

625. E. B.: Sonnenenergie - chemisch genutzt, in: Urania Universum, Bd.28, Urania-Verlag, Leipzig-Jena-Berlin, 1982, 443-447.



Engelbert Broda

Sonnen- energie- chemisch genutzt

Viele Länder besitzen keine Lagerstätten fossiler Brennstoffe, wie Kohle und Öl, und in anderen sind ihre Vorkommen sehr begrenzt. Immer mehr Stimmen erheben sich gegen eine einseitige Orientierung auf die Kernenergie. Unter diesen Bedingungen wächst das Interesse an der Sonnenenergie: Sie birgt keine Gefahren und ist unbegrenzt vorhanden, sie belastet weder die Umwelt, noch erscheint sie für militärische Zwecke attraktiv. Auch erzeugt die Sonnenenergie, anders als Kohle oder Öl, kein zusätzliches Kohlendioxid, das das Klima verändert. Die zur Erde gelangende Energie ist gewaltig: $1,7 \cdot 10^{14}$ kW. Deshalb begann man in zahlreichen Ländern, ernsthafte Forschungsprogramme für Sonnenenergie aufzustellen.

In einigen Ländern der warmen und der gemäßigten Zonen wurden Heizungssysteme und Warmwasserbereitungsanlagen auf Sonnenenergiebasis entwickelt – man spricht von der »solar-thermischen Option«. Nur wenige Quadratmeter des Daches eines Hauses genügen, um einen großen Teil des Jahresbedarfs an Wärme zu decken, weil dafür nur relativ niedrige Temperaturen benötigt werden. Für die Elektroenergieerzeugung mittels Turbinen reichen diese Temperaturen allerdings nicht aus.

Hoherhitzter Dampf kann mit Hilfe der »Turmvariante« solar-thermisch erzeugt werden. Eine große Anzahl von Spiegeln, die dem täglichen Sonnenlauf nachgeführt werden und insgesamt einen Hohlspiegel bilden, reflektieren das Sonnenlicht auf einen Dampferzeuger, der sich oben auf dem Turm im Brennpunkt des Hohlspiegels befindet. Der erzeugte Dampf treibt dann ein herkömmliches Turbinensystem an. Versuchsanlagen zur Demonstration der technischen Realisierbarkeit funktionieren bereits in einigen Ländern. Die »Farmvariante«, bei der der Dampferzeuger rohrförmig, also dezentralisiert ist, ist aber wahrscheinlich wirtschaftlicher, obwohl weniger hohe Temperaturen erreicht werden.

Eine zweite Richtung zur Nutzung der Sonnenenergie besteht in der Anwendung von Solarzellen auf Halbleiterbasis. Der elektri-

sche Strom wird dabei mit Energieausbeuten bis zu 20 % und mehr direkt erzeugt. Dies ist die »solar-elektrische Option«. Solche Zellen haben sich in der Raumfahrt bereits bewährt. Da sie jedoch bisher kostspielig sind, müssen die Herstellungskosten für einen allgemeinen, wirtschaftlichen Einsatz noch gesenkt werden, was grundsätzlich durchaus möglich ist.

Es mag kurios anmuten, daß bei der Nutzung der Sonnenenergie gerade die optimale Lösung der Energieprobleme der Menschheit bisher sträflich vernachlässigt wurde, nämlich ihre photochemische Nutzung, um Wasserstoff zu gewinnen – die »solar-chemische Option«. Die Biophysik hat die wissenschaftlichen Bemühungen auf diesem Gebiet wesentlich beeinflußt.

Wasserstoffwirtschaft

Der photochemisch erzeugte Wasserstoff würde in eine »Wasserstoffwirtschaft« einfließen. Diese ist ja bereits im Zusammenhang mit der Wasserstoffherstellung durch Atomenergie wissenschaftlich untersucht worden. In einem thermochemischen Prozeß wird dabei ein wäßriges System bei hohen Temperaturen in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Dieser Vorgang ist billiger als die Elektrolyse, weil er die zwischenzeitliche Erzeugung von Elektroenergie umgeht. Eine photochemische Herstellung von Wasserstoff aus Wasser erfordert jedoch – wenn sie gelingt – keine Atomenergie. Dieser neue Prozeß wird »Photolyse« genannt.

