

Nobelpreis für Chemie 1997

Der Chemie-Nobelpreis 1997 ging je zur Hälfte an Professor Paul D. Boyer (University of California, Los Angeles) gemeinsam mit Dr. John E. Walker (Lab. of Molecular Biology, Cambridge, UK) für die

Aufklärung des enzymatischen Mechanismus der Adenosintriphosphat-(ATP)-Synthese

und an Professor Jens Skou (Universität Aarhus, Dänemark) für die

erste Entdeckung eines ionentransportierenden Enzyms, der Na^+, K^+ -ATPase.

Boyer und Mitarbeiter haben auf der Grundlage biochemischer Daten einen Mechanismus vorgeschlagen, wie ATP aus Adenosindiphosphat (ADP) und anorganischem Phosphat gebildet wird. Walker hat mit Mitarbeitern die Struktur des beteiligten Enzyms, der ATP-Synthase, gefunden und den von Boyer vorgeschlagenen Mechanismus verifiziert.

Das von Jens Skou entdeckte Enzym, die Natrium-, Kalium-stimulierte Adenosintriphosphatase, hält das Gleichgewicht der Natrium- und Kalium-Ionen in der lebenden Zelle aufrecht.

Beide Enzyme sind an Zellmembranen gebunden und stehen mit dem Transport von Ionen durch die Membranen - allerdings aus verschiedenen Gründen - in Zusammenhang.

ATP - der universelle Energieträger in der lebenden Zelle

Der deutsche Chemiker Karl Lohmann entdeckte ATP im Jahr 1929. Nach der Aufklärung der Struktur synthetisierte der Schotte Alexander Todd (Nobelpreis 1957) 1949 ATP. In den Jahren 1939-41 konnte Fritz Lipmann (Medizin-Nobelpreis 1953) zeigen, daß ATP der universelle Träger der chemischen Energie in der Zelle ist, und prägte den Ausdruck "energiereiche Phosphatbindungen".

ATP fungiert als Energiespeicher in allen lebenden Organismen von den Bakterien und Pilzen bis zu Pflanzen und Tieren, den Menschen eingeschlossen. ATP speichert die bei der Verbrennung von Nahrung freiwerdende Energie und stellt sie beim Aufbau von Zellbestandteilen, bei der Muskelkontraktion, der Übertragung von Nervensignalen und anderen Funktionen zur Verfügung. ATP wurde "energetisches Kleingeld" der Zelle genannt.

ATP besteht aus dem Nukleotid Adenosin gebunden an drei Phosphatgruppen. Bei der Entfernung der äußersten Phosphatgruppe entsteht Adenosindiphosphat (ADP), während die gleichzeitig freigesetzte Energie für andere Reaktionen verfügbar ist. Umgekehrt kann unter Energieaufwand eine anorganische Phosphatgruppe an ADP gebunden werden, wodurch ATP entsteht. Beträchtliche Mengen von ATP werden gebildet und umgesetzt. In Ruhe setzt ein Erwachsener täglich ATP entsprechend seinem halben Körpergewicht um, während bei

harter Arbeit dies bis zu einer Tonne zunehmen kann. Ein Großteil der ATP-Synthese wird durch das Enzym ATP-Synthase bewirkt. In Ruhe verbraucht die Na^+, K^+ -ATPase ein Drittel des gebildeten ATP.

ATP-Synthase: eine besondere molekulare Maschine

In den 40er- und 50-Jahren wurde erkannt, daß ATP primär bei der Zellatmung in den Mitochondrien und bei der Photosynthese in den Chloroplasten gebildet wird. 1960 isolierte Efraim Racker aus Mitochondrien das Enzym „ F_0F_1 ATPase“, heute ATP-Synthase genannt. Das Enzym enthält in einem Teil F_1 das katalytische Zentrum, während der Teil F_0 den F_1 -Teil an die Membran bindet. Das Enzym existiert sowohl in Chloroplasten wie auch in Bakterien. Peter Mitchell formulierte 1961 die chemiosmotische Hypothese, wofür er 1978 den Nobelpreis erhielt. Er zeigte, daß die Zellatmung zu einer inner- und außerhalb der Mitochondrienmembran unterschiedlichen Wasserstoffionenkonzentration führt, und daß ein Strom von H-Ionen die Bildung von ATP antreibt, woran der F_0 -Teil beteiligt ist.

