. Allein DNase war imstande, auch ihn durch Querbrüche zu zerlegen. Er besteht also aus DNS. Die Kinetik der DNase-Wirkung ergab darüber hinaus, daß hier jeweils nur *eine DNS-Doppelhelix* vorhanden ist. So ingeniös nun auch diese Experimente waren, ihre Ergebnisse konnten zur Not auch noch anders gedeutet werden. 1973 konnte nun aber tatsächlich an zwei verschiedenen Objekten, der allbekannten Essigfliege *Drosophila* einerseits, der Hefe andererseits, in zwei mit ganz verschiedener Methodik arbeitenden Labors überzeugend gezeigt werden, daß das *Einstrang-Modell* zutrifft. Der DNS-Gehalt des Genoms war für beide Organismen genau bekannt, ebenso die Chromosomenzahl, somit auch der mittlere DNS-Gehalt der Chromosomen. Aus Zellkernen beider Organismen konnten nun DNS-Moleküle isoliert werden, deren Länge den Erwartungen der Einstrang-Hypothese entspricht. Die Länge wurde im Falle von *Drosophila* indirekt durch Messung der elastischen Eigenschaften des Isolates, für die Hefe durch elektronenmikroskopische Darstellung und Vermessung direkt bestimmt. Durch diese Ergebnisse vereinfacht sich die weitere Diskussion um die Chromosomenstruktur erheblich – manches Fragezeichen kann jetzt getrost gelöscht werden. Andere bleiben freilich, und neue wachsen nach wie die Köpfe der in solchen Zusammenhängen gewöhnlich beschworenen Hydra.

Ist das enttäuschend? Wenn ich unseren kurzen Rundgang durch die Zellbiologie mit einem persönlichen Bekenntnis schließen darf – ich finde es nicht enttäuschend, ich finde es im Gegenteil wunderbar. Daß sich hinter jeder erreichten Einsicht erneut das Unbekannte auftut, daß unsere Entdeckungsfahrten nie ein Ende haben, das gerade scheint mir ihre eigentliche Verlockung zu bedeuten. Wer in diesen Sphären etwa endgültige Antworten, von der Naturwissenschaft insgesamt ein geschlossenes Weltbild er-

wartet, mißverstehst sie grundsätzlich. Es ist vorhin angedeutet worden, daß wir keine Kenntnis davon haben können, ein wie großer Teil der Welt uns noch unbekannt ist. Wollen wir hoffen, daß die Menschheit nie so satt und träge, oder auch nur so bänglich auf die bloße Erhaltung eines nur materiell definierten Lebensstandards eingestellt ist, daß sie die fernen, ungekannten Bereiche der Fantasie überließe und nicht auch danach dürstete, von ihnen zu wissen. Ich glaube übrigens nicht, daß wir Zöglinge des Prometheus uns jemals mit dem langweiligen Perpetuieren dessen zufriedengeben könnten, was sich in verstaubten Bibliotheken nachlesen läßt; daß wir je Zauber und Faszination des Wagnisses vergessen könnten, sich mit dem Unbekannten einzulassen. *Semper apertus!* Freilich muß ich zugleich auch hoffen, daß diese Menschheit immer Einsicht und Charakter genug besitzen wird, das so eroberte Wissen nicht zur Verdüsterung, sondern zur Erhellung ihrer Welt zu gebrauchen.

Weiterführende Literatur:

NOVIKOFF, A.B., und E. HOLTZMAN: Zellen und Organellen. BLV Verlagsgesellschaft, München/Bern/Wien 1973.

BERKALOFF, A., J. BOURGUET, P. FAVARD und M. GUINNEBAULT: Biologie und Physiologie der Zelle. Vieweg, Braunschweig 1973.

FAWCETT, D.W.: Atlas zur Elektronenmikroskopie der Zelle. Urban & Schwarzenberg, München 1973.

PORTER, K.R., und M.A. BONNEVILLE: Einführung in die Feinstruktur von Zellen und Geweben. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1965.

The Chemical Basis of Life: An Introduction to Molecular and Cell Biology. (Readings from Scientific American.) Freeman, San Francisco 1973.

REINERT, J., and H. URSPRUNG (Herausg.): Origin and Continuity of Cell Organellen. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1971.

KOMNICK, H., W. STOCKEM und K.E. WOHLFARTH-BOTTERMANN: Ursachen, Begleitphänomene und Steuerung zellulärer Bewegungserscheinungen. Fortschr. Zool. 21/1. Fischer, Stuttgart 1972.

SITTE, P.: Methodengefüge und Erkenntnisfortschritt. Naturwiss. 60 (1973) 333 – 339.

Neue Forschungsmethoden und Entdeckungen haben in den vergangenen Jahren in den Erdwissenschaften eine stürmische Entwicklung ausgelöst. »Sea-floor spreading« und Platten tektonik sind dafür zwei kennzeichnende, auch außerhalb der Fachkreise bekannt gewordene Stichworte.

Eine entscheidende Rolle haben dabei zuletzt die Forschungsreisen gespielt, die seit 1968 mit der Glomar Challenger in allen Weltmeeren durchgeführt werden. Mit der Ausrüstung dieses einzigartigen Spezialschiffs lassen sich noch bei einer Wassertiefe von 4.000 m Bohrkerne bis zu 3.000 m tief unter dem Meeresboden heraufholen und damit völlig neue Daten über die Beschaffenheit und Geschichte der Erdkruste gewinnen.

KENNETH J. HSÜ berichtet hier über eine Reise mit diesem Schiff, die ihn zur Aufstellung einer revolutionierenden neuen Theorie über die Geschichte des Mittelmeerbeckens veranlaßte. Sein Bericht liest sich stellenweise wie eine Detektivgeschichte: Stück für Stück fügen sich zunächst rätselhaft erscheinende Einzelbefunde zu dem seltsamen, aber überzeugenden Bild einer erdgeschichtlichen Katastrophe zusammen, die 6 Millionen Jahre zurückliegt.

Hsü wurde 1929 in Nanking, China, geboren, wo er bis 1948 auch studierte. Dann wanderte er in die USA aus, wo er – an der University of California in Los Angeles – sein Geologiestudium abschloß. Bis 1963 arbeitete er danach in der Forschungs- und Entwicklungsabteilung von Shell, anschließend an der Universität von New York. Seit 1967 lehrt der Autor, der mit einer Schweizerin verheiratet ist, am Geologischen Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Neben 7 Büchern und zahlreichen Aufsätzen über andere Themen hat Hsü in den letzten Jahren wichtige Untersuchungen zur Frage der Entstehung der Alpen und des Apennin veröffentlicht. Er ist Mitglied zahlreicher wissenschaftlicher Gesellschaften in aller Welt.

Als das Mittelmeer eine Wüste war

KENNETH J. HSÜ

Hinweise auf eine seltsame Vorgeschichte

In jenen vergangenen Tagen, bevor der Atlantische Ozean sein Wasser in das Becken des heutigen Mittelmeeres ergoß, hatten Schwalben und viele andere Zugvögel die Gewohnheit angenommen, dem Norden zuzustreben. Diese damals erworbene Gewohnheit veranlaßt sie, noch heute die Gefahren des Fluges über das offene Wasser auf sich zu nehmen, das über die Täler des alten Mittelmeerbeckens fließt und seine Geheimnisse verbirgt.

So schrieb H. G. WELLS vor 50 Jahren in einem seiner utopischen Romane. Die im Mittelmeer vorgenommenen Tiefseebohrungen haben ihn nachträglich zum Propheten gemacht.

Unermüdlich hatten die Geologen gesucht und gebohrt, um die verlorenen Geheimnisse des Mittelmeeres zu ergründen. Sie fanden seltsame Dinge, ließen sich aber nicht dazu herab, eine Science-Fiction-Vision ihrer Arbeit als Hypothese zugrunde zu legen. So wurden die Geheimnisse immer verwirrender, bis in der Tiefe des Meeresbodens Salzlager gefunden wurden. H. G. WELLS hatte recht gehabt. »Jene längst vergangenen Tage«, von denen er schrieb, liegen 6 Millionen Jahre zurück. Damals war das Mittelmeerbecken eine über 3000 Meter unter dem heutigen Meeresspiegel gelegene Wüste. Die Hinweise darauf hatten von jeher existiert. Die Geschichte, die sich hinter ihnen verbarg, ist jedoch so phantastisch, daß niemand an sie glauben wollte.

Wir beginnen den Bericht über die Geschichte dieser Entdeckung am besten bei Sir Charles LYELL, einem der Begründer der Geologie. 1828 unternahm LYELL eine Reise nach Italien. Ein Jahrzehnt vorher hatte William SMITH, ein englischer Landvermesser, die aufregende Entdeckung gemacht, daß jede geologische Schicht durch eine bestimmte Zusammensetzung der in ihr ent-

haltenen fossilen Muscheln charakterisiert ist. Es stellte sich bald heraus, daß einige Sedimentschichten Fossilien enthalten, die den Arten unserer Zeit weitgehend ähnlich sind, während die Muschelschalen anderer Schichten völlig anders waren.

So fand ein italienischer Naturwissenschaftler, Giovanni Battista BROCCHI, heraus, daß die in den Formationen entlang der italienischen Küste eingeschlossenen Muscheln mit den heute im Mittelmeer lebenden Arten nahezu identisch sind. Das wollte LYELL mit eigenen Augen sehen. Bei seiner Reise über die Seealpen war seine erste Station Turin, wo er zunächst eine gewaltige Enttäuschung erlebte.

Franco BONELLI, der Direktor des dortigen Museums, führte ihn in das nahegelegene Bergland von Superga und zeigte ihm, daß die dort vorhandenen fossilen Muscheln nahezu sämtlich ausgestorbenen Arten angehörten. Erst als LYELL seine Reise nach Süden fortsetzte, konnte er sich davon überzeugen, daß BROCCHI nicht gelogen hatte, denn an anderen Stellen, insbesondere in Kalabrien und auf Sizilien, fand er Formationen mit eingeschlossenen Muscheln, die den heute lebenden Arten tatsächlich sehr ähnlich waren.

Auf seiner Heimreise besuchte LYELL in Paris dann den Muschelexperten Gérard Paul DESHAYES. DESHAYES war ein Arzt, der seine einträgliche Praxis vernachlässigte und sich völlig seiner Liebhaberei, dem Sammeln von Muscheln, widmete. Seine Untersuchungen hatten den Franzosen zu dem Schluß geführt, daß man die geologischen Schichten aufgrund ihres Gehalts an ausgestorbenen Arten chronologisch ordnen konnte: Jüngere Formationen enthalten Fossilien, die den noch lebenden Tieren ähneln, während ältere Formationen mit zunehmendem Alter immer mehr ausgestorbene Arten enthalten. Diesen Gedanken fand LYELL so interessant, daß er DESHAYES bat, seine italienischen Sammlungen nach diesem Gesichtspunkt zu untersuchen. Da er ein vermögender Mann war, bezahlte er dafür ein Honorar von 100 Pfund Sterling. Als nach einem Jahr alle Muscheln gesäubert, sortiert und identifiziert waren, ergaben Fakten und Zahlen ein eindeutiges Bild: Die fossilen Muscheln aus der Umgebung von Turin bestehen zu weniger als 30% aus den heute an der Mittelmeerküste lebenden Arten, während die in Sizilien ausgegrabenen Muscheln bis zu 90% dieser Arten enthalten.

Aufgrund des Berichtes von DESHAYES konnte LYELL seine italienischen Formationen in ein älteres »Miozän« und ein jüngeres »Pliozän« aufteilen. Es hatte den Anschein, als ob die meisten der im »Miozän« als Fossilien gefundenen Arten in Italien vor dem »Pliozän« ausgestorben waren.

Die Entdeckung eines solchen Massenaussterbens hätte eigentlich den Gedanken eines ungewöhnlichen Geschehens oder einer Katastrophe kurz vor dem Ende des Miozän nahelegen müssen. Ausgerechnet war LYELL aber nun ein besonders konsequenter Gegner Georges CUVIERS. Er widmete sein Leben weitgehend der Bekämpfung der geologischen »Katastrophen-Theorien«, die zu Anfang des 19. Jahrhunderts von diesem berühmten französischen Paläontologen aufgestellt wurden. LYELL blieb in fast allen aus diesem Streit hervorgehenden wissenschaftlichen Auseinandersetzungen Sieger.

Trotzdem wäre damals der Schluß möglich gewesen, daß vor 6 Millionen Jahren eine biologische Revolution über das ganze Mittelmeerbecken hinweggegangen sein mußte. Damals wanderten die ursprünglichen marinen Bewohner des Mittelmeers, Abkommen gemischter Rassen aus dem Atlantischen und dem Indischen Ozean, in ganz kurzer Zeit aus, um westlich der Meerenge von Gibraltar Zuflucht zu finden. Die verbleibenden Organismen fielen alsbald der Vernichtung anheim, mit Ausnahme besonders widerstandsfähiger Arten, welche auch unter den schlechteren Lebensbedingungen existieren konnten. Das war das Ende der »Miozän« genannten geologischen Epoche. Mit dem Anbruch des »Pliozäns« kehrten die Flüchtlinge zusammen mit neuen Einwanderern aus dem Atlantischen Ozean zurück. Diese Heimkehrer und Einwanderer sind die Vorfahren der heutigen Lebewesen des Mittelmeeres.

Einige Paläontologen diskutierten damals schon die Möglichkeit, daß sich im Mittelmeer eine drastische Veränderung des Salzgehalts vollzogen haben könnte, eine »Salinitäts-Krise«, wie sie es nannten, welche die völlige Vernichtung der Meereslebewesen des Miozäns zur Folge hatte. Vielleicht war dieses Binnenmeer damals ausgetrocknet oder zu einem Brackwassersee reduziert? Diese Hypothesen führten jedoch zu nichts anderem als dazu, Schriftsteller wie H. G. WELLS zu utopischen Erzählungen zu inspirieren.

Von anderer Seite kamen dann Hinweise völlig anderer Art. Auf der Suche nach Grundwasser im südlichen Frankreich fanden Ingenieure Ende des vorigen Jahrhunderts eine tief eingegrabene Schlucht unter der Ebene von Valence. Die Schlucht war bis zu einer Tiefe von mehr als 100 Metern unter Meereshöhe in harten Granit eingeschnitten und mit ozeanischen Sedimenten aus dem Pliozän angefüllt, welche ihrerseits von dem Sand und Kiesgeröll der Rhône überlagert waren. Zunächst schien sich diese von jüngeren Ablagerungen zugedeckte Schicht nur rund 25 km zwischen Lyon und Valence zu erstrecken. Später ließ sie sich dann aber über 160 km flußabwärts bis in die Camargue und ins Rhône-Delta verfolgen, wo ihr Boden, wie Bohrungen ergaben, nicht weniger als 1000 Meter unter der Oberfläche lag. Die heutige Rhône ist offensichtlich nur ein Schwächling verglichen mit ihrem Vorläufer, der solche Schluchten auszuwaschen imstande war. Wie ließ sich dieser tiefe Einschnitt unter der heutigen Rhône erklären? Nur wenige Wissenschaftler getrauten sich, darauf eine Antwort zu geben, unter ihnen der Franzose Georges DENIZOT. Er argumentierte, daß bei einem Absinken des Mittelmeerspiegels die in das Mittelmeer einmündenden Flüsse sich dem niedrigeren Niveau durch ein tieferes Einschneiden in den Grund anpassen müßten, weil sonst an der Einmündung jedes Flusses ein Wasserfall entstehen würde. Die Rinne, die die Rhône tief in das Gestein eingeschnitten habe, könne daher ein Hinweis darauf sein, daß das Mittelmeer vor dem Beginn des Pliozän ausgetrocknet gewesen sei. Leider war DENIZOT kein Paläontologe. Daher konnte er seine Hypothese nicht mit der von LYELL entdeckten biologischen Revolution am Ende des Miozän in Verbindung bringen. Seine Veröffentlichung wurde als reine Spekulation angesehen und rasch vergessen.

Bis dahin waren alle Untersuchungen auf dem Land unternommen worden. 1961 fuhr dann das amerikanische ozeanographische Forschungs-Schiff *Chain* in das Mittelmeer, um den Meeresboden mit einem neu entwickelten seismischen Gerät zu untersuchen. Das an Bord mitgeführte CSP-Gerät (Abkürzung für *continuous-seismic-profiling*) stellte so etwas wie ein Super-Echolot dar. Es nahm nicht nur die vom Meeresboden reflektierten akustischen Signale auf, sondern auch das Echo der Schallwellen, welche den sandigen Meeresboden durchdrangen

und von den harten Schichten Hunderte von Metern tiefer reflektiert wurden. Dieses neue Gerät ermöglichte eine neue Entdeckung: Man stellte fest, daß es unter dem sandigen Boden des Mittelmeeres säulenförmige Gebilde gab, die einige Kilometer Durchmesser hatten und Hunderte oder Tausende Meter hoch waren und bis in die Sedimentschichten hineinragten (Abb. 1). Den Geophysikern waren Strukturen dieser Art bekannt: Sie sahen genauso aus wie »Salzdome«.

Salzdome bilden sich, wenn Steinsalz aus einer tiefgelegenen und zugedeckten Mutterschicht unter Druck in die darüber lagernden Sedimentschichten nach oben gepreßt wird. So finden sich Salzdome in großer Anzahl entlang der Küste des mexikanischen Golfs, wo viele Ölfelder in der Nähe der Salzdome festgestellt wurden. Daß man in den Sedimentschichten von Küstengewässern Salz gefunden hat, ist nicht überraschend, da die Geologen schon lange damit rechneten, daß es in Salinen oder Lagunen ent-

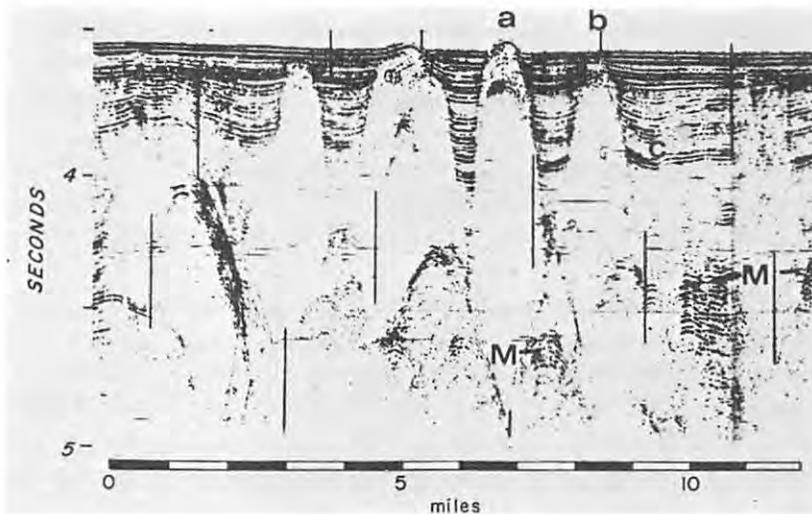


Abb. 1: Kontinuierliches seismisches Profil (16 Kilometer breiter Abschnitt aus der Balearentiefe im westlichen Mittelmeer). Unter dem Meeresboden sind deutlich säulenartige Strukturen, offenbar Salzdome, zu erkennen. Einige ragen wie Riffe über den Meeresboden empor (a), während andere (b) völlig zugedeckt sind. Die Entdeckung dieser Strukturen war der erste Hinweis auf das Vorhandensein großer Salzablagerungen unter dem Boden des Mittelmeeres (Diagramm des französischen Forschungsschiffs Calypso, mit freundlicher Erlaubnis von O. LEENHARDT).

lang der Küste zu Salzausfällungen gekommen sein müsse. Völlig unerwartet war jedoch die Entdeckung von Salzdomen unter dem Tiefseeboden des Mittelmeeres. Woher konnte hier das Salz kommen? Niemand getraute sich, dieses Salz als den Rückstand zu erklären, der zurückblieb, als das Mittelmeer vor 6 Millionen Jahren austrocknete. Statt dessen zogen die Gelehrten es vor, diese Ablagerungen als eine uralte kontinentale Formation zu erklären, die sich vor reichlich 200 Millionen Jahren gebildet hätte und in die Tiefe gesunken wäre, als ein Teil des europäischen Kontinents abgesunken wäre und damit das Mittelmeer hätte entstehen lassen. Andere wieder beruhigten sich mit der Annahme, daß es sich gar nicht um Salzdomen handele, sondern lediglich um domartige Strukturen aus weichem Schlamm, die bei der seismischen Untersuchung ein ähnliches Bild ergäben.

Während der 60er Jahre wurden die Untersuchungen in immer rascherem Tempo fortgesetzt. William B. F. RYAN vom Geologischen Observatorium von Lamont-Doherty, der an vier Forschungsfahrten im Mittelmeer teilgenommen hatte, und andere Wissenschaftler, die in demselben Gebiet arbeiteten, entdeckten zu ihrer Überraschung überall unter dem Mittelmeerboden eine akustisch besonders stark reflektierende Schicht (Abb. 2). Diesen Reflektor, auch *M-Reflektor* genannt, findet man in der Regel etwa 100 Meter unter dem Meeresboden. Seine Oberfläche spiegelt im großen ganzen die Topographie des Meeresbodens ziemlich genau wider.

Eine Schicht, die ein so deutliches Echo zurückwerfen konnte, mußte sehr hart sein. Meeressedimente sind im allgemeinen aber weiche Schlickschichten, die aus winzigen Skeletten kleiner Organismen bestehen, vor allem Foraminiferen und Nanno-Plankton. Woraus mochte sich der »M-Reflektor« zusammensetzen? Woran konnte es liegen, daß eine so harte Schicht überall unter dem Mittelmeerboden existierte? Einige unserer sowjetischen Kollegen hielten die harte Schicht für einen Markstein in der Erdgeschichte, der das Ende des Mesozoikums oder des Zeitalters der Dinosaurier vor etwa 70 Millionen Jahren anzeigte.

RYAN und seinen Mitarbeitern gelang es jedoch, der geheimnisvollen Schicht an einer günstig gelegenen Stelle einen Bohrkern zu entnehmen. Die in dem weichen Schlamm an der Oberfläche der Bohrprobe eingebetteten Mikrofossilien gaben Veranlassung

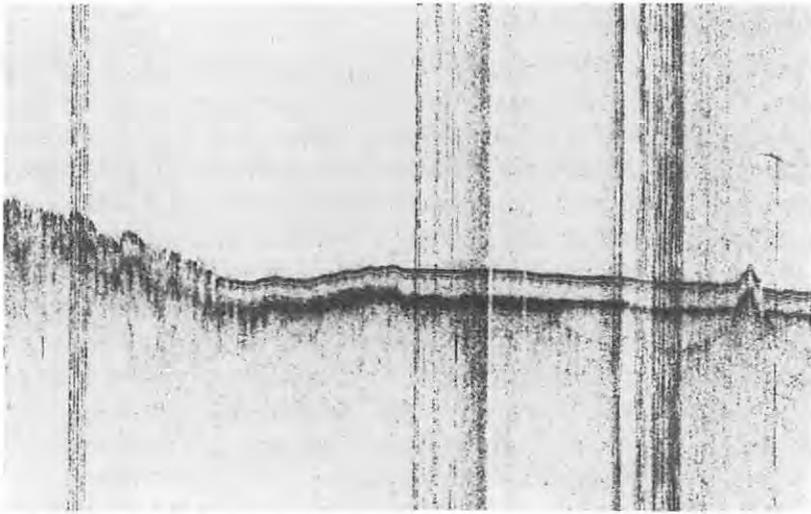


Abb. 2: Der M-Reflektor, eine akustisch stark reflektierende Schicht, liegt unter großen Teilen des Mittelmeerbodens. Das Relief dieser Schicht (untere dunkle Linie) folgt weitgehend der Topographie des Meeresbodens (obere dunkle Linie). Dieses kontinuierliche seismische Profil wurde von der Glomar Challenger erstellt, während sie sich in nordöstlicher Richtung (von rechts nach links) von einem Punkt südöstlich von Sizilien in Richtung auf Kreta bewegte.

zu der Vermutung, daß der M-Reflektor nicht älter ist als das Pliozän, also nur wenige Millionen Jahre alt. Noch immer stand RYAN vor einem Rätsel. Wie kam es, daß gerade diese Schicht so hart war? Er ahnte nichts von den paläontologischen Vermutungen über eine »Salinitäts-Krise« im Mittelmeer. Sonst hätte er den logischen Schluß gezogen, daß diese harte Schicht sich bildete, als der Boden des Mittelmeeres vor 6 Millionen Jahren von der Sonne ausgeglüht wurde.

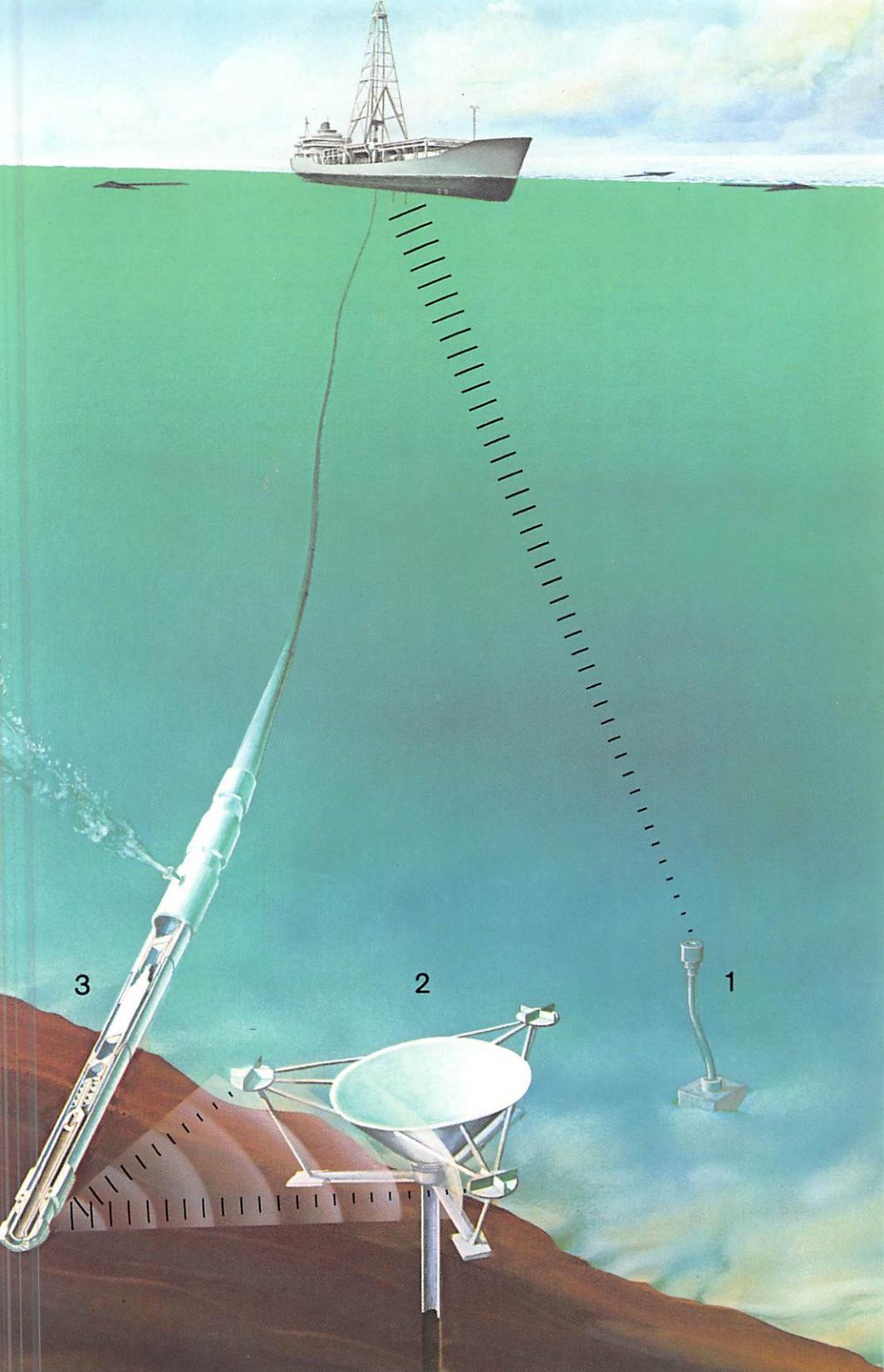
Es klinge nur logisch, wenn man jetzt sagen könnte, daß das speziell für Tiefseebohrungen gebaute Forschungsschiff *Glomar Challenger* 1970 in das Mittelmeer entsandt wurde, um das Geheimnis der »mediterranen Salinitätskrise« zu lösen. In Wirklichkeit war es anders. Die Fahrt in das Mittelmeer sollte der Untersuchung anderer Fragen dienen. Aber wir stießen dabei zu unserer eigenen Überraschung auf einen ganz unerwarteten Befund und bestätigten damit die alte Wahrheit, daß wissenschaftlicher Fortschritt sich nicht immer programmieren läßt.

Ein Kies besonderer Art

Am 13. August 1970 lief die *Glomar Challenger* aus Lissabon zum 13. Male im Rahmen des Tiefseebohrungsprogramms aus. Das Schiff ist deswegen einzigartig, weil es sich auch in stürmischer See auf demselben Fleck halten kann (Abb. 3–5). Ein System von akustischen Leitstrahlen, Computern und 4 Wasserdüsen hält das Schiff in seiner Position über dem Bohrloch innerhalb eines Kreises mit einem Durchmesser von nicht mehr als 130 Metern fest. RYAN und ich waren die leitenden Wissenschaftler dieser Fahrt. Wir hatten eine internationale Gruppe von 20 Forschern und Technikern an Bord. Am Abend des 23. August erreichten wir einen Punkt etwa 200 km südöstlich von Barcelona (Platz 122, Abb. 6). Nachdem wir unser Schiff über einem von Sedimenten bedeckten unterseeischen Vulkan in Stellung gebracht hatten, gingen wir daran, dem geheimnisvollen M-Reflektor auf den Leib zu rücken. Die ineinander verschraubten Bohrröhre wurden auf den Meeresboden hinabgelassen. Bald darauf hatten wir unseren ersten Bohrkern an Bord.

Die Ozeane sind der Lebensraum der marinen Organismen. Die treibenden oder schwimmenden Seelebewesen werden zusammenfassend als *Plankton* bezeichnet, während die, welche kriechen oder am Boden sitzen, zum *Benthos* zählen. Wenn diese Organismen sterben, dann zersetzen sich ihre weichen Teile allmählich. Nur ihre harten Skelette, die gewöhnlich aus *Kalziumkarbonat* (CaCO_3) bestehen, sinken auf den Meeresboden, wo sie als Fossilien zugedeckt werden. An Stellen, wo von Land her nur wenig Sand in das Wasser gelangt, kann eine Sedimentschicht im Meer ausschließlich aus abgestorbenen Skeletten von Foraminiferen und Nanno-Plankton bestehen (Abb. 7).

Die Foraminiferen oder Wurzelfüßler sind winzige, einzellige Tiere, deren Größe von wenigen Hundertsteln eines Millimeters bis zu Zehntelmillimetern reicht. Die dem Nanno-Plankton zugeordneten Lebewesen sind sogar noch kleiner. Es handelt sich um einzellige Pflanzen, die im offenen Meer leben und bei ihrem Absterben ebenfalls Skelette aus Kalziumkarbonat in den verschiedensten Formen und Gestalten hinterlassen. Einige Arten (*Discoaster*) sehen unter dem Mikroskop wie kleine Schneeflocken aus, sind aber nur wenige Tausendstel eines Millimeters groß



3

2

1

Abb. 3 (s. gegenüber von S. 126): Schematische Darstellung des »dynamischen Positionssystems« der Glomar Challenger sowie der für dieses Forschungsschiff erstmals entwickelten Bohrloch-Suchtechnik (re-entry-Technik).

a) An der Bohrstelle wird als erstes ein Sonar-Sender versenkt (1). Die von diesem ausgehenden Peilsignale werden von Hydrophonen am Schiffsboden in einen Bordcomputer geleitet. Dieser steuert 4 im Schiffsrumpf eingebaute Wasserdüsen, die das Schiff in allen Richtungen seitlich versetzen können, so daß die Glomar Challenger auch bei rauher See an Ort und Stelle bleibt.

b) Anschließend wird ein »re-entry«-Trichter (Durchmesser ca. 5 m) versenkt (2), an dessen Rand 3 Sonarreflektoren angebracht sind. Mit einem eigenen kleinen Sonarsender steuert sich dann der Bohrkopf (3) mittels einer Wasserdüse selbsttätig an den Trichter heran, der sich in den oberen Schlickschichten fest verankert hat. Diese Technik ermöglicht es noch bei Wassertiefen von mehr als 3000 m, das gleiche Bohrloch mehrfach wiederzufinden, etwa nach einer Unterbrechnung aus technischen oder meteorologischen Gründen.



Abb. 4: Die Glomar Challenger. Das 11 000 Tonnen große Bohrschiff gehört der Global Marine Company und ist von der National Science Foundation für das Deep Sea Drilling Project (DSDP) gechartert. Ihren Namen hat sie von dem ersten Schiff, das ausschließlich der ozeanographischen Forschung gewidmet war, der H. M. S. Challenger, die im Dezember 1872 vom Stapel lief. Zur Zeit ist die Glomar Challenger das einzige Bohrschiff, das auf dem offenen Meer eingesetzt werden kann. Ein dynamisches Positionssystem hält das Schiff über dem Bohrloch auch in stürmischer See praktisch stationär (s. Abb. 3). Das Schiff liefert noch bei 4000 m Wassertiefe Bohrproben bis zu 3000 m unter dem Meeresboden (Mit freundlicher Genehmigung des DSDP).