Wer genügend billigen Wasserstoff besitzt, hat eigentlich schon alles. Wasserstoff kann zur industriellen wie zur Wohnraumheizung verwendet werden. Er kann Gasturbinen treiben und auf diese Weise zur elektrischen Energieerzeugung dienen. Noch besser ist die Stromerzeugung mittels Brennstoffzellen, deren Technologie freilich noch nicht ausgereift ist. Weiterhin kann Wasserstoff Kohle oder Koks bei der Metallgewinnung aus Erzen ersetzen, z. B. bei der Eisen- bzw. Stahlproduktion. Wasserstoff

ist außerdem ein wichtiger Ausgangsstoff für die chemische Industrie, etwa um Benzin aus Kohlendioxid herzustellen. Und schließlich verwenden auch einige Gruppen von Bakterien (Knallgasbakterien) Wasserstoff zur Erzeugung der lebensnotwendigen Energie. Diese Bakterien besitzen wertvolle Biomasse, die proteinreich und nahrhaft ist.

Bei der Anwendung von Wasserstoff entsteht nur Wasser, so daß keine Umweltverschmutzung eintritt. Wie Erdgas kann Wasserstoff leicht, billig und gefahrlos mittels Rohrleitungen transportiert werden. Für die Zeit von Produktionsunterbrechungen, beispielsweise nachts, läßt er sich speichern.

Das Membranprinzip

Eine einfache Rechnung über die Photolyse zeigt, daß ein Mol an Quanten (1 »Einstein«) grünen Lichtes für die Spaltung eines Mols Wasser in ein Mol Wasserstoff und ein halbes Mol Sauerstoff ausreicht. Der Energieinhalt eines solchen Mols an Quanten – rund 240 kJ (57 kcal) – entspricht nämlich der Bindungsenergie eines Mols Wasser. Die Quanten des blauen und des violetten Lichtes enthalten sogar mehr Energie, als zur Spaltung notwendig ist, während zwei Quanten an gelbem oder rotem Licht erforderlich wären.

Eine Reihe hervorragender Wissenschaftler, unter ihnen F. Daniels und E. Rabinowitsch, hat Versuche zur Photolyse von Wasser oder wäßrigen Lösungen durchgeführt. Da Wasser für sichtbares Licht durchlässig ist, müssen dazu vorher farbige Sensibilisatoren oder »Photokatalysatoren« eingebracht werden. Ähnliche Versuche unternahm Krasnowski zu photochemischen Redoxreaktionen in organischen Lösungsmitteln mit Chlorophyll als Photokatalysator, wobei z. B. gleichzeitig Ascorbinsäure oxydiert und Nikotinamid-Adenin-Dinukleotid (NAD) reduziert wurde. Das bedeutet, daß Wasserstoff unter Lichteinfluß von einer Verbindung zur anderen transportiert wurde.

Die Ausbeute bei solchen photochemischen

Dieser Sonnenenergie-Umwandler betreibt eine Wasserpumpe auf dem Werkgelände des japanischen Elektronikkonzerns Sharp in Tenri

Experimenten in Lösungen ist jedoch äußerst gering. Der Grund für diese bedauerliche Tatsache liegt auf der Hand: Die Herstellung stabiler Endprodukte – etwa von Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser – kann nicht in einem Schritt erreicht werden; vielmehr entstehen zuerst hochreaktive Stoffe. Diese Primärprodukte rekombinieren sofort nach der Entstehung wieder zu Wasser.