Paul Boyer begann seine Untersuchungen der ATP-Bildung in den frühen 50er-Jahren und ist immer noch in der Forschung aktiv. Er konzentrierte sich darauf, mit Isotopentechniken herauszufinden, wie ATP-Synthase wirkt und wie sie Energie einsetzt, neue ATP zu bilden. Seine Arbeit hatte in den letzten Jahren großen Erfolg. John Walker untersuchte ATP-Synthase ab den frühen 80er-Jahren. Er sah, daß eine genaue Kenntnis

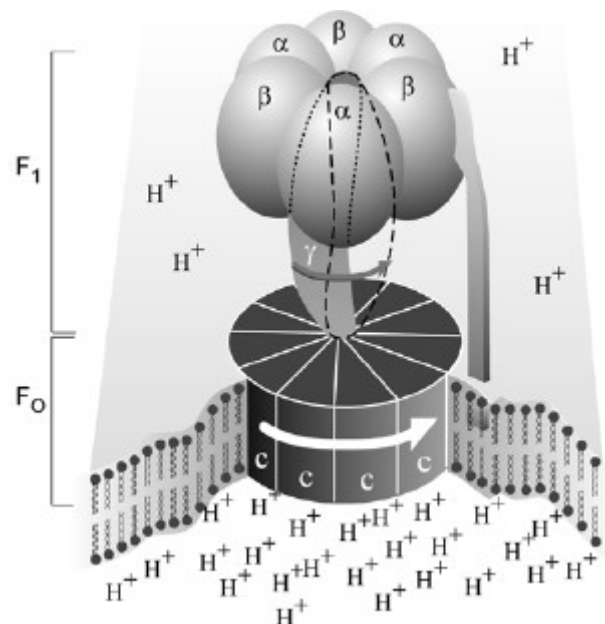


Abb. 1: Vereinfachtes Bild der ATP-Synthase. In der Membran sitzt der F_0 -Teil, durch den H-Ionen strömen. Außerhalb der Membran synthetisiert der F_1 -Teil ATP. Wenn die H-Ionen mittels der Bausteine c durch die Membran fließen, muß sich F_0 drehen. Die Untereinheit γ ist an F_0 angeheftet, so daß sie sich mitdreht. Die je 3 Untereinheiten α, β können jedoch nicht rotieren, da sie über b fest mit der Membran verbunden sind. Daher rotiert γ innerhalb der α, β . γ ist unsymmetrisch, wodurch es Strukturänderungen in den β erzwingt, was zu unterschiedlichen Bindungsstärken mit ATP und ADP führt.

Quelle: Pressemitteilung der Nobel-Stiftung, übersetzt und gekürzt von Red.

der Chemie und der Struktur eines Enzyms notwendig ist, wenn man seine Funktion *m* Detail verstehen möchte. Daher bestimmte er die Aminosäuresequenzen in den Proteinbausteinen. In den 90er-Jahren arbeitete er mit Kristallographen bei der Aufklärung der dreidimensionalen Struktur der ATP-Synthase zusammen. Bisher konnte die Struktur des F₁-Teils geklärt werden.

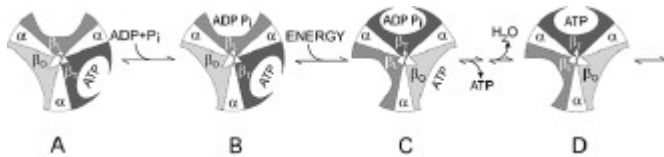


Abb. 2: Boyers Mechanismus des Bindungswechsels. Die β -Untereinheiten ändern sich bei der Drehung durch γ . In Phase A ist ATP fertig synthetisiert. In Schritt nach B werden ADP und anorganisches Phosphat gebunden; in C sehen wir, wie sich γ durch den H-Ionenstrom gedreht hat, es wird ATP freigesetzt. Im letzten Schritt reagieren die Phosphationen mit dem ADP-Molekül zu ATP.