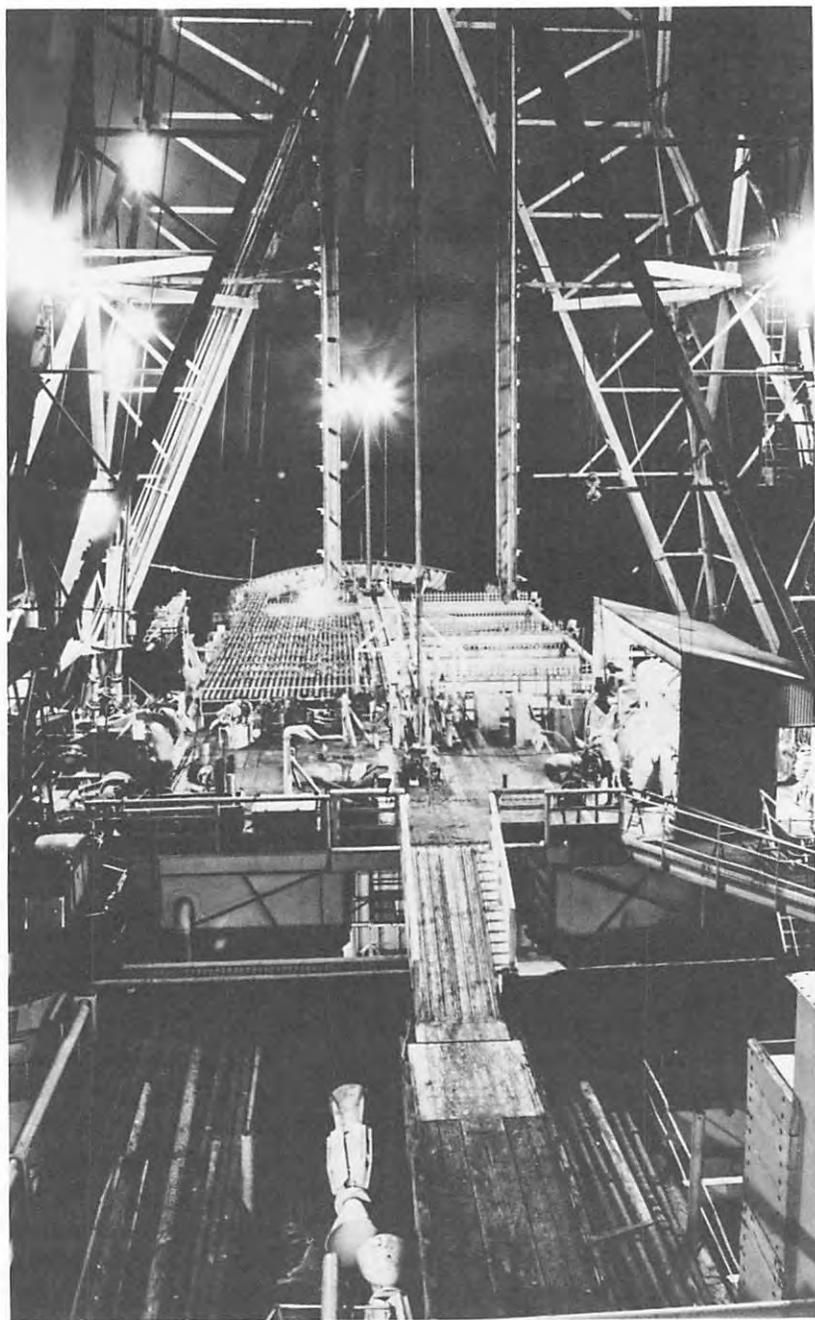
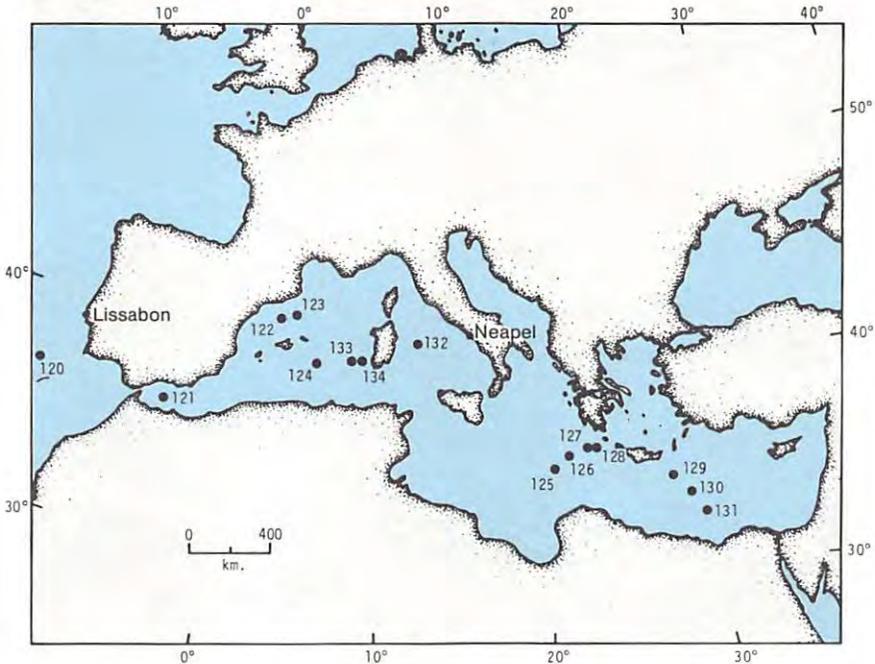


Abb. 5: Nächtliche Ansicht von der Brücke. Mittschiffs spreizen sich die unteren Teile der Beine des Bohrturmes (Höhe über Deck 45 m, über der Wasserlinie fast 60 m). Auf dem Vorderdeck ist der automatische Rohrstapler zu erkennen, mit dessen Hilfe über 7000 Meter Bohrrohr auf den Meeresboden abgesenkt werden können. Das senkrecht über der Bohrbühne hängende Rohr ist das obere Ende eines 3570 m langen Bohrstrangs, mit dem im Zeitpunkt dieser Aufnahme dem Boden des Mittelmeers 130 km westlich von Sardinien Proben entnommen wurden. Wie man der Photographie entnehmen kann, werden diese Bohr- und Kernarbeiten rund um die Uhr 24 Stunden täglich durchgeführt (Mit freundlicher Genehmigung des DSDP).

Abb. 6: Lage der Tiefsee-Bohrstellen, DSDP Etappe XIII. Während ihrer 54 Tage dauernden Reise vom 13. VIII. bis 6. X. 1970 legte die Glomar Challenger 4646 Seemeilen zurück, brachte 28 Bohrungen an 15 Bohrstellen nieder und erbohrte 201 Bohrkern mit einer Gesamtlänge von mehr als 1,5 km. Die Wassertiefen an den Bohrstellen lagen zwischen 1100 und 4600 m. Insgesamt wurden über 6000 m Sedimentschichten durchbohrt. Das tiefste Bohrloch hatte eine Länge von etwa 915 m.



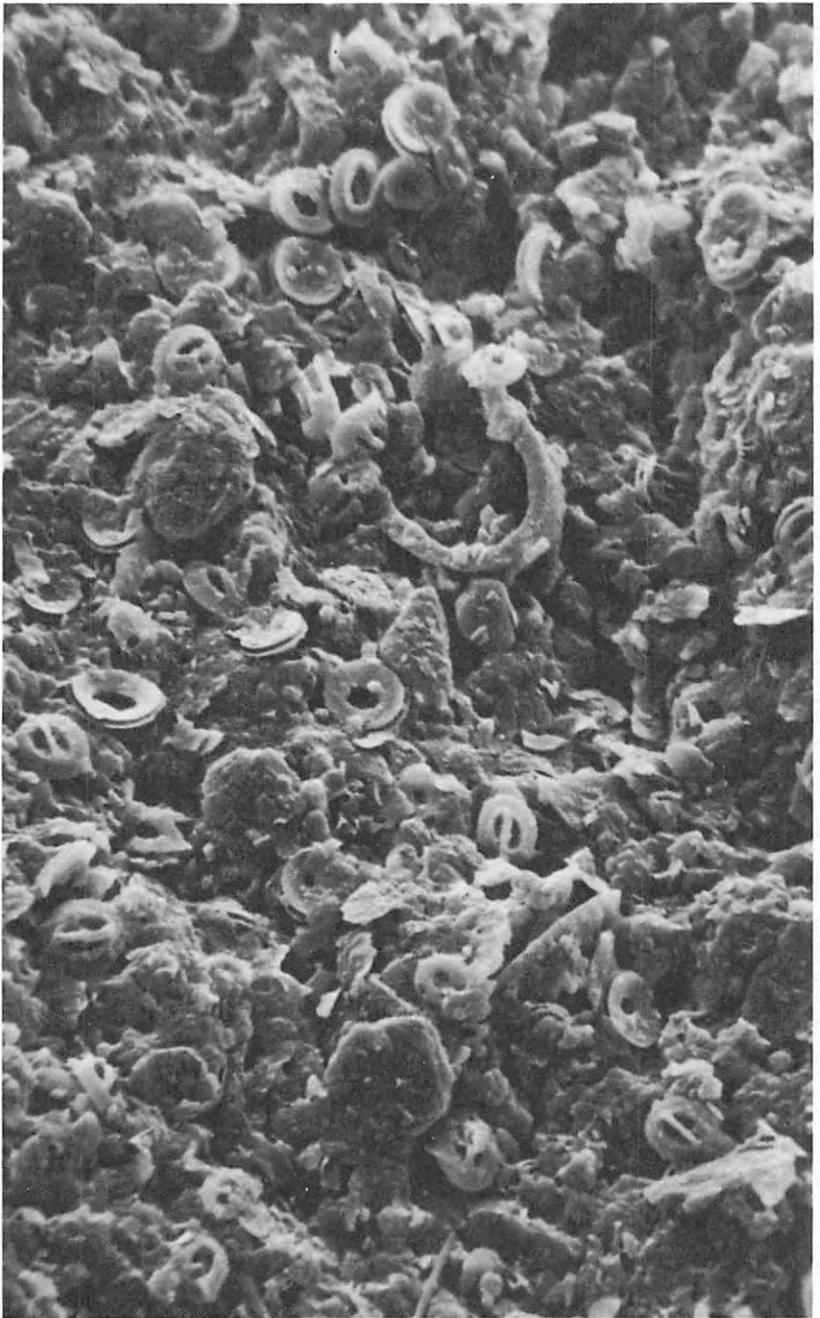
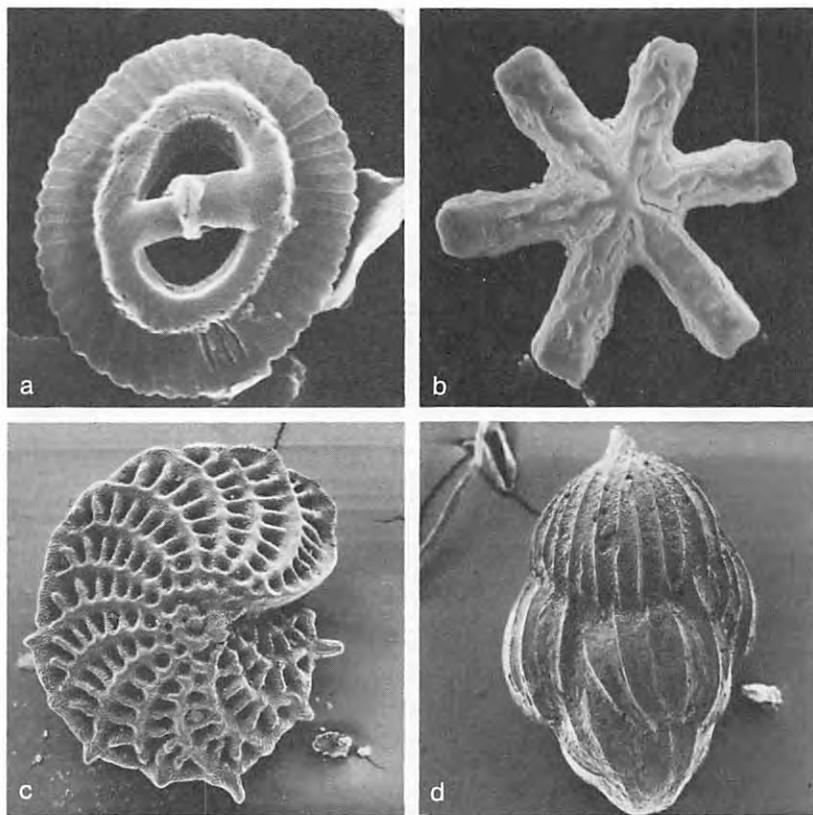


Abb. 7: Ozeanische Sedimente aus dem Mittelmeer. Dieses Stereoscan-Photo zeigt ein normales ozeanisches Sediment aus dem Mittelmeer. Es besteht fast ausschließlich aus den harten Überresten tierischer (Foraminiferen) und sehr viel kleinerer pflanzlicher Einzeller (Nanno-Plankton) (4000 ×, Aufnahme: H. E. FRANZ).

Abb. 8: Einige fossile Foraminiferen- und Plankton-Arten aus dem Mittelmeer.

- a) *Geophyrocapsa* sp. 16 000 ×
- b) *Discoaster* sp. (a und b: Nannofossilien) 4000 ×
- c) *Uvigerina mediterranea* HOFKER 75 ×
- d) *Elphidium strigillatum* FICHEL-MOLL (c und d: Foraminiferen) 85 × (Aufnahmen: H. E. FRANZ)



(Abb. 8). Der Meeresboden ist die Grabstätte für Milliarden und Abermilliarden dieser winzigen Organismen.

Ich habe erwähnt, daß William SMITH das Prinzip der Altersbestimmung sedimentärer Formationen auf dem Festland anhand der in ihnen enthaltenen Fossilien entdeckt hat. Die Mikropaläontologen stützen sich auf dasselbe Prinzip, um das Alter ozeanischer Sedimentschichten festzustellen, denn auch die winzigen einzelligen Lebewesen kamen und vergingen. Eine Art nach der anderen starb aus, und an ihre Stelle traten neue Arten. So zeichnete die Evolution des Lebens im Meere sich in einer Abfolge unterschiedlich zusammengesetzten Ablagerungen von Mikro- und Nannofossilien ab, welche die Sedimentschichten der einzelnen Zeitalter kennzeichnen.

Ein Historiker spricht von *Dynastien*, wenn er über die geschichtlichen Epochen eines Landes berichtet, das von einander ablösenden Herrscherfamilien regiert wurde. In unserem Fach verwendet man den Ausdruck »fossile Zonen« zur Definition bestimmter Epochen der Erdgeschichte. So wurde z. B. festgestellt, daß der Beginn des Pliozäns in den Mittelmeerländern sich durch eine »Zone« von *Sphaeroidinellopsis acme* definieren läßt (d. h. durch eine Epoche, in der Foraminiferen der Gattung *Sphaeroidinellopsis* den Höhepunkt ihrer Entwicklung erreichten).

Die paläontologische Datierung liefert uns jedoch nur eine *relative* Chronologie der Sedimente. LYELL bediente sich dementsprechend der Ausdrücke Pliozän und Miozän, was im Grunde eben nicht mehr heißt als »mehr« oder »weniger rezent«. Über eine Möglichkeit zur Bestimmung des absoluten Alters verfügen die Paläontologen nicht. Die Physiker haben jedoch eine Methode entwickelt, das Alter durch Messung des Ausgangs- und Endproduktes radioaktiven Verfalls zu bestimmen. Sie benötigen zu diesem Zweck lediglich ein Gesteinsstück, das radioaktive Elemente bzw. Isotope wie Uran, Thorium, Kalium oder Rubidium usw. enthält. Leider sind in den Ablagerungen, in denen die Fossilien eingeschlossen sind, die radioaktiven Elemente nicht in ausreichenden Mengen vorhanden.

Andererseits sind die Fossilien an einigen Stellen eingebettet in vulkanische Aschen oder Lavaströme, bei denen das der Fall ist. Damit konnten diese eine Skala für das Alter fossiler Zonen liefern. Der verstorbene schottische Geologe Arthur HOLMES hat in

der Aufstellung einer absoluten Skala geologischer Epochen Pionierarbeit geleistet. Im vergangenen Jahrzehnt ist diese Skala noch wesentlich verbessert worden. Bei unseren Untersuchungen stützten wir uns auf eine von Bill BERGGREN erstellte Zeitskala, wenn wir für das Ende des Miozäns eine Zeit von 5,5 Millionen Jahren vor der Gegenwart und für das Ende des Pliozäns eine Zeit von 2 Millionen Jahren angeben.

Unter Anwendung dieses Verfahrens stellten wir gleich nach dem Beginn der Bohrungen fest, daß wir die älteste pliozäne Sedimentschicht (Ablagerungen mit einem Alter von 5,5 Millionen Jahren) in einer Tiefe von 180 Metern unter dem Meeresboden durchstoßen hatten. Nach unseren seismischen Aufzeichnungen hätten wir nun unser Ziel erreichen und auf die Oberseite der geheimnisvollen harten Schicht, des M-Reflektors, treffen müssen. An diesem kritischen Punkt jedoch, während wir alle gespannt auf das Auftauchen der nächsten Gesteinsprobe warteten, ereignete sich ein kleiner Betriebsunfall. Das Kernrohr verklemmte sich in der Verrohrung. Uns blieb nichts übrig, als die Bohrröhre an Deck zu hieven, auseinanderzuschrauben und das Kernrohr aus dem letzten Rohr am Ende des Bohrstranges herauszuholen.

Am Morgen des 24. August waren Bill RYAN und ich todmüde. Seit wir aus Lissabon ausgelaufen waren, hatte keiner von uns richtig geschlafen. Die Mannschaft war noch mit dem Aufziehen des Bohrstranges beschäftigt. Wir hatten eigentlich nichts zu tun und hätten uns ins Bett legen sollen. Aber wir waren zu nervös, angespannt und deprimiert. Über 10 Tage waren bereits vergangen, und allein die Zeit für die Benutzung des Schiffs hatte über 100 000 Dollar gekostet, ohne daß uns auch nur die verhältnismäßig einfache Identifizierung des M-Reflektors gelungen war. Inzwischen kam das Kernrohr an Deck. Es hatte sich in einem mit Sand gefüllten Bohrröhr verklemmt. Stumm beschäftigten wir uns im Bordlaboratorium damit, die erbsgroßen Kieskörner aus den Eimern mit Sand, die ein Helfer von der Bohrbühne heranschaffte, zu waschen und zu sortieren. Als der Morgen dämmerte und unsere Sammlung anwuchs, wuchs auch unser Erstaunen über das, was wir sahen.

Kiesige Sande sind im Meer selten. Unter Wasser sich ereignende Erdbeben können einen Schlammstrom erzeugen, der Sand und Kies von der Küste bis auf den Tiefseeboden verfrachtet. Zu die-

sem Schluß waren wir in der vorangegangenen Nacht zunächst auch gelangt: Das vulkanische Geröll und der Gips in unseren Eimern konnten von der spanischen Küste abgebrochen und durch eine kräftige Schlammströmung in den Valencia-Graben befördert worden sein. Von einem Kies dieser Art erwartet man jedoch, daß er aus verschiedenen Gesteinen, die von einer Erosion an der Küste stammen, zusammengesetzt ist. Kies dieser Herkunft müßte in erster Linie Quarz enthalten, das den Hauptbestandteil aller Sande bildet. Dann hätten wir Feldspat, Granitbruchstücke, Rhyolith, Gneis, Schiefer und andere metamorphe Gesteine und vielleicht auch sekundäre Quarzite, Sandsteine, Tone und Kalksteine finden müssen, die sich auf Festlandssockeln ablagern.

Als unsere Sammlung anwuchs, stellten wir jedoch fest, daß unser Kies nur aus 3 verschiedenen Gesteinsarten bestand: ozeanischem Basalt, verhärtetem ozeanischem Schlick und Gips. Außerdem fanden wir eine ungewöhnliche Fauna von winzig kleinen Muscheln, die »Zwerge« genannt werden, weil sie sehr viel kleiner sind als die robusteren Exemplare derselben Art. Wir fanden keinen Quarz, keinen Feldspat, keine Granite, keine Rhyolithe, keinen Gneis, keine Schiefer, keine Quarzite, keine Sandsteine, keinen Ton und keine Kalksteine. Wir fanden, genau gesagt, nicht die geringste Spur irgendeiner Materie, die von einem Kontinent hätte stammen können. Unser Kies war ganz sicher nicht durch Schlammströme von der *Costa blanca* bis zu unserer Bohrstelle transportiert worden. Was also hatte er zu bedeuten?

Am Abend des 24. August wurde der Bohrmeißel, der das letzte Loch gebohrt hatte, heraufgebracht. Zwischen seinen Zähnen, die in der Nähe der obersten Lage der »harten Schicht« stecken geblieben waren, fanden wir feine Ansammlungen von eingebettetem Gips. Damit hatten wir den Beweis, daß die Gipsteilchen in unserem Kies von der Erosion einer darunter gelegenen, älteren Gipsschicht stammten, dem anorganischen Rückstand einer verdunsteten Lagune. Geologisch alte Verdunstungsrückstände versteinern im allgemeinen (sie werden in Felsgestein umgewandelt). Damit hatten wir die erste Antwort gefunden: Der M-Reflektor, die »harte Schicht« unter dem Mittelmeerboden, besteht aus jung-miozänen *Evaporiten* (Verdunstungsgesteinen).

Diese Entdeckung machte die Angelegenheit aber nur noch ge-

heimnisvoller. Verdunstungsprodukte können naturgemäß nur als Ablagerungen aus küstennahen Lagunen oder in Wüsten entstehen. Wie kam eine solche Evaporitschicht unter den Mittelmeerboden in eine Tiefe von mehr als 1000 Metern unter dem Meeresspiegel? Vielleicht lieferte der Kies eine Antwort: Die Kiesel stammten nicht vom Festland. Andererseits konnten sie aus geologischen Gründen nur als »Gerölle«, also keinesfalls unter Wasser entstanden sein. Hatten wir sie etwa aus einem Meer geholt, das einst ausgetrocknet gewesen war? War es denkbar, daß das Mittelmeer während des späten Miozäns vom Atlantik getrennt worden war und sich in ein Wüstenbecken verwandelt hatte?

Wir konnten uns sehr wohl den allmählichen Rückzug des Mittelmeeres und die wachsende Versalzung seines Wassers ausmalen mit der Folge des Absterbens aller normalen Seelebewesen, ausgenommen einige Zwergarten von Muscheln und Schnecken, welche die Lebensbedingungen in einer Umgebung mit einem so hohen Salzgehalt ertragen konnten. Das Binnenmeer mußte sich dabei allmählich in einen Salzsee verwandeln, ähnlich dem Toten Meer, in dem das Wasser durch fortlaufende Verdunstung schließlich zu einer so konzentrierten Lake wurde, daß es zur Ausfällung eines Gipsniederschlags kam. Die weitergehende Verdunstung würde zuletzt den Boden des Mittelmeers freigelegt haben, und die unterseeischen Vulkane würden zu vulkanischen Gebirgen werden. Der ozeanische Schlick an ihren Hängen würde versteinern. Wasserläufe, die ein derartiges Gelände entwässert hätten, würden einen Kies genau der ungewöhnlichen Art ablagern, wie wir ihn gefunden hatten.

Es wäre vermessen gewesen, auf den mehr als dürftigen Unterlagen, die wir besaßen, eine Theorie dieser Art aufzubauen. Außerdem waren die an Bord befindlichen Wissenschaftler nach Gesichtspunkten ausgewählt worden, zu denen die Geologie dieses Teils der Erde nicht gehörte. Keiner von uns wußte damals etwas von der »mediterranen Salinitätskrise« der Paläontologen oder von der unter dem Rhône-Bett entdeckten unterirdischen Schlucht. So stand mein guter Freund Bill RYAN dieser eigenwilligen Spekulation besonders skeptisch gegenüber. Wir konnten erst weiterkommen, wenn wir wesentlich mehr Bohrproben zur Prüfung hatten.

Die »Säulen von Atlantis«

Am Abend des 26. August erreichten wir die Bohrstelle 124 südlich der Balearen. Die weichen Sedimente durchstießen wir ziemlich schnell. Im weiteren Verlauf entnahmen wir mehrere Bohrkern und fanden die übliche Abfolge mariner Sedimentierung während der letzten 5 Millionen Jahre. Dann stießen wir auch hier auf die Oberkante der Evaporitschicht. Das Tempo der Bohrung verlangsamte sich, und wir benutzten die Pause, um etwas Schlaf nachzuholen. Aber unsere Ruhe sollte nicht lange dauern. Sehr bald wurden wir von einem Techniker geweckt, der uns mitteilte, daß wir »eine Säule von Atlantis« an die Oberfläche geholt hätten (Abb. 9).

Wir zogen uns rasch an und eilten ins Laboratorium. Auf dem langen Arbeitstisch lag ein besonders schöner Bohrkern, der tatsächlich einer kleinen Marmorsäule sehr ähnlich sah. Ich warf nur einen Blick darauf und behauptete, daß dieser Bohrkern den endgültigen Beweis dafür lieferte, daß das Mittelmeer einst vollständig ausgetrocknet war.

Meine wissenschaftlichen Kollegen an Bord waren hauptsächlich als Meeresgeologen ausgebildet. Sie waren Fachleute in der Analyse ozeanischer Sedimente. Aber kaum einer von ihnen hatte auf früheren Forschungsreisen mit Evaporiten zu tun gehabt. Es erschien ihnen unglaublich, daß ein Sedimentologe wie ich nach einem kurzen Blick so viel über ein Gestein aussagen konnte.

Sedimentologen beschreiben und analysieren Ablagerungen und Sedimentgesteine. Sie schneiden beispielsweise von Kalkstein einen Brocken ab und schleifen den Splitter zu einer durchsichtigen, dünnen Scheibe, die sie unter dem Mikroskop untersuchen. Schiefer zermahlen und pulverisieren sie und bombardieren das Pulver mit Röntgenstrahlen. Sandstein zertrümmern und zerkleinern sie, bis die Sandkörner durch eine Reihe von Sieben geschüttelt werden können. Sie lösen einen Salzkristall auf, schicken die Lösung durch eine Reihe von Apparaten und analysieren sie schließlich unter dem Massenspektographen.

Mit derartigen Untersuchungen wollen sie etwas über den Ursprung des Sediments erfahren. Handelt es sich um eine Ablagerung vom Küstenstrand, um Kalkschlamm, der sich auf einer Gezeitenfläche abgelagert oder um Meeresschlack? Manchmal

Abb. 9: Die »Säule von Atlantis«. Der erste Bohrkern einer Evaporitablagerung, welcher jemals aus einem Tiefseeboden gewonnen wurde. Der Bohrkern besteht aus Schichten von Kalziumsulfat (Anhydrit) und dunklem Dolomit mit fossilisierten Algenmatten. Die Techniker, die gewohnt sind, nur Schlamm und Schlick vom Tiefseeboden zu sehen, nicht aber eine Miniatursäule von marmorähnlichem Gestein, gaben diesem Kern den Spitznamen »Säule von Atlantis«. Diese Art von Evaporitablagerung kann sich nur auf Gezeitebenen in Trockengebieten formen. Die Entdeckung eines derartigen Vorkommens im Mittelmeer gibt uns einen Beweis, daß das Mittelmeerbecken einst ausgetrocknet war.



braucht man die komplizierten Untersuchungsverfahren nicht vollständig ablaufen zu lassen und nicht immer benötigt man komplizierte Apparate. Ein erfahrener Spezialist kann einem Gestein seinen Ursprung mitunter ansehen.

Die vergleichende Sedimentologie wurde kurz nach dem Zweiten Weltkrieg entwickelt und durch die finanzielle Unterstützung der Mineralölindustrie rasch vorangetrieben. Es wurden Studiengruppen ausgesandt zur Untersuchung rezenter Sedimente in verschiedenen Umgebungen: Flußsedimente auf Küstenebenen, Deltaablagerungen an der Mündung größerer Flüsse, Meeresedimente auf Festlandssockeln, ozeanische Sedimente auf Tiefseeboden usw. usw. Dabei stellten sich nach und nach unterscheidende Merkmale heraus, die als »Sedimentstrukturen« festgehalten und beschrieben wurden. Sie sind für Sedimente, die an verschiedenen Plätzen abgelagert wurden, sehr charakteristisch. Wenn bei einer Bohrung ein Bohrkern mit einer alten Sedimentformation ans Tageslicht gefördert wird, dann kann man seine Sedimentstruktur mit den bekannten Normen in etwa derselben Weise vergleichen, in der ein Kunstexperte einen »Rembrandt« dadurch identifiziert, daß er Farbe, Komposition, Schattierung, Führung des Pinselstrichs usw. mit den entsprechenden Charakteristiken bekannter Rembrandt-Gemälde vergleicht.

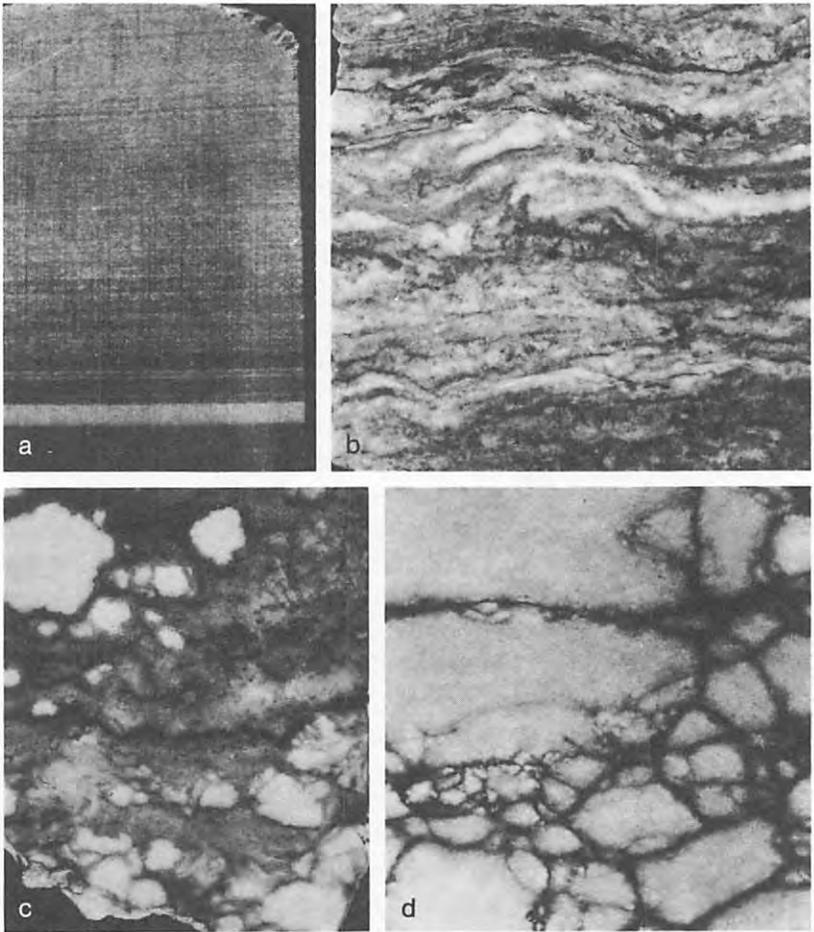
Sedimente von der Art unserer »Säule von Atlantis« aber waren bisher nur an trockenen Küstenebenen gefunden worden. Das weiße Mineral ist *Anhydrit*, ein wasserfreies Kalziumsulfat (Abb. 10). Das dunkle Mineral *Dolomit*: Es tritt in horizontalen Bändern oder Blätterstrukturen auf, die man »Stromatolithe« nennt (Abb. 10b).

In den der Mittelmeerfahrt vorangegangenen Jahren hatten meine Kollegen und ich von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich die Küstensedimente des Persischen Golfs studiert. Auf Salzebenen, arabisch *Sabhkas* genannt, haben wir zahlreiche Gräben gezogen und Anhydrit (CaSO_4) nur dort gefunden, wo der Grundwasserspiegel ziemlich nahe an der Oberfläche liegt. In diesem Bereich wird das salzhaltige Grundwasser auf Temperaturen von mehr als 30°C erwärmt. Wo der Grundwasserspiegel tiefer liegt und das Wasser kühler ist, wird anstelle von Anhydrit Gips, als das hydrierte Kalziumsulfat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ausgefällt.

