

# Wissenschaftliche Nachrichten

Gewidmet von der  
**VEREINIGUNG ÖSTERREICHISCHER  
INDUSTRIELLER**

Nr. 7 - April 1965

## Inhalt:

### PHYSIK

Der MHD-Wandler  
Kurznachrichten  
Spin, Isospin, Hyperladung  
Die Theorie der superdichten Sterne

### CHEMIE

DNS, RNS und der genetische Code (II)  
Endogene Amine im Stoffwechsel des Gehirns und psycho-

trope Pharmaka

Die Anwendung des Mössbauer-Effektes in der Chemie

### EXPERIMENTALPHYSIK

Elektrische Schwingungen im Unterricht der Oberstufe

### Vorschau auf den Inhalt der nächsten Folge:

Der genetische Code (III)  
Schlüssel-Schloß Strukturen in der organischen Chemie  
Fortschritte beim Kontinuumproblem  
Speicherringe  
Dauer des Venustages

## PHYSIK

Dr. Walter Kranzer

### Der MHD-Wandler

Nachdem in Nr. 4, Jänner 1964, der „Wissenschaftlichen Nachrichten“ über den Thermoionic-Generator berichtet wurde, möge diesmal das Interesse auf eine andere Methode der direkten Umwandlung von Wärme in elektrische Energie gelenkt werden, die in der Forschungsanlage der International Research and Development Co. Ltd. in Newcastle-upon-Tyne ihre Feuerprobe bereits bestanden hat. Nach drei Jahren theoretischer und experimenteller Vorarbeiten wird dort eine elektrische Dauerleistung von 0,5 Watt zustande gebracht. Das ist nicht viel, aber die Steigerung auf mehrere 100 MW — dieses Ziel wird allen Ernstes von den Technikern angestrebt — könnte unter Umständen leichter fallen als die erste Dauerproduktion eines halben Watt.

MHD sind die Anfangsbuchstaben der Wortgruppe magneto-hydro-dynamisch. Der Magnetismus spielt nämlich in der neuen Methode dieselbe Rolle wie bei den konventionellen Dynamomaschinen. Der Unterschied besteht in der Natur des durch das Magnetfeld bewegten Leiters. In den Generatoren der Kraftwerke rotieren metallische Leiter, die als Drähte um Eisenkerne gelegt sind, in Magnetfeldern. Die Wechselwirkungskräfte zwischen dem Feld und den leicht beweglichen Elektronen im Material der Wicklung zwingen die letzteren zu geordneter Bewegung — es fließt ein elektrischer Induktionsstrom.

Im MHD-Wandler bewegt sich an Stelle der Wicklung ein Plasmaström durch das Magnetfeld. Plasma ist ionisiertes Gas und enthält als solches freie Ladungsträger — Elektronen und Ionen —, welche unter dem Einfluß des Magnetfeldes quer zur Stromrichtung des Plasmas in Bewegung kommen. Der Induktionsstrom trifft

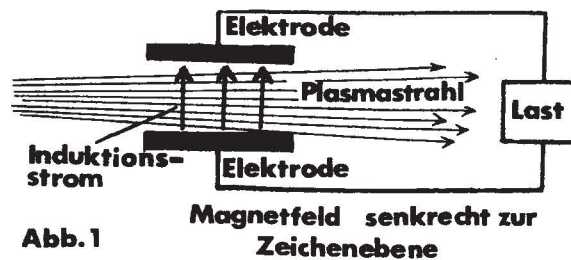


Abb. 1

auf zwei Elektroden, welche über die äußere Belastung in leitender Verbindung stehen (siehe Abb. 1), wodurch der Stromkreis geschlossen ist! Die Energie des elektrischen Stroms stammt aus der kinetischen Energie des Plasmastrahls, der im Verlauf der Induktionsvorgänge abgebremst wird (Lenzsche Regel!).

Das ist in größten Zügen die Wirkungsweise des MHD-Wandlers. Um über ihn zu einem reiferen Urteil zu gelangen, müssen die Einflüsse der verschiedenen Parameter genauer untersucht werden.

**1. Die Leitfähigkeit des Plasmas.** Im festen Aggregatzustand haben die Kohäsionskräfte zwischen den Ionen des Kristallgitters das Übergewicht über den gefügelockernden Einfluß der Wärmebewegung. Diese bewirkt, sobald der Materialschmelzpunkt erreicht ist, die erste tiefgreifende Veränderung der Erscheinungsform der Substanz. Die Kohäsion reicht nicht mehr zur Beibehaltung der Gestalt aus, wohl aber vermag sie das Volumen der Flüssigkeit nahezu konstant zu halten. Das wird erst nach