Boyer und Mitarbeiter fanden, daß im Gegensatz zur allgemeinen Meinung nicht die Synthese von ATP aus ADP und Phosphaten Energie erforderte, sondern die Bindung von ADP und des Phosphats an das Enzym und die Freigabe des gebildeten ATP. Trotzdem wird in ATP ein Energieüberschuß gespeichert. Dadurch unterscheidet sich ATP-Synthase von der Mehrheit aller Enzyme, für die die gesamte katalytische Reaktion Energie erfordert. Trotz des unsymmetrischen Aufbaus von F₁ kann das Enzym nur in einer Weise reagieren. F₁ besteht aus 5 strukturellen Untereinheiten α , β (die je dreifach vorhanden sind) und die einfach vorhandenen γ , δ und ϵ und. Boyer konnte zeigen, daß γ , δ und ϵ in einem Zylinder rotieren, der abwechselnd aus den Untereinheiten α und β besteht. Die Drehung induziert Strukturänderungen in β , wodurch sich seine Fähigkeit zu binden periodisch ändert. Boyer nannte daher die ATP-Synthase eine molekulare Maschine. (Die Drehung des F₁-Teils konnte jüngst von Masasuke Yoshida und Mitarbeitern unter dem Mikroskop sichtbar gemacht werden: Sie hefteten eine Faser des Muskelproteins Actin an γ , während die β an ein Substrat geheftet wurden. Unter dem Mikroskop konnte nachgewiesen werden, wie die Actinfaser mit zunehmender ATP-Konzentration immer schneller rotierte.)

Na⁺,K⁺-ATPase - eine molekulare Pumpe

Seit den 20er-Jahren ist bekannt, daß die Natriumkonzentration in der lebenden Zelle niedriger, die Kaliumkonzentration höher ist als in der Flüssigkeit außerhalb. Durch die Arbeiten der Engländer Richard Keynes und Alan Hodgkin (Nobelpreis



Paul D. Boyer promovierte 1943 an der University of Wisconsin. Von 1963 bis 1989 Professor für Chemie an der University of California at Los Angeles (UCLA), von 1965 bis 1983 Direktor des Instituts für Molekularbiologie am UCLA.

John E. Walker promovierte an der Oxford University, Großbritannien. Seit 1982 ist er Forschungschef des Medical Rese-

arch Council Laboratory of Molecular Biology, Cambridge. Seit 1995 Mitglied der Royal Society, London.

arch Council Laboratory of Molecular Biology, Cambridge. Seit 1995 Mitglied der Royal Society, London.

Mit diesem Wissen begann Jens Skou die Suche nach einem ATP-abbauenden Enzym in der Nervenmembran, das mit dem Ionentransport in Verbindung steht. 1957 veröffentlichte er die erste Arbeit über ATPase, die durch N⁺ und K⁺-Ionen aktiviert wird. Als erster beschrieb er ein Enzym, das den gerichteten Transport von Substanzen durch Zellmembranen fördert. Seither wurde diese Fähigkeit bei zahlreichen Enzymen nachgewiesen.