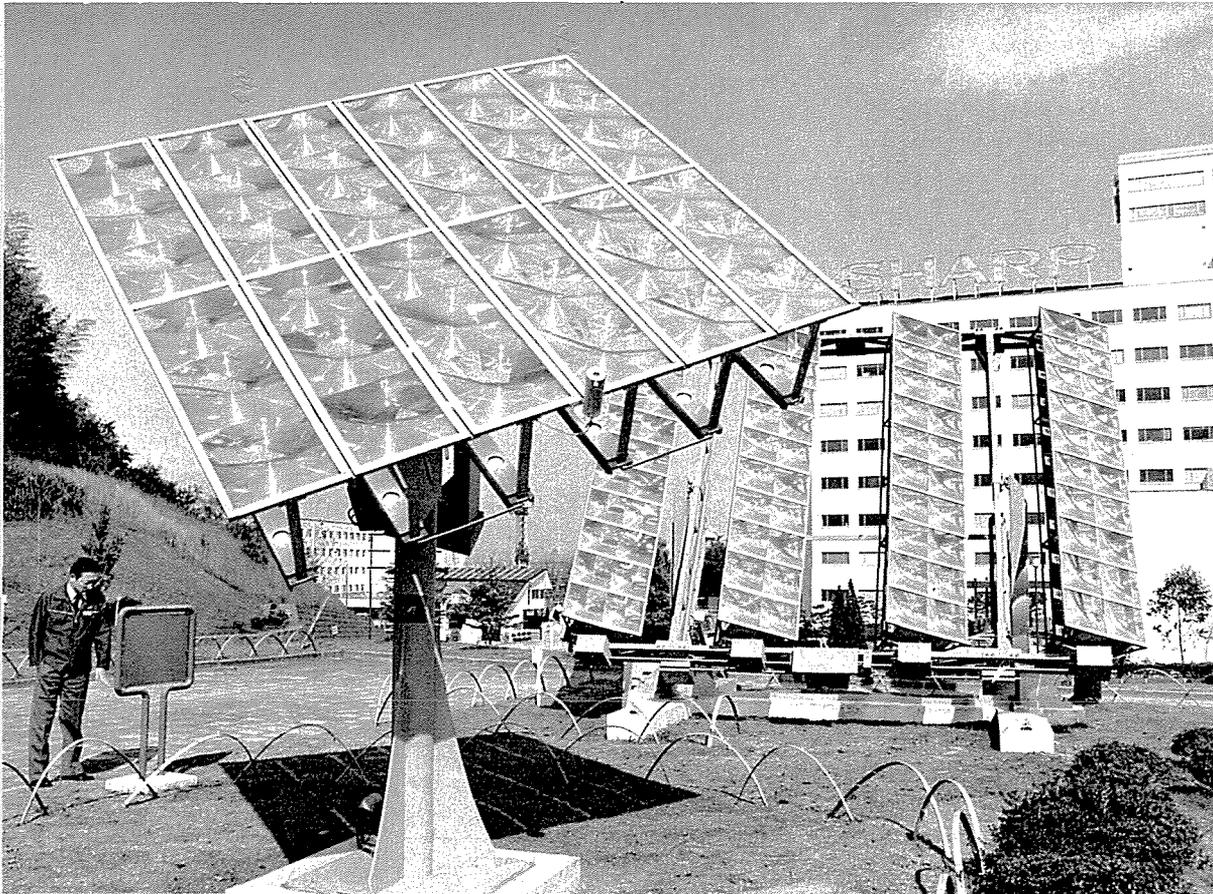
Eine Lösung des Problems der Wasserphotolyse liegt in der Einführung von Membranen, die das homogene System in ein inhomogenes überführen. Diese Membranen, die den Photokatalysator enthalten, müssen das primäre Reaktionsprodukt, aus dem sich dann der Wasserstoff bildet, von jenem trennen, aus dem der Sauerstoff hervorgeht. Um diesen Effekt zu erreichen, muß die Membran eine asymmetrische Struktur aufweisen. An asymmetrischen Membranen müssen »asymmetrische« oder »vektorielle« Reaktionen ablaufen. Derartige Membranen hat der Mensch zwar noch nicht konstruiert, geschweige denn angewandt, es gibt jedoch kein Naturgesetz, das ihrer Entwicklung und ihrem Einsatz widerspräche.