Tabelle 1

Gas		H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	Br <sub>2</sub>	J <sub>2</sub>	NO	HCl
Dissoz.- energie	in eV	4,46	5,11	9,76	4,45	2,47	1,96	1,53	5,3	4,40
	in kcal/Mol	103	119	225	103	57	45	35	122	102
	in kcal/gramm	51	3,72	8,04	1,61	0,803	0,281	0,138	4,07	2,8

Tabelle 2

Stoff		H	H <sub>2</sub>	N	N <sub>2</sub>	O	O <sub>2</sub>	He	Na	Cs	K
Ionisations- energie	in eV	13,6	15,4	14,5	15,8	13,6	11,2	24,6	5,1	3,9	4,34
	in kcal/Mol oder kcal/Grammatom	315	356	335	365	315	259	568	118	90,2	101
	in kcal/Gramm	313	177	23,9	13	19,7	8,1	142	5,13	0,68	2,58

dem Verdampfen anders. Die Moleküle von Gasen bewegen sich im Durchschnitt derart rasch aneinander vorbei, daß die im winzigen Zeitintervall stärkster Annäherung nach wie vor auftretenden Kräfte nicht mehr in der Lage sind, Dauerbindungen zwischen den Molekülen herbeizuführen. In den seltenen Fällen eines langsamen Vorbeifluges (die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung sichert auch in heißen Stoffen einem Teil der Moleküle kleine Geschwindigkeiten zu) mit nachfolgender Bindung wird dieselbe von der nächsten Kollision wieder gesprengt.

Meistens enthalten die Moleküle des Gases mehrere Atome, welche durch Coulomb- (Ionenmoleküle, heteropolare Bindung) und Austauschkräfte (homöopolare Bindung) zusammengehalten werden. Sie übertreffen bei weitem die Kohäsionskräfte. Trotzdem sind auch sie nicht auf die Dauer der Wärmebewegung gewachsen. Die molekulare Struktur geht durch thermische Dissoziation verloren, das Gas wird einatomig.

Noch kreisen aber die Elektronen um die Kerne der Atome, das Gas leitet mangels beweglicher Ladungen die Elektrizität nicht. Erreicht die kinetische Energie eines Atoms des Gases die eigene Ionisierungsenergie, dann kann sich anlässlich eines „günstig“ verlaufenden Wärmestoßes ein Elektron ablösen. Zusammen mit dem positiven Atomrest bildet es ein Ionenpaar. Sobald die Anzahl der Ionenpaare merklich anwächst, entsteht der vierte Aggregatzustand. Das Gas verwandelt sich in ein Plasma.

Die Austrittsarbeit für ein zweites Elektron ist bedeutend höher, da die Coulombsche Bindung anwächst, wenn dem Atom schon ein Elektron entrissen wurde. Auf diese Weise führt die Aufheizung des Plasma zur doppelten, dreifachen usw. Ionisierung, bis im Extremfall nur mehr nackte Kerne (stripped atoms) und Elektronen durcheinanderwirbeln. Die kinetische Intensität der Kollisionen verhindert jegliche dauernde Rekombination. Ein Plasma

besitzt immer elektrische Leitfähigkeit, ist aber natürlich nach außen neutral, weil alle Ladungen dem Vorzeichen nach in Paaren auftreten, deren Wirkungen einander neutralisieren. Auch stromführende Drähte sind nach außen neutral.

Selbstverständlich gehen die Prozesse der Dissoziation und der 1-, 2-, ...-fachen Ionisierung nicht getrennt vorstatten. Schon vor Beendigung der Dissoziationsphase beginnt die Bildung von Molekülionen. Es verschiebt sich nur die Häufigkeit der verschiedenen Prozesse mit der Erwärmung.

Die Dissoziationsenergien (aus dem Grundzustand) betragen einige eV. Sie liegen wie die nachstehenden Tabellen 1 und 2 zeigen, erheblich unter den Ionisationsenergien (aus dem Grundzustand).

Die Anteile an neutralen bzw. ionisierten Molekülen, ferner an neutralen bzw. 1- oder 2fach ionisierten Atomen in ihrer Abhängigkeit von der Temperatur sind aus Tabelle 3 ersichtlich. Sie bezieht sich auf Stickstoffplasma unter dem konstanten Druck von 1 at.

Die Zahl der freien Elektronen beträgt  $N_e = N_1 + 2 \cdot N_2 + 3 \cdot N_3 + \dots$ , wenn  $N_k$  k-fach ionisierte Atome vorhanden sind.

Obwohl dies nichts mehr mit dem MHD-Wandler zu tun hat, wollen wir den Vorgang der Gefügelockerung durch Erwärmung weiter verfolgen. Erreicht die Temperatur Werte von einigen Millionen Grad, so ist die Wucht der Wärmestöße imstande, Kernreaktionen auszulösen. Die kinetische Energie der freien Kerne im Plasma reicht gelegentlich aus, die Coulombsche Abstoßung so weit zu überwinden, daß sie einander bis auf Abstände nahekommen, welche kleiner sind als die (sehr geringe) Reichweite der Kernkräfte. Dann beginnen sich jene selbst-erhaltenden nuklearen Prozesse auszubilden, aus denen die Sterne ihre gigantischen Strahlungsverluste decken.