In seinen Experimente benutzte Skou fein zermahlene Nervenmembranen von Krabben. Das ATP-abbauende Enzym konnte durch vermehrtes Angebot von K-Ionen angeregt werden, die Anregung war bei den in Nervenzellen üblichen Na- und K-Konzentrationen maximal. Aus den weiteren Untersuchungen ergab sich schließlich folgendes Bild: Das Enzym besteht aus 2 Untereinheiten. Die erste ist der aktive Teil, die zweite stabilisiert vermutlich das Molekül. Die Enzym-Moleküle sind in die Zellmembran eingebettet, so daß ein Teil ihrer Oberfläche in den Außenraum, ein anderer in den Innenraum der Zelle schaut. Drei Na-Ionen und ATP binden an die innere Oberfläche. Anschließend wird ein Phosphat von ATP an die Aminosäure Asparagin im Enzym übertragen, worauf ADP freigesetzt wird und das Enzym seine Gestalt so ändert, daß die Natrium-Ionen hinaus transportiert werden. Sie werden freigelassen und an ihrer Stelle lagern sich zwei K-Ionen an. Wenn das Phosphat-Ion vom Enzym freigegeben wird, werden die K-Ionen in die Zelle transportiert und freigesetzt, wenn neues ATP an das Enzym bindet. Da mehr Na-Ionen hinaus transportiert werden als K-Ionen hinein, wird quer zur Membran eine elektrische Potentialdifferenz aufgebaut. Letztere ist eine Bedingung dafür, daß sich eine Nerven- oder Muskelzelle ausbreiten kann. Daher führt Nahrungs- oder Sauerstoffmangel im Gehirn schnell zu Bewußtlosigkeit, da die ATP-Bildung aufhört und daher die Ionenpumpe anhält. Außerdem schwellen die Zellen an, wenn die Pumpe steht. Die unterschiedliche Na-Konzentration zwischen Innen und Außen ermöglicht die Aufnahme von für die Zelle wichtigen Nährstoffen wie Glukose und Aminosäuren. Sie kann auch zum Transport anderer Ionen durch die Zellwand führen: Statt Na hineinzutransportieren können Ca-Ionen heraus transportiert werden. Durch letzteren Mechanismus kann Digitalis die Herz- tigkeit unterstützen.

arch Council Laboratory of Molecular Biology, Cambridge. Seit 1995 Mitglied der Royal Society, London.



Jens C. Skou studierte in Kopenhagen und promovierte 1954 in Aarhus, wo er 1963 Professor für Physiologie wurde. 1977 wurde er in Aarhus auch zum Professor für Biophysik ernannt.

Nobelpreis für Physik 1997

Der Physiknobelpreis 1997 wurde den Professoren Steven Chu (Universität Stanford) und Claude Cohen-Tannoudji (Collège de France, Paris) sowie Dr. William D. Phillips (National Institute of Standards and Technology, USA) zuerkannt für die

Entwicklung von Methoden, Atome mit Laserlicht zu kühlen und einzusperren.

Bei Raumtemperatur bewegen sich Atome und Moleküle, z.B. die Luftmoleküle in beliebige Richtungen mit Geschwindigkeiten bis etwa 4000 km/h. Es ist daher schwierig, Atome einzeln zu studieren. Durch Abkühlen läßt sich ihre Geschwindigkeit reduzieren, doch verhindern Kondensation und Gefrieren eine Untersuchung einzelner Moleküle. Man muß daher beim Abkühlen die Dichte gering halten, d.h. Einzelatome im Vakuum untersuchen. Jedoch erst im Mikro-Kelvin-Bereich bewegen sich beispielsweise H-Atome mit Geschwindigkeiten unter 25 cm/s. Die Preisträger entwickelten Methoden, Gase mittels Laserlicht in den Mikro-Kelvin-Bereich abzukühlen, und die kalten Atome in verschiedenen Atomfallen einzufangen. Das Laserlicht wirkt wie dabei eine dicke zähe Flüssigkeit, die von Chu auch als optische Molasse bezeichnet wird, in der die Atome gekühlt werden. Experimente mit solch kalten Atomen haben zu einem tieferen Verständnis der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie geführt und auch die Experimente zur kürzlich beobachteten Bose-Kondensation ermöglicht.