Deshalb muß es dem menschlichen Intellekt möglich sein, Membranen für diesen Zweck zu bauen und erfolgreich anzuwenden – eine vorrangige Aufgabe der modernen Wissenschaft.

Die Natur als Vorbild

Asymmetrische Membranen sind nicht nur theoretisch auf den Grundlagen der physikalischen Chemie möglich – die Natur hat sie tatsächlich in wahrhaft gigantischem Maßstab hergestellt. Die lebenden Zellen wenden seit mehr als drei Milliarden Jahren (Gigajahren) das Membranprinzip an.

Die moderne Biophysik hat bewiesen, daß die photochemische Wasserzersetzung die Basis der pflanzlichen Photosynthese ist. Wir verdanken dieses Wissen dem genialen niederländischen Forscher Cornelius van Niel. Er zeigte bereits vor einem halben Jahrhundert, daß die Primärreaktion des Lichtes in der Pflanze nicht die Spaltung des Kohlendioxids ist, wie das von Willstätter, Warburg u. a. angenommen worden war. Nach van Niel besteht das Prinzip der Photosynthese vielmehr



darin, daß zuerst ein dem Wasserstoff verwandter Stoff gebildet wird, der in einer zweiten Stufe zur Reduktion des Kohlendioxids zu Kohlenhydraten und überhaupt zu Biomasse dient. Die Konzeption von Niels hat sich als richtig erwiesen, obwohl Warburg sie niemals akzeptiert hat. Der gesamte Sauerstoff der Erdatmosphäre stellt nichts anderes dar als ein »Abfallprodukt« der Wasserphotolyse durch die Pflanze.

Normalerweise tritt der Wasserstoff in der Photosynthese freilich nicht in elementarer Form auf, da es für die Pflanze geradezu absurd wäre, ein derart flüchtiges Gas zu produzieren, das sie verlieren würde. Nach Arnon nützt die Pflanze den photolytisch hergestellten Wasserstoff sofort zur Reduktion des in der oxydierten Form vorliegenden Zellproteins Ferredoxin. Dieses besondere Protein enthält außer den üblichen Aminosäuren Eisen- und Schwefelatome, und zwar in anorganischer Bindung. Die oxydierte Form des Ferredoxins benötigt zur Reduktion aber nicht das gesamte Wasserstoffatom, sondern ein einziges Elektron, wobei das verbleibende Proton abgegeben wird.

Ferredoxin ist dadurch gekennzeichnet, daß es das bei der Reduktion aufgenommene Elektron sehr leicht wieder abzugeben vermag, und zwar an einen oxydierenden Akzeptor, der gleichzeitig wieder ein Proton aufnehmen kann. Ferredoxin ist demnach ein außerordentlich starkes Reduktionsmittel. Sein Redoxpotential ist etwa gleich dem des Wasserstoffs in Berührung mit neutralem Wasser, d. h., die bei seiner photochemischen Reduktion gespeicherte Energie ist ebenso groß wie diejenige bei der Entstehung freien Wasserstoffs. Das reduzierte Ferredoxin wird für die Reduktion des Kohlendioxids und damit für die Assimilation des Kohlenstoffs benötigt. Es stellt also die Verbindung zwischen dem Wasser und der Biomasse her.

Gaffron bestätigte diese Vorstellungen, indem er fand, daß einige niedere Pflanzen, Blau- und Grünalgen, unter außergewöhnlichen, un-

natürlichen Lebensbedingungen tatsächlich elementaren Wasserstoff produzieren. Das bestätigt, daß die Energie des Lichtes wirklich zur Bildung molekularen Wasserstoffs ausreicht. Diese Pflanzen müssen ein Enzym besitzen, das Elektronen auf Wasserstoffionen überträgt.