Tabelle 3

Temperatur		10.000° K		20.000° K		30.000° K	
		%	cm <sup>-3</sup>	%	cm <sup>-3</sup>	%	cm <sup>-3</sup>
Prozentanteil und Teilchendichte von	N <sub>2</sub>	0,45	2,9 · 10 <sup>15</sup>	—	—	—	—
	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	0,004	2,8 · 10 <sup>13</sup>	—	—	—	—
	N	95,5	6,5 · 10 <sup>17</sup>	2,5	4,5 · 10 <sup>15</sup>	—	—
	N <sup>+</sup>	4	2,6 · 10 <sup>16</sup>	97,2	1,8 · 10 <sup>17</sup>	52	6,2 · 10 <sup>16</sup>
	N <sup>++</sup>	—	—	0,3	5 · 10 <sup>14</sup>	48	6 · 10 <sup>16</sup>

Die letzte Phase ist die vollständige Desintegration sämtlicher zusammengesetzter Kerne. Das Plasma ist ein Gemisch von Protonen, Neutronen und Elektronen, zu denen sich Mesonen und andere kurzlebige Partikeln gesellen, die immer entstehen, wenn höchste Energien umgesetzt werden.

Eine natürliche Folge der Ionisierung ist die Zunahme des thermischen und elektrischen Leitvermögens, die wir wieder beim Stickstoff untersuchen wollen. Der Wärmeleitkoeffizient  $\kappa$  der Plasmen setzt sich einerseits aus den partiellen Koeffizienten für die Wärmeleitfähigkeit der Moleküle, Atome und Ionen, andererseits aus den Anteilen der Dissoziations- und Ionisationswärmeleitung zusammen. Man versteht, daß angesichts derart komplizierter Verhältnisse keine lineare Relation zwischen  $\kappa$  und der Temperatur bestehen kann.

Bei 500° K hat  $\kappa$  einen Wert von  $4 \cdot 10^3$  CGS-Einheiten und erreicht, sehr ungleichmäßig wachsend, bei 6800° K ein erstes Maximum von  $5,6 \cdot 10^5$  CGS-Einheiten. Die Wärmeleitfähigkeit des Stickstoffplasmas hat sich somit um den Faktor 140 verbessert.  $\kappa$  sinkt nun infolge des Abfalls der Beiträge der Dissoziationsvorgänge und der Moleküle auf das relative Minimum von  $1,26 \cdot 10^5$  bei 9300° K. Das nächste Maximum von  $\kappa$  ist  $1,8 \cdot 10^6$  und erscheint bei 13.900° K.

Die elektrische Leitfähigkeit der Gase ist durch die Bank verschwindend klein. Erst mit dem Einsetzen der thermischen Ionisierung endet dieser Zustand. Bei hohen Temperaturen werden Plasmen hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit Metallen wie Kupfer ebenbürtig und überlegen. Wasserstoff (wegen seiner hohen Ionisationsenergie besonders ungünstig) muß auf etwa 10 Millionen Grad gebracht werden, um die Leitfähigkeit des Kupfers zu erreichen, falls er unter dem Druck von 1 at steht. Im allgemeinen begünstigt niedriger Druck das Leitvermögen.

Wer einen brauchbaren Wandler bauen will, muß den realen technologischen Verhältnissen Rechnung tragen, das heißt die Temperaturen des Plasmastrahls dürfen 3000° K nicht überschreiten. In der Praxis wird die Betriebstemperatur wohl um 1000° tiefer liegen. Dann ist aber die Ionisierung noch recht geringfügig, der hohe spezifische Widerstand des Plasmas verhindert die Ausbildung starker Ströme.

Als sehr wirksames Gegenmittel erwies sich das „Impfen“ des Plasmas mit leicht ionisierbaren Atomarten. Cs würde sich besonders gut für diese Zwecke eignen, wenn es nicht so teuer und chemisch aggressiv wäre. Die unliebsamste Folge ist die rasche Zerstörung des Elektrodenmaterials. Daher wird Kalium als Impfstoff bevorzugt. Die Beimengung von nur 1% Kalium verleiht einem Argonplasma (bei 1 at Druck) die Leitfähigkeit  $120 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ . Das reicht hin, um die geometrische Größe eines Wandlers für 100 MW in tragbaren Grenzen zu halten.

Die Plasmatemperaturen werden durch Verbrennung von Öl, Kohle usw. erzielt, können aber auch von Kernreaktoren geliefert werden. Auch im letzteren Fall ist kaum mit der Überschreitung der 3000°-Grenze zu rechnen, weil die thermische Belastungsfähigkeit der Bauteile ungefähr in dieser Höhe liegt.