Abbremsen von Atomen mittels Licht

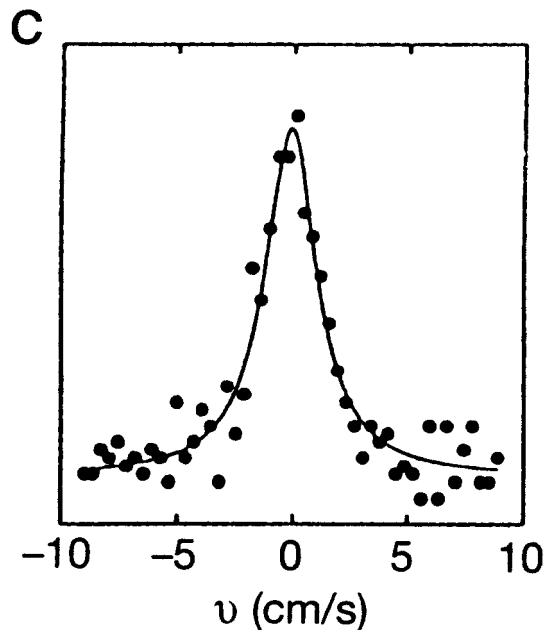
Die genaue Energie, bei der Photonen Atome beeinflussen können, hängt von der Struktur, den Energieniveaus der Atome ab. Wegen des Dopplereffekts hängt sie von der Geschwindigkeit der Atome ab. Wenn sich Licht und Atome einander entgegen bewegen, muß das Licht zur Absorption eine niedrigere Frequenz besitzen als für ruhende Atome. Bei der Absorption erhält das Atom Energie und Impuls des absorbierten Photons. Dadurch wird es geringfügig abgebremst. Nach etwa 10^{-8} Sekunden wird wieder ein Photon emittiert, allerdings in eine beliebige Richtung, so daß das Atom einen kleinen Rückstoß erleidet. Wegen der zufälligen Richtung des Rückstoßes wird nach zahlreichen Licht-Atom-Wechselwirkungen die Geschwindigkeit der Atome beträchtlich abgenommen haben. Bedingung sind allerdings starke abstimmbare Laser.

Diese Methode wurde 1985 - nach einem Vorschlag von Hänsch und Schawlow aus dem Jahr 1975 - von Chu und Mitarbeitern am Bell Lab entwickelt. Sie benutzten 6 paarweise entgegengesetzte, auf einander senkrechte Laserstrahlen, um Natriumatome im Schnittpunkt der Laserstrahlen zu kühlen. In welche Richtung sich die Atome auch bewegten, sie bewegten sich gegen einen der Laserstrahlen und wurden durch Lichtabsorption gekühlt. Schließlich bildeten sie eine erbsgroße Wolke aus kalten Atomen, deren Fluoreszenz mit freiem Auge beobachtbar war. Die erreichbare Temperatur ist in einem ein-

fachen Modell (Atom habe nur Grund- und ersten angeregten Zustand) durch die natürliche Linienbreite bestimmt: für Natrium 240 μ K.

Durch ein zusätzliches inhomogenes Magnetfeld, dessen Stärke vom Zentrum nach außen ansteigt, führt die Zeeman-Verschiebung zusammen mit der Doppler-Verschiebung der Niveaus zu einer auf das Zentrum gerichteten Kraft. In dieser magneto-optischen Falle lassen sich Atome minutenlang speichern. Dabei gab es eine Überraschung: Die Temperatur der Atome wurde zu 40 μ K gemessen, weit unter dem durch den Dopplereffekt begrenzten Wert! Die Lösung: das theoretische Modell war zu vereinfacht, die Wechselwirkung zwischen polarisiertem Licht, Magnetfeld und den niedrigsten Energieniveaus von Natrium ermöglichte es.

Die nächste Grenze, die sog. Rückstoßgrenze, erwies sich ebenfalls als überwindbar. Zunächst war zu erwarten, daß eine Geschwindigkeitsreduktion unter die Rückstoßgeschwindigkeit, die ein Atom bei der Emission eines Photons erhält, nicht möglich ist. Der Ausweg besteht in einer Entkopplung von Atomen mit Geschwindigkeit $v = 0$ vom Laserfeld, der sogenannten Dunkelresonanz: Beleuchtet man ein Ensemble von Atomen mit Licht geeigneter Polarisation aus entgegengesetzten Richtungen, so interferieren die Übergangsamplituden aus unterschiedlichen Grundzustandsniveaus in ein gemeinsames angeregtes Niveau destruktiv, und der angeregte Zustand koppelt nicht mehr an das Lichtfeld. Bei Helium ließ sich damit eine Temperatur von 0,18 μ K erreichen, die Heliumatome bewegen sich dabei mit Geschwindigkeiten um 2 cm/s.