Pflanzen und photosynthetische Bakterien

Pflanzen müssen sich vor Rekombination und vor Verlust der Primärprodukte der Photolyse schützen – eben dafür wenden sie das Membranprinzip an. Tatsächlich führen alle Zellen die Primärprozesse der Photosynthese in Membranen durch. In einigen Fällen geschieht dies an der die Zelle umgebenden Membran, meist jedoch an intrazellulären Membransystemen. Die eukaryotischen (entwickelten) Pflanzen enthalten diese Membranen in spezialisierten intrazellulären Organellen, den sogenannten Chloroplasten. Die prokaryotischen Blaualgen, noch den Bakterien nahestehend, enthalten keine derartigen Organellen, wenden jedoch ebenfalls das Membranprinzip an. Ihr Mechanismus der Photosynthese ist mit dem der eukaryotischen Pflanzen identisch.

Die Blaualgen haben sich aus photosynthetischen Bakterien entwickelt. Eine Reihe solcher Bakterien existiert noch, so die purpurnen und die grünen Bakterien. Welche Unterschiede auch immer es zwischen den photosynthetischen Bakterien geben mag – ihnen allen ist gemeinsam, daß sie kein Wasser spalten und keinen Sauerstoff freisetzen können. Daher müssen sie ihren Wasserstoff für die Kohlendioxidreduktion aus Verbindungen nehmen, in denen er lockerer gebunden ist. Schwefelwasserstoff und einige organische Verbindungen dienen diesen Bakterien als Wasserstoffquelle, wobei z. B. aus Schwefelwasserstoff elementarer Schwefel entsteht.

Aus der Sicht des Forschers sind die photosynthetischen Bakterien von immenser Bedeutung, da sie noch einfacher gebaut und stammesgeschichtlich älter sind als die einfachsten Pflanzen, die Blaualgen. Dies erleichtert die

Erforschung der Lebensprozesse einschließlich der Photosynthese ganz wesentlich. Die gewonnenen Erkenntnisse werden gewiß die Entwicklung technischer Verfahren zur photochemischen Zersetzung von Wasser und damit zur Wasserstoffherzeugung fördern.

Energiefarmen oder Wasserstofffabriken

Immer wieder werden Stimmen laut, Pflanzen direkt als Energiequellen anzubauen, also Energiefarmen anzulegen. Man denkt dabei an schnellwüchsige Pflanzen mit einer hohen Ausbeute an Biomasse, wie Zuckerrohr in den Tropen oder Pappeln in gemäßigtem Klima. Nach chemischer Behandlung der Biomasse könnten aus ihr flüssige oder gasförmige Brennstoffe gewonnen werden. So erhält man durch Vergärung unter Luftabschluß »Biogas« (Methan), unter Luftzutritt Ethanol. Pyrolyse (trockene Destillation) ist eine weitere Möglichkeit.

Ein anderer Weg zur Gewinnung von Biomasse besteht in der Hydrokultur mikroskopischer, einzelliger Pflanzen. Es gibt bereits Methoden zur Produktion von Grünalgen (*Scenedesmus*) und Blaualgen (*Spirulina*) als Futter- oder Nahrungsmittel. Diese Verfahren sind interessant und vielversprechend, wenn auch im Moment noch zu teuer.

Die Verfahren zur Ausnützung von Biomasse, um technische Energie zu erzeugen, können zunächst an praktisch wertlosen Abfallstoffen, wie Stroh und Kleinholz, studiert werden, so daß keine Anbauflächen der Produktion von Nahrungs- oder Faserstoffen entzogen werden.