**2. Die Plasmageschwindigkeit.** Zur Erzielung der angestrebten Leistung müssen drei Faktoren zusammenwirken: Gute Leitfähigkeit des Plasmas, hohe Strömungsgeschwindigkeit desselben und ein kräftiges Magnetfeld. Wie schon anfangs gesagt, entspricht die Bewegung des aus der Düse strömenden Plasmas der Bewegung der Rotorwicklungen im Magnetfeld der herkömmlichen Generatoren. Die induzierte Spannung steigt mit der Geschwindigkeit des Leiters, welcher die magnetischen Kraftlinien schneidet. Je rascher also das Plasma zwischen den parallelen Elektroden durchtritt, desto stärkere Induktionsströme fließen quer zur Strömungsrichtung des Plasmastrahls.

Die Strömungsgeschwindigkeit kann auf zwei Arten beeinflußt werden: a) Sie wächst mit der Temperatur und mit abnehmendem Molekulargewicht der strömenden Substanz. Die reichen Erfahrungen, die in dieser Richtung bei den Raketentreibstoffen gesammelt wurden, stehen den Technikern nun auch für den MHD-Wandler zur Verfügung. Freilich, die diesbezüglich noch zu erwartenden Fortschritte werden keine Sensationen mehr bringen.

**3. Das Magnetfeld.** Die neueren Entwicklungen auf dem Gebiet der Supraleitung geben die Mittel in die Hand, Felder mit magnetischen Induktionen von 100.000 Gauß aufzubauen. Spulen mit Eisenkernen liefern höchstens ein Drittel dieses Wertes. Beispielsweise erzeugen bereits 20 Ampere, die in einem Supraleiter fließen, 50.000 Gauß. Das ist ungemein vielversprechend, besonders dann, wenn berücksichtigt wird, daß die Supraleitertechnik erst am Anfang ihres Ausbaues steht.

Bedauerlicherweise beeinträchtigt der Hall-Effekt bei übermäßigem Anwachsen der Feldstärke die Leistung des Wandlers. (Jedes Magnetfeld, dessen Richtung auf einem stromdurchflossenen Leiter senkrecht steht, übt auf die Leitungselektronen eine Kraft aus, welche jenen eine Bewegungskomponente quer zum Leiter aufprägt. Das ist dasselbe, als wenn zwischen gewissen diametralen Mantellinien der Leiteroberfläche eine elektrische Spannung läge: die Hall-Spannung.) Die nachteiligen Wirkungen des Hall-Effekts werden durch Unterteilung der beiden Elektroden in mehrere einander gegenüberstehende Plattenpaare gemildert. Allerdings muß jedes Plattenpaar über einen selbständigen Lastwiderstand zu einem Stromkreis geschlossen werden, der auch außen in keiner leitenden Verbindung mit den anderen infolge der Unterteilung vorhandenen Teilstromkreisen steht.

Der Wirkungsgrad des MHD-Wandlers liegt derzeit bei etwa 20%.

**Anwendungen auf Raketentriebwerke.** Die Energie des erzeugten, quer zum Plasmastrahl fließenden Stroms stammt aus der kinetischen Energie der Plasmateilchen. Je höher der Induktionsstrom, desto stärker ihre Abbremsung.

Man kann aber auch den Spieß umdrehen. Legt man an die Elektroden eine äußere Spannung, die entgegen der Induktionsspannung verläuft, so wird dem Plasmastrahl Energie zugeführt, er wird beschleunigt. Dies kann bei Raketentriebwerken ausgenutzt werden.

Im Leitschienenbeschleuniger wird ein dünner Draht, der im Vakuum die Elektroden eines MHD-Wandlers verbindet, durch Anlegung einer hohen Spannung verdampft. Der entstehende Metaldampf ist das Plasma, durch das nun der Strom fließt, wobei es, wie eben angedeutet, beschleunigt wird.

Die Daten des Leitschienenbeschleunigers sind recht interessant:

Strömungsgeschwindigkeit des Plasmas = 100 km/sek;  
Masse einer Plasmawolke =  $10^{-5}$  g;  
Dauer eines Beschleunigungsimpulses =  $10^{-4}$  sek;  
Schub eines Impulses = 1 kp.

Eine andere Version tritt uns im Pinch-Beschleuniger entgegen. Werden parallele Drähte von gleichorientierten Strömen durchflossen, so ziehen sie einander an. Ganz dasselbe ereignet sich in einer Plasmasäule, an deren Enden eine sehr rasch ansteigende Spannung gelegt wird. Das Magnetfeld, welches dabei entsteht, kontrahiert das Plasma radial, es zieht sich gegen die Achse zusammen. Der mit diesem Vorgang verbundene Druckanstieg erteilt dem Plasma Geschwindigkeiten von derselben Größenordnung, wie sie beim Leitschienenbeschleuniger beobachtet werden.