Dreidimensionale Laserkühlung von Heliumatomen unter die Rückstoßgrenze: Geschwindigkeiten 0 ± 2 cm/s.

Eine der spektakuläreren Anwendungen der kalten Atome ist eine kürzlich gebaute Atomuhr, in der ein Springbrunnen von Cs-Atomen - langsame Atome laufen auf einer Wurfparabel

Quelle: Pressemitteilung der Nobel-Stiftung, übersetzt und gekürzt von Red.

zweimal durch ein Mikrowellenfeld von 9,17 GHz, durch die im Vergleich zu herkömmlichen Cs-Atomstrahluhren geringe Geschwindigkeit ist die Wechselwirkungszeit um Größenordnungen erhöht verwendet wird. Dies ist die derzeit genaueste Atomuhr mit einer Ganggenauigkeit von $2 \cdot 10^{-15}$, entsprechend etwa 1 Sekunde in 100 Millionen Jahren. Eine weitere Anwendung könnte die Atomstrahlolithographie werden zur Herstellung bisher nicht realisierbarer Nanometerstrukturen - die dazu notwendigen "optischen" Elemente sind "Linsen" aus stehenden Lichtwellen.

Steven Chu, geboren in Saint Louis, USA, promovierte 1976 in Physik an der Universität Berkeley. Von 1978 bis 1987 arbeitete er in den Bell Labs, seither ist er Professor an der Universität Stanford.



Claude Cohen-Tannoudji, geboren in Algerien, kam 1953 nach Paris. Sein Doktorat machte er 1962, seit 1964 ist er Professor an der Université de Paris und gehört seit 1973 dem Collège de France an.

William Phillips promovierte 1976 am MIT und arbeitet seit 1978 am National Institute for Standards and Technology.



Computorexperimente mit der menschlichen Stimme

Ivo Verovnik und Leopold Mathelitsch

Zur Analyse von Klängen, wie sie etwa von Musikinstrumenten erzeugt werden, müssen vorerst Druckschwankungen in sehr hoher zeitlicher Auflösung aufgenommen werden (Fig. 1a), d.h. es muß eine große Datenmenge erfaßt werden. Im weiteren werden diese Daten mittels Fouriertransformation in aussagekräftigere Parameter und Darstellungen, wie Frequenzspektrum (Abb. 1b) und Sonagramm (Abb. 2) übergeführt.

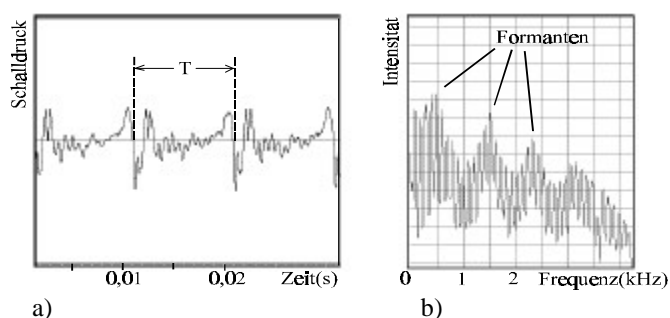


Abb. 1: Der Vokal "e", gesprochen mit einer Frequenz von 100 Hz.
a) Wellenform des Schalldrucks. b) Frequenzspektrum.