Dieser Befund stimmt mit den im Laboratorium vorgenommenen chemischen Untersuchungen überein, welche ergaben, daß die Übergangstemperatur für die Ausfällung von Kalziumsulfat aus salzhaltigem Grundwasser etwa 30°C beträgt. Wir haben also gute Gründe für die Annahme, daß Anhydrit wahrscheinlich nur unter Bedingungen zu finden ist, wie sie in den heißen und trockenen *Sabhkas* gegeben sind, weil die Oberflächentemperaturen und die chemische Zusammensetzung des Grundwassers an anderen Stellen nur sehr selten seine Ausfällung zulassen. Wir sind ziemlich sicher, daß Anhydrit nicht in tiefen Meeresgewässern entstehen kann. Selbst das *Tote Meer* ist ein Gewässer von zu großer Tiefe, als daß es so weit aufgewärmt werden könnte, daß eine Ausfällung von Anhydrit möglich wird. Am Boden dieses Salzsees wurden nur Gipskristalle gefunden. Nur in wenigen kleinen, isolierten Becken des Roten Meeres, wo die Temperaturen etwa 50°C erreichen, trifft man ausnahmsweise auf Anhydrit, das von heißen Quellen am Meeresboden abgelagert ist. Diese Anhydrit-Ablagerungen haben aber eine völlig andere Sedimentstruktur.

Das *Sabhka*-Anhydrit hat eine sehr charakteristische Form. Es wurde aus Grundwasser ausgefällt. Die feinen Körner des Anhydrits wachsen zusammen und bilden unterirdisch kleine Klümpchen, wobei sie vorher vorhandene Karbonatsedimente ersetzen (Abb. 10c). Diese Klümpchen können bis zu 10 Zentimeter lang werden. Während dieser Austausch sich vollzieht, verschmelzen die Anhydritklümpchen miteinander und wachsen zu einer Schicht zusammen, in welcher nur noch feine Stränge der ursprünglichen Karbonate zu entdecken sind.

Diese dunklen Karbonatäderchen vor einem weißen Hintergrund von *Anhydrit* sehen aus wie ein Maschendraht, wie Bauern ihn benutzen, um ihren Hühnerhof einzuzäunen (Abb. 10d). Deshalb haben die Ölgeologen, die bei ihren Untersuchungen zuerst auf *Anhydrit* in dieser Form stießen, den simplen, aber sehr bildhaften Ausdruck »Kükendraht-*Anhydrit*« geprägt. Wir wissen nicht, warum Anhydrit in dieser speziellen Form wächst, genauso wenig wie ein Kunstexperte versteht, warum FRA ANGELICO in der Weise malte, die ihm eigen ist. Wir müssen uns auf die während der letzten Jahrzehnte von Sedimentologen wiederholt gemachte Beobachtung verlassen, daß diese Art von Anhydrit für *Sabhka*-Sedi-



mente jüngerer und älteren Datums typisch ist. Solange wir keinen Beweis für das Gegenteil finden, halten wir es daher für gerechtfertigt, »Kükendraht-Anhydrit« als typisch für eine *Sabhka* zu betrachten.

Eine andere Sedimentstruktur ist der *Stromatolith* (Abb. 10 b). *Stromatolithe* wurden lange Zeit als eine fossile Struktur oder eine anorganische Struktur, die auf chemischer Ausfällung beruhte, betrachtet, bis in den dreißiger Jahren der britische Sedimentologe Maurice BLACK über das Watt der *Bahamas* watete. Auf dem flachen Küstenvorland, das in regelmäßigen Abständen von der

Abb. 10: Evaporite des Mittelmeeres.

a) *Geschichteter Mergel.* Während des ersten Stadiums der Austrocknung wurde das Mittelmeer in eine Anzahl von Seen verwandelt, von denen einige Salzwasser und andere Brackwasser enthielten. Auf dem völlig ruhigen Boden dieser Seen lagerte sich sehr feinkörniger Schlamm ab. Die marinen Organismen starben aus, an ihre Stelle trat die in Süßwasser oder Brackwasser lebensfähige Fauna (Muschelkrebse) und Flora (Diatomeen).

b) *Stromatolithe.* Als die Seen flacher und immer flacher wurden, bildeten die küstennahen Sedimente eine konvex aufwärtsgerichtete Schichtung, wie sie in dieser Photographie zu sehen ist. Die Geologen nennen derartige Strukturen stromatolithisch. Stromatolithe (wörtlich: »flache Steine«) sind in einer für sie typischen Weise geschichtete Karbonate, deren Entstehung auf die Tatsache zurückgeht, daß blau-grüne Algen auf bestimmten Gezeitenstränden in einer Folge dünner Matten wachen. Da die Algen nur durch Photosynthese existieren können, wird eine stromatolithische Struktur als Beweis für die Ablagerung in flachem Wasser angesehen. Auf dem Boden eines tieferen Gewässers ist es zu dunkel, um diesen von der Photosynthese abhängigen Pflanzen die Existenz zu ermöglichen.

c) *Nodularer Anhydrit.* Mit der allmählichen Schrumpfung der Seen wurden die Seeböden in Seeküsten verwandelt, und in den Sedimenten der austrocknenden Seen begannen hell gefärbte Klümpchen zu erscheinen. Diese Klümpchen bestehen aus Anhydrit: Das ist eine bei hoher Temperatur gebildete Form von Kalziumsulfat, die aus Salzwasser nur bei Temperaturen von mehr als 30°C ausgefällt werden kann. Bei niedrigeren Temperaturen wird gewöhnlicher Gips ausgeschieden. Anhydrit bildet sich heute fast nur in heißen und trockenen Küstenwüsten, Sabhkas genannt, wo es in die Porenräume der Sedimente in der Nähe des Grundwasserspiegels abgegeben wird. Diese bei hoher Temperatur entstehende Ausfällung bildet typische, unregelmäßig geformte Klümpchen, ähnlich den Kalkkonkrementen, die man in ariden Böden findet.

d) *»Kükendraht-Anhydrit«.* Der fortgesetzte Austausch von Tümpelschlamm durch Anhydrit in Form von Klümpchen führt schließlich zur Bildung des Gesteins, das auf dieser Aufnahme gezeigt wird. Die kleinen Schlammstränge, die zwischen den Anhydritklümpchen zurückbleiben, haben eine entfernte Ähnlichkeit mit Kükendraht.

Flut bedeckt wurde, fand BLACK einen dichten Bewuchs von blau-grünen Algen, die zu einer dünnen Matte zusammengewachsen waren. Nach einem schweren Sturm wird die Matte von einer dünnen Lage von Sedimenten bedeckt. Die Algen jedoch wachsen weiter und bilden neue Matten. Dieser Ablauf – Mattenbildung, Abdeckung mit Sand, erneute Mattenbildung usw. – führt zur Entstehung eines geschichteten Sediments, das *Stromatolith* genannt wird (wörtlich: »flaches Gestein«). Da die Algen auf Photosynthese angewiesen sind, kann das Vorhandensein einer Algen enthaltenden *Stromatolith*struktur als unbestreitbarer

Beweis für eine Ablagerung in sehr flachem Wasser gelten. Wiederholte Beobachtungen haben tatsächlich bestätigt, daß derartige Algenmatten charakteristisch sind für Gezeitenzonen. In der Gezeitenzone von *Abu Dhabi*, also in dem Küstenvorland, das abwechselnd von der Ebbe freigelegt und von der Flut bedeckt wird, fanden wir in üppigem Wachstum begriffene Algenmatten. Wir fanden aber auch Algenmatten, die einige 1000 Jahre alt waren und jetzt unter dem vom Wind herangetriebenen Sand der *Sabhkas* an der Küste begraben lagen. Die Ausdünstung von Grundwasser führte in diesen fossilen Sedimenten der Gezeitenzone zur Ausfällung von Gips oder Anhydrit.

Bei unserer »Säule von Atlantis« aber fand sich nun eben diese Struktur eines *Stromatoliths*, der teilweise von Anhydrit in Form von Klümpchen ersetzt war. Es gab für mich kaum einen deutlicheren Hinweis darauf, daß diese Ablagerungen sich an der Küste eines austrocknenden Mittelmeeres gebildet haben mußten.

Wenn diese *Stromatolithe* tatsächlich fossile Algenmatten waren, dann mußten wir Spuren von Algenfäden in diesen »flachen Gesteinen« finden. Keiner der an Bord befindlichen Wissenschaftler war ein Spezialist für fossile Algen. Wir schickten später einige Proben an R. PARKS in Liverpool, der mehrere Jahre in *Abu Dhabi* verbracht hatte, um die Algenmatten zu untersuchen. PARKS fand in unseren Proben tatsächlich fossile Algen. Damit waren, abgesehen von den unverbesserlichen Skeptikern, alle Fachleute davon überzeugt, daß das Mittelmeer zur Zeit der Ablagerung der *Stromatolithe* ein Flachwasserbecken gewesen sein muß, dessen Inhalt mehr und mehr verdunstete.

Die »Säulen von Atlantis« waren in der Tat sehr hart. Am 28. August erbohrten wir noch einige von ihnen. Das langsame Vordringen des Bohrmeißels stellte unsere Geduld auf eine harte Probe. Nachdem wir den ganzen Tag auf der Bohrbühne auf- und abgegangen waren, begaben RYAN und ich uns in die Messe, um vor dem Schlafengehen noch eine Kleinigkeit zu essen. Aber wiederum wurde unsere Ruhe gestört: Uns wurde gemeldet, daß der Bohrer das harte Gestein durchstoßen habe. Als wir das Laboratorium betraten, hatten die Techniker der Nachtschicht den Bohrkern bereits freigelegt. Wir fanden einige besonders schön geschichtete Sedimente (Abb. 10 a). Sie waren viel weicher als das Anhydritgestein.

Unser Spezialist für Nannofossilien, Herb STRADNER, war noch auf. Er machte einen Abstrich und untersuchte das Material unter seinem Mikroskop. Nach einer halben Stunde blickte er auf. Er ist ein Mensch, der sich nicht leicht aus der Fassung bringen läßt. So erzählte er uns in seiner gewohnten lässigen Art, daß er in diesen geschichteten Sedimenten *Diatomeen* (Kieselalgen) in großen Mengen gefunden habe.

Diatomeen sind einzellige Pflanzen mit einem Kieselpanzer (SiO_2). Einige Arten leben in den Ozeanen. Viele andere Arten sind jedoch ausschließlich auf *Brackwasser* oder *Süßwasser* angewiesen. Sie leben oder lebten nur in Lagunen oder Binnenseen. STRADNER war zwar kein Spezialist, hatte aber doch eine hinreichende Kenntnis der Paläontologie, um uns sagen zu können, daß es sich bei den Kieselalgen in unseren Bohrkernen nicht um ozeanische Arten handelte. Seine vorläufige Feststellung wurde später durch die Spezialistin Marta HAJOS von der Ungarischen Akademie der Wissenschaften vollauf bestätigt, die in den Proben unseres Bohrlochs 124 sowohl Brackwasser- als auch Süßwasserarten fand.

Wie waren diese Arten in das Mittelmeer gelangt? RYAN, der meine Deutung der *Stromatolithe* immer noch ablehnte, zog sich auf die Erklärung zurück, daß eine Oberflächenlage aus Brackwasser das schwere Salzwasser überlagert haben könnte. Ich selber war jedoch davon überzeugt, daß wir unserem Puzzle ein weiteres Stück angefügt hatten: Ein ausgetrocknetes Mittelmeer könnte sich leicht in ein Binnenmeer von der Art des *Kaspischen Meeres* verwandeln, wenn es von irgendwo her plötzlich einen kräftigen Zufluß von Süßwasser erhielt.

Tatsächlich gab es damals in Osteuropa einen sehr großen Brackwassersee, der sich von Österreich bis zum *Aralsee* in Zentralasien erstreckte. Dieser konnte sehr wohl eine große Menge Brackwasser in das Mittelmeerbecken des Miozäns gebracht haben. Bald mußte auch RYAN seine Vorstellung von einer Oberschicht aus Brackwasser aufgeben, weil Marta HAJOS in unseren Proben nicht nur Diatomeenarten entdeckte, die für oberflächennahe Wasserschichten charakteristisch sind, sondern auch einige typischerweise bodenbewohnende Arten. Das Vorhandensein dieser Diatomeen bewies, daß der Boden unseres Brackwassersees der Wasseroberfläche nahe genug lag, um Photosynthese zu ermöglichen.

Jetzt waren wir fest davon überzeugt, daß das Meer um die Balearen zu der Zeit, in der diese Diatomeen gelebt hatten, wie das *Kaspische Meer* von der Wasseroberfläche bis zum Boden Brackwasser enthalten haben mußte. Letzte Gewißheit brachte uns die Entdeckung, daß es in den kieselhaltigen Sedimenten auch Muschelkrebse der Gattung *Cypreideis* gab. Keines dieser kleinen molluskenähnlichen Lebewesen hat jemals zu den Schwimmtieren gehört. Sie konnten nur am Boden eines Brackwassersees existiert haben.

Während unserer Zeit an Bord brachte uns die große Vielfalt ungewöhnlicher Gesteinsarten, die wir erbohrten, in Verwirrung: die »Säulen von Atlantis«, die *Stromatolithe*, die gleichmäßig geschichteten Sedimente mit Kieselalgen und andere. Aber wir hatten keine Zeit, das alles in eine systematische Ordnung zu bringen. Als ich 2 Jahre später meinen Bericht über den Ursprung der Evaporite abschließend redigierte, suchte ich das Lamont Laboratorium in New York auf, wo die Bohrkerne gelagert waren, und nahm eine sorgfältige Untersuchung der Bohrproben von Bohrloch 124 vor. Erst dann entdeckte ich die Spuren *wiederholter* Austrocknungsvorgänge. Bei jedem dieser Zyklen wurde das älteste Sediment entweder aus tiefem Meereswasser oder von einem großen Brackwassersee abgelagert. Die feinkörnigen Ablagerungen auf einem ruhigen oder tief liegenden Boden waren vollkommen gleichmäßig geschichtet (Abb. 10 a). Während das Becken austrocknete und der Wasserspiegel sank, wurde die Schichtung wegen der zunehmenden Wellenbewegung unregelmäßig. *Stromatolithe* entstanden dann, wenn die Ablagerung innerhalb einer Gezeitenzone erfolgte (Abb. 10 b). Die Gezeitenzone (das Watt) trocknete dann völlig aus, und von dem salzhaltigen Grundwasser unter der dabei entstehenden *Sabhka* wurde Anhydrit ausgefällt (Abb. 10 c + 10 d).

Einige Zeit später muß dann der Atlantik an der Meerenge von Gibraltar oder in ihrer Nähe wieder durchgebrochen sein, so daß das Balearenbecken erneut von Wasser bedeckt wurde. Der »Kükendraht«-Anhydrit wurde dadurch plötzlich unter dem feinen Schlamm begraben, der von der Überflutung hergetragen wurde. Dieser Zyklus wiederholte sich wahrscheinlich 8- bis 10mal während der 1½ Millionen Jahre der letzten Miozänperiode, die wir das »Messinium« nennen.

Die große Flut

Die *Glomar Challenger* ist kein sehr schnelles Schiff. Ihre höchste Reisegeschwindigkeit beträgt 12 Knoten, aber wir trieben gemächlich mit etwa 10 Knoten dahin. So brauchten wir fast drei Tage, bevor wir unsere nächste Bohrstelle erreichten. Diese Atempause konnten wir gut gebrauchen. Für jede Bohrstelle mußten Berichte geschrieben, redigiert, überarbeitet und nochmals mit der Maschine geschrieben werden. Konferenzen wurden abgehalten, um unsere Funde zu besprechen und Pläne für die Zukunft zu erörtern, denn nun hatten wir etwa die Hälfte unserer Fahrt hinter uns.

Einige unserer Mitarbeiter, wie Maria CITA, Wolf MAYNC und FORESE WEZEL hatten mehr als nur die Grundlagen der Geologie des Mittelmeers gelernt. Sie waren vertraut mit dem Auftreten von Evaporiten an mehreren Stellen des Festlands, das dieses Binnenmeer umschloß. Sie alle wußten Bescheid über die Evaporite des späten Miozäns in Spanien, in Piemont, in der Toskana, Umbrien, Kalabrien, auf Sizilien, den Ionischen Inseln, Kreta, Zypern, in Israel, in Algerien und wo sonst noch.

Wie andere unserer Kollegen hatten auch sie diese Salzgesteine als örtliche Ablagerungen von Lagunen betrachtet, die sich in einer Periode ungewöhnlich trockenen Klimas gebildet hatten. Während wir nun ostwärts fuhren und nicht mehr unter der Spannung der täglichen Bohrarbeiten standen, erkannten wir die Tragweite unserer Entdeckung: Wir hatten derartige Evaporite oder Salzgesteine in der Mitte des Mittelmeers gefunden! Ferner deutete die Tatsache, daß wir überall auf den M-Reflektor stießen, darauf hin, daß *das gesamte Mittelmeer* von dieser Formation von Salzgestein unterlagert wurde! Wir konnten die auf dem Festland vorkommenden Evaporite des späten Miozäns nicht mehr einfach als *örtliche* Ablagerungen betrachten. Vielleicht stellten sie überhaupt keine Ablagerungen örtlicher Lagunen dar, sondern waren selbst noch Teile des ausgetrockneten Mittelmeerbodens, die aus dem zurückweichenden Meer aufgestiegen waren? Sowohl Maria CITA als auch FORESE WEZEL hatten die Evaporit-Formation von Sizilien, die *solfifera sicilienne*, untersucht. Diese Formation umfaßt dicke Lagen von Steinsalz, Gips und Anhydrit. In den Evaporiten befinden sich Mergelschlüsse mit marinen

Fossilien. Vor rund einem Jahrhundert untersuchte Professor **MAYER-EYMAR** aus Zürich die Fossilien, die von einem *Solfifera*-Mergel in der Nähe der Stadt Messina auf Sizilien stammten. Er kam zu dem Schluß, daß diese Fossilien zu einer Zeit unmittelbar vor dem Ende des Miozäns lebten, und schlug für diese Epoche die Bezeichnung »Messinium« vor. Die Untersuchungen von Fossilien, insbesondere der *Foraminiferen*, in Meerwassersedimenten, die in anderen Evaporiten des mediterranen Küstengebietes eingeschlossen waren, ergaben, daß auch sie in diesem besonderen Zeitabschnitt abgelagert worden waren.

Nun kamen wir zu der Auffassung, daß die Evaporite unter dem Meeresboden die Hauptmasse dieser gigantischen Formation darstellten und in denselben Zeitabschnitt gehörten. Leider waren die Fossilien aus unseren Bohrkernen vom Bohrloch 124 von nicht sehr guter Qualität, und **Maria CITA** hatte noch keine Gelegenheit zu einer genauen Untersuchung gehabt. Sie konnte lediglich sagen, daß die Evaporite aus dem Balearengebiet aus dem späten Miozän stammten, konnte aber nicht mit Gewißheit angeben, ob sie dem Messinium zuzuordnen waren. An unserer nächsten Bohrstelle war unser wichtigstes Ziel deshalb die Bestimmung des genauen Alters dieser Evaporitschicht.

Die *Solfifera* von Sizilien ist überlagert von einem weißen ozeanischen Sediment, das *Trubi*-Mergel genannt wird. Dieser Mergel enthält eine Mikrofauna, die nur in einem tiefen Meer gelebt haben kann. Die Paläontologen waren sich ihrer Schlußfolgerungen völlig sicher: Die *Trubi*-Foraminiferen gehören entweder zu Arten, die in großen Wassertiefen schwammen, oder zu Gattungen, die den Boden kalter Gewässer bewohnten. Später sagte **Dick BENSON** vom Smithsonian Museum, der Spezialist für Muschelkrebse ist, daß die Muschelkrebse des *Trubi* ebenfalls eine typische Kaltwasserfauna bilden, ähnlich den Formen, die heute in großen Tiefen im Atlantik leben. Nun hatte ich als Herausgeber der Zeitschrift »Sedimentology« kurz vor meiner Abreise nach Lissabon ein Manuskript über die *Solfifera* überarbeitet, das von **Laurie HARDIE** und **Hans EUGSTER** von der Johns-Hopkins-Universität stammte. Diese Autoren behaupteten, daß die sizilianischen Salze auf einem Strand abgesetzt worden wären! Wenn also beide, die Sedimentologen und die Paläontologen, recht hatten, dann ergab sich die unwiderlegbare Schlußfolgerung, daß die

Salzablagerung des Messiniums in Sizilien durch eine plötzliche Überflutung beendet wurde: Als das Seewasser zurückkehrte, wurde die Salzmulde plötzlich wieder in ein tiefes Meer verwandelt.

An unserer letzten Arbeitsstelle konnten wir leider keinen Bohrkern bekommen, der den Übergang von Evaporit zu normaler Sedimentation in Meerwasser belegt. Immerhin zeigten unsere dort gewonnenen Bohrkern vom ältesten Pliozän eine auffallende Ähnlichkeit mit dem *Trubi*-Mergel von Sizilien. Sollte das ein Hinweis darauf sein, daß die Überflutung kein örtlich auf Sizilien beschränktes Ereignis gewesen war? Vielleicht wurde das gesamte Mittelmeer überflutet, als die Schleuse bei Gibraltar einbrach. Die Hinweise waren deutlich genug. Aber wir durften uns nicht zu voreiligen Schlußfolgerungen hinreißen lassen. Wir mußten eine lückenlose Beweiskette haben. Es gab also keine andere Möglichkeit, als Meter um Meter tiefer zu bohren und so viele Bodenproben wie möglich heraufzuholen.

Nach drei Tagen Fahrt legten wir schließlich die Boje aus zur Markierung der Bohrstelle 125 am Boden des Ionischen Meeres, etwa 150 Seemeilen südwestlich von Kreta. Wir wählten eine Stelle mit langsamer Sedimentation, um einen zusammenhängenden Überblick gewinnen zu können. Hier hatten sich auf dem Kamm einer unterseeischen Bergkette die Skelette von Nannofossilien und Foraminiferen in Schichten von jeweils nur 2 Zentimetern pro Jahrtausend abgelagert. Wir konnten deshalb durch die Entnahme von Bohrkernen über eine Tiefe von nur 100 Metern 5 Millionen Jahre geologischer Entwicklung übersehen. Beim Bohren hatten wir allerlei Schwierigkeiten. Dennoch erfüllten sich unsere Hoffnungen insofern, als wir die Entwicklung der Sedimentation Stück für Stück verfolgen konnten.

Was am wichtigsten war: Es gelang uns, einen Bohrkern zu gewinnen, der das Ende der Ablagerung von Evaporiten und den Beginn der Überflutung erkennen ließ. Das letzte Sediment des Miozäns war ein Karbonatschlamm, der sehr kümmerlich entwickelte Formen mariner Lebewesen enthielt. Wir halten diesen Schlamm heute für das Sediment, das sich in der Übergangszeit abgelagerte, in der das Mittelmeer sich wieder zu füllen begann. Sein Salzgehalt muß dabei zunächst über dem normalen Wert gelegen haben. Heute strömt durch Verdunstung konzentriertes Meer-

wasser an der Straße von Gibraltar in den Atlantik ab. Im Gegensatz dazu war die Straße von Gibraltar am Ausgang des Miozäns ein riesiger Wasserfall, also eine Einbahnstraße. Das konzentrierte Salzwasser konnte nicht zurückfließen und wurde unter dem heißen Himmel des Mittelmeers immer salziger, so daß nur einige Zwergformen der Mikrofauna unter diesen lebensfeindlichen Bedingungen überleben konnten. Sie waren die letzten Lebewesen im Mittelmeer des Miozäns.

Dann muß der Damm plötzlich gebrochen sein, ein tiefer Einschnitt zog sich über die ganze Länge der Meerenge. Jetzt füllte sich das Mittelmeerbecken mit großer Geschwindigkeit bis zum Rand. Der Zustrom von Wasser aus dem Atlantik und der Rückfluß des aus dem Mittelmeer stammenden angereicherten Salzwassers erfolgten von da ab so schnell, daß der Salzgehalt wieder absank. Zum ersten Mal, nach 2 Millionen Jahren war das Mittelmeer wieder zu einem bewohnbaren Dorado für marine Lebewesen geworden.

Die pliozänen Einwanderer aus dem Atlantik waren in der Mehrzahl Neuankömmlinge. Nur sehr wenige der jetzt im Mittelmeer lebenden Tiere und Pflanzen stammen von den alten Familien ab, die vor der Austrocknungskatastrophe ihren Wohnsitz östlich von Gibraltar gehabt haben. Diese wenigen, ursprünglich im Mittelmeer beheimateten »Remigranten« müssen Abkömmlinge der Flüchtlinge des Miozäns gewesen sein, die durch ihre Flucht die Austrocknung überlebt hatten. Die Nachkommen der erstmals in das Mittelmeer eingedrungenen Arten hatten jedoch niemals eine lebensgefährdende Versalzung durchzumachen. Deshalb ist es nicht erstaunlich, daß die heutigen marinen Organismen des Mittelmeers große Ähnlichkeit mit den Fossilien des *Pliozäns* haben und völlig anders beschaffen sind als die Fauna des *Miozäns*, die zum größten Teil während der Versalzung im Messinium ausstarb. Damit hatten wir endlich die Ursache der biologischen Revolution gefunden, die LYELL im Jahre 1828 entdeckt hatte.

Am Anfang war der Ozean

Bis jetzt hatten wir nur die oberste Schicht der Evaporit-Formation durchdringen können. Sie war so hart, daß wir uns nicht hindurchbohren konnten. Wir mußten daher einen anderen Weg fin-

den, um an eine Probe des unter der Evaporit-Formation liegenden Sediments heranzukommen.

Etwa 60 Seemeilen nordöstlich unserer Bohrstelle 125 wird die unterseeische Gebirgskette des Mittelmeers von einem tiefen und schmalen Tal durchschnitten. Dieser Einschnitt wurde entdeckt, als das Forschungsschiff *Conrad* des Lamont-Observatoriums seismische Aufzeichnungen machte (Abb. 11). Der Graben ist weder ein Bruch noch eine Verwerfung, denn die Schichten an seinen beiden Seiten sind nicht gegeneinander verschoben. Er ähnelt vielmehr einer Erosion. Die Messungen zeigten jedoch, daß diese Erosion nicht nur die weichen Sedimente abgetragen, sondern auch den M-Reflektor durchschnitten hatte.

RYAN hatte an der damaligen Fahrt der »Conrad« teilgenommen. Weder er noch seine Kollegen waren bereit, die Möglichkeit zuzugeben, daß der Graben durch Erosion entstanden sein konnte. Selbstverständlich wußten sie, daß durch tiefe Strömungen unterseeische Gräben gebildet werden können. Aber dieses Tal war

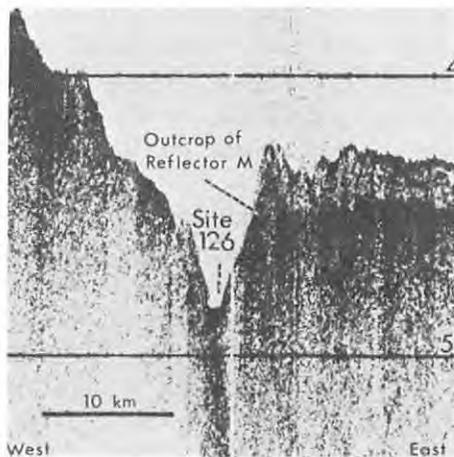


Abb. 11: Mittelmeerkamm und Hellenischer Graben im seismischen Profil. Auf dem Kamm der Gebirgskette des Mittelmeerbodens existiert ein tiefer Einschnitt. Schluchten wie diese wurden von den Salzwasserströmen eingeschnitten, die vom Atlantik hereinfließen und das ausgetrocknete Mittelmeerbecken wieder auffüllten. Das harte Evaporitgestein wurde dabei abgetragen. An der Bohrstelle 126 gelang es uns daher endlich, eine Probe der Sedimente unterhalb der Evaporitschicht an Bord zu holen. Diese Bodenprobe gab uns den ersten Hinweis darauf, daß das Mittelmeer vor etwa 10 Millionen Jahren ein Tiefsee gewesen war wie heute.

quer durch die Gebirgskette des Mittelmeerbodens eingeschnitten worden. Und welcher erodierende Prozeß hätte stark genug gewesen sein können, darüber hinaus auch noch die harte Formation des M-Reflektors zu durchtrennen?

Dieser M-Reflektor hatte uns Respekt abgenötigt. Seine Evaporit-Formation hatte allen unseren Bohrversuchen widerstanden. Über den Kamm des unterseeischen Gebirges treibende Unterwasserströme konnten niemals stark genug gewesen sein, um diese Formation zu durchschneiden. Als nun aber unsere so ausgefallen scheinende Theorie von der vorübergehenden Austrocknung des Mittelmeers mehr und mehr Gestalt annahm, sahen wir eine Antwort auch auf diesen Teil des Rätsels: Das Tal war eine Flußklamm! Es stammte aus der Zeit, in der der Spiegel des Mittelmeers sehr viel tiefer gelegen hatte als heute. Wir konnten uns nun vorstellen, daß es im späten Miozän eine Zeit gegeben hatte, in der das Ionische Becken nur bis zur Höhe des Gebirgskamms, der es von dem tiefen Hellenischen Graben im Norden trennt, mit Wasser gefüllt war. Das überflutende Meerwasser mußte dann zunächst über einen Sattel des Kammes abfließen und dabei in das harte Gestein nach und nach einen Kanal einschneiden, der schließlich an Größe der Yangtse-Schlucht in China nicht nachstand. Die Erosion nahm ein Ende, als das Mittelmeer wieder gefüllt war, und heute ist die Schlucht gut 100 Meter tief unter weichen Ablagerungen begraben.

Dieses von weichen Sedimenten überlagerte Naturphänomen bot uns den erwünschten Ausweg. Wir bezogen eine Position über dem Tal, in dem die harten Evaporite durch die Erosion abgetragen worden waren. Dort durchstießen wir die weiche Schlammdecke und förderten Proben der alten Sedimente zutage, die unter der Evaporitschicht in der Wand der Klamm lagen. An dieser Bohrstelle verbrachten wir einen ganzen Tag. Aber unsere Mühe wurde reichlich belohnt. Wir erhielten mehrere Proben von Sedimenten aus der Mitte des Miozäns, die gut 15 Millionen Jahre alt waren. Diese alten Bodenproben sind *ozeanische* Sedimente und beweisen daher, daß das Mittelmeer ein tiefes Meer gewesen ist, bevor sein Salzgehalt kritisch anstieg. Jüngere Bodenproben ließen erkennen, daß zu einer späteren Zeit nicht mehr alles in Ordnung war und daß das Mittelmeer zu einem stehenden Gewässer wurde. Alle am Boden lebenden Organismen starben dabei aus.

Aufgrund unserer Kenntnisse von der geologischen Entwicklung an Land konnten wir nunmehr die Geschichte der allmählichen Isolierung des Mittelmeers rekonstruieren: Zu Beginn unseres Erdzeitalters, des *Känozoikums*, war das Mittelmeer eine breite Wasserverbindung zwischen dem Indischen und dem Atlantischen Ozean. Der Atlantik verbreiterte sich, und Afrika rückte nach Osten, bis es vor etwa 20 Millionen Jahren mit Asien zusammenstieß. Damit war die Verbindung zwischen dem Mittelmeer und dem Indischen Ozean abgeschnitten. Die tropische oder subtropische Meeresfauna und -flora des Indisch-Pazifischen Ozeans konnte nicht mehr in das Mittelmeer gelangen. Stattdessen wurden von den Oberflächenströmungen Lebensformen der gemäßigten Zone des Atlantik in das Mittelmeer gespült. Später, vor etwa 12 Millionen Jahren, verengte sich auch der westliche Ausgang. Die hohe Schwelle an der alten Straße von Gibraltar verhinderte das Eindringen von kalten Tiefseeströmungen. Die Wasserzirkulation am Boden wurde im Mittelmeer unmöglich, so daß die am Meeresboden lebenden Tiere ausstarben. Noch später, vor gut 7 Millionen Jahren, trat schließlich die vollständige Isolierung ein u. a. mit der Folge, daß die Ablagerung von Evaporiten begann.

Kann die Geschichte sich wiederholen?

Kurz nachdem wir unsere letzte Bohrstelle im östlichen Mittelmeer verlassen hatten, gerieten wir in einen Sturm. Drei Tage lang stampfte und rollte das Schiff. Glücklicherweise klärte der Himmel sich gerade auf, als wir uns der Straße von Messina näherten. Der Kapitän sah mit einigen Sorgen der schwierigen Aufgabe entgegen, sein Schiff mit dem hohen Bohrturm unter der Hochspannungsleitung, welche die Meerenge überspannt, hindurchzumanövrieren. Wir hatten einen Lotsen an Bord, der uns durch eine Fahrrinne dicht unter der Küste von Kalabrien führte. Wir hatten den Eindruck, daß wir so dicht unter Land wären, daß wir den Fußgängern auf der Küstenstraße die Hand reichen könnten. Bei dieser Gelegenheit erinnerten wir uns der Sage von ODYSSEUS und an sein Abenteuer mit *Scylla* und *Charibdis*. Aber der Olivenbaum, der damals sein Leben gerettet hatte, war schon lange gefällt worden, um dem Verkehr auf der Küstenstraße Platz zu machen.