Bei einer dritten Ausführung wird in ganz kurzer Zeit ein Magnetfeld parallel zur Plasmaachse aufgebaut. Jetzt setzen aber die damit einhergehenden Induktionsströme und ihre Magnetfelder das Plasma von außen her unter Druck. Hat der vom Plasma erfüllte Raum konische Form, dann erfolgt der Druckausgleich durch Beschleunigung des Plasmas in der Kegellachse. Der durchschnittliche Schub liegt bei 0,1 kp, wenn in jeder Sekunde das Magnetfeld ungefähr 1000mal aufgebaut wird.

0,1 kp sind nicht welterschütternd, wohl aber das Ergebnis der Anwendung neuer technischer Ideen. Neue Gedankengänge haben aber die Eigenart, in plötzlichen Durchbrüchen unsere Fähigkeiten auf höhere Stufen der Vollkommenheit zu heben.

**Literatur:** Umschau i. Wi. u. Te., Heft 10 und 11, 15. Mai und 1. Juni 1964, S. 289 und S. 329. Dr. E. Pfender: Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Magneto-Hydrodynamik.

# Kurznachrichten

**1. 600 Millionen Jahre alte lebensfähige Bakterien.** In Nr. 1 der „Wissenschaftlichen Nachrichten“ wurde von Arbeiten Dombrowskis berichtet, die zur Aktivierung der Lebensfunktionen von Bakterien führten, welche 350 Millionen Jahre in Steinsalz konserviert waren.

Derselbe Forscher hat nun in Zechsteinsalzen, die aus den ältesten Salzlagern der Erde stammen, nach Einhaltung aller Vorsichtsmaßnahmen neuerlich Bakterien gefunden und reaktiviert. Das Zechsteinmeer, aus dem sie ins Salz gelangten, verschwand vor 600 bis 650 Millionen Jahren (Unterkambrium).

Vor Einbringung der Salzproben in die Nährlösung wurde die Oberfläche sorgfältig abgeflammt. Ferner überzeugte man sich durch mikroskopische Beobachtung von Dünnschliffen, daß die Bakterien nicht zufällig in feinste Ritzen des Salzstückes gelangt waren, die beim Losbrechen immer entstehen.

In einem Kontrollversuch wurden halophile (=salzliebende) Bakterien durch fünf Jahre ständig in Salz eingeschlossen gehalten und anschließend in der Nährlösung zur Wiederaufnahme aller Lebensfunktionen gebracht.

**Literatur:** Umschau i. W. u. T., Heft 6, 15. März 1964, S. 185. 600 Millionen Jahre alte Bakterien — lebensfähig.

**2. Allotropie von Helium.** Verschiedene Elemente treten in allotropen Modifikationen auf, die sich durch die Konfiguration des Kristallgitters unterscheiden. Derzeit sind von den beiden He-Isotopen He<sup>3</sup>, He<sup>4</sup> je drei Allotrope bekannt, welche man durch die Symbole  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  unterscheidet, deren uneinheitliche Bedeutung (bei He<sup>3</sup> und He<sup>4</sup>) zur Verwirrung Anlaß gibt. Deshalb wurde folgende neue Kennzeichnung vorgeschlagen, aus der die Art des Gitterbaues unmittelbar zu entnehmen ist:

bcc ..... body centered cubic  
hcp ..... hexagonal close packed  
ccp ..... cubic close packed.

Danach sind:

He<sup>3</sup>  $\alpha$  ... bcc      He<sup>4</sup>  $\alpha$  ... hcp  
       $\beta$  ... hcp             $\beta$  ... ccp  
       $\gamma$  ... ccp             $\gamma$  ... bcc.

Die beiden Diagramme der Abb. 2 zeigen die Existenzbereiche der He-Formen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur.

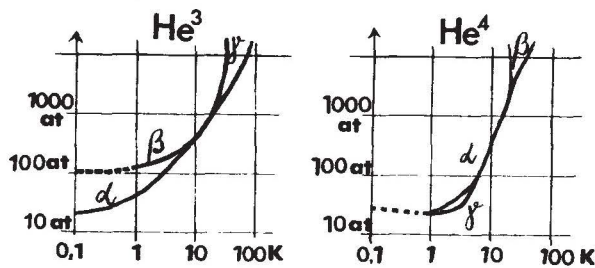


Abb. 2

He<sup>4</sup>  $\alpha$  und  $\beta$  wurden 1953 von Dugdale erkannt, He<sup>4</sup>  $\gamma$  wiesen 1961 Vignos und Fairbanks nach.

He<sup>3</sup>  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  fand man in Los Alamos bei Beugungsversuchen mit  $\gamma$ - und Neutronenstrahlen.

**Literatur:** Physics Today, I. 64, S. 50. J. G. Daunt, A. F. Schuch, R. L. Mills: Proposed Nomenclature for He-Allotropes.