Solche Auswertungen konnten bis vor wenigen Jahren nur mit aufwendigen Computern in speziellen Forschungszentren durchgeführt werden. Die rasante Entwicklung der Computertechnik ermöglicht es heute aber, diese Untersuchungen und Berechnungen auch von einem Personal-Computer durchzuführen, wobei die benötigte Software allgemein erhältlich ist. Im folgenden möchten wir ein derartiges Auswertesystem vor-

stellen und anregen, dieses auch im Physikunterricht einzusetzen. Das System ist so einfach zu bedienen, daß es selbst Schüler damit einfache Untersuchungen ("Miniforschungen") durchführen können. Als Anwendungsbeispiel wollen wir hier die physikalischen Grundlagen der menschlichen Stimme diskutieren.

Die von uns verwendete Hardware besteht aus der Soundcard Sound Blaster 16 [1], wobei als Grundeinheit ein PC der Generation 386 und aufwärts benötigt wird. Das Shareware Programm Cool Edit [2] erlaubt, Daten über ein Mikrofon online aufzunehmen und zu speichern, kann aber auch Daten von einer Audio-CD übernehmen. Die Darstellung der Daten erfolgt als Zeitentwicklung der Schallwelle (Abb. 1a) oder als Fouriertransformierte in Form eines Frequenzspektrums (Abb. 1b). Mehr Aussagekraft hat ein sogenanntes Sonagramm, das die Zeitentwicklung der einzelnen Frequenzen (Grund- bzw. Obertöne des Schalls) wiedergibt, wobei die Intensitäten der einzelnen Partialtöne durch die Stärke der Grauschattierung gezeigt sind (Abb.2).

Mit diesem Instrumentarium können die Grundprinzipien einer Stimmformung gezeigt werden. Die Stimmlippen schwingen mit einer bestimmten Periode, die die Höhe des ausgesandten Tons angibt. Das Beispiel von Abb. 1 zeigt eine Schwingungsdauer von $T = 0,01$ s (Abb. 1a) bzw. die entsprechende Grundfrequenz von $f = 100$ Hz (Abb. 1b und linke Hälfte von Abb. 2). Abb. 1b zeigt den Grundton mit der Frequenz f und eine große Anzahl von ausgeprägten Obertönen, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache des Grundtons sind.

Der von den Stimmlippen ausgesandte Ton wird durch die Mundhöhle als Resonator verformt. Die Mundhöhle hat be-

Ivo Verovnik, Staatsschulrat Slowenien, Ljubljana, Slowenien;
Leopold Mathelitsch, Inst. f. Theoret. Physik, Univ. Graz, Österreich

stimmte Eigenfrequenzen, die sogenannten Formanten. Sie verändern den Stimmbandton so, daß bestimmte Frequenzbereiche verstärkt werden. Die frequenzmäßigen Positionen der Formanten (besonders der ersten zwei) bestimmen den Vokal, der gesprochen wird. Abb. 2 zeigt den Vokal "e", gesprochen mit der Grundfrequenz 100 Hz bzw. 200 Hz. Das Frequenzmuster wird dabei auf das Doppelte vergrößert, die Lage der Formanten bleibt unverändert.

Schüler können nun selbst experimentieren und etwa die Unterschiede zwischen den einzelnen Vokalen anhand der Formanten aufzeigen (Abb. 3). Sie können untersuchen, welche physikalische Eigenschaften die Konsonanten innehaben, sie können Frauen-, Männer- und Kinderstimmen vergleichen oder Unterschiede zwischen einzelnen Stimmen erkunden (das Geheimnis des Timbres erforschen).

Die Möglichkeit der Verwendung von Audio-CDs erlaubt auch die gezielte Analyse von Singstimmen. Man kann Eigenheiten einer im europäischen Opernstil (bel canto) ausgebildeten Stimme erkennen, von denen eine in Abb. 4 gezeigt ist. Neben den für die Vokalbildung zuständigen Formanten ergibt sich bei etwa 2500-3000 Hz ein sogenannter Singformant. Dieser wird dadurch gebildet, daß sich der Kehlkopf während einer Gesangsausbildung etwas senkt und damit ein zusätzlicher Hohl-/Resonanzraum gebildet wird. Dieser Singformant ist hauptsächlich dafür verantwortlich, daß eine Singstimme ein Orchester "übertönen" kann [3].