Anlagen zur Wasserstoffgewinnung in großem Maßstab könnten zunächst am besten in den heißen Wüsten Afrikas oder Asiens aufgebaut werden. In einigen Teilen dieser Kontinente stehen enorme Landflächen zur Verfügung, die für andere Zwecke wertlos sind. Die Sonne scheint hier intensiv und gleichmäßig. Es kann abgeschätzt werden, daß bei einer Energie-

ausbeute von 10% etwa 100 km² Land ausreichen, um eine Million Menschen mit 1 kW Energie pro Kopf zu versorgen (wobei der Prokopfverbrauch von 1 kW derzeit eine typische Größe für einen beträchtlichen Teil der Menschheit darstellt). Dies trifft dann zu, falls der gesamte Energieverbrauch ausschließlich aus Sonnenenergie gedeckt wird – für die nahe Zukunft freilich eine wenig realistische Annahme. Denken wir nun weiter daran, daß die Sahara allein 10 Mill. km² umfaßt! Offenbar könnte schon mit einem geringen Teil der Sahara eine große Anzahl von Menschen ihren Energiebedarf decken. Die Photolyse wird man aber auch anderswo ausführen können.

Nach Meinung des Autors sollten die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Wasserphotolyse und anderer Anwendungsbereiche der Sonnenenergie in übernationaler Zusammenarbeit erfolgen. Wenn hundert Länder mit eigenen Arbeiten auf diesem Gebiet beginnen, so bedeutet das Vergeudung qualifizierter Arbeitskraft und finanzieller Mittel. Es wäre deshalb sinnvoll, ein internationales Sonnenenergie-Institut zu gründen, das dem CERN in Genf oder dem Vereinigten Kernforschungsinstitut in Dubna vergleichbar wäre. Das heißt jedoch nicht, daß sich alle Abteilungen dieses Instituts unter einem Dach befinden müßten: Einige könnten ihren Standort in Ländern mit hervorragender wissenschaftlicher und technischer Infrastruktur und andere in Gebieten mit starker Sonnenstrahlung erhalten. Die Kosten für ein solches Forschungszentrum lägen, verglichen mit denen der Institute von Dubna oder Genf, infolge des geringen Bedarfs an großen und teuren Präzisionsgeräten relativ niedrig. Ein internationales Sonnenenergie-Institut würde den Friedensinteressen der gesamten Menschheit dienen und die Kräfte aller Länder, unabhängig von ihrer sozialen Struktur, vereinen – es könnte eine machtvolle Kraft für den Weltfrieden bilden.

Bildquellennachweis: Fotos: Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Astrophysik/Sternwarte Sonneberg (S. 427); Max Alpert, Moskau (S. 439); Bergakademie Freiberg, Hochschulbildstelle (S. 374, 375, 378); Bernd Blume, Klitzschen (S. 120, 335, 364, 368, 422, 424); Walter Danz, Halle (S. 391); Deutsche Fotothek Dresden (S. 35, 372, 376/377); H. Dick, Magdeburg (S. 393 u.); Werner Fiedler, Leipzig (S. 193–198); Friedrich-Schiller-Universität Jena, Ernst-Haeckel-Haus/Werner Reinhold (S. 64); Karlheinz Friedrich, Leipzig (S. 275–277, 402, 403, 406, 407, 410, 411); Rainer Funck, Leipzig (S. 298); Claus Lutz Gaedicke, Halle/S. (S. 387); Uwe Gerig, Erfurt (S. 10, 92–103, 104–112); Sigrid Geske, Weimar (S. 140–147); Bernd Göbel, Halle (S. 389); Jürgen Graetz, Berlin (S. 165, 168); Eckhard Grieshammer, Schöneiche (S. 169, 170); Dr. E. Grimberger, Eberswalde-Finow (S. 67); Dr. Joachim Gürtler, Jena (S. 428, 430, 431, 434, 435); Rudolf Hartmetz, Schwedt (S. 393 o.); Archiv Dr. Heinz Helmert, Leipzig (S. 301); Karl-Schwarzschild-Observatorium, Tautenburg (Schutzumschlag Vorderseite); Gerhard Kiesling, Berlin (S. 167); Albrecht Körner, Werdau (S. 316); Heinz Krüger, Falkensee (S. 56–62); Hans Krumbholz, Berlin (S. 148–154); Gottfried Kurze, Leipzig (S. 323, 325); Künstler-Agentur der DDR/H. Paris, Berlin (S. 8); Guntard Linde, Jena (Schutzumschlag Rückseite, S. 2/3, 412, 416); Reinhard Mende, Zürcchau (Vor- und Nachsatz, S. 248–256); Militärverlag der DDR/Militärbilddienst, Berlin (S. 156/157, 158, 163); Siegfried G. Müller, Leipzig (S. 184, 187–191); Museum für Geschichte der Stadt Leipzig/Rainer Funck (S. 296/297); Museum für Deutsche Geschichte, Berlin (S. 20, 24–26); Dr. Frank Peter, Berlin (S. 305, 308/309, 312, 313); Dr. Helga Picht, Berlin (S. 437, 440, 441); Manfred Radloff, Berlin (S. 327–333); Robert