**3. Positive Temperatur in der Stratosphäre.** Das Berliner Meteorologische Institut stellte am 31. Jänner 1964 in einer Höhe von 37,2 km bei einem Luftdruck von 3,8 mb eine über dem Gefrierpunkt liegende Temperatur der Luft fest. Niemals vorher wurden derartige Beobachtungen gemacht.

**Literatur:** Beilage zur Berliner Wetterkarte vom 3. Februar 1964.

**4. Photographie dünner Grenzschichten.** Die Entgasung von Flüssigkeiten und alle damit verbundenen Erscheinungen sind für den Techniker von großem Interesse. Besonders wichtig ist das Studium der Grenzschichten, welche die aufsteigenden Gasblasen einhüllen.

Auf sehr elegante Weise kann man seit einiger Zeit diese Grenzschichten sogar im Lichtbild festhalten und ihre Modifikation im Laufe des Aufsteigens studieren.

Betrachten wir, um die Methode zu verstehen, CO<sub>2</sub>-haltiges Wasser. Diesem wird Bromkresolgrün als Indikator beigegeben, dessen Färbung beim pH-Wert 4,6 in Gelb umschlägt (pH = -log c, c = Wasserstoffionenkonzentration).

Im Inneren der Flüssigkeit ist die H-Ionenkonzentration konstant, fällt aber in der dünnen Grenzschicht, welche eine CO<sub>2</sub>-Blase umgibt, auf 0 ab, weil die CO<sub>2</sub>-Verluste der Flüssigkeit gegen die Blasengrenze hin anwachsen (infolge von Diffusion von CO<sub>2</sub> in den Hohlraum). Die Grenzschicht erscheint also gelb und kann photographiert werden.

**Literatur:** Umschau i. W. u. T., Heft 3, 1. Februar 1964, S. 77. Entgasen und Verdampfen von Flüssigkeiten im Vakuum.

**5. Gezielte Metallverformung durch Explosionsdruck.** Rasche Verformung von Metallen führt schwerer zum Bruch (Ribbildung) als langsame Deformation. Bei Umformgeschwindigkeiten von 300 bis 2000 m/sek verbessert sich das Verhalten von Al beispielsweise um den Faktor 2,5!

Die Stoßwellen einer Explosion haben Geschwindigkeiten bis zu 9 km/sek und verursachen Drücke bis 300.000 at.

Zur Explosivbearbeitung eignen sich alle Blechdicken zwischen 0,05 und 100 mm. Über dem Blech detoniert der Sprengstoff und drückt es in die darunter angebrachte Form. Zwischen Blech und Druckquelle kann Wasser geschaltet werden, dem die Aufgabe der Druckübertragung auf das Metallstück zufällt.

Beim Dynapack-Verfahren treibt detonierendes Gas einen Stempel gegen das Blech.

**Literatur:** Umschau i. W. u. T., Heft 6, 15. März 1964, S. 171. Metallbearbeitung durch Explosionsenergie.

**6. Whiskermetalle.** Die reale Bruchgrenze der im Bauwesen und im Maschinenbau verwendeten Stoffe liegt weit unter dem theoretischen Wert. Wie bei einer Kette richtet sich auch bei Drähten und Stäben die Belastungsfähigkeit nach dem schwächsten Glied. Die schwachen Glieder von Metallen sind Kerbstellen, Fremdeinschlüsse, Mikrorisse usw. Der Einbau anderer Stoffe zwecks Erhöhung der Festigkeit steht seit langem in Gebrauch, man denke nur an die Armierung von Beton mit Stahl.

Seit einiger Zeit geht man daran, Metallen haarförmige Einkristalle aus Wolfram, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> usw. beizumengen (daher der Name „Whisker“). Die Länge eines Whiskers beträgt etwa 2 cm, sein Durchmesser nur einige  $\mu$ m. Überdies wird die Oberfläche solcher Fasern durch Flammpolitur von allfälligen Kerben befreit.

Die Erfolge des Verfahrens sind beachtlich. Während die maximale Zugfestigkeit von Spezialstählen 120 kp/mm<sup>2</sup> beträgt, erreicht diese bei manchen Einkristallen 1500 kp/mm<sup>2</sup>. Besonders wertvoll ist die Erhaltung großer Festigkeit im Bereich höherer Temperaturen, wie die nachstehende Übersicht für Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Whisker zeigt.

Die Bruchgrenze beträgt

bei 20° C	630—1050 kp/mm <sup>2</sup>
bei 1100° C	420—730 kp/mm <sup>2</sup>
bei 1540° C	200—280 kp/mm <sup>2</sup>
bei 1850° C	70—140 kp/mm <sup>2</sup>

In Legierungen von 80 Teilen Ni mit 20 Teilen Cr steigt die Festigkeit nach Beimengung von 3,8 Gewichtsprozent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Whisker um 28%. Baut man in Eisen 8 Gewichtsprozent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Whisker ein, so wächst die Festigkeit bei Zimmertemperatur um 34%, bei 482° C um 30%.