Es können weitere Eigenschaften einer ausgebildeten Singstimme, wie z.B. das Vibrato, untersucht werden, es können die Stimmen von Opern-, Musical- oder Schlagersängern verglichen werden usf. Auch Absonderlichkeiten wie Jodeln, Bauchreden können untersucht werden.

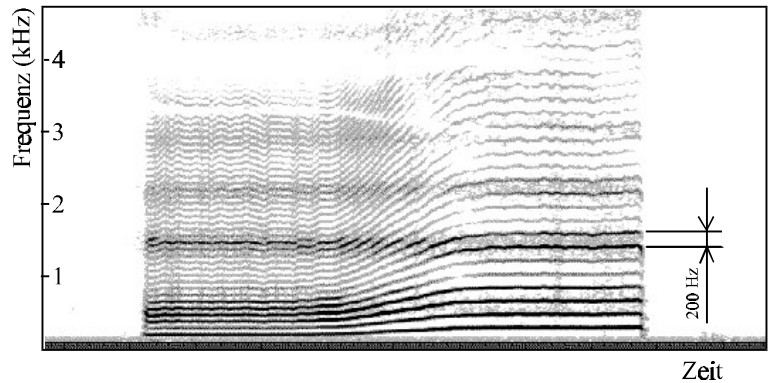


Abb. 2: Der Vokal "e", gesprochen mit einer Frequenz von 100 Hz (linker Teil) und von 200 Hz (rechts).

Wir wollten mit diesem Beispiel die Möglichkeiten aufzeigen, die sich aus einem System von Hard- und Software ergeben, das auch für den Schulunterricht durchaus erschwinglich und zugänglich ist [4]. Andere mögliche Anwendungen, etwa die Analyse der Töne von Instrumenten oder der Geräusche unserer Umwelt ganz allgemein, zeigen weiters, wie der Einsatz eines solchen Systems zu einer Bereicherung des Akustikunterrichts beitragen kann.

- [1] Sound Blaster 16, Creative Labs, Creative Technology Ltd., Singapore, Fax: +65 773 0353.
- [2] Cool Edit 96, Syntrillium Software Corporation, Phoenix, USA. E-mail: syntrill@aol.com. Es ist eine Grundgebühr von US\$ 50,- zu entrichten.
- [3] L. Mathelitsch, G. Friedrich, *Die Stimme*, Springer Heidelberg, 1995.
- [4] Das in Österreichs Schulen eingesetzte System DIBOX/WIN-LAB kann mittels des Softwarepakets "Akustik 1" (Fa. ZOESOFT) Fourieranalysen in einem Frequenzbereich von 40 Hz bis 80 kHz durchführen; die Ausgabemöglichkeit mittels eines Sonagramms ist allerdings nicht vorgesehen.

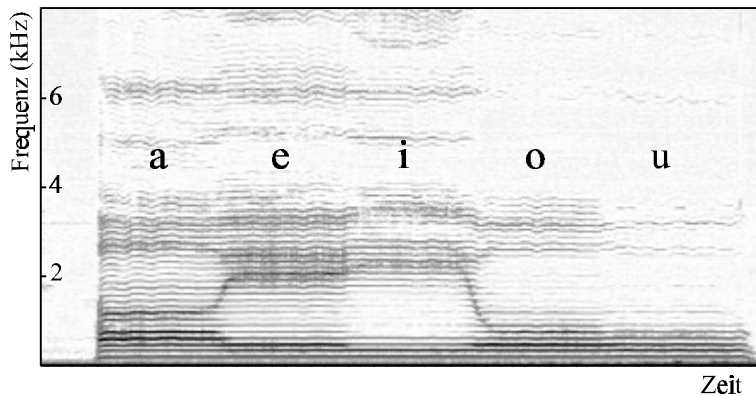


Abb. 3: Sonagramm der einzelnen Vokale.

Abb. 4: Frequenzspektrum der Stimme von José Carreras.