Am Abend des 23. setzten wir unseren Sonaranker an der Bohrstelle 132, etwas südöstlich von Korsika. Unser wertvollster Fund an diesem Punkt war ein kurzer Bohrkern, der uns erregende Einzelheiten von der Überflutung des Mittelmeerbodens erzählte: Die von diesem Bohrkern gelieferten sedimentologischen und paläontologischen Indizien wiesen eindeutig darauf hin, daß der Boden des Tyrrhenischen Meeres am Ende des Messiniums *nicht* versunken ist, sondern daß er überschwemmt, ertränkt wurde*: Wir fanden *Sabhka*-Sedimente wie in der Balearen-Tiefe, in denen allerdings der »Kükendraht«-Anhydrit in Gips verwandelt worden war durch süßes oder brackiges Grundwasser, das bis zu diesem Teil der Messinawüste vorgedrungen war. Wir fanden den dunklen Mergel, der während des Übergangsstadiums bei der Auffüllung des Mittelmeers sich abgesetzt hatte. In dem schwarzen Schlamm fanden wir die letzten verkümmerten Lebensformen des Messiniums.

Wir konnten unseren Finger auf die scharf abgegrenzte Oberfläche legen, die den Augenblick markiert, an welchem der Damm bei Gibraltar brach, an welchem sich das Wasser aus dem Atlantik in das Mittelmeer ergoß, an welchem die Ära des Pliozäns begann. Während der ersten 1000 Jahre der neuen Epoche gab es hier ausschließlich Lebewesen, die schwimmen oder sich treiben lassen konnten. Erst viel später gelang es den nur langsam sich bewegendem Bewohnern des Meeresbodens, ebenfalls durch die Meerenge zu kriechen. Unser an der Küste stationierter Kollege BENSON fand Tiefsee-Muschelkrebse, BANDY Tiefseearten von Foraminiferen in den Sedimenten direkt oberhalb der scharf abgegrenzten Oberfläche, welche den Beginn des Pliozäns in den Bohrkernen markiert.

Untersuchungen der Mikrofauna aus den Bohrkernen gestatteten uns einen Einblick in die sich verändernde Ökologie des Mittelmeers. Offensichtlich war in der Meerenge von Gibraltar während des Pliozäns allmählich eine Schwelle aufgebaut worden, so daß

* Der Autor spielt hier auf den wichtigsten Einwand der Kritiker seiner Theorie an, die ihm entgegengehalten haben, daß die mediterranen Evaporite zu einer Zeit entstanden, als das Mittelmeer noch ein Flachwasserbecken gewesen sei, dessen Boden erst viel später auf die heutige Tiefe abgesunken sei. Insbesondere deutsche Geologen haben wiederholt darauf hingewiesen, daß speziell die Absenkung des Tyrrhenischen Mittelmeerbodens durch zahlreiche geologische Hinweise wahrscheinlich gemacht werde (Anm. d. Red.).

die tiefen und kalten Wasserströmungen des Atlantik schließlich nicht mehr in das Mittelmeer gelangen konnten. Die bodennahen Wasserschichten dieses Binnenmeeres wurden daher allmählich erwärmt, so daß die auf kaltes Wasser angewiesenen Arten der Bodenbewohner ausstarben. Die letzten Tiefsee-Muschelkrebse verschwanden vor gut 2 Millionen Jahren.

Seit jener Zeit erfolgt die Ventilation des Mittelmeerbodens allein durch das Absinken von oberflächennahen Wasserschichten, die durch die winterliche Luft im Balearengebiet und im Adriatischen Meer abgekühlt werden. Während des Pleistozäns spitzte sich die Situation so katastrophal zu, daß der gesamte östliche Teil des Mittelmeers zu einem flachen, stehenden Gewässer wurde, in welchem sich nur noch übelriechender schwarzer Schmutz, von den Geologen *Sapropel* oder Faulschlamm genannt, auf dem sterilen Meeresboden des Mittelmeeres ablagerte.

Wenn wir uns hier daran erinnern, daß auch der Austrocknung des Mittelmeers im Miozän eine Zeit der Stagnation vorausgegangen war, dann kann man sich fragen, ob die Geschichte sich vielleicht wiederholen wird. Die Schwelle von Gibraltar hebt sich unverkennbar, und das Wasser wird dort jedes Jahr flacher. Noch werden die stark salzhaltigen Wasserströmungen durch einen Rückfluß in den Atlantik entleert, aber es wird ständig schwerer, das Defizit im Wasserbudget des Mittelmeeres aufzufüllen. Die Tage der schönen blauen See sind gezählt. Man könnte sich vorstellen, daß in einer nicht allzu fernen Zukunft, etwa in 2 oder 3 Millionen Jahren, die Meerenge von Gibraltar wieder in einen Isthmus verwandelt wird. Dann würden die Wasserfälle von Gibraltar neu entstehen. Schiffe würden zur Überquerung der neuen Mittelmeerwüste durch Kamelkarawanen ersetzt werden. Riesige Wasserkraftwerke würden an dem Salzwasserfall errichtet werden, um die wachsende Energiekrise zu mildern. Bohrtürme würden wie Bambusschößlinge nach einem Frühlingsregen überall aufschießen, um die Ölfelder unter dem abermals ausgetrockneten Boden der Verdunstungsebene auszubeuten, deren Mineralölreserven noch größer sind als die größten Vorkommen im Mittleren Osten. Nur die *Riviera* und die *Costa Blanca* würden einen Niedergang erleiden und verlassen sein, abgesehen von einigen Ölfeldarbeitern, die in diesen Außenbezirken der Wüste Ruhe und Erholung suchen.

Die farbige Wüste

Von der uns gewährten Schiffszeit blieben uns noch zwei Wochen. Als nächste Bohrstelle (133) wählten wir einen Punkt westlich von Sardinien, wo wir die dünne Evaporit-Formation zu durchbohren hofften, um dem Gestein des Unterbaus einige Proben zu entnehmen.

Schon unser zweiter Bohrkern brachte eine Überraschung. Wir hatten den M-Reflektor angebohrt und mit Anhydrit oder Gips oder Dolomit oder einem anderen Verdunstungsgestein gerechnet. Als die Plastikhülle um den Bohrkern aufgeschnitten wurde, fanden wir aber keines dieser Mineralien, sondern einige gleichmäßig abgerundete Schottersteine zwischen massiven roten und grünen *Silten*. Wie waren die hierhergekommen?

Wir bohrten tiefer und förderten einen weiteren Bohrkern. Noch mehr rote Schichten. Wir bohrten noch tiefer und holten einen weiteren Bohrkern an Bord. Noch mehr Kiesel zwischen grünen und roten Silten. Keines dieser Sedimente enthielt Fossilien irgendeiner Art, keine Foraminiferen, kein Nanno-Plankton, keine Diatomeen, keine Muschelkrebse, keine Muscheln oder Schnecken. Schließlich ging uns auf, daß wir ein altes, ausgetrocknetes Flußbett in einer ehemaligen Wüste angebohrt hatten!

Während der vorangegangenen dreitägigen Fahrt in Richtung Osten hatten wir unsere Idee von dem ausgetrockneten Tiefseebecken diskutiert. RYAN hatte dabei den *Advocatus diaboli* gespielt und versucht, Argumente gegen unsere neue Theorie vorzubringen. So hatte er darauf hingewiesen, daß Flüsse, die sich in das ausgetrocknete Mittelmeerbecken ergossen hätten, große Mengen an Sand und Kies hätten mitführen müssen. Daß wir Ablagerungen dieser Art nicht gefunden hatten, hatte ich damit zu erklären versucht, daß unsere Bohrstellen zu weit von der Küste entfernt gewesen wären. Zwar könnten Sturzfluten an der Mündung eines Canyons einen Schuttfächer aufbauen. Aber man könne von gewöhnlichen Flüssen nicht erwarten, daß sie Sand und Kieselsteine bis zur Mitte einer Verdunstungsebene trügen.

Dieses Argument hatte zwar eingeleuchtet, aber wir durften uns mit unserer neuen Theorie nicht zufriedengeben, bevor wir Spuren derartiger Gerölle gefunden hatten. Jetzt waren wir durch Zufall prompt auf die richtige Bohrstelle gestoßen. Wir lagen 80

Seemeilen westlich von Sardinien, am Fuß des Kontinentalabfalls. Dieser Kontinentalabfall war, als das Seewasser durch Verdunstung aus dem Balearenbecken entwich, eine Bergfront gewesen. Am Fuß dieser Steilwand bauten die – nur nach starken Regenfällen vorübergehend Wasser führenden – Flüsse der Messinawüste ihre Schuttfächer auf. Ich rief mir das Manuskript von HARDIE und EUGSTER in Erinnerung, in dem die Bachbettkiesel und roten Schichten beschrieben waren, welche das sizilianische Salzbecken einfaßten. Hier hatten wir dieselbe Art von Kieseln und dieselbe Art von roten Schichten vor uns.

Dann begann RYAN sich der Kiesel zu erinnern, die BOURCART einige Jahre zuvor aus unterseeischen Mittelmeer-Canyons an die Oberfläche geholt hatte. Während der Jahrzehnte nach dem Zweiten Weltkrieg hatten die Franzosen sich intensiv mit der Erforschung der Unterwassertopographie des westlichen Mittelmeeres befaßt. BOURCART und seine Mitarbeiter hatten viele unterseeische Canyons gefunden. Die Canyons des Mittelmeerbodens schienen anders zu sein als die an den Festlandsrändern des Atlantischen und des Pazifischen Ozeans. Die von BOURCART entdeckten Canyons machten den Eindruck überfluteter Flußtäler, während die Canyons an der atlantischen und der pazifischen Küste von unterseeischen Strömungen eingeschnitten worden sind. Außerdem waren viele der Canyons vor der *Côte d'Azur* anders als die atlantischen und pazifischen Canyons nicht durch Erosion in jüngerer Vergangenheit oder während des Pleistozäns entstanden. Sie waren vielmehr während des letzten Abschnitts des Miozäns eingeschnitten worden. Diese Canyons waren teilweise mit Flußkieseln aus dem späten Miozän angefüllt, die ihrerseits von dem Ozeanschlamm des Pliozäns zugedeckt waren. Die Ausgangspunkte vieler dieser Canyons konnten ferner mit den Mündungen heutiger Flüsse in Südfrankreich, auf Korsika und Sardinien, in Nordafrika und in Spanien in Verbindung gebracht werden. In vielen Fällen lag ihr Boden etwa auf demselben Niveau wie der der Balearentiefe.

Die Entstehung dieser Canyons und die Herkunft der Kieselsteine waren ein Rätsel geblieben. BOURCART war davon überzeugt gewesen, daß die Canyons von Flußläufen, die im späten Miozän vom Land kamen, eingeschnitten worden sein mußten. Da er aber keinen Anlaß hatte, an die Möglichkeit einer früheren

Austrocknung des Mittelmeers zu denken, behalf er sich mit der weniger provozierenden Hypothese, daß die kontinentalen Ränder Europas und Afrikas sich gesenkt und dabei die Küstenflüsse des Miozäns unter den heutigen Meeresspiegel »mitgenommen« haben könnten.

Ich habe den Verdacht, daß meine französischen Kollegen noch sehr stark unter dem Einfluß dieser von ihrem verstorbenen Lehrer entwickelten Hypothese der »perikontinentalen Flexur« standen, als sie die These einer Absenkung des Mittelmeeres nach dem Miozän aufstellten. Aber die Hypothese von BOURCART war niemals wörtlich befriedigend. Im Küstenbereich können Flüsse keine tiefen Canyons eingraben. Außerdem lassen sie das mitgeführte Schuttgestein in den Bergen zurück. Die Kieselsteine des späten Miozäns, die wir in den unterseeischen Canyons des Mittelmeeres fanden, können nur von *Berg*flüssen abgelagert worden sein, nicht von Flußläufen, die sich träge durch flache Küstenebenen schlängeln.

Als wir jetzt im Laboratorium saßen und die roten und grünen Sedimente der einstigen Wüste bestaunten, hatten wir eine bessere Erklärung für die Funde von BOURCART in der Hand. Unsere Annahme, daß der Mittelmeerboden im späten Miozän trocken lag, führte zu einer neuen Lösung. Wir konnten uns am Boden des heutigen Kontinentalabfalls eine mit farbigen Geröllen gesprenkelte Wüste vorstellen, die sich über die weite Fläche erstreckte, die heute den Boden der Balearentiefe bildet (Abb. 12). Der Wüstenboden lag 2000 bis 3000 Meter tiefer als die Oberfläche des Atlantik auf der anderen Seite von Gibraltar. Die Flüsse der an das Mittelmeer anrainenden Länder ergossen sich jetzt nicht mehr auf dem Niveau des Meeresspiegels in diese Binnensee. Sie nahmen vielmehr einen steilen Lauf an den jetzt bloßgelegten Hängen des Kontinentalsockels hinab. Ehemalige Küstenebenen lagen nun hoch und trocken am Rande der Hochplateaus, die das ausgetrocknete Balearenmeer umgaben.

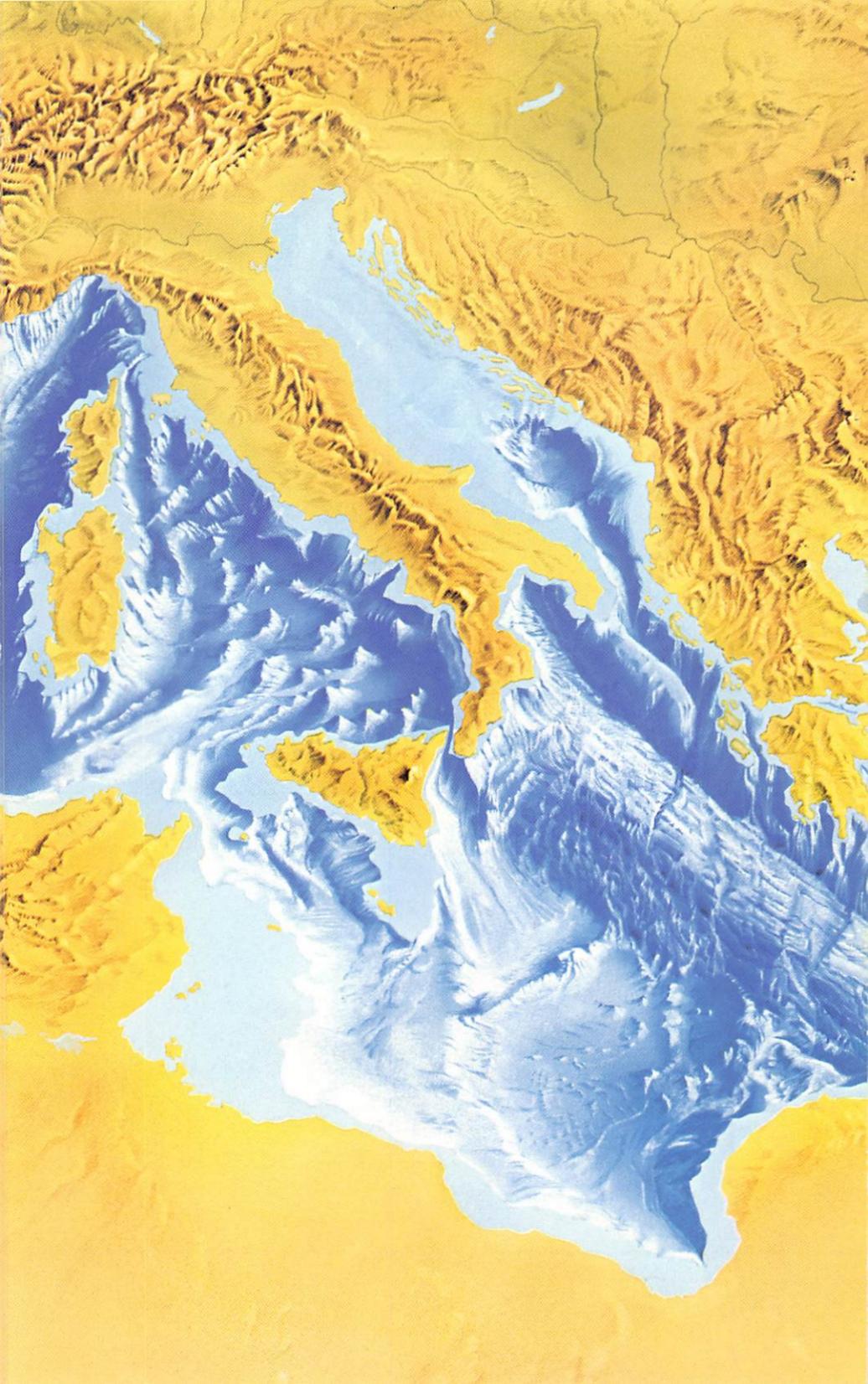
Die Flußläufe gruben sich mit neu gewonnener Kraft tief in die Kanten dieser Hochebenen ein und schnitten auf ihrem Weg nach unten in die ausgetrocknete Tiefebene große Canyons in die Steilhänge. Dabei wurden Kieselsteine in die Canyons geworfen und verschiedenartige Sände am Fuß des Steilhangs aufgetürmt. Diese Hypothese erklärte nicht nur das Auftreten roter Sände an

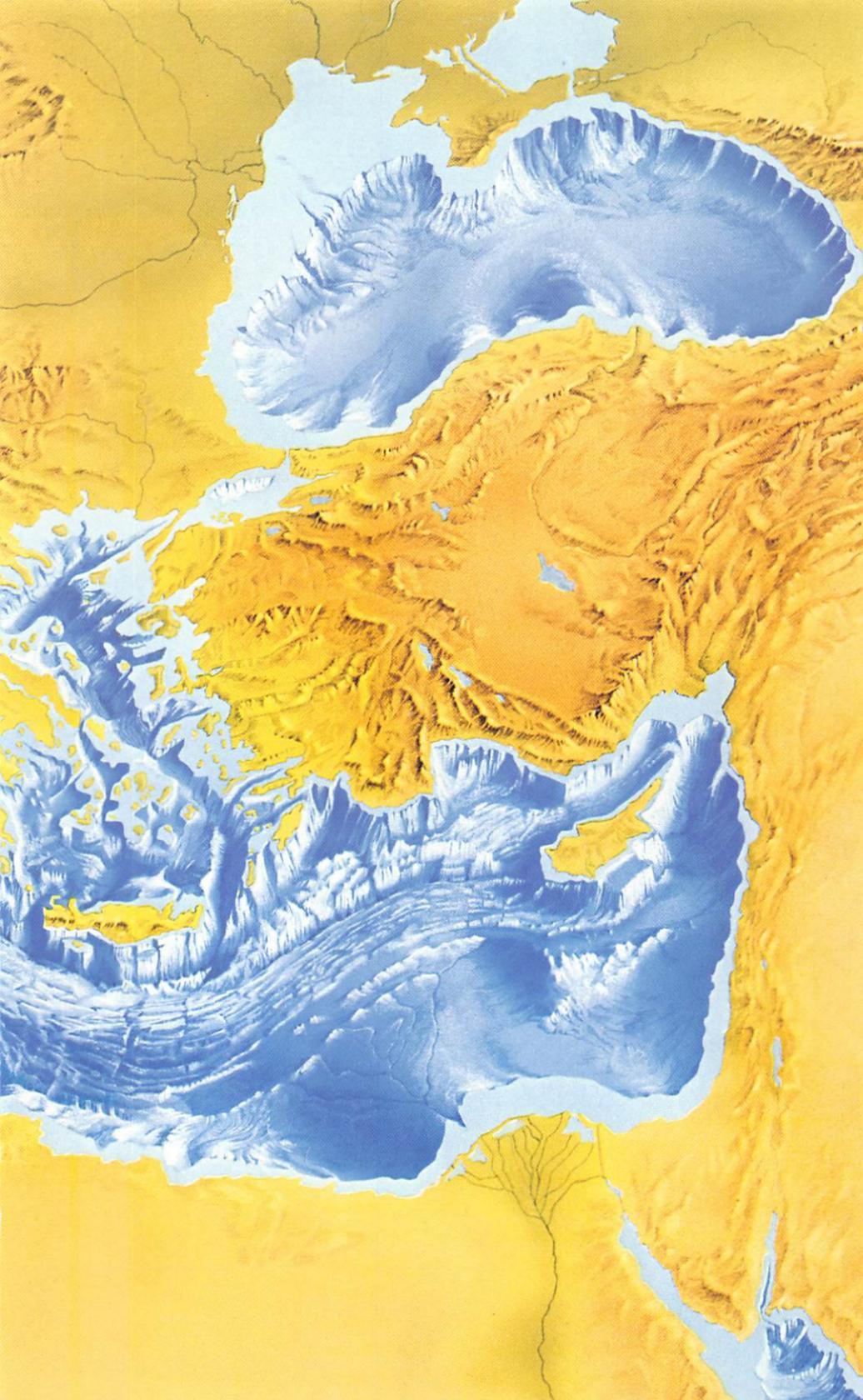


Abb. 12: Reliefkarte des Mittelmeerbodens. Das Becken mit dem flachen Boden zwischen Sardinien und Spanien ist das Balearenbecken. Die lange von Osten nach Westen verlaufende Bergkette südlich von Griechenland ist ein unterseeisches Gebirge, von den Ozeanologen Mediterranean Ridge genannt. Umriss und Relief des ausgetrockneten Mittelmeerbeckens vor 6 Millionen Jahren dürften dieser Topographie des heutigen Mittelmeeres weitgehend geähnelt haben. Wenn es damals Astronauten gegeben hätte, dann würde sich ihnen bei ihrer Rückkehr auf die Erde etwa dieser Anblick geboten haben (Graphik von J. KÜHN).



Abb. 12: Reliefkarte des Mittelmeerbodens. Das Becken mit dem flachen Boden zwischen Sardinien und Spanien ist das Balearenbecken. Die lange von Osten nach Westen verlaufende Bergkette südlich von Griechenland ist ein unterseeisches Gebirge, von den Ozeanologen Mediterranean Ridge genannt. Umriss und Relief des ausgetrockneten Mittelmeerbeckens vor 6 Millionen Jahren dürften dieser Topographie des heutigen Mittelmeeres weitgehend geähnelt haben. Wenn es damals Astronauten gegeben hätte, dann würde sich ihnen bei ihrer Rückkehr auf die Erde etwa dieser Anblick geboten haben (Graphik von J. KÜHN).





unserem Bohrloch 133, sondern lieferte zugleich eine einleuchtende Antwort auf die von BOURCART unbeantwortet gelassene Frage nach dem Ursprung der Canyons und des Kieselgerölls. Außerdem war damit endlich eine Antwort auf die so lange Zeit offen gebliebene Frage der Entstehung des tief eingeschnittenen Grabens unter der Rhône gefunden.

Während wir uns unserer Entdeckung freuten, hatte unser technischer Leiter auf der Bohrbühne mit einer eben daraus entstandenen Schwierigkeit zu kämpfen. Die roten und grünen Sande waren sehr locker, und unser Bohrloch war nicht verschalt. Das lose Geröll fiel leicht in das Bohrloch hinein, und die Leistung unserer Pumpen war nicht groß genug, um die Sande auszuwaschen. Die unvermeidliche Panne trat schließlich ein, als wir unseren Bohrkern Nummer 7 herausschnitten. Wir mußten die Pumpen vorübergehend abschalten, die Wände des Bohrlochs stürzten ein, und unser Bohrrohr saß wieder einmal fest. Es war die alte Geschichte. Wir mußten abbrechen. Abermals gaben wir ein Bohrloch auf, bevor wir den Unterbau unter den Evaporiten erreicht hatten. Wir mußten es an einer anderen Stelle von neuem versuchen. Damals ahnten wir natürlich nicht, daß unser Pech dazu führen sollte, daß wir beim nächsten Mal blindlings ein »Ochsenaugen« treffen würden.

»Ochsenaugen« war der Ausdruck, den Robert SCHMALZ benutzt hatte, um die Verteilung von Evaporitgesteinen auf einer Verdunstungsebene zu beschreiben. Er hatte zwei unterschiedliche Muster entdeckt, die typisch waren für zwei verschiedene Arten der Entstehung derartiger Ablagerungen. Wenn Evaporite sich in einem tief gelegenen Salzwassertümpel absetzen, der noch eine gewisse Verbindung mit dem offenen Meer hat, dann muß die Verteilung der Evaporite auf einer Karte ein Tropfenmuster bilden (Abb. 13 a). Die am leichtesten löslichen Salze, die als letzte Fraktion ausfallen, konzentrieren sich an den am weitesten von der Verbindung zum offenen Meer entfernten Stellen. Wenn jedoch Evaporite Rückstände eines völlig isolierten Beckens sind, dann müssen die ersten Salze, die sich am Rand ablagern, *Karbonate* sein, Kalkstein oder Dolomit. Mit weiterem Absinken des Wasserspiegels und wachsender Konzentration der Salzlauge würde sich ein Ring von *Sulfatablagerungen* bilden. Schließlich würde man in der Mitte oder an den am tiefsten gelegenen Stellen

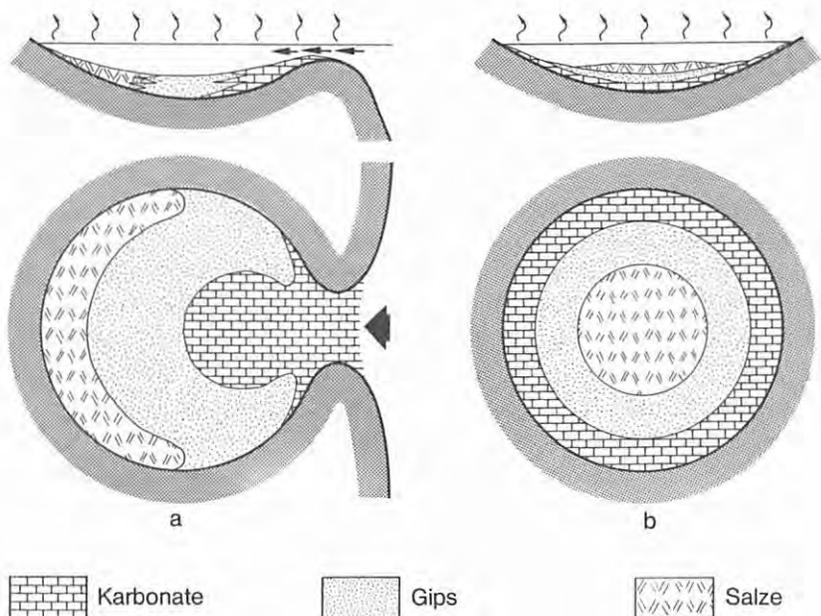


Abb. 13: Schema der Ausfällungsverteilung unter verschiedenen Bedingungen (oben jeweils im Querschnitt, unten in Aufsicht).

a) »Tropfmuster«. Evaporite in einem nur partiell abgeschlossenen Becken müßten in der in diesem Schema gezeigten Anordnung ausfallen. Halite oder Steinsalze müßten als die am leichtesten löslichen Salze an den hinteren Rändern des Beckens abgelagert sein, wo die Salzkonzentration am höchsten sein würde.

b) »Ochsenauge«. In einem gänzlich abgeschlossenen Becken abgelagerte Evaporite müßten die konzentrische Anordnung zeigen, die in diesem Schema dargestellt ist. Die am leichtesten löslichen Verbindungen müßten im Zentrum der Mulde abgelagert sein, wo sich die letzten Reste der stark konzentrierten Salzlake sammeln.

einer Salzpfanne die letzte Fraktion finden, *Halit* und andere leichter lösliche Salze. Die auf diese Weise entstehende sehr charakteristische Verteilung erhielt von SCHMALZ den anschaulichen Namen »Ochsenauge« (Abb. 13 b).

Es gab keinerlei Anzeichen dafür, daß die Evaporite im Mittelmeer in einem Tropfenmuster verteilt waren. Unsere bisher mit den Bohrungen erzielten Ergebnissen ließen uns eher an die Möglichkeit eines »Ochsenauges« denken: Den Ring von Sulfatablagerungen hatten wir bei unseren Bohrungen an Beckenrändern gefunden, die etwas über dem Niveau der Tiefsee-Ebenen

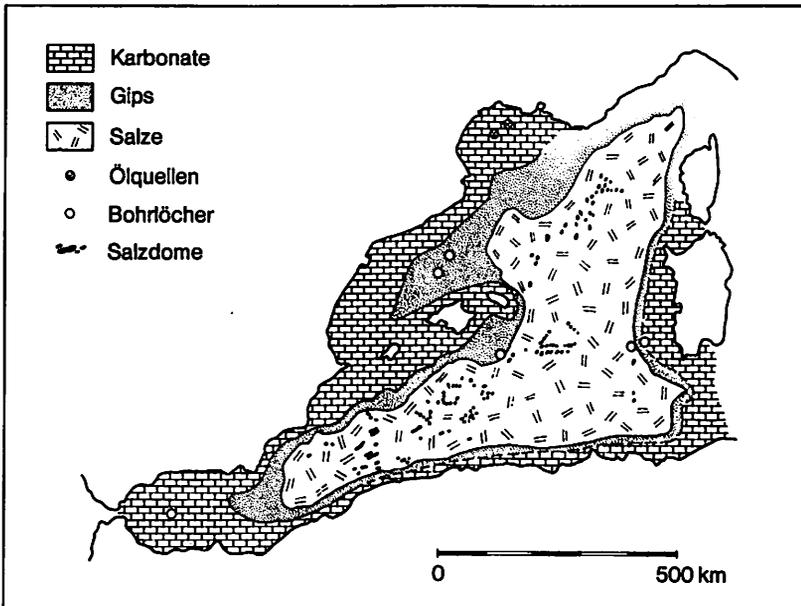


Abb. 14: Tatsächliche Verteilung der mediterranen Evaporite. Die aus unseren Bohrproben abgeleitete Verteilung der Evaporite im Balearen-Becken und im Alboran-Becken entspricht der These von der vollständigen Austrocknung. Die verdunstete Salzlake ließ zunächst einen »Ring« von Karbonaten (Dolomit) zurück und dann einen Ring von Sulfaten (Anhydrit und Gips). Das am leichtesten lösliche Steinsalz wurde im Zentrum der Mulde ausgeschieden.

lagen. Unsere seismischen Aufzeichnungen hatten dafür gesprochen, daß es darunter in den zentralen abysalen Ebenen Steinsalz geben müsse. Denn inzwischen waren wir ziemlich sicher, daß es sich bei den schon erwähnten domartigen Strukturen tatsächlich um Salzdomme handelte (Abb. 14). Zum Beweis brauchten wir nur noch einen Bohrkern mit Salz.

Das aber war gar nicht so einfach zu bewerkstelligen. Die Schwierigkeit lag darin, daß wir einen Salzdom, wo wir Salz erwarten konnten, keineswegs etwa ohne weiteres anbohren durften. Hier war die Gefahr viel zu groß, daß wir auf Öl stießen, was das gänzlich unkalkulierbare Risiko eines Gasausbruchs mit all seinen unvorhersehbaren Folgen für unser Schiff heraufbeschworen hätte. Wo wir aber ungehindert von diesen Risiken bohren konnten, da konnten wir nicht erwarten, bis zum Salz durchzudringen. Zu un-

serer weiteren Entmutigung schwor unser technischer Leiter, daß wir, selbst wenn wir eine Salzlage anbohren könnten, mit unserer primitiven Ausrüstung niemals einen Salzkern an die Wasseroberfläche würden hieven können. Nach seiner Meinung würde das Salz längst verschwunden sein, bevor wir den Bohrkern an Bord hätten, da es durch das Seewasser, das wir als Bohrflüssigkeit in das Bohrloch hinabpumpten, aufgelöst werden würde. In dieser letzten Phase fühlten wir uns daher ausgesprochen frustriert. Wir waren eigentlich sicher, daß wir unter uns ein Ochsenauge hätten, einen weiteren Beweis dafür, daß das Mittelmeer einmal eine Wüste gewesen war. Wir waren dementsprechend sehr darauf erpicht, ein Ochsenauge zu treffen, um eine Probe Steinsalz zu bekommen. Aber wir mußten uns eingestehen, daß wir nicht recht wußten, wie wir vorgehen sollten, um uns diesen Wunsch zu erfüllen.

Nachdem wir unser Bohrloch 133 aus den geschilderten Gründen hatten aufgeben müssen, bestimmte RYAN die Stelle für unseren nächsten Versuch. Die Koordinaten wurden dem Kapitän mitgeteilt. Ich schrieb einen neuen Aushang, um unseren Schiffsgenossen die Lage mitzuteilen. Sie waren verärgert bei dem Gedanken, daß wir uns schon wieder auf die Reise machen mußten, aber zu müde, um ernstlich zu protestieren. Es war nur eine kurze Fahrt, und wir erreichten die Bohrstelle 134 um 17.05 Uhr am Nachmittag des 29. September.

Nach eintägiger Bohrarbeit zogen wir unseren fünften Bohrkern an Bord. Im Kernrohr fanden wir nur etwas Schlamm. CITA erklärte uns, daß wir immer noch im Pliozän bohrten, weit oberhalb der obersten Lage der Evaporitschichten. Den ganzen Vormittag drangen wir vorsichtig weiter vor. Wir hatten nicht mehr genug Zeit, um Kern für Kern zu inspizieren. Andererseits wagten wir nicht, zu schnell vorzugehen, damit wir nicht den Übergang vom Pliozän zum Miozän verpaßten.

Da ich einigen Schlaf nachzuholen hatte, überließ ich RYAN die Wache. Aber ich war noch zu aufgedreht, um ins Bett zu gehen. Die alten Paperbacks in den Bücherregalen unseres Aufenthaltsraums hatte ich alle gelesen. Deshalb ging ich in unseren Arbeitsraum, um zur Entspannung Berichte über frühere Forschungsfahrten zu lesen.