Als Whisker eignen sich ferner SiC, TiC, TiB.

**Literatur:**

1. Nature, Bd. 196, 1962, S. 1082.

2. Umschau i. W. u. T., Heft 9, 1. Mai 1964, S. 283. Dr. G. Nitschmann: Whiskerverstärkte Metalle.

**7. Das Radioteleskop von Arecibo.** Die Liste der ganz großen Radioteleskope hat eine wertvolle Bereicherung erfahren. Auf Grund der Berechnungen und Planungen von Gelehrten der Cornell-Universität in den USA wurde in vierjähriger Bauzeit mit einem Kostenaufwand von acht Millionen Dollar das amerikanische Ionosphärenobservatorium in Arecibo (Puerto Rico) fertiggestellt und am 1. November 1963 den Wissenschaftlern übergeben. Infolge seiner Größe — der Reflektor hat einen Durchmesser von 304 m und eine Tiefe von 47 m — ist die schüsselförmige Antenne nicht schwenkbar, sondern fest in einer Talmulde verankert. Die Fokussierungseinrichtungen sind verschiebbar in einer Höhe von 150 m über dem Boden an Kabeln befestigt. Dadurch ist es trotz der sonst starren Montage möglich, einen Himmels teil von etwa 40° Durchmesser zu beobachten. Man darf davon außerordentlich interessante Ergebnisse erwarten.

**Literatur:** Phys. Blätter, Heft 1, Jänner 1964, S. 31. Das Radioteleskop von Arecibo.

## Spin, Isospin, Hyperladung

### A. Der Spin

Als die Bohrschen Quantenbedingungen den theoretischen Zugang zum Verständnis der Spektren geöffnet hatten, setzte die Untersuchung des bereits vorhandenen reichhaltigen experimentellen Materials ein und zeitigte großartige Erfolge. Jede Spektrallinie entsteht bei der Rückkehr von Elektronen der Atomhülle aus energetisch höheren in tiefere Quantenzustände. Die emittierte Frequenz  $\nu$  ergibt sich aus der bekannten Beziehung  $h\nu = E_2 - E_1$ , in der  $E_1, E_2$  die End- bzw. die Ausgangsenergie,  $h$  die Plancksche Konstante bezeichnen.

Auf Grund der Bohrschen Ansätze wurde ein Quantenzustand durch die drei ganzen Zahlen  $n$  (Hauptquantenzahl),  $l$  (Nebenquantenzahl),  $m$  (magnetische Quantenzahl) charakterisiert, deren Werte die Energie des Elektrons bestimmen. Die Interpretation von  $n, l, m$  in der älteren Theorie (d. h. vor dem Aufkommen der Quanten- und Wellenmechanik), der noch die klassischen Bahnvorstellungen vorschwebten, bezog sich auf Haupt- und Nebenachsen der Bahnellipsen ( $n$  und  $l$ ), sowie auf die Einstellung der Bahnebene relativ zur Richtung eines Magnetfeldes ( $m$ ).  $n$  konnte jede natürliche Zahl sein,  $l$  lief von 0 bis  $n-1$  und  $m$  variierte zwischen  $-l$  und  $+l$ :

$$\begin{aligned} n &= 1, 2, 3, \dots \\ l &= 0, 1, 2, \dots, n-1 \\ m &= -l, -l+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, l-1, l. \end{aligned}$$

Die Rechnung zeigte, daß beim Fehlen eines Magnetfeldes die Bahnenergie  $E_{nl}$  des Zustandes ( $n, l$ ) lediglich von  $n$ , nicht aber von  $l$  abhing

$$E_{n0} = E_{n1} = \dots = E_{nn-1}.$$

Bei Übereinstimmung der Energie in  $p$  verschiedenen Zuständen spricht man von  $p$ -facher Entartung, hier also von  $n$ -facher  $l$ -Entartung. Der Vergleich mit der Wirklichkeit zeigte jedoch eine Aufspaltung der Spektrallinien, die der Entartung widersprach und die faktische Verschiedenheit der Energien  $E_{nl}$  belegte. Daraufhin berücksichtigte A. Sommerfeld in einer berühmt gewordenen Arbeit die relativistischen Effekte, die mit der Massenveränderlichkeit der Elektronen auf elliptischen Bahnen (große Geschwindigkeit im Perihel, kleine im Aphel) zusammenhängen. Das Ergebnis war die Sommerfeldsche Feinstrukturformel, in der die Abhängigkeit der Bahnenergie auch von der Nebenquantenzahl zum Ausdruck kommt. Beim Wasserstoff ist die Linienaufspaltung noch gering, steigt aber bei höheren Massenzahlen stark an.