Rosentreter, Rostock (S. 160, 162); Ernst Schäfer, Weimar (S. 6, 9, 11, 12); Horst Schäfer, Berlin (S. 48–55); Dr. Ingo Schönfelder, Leipzig (S. 33, 36/37); Hartmut Schorsch, Berlin (S. 40); Alexander Schpikalow, Moskau (S. 200–207); Gert Schütze, Halle (S. 388, 392); Werner Schulze, Berlin (S. 274, 401, 404, 405, 408/409); Werner Seifert, Berlin (S. 366); Rosa Staneva, Sofia (S. 216–223); Uwe Steinberg, Berlin (S. 263–271); Uwe Steinbrück, Erfurt (S. 125); Barbara Stroff, Leipzig (S. 13); K. Thiemann, Eichwalde (S. 135, 138); Archiv Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin (S. 231, 281, 314, 317, 348); Universitätssternwarte Jena, Beobachtungsstation Großschwabhausen (S. 429); VEB Entstaubungstechnik »Edgar André«, Magdeburg (S. 339); VEB Funkwerk Erfurt (S. 261); VEB Petrochemisches Kombinat Schwedt/Karl-Heinz Wendland (S. 419); Helmut Wenzel, Frankfurt/O. (S. 390); Prof. Dr. Bernd Wilhelm, Jena (S. 208, 210 o.); Bernd Wurllitzer, Berlin (S. 81–91, 241–247); Zentralinstitut für Isotopen- und Strahlenforschung der AdW, Leipzig (S. 115, 116, 118); Zentralbild, Berlin (alle übrigen Fotos).

Zeichnungen: Heinz Behling, Berlin (S. 354–363); Wolfgang Parschau, Eggersdorf (S. 289, 292, 320); Werner Ruhner, Beucha (S. 172, 175, 225–229); Hasso Seyferth, Leipzig (alle übrigen Textzeichnungen).

Übersetzungen: Pavel Francouz »Das Beispiet«, übersetzt von Barbara Zulkarnain (mit freundlicher Genehmigung des Aufbau-Verlages aus: »Die Akrobatin. Moderne tschechische Erzählungen«); Alexander Schpikalow »Beinschnitzkunst im hohen Norden«, übersetzt von Irmgard Luft; Prof. Dr. Velizar Velkov »Die alten Thraker«, übersetzt von Egon Hartmann.

Redaktionsbeirat: Prof. Dr. sc. H. Ambrosius;
Prof. Dr. sc. G. Barthel; Prof. Dr. habil. R. Göttner;
Prof. Dr. sc. G. Olszak; Prof. Dr. habil. L. Pickenhain;
Dr. sc. A. Pinther; Prof. Dr. habil. M. Vorwerg;
Prof. Dr. sc. W. Windsch

1. Auflage 1982, 1.–70. Tausend
Alle Rechte vorbehalten
VLN 212-475/50/82 · LSV 9819

Redaktion: Henry Heinig
Buchgestaltung: Horst Adler
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung:
INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb Leipzig
III/18/97
Best.-Nr. 6537532

DDR 15,— M