Nach zwei Stunden war ich endgültig bettreif. Es war etwa die

Zeit, zu der wir wieder einen Bohrkern an Bord ziehen konnten. Deshalb dachte ich, ich könnte ebenso gut zur Bohrbühne hinunterschauen. Als ich den Arbeitsraum verließ, stieß ich in der Gangway mit RYAN zusammen. Er hielt einen glänzenden »Eiszapfen« in der Hand und war sehr aufgeregt: Wir waren auf Steinsalz gestoßen!

Es kam für uns alle völlig überraschend. RYAN ging mir voran ins Laboratorium. Der Raum war voll von Menschen: Wissenschaftler, Techniker, Bohrlocharbeiter, seemännisches Personal und sogar der Koch. Alle wollten den Salzkern bewundern. Wie unser technischer Leiter vorausgesagt hatte, war er übrigens tatsächlich durch das zirkulierende Seewasser teilweise aufgelöst worden. Aber wir hatten ihn immerhin an Bord gebracht (Abb. 15).

Es war das erste Mal, daß jemals Steinsalz vom Meeresboden an die Oberfläche geholt worden war. Wir hatten das Ochsenauge in der Balearensee über 3000 Meter unter dem Meeresspiegel getroffen!

Ergebnisse einer Forschungsreise

Am 6. Oktober 1970 um 8 Uhr legte die *Glomar Challenger* wieder in Lissabon an. Am Kai wurden wir von Mel PETERSON, dem wissenschaftlichen Leiter des Bohrprogramms, und seinen Mitarbeitern begrüßt. Wir wurden wie Helden empfangen, die vom Schlachtfeld zurückkehren. Dann wurden wir nach Paris gebracht. Scripps* hatte für die Publizität gesorgt und über das französische Nationalinstitut für Ozeanographie eine Pressekonferenz veranstaltet. Vor der Presse in Paris erzählten wir unsere Geschichte einer Wüste, die 3000 Meter unter dem Meeresspiegel lag. Dann machten wir uns an die mühsame Arbeit, unseren »vorläufigen« Reisebericht zu schreiben.

Wir stellten uns das Mittelmeer vor 20 Millionen Jahren als breites Meer vor, Verbindungsglied zwischen dem Indischen und dem Atlantischen Ozean. Mit dem Zusammenprall des afrikanischen und des asiatischen Kontinents und dem Aufbau von Bergen im Mittleren Osten wurde die Verbindung mit dem Indischen Ozean

* Scripps Institution of Oceanography, La Jolla (Kalifornien), die wissenschaftliche Zentrale des Forschungsprojekts.

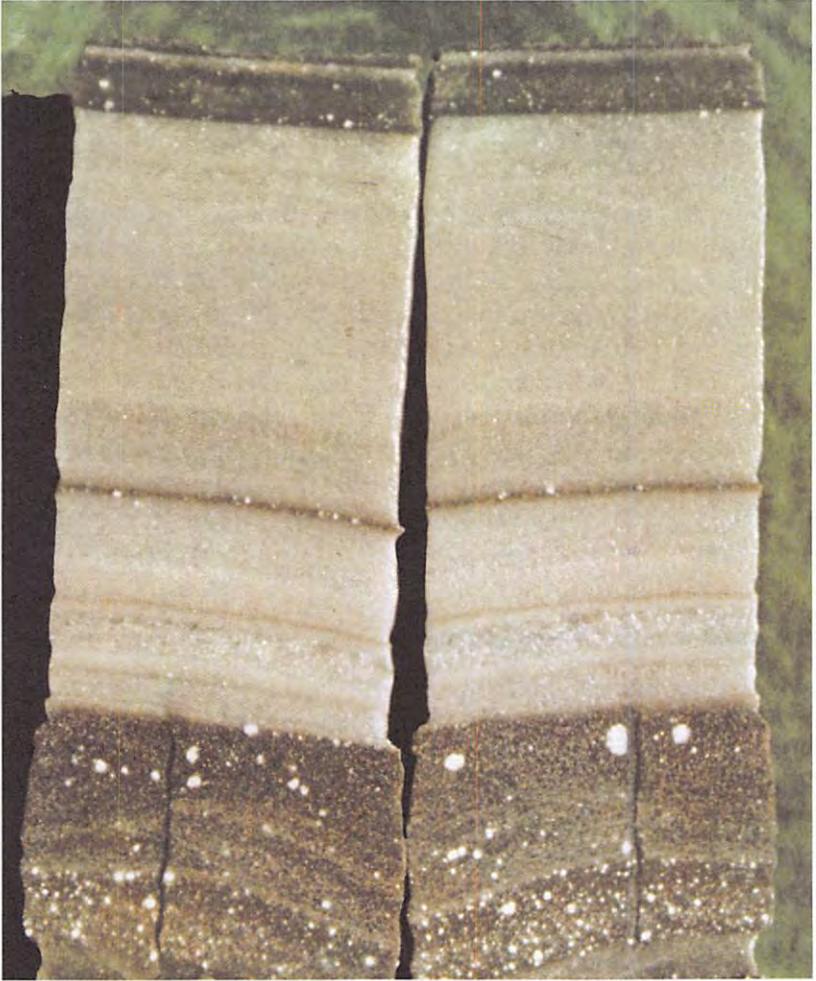


Abb. 15: Steinsalz aus dem Tiefseeboden. Dieser Tiefsee-Bohrkern – der erste seiner Art, der bisher zutage gefördert wurde – stammt vom Grund eines Bohrlochs, das die Glomar Challenger durch eine gut 300 m dicke Schicht weichen Schlammes unter dem Boden des Balearentiefs, etwa 130 km westlich von Sardinien, niedergebracht hat. Der Meeresboden lag hier etwa 3000 m unter der Wasseroberfläche. Der senkrechte Riß im unteren Teil des Bohrkerens ist nach unserer Meinung ein bei der miozänen Austrocknung entstandener Riß und wäre damit ein weiterer Beweis dafür, daß das Mittelmeerbecken bis zu einer Tiefe von 3000 m trocken gewesen ist.

unterbrochen. Inzwischen näherte Afrika sich gleichzeitig dem europäischen Kontinent, und die Verbindung zum Atlantik wurde nur durch zwei schmale Meerengen aufrecht erhalten, im Betischen Bergland in Südspanien und im Rif in Nordafrika. Den Beweis dafür sahen wir in unseren Bohrkernen: allmähliche Verschlechterung der Lebensbedingungen im Mittelmeer, zunehmende Stagnation seines Wassers, das unvermeidbare Aussterben der Bewohner des Meeresbodens, der Kampf um das Überleben, den die schwimmenden Organismen des Mittelmeeres führten, und die Entwicklung einer überaus widerstandsfähigen Rasse, die den drastischen Anstieg des Salzgehalts überleben konnte. Wir sahen die Verwandlung eines Binnenmeeres in eine Anzahl großer Salzseen, wir sahen deren Austrocknung und die vollständige Ausrottung der Fauna und Flora am Boden des miozänen »Death Valley«, über 3000 Meter unter dem Meeresspiegel.

Wir stellten uns das ausgetrocknete Mittelmeer als eine riesige Wanne vor, die nur durch den Isthmus von Gibraltar gegen das Eindringen von Wasser aus dem Atlantik geschützt wurde. Wir sahen, wie der Damm brach, der Isthmus sich in eine Meerenge verwandelte und Seewasser in einem gigantischen Wasserfall durch diesen Zugang donnerte. Über die Wasserfälle von Gibraltar, die 100mal größer gewesen sein müssen als die Victoriafälle und 1000mal größer als die Niagarafälle, ergossen sich jährlich 44 000 Kubikkilometer Atlantikwasser in das Mittelmeerbecken. Selbst mit diesem gigantischen Zufluß dauerte es über 100 Jahre, bis die leere Wanne wieder gefüllt war. Was für ein Anblick muß das für den afrikanischen Affenmenschen gewesen sein, falls es in der Gegend welche gab, die von dem Getöse angelockt wurden! Wir fanden Beweise dafür, daß nach der Überflutung eine neue Dynastie in der Fauna heranwuchs. Anfangs war der Einschnitt an der Meerenge schmal aber tief, so daß das kalte Wasser aus dem Atlantik seinen Weg in das wiedergeborene Mittelmeer fand. Aber in unseren Bohrkernen sahen wir, daß die Geschichte sich wiederholt. Die Meerenge von Gibraltar wird allmählich wieder aufgebaut zu einer Schwelle mit geringer Wassertiefe. Wir konnten uns vorstellen, daß in einer geologisch gesehen nicht allzu fernen Zukunft die Straße von Gibraltar erneut zu einem Isthmus und das Mittelmeer abermals eine Wüste werden würde.

Zugegeben, das alles waren nicht ganz leicht verdauliche Neuigkeiten. Aber Bill RYAN, Maria CITA und ich gaben nur die Geschichte wieder, die das Gestein uns erzählt hatte. Begreiflicherweise begegnete man unseren ausgefallen wirkenden Ideen mit größter Skepsis. Fragen über Fragen wurden gestellt. Aber jeder derartige Disput endete bisher nur damit, daß wir ein weiteres fehlendes Stück für unser Mosaik fanden.

Erstes Beispiel: Als wir von Bord der *Glomar Challenger* gingen, hatten wir nur Gips, Anhydrit und Halit in unserer Evaporit-Sammlung festgestellt. Überall bedrängte man uns daher mit der Frage: »Wo ist denn das Karbonat, das erste Mineral, das sich aus einer Evaporitlauge absetzt?«

Wir überlegten und kamen zu dem Schluß, daß wir im Bohrloch 121, im Alboran-Becken vor der spanischen Küste, eigentlich Dolomit (Kalzium-Magnesium-Karbonat) gefunden haben müßten. Also nahmen wir uns die Bohrkerne von der Bohrstelle 121 noch einmal vor. Tatsächlich: In der Hast und unter dem Zeitdruck der Arbeitsbedingungen an Bord hatten wir dieses Mineral in der Probe übersehen. Wir hatten also etwas Dolomit, aber wir wollten mehr davon sehen. Unsere Erwartung wurde einige Monate später erfüllt, als Vlad NESTEROFF seine Untersuchung der Bohrkernproben in aller Muße hatte abschließen können. Er fand tatsächlich das sehr fein verteilte Mineral, das wir mit dem für diese Zwecke unzureichenden Mikroskop an Bord nicht hatten identifizieren können.

Nächste Frage: »Wenn ein Meeresbecken ausgetrocknet ist, dann müßte mehr lösliches Kaliumsalz und Magnesiumsalz vorhanden sein. Wo sind sie?«

Darauf konnten wir mit dem Argument antworten, daß wir nur den Rand des Ochsenauges getroffen hätten, aber nicht seine Mitte, wo die letzte Mutterlauge sich angesammelt haben mußte. Das Argument war zwar vernünftig, ließ die Skeptiker aber unbefriedigt. Erst 2 Jahre, nachdem ich in Lissabon von Bord gegangen war, lernte ich einen Spezialisten der Salzchemie kennen: Robert KÜHN von der Kaliforschung in Hannover. Er erklärte sich freundlicherweise bereit, eine genaue Analyse unserer Salzproben vorzunehmen. Tatsächlich fand er *Bischofit*, eines der leichter löslichen Magnesiumsalze, das in einem ausgetrockneten Meeresboden vorhanden sein müßte. Er führte ferner eine Reihe von

Untersuchungen über Spurenelemente durch, und seine Ergebnisse bestätigten nachhaltig unsere Schlußfolgerung, daß die Salze des Mittelmeers nicht in tiefen Salzseen, sondern in flachen Salztümpeln ausgefällt worden waren.

»Wo ist der geomorphologische Nachweis für die Austrocknung des Mittelmeers?« Mit dieser Frage brachte man Maria CITA bei einem in Lyon abgehaltenen Symposium in Verlegenheit, dessen Teilnehmer zum größten Teil Mikropaläontologen waren. Denn wenn der Wasserstand des Mittelmeers durch Verdunstung tatsächlich auf Null gesunken wäre, dann müßten die Küstenebenen der angrenzenden Festlandsteile zu Hochplateaus geworden sein und die Inseln zu hochaufragenden Bergen. »Das Absinken des Mittelmeerspiegels müßte dann eine Verjüngung der Flußläufe zur Folge gehabt haben, die sich stärker und tiefer in den Boden einschneiden würden«.

Ein französischer Kollege, G. CLAUSON, gab die Antwort. Er erzählte den Zuhörern und später auch uns die Geschichte des unterirdischen Rhônetales, die ich zu Beginn dieses Aufsatzes schon erwähnt habe.

Schön, da gab es also diese unterirdische Rhôneschlucht. Es flossen aber noch andere Flüsse in das Mittelmeer. Dann müßten auch sie jetzt zugeschüttete Gräben in das Land eingeschnitten haben. Wo waren diese denn?

Es dauerte nicht sehr lange, bis Bill RYAN auch darauf antworten konnte. Kurz nach unserer Rückkehr erhielt er ein Schreiben von einem russischen Geologen, I. S. CHUMAKOV, der durch einen Artikel in der New York Times von unseren Entdeckungen erfahren hatte. CHUMAKOV gehörte zu den Spezialisten, welche die Sowjetunion nach Ägypten geschickt hatte, um beim Bau des berühmten Staudammes von Assuan zu helfen. Auf der Suche nach hartem Gestein für das Fundament des Dammes wurden 15 Bohrungen niedergebracht. Zum Erstaunen des Russen führten diese zur Entdeckung einer unter dem Niltal gelegenen schmalen, aber tiefen Schlucht, die bis über 200 Meter unter dem Meeresspiegel in den harten Granit eingeschnitten war. Diese Schlucht war vor etwa 5 Millionen Jahren überflutet und mit pliozänem Meeresschlamm angefüllt worden, der seinerseits mit Nilschlamm zugedeckt worden war.

Assuan liegt mehr als 1000 Kilometer stromaufwärts von der Mit-

telmeerküste entfernt. Im Nildelta niedergebrachte Bohrungen hatten auch nach 1000 Meter Tiefe den Boden des alten Nil-Canyons noch nicht erreicht. CHUMAKOV schätzt, daß der vorzeitliche Nil sich dort etwa 1500 Meter tief eingegraben hat und stellt sich ein in großer Tiefe unter dem jetzigen Meeresspiegel überflutetes Mündungsgebiet vor, das unter den Sanden des neuen Nildeltas begraben liegt.

CHUMAKOV war nicht der einzige, der unterirdische Flußläufe fand. Auch in Libyen erlebten Ölgeologen bei ihren Erschließungsarbeiten einige Überraschungen. Zuerst wiesen ihre Seismogramme gewisse Anomalien auf. Unter der Erdoberfläche gab es lineare Strukturen, die die seismischen Wellen mit abnorm hohen Geschwindigkeiten zurücksandten. Als man diese ungewöhnlichen Gebilde anbohrte, erwiesen sie sich als zugedeckte Gräben, die bis 400 Meter unter den Meeresspiegel eingeschnitten waren. Die geologischen Erkundungen zeigen denselben Sachverhalt: kräftige Einschnidung von Flußläufen und Schluchten im späten Miozän und plötzliche Überflutung durch Seewasser am Beginn des Pliozäns. Ted BARR und seine Mitarbeiter in der Oasis Oil Company, die von Tripolis in Libyen aus arbeitet, folgerten in einem Bericht, daß das Mittelmeer über 1000 Meter unter seinem jetzigen Niveau gelegen haben muß, als die Kanäle eingeschnitten wurden. Die Veröffentlichung ihrer Berichte in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift gelang ihnen jedoch nicht, da keine Redaktion bereit war, eine derart ungewöhnliche Interpretation abzdrukken.

Es wurden noch weitere früher eingeschnittene und jetzt überdeckte Schluchten und Kanäle in Algerien, Israel, Syrien und anderen Mittelmeerländern gefunden. Auf dem festen Land gab es also hinreichende Beweise zur Bekräftigung unserer Theorie. Bei einer Vorlesung an der Yale Universität über die Ergebnisse unserer Expedition fragte jedoch ein Zuhörer in der anschließenden Diskussion nach weiteren Beweisen im heutigen Meeresbecken: »Die in das Mittelmeer strömenden Flüsse müssen sich nicht nur auf dem heutigen Festland tief eingegraben haben, sondern auch auf dem damals freiliegenden Festlandsockel und auf dem Kontinentalabfall bis zum austrocknenden Boden der Tiefebene. Wo sind diese Gräben?«

Bill RYAN war zu meinem Vortrag nach New Haven gekommen

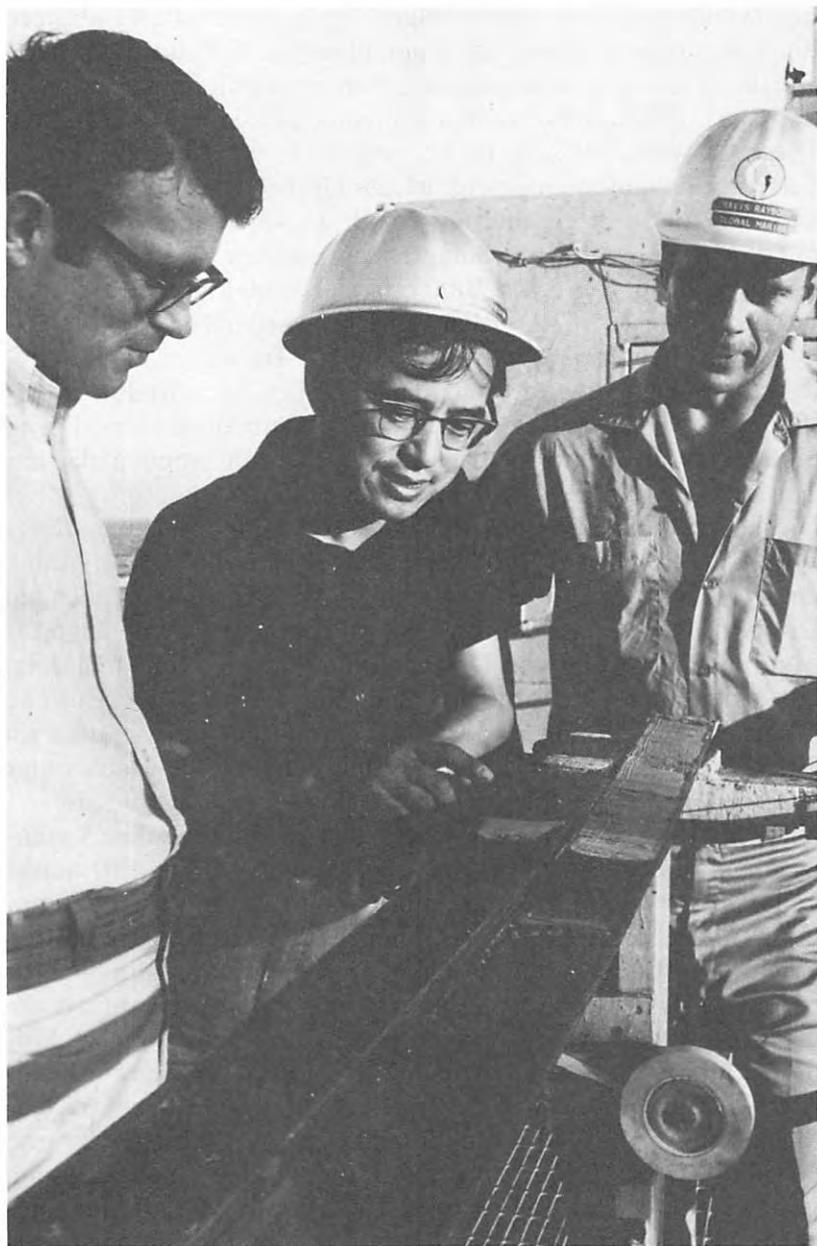


Abb. 16: Von links nach rechts: W. B. F. RYAN, der Verfasser und Travis RAYBORN (der leitende Bohringenieur) bei der Prüfung eines Bohrkerns.

und konnte mich jetzt unterstützen. Er berichtete den Zuhörern über die umfangreichen ozeanographischen Erkundungen, welche die Franzosen im Balearenbecken angestellt hatten, und von den mächtigen unterseeischen Canyons, die sie entdeckt hatten. Diese Canyons, erklärte RYAN, zeigen die typischen Merkmale der von Flußläufen eingeschnittenen Gräben und sind mit Flußkies angefüllt. Für die meisten von ihnen kann eine Verbindung mit einem Fluß auf dem Festland nachgewiesen werden. Sie können bis zu einer Tiefe von 2000 oder gar 2500 Metern am Rande der Tiefebene verfolgt werden. Auch sie wurden von der Überflutung im frühen Pliozän betroffen und mit Tiefseesedimenten bedeckt. Ähnliche Canyons sind in allen Teilen des Mittelmeers gefunden worden. Ihre Entstehung konnte bisher nicht befriedigend erklärt werden, bis wir jetzt auf die Beweise dafür stießen, daß das Mittelmeer vor 5 bis 7 Millionen Jahren austrocknete.

Diese Erklärung ermöglicht auch die Auflösung mancher anderer Rätsel. So können wir jetzt, wenigstens annähernd, den Ursprung der ausgedehnten Höhlen in den an das Mittelmeer angrenzenden Ländern und die merkwürdige Karst-Topographie von Jugoslawien mit ihrer Fülle von Dolinen und Klippen verstehen. Jetzt kann man auch eine Antwort geben auf die seit langem offene Frage, warum die Grundwasserzirkulation auf einer mitten im Meer liegenden Insel wie Malta früher einmal 3000 Meter unter den jetzigen Meeresspiegel hinabreichte.

Nicht nur die geomorphologischen, auch die biologischen Veränderungen jener Epoche waren katastrophal. Giuliano RUGGIERI von der Universität Palermo lenkte meine Aufmerksamkeit auf diese Tatsache. Er sandte mir einen Artikel, den er schon 1955 geschrieben hatte und in welchem er die Vermutung aufgestellt hatte, daß das Mittelmeer ausgetrocknet gewesen sein müsse, um die biologische Revolution zu erklären, die sich vor 5 oder 6 Millionen Jahren zugetragen hätte. Das von LYELL angegebene historische Datum bezeichnet die Rückkehr des Seewassers mit der Meereswasserfauna in dieses Inlandsbecken. Dick BENSON und Orville BANDY schrieben uns dann, daß zu den einwandernden Lebewesen auch ausgesprochene Tiefseeboden-Organismen gehörten. Der Meerwassereinbruch des Pliozäns überflutete also offensichtlich nicht ein flaches Schelf, sondern ergoß sich in ein ausgetrocknetes tiefes Becken.

Das Verschwinden des gesamten Wassers aus dem Mittelmeer und seine Verteilung auf die Ozeane unserer Erde würde den Wasserspiegel der Weltmeere um gut 10 Meter ansteigen lassen und damit viele unserer Küstenstädte überfluten. Die Entlastung, die das ausgetrocknete Mittelmeerbecken erfuhr, ist in ihrem Ausmaß dem Gewicht der fennoskandischen Eisdecke zu vergleichen, die während der letzten Eiszeit auf Europa lag. Die neuerliche Überflutung des Mittelmeerbeckens muß zu seinem Absinken geführt und eine Anhebung des angrenzenden Festlands verursacht haben. Nachdem die Ozeanographen und Geologen auf diese Möglichkeit erst einmal aufmerksam geworden waren, entdeckten sie in ihren Aufzeichnungen auch die entsprechenden Befunde. Die Existenz einer heißen Wüste an der Stelle des heutigen Mittelmeers müßte sich auch klimatisch nachdrücklich ausgewirkt haben. Europäische Paläontologen haben tatsächlich in Mitteleuropa eine Verschiebung zu warmem, trockenem Klima während des späten Miozäns beobachtet, als die Wälder um Wien zu Steppen wurden und in der Schweiz Palmen wuchsen. Mit der Rückkehr des Seewassers in das Mittelmeer während des Pliozäns wurde das Klima in Mitteleuropa naß und kalt und verschlechterte sich allmählich bis zu einer Eiszeit.

Man ist auch versucht, Spekulationen darüber anzustellen, daß die Zunahme der Trockenzeit und das Aussterben der Wälder einen Schritt in der Evolution der Hominiden ausgelöst haben könnte. Die Anthropologen haben uns schließlich immer wieder erzählt, daß die Affen sich zu Zweibeinern entwickelten, als sie von den Bäumen herabstiegen, um in der Savanne nach Nahrung zu suchen. Der Gedanke ist verführerisch, aber wir haben keine Fakten, die ihn stützen könnten.

Die Beobachtungen der auf Wirbeltiere spezialisierten Paläontologen geben ferner Anlaß zu der Vermutung, daß während der Trockenzeit des Mittelmeeres Landtiere in großem Umfang gewandert sind. Afrikanische Antilopen und Pferde konnten damals über den Isthmus nach Spanien ziehen. Auch afrikanische Nager kamen damals aus dem Süden herübergewandert und besetzten neue Reviere in Europa. Etwa zur selben Zeit gelangte das Flußpferd vom Nil auf die heutige Insel Zypern. Vielleicht hätte die Wanderung der Tiere einen noch größeren Umfang angenommen, wenn sie nicht eine Wüste hätten durchqueren müssen.

Die plötzliche Isolierung der Inseln nach der Überflutung im Pliozän zwang die gestrandete Tierwelt zur Inzucht und zur Beschränkung auf relativ enge Gebiete. Ein Zoologe, der mir schrieb, hatte diese Möglichkeit aufgrund seiner Untersuchungen über die Eidechsen auf den adriatischen Inseln bereits erwogen. Ein anderer Kollege war davon überzeugt, daß die Zwergantilopen auf Mallorca und Menorca ihren zierlichen Wuchs der Isolierung dieser balearischen Inseln vom Festland während der letzten 5 Millionen Jahre zu verdanken hätten.

Auch andere, noch merkwürdigere Hinweise gaben uns Grund zum Nachdenken. Wir teilen zwar nicht die Meinung, von H. G. WELLS, daß die Schwalben ihre Gewohnheit, direkt über das Mittelmeer zu fliegen, in jenen Tagen annahmen, als da noch trockenes Land war. Aber wir waren sehr beeindruckt von der kürzlich veröffentlichten Beobachtung, daß die Aale, die in den in das Mittelmeer mündenden Flüssen leben, sich nicht ihren europäischen und amerikanischen Verwandten anschließen und nicht zu der traditionellen Laichstätte für Aale im Sargasso-Meer wandern. Sie allein von allen Flußaalen tun das nicht sondern laichen im Mittelmeer. Haben sie diese Gewohnheit vielleicht vor 6 Millionen Jahren angenommen, als sie die Wasserfälle von Gibraltar nicht überwinden konnten, um sich ihren Artgenossen anzuschließen? Wir können darauf keine Antwort geben. Aber die Tatsache, daß das Mittelmeer einmal ausgetrocknet war, legt unorthodoxe Anregungen zur Lösung von Problemen der biologischen Evolution nahe.

Steht das Verschwinden eines großen Binnenmeeres in der Geschichte der Geologie als einmaliges Ereignis dar? Wahrscheinlich nicht. Die Existenz großer Salzlager weist darauf hin, daß es noch andere ausgetrocknete Meere gegeben haben dürfte. Die berühmten Zechsteinsalze in Nordeuropa können Überreste eines Binnenmeeres sein, das vor 250 Millionen Jahren austrocknete. Die riesigen, gut 350 Millionen Jahre alten Ablagerungen von Salz und Kalziumkarbonat in Alberta und Saskatchewan könnten auf einen ähnlichen Ursprung zurückgehen. Die Entdeckung, daß ein relativ kleines Meeresbecken in eine Wüste verwandelt werden kann, hat uns veranlaßt, das ganze Problem der Entstehung derartiger Salzlager neu zu überdenken. Bisher waren die Geologen sich keineswegs im klaren über die Herkunft der ozeanischen

Salzablagerungen im Golf von Mexiko, im Südatlantik vor der Kongolesischen Küste und vor Angola und im Nordatlantik vor der Küste von Neuschottland. Heute können wir die Arbeitshypothese aufstellen, daß diese Salzablagerungen sich bildeten, als der Golf von Mexiko und die betreffenden Regionen des Atlantik isolierte, im Austrocknen begriffene Binnenmeere waren.

Es mag ein wenig weit hergeholt scheinen, sich das Mittelmeer als eine tiefe, trockene, heiße Hölle vorzustellen. Deshalb ist es nicht verwunderlich, daß unsere Auffassung nicht von allen anerkannt worden ist, obwohl die vorhandenen Beweise keine andere Auslegung zulassen. Maria CITA war manchmal ungehalten, wenn ihre Kollegen ihr nicht glauben wollten. Ich habe ihr dann immer geraten, die Nachwelt urteilen zu lassen.

Vor 150 Jahren trat ein junger Ingenieur aus Genf mit der ungeheuerlich klingenden Behauptung auf, daß Mitteleuropa einmal von einer riesigen Eisdecke bedeckt gewesen sein müsse. Es gab für ihn keine andere einleuchtende Erklärung für das Vorkommen von erratischem Schiebegestein auf der schweizerischen Hochebene. Niemand glaubte ihm. Aber seine Zweifler sind längst gestorben. Seitdem haben Generationen von Schulkindern von der »Eiszeit« gehört, und wir alle halten es für selbstverständlich, daß dieses so unwahrscheinlich klingende Ereignis tatsächlich stattgefunden hat.

Die Wassermenge des Mittelmeeres stellt ungefähr das gleiche Volumen dar wie das gesamte Eis, das während des Pleistozäns *Fennoskandia* bedeckte. Daß aus einem Meer so viel Wasser verschwinden kann, ist nicht unwahrscheinlicher als die Tatsache, daß einmal so viel Eis an Land aufgetürmt war. Eines Tages werden auch die Skeptiker, die heute Frau CITA bedrängen, ihren letzten Weg gehen. Und neuen Generationen von Schulkindern wird man dann beibringen, die Austrocknung des Mittelmeers für eine unbezweifelbare Tatsache zu halten.

Weiterführende Literatur:

Hsü, K. J.: When the Mediterranean dried up. *Scientific American*, Vol. 227, No. 6, p. 26–36, 1972.

Hsü, K. J., W. B. F. RYAN and M. B. CITA: Late Miocene Desiccation of the Mediterranean. *Nature*, Vol. 242, No. 5395, p. 240–244, 1973.

Hsü, K. J.: The Miocene Desiccation of the Mediterranean and its climatical and zoogeographical implications. *Naturwissenschaften* 61, p. 137–142, 1974.

Das Bedürfnis zur Aufstellung eines Kalenders hat die Beobachtung des Sternhimmels offensichtlich zur ersten wissenschaftlichen Betätigung des Menschen schon in prähistorischer Zeit werden lassen. Das Motiv war vordergründig sicher der Wunsch nach einer zeitlichen Organisation des Arbeitsablaufs in Anpassung an den Wechsel der Jahreszeiten. Aber hinter den monumental Dimensionen einer Anlage wie der von Stonehenge wird man vielleicht auch noch ein anderes Motiv vermuten dürfen: Nach Jahrtausenden des Ausgeliefertseins an eine nicht allein bedrohliche, sondern vor allem auch ganz und gar unberechenbare, von willkürlichen Dämonen beherrschte Umwelt muß es für den frühen Menschen ein eindruckvolles und befreiendes Erlebnis gewesen sein, als es ihm gelang, die Periodizität auffälliger Himmelserscheinungen zu durchschauen, Sonnen- und Mondfinsternisse vorherzusagen und ihrer damit geistig Herr zu werden. Vielleicht sind manche dieser vorgeschichtlichen Observatorien auch als Denkmäler aufzufassen, Erinnerungen an den ersten großen Triumph des menschlichen Geistes über die ihn umgebende fremde Natur.

WOLFHARD SCHLOSSER erläutert die Arbeitsmethoden der prähistorischen Kalendermacher und Astronomen, wie sie sich aus einer Analyse der von ihnen hinterlassenen Bauwerke ergeben. Der Autor arbeitet am Astronomischen Institut der Universität Bochum und an der Europäischen Südsternwarte (ESO) in La Silla, Chile. Neben seiner wissenschaftlichen Haupttätigkeit gilt sein Interesse in Zusammenarbeit mit einer Gruppe namhafter Historiker und Orientalisten seit vielen Jahren der prähistorischen Astronomie.

Sterne und Steine

Urtümliche Formen der
Astronomie und Zeitbestimmung
von der Steinzeit bis heute

WOLFHARD SCHLOSSER

Einleitung

Eine der wichtigsten Aufgaben der Himmelskunde war seit jeher die Zeitbestimmung. Je weiter wir die Geschichte der Astronomie in die Vergangenheit zurückverfolgen, umso mehr gewinnt die Zeit- und die damit eng verbundene Ortsbestimmung an Bedeutung. Eine wissenschaftliche Astronomie als Grundlagenforschung, wie wir sie heute kennen, gibt es erst seit der griechischen Antike. Aber schon viele Jahrtausende früher war die Sternkunde von eminenter Bedeutung. Bot sie doch die einzige Möglichkeit zur Bestimmung von Zeitmaßen, in die der Mensch sein Leben und seine Geschichte einteilte, seit er über Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft zu reflektieren begonnen hatte.