Die Aufspaltung der Linien in Magnetfeldern interessiert im gegenständlichen Fall weniger, bleibe daher unbesprochen.

Neues Rätselraten setzte ein, als sich die Duplizität der Linien der Atome mit einem Valenzelektron, also der Alkalien, herausstellte. Die meisten Linien waren in Wirklichkeit eng benachbarte Doppellinien, für deren Auftreten keine theoretische Begründung vorlag. Die Atome mit mehreren Valenzelektronen zeigten eine ent-

sprechend größere Multiplizität der Linien. Eingehende Untersuchungen brachten bald des Rätsels Lösung.

Die Deutung der Nebenquantenzahl  $l$  als Maß für die Bahnexzentrizität ist nicht die einzige. Durch  $l$  ist auch der mechanische Bahndrehimpuls gegeben. Der Drehimpuls ist ein Vektor, den man, ohne Verwechslungen befürchten zu müssen, mit  $\vec{l}$  bezeichnet.  $h \cdot \sqrt{l(l+1)}$  ist als sein absoluter Betrag anzusehen, wenn man, wie üblich,  $h$  für  $\frac{h}{2\pi}$  schreibt. (In der ursprünglichen Theorie war  $h \cdot l$  ( $l$ =Nebenquantenzahl) der Betrag von  $\vec{l}$ . Die Quantenmechanik berichtete das — in Übereinstimmung mit daraufhin vorgenommenen Messungen — auf  $h \cdot \sqrt{l(l+1)}$ .  $\vec{l}$  steht auf der Bahnebene des Elektrons senkrecht.

Die erwähnte Linienaufspaltung ergibt sich zwanglos, wenn dem Umlaufelektron neben dem Bahndrehimpuls  $\vec{l}$  noch ein Eigendrehimpuls  $\vec{s}$  (=Spin) zugeschrieben wird, der sich vektoriell mit  $\vec{l}$  zum Gesamtdrehimpuls

$$\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}, \quad |\vec{j}| = h \cdot \sqrt{j(j+1)} \quad (j=l+s \text{ innere Quantenzahl})$$

zusammensetzt.  $s$  bedeutet die Spinquantenzahl, welche, wie aus der Liniendupplung folgt, nur der beiden Werte  $+\frac{1}{2}$ ,  $-\frac{1}{2}$  fähig ist. Der Betrag  $|\vec{s}|$  ist analog

$$h \cdot \sqrt{s(s+1)} = \frac{h}{2} \sqrt{3}.$$

Die Beschränkung von  $s$  auf nur zwei Werte bedeutet, daß  $\vec{s}$  entweder parallel oder antiparallel zu einem vorhandenen Magnetfeld (z. B. dem inneratomaren) orientiert ist.

Zu jedem Wert der Nebenquantenzahl  $l$  gehören daher zwei Gesamtdrehimpulse  $\vec{j} = \vec{l} \pm \vec{s}$ , denen etwas verschiedene Energien entsprechen. Die Folge dieser Niveaufspaltung ist die Linienduplizität.  $j = l \pm \frac{1}{2}$  heißt innere Quantenzahl, eine Benennung, die auf Sommerfeld zurückgeht.

Bei Mehrelektronenatomen liegen die Verhältnisse wohl verwickelter, prinzipiell kommt jedoch kein neuer Gedanke hinzu.

Der Elektronenspin wurde 1925 direkt von Goudsmit und Uhlenbeck nachgewiesen. Im Einstein-de Haas-Effekt zeigte sich die Abhängigkeit des Ferromagnetismus von der Spinorientierung der Elektronen (nicht, wie bis dahin angenommen, von der Bahnorientierung!). Der Versuch von Stern und Gerlach zerlegte einen Strahl von Ag-Atomen in einem stark inhomogenen Magnetfeld in zwei Teilstrahlen, weil die Atome mit entgegengesetztem Spin verschieden abgelenkt wurden. Schließlich konnte Rabi das Umlappen der Spinorientierungen von Atomkernen zeigen, wenn ein Strahl von Molekülen, bei denen das resultierende magnetische Moment der Hüllenelektronen verschwindet, durch geeignete Magnetfelder geschickt wird. Das überzeugende Ergebnis dieser und anderer Versuche führte zur allgemeinen Anerkennung des Spins als einer physikalischen Realität.

Mit dem Spin gesellte sich zu  $n, l, m$  eine vierte Quantenzahl  $s = \pm \frac{1}{2}$ , die erst zusammen mit den drei anderen die Quantenzustände vollständig definiert.

Das Auftreten halbzahliger Quantenzahlen war für die Atomphysik der frühen zwanziger Jahre ein Novum, das großes Unbehagen hervorrief. Es wurde aber unter dem Druck der Beobachtungen ebenso hingenommen, wie die Ganzzahligkeitsforderungen Bohrs. Begründungen fehlten sowohl für das eine wie für