Die wichtigsten Zeitmaße – in der Antike wie heute – werden von der Erdrotation sowie der Bewegung von Sonne und Mond abgeleitet. Die Erdrotation liefert die Tageslänge, der Mondlauf Woche und Monat und der Sonnenlauf das Jahr. Die astronomischen Probleme der Antike und des Mittelalters glichen dabei den heutigen fast bis aufs Haar. War in der Vergangenheit die Inkommensurabilität von Tag und Jahr der Grund für kalendarische Unstimmigkeiten, die nur durch den Einsatz höchster weltlicher und geistlicher Autorität ausgeräumt werden konnten (julianischer und gregorianischer Kalender, nach Julius CAESAR und Papst GREGOR XIII.), so ist bei vielen Mitmenschen heute die Einführung einer *Schaltsekunde* zu Neujahr oder zur Jahresmitte ein Stein des Anstoßes. Diese Schaltsekunde wurde notwendig, weil die Erde nicht gleichmäßig rotiert, und ein Tag daher nicht jedes Jahr exakt das 86 400fache der neuen Atomzeitsekunde ist. Ohne die gelegentliche Einschaltung dieser »zusätzlichen« Sekunde

würden wir daher vor die Alternative gestellt, ob wir – kraß ausgedrückt – lieber eines Tages die Sonne nachmittags um 14.00 aufgehen sähen oder eine andere Zeitdefinition vorzögen, in der die Naturgesetze nicht gelten.

Der Unveränderlichkeit astronomischer Phänomene und der Beständigkeit ihres zeitlichen Ablaufs über die Jahrtausende entspricht eine Konstanz der Beobachtungsverfahren, die immer wieder überrascht. So werden im Irak noch im 20. nachchristlichen Jahrhundert die gleichen Techniken zur Bestimmung des neuen Mondes angewandt, mit denen im 19. vorchristlichen Jahrhundert Steinzeitmenschen in Südengland die Sommersonnenwende festlegten.

Im folgenden soll dieses unveränderte Prinzip durch viele Jahrtausende hindurch verfolgt werden, von den ersten Spuren eines Interesses am gestirnten Himmel in der Altsteinzeit (Kapitel 3) über Stonehenge (Kapitel 4), Persepolis (Kapitel 5) bis in die heutige Zeit (Kapitel 7).

Die über Jahrtausende unveränderten Beobachtungsverfahren beruhen auf der frühen Feststellung der Beobachter, daß

- a) Fixsterne stets an der gleichen Stelle des Himmels auf- und untergehen
- und b) der Sonnen- und Mondlauf zusätzlich von der Jahreszeit abhängt.

Dieser so wichtige Zusammenhang wird durch Abb. 1 erläutert. Sie zeigt den Blick auf einen Horizontausschnitt, der sich von Ost über Süd nach West erstreckt. Ost- und Westpunkt werden durch den Himmelsäquator verbunden. Dieser ist die wichtigste gedachte Linie am Himmel. Real wird er markiert durch die Sonne zur Frühlings- und Herbsttagundnachtgleiche und die Gürtelsterne im Sternbild Orion. Der größte Abstand des Himmelsäquators vom Horizont wird über dem Südpunkt erreicht. Subtrahiert man diesen Wert vom Rechten Winkel (90°), so erhält man die geographische Breite des Beobachtungsstandortes.

Nun liegen die Gestirne (Sonne und Mond gehören natürlich auch dazu) im allgemeinen nicht auf dem Himmelsäquator, sondern kreisen um den Betrag ihrer Deklination nördlich ($+\delta$) oder südlich ($-\delta$) vom Aufgangspunkt zum Untergangspunkt. Die Auf- und Untergangspunkte liegen symmetrisch zum Südpunkt und –

wie Abb. 1 zeigt – um so weiter vom Ostpunkt und Westpunkt entfernt, je größer die Abweichung δ vom Himmelsäquator ist. Da bei den Fixsternen die Deklination unveränderlich ist, bei Sonne und Mond hingegen von der Jahreszeit und anderen Faktoren abhängig, gelten die oben unter a) und b) aufgeführten Feststellungen.

Es lag daher nahe, die Horizontpunkte A und U durch unverrückbare Male wie z. B. Steinsetzungen oder – bei Bauwerken – durch architektonische Linien zu kennzeichnen, um danach Jahr für Jahr die himmlischen Phänomene präzise voraussagen zu können. Bald stellte man außerdem fest, daß bestimmte, vorausberechenbare Stellungen von Sonne, Mond und Planeten Finsternisse und Konstellationen bedeuteten, die durch einfache zahlenmäßige Beziehungen untereinander verknüpft waren. So konnte man z. B. durch ein reines Abzählverfahren Finsternisse und Planetenkonstellationen voraussagen und die Anwendbarkeit von Steinsetzungen erheblich erweitern. Nach Ansicht vieler Historiker ist Stonehenge ein »Computer der Steinzeit«, der eben

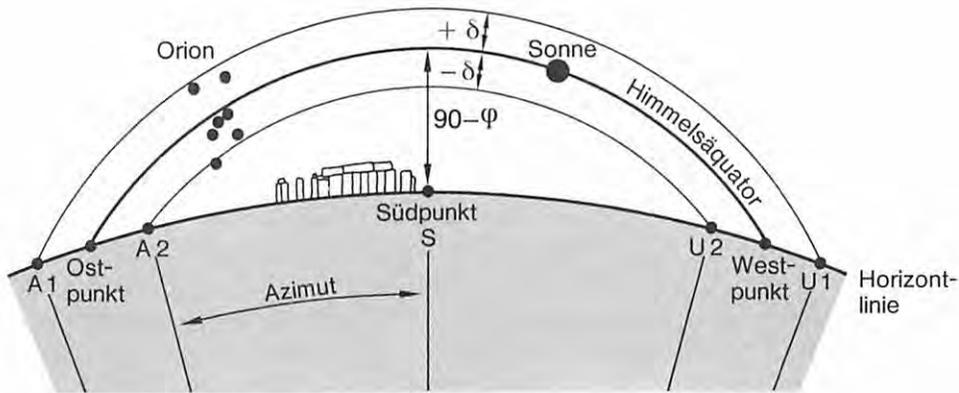


Abb. 1: Die Abbildung vermittelt einige wichtige Kenntnisse über den täglichen Lauf der Gestirne und ihre Fixpunkte. Neben dem Horizont ist die wichtigste Bezugslinie der Himmelsäquator. Gestirne auf dem Himmelsäquator gehen im Ostpunkt auf, erreichen im Süden ihre größte Höhe $90^\circ - \varphi$ (φ = geographische Breite) und gehen im Westpunkt unter. Bei einer Abweichung δ vom Himmelsäquator verschieben sich die Auf- und Untergangspunkte A_1, A_2, U_1, U_2 . Der Winkel zwischen A und S oder U und S heißt Azimut des auf- bzw. untergehenden Sterns. Er ist in einfacher Weise durch Steinsetzungen oder Baufluchtlinien fixierbar.

diesem Zweck gedient hat. (Der Ausdruck »Abakus der Steinzeit« wäre übrigens zutreffender.) Immerhin können mit der Anlage – wie ich zeigen werde – heute noch Sonnen- und Mondfinsternisse vorausberechnet werden.

Die Auswahl der in diesem Aufsatz besprochenen Anlagen ist keineswegs umfassend. Sie spiegelt die Zusammenarbeit einer Gruppe von Historikern und Naturwissenschaftlern wider (G. GROPP, Teheran; W. LENTZ, Marburg; J. NEBEZ, Berlin, und der Verfasser), die in diesem interessanten Grenzgebiet zwischen Natur- und Geisteswissenschaften einige weitere Mosaiksteine einzufügen versuchen.

Die Kenntnis des gestirnten Himmels – einst und heute

Bevor wir unseren Blick auf die Astronomie der Vergangenheit richten, muß einiges zum Vergleich der Kenntnisse von einst und jetzt gesagt werden. Sind die himmelskundlichen Grundkenntnisse heute eigentlich größer? Kann der »Mann auf der Straße« Wesen und Funktion von *Stonehenge* ohne Schwierigkeiten begreifen, oder gar nach kurzer Einweisung mit der Anlage arbeiten? Die Antwort darauf muß »nein« heißen. Die Allgemeinkenntnisse über die täglichen Vorführungen des himmlischen Uhrwerks sind denkbar gering – viel geringer dürften sie in der Steinzeit auch nicht gewesen sein!

Astrophysik und Weltraumforschung gelten als Kennzeichen unserer Zeit. Berichte über aktuelle Forschungsergebnisse wie *Schwarze Löcher*, *Quasare* etc. werden mit dem gleichen Interesse gelesen wie Resultate der Erkundung der Erde und anderer Planeten von Raumflugkörpern aus. Mag dieses Interesse auch dem Bild des vielzitierten »modernen Menschen« entsprechen, so ist doch für die Mehrzahl der Zeitgenossen (auch in den Industrienationen) das Universum nach wie vor in jenes geheimnisvolle Dunkel gehüllt, das wie ein verhangener Spiegel das eigene und kollektive Schicksal verbirgt und dem man mit höchst obskuren Mitteln beizukommen versucht. Horoskope in fast allen Zeitungen und UFO-Tagungen, deren Teilnehmerzahlen die Treffen von Fach- und Amateurastronomen mit Privatissime-Vorstellungen vergleichen lassen, sprechen eine beredte Sprache.

Gewiß, die Erkenntnis, daß man auf dem Mond spazieren gehen kann, gehört inzwischen zur Allgemeinbildung (wenn auch gelegentlich noch zu hören ist, die Fernsehaufnahmen vom Mond seien Trickaufnahmen aus der Sahara gewesen). Aber diese Kenntnisse sind nicht in den Kontext eines verbesserten Grundwissens über das Weltall eingebettet.

Ich habe einmal während eines Apollofluges einen einigermaßen repräsentativen Querschnitt der Bevölkerung nach dem Zustandekommen der Mondphasen gefragt. Bekanntlich hatten schon die alten Griechen die richtige Erklärung gefunden, aus der sie sogar die Entfernung der Sonne ableiteten. Von ganzen 5 Prozent der Befragten bekam ich die richtige Antwort, etwa die gleiche Anzahl konnte als halbrichtig gewertet werden. Der Rest – also 90 Prozent – gab keine oder eine falsche Antwort. Unter den falschen Antworten befand sich auffallend häufig die Erklärung, daß die Mondphasen durch den Schatten der Erde zustande kämen, der auf den Mond falle. Dies aber ist bekanntlich die Ursache der Mondfinsternisse.

Wo es um ungefähre Vorstellungen von kosmischen Größenverhältnissen geht, herrscht erst recht völlige Unkenntnis. Zwar ist meist noch geläufig, daß es sich dabei um »astronomische« Entfernungen handelt. Daß diese aber gestaffelt sind nach Sonnensystem, Fixsternraum, Galaxis, Universum ist kaum jemandem bekannt. Aber gerade die Einsicht in diese hierarchische Ordnung der kosmischen Objekte mit ihren mathematischen und physikalischen Konsequenzen unterscheidet unsere moderne Weltanschauung von der primitiver Völker.

Die Unkenntnis über die elementarsten astronomischen Tatsachen reicht bis in die Universitäten hinein. So wurde ich einmal von einem Studenten um Literatur über das ptolemäische Weltsystem gebeten, da er darüber einen Seminarvortrag halten sollte. (Das ptolemäische Weltsystem war das herrschende Weltbild von der Spätantike bis ins Mittelalter. Es stellte die Erde in den Mittelpunkt des Universums und ließ die Planeten auf recht gekünstelten Bahnen um sie kreisen.) Wie sich während des Gesprächs herausstellte, war der Vortrag aber keineswegs etwa als astronomisch-historisches Referat gedacht, vielmehr sollte das ptolemäische Weltbild als eine auch noch heute aktuelle Alternative dargestellt werden. Der Student (und sein Professor) hatten im Jahre

des 500. Geburtstages von KOPERNIKUS den Einzug des kopernikanischen Systems offensichtlich noch nicht mitbekommen.

Zwei Gründe scheinen mir für diese Entfremdung zwischen Mensch und Universum maßgebend zu sein. In der Antike war der Sternhimmel der Kalender der Menschheit und die Sonne ihre Uhr. Schon früh fand man heraus, daß es bei der Festlegung landwirtschaftlicher Stichdaten sicherer ist, dem Sternenhimmel als den aktuellen meteorologischen Bedingungen zu vertrauen. Dem Seemann waren Sonne, Mond und Sterne die wichtigsten Orientierungshilfen.

Bei religiösen Festen gilt diese Bindung an himmlische Erscheinungen noch heute. Die Termine der höchsten christlichen Feste werden allesamt astronomisch festgelegt: die Karwoche, Ostern und Pfingsten durch Vollmond und Frühjahrstagundnachtgleiche. Das Weihnachtsfest – vermutlich über den spätantiken Mithraskult – durch die Wintersonnenwende. Ähnliches gilt auch für die Feste anderer Religionen.

Der zweite Grund liegt in der zunehmenden Aufhellung des Nachthimmels durch künstliche Lichtquellen. Der jahreszeitliche Wechsel der Konstellationen, die Bewegung des Mondes und der Planeten unter den Fixsternen und das Band der Milchstraße sind dem Städter heute kaum mehr bekannt. Daher können Nachrichten über neue weltraumkundliche Entdeckungen nicht mehr in Beziehung zu vertrauten Himmelsphänomenen gebracht werden und sind schnell wieder vergessen. In alter Zeit aber war die Kenntnis des gestirnten Himmels nicht Forschungszweck sondern Alltagsnotwendigkeit.

Astronomische Kenntnisse der Steinzeit

Bemerkenswert ist das hohe Alter grundlegender astronomischer Kenntnisse. Wo immer wir eine Kultur aus schriftloser Vorzeit ins Licht der Geschichte treten sehen und ihre prägenden Gestalten und geistigen Strömungen aus Texten zu uns sprechen lassen können, stets ist die Kenntnis des Sternenhimmels schon voll ausgebildet und in religiöse Vorstellungen integriert.

Die Benennung der Sternbilder, die Kenntnis vom Jahreslauf der Sonne und der eigentümlichen Bewegung der Planeten verlieren sich in Epochen, aus denen wir keine Bild-, Sprach- oder Schrift-

denkmäler haben. So dürfen wir annehmen, daß die Auswahl der Haupthimmelsrichtungen so alt ist wie die Menschheit.

Die ältesten Spuren des Glaubens an ein Weiterleben nach dem Tode sind aus dem Moustérien überliefert, der Epoche des »Neandertalers«. Ausgrabungen haben ergeben, daß bereits diese urtümliche Hominidenrasse ihre Toten auf Steinkissen bettete, ihnen mit Röteln die Farbe des Lebendigen zurückzugeben versuchte und sie mit Wegzehrung für ein »Jenseits« versah. Der Kopf der Toten ist auffallend oft der Sonnenaufgangs- oder -untergangsrichtung, Osten bzw. Westen, zugewandt. Das scheint ein Zeichen dafür, daß der Jenseitsglaube damals bereits astronomische Elemente enthielt.

Als Beispiele gelten die Funde von La-Chapelle-aux-Saints (Moustérien, 150 000–60 000 v. Chr.), Combe Capelle (unteres Aurignacien, 100 000 v. Chr.) sowie Solutr  (mittleres Aurignacien, 40 000 v. Chr.). Die Bedeutung der Auf- und Untergangspunkte der Sonne und damit der Himmelsrichtungen Ost und West ist seit daher unverändert geblieben und in viele Religionen eingegangen.

So hießen in Altägypten die Toten die »Westlichen«, für die Antike galt *ex oriente lux* und früher wurden die christlichen Kirchen in Ost-West-Richtung gebaut. Osten und Westen sind also urtümlichere Himmelsrichtungen als Norden und Süden. Die Etymologie der Worte »Osten« und »Westen« legt ebenfalls eine Ableitung vom Sonnenlauf nahe. »Osten« wird vom indogermanischen *ausos* (Morgenröte) hergeleitet; »Westen« ist mit lat. *vesper*, gr. *ἑσπέρα* verwandt und erlaubt so die Deutung »Abendseite«. »Norden« und »Süden« sind in ihrer Herkunft viel blasser und bedeuten nach Ansicht vieler Sprachforscher einfach »links« und »rechts«. (Beim Blick nach Osten liegen Norden und Süden links und rechts vom Beobachter.) Daß wir heute die Nord-Süd-Richtung als Hauptachse betrachten, hat seinen Grund in unserem Wissen von der nur scheinbaren Natur des Sonnenlaufs. Er resultiert ja aus der Drehung der Erde um eine raumfeste Achse, die den Nord- und Südpol der Erde durchstößt und damit – auf eine viel abstraktere Weise – diese beiden Himmelsrichtungen als primär festlegt.

Die vergleichende Sprachwissenschaft liefert uns ferner Hinweise darauf, daß die himmelskundlichen Grundkenntnisse bereits seit

ältester Zeit auch praktisch genutzt wurden. Unser Wort »Mond« ähnelt vielen Worten mit gleicher Bedeutung von Zentralasien bis Island. Es wird von vielen Forschern vom indogermanischen *me* = *messen* abgeleitet. Man schließt daraus, daß der Mond seit mindestens 4000 Jahren als Zeitmesser verwendet wurde und daß seine Phasen und ihr Bezug zur Sonne noch früher bekannt waren. Weitere Hinweise auf das hohe Alter astronomischen Wissens ergeben sich aus dem Studium »heiliger« – oder allgemeiner gesagt »bedeutungsvoller« – Zahlen, die in den religiösen Schriften der ganzen Welt, in Märchen, Sagen und Bräuchen aller Völker anzutreffen sind. So spielen zum Beispiel die Zahlen Drei, Sieben und Zwölf in vielen Religionen eine große, zum Teil dogmatisch sanktionierte Rolle. Dagegen kommen die Zahlen Vier, Sechs und Elf nur selten vor. Die Auswahl ist *cum grano salis* in allen Kulturkreisen ähnlich und daher sicher sehr alt. Allgemein fällt auf, daß bei Zahlen unter Zehn die ungeraden bevorzugt werden, während unter den zweistelligen solche herausragen, die in zwangloser Weise markanten astronomischen Phänomenen zugeordnet werden können. Beispiele sind 12 (= Monate im Jahr), 19 (= Mondknoten) und 30 (= Anzahl der Tage im Monat). Es braucht nicht besonders betont zu werden, daß solche Überlegungen stets die Gefahr in sich bergen, sich in zahlenmystische Spielereien zu verlieren. Die Möglichkeit einer zwanglosen Koppelung bemerkenswert häufiger Zahlen mit astronomischen Daten sollte daher die einzige Schlußfolgerung bleiben.

Weitere Einblicke in das astronomische Wissen früherer Zeiten erhält man durch das Studium kalendarischer Praktiken in kulturellen Rückzugsgebieten. Ähnlich wie in einem Volk die himmelskundlichen Kenntnisse breit streuen, so auch in den verschiedenen Kulturen der Welt. Abb. 2 vermittelt einen Eindruck der Entwicklung astronomischen Wissens. Diese Entwicklung geschieht nicht gleichmäßig, sondern innerhalb eines breiten »Kultur-fächers«. Wie zu einem gegebenen Zeitpunkt auf der Erde die unterschiedlichsten Wissensstände nebeneinander bestehen (vertikale Linie), so kann andererseits ein kalendarisches Verfahren (etwa aus der vorhandenen Kenntnis von Sonnen- und Mondlauf) über Jahrtausende hinweg erhalten bleiben und – von früheren Hochkulturen langsam in kulturelle Rückzugsgebiete abwandernd – auch heute noch aufzufinden sein (horizontale Linie).

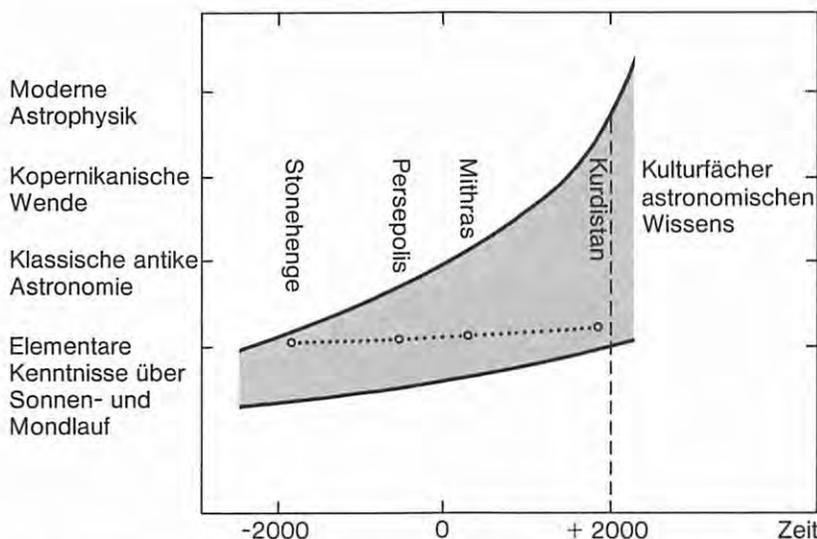


Abb. 2: Die Entwicklung des astronomischen Wissens. Das genutzte Wissen liegt innerhalb eines Kulturfächers, der sich bei Annäherung an die Gegenwart immer weiter öffnet. Was zu Zeiten von Stonehenge noch »big science« war, findet sich heute nur noch in kulturellen Rückzugsgebieten (horizontale Linie). Die vertikale Linie zeigt die Spannweite des gleichzeitig nebeneinander bestehenden Wissens.

In Westeuropa, speziell in Frankreich, England und Irland gibt es eine sehr große Anzahl von Steinsetzungen (Hünengräber, Menhire, Dolmen), deren astronomische Funktion außer Zweifel steht. Sie stammen zumeist aus der Übergangszeit Neolithikum/Bronzezeit, um 1800 v. Chr. Dieser Zeitraum ist dadurch gekennzeichnet, daß neben der Selbsthaftwerdung des Menschen mit dem Übergang zum Ackerbau der Gebrauch neuer Werkstoffe, der Metalle, hinzukam. Man darf vermuten, daß diese Zeit, in der es zu einer Fülle praktischer Neuerungen kam, auch tiefere Einsichten in den Ablauf der Naturereignisse brachte.

Wir verstehen wichtige Züge der geistigen Entwicklung jener Zeit, wenn wir einmal dem viel zitierten Satz von der Astronomie als der ältesten Wissenschaft auf den Grund gehen. Die Astronomie konnte sich deswegen so früh zur Wissenschaft entwickeln, weil ihre Erscheinungen auf grundlegenden Naturgesetzen basieren, die nicht von Nebeneffekten verdunkelt werden. Die wichtig-

sten dieser Gesetze sind: die Gesetze von der Gravitation und der Trägheit der Materie sowie die Erhaltungssätze von Energie, Masse und Impuls. Unter den Nebeneffekten erweist sich die Reibung als besonders störend. Ihrer im wahrsten Sinne des Wortes hemmenden Wirkung ist es zuzuschreiben, daß die Entwicklung der Punktmechanik und damit der Physik erst mit GALILEI begann und nicht schon knapp zweitausend Jahre früher mit ARISTOTELES.

Wenn wir eine Kugel auf einer ebenen Fläche anstoßen, so kommt sie auf ihrer stets etwas rauhen Unterlage schnell wieder zur Ruhe. Daß sie »eigentlich« wegen der Erhaltung der Energie und des Impulses bis in alle Ewigkeit mit unveränderter Geschwindigkeit und ohne Änderung der Richtung weiterrollen müßte, wird durch die Reibung verschleiert. Zwar setzt diese die Erhaltungssätze keineswegs außer Kraft. Der Ablauf wird aber in sehr unanschaulicher Weise modifiziert (Umwandlung der Bewegungsenergie in Wärme), so daß seine Gesetzmäßigkeiten der naiven Beobachtung nicht mehr zugänglich sind.

Ganz anders die kosmischen Bewegungsvorgänge: Im Weltall gibt es keine Reibung oder vergleichbare Nebeneffekte. Erde und Mond kreisen seit ihrem »Anstoß« vor 5 Milliarden Jahren auf Bahnen, die sich in den Jahrtausenden menschlicher Kultur nicht geändert haben. Das ist die Ursache der so oft zitierten Präzision des himmlischen Uhrwerks. Dessen Periodizität wurde von dem für geometrische und arithmetrische Strukturen sehr empfänglichen menschlichen Geist sehr bald erkannt und ließ ihn schon früh einfache Gesetzmäßigkeiten ableiten.

Zur Illustration dieses Sachverhalts braucht man nur an den eklatanten Unterschied in der Zuverlässigkeit astronomischer und meteorologischer Vorhersagen zu denken. Beide Disziplinen haben mit Erscheinungen am Himmel zu tun. Aber ein zweistündiger Regenfall mit nachfolgender Aufheiterung ist eben mit dem Wetter 12 Tage früher oder später keineswegs direkt korreliert. Demgegenüber ist schon dem neolithischen Bauern aufgefallen, daß aus einer schmalen Mondsichel am westlichen Abendhimmel mit unfehlbarer Sicherheit ein Vollmond innerhalb von 12 Tagen vorausgesagt werden kann, so wie diese Sichel selbst 12 Tage zuvor aus der Mondphase »Letztes Viertel« abgeleitet werden konnte. Befindet sich die Sichel zudem noch an einer bestimmten

Stelle im Tierkreisgürtel, so kann bei Vollmond eine Mondfinsternis erwartet werden. Einige wenige Parameter genügen also, um dem neolithischen Sternbeobachter das Erfolgserlebnis »Vollmond« zu vermitteln, während die gleiche Geistesschärfe bei der Wettervorhersage höchstens zu einigen Bauernregeln mit recht geringer Trefferquote führt.

Deshalb können wir astronomische Grundkenntnisse überall dort erwarten, wo überhaupt eine kulturelle Entwicklung stattgefunden hat. Kenntnisse über die Sterne und ihre Bewegungen waren auch nicht nur im Mittelmeerraum verbreitet, wo die »antike Astronomie« gemeinhin angesiedelt wird. Zwar begünstigt das gute Klima dieser Gegend astronomische Beobachtungen, und viele astronomische Erscheinungen sind dort besonders deutlich. Aber die höheren geographischen Breiten bieten dem Beobachter ebenfalls himmelskundliche Phänomene von großer Eindringlichkeit: die Variabilität der Tageslänge ist stärker ausgeprägt, der Azimutbereich der Auf- und Untergangspunkte der Sonne (vgl. Abb. 1) drei- bis viermal so groß wie in tropischen Breiten. Besonders markant ist der Knotenumlauf der Mondbahn. Man versteht darunter den Umlauf des Schnittpunktes von Mondbahn und Bahnebene der Erde um die Sonne, der rund 19 Jahre (genau 18,61 Jahre) dauert (zur Erläuterung s. Abb. 3). Zwei Mondphasen in diesem zeitlichen Abstand sind einander fast gleich. Das gilt insbesondere für die Mondphasen »exakter Neumond« (= Sonnenfinsternis) und »exakter Vollmond« (= Mondfinsternis), die ebenfalls nach dieser Zeit wiederkehren und daher vorausberechnet werden können. In mediterranen Kulturkreisen ist dieser Zyklus als »Saroszyklus« (chaldäisch) oder »Metonischer Zyklus« (griechisch) bekannt. Er wurde aus Finsternislisten abgeleitet, die schriftlich vorlagen, was eine hochentwickelte Kultur voraussetzte.

Im Norden wirkt sich dieser Zyklus direkt in der beobachteten Mondstellung aus, weshalb er hier unabhängig von den relativ seltenen Finsternissen augenfällig wird. So ist der Wintervollmond bereits in der Höhe von Bergen, Norwegen, alle 19 Jahre zirkumpolar, geht dann also mehrere Tage lang nicht unter. In den gleichen Jahren geht der Sommervollmond gar nicht erst auf. Dieses Phänomen hat die Menschen jener Breiten sehr beeindruckt. Es hat deswegen auch Eingang in ihre Religion gefunden.

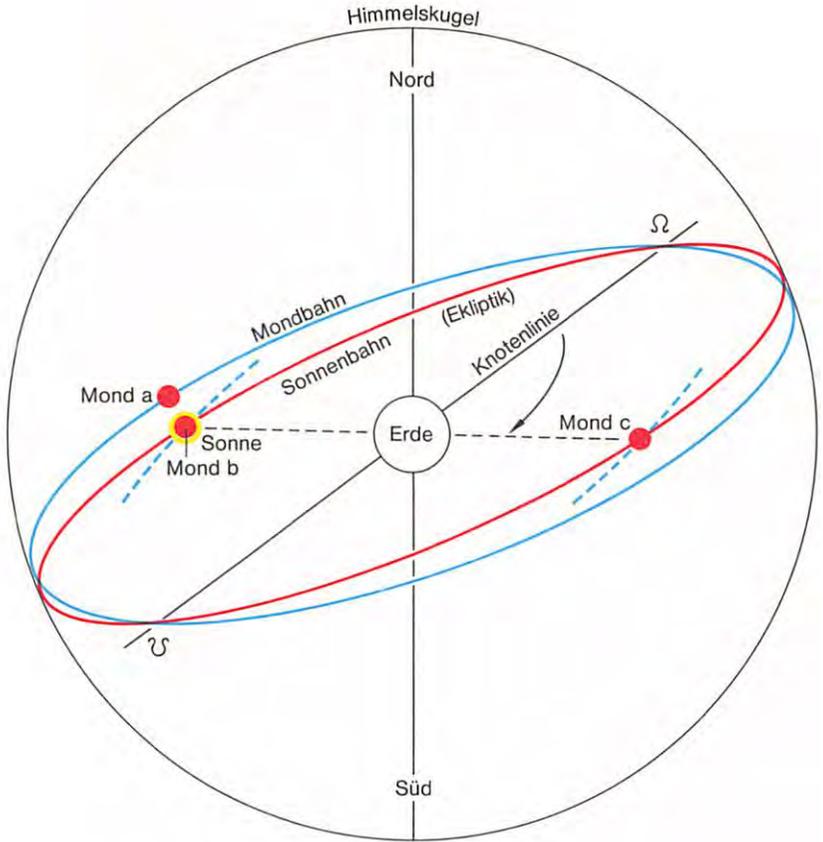


Abb. 3: Umlauf der »Knotenbahn« des Mondes. Die Skizze zeigt die scheinbare Sonnen- und Mondbahn an der Himmelskugel. Die Sonne vollendet ihren Umlauf in einem Jahr, der schnellere Mond in einem Monat. Die Sonne wird daher regelmäßig vom Mond überholt. In der Abbildung zieht der Mond (a) nördlich an der Sonne vorbei, eine Bedeckung der Sonnenscheibe (Sonnenfinsternis) tritt daher nicht ein. Die Schnittpunkte von Sonnen- und Mondbahn werden aufsteigender und absteigender Knoten genannt (Ω und ϖ), ihre Verbindung ist die Knotenlinie. Die Knotenlinie läuft entgegengesetzt zur Bewegung von Sonne und Mond in 18,6 Jahren um. Nach rund 4 Jahren hat sie die gestrichelte Position erreicht. (Teilstücke der Mondbahn sind an den betreffenden Stellen ebenfalls gestrichelt eingezeichnet.) In dieser Lage wird die Sonne durch den vorbeiziehenden Mond (b) verdeckt (Sonnenfinsternis). Einen halben Monat später steht die Erde genau zwischen Sonne und Mond (c) und eine Mondfinsternis resultiert.

Durch die ausgedehnten Handelsbeziehungen (berühmtes Beispiel: um 330 v. Chr. segelte der Grieche PYTHEAS von Marseille durch den Ärmelkanal und am friesischen Wattenmeer vorbei bis in die Gegend von Trondheim) kam Kunde von diesen außergewöhnlichen Himmelserscheinungen auch nach Griechenland und Rom. Der Schriftsteller DIODOR – ein Zeitgenosse CAESARS – sagt von den *Hyperboräern*, den »Einwohnern des äußersten Nordens«, daß ihr Gott *alle 19 Jahre* eine ihrer Inseln besuche.

In der Tat vereinfacht eine hohe geographische Breite nicht nur das Erkennen derartiger Phänomene, sondern auch deren quantitative Erfassung. Die astronomische Erklärung dafür ist, daß schon eine kleine Änderung der Deklination eines Gestirns eine ausgeprägte Änderung des Auf- oder Untergangszazimutes bewirkt (zur Veranschaulichung siehe wieder Abb. 1), die durch recht grobe Mittel wie einfache Steinsetzungen festgestellt werden kann. Das Zustandekommen z. B. einer Finsternis hängt aber entscheidend von der Deklination des Voll- oder Neumondes ab.

Stonehenge, ein Beispiel megalithischer Astronomie.

Beginnen wir unseren Streifzug durch die astronomische Antike im europäischen Neolithikum. Europa – flächenmäßig der Zweitkleinste der Kontinente – weist eine überraschend hohe Dichte vorgeschichtlicher Funde auf. Hier wurden die ersten Urmenschenreste entdeckt (Neandertal, 1856). Hier fanden die Archäologen die ersten Malereien aus der Eiszeit (1880).

Auch das berühmteste Beispiel megalithischer Baukunst findet sich in Europa. Es ist die Steinsetzung von *Stonehenge* in der Nähe von Salisbury/ Südengland (Abb. 4). Die Anlage ist heute weitgehend restauriert. Das Bauwerk besteht – vereinfacht ausgedrückt – aus vier oder fünf konzentrischen Kreisen. Der äußerste Ring, der sogenannte *Aubreykreis*, mißt 88 m im Durchmesser. Der innerste, bestehend aus den *Trilithen* (Dreisteinen), nur etwa 10 m. Die Vorgeschichtler unterscheiden heute mehrere Bauperioden von Stonehenge. Ihrer Ansicht nach erstreckte sich die Bauzeit über dreihundert Jahre. Um 1900 v. Chr. wurde von kontinentalen Steinzeitmenschen *Stonehenge I* erbaut. Die *Glockenbecherleute* ergänzten die Anlage um 1750 v. Chr. um den *Blausteinring* (Stonehenge II). Schließlich folgte um 1600 v. Chr. die dritte Er-



Abb. 4: Ein Blick auf die Steine von Stonehenge. Die Anlage wurde im 2. vorchristlichen Jahrtausend errichtet. Das Baumaterial wurde zum Teil aus vielen hundert Kilometern Entfernung herbeigebracht.

gänzung, in der die zentralen *Trilithen* hinzugefügt wurden (Stonehenge III). Stonehenge wurde also von außen nach innen erbaut.

Der englische Astrophysiker SIR NORMAN LOCKEYER wies 1906 darauf hin, daß die Sonne am Tage der Sommersonnenwende (21. Juni) genau über der Verbindungslinie Mittelpunkt der Anlage – Fersenstein (*heelstone*) aufgeht. Dieses Schauspiel ist heute Anziehungspunkt für viele Touristen.

Die erneuten Grabungen in Stonehenge in den Jahren 1963–65 und eine gleichzeitig erfolgte Neuvermessung der Anlage ermöglichten es dem amerikanischen Astronomen G. S. HAWKINS, eine genaue Analyse der Position der Steine und ihren Bezug zu Auf- und Untergangszazimuten auffälliger Himmelskörper durchzuführen. Das bemerkenswerteste Ergebnis war, daß Stonehenge neben seiner Funktion zur Beobachtung des Sonnenlaufs eine Einrichtung zur Feststellung der Mondbewegung gewesen ist und sich damit auch zur Berechnung von Sonnen- und Mondfinsternissen eignet.

Die Behauptung, daß die klobige, ungeschlacht wirkende Anlage die Vorausberechnung von Finsternissen ermöglicht, wirkt auf den ersten Blick überraschend, da wir heute für die präzise Berechnung von Sichtbarkeit und Verlauf einer Finsternis eine gründliche Kenntnis physikalischer Gesetze und mathematischer Methoden voraussetzen. Auch ist der Einsatz aufwendiger Rechenverfahren, z. B. Elektronenrechner, vonnöten, um den Beginn und die Dauer einer Finsternis auf Sekunden genau zu bestimmen und daraus Informationen über Sonne, Mond und Erde abzuleiten.

Für unsere steinzeitlichen Vorfahren war eine solche Präzision aber unnötig. Ihnen lag einzig und allein daran, vorhersagen zu können, wann mit Finsternissen gerechnet werden mußte. Das gab ihnen die Möglichkeit, sich seelisch auf das unheimliche Ereignis einzustellen und es in der Gewißheit überstehen zu können, daß es zwar nicht zu beeinflussen aber doch wenigstens in den Griff zu bekommen war. Und die Zusammenstellung eines Finsterniskalenders ist in der Tat so einfach, daß er sich auch mit den Möglichkeiten der Steinzeit erstellen ließ.

Die Abb. 5, auf welcher der geregelte Ablauf der Finsternisse – vom österreichischen Astronom Th. OPPOLZER als »Kanon der

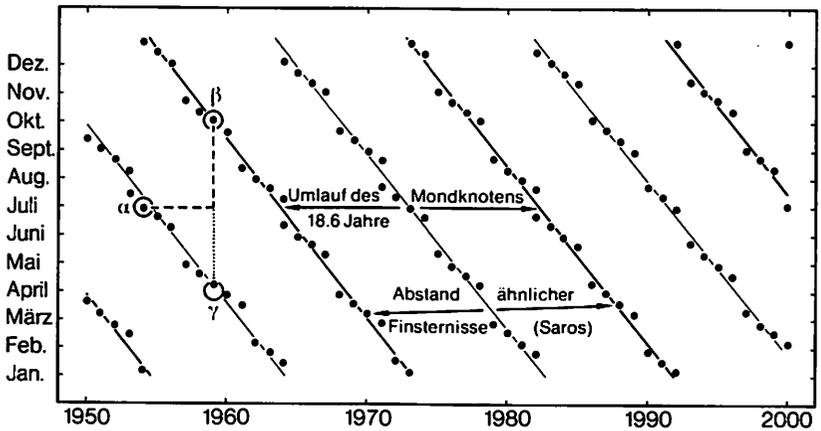


Abb. 5: Die Termine der Sonnenfinsternisse von 1950 bis 2000. Finsternisse wiederholen sich in sehr ähnlicher Weise im Abstand von 18 Jahren, 11 Tagen, dem Saroszyklus. Die als durchgezogene Linien dargestellten mittleren Abstände der Finsternisserien geben einen etwas größeren Wert von 18,6 Jahren (Knotenumlauf der Mondbahn). Auch nach 9,3 Jahren tritt bereits eine auffällige Wiederholung der Finsternisse ein (dünnere Linien). Ein praktisch gleich aussehendes Diagramm ließe sich auch für die Mondfinsternisse anfertigen. Der im Text beschriebenen Vorschrift zur Ermittlung der Finsternisse mit dem »Stonehenge-Abakus« entspricht ein Vorrücken von α nach β . Die gleichfalls erwähnte Variante dieser Vorschrift führt zum Punkt γ .

«Finsternisse» bezeichnet – graphisch dargestellt ist, läßt das auf einen Blick erkennen. Das Schema enthält alle Finsternisse für den Zeitraum von 1950 bis 2000. Es zeigt deutlich, daß Finsternisse nicht zu beliebigen Zeitpunkten zu erwarten sind, sondern daß sie in einem bestimmten Zyklus aufeinander folgen. Dieser Zyklus zeichnet sich durch klare Gesetzmäßigkeiten aus:

1. Finsternisse folgen einander im Abstand von einem halben Jahr.
2. Nach rund 9,3 und 18,6 Jahren (dem schon erwähnten Knotenumlauf) wiederholen sich Finsternisse unter ähnlichen Bedingungen.
3. Die Termine der Finsternisse verschieben sich von Jahr zu Jahr um 19 Tage.

Finsternisse sind folglich vorhersagbar und kommen offensichtlich genauso regelmäßig und sicher wie der Sonnenaufgang oder

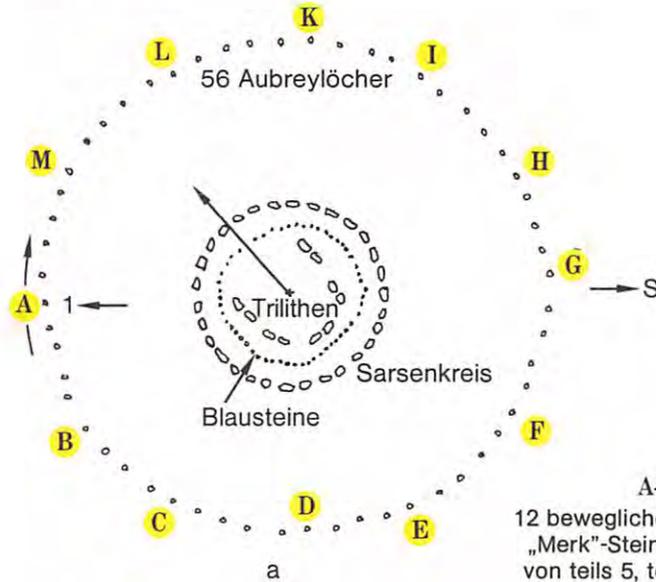
-untergang. Eine Eigentümlichkeit der Finsternisse zeigt das Diagramm allerdings nicht. Daß eine Finsternis auftritt, ist eine Sache, ob sie vom Beobachter auch gesehen werden kann, eine andere. Bei Mondfinsternissen liegt der Fall noch recht einfach, da sie stets sichtbar sind, wenn der Mond über dem Horizont steht. Das ist aber nur jedes zweite Mal der Fall. Sonnenfinsternisse sind natürlich auch nur sichtbar, wenn die Sonne über dem Horizont steht, aber ihre Sichtbarkeit hängt zusätzlich vom geographischen Standort des Beobachters ab. Der Steinzeitmensch hatte daher nur die Möglichkeit, »finsternisgefährdete« Tage zu berechnen. Ob es an diesen aber tatsächlich zu einer (sichtbaren) Sonnenfinsternis kommen würde, das konnte er vorher nicht wissen.

Nach dem Astronomen G. S. HAWKINS ist die Länge des Umlaufes des Mondknotens von 18,61 Jahren ein möglicher Schlüssel zum Geheimnis von Stonehenge. Das Dreifache dieser Zahl, 55,83, entspricht der Anzahl der Aubreylöcher: 56. Stellt man nun vor jedes vierte bis fünfte Loch des Aubreykreises einen beweglichen *Merkstein* – es wären insgesamt 12 – hat man damit ein einfaches Hilfsmittel zur Ermittlung von Finsternissen, gewissermaßen einen *kosmischen Abakus* (siehe Abb. 6).

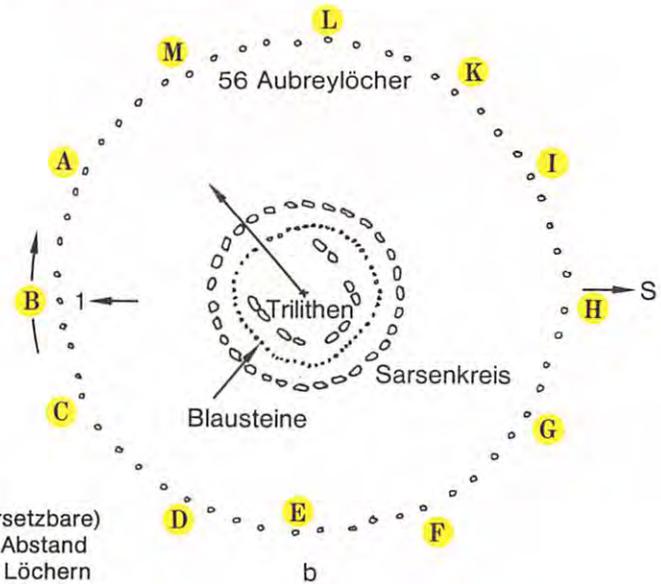
Die Schilderung der – oder besser: einer möglichen – Vorschrift zur Berechnung von Sonnen- und Mondfinsternissen mittels des »Stonehenge-Computers« wird anschaulicher, wenn wir damit Finsternisse der Gegenwart berechnen. Nehmen wir als Beispiel die Sonnenfinsternis vom 30. Juni 1954, eine Finsternis nahe Sommerbeginn. Diese Finsternis ist vielen Lesern sicher noch erinnerlich, da sie eine der beeindruckendsten Sonnenfinsternisse der letzten 50 Jahre in Deutschland war. Ihr soll in unserem Beispiel eine Stellung der Merksteine gemäß Abb. 6a entsprechen. Der Stein A steht dabei vor dem Aubreyloch Nr. 1. Nun rückt man jedes Jahr die Merksteine im Uhrzeigersinn um ein Loch weiter. Nach fünf Jahren steht dann Stein B vor Loch Nr. 1 (Abb. 6b). Wir vermerken daher $1954 + 5 = 1959$ als Jahr einer Finsternis.

Der genaue Zeitpunkt innerhalb des Jahres ergibt sich durch die Regel, den Finsternistermin um jeweils drei Monate weiterzuschalten. Damit erhalten wir den Herbstbeginn (30. September) 1959 als »finsternisgefährdeten Zeitpunkt«. Tatsächlich fand die nächste Finsternis am 2. Oktober dieses Jahres statt. Erneutes

◆ Fersenstein



◆ Fersenstein



A-M:

12 bewegliche (versetzbare)
„Merk“-Steine im Abstand
von teils 5, teils 4 Löchern

Abb. 6: Schematischer Grundriß von Stonehenge zur Erläuterung des Verfahrens der Finsternisbestimmung. Die linke Seite zeigt die Ausgangsstellung der Merksteine (z. B. für den 30. Juni

1954). Das rechte Diagramm zeigt die um fünf Löcher versetzten Merksteine (Finsternisvoraussage für den 30. September 1959, Eintritt am 2. Oktober 1959). Einzelheiten im Text.

Weiterrücken bringt nach 4 Jahren (also 1963) Stein C vor Loch Nr. 1. Die Regel bezüglich der Jahreszeiten ergibt den 30. Dezember 1963. An diesem Tag kam es zu einer Mondfinsternis! Die folgende Tabelle bringt eine Zusammenstellung der durch Stonehenge vorherberechneten Finsternisse und der tatsächlichen Finsternistermine. Die maximale Abweichung beträgt 25 Tage, im Mittel liegen nur 11 Tage zwischen Vorhersage und Eintreffen der Finsternis.

Tabelle 1

mit Stonehenge vorherberechnet	tatsächlicher Termin	Abweichung zwischen Stonehenge und OPPOLZER
30. 6. 54	SF 30. 6. 54	–
	MF 16. 7. 54	+ 16 Tage
30. 9. 59	SF 2. 10. 59	+ 3
30. 12. 63	MF 30. 12. 63	± 0
30. 3. 68	SF 28. 3. 68	– 2
	MF 13. 4. 68	+ 14
30. 6. 72	SF 10. 7. 72	+ 10
	MF 16. 9. 77	– 14
30. 9. 77	SF 12. 10. 77	+ 12
	SF 15. 12. 82	– 15
30. 12. 82	MF 30. 12. 82	± 0
	SF 9. 4. 86	+ 10
30. 3. 86	MF 24. 4. 86	+ 25
	MF 15. 6. 91	– 15
30. 6. 91	SF 11. 7. 91	+ 11
30. 9. 95	SF 24. 10. 95	+ 24
	SF 25. 12. 00	– 5
30. 12. 2000	MF 9. 1. 01	+ 10

SF : Sonnenfinsternis

MF: Mondfinsternis

Man kann diese Vorschrift nun in vielerlei Weise variieren. Zum Beispiel ist es möglich, statt der drei Monate voraus drei zurück zu gehen. Abb. 5 zeigt, daß man damit vom 30. Juni 1954 zum 30. März 1959 kommt und so im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit die Finsternis vom 10. April dieses Jahres erfaßt.

An dieser Stelle ist es notwendig, auf die Fallstricke hinzuweisen, die in der Gleichsetzung solcher megalithischer Steinkreise mit astronomischen Ortungsanlagen liegen. Der Leser wird vielleicht schon mit einiger Skepsis an die Tausende von möglichen Verbin-

dungslinien zwischen den Steinen von Stonehenge gedacht und die hohe Zufallswahrscheinlichkeit einer Ausrichtung auf Sternazimute bemerkt haben. Wenn man nämlich eine Steinanlage aus n Steinen betrachtet, so gibt es maximal $\frac{n \cdot (n-1)}{2}$ Verbindungslinien zwischen ihnen. Da jede von ihnen zwei um 180° versetzte Blickrichtungen ermöglicht, ergeben sich somit $n \cdot (n-1)$ Richtungen. Bei $n = 10$ Steinen erhalten wir bereits 90 Azimutrichtungen. Diese haben im Mittel einen Abstand von $360^\circ/90 = 4^\circ$, so daß von nur 10 Steinen praktisch der ganze Horizont überstrichen wird.

Deshalb ist klar, daß nicht der einzelne megalithische Steinkreis ein Garant urtümlicher astronomisch-kalendarischer Kenntnisse ist, sondern nur die Summe aller Indizien, die für eine astronomische Funktion derartiger Anlagen sprechen. Da es in der Tat eine Vielzahl derartiger megalithischer Bauwerke gibt, konnte der Astronomiegeschichtler Rolf MÜLLER, der in seinem sehr lesenswerten Buch »Der Himmel über dem Menschen der Steinzeit« etwa hundert dieser Anlagen diskutiert, aus der Summe seiner Erfahrungen den auch den Skeptiker überzeugenden Schluß ziehen, daß eine astronomische Funktion dieser Bauwerke zumindest als vernünftige Arbeitshypothese anzuerkennen sei.

Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Entdeckung des englischen Astronomen A. THOM, daß es im Megalithikum eine im gesamten westeuropäischen Kulturkreis gültige Maßeinheit gegeben hat, die »megalithische Elle« zu 82,9 cm. Diese Grundeinheit galt von den Hebriden bis nach Spanien, von Irland bis nach Ostdeutschland. Und sie wird ihre universelle Bedeutung vermutlich auch noch in allen weiteren Ländern beweisen, in denen megalithische Bauwerke gefunden werden.

Die Existenz und strenge Einhaltung der »megalithischen Elle« als Grundmaß in einem so großen Gebiet bedeutet eine fast hochkulturelle Durchstrukturierung zumindest in der Geometrie, die den geschilderten astronomischen Kenntnissen in keiner Weise nachsteht.

Persepolis

Die zweite in diesem Zusammenhang zu besprechende antike Anlage zur Ermittlung astronomischer Daten ist 1000 Jahre jün-

ger, liegt 5000 km von Stonehenge entfernt und kann weit besser zu dem in Relation gesetzt werden, was wir gemeinhin Weltgeschichte nennen. Es handelt sich dabei um die Palastanlage von Persepolis nahe Schiraz in Persien. Sie wurde weithin bekannt, als dort 1971 die Feier zum 2500jährigen Bestehen des persischen Reiches mit Staatsoberhäuptern aus aller Welt stattfand.

Dieses persische Reich hatte kaum seine erste Dekade hinter sich, als sein Gründer DARIUS I. den Frühlingsitz der Achämenidenkönige nach Persepolis verlegte. Die Orientalisten rätseln noch heute, was den Großkönig zu diesem Schritt bewegen haben könnte. In den Keilschriftarchiven, auf den Fassaden der Mauern von Persepolis und in den Schriften antiker Autoren finden sich keine Hinweise auf politische, militärische oder ökonomische Gründe. Ist Persepolis etwa nur aus einer Laune des Herrschers heraus geschaffen worden?

Zwei Dinge fallen dem Besucher der Ruinen von Persepolis auf. Einmal überraschen die guterhaltenen Reliefs an den Mauern. Ihre Makellosigkeit ist die unmittelbare Folge des Untergangs von Persepolis: ALEXANDER der Große brannte den Palast 200 Jahre nach seiner Gründung nieder. Der Brandschutt der Decken legte sich schützend auf die Reliefs und bewahrte sie bis zu ihrer Freilegung durch das *Oriental Institute of Chicago* im Jahre 1931. Um die zweite Besonderheit der Palastanlage kennenzulernen, muß man den benachbarten Bergrücken *Kuh-i-Rahmat* besteigen. Am Grabmal des ARTAXERXES vorbei gelangt man auf eine Höhe, die einen guten Gesamtüberblick über die Anlage vermittelt. Es zeigt sich, daß Persepolis nach einem einheitlichen Plan angelegt wurde, der auf den ersten Blick als schachbrettartig bezeichnet werden könnte. Zwei senkrecht aufeinanderstehende Achsen bilden die Bezugsrichtung für die über 30 Einzelpaläste. Die Hauptachse ist rund 20° gegen die Nordrichtung geneigt. Von Süden nach Norden werden die Gebäude größer, weswegen der Eindruck des Schachbretts nicht ganz zutrifft. Das Ganze kulminiert schließlich in dem Hundert-Säulensaal, dem Apadana und dem Xerxespalast (Abb. 7).

Gesamtplan und Ornamente lassen erkennen, daß den Erbauer vornehmlich zeremonielle Gesichtspunkte leiteten. Auf den Wänden kehren Reliefs vom Großkönig – oder einem königlichen Helden – immer wieder. Darüber ein geflügeltes Wesen, das von

den Fachleuten abwechselnd als der persische Gott *Ahura-Mazda* oder als geistiges Ich, *Fravashi*, gedeutet wird. Das uralte morgenländische Motiv vom Kampf zwischen Löwen und Stier ist ebenfalls mehrfach vertreten. An den Treppen finden sich Reliefs persischer und medischer Krieger, schließlich noch einmal der Großkönig, der von 28 Vasallen getragen wird. Dazwischen Inschriften von Touristen, die gelegentlich selbst schon Geschichte sind. Henry Morton STANLEY hat sich hier verewigt, bevor er den Afrikaforscher LIVINGSTON suchte.

Wie schon erwähnt, gibt es keine antiken Quellen, die direkten Aufschluß über die Funktion dieser Palastanlage geben. Immerhin kann man annehmen, daß der volkstümliche persische Namen der Ruinen, *Tachte Dschemschid*, sehr alt ist, und er mag ein erster Hinweis auf ihre frühere Funktion sein. Er bedeutet übersetzt »Thron des Königs Dschemschid«. DSCHEMSCHID war ein mythischer König, der nach dem Königsbuch des FIRDAUSI (Schahname) neben anderen Werken der Zivilisation auch den Neujahrstag eingerichtet hat. Jener Urkönig reiste im Lande umher. Kam er nach Aserbeidschan (im Nordwesten Persiens), so trugen ihn die Leute auf ihren Schultern umher. Wenn der erste Strahl der Morgensonne auf sein Antlitz fiel, war Jahresbeginn. Der Schriftsteller AL-BERUNI (gest. 1048) ergänzt, daß in den frühesten Zeiten der Jahresanfang der Perser mit der Sommersonnenwende (21. Juni) zusammenfiel.

Eine einfache Folgerung aus diesen Hinweisen zog der Hamburger Iranist W. LENTZ, der – auch auf andere Quellen gestützt – die Frage stellte, ob das Koordinatensystem von Persepolis nicht in Bezug zur Sommersonnenwende stände und somit diesen Tag, den alten persischen Neujahrstag, festzustellen gestattete.

Der Beweis für diese Vermutung ist recht leicht zu führen. Persepolis hat nur zwei Hauptrichtungen (Abb. 7), und eine davon müßte mit dem Sonnenstand zur Sommersonnenwende koinzidieren. Aufgrund vorläufiger Rechnungen zum Sonnenlauf des 6. vorchristlichen Jahrhunderts konnte ich in der Tat zeigen, daß zu jener Zeit die aufgehende Sonne zum Sommeranfang senkrecht auf die Palastanlage fiel. Nun unterscheidet sich der Sonnenlauf zur Zeit des DARIUS nur unwesentlich vom heutigen (die Ekliptik verlief steiler und die Jahreszeiten waren dadurch etwas ausgeprägter). Deshalb können zur Demonstration der antiken Be-

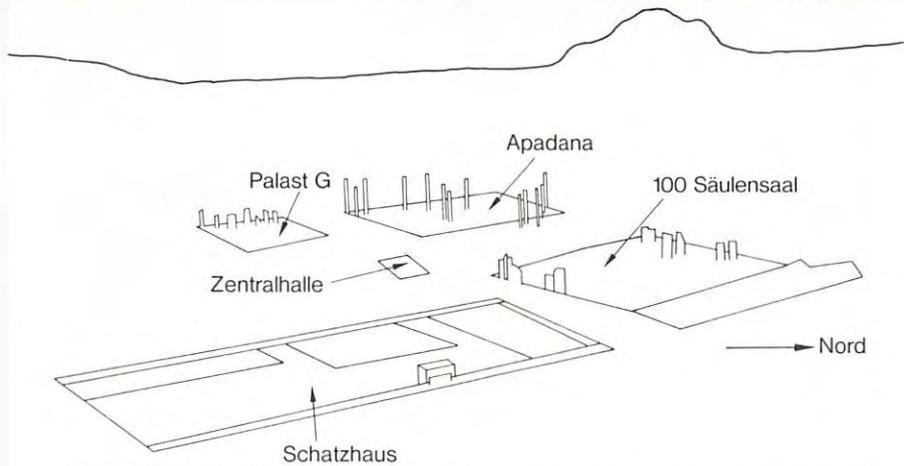


Abb. 7: Blick auf die Palastanlage von Persepolis nahe Schiraz in Persien. Die Skizze darunter verweist auf die im Text erwähnten Gebäudeteile.

leuchtungsverhältnisse Photographien von heute herangezogen werden, die um die Sommersonnenwende von Persepolis aufgenommen wurden. Auf Anregung von W. LENTZ und mir machte G. GROPP vom Deutschen Archäologischen Institut in Teheran im Juni 1970 Aufnahmen in der Palastanlage, die diese Annahme bestätigten.

Abb. 8 zeigt den Schattenwurf der Säulen zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs bei der Sommersonnenwende. Die Schatten der östlichen Säulen fallen genau auf die westlich davon stehenden. Man sieht auf der Abbildung, wie der Schatten über den Erdboden läuft und auf den in der gleichen Reihe stehenden Säulen endet. Die hohe Präzision in der Ausrichtung der Säulen – verglichen mit megalithischen Steinsetzungen – erhöht die Genauigkeit der Bestimmung des Sonnenwenden-Termins.

Vieles spricht dafür, daß die Sommersonnenwende zu den Zeiten des DARIUS als großes Fest gefeiert wurde. W. LENTZ nimmt an, daß die Hofastronomen und -astrologen den Sonnenlauf vermutlich im Südteil der Palastanlage genau verfolgten und den ungefähren Zeitpunkt für das Fest voraussagten, damit die Vorbereitungen rechtzeitig getroffen werden konnten. Es liegt nahe, daß diesem Fest Hunderte von Würdenträgern und Abgesandte des ganzen persischen Reiches beiwohnten. Am vorausberechneten Tag versammelte sich der Hofstaat im Morgengrauen und begrüßte zusammen mit dem Großkönig die aufgehende Sonne und damit das Neue Jahr. Sicher sind dem König bei der Zeremonie auch religiöse Funktionen zugefallen. Indogermanische Religionen sind Himmelsreligionen, in denen die Sonne stets eine große Rolle spielt.

Die Aufnahmen von G. GROPP erlauben noch einige andere Feststellungen, die für das Verständnis der Funktion von Persepolis von Bedeutung sind. Die Sonne geht für Persepolis nicht im mathematisch-astronomischen Horizont auf, sondern etwas erhöht über der Bergkette *Kuh-i-Rahmat* (Abb. 9). Dadurch werden die verschiedenen Teile der Palastanlage nicht gleichzeitig von den Strahlen der aufgehenden Sonne getroffen. Für die westlichen Teile von Persepolis erscheint die Sonne früher als für die östlichen. Außerdem steigt die Sonne nicht senkrecht aus dem Horizont, sondern verlagert ihren Azimut langsam von Nordosten in südliche Richtung. Eine mathematische Analyse dieses Sachver-

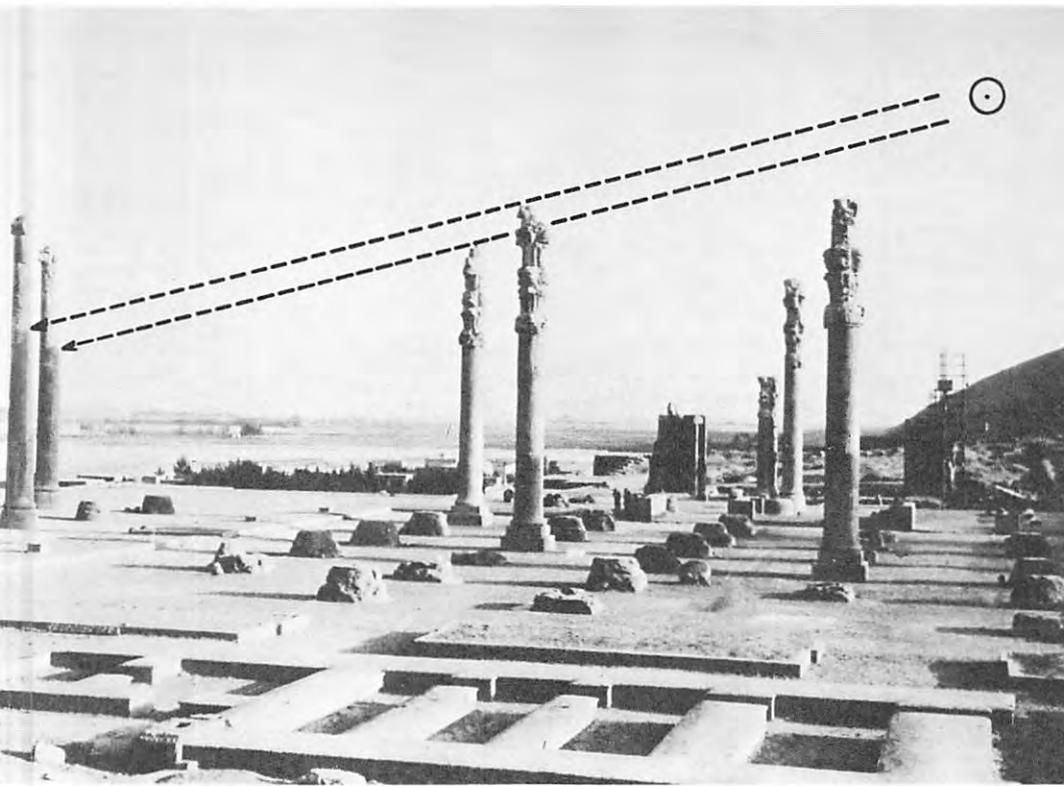


Abb. 8: Blick vom Palast G zum Apadana (Aufnahme GROPP, 1970). Die Schatten der östlich stehenden Säulen fallen bei Sonnenaufgang zur Sommersonnenwende genau auf die in gleicher Reihe westlich davon stehenden Säulen. Zur Lokalisierung der Gebäude siehe Abb. 7.

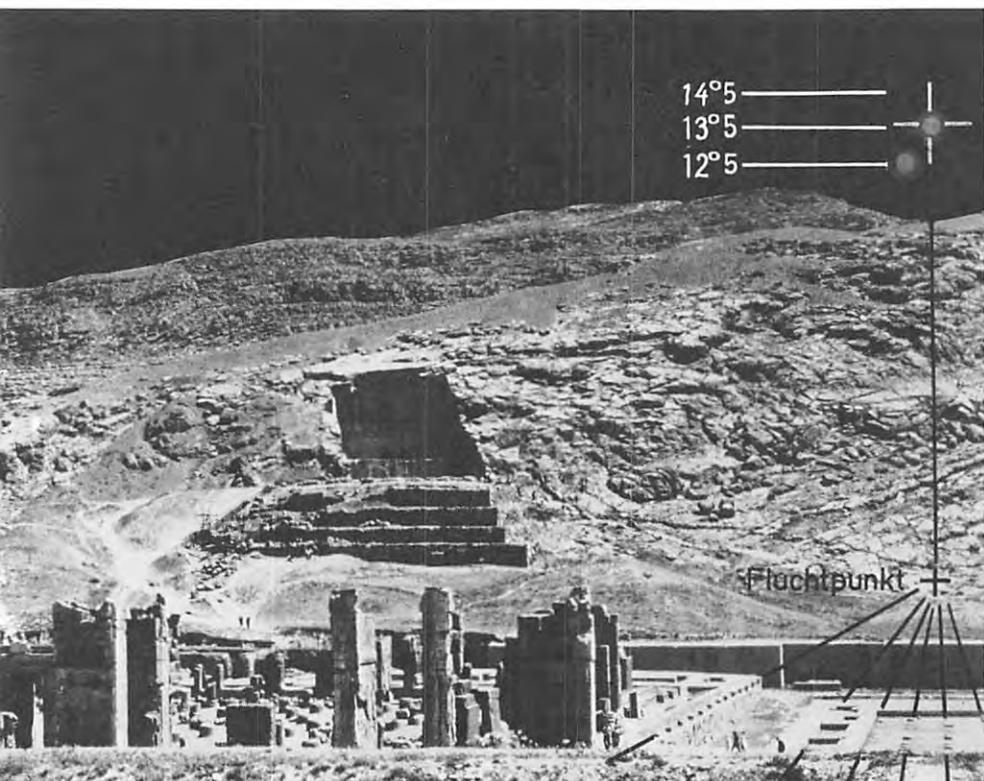


Abb. 9: Sonnenaufgang über Persepolis zur Sommersonnenwende. Aufnahme-standpunkt ist der Palast G. In eine Tagesaufnahme (JETTMAR) wurden zwei Aufnahmen von GROPP einkopiert, die den Sonnenaufgang zur Sommersonnenwende zeigen. Die Skala gibt die Sonnenhöhe bei Erreichen des Fluchtpunktes mit $13,5^\circ$ über dem Horizont an. Berücksichtigung des Geländes läßt die Zentralhalle als wahrscheinlichsten Beobachtungsort hervortreten (siehe Abb. 7).

haltes zeigt, daß nur eine schmale, etwa 10 m breite Zone für den wirklich exakt senkrechten Einfall der Sonnenstrahlen in Frage kommt. Diese Zone verläuft interessanterweise nun durch eine Halle, deren unauffällige Lage und Form mit ihrem anspruchsvollen Namen »Thron«- oder »Zentralhalle« (Abb. 7), kontrastiert. Dieser Halle kommt also tatsächlich eine besondere Bedeutung zu: Von hier aus war die Bestimmung der Sonnenwende mit besonderer Genauigkeit möglich. Es ist daher sehr wahrscheinlich, daß von dieser Halle aus der Beginn des Neujahrs in allen Satrapien des Reiches verkündet wurde.

Wie eingangs bemerkt, liegen Zweck und Motiv der Gründung von Persepolis noch weitgehend im Dunkeln. Was den Zweck betrifft, so konnten durch die Untersuchungen von W. LENTZ und mir Argumente für eine *kalendarische* Funktion erbracht werden. Aber selbstverständlich kann dies nur eine von vielen, vielleicht eine wichtige, ganz sicher aber nicht die einzige Aufgabe von Persepolis gewesen sein. Es scheint aber, daß bei der Gründung der Anlage auch *astronomische* Gesichtspunkte eine Rolle spielten. Anlässlich der Berechnungen des Sonnenlaufs hatte ich auch alle markanten astronomischen Phänomene in der dem Baubeginn vorausgehenden Dekade (530–520 v. Chr.) errechnet, in der Hoffnung, dabei auf bemerkenswerte Himmelserscheinungen zu stoßen, die den Baubeginn der Palastanlage als *Omina* beeinflussen haben könnten. Aus diesem Grunde rechnete ich alle wichtigen Planetenkonstellationen durch und untersuchte alle Sonnen- und Mondfinsternisse, und ebenso alle Kometenerscheinungen auf ihre Sichtbarkeit in Persepolis hin.

Die Mühe lohnte sich. Ich stieß tatsächlich auf zwei bemerkenswerte Erscheinungen, denen von den sterngläubigen Persern eine Vorbedeutung beigemessen werden konnte.

Als erstes muß die Sonnenfinsternis vom 10. Juni 521 v. Chr. erwähnt werden. An diesem Tag ging die verfinsterte Sonne über der arabischen Halbinsel *Qatar* auf. Von dort aus überquerte der Schatten des Mondes mit dreifacher Schallgeschwindigkeit den Persischen Golf und erreichte gegen 5¹⁰ Ortszeit die Küste Persiens. Er überzog das persische Kernland *Fars* in voller Länge, bis er gegen 5²⁵ im heutigen Afghanistan verschwand. Da die Totalitätszone somit quer durch Persien verlief, wurde diese Sonnenfin-

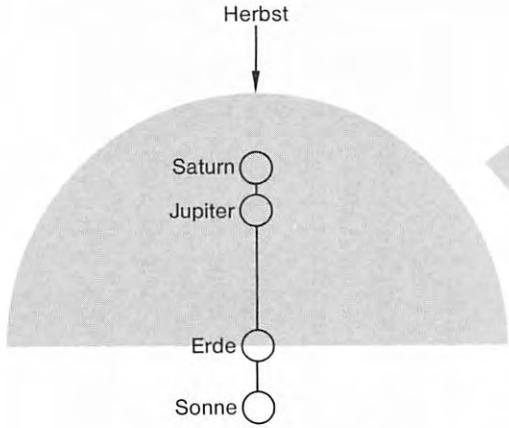
sternis praktisch von allen Einwohnern gesehen und hat diese sicherlich tief beeindruckt.

Totale Sonnenfinsternisse sind für ein gegebenes Gebiet ja sehr selten. In Deutschland war die letzte totale Sonnenfinsternis 1887 sichtbar. Die nächste wird erst wieder am 11. August 1999 eintreten. Bei der Finsternis vom 10. Juni 521 v. Chr. kam hinzu, daß sie 11 Tage vor dem Fest der Sommersonnenwende stattfand. Für die den Sonnenlauf verfolgenden Astronomen muß es ein rechter Schock gewesen sein, als die Sonne an diesem Tag nur als schmale Sichel aufging, immer mehr abnahm, um schließlich ganz zu verschwinden. Die Helligkeit des kaum begonnenen Tages sank für kurze Zeit auf die einer Vollmondnacht herab, während die geisterhaft glimmende Sonnenkorona das Land beleuchtete.

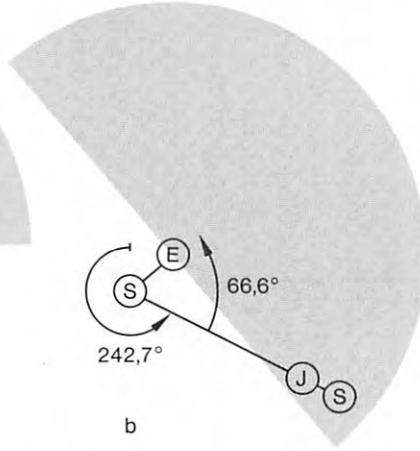
Die zweite bemerkenswerte himmlische Erscheinung jener Zeit fand am Nachthimmel statt. Es handelt sich dabei um eine »Konjunktion« der Planeten Jupiter und Saturn. Von den mit bloßem Auge sichtbaren Planeten haben Jupiter und Saturn die längsten Umlaufzeiten. Jupiter braucht 11,86 Jahre, Saturn 29,46 Jahre für eine Umrundung der Sonne. Wenn wir einmal von einer Planetenkonstellation ausgehen, in der Sonne, Erde, Jupiter und Saturn auf einer Linie liegen. (Abb. 10 a), so vergehen 19,86 Jahre bis Sonne, Jupiter und Saturn wiederum (annähernd) auf einer Geraden liegen (Abb. 10 b). Für den Beobachter auf der Erde stehen die beiden Planeten bei dieser Konstellation scheinbar dicht nebeneinander. Dieses Nebeneinander zweier Planeten wird als Konjunktion bezeichnet.

Aus Abb. 10 b wird aber auch ersichtlich, daß sich die Erde im zweiten Fall nicht mehr auf der gemeinsamen Verbindungslinie von Sonne, Jupiter und Saturn befindet, sondern $66,6^\circ$ seitlich von ihr. Das bedeutet, daß die Konjunktion nicht mehr – wie in

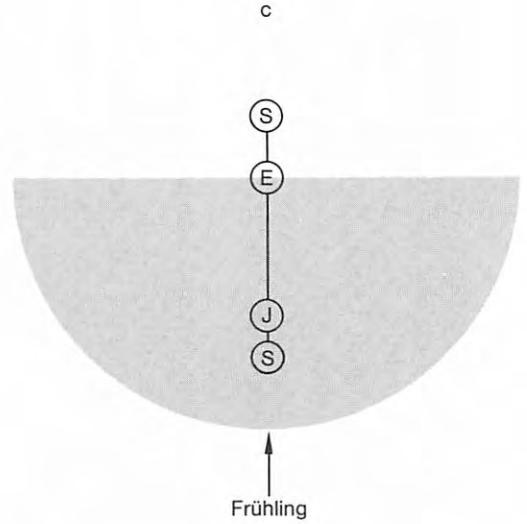
Abb. 10: Konjunktionen der Planeten Jupiter und Saturn. Die Diagramme zeigen ein idealisiertes Planetensystem mit kreisförmig angenommenen Bahnen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Größen- und Abstandsverhältnisse nicht maßstabgerecht wiedergegeben. Ausgehend von der Großen Konjunktion des Jahres 7 v. Chr. (a) zeigt (b) die 19,86 Jahre darauf erfolgende Konjunktion. Hier steht die Erde $66,6^\circ$ seitlich, so daß die Planeten nur noch einen Teil der Nacht am Himmel stehen. Diese selbst stehen $242,7^\circ$ von ihrer Ausgangsposition in (a) entfernt. Das Diagramm (c) zeigt die Situation im Frühjahr 522 v. Chr. (Schraffiert jeweils die Nachtseite der Erde)



a



b



Frühling

Abb. 10 a – die ganze Nacht sichtbar ist, sondern nur noch während der ersten Nachthälfte. Das macht natürlich nicht einen so großen Eindruck wie eine Konjunktion, die während der ganzen Nacht sichtbar bleibt. Konjunktionen, die entgegengesetzt zur Sonne stehen, werden auch »Große Konjunktionen« genannt. Sie sind besonders eindrucksvoll. Für uns sind nun zwei Große Konjunktionen von besonderem Interesse, nämlich die der Jahre 522 und 7 v. Chr.

Konstellationen und Konjunktionen der Planeten Jupiter und Saturn haben seit jeher das besondere Interesse des alten Orients gefunden. Jupiter galt, durch Glanz und Ruhe seiner Bewegung am Himmel ausgezeichnet, als »Königsstern«. In der klassischen Antike des griechisch-römischen Kulturkreises war er der Stern des obersten Gottes ZEUS-JUPITER. In Mesopotamien war er der Stern des Stadtgottes Babylons, MARDUK, der später zum höchsten Gott des babylonischen Pantheons avancierte. Demgegenüber war das Gefühl, das Saturn bei den Menschen erweckte, eher ängstlich getönt. Bleich und langsam, wie er seine Bahn am Himmel zog, war er der Stern des Todes. So kann man das besondere Interesse verstehen, mit dem eine Konjunktion dieser beiden großen Planeten beobachtet und – sofern die rechnerischen Mittel zur Verfügung standen – vorherberechnet wurde.

Die astrologischen Deutungen der Konjunktionen von Jupiter und Saturn liefen wegen der gegensätzlichen Wertung der Planeten weit auseinander. Positive und negative Einschätzung halten sich etwa die Waage. Stets aber fand ein solches Ereignis gebührende Beachtung.

Von herausragender Bedeutung war die Konjunktion des Jahres 7 v. Chr. Seit KEPLER wird sie von vielen Wissenschaftlern als astronomischer Hintergrund der Geschichte des Sterns von Bethlehem angesehen. Da das Geburtsjahr JESU CHRISTI und somit der Beginn der heutigen abendländischen Zeitrechnung erst ein halbes Jahrtausend später vom Abt DIONYS EXIGUUS rückgerechnet wurde, und dieser nach heutiger Ansicht Christi Geburt um 7 Jahre zu spät ansetzte, ergibt sich keine zeitliche Diskrepanz. Die Konjunktion des Jahres 7 v. Chr. war eine Große Konjunktion. Die beiden Planeten bewegten sich 12 Stunden, von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang, gemeinsam am nächtlichen Himmel. Während eines knappen halben Jahres zogen sie ihre

Schleifen umeinander (mittlerer Zeitpunkt der Konjunktion: 7. Sept. 7 v. Chr.) und näherten sich einander dreimal bis auf etwa 1° Abstand. Diese Erscheinung war von den »Heiligen Königen«, wahrscheinlich Magiern einer babylonischen Astrologenschule, vorherberechnet worden. Ihre Deutung besagte, daß in Judäa eine Königsgeburt stattfinden werde. Die Lokalisierung dieser Geburt ergab sich aus einer früher häufig geübten Gleichsetzung von Tierkreiszeichen mit bestimmten Ländern des Vorderen Orients: Das Sternbild Fische, in dem die Konjunktion stattfand, vertrat am Himmel nach Meinung babylonischer Astrologen das Land Judäa.

Dies alles bliebe bloße Hypothese, wenn nicht auch die Bibel deutliche Hinweise auf jene astronomische Erscheinung gäbe. Durch Ungenauigkeiten der Übersetzung sind sie nur weitgehend verdeckt. Von den vier Evangelisten berichten MATTHÄUS und LUKAS über die Geburt Christi. LUKAS beschränkt sich auf das eigentliche Weihnachtsgeschehen, während MATTHÄUS die drei Weisen aus dem Morgenland und den Stern erwähnt, der sie nach Bethlehem führte. Der österreichische Astronom K. FERRARI d'OCCHIEPPO gibt in seinem Buch »Der Stern der Weisen« eine Übersetzung der Weihnachtsgeschichte aus der griechischen *Koine*, die merklich von der uns vertrauten Form abweicht. So wird die Wendung ἐν τῇ ἀνατολῇ in herkömmlichen Übersetzungen mit »im Morgenland« wiedergegeben, während dies nach FERRARI d'OCCHIEPPO ein Fachausdruck der damaligen Astronomie war und »Stern im Abendaufgang« bedeutete. Damit erhält die Weihnachtsgeschichte im Matthäus-Evangelium eine astronomische Dimension, die sich mit der Konjunktion von Jupiter und Saturn im Jahre 7 v. Chr. in Einklang bringen läßt.

Die Erwähnung der Magier in der Weihnachtsgeschichte ist darüber hinaus noch insofern interessant, als das Wort Magier über das griechische μάγοι vom persischen ma-gu-u-ša abgeleitet wird. Die Magier sind zunächst einfach Priester der altiranischen Religion und des Parsismus. Erst in späterer Zeit wurde der Name zum Synonym für Zauberer, Wahrsager und Traumdeuter. Wir haben hier zumindest sprachlich also einen Hinweis auf Persien.

Blicken wir nun von Christi Geburt 26 Konjunktionen zurück. Bei einem Abstand von 19,86 Jahren zwischen zwei Konjunktio-

nen kommen wir ins Jahr 523 v. Chr. Nun müssen wir eine kleine Korrektur wegen der doch nicht ganz exakt kreisförmigen Bahnen anbringen: die dem Baubeginn von Persepolis vorausgehende Konjunktion fand im März 522 v. Chr. statt.

Der Abb. 10 c können wir entnehmen, daß die Stellung von Jupiter und Saturn jetzt der im Jahre 7 v. Chr. diametral entgegengesetzt war. Der Differenzwinkel von Konjunktion zu Konjunktion ($242,7^\circ$) ergibt nämlich mit 26 multipliziert 6310° , welches durch schrittweise Subtraktion von 360° auf die handlichere Größe von 190° zurückgeführt werden kann. Die Erde befindet sich aber ebenfalls in diametraler Position zu ihrer Stellung des Jahres 7 v. Chr., da wir in der Jahreszeit um ein halbes Jahr zurück sind (März gegen September). Kurz, die dem Baubeginn von Persepolis vorausgegangene Konjunktion dieser beiden Planeten war auch eine Große Konjunktion, die der von 7 v. Chr. fast aufs Haar entsprach.

Es wird in diesem Zusammenhang vielleicht interessieren, daß die nächste Konjunktion von Jupiter und Saturn die 100. seit Christi Geburt sein wird. Die kleine Rechnung $7 \text{ v. Chr.} + 100 \cdot 19,86$ läßt sie in einem knappen Jahrzehnt erwarten.

Mit der einfachen Annahme, daß Erde, Jupiter und Saturn auf idealen Kreisen mit konstanten Geschwindigkeiten umlaufen, konnten wir die Bewegungen der Planeten am Himmel über zweieinhalb Jahrtausende verfolgen. Die Art und Weise unseres Vorgehens war dabei typisch für die in der Antike durchgeführten Vorausberechnungen von Himmelserscheinungen. Der einzige Unterschied liegt darin, daß wir das Kopernikanische Weltbild zugrundegelegt haben (s. Abb. 10). Das ist zwar von fundamentaler Bedeutung für unser Verständnis vom Aufbau des Sonnensystems. Auf die Resultate von Rechnungen, wie wir sie in diesem Abschnitt angestellt haben, bleibt das aber ohne jeden Einfluß. Für die Ermittlung der Zeitpunkte von Konjunktionen oder ähnlichen Himmelsphänomenen hätten wir daher mit der gleichen Präzision auch vom antiken ptolemäischen Weltsystem ausgehen können.

Zwischen Antike und Neuzeit

Das persische Erbe überdauerte den Untergang von Persepolis rund ein halbes Jahrtausend und lebte im römischen Weltreich

wieder auf. Im Mithraskult erstarkte es noch einmal zu einer bedeutenden Religion. Zentralgestalt war der alte iranische Lichtgott MITHRAS («Das Gesetz»). MITHRAS wird zum ersten Male acht-hundert Jahre vor der Gründung von Persepolis erwähnt. Sein Kult nahm in römischer Zeit die Form einer Mysterienreligion an und war besonders bei den römischen Soldaten verbreitet. So gibt es *Mithräen* – wie die Heiligtümer des persischen Gottes genannt wurden – an allen Orten, an denen römische Legionen standen oder Veteranen des römischen Heeres ihren Lebensabend als Siedler verbrachten. Daher finden wir sie häufig an der Grenze des alten römischen Imperiums: in London ebenso wie in Dura-Europos (Syrien), Saarbrücken oder Stockstadt am Main.

Die Anhänger des Mithraskults waren zur Verschwiegenheit verpflichtet. Deshalb sind wir auf Ausgrabungen und Zeugnisse der konkurrierenden Religionen angewiesen. Eine starke Bindung an astronomisch-astrologische Vorstellungen ist unbestritten. MITHRAS verkörpert die helle Mittagssonne, seine Begleiter CAUTES und CAUTOPATES die Morgen- und Abendsonne. In Dutzenden von Inschriften wird er als unbesiegter Sonnengott angerufen (*deus sol invictus*). Die Oberpriester waren dem Dienst des Himmels und der Gestirne geweiht, wie uns ein Text aus dem Jahre 382 n. Chr. verrät.

In die gleiche Richtung zielt eine Interpretation der baulichen Anlagen der Mithräen. Sie befanden sich häufig in Höhlen oder ahmten doch in ihrem Aufbau Grotten oder Gewölbe nach. Einen Lichtgott in einem dunklen Raum zu verehren, mag zunächst merkwürdig erscheinen. Diese Gepflogenheit gab den Priestern jedoch die Möglichkeit, Licht und Schatten der Sonnenstrahlen, die durch Öffnungen im Mauerwerk ins Innere fielen, zur Bestimmung wichtiger religiöser Termine zu nutzen.

Ihr besonderes Augenmerk richteten sie naturgemäß auf den Sonnenlauf. Dabei waren wieder die Tage der Sonnenwenden, in diesem Fall die Wintersonnenwenden, besonders wichtig, da sie den Neubeginn des jährlichen Sonnenlaufs ankündigten. Deshalb war der 25. Dezember der bedeutendste Tag des Jahres im liturgischen Kalender der Mithrasgemeinde. An diesem Tag hatte die Sonne ihren winterlichen Tiefststand (Wintersolstitium) überwunden und bewegte sich zum ersten Mal deutlich sichtbar nach

Süden, zur Wärme hin. So wurde MITHRAS als *genitor luminis*, als Erzeuger des Lichts verehrt.

Moderne Beobachtungsverfahren können die Wintersonnenwende auf Sekunden genau festlegen. Mit dem bloßen Auge und unterstützt durch Horizontmale und ähnliche Markierungen muß eine Fehlerbreite von einigen Tagen in Kauf genommen werden. So kommt es zum 25. (anstatt 22.) Dezember als Termin für MITHRAS Geburt. Als das Christentum seinen Siegeszug über den damaligen Hauptkonkurrenten antrat, übernahm es diesen Tag als Christi Geburtstag, obwohl die Geburt des historischen CHRISTUS eher in den Herbst gefallen sein dürfte (siehe den vorhergehenden Abschnitt).

Das Mithräum in Saarbrücken (in einer Höhle des Halberges oberhalb der Stadt) wird zur Zeit von Historikern und Astronomen auf eine mögliche astronomische Funktion hin untersucht. Es sind zwar noch viele Probleme zu klären, aber aus astronomischer Sicht kann gesagt werden, daß die Anlage im Halberg zur Bestimmung der Wintersonnenwende geeignet war und auch sonst zur Festlegung wichtiger Daten des Sonnen- und Mondlaufes.

Mit dem Erlöschen der großen Astralreligionen wurde den in diesem Aufsatz erörterten kalendarischen Techniken der transzendente Unterbau entzogen. Die gleiche Wirkung hatte die Einführung der Hochkulturkalender, bei denen schließlich nur noch die Wochen- und Monatsnamen an die ursprüngliche Beziehung zu höheren Mächten erinnern. In kulturellen Rückzugsgebieten überdauerte das antike Erbe stellenweise jedoch bis in unsere Zeit hinein. Im indoiranischen Raum sind es vor allem die Bergtäler des Hindukusch, in denen sich die alten Beobachtungstechniken bis heute erhalten haben. Interessante Beispiele sind in der umfangreichen Monographie »Zeitrechnung in Nuristan und am Pamir« von W. LENTZ aufgeführt. Nuristan wurde erst im letzten Jahrhundert islamisiert. Danach erst erhielt es auch den jetzigen Namen: Nuristan = Land des Lichts. Zuvor hieß es Kafiristan = Land der Ungläubigen. Nun ist Unglauben aber ein relativer Begriff: die Einwohner des Hindukusch hatten jedenfalls einen Pantheon, der iranische Züge aufwies. Es gab sogar einen Gott der Schalttage, der den Namen GISCH trug.

Die Zeitrechnung in diesem Gebiet war von Tal zu Tal verschieden. Folglich mußte es auch für jede Kommune Männer geben,

die für die Festsetzung des Jahresbeginns und anderer Stichtage zuständig waren. Dies waren stets Respektspersonen mit geistlichem oder weltlichem Rang. In vielen Häusern befanden sich Öffnungen, durch welche bei Sonnenaufgang Lichtkreise auf die gegenüberliegende Wand fielen. Der Sonnenauf- und -untergang hinter auffälligen Landschaftspunkten wie Berggipfeln und Gletschern wurde zur Bestimmung des jeweiligen Monats herangezogen. So entstanden Monatsnamen wie »Gletschermonat«, »Felspaltmonat« etc. Auf dem Palast eines regionalen Königs im Hunza-Nagir-Gebiet befand sich ein Gestell, dessen Schattenform sogar als Schriftzeichen für den betreffenden Monat galt.

Diese Fakten sind insofern interessant, als hier auf provinzieller Ebene genau das nachgespielt wurde, was Tausende von Jahren zuvor am Hofe des DARIUS aufgeführt worden war. Hier, in der Provinz, spielt jedoch die zweite Besetzung. Die Funktion des Großkönigs wird vom Ortsgeistlichen oder einem regionalen König übernommen und die Festsetzung des Neujahrsbeginns gilt nicht mehr für die Satrapien eines Weltreiches, sondern nur noch für die benachbarten Dörfer.

Ein kurdisches Mondobservatorium der Gegenwart

Wir beenden unseren Streifzug durch urtümliche astronomische Anlagen in einem Mondobservatorium, das noch in unserem Jahrhundert im irakischen Kurdistan ähnliche Funktionen zu erfüllen hatte wie Stonehenge fast 4000 Jahre zuvor. Hier der Bericht eines der Beobachter an diesem Bauwerk, des Kurden JEMAL NEBEZ, der später in Europa studierte und den ich bei dieser Gelegenheit kennenlernte (etwas verändert nach NEBEZ/SCHLOSSER, 1972):

»Bei diesem Mondobservatorium handelt es sich um ein aus Steinen und Lehm errichtetes zylindrisches Türmchen von anderthalb Metern Höhe und etwa einem Meter Durchmesser auf der Spitze des Berges Gilazarda westlich der Stadt Sulaimani. Die Wand dieses Turmbaus war in ihrem oberen Teil an ungefähr sechzig Stellen durchlöchert. Der islamische Geistliche pflegte dort zu Beginn des letzten und dann wieder zu Anfang des ersten islamischen Mondmonats durch zwei einander gegenüberliegende Löcher den

ersten Schein des Neuen Mondes festzustellen und danach Beginn und Ende der Fastenzeit vorherzubestimmen. Da die Augen des alten Herrn schon schwach geworden waren, leitete er mich selbst in meiner Jugend, das ist etwa ein Vierteljahrhundert her, des öfteren an, nach der schmalen Mondsichel zu forschen, indem er mich durch die Löcher schauen ließ. Die einheimische Bevölkerung wußte, daß der Bau im 18. Jahrhundert von dem kurdischen Gelehrten Scheich HASANI GILAZARDA für astronomische Beobachtungen errichtet worden war. Sein Grab befindet sich auf dem Berg.«

Es wurde also am westlichen Abendhimmel die nach Neumond erstmals wieder sichtbare Mondsichel aufgesucht und dadurch der Beginn des Fastenmonats *Ramadan* bestimmt. Aus der religiös bedingten Notwendigkeit, die schmale Sichel am noch recht hellen Abendhimmel so früh wie möglich zu entdecken, ergibt sich die Aufstellung auf einem Berg. Von diesem erhöhten Standpunkt aus wird die Horizontlinie durch die umliegenden Berge nur noch geringfügig angehoben, so daß der Horizont relativ frei liegt.

Etwa in Augenhöhe waren rund 60 Öffnungen in die Zylinderwand eingelassen. Der zylindrische Turm stellte somit eine Art Winkelmesser für Azimute dar. Er kann als Weiterentwicklung der urtümlichen Steinsetzungen und Baufluchtlinien gelten und bringt ein quantitatives Element in die Beobachtung. Die Einheit dieses Azimutwinkelmessers war 6° ($360^\circ/60$). Sie war auch zugleich der maximale Wert für das Gesichtsfeld beim Blick durch die Öffnungen. Um die Frage zu klären, wie dieses einfache Winkelmeßinstrument zur Feststellung religiöser Daten herangezogen werden konnte, muß man kurz auf einige Einzelheiten der Mondbewegung eingehen.

Für einen Ort der geographischen Breite des Berges Gilazarda ($35,5^\circ$) kann der Untergangszimut des Mondes um 72° variieren. Es dürfte sehr schwer sein, die horizontnahe schmale Sichel des jungen Mondes innerhalb eines so großen Horizontbereiches mit der zur Einhaltung der religiösen Riten notwendigen Sicherheit aufzufinden. Man muß sich hierbei vor Augen halten, daß die Mondsichel ja nicht feststeht, sondern innerhalb kurzer Zeit in die lichtschluckenden Schichten dicht über dem Horizont wandert und gleich darauf untergeht. Erheblich enger läßt sich jedoch der

Azimut der Mondsichel eingrenzen, wenn man von der Tatsache Gebrauch macht, daß die Azimute der untergehenden Sonne und der ihr dicht folgenden Sichel während dieser Mondphase nie sehr weit voneinander entfernt sind.

Die Mondsichel ist frühestens 22 Stunden nach dem astronomischen Neumond erkennbar. Einen Tag später – also nach 46 Stunden – ist sie in jedem Fall sichtbar. Nimmt man einen Mittelwert von 34 Stunden an, so zeigt eine Durchrechnung der Mond- und Sonnenbahn, daß die Untergangszimute der beiden Gestirne nie mehr als 15° voneinander abweichen. Legt man daher den Untergangszimut der Sonne durch ein Löcherpaar im Zylinder fest, so muß der Mond in einer Blickrichtung von $\pm 3^\circ$ Öffnungen ($\pm 18^\circ$) neben diesem Punkt auftauchen.

Der Bereich des Azimuts der ersten Mondsichel läßt sich aber noch weiter einengen. Wenn man nämlich die Azimutdifferenz zwischen Sonne und Mond vom vorangegangenen Monat kennt, läßt sich dieser Wert mit einer nicht sehr großen Änderung auch auf den laufenden Monat übertragen. Die Änderung der Azimutdifferenz ist in 50% aller Fälle kleiner als 3° und überschreitet nur in seltenen Fällen das Doppelte.

Die Abb. 11 zeigt die astronomische Situation für Sonne und Mond kurz nach Neumond. Vom vorausgegangenen Monat ist die Winkel(Löcher-)differenz der Untergangszimute von Sonne und Mond bei dessen erstem Erscheinen bekannt. Man bestimmt folglich den Punkt des Sonnenuntergangs und fügt die vom vorigen Monat her bekannte Azimutdifferenz hinzu. Durch das so bestimmte Löcherpaar sollte der Mond in der Mehrzahl der Fälle sofort sichtbar werden, bestimmt aber in einer der beiden benachbarten Öffnungen. Abb. 11 demonstriert in einer Computer-Simulation die Stellung von Sonne und jungem Mond während dreier aufeinanderfolgender Monate.

Ein genaueres Studium der Mondbewegung würde die Grenzen vielleicht noch mehr einengen lassen. Allerdings spielen dann Witterungseinflüsse und ähnliche Störungen eine dominierende Rolle und verhindern eine volle Ausnutzung der heraufgesetzten Beobachtungsgenauigkeit. Abschließend sei noch bemerkt, daß ein derartiger Beobachtungsstand natürlich nicht nur zur Bestimmung des Ortes der ersten Mondsichel geeignet ist, sondern ebenso auch für viele andere astronomisch-kalendarische Pro-

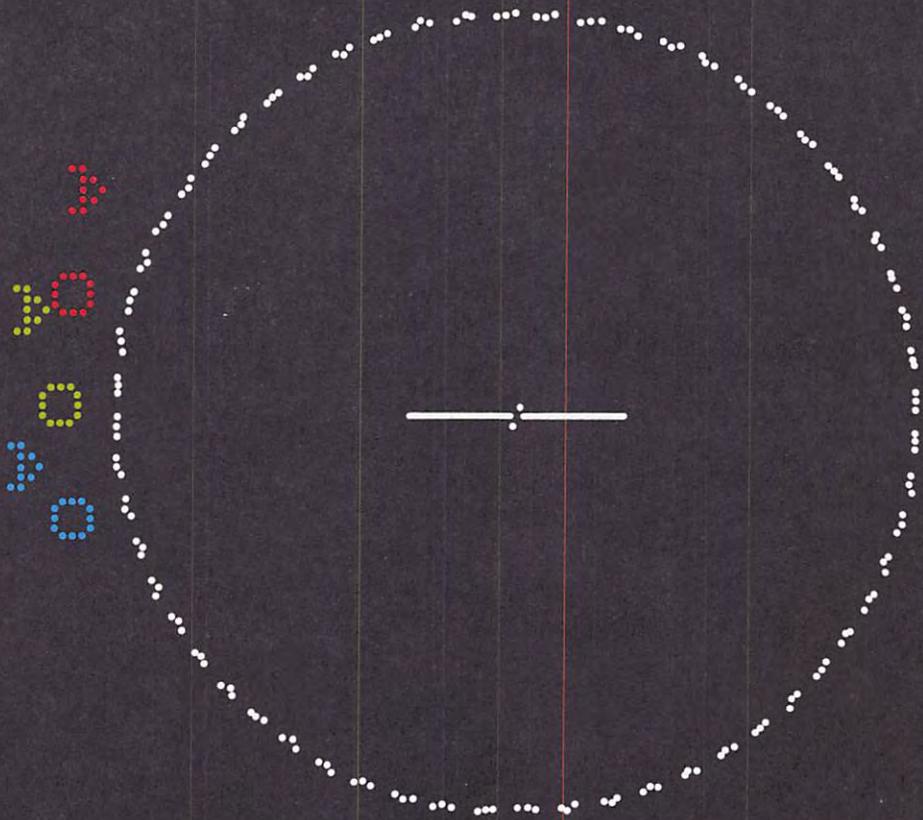


Abb. 11: Das rekonstruierte Mondobservatorium von Gilazarda (Kurdistan) auf dem Bildschirm eines Elektronenrechners. Es sind die Untergänge von Sonne und junger Mondsichel am westlichen Abendhimmel 34 Stunden nach Neumond dargestellt. In der Mitte das Observatorium mit seinen 60 Öffnungen; in rot, grün und blau die Stellung der Gestirne während dreier aufeinanderfolgender Monate. Man erkennt deutlich, daß sich die Differenz der Untergangspositionen von Monat zu Monat nur wenig ändert.

bleme. Sonnenwenden und Solstitien könnten hier ebenfalls bestimmt werden, außerdem auch Sternauf- und -untergänge. Die Beobachtungs- und Rechenmethoden, die hier angewandt wurden, unterscheiden sich grundsätzlich nicht von denen, die 3500 Jahre früher Menschen der Steinzeit zum Bau der gewaltigen Anlage von Stonehenge veranlaßten.

Auch der in der Neuzeit noch benutzte Turm auf dem Berge Gilazarda stellt damit ein vollkommenes Beispiel für unser Thema dar: die Beobachtung der Sterne durch Steine. Leider wurde er als ein Opfer der Auseinandersetzungen zwischen Kurden und Arabern vor einigen Jahren bei einem Luftangriff zerstört.

Aber auch ohne derartige Gewalttaten ist heute das Ende der hier erörterten kalendarischen und astronomischen Techniken gekommen. Nach einer Anwendungsdauer von mindestens 4 Jahrtausenden gehören sie nunmehr endgültig der Geschichte an. Denn die rasche Entwicklung der Technik hat dafür gesorgt, daß inzwischen Transistorradios auch im letzten Dorf den abendländischen oder islamischen Kalender durchgesetzt haben. Die Beobachtungen von Sonne, Mond und Sternen durch Steine ist damit überflüssig geworden.

Weiterführende Literatur:

FERRARI D'OCCHIEPPO, K.: Der Stern der Weisen. Wien, Herold 1969.

HAWKINS, G. S.: Stonehenge decoded, New York, Doubleday 1965.

KÜHN, H.: Erwachen und Aufstieg der Menschheit. Frankfurt/M., Fischer 1966.

LENTZ, W.: Zeitrechnung in Nuristan und am Pamir. Berlin, Reichsdruckerei 1939.

LENTZ, W. und W. SCHLOSSER: Persepolis – ein Beitrag zur Funktionsbestimmung. XVII. Dt. Orientalistentag 1968. Suppl. I 1969, p. 957–983.

LENTZ, W., W. SCHLOSSER und G. GROPP: Persepolis – weitere Beiträge zur Funktionsbestimmung. Z. Dt. Morgenl. Ges. 121, 254, 1971.

MÜLLER, R.: Der Himmel über dem Menschen der Steinzeit. Berlin, Springer 1970.

NEBEZ, J. und W. SCHLOSSER: Ein kurdisches Mondobservatorium aus neuerer Zeit. Z. Dt. Morgenl. Ges. 122, 140, 1972.

THOM, A.: Megalithic Lunar Observatories. Oxford, Clarendon Press 1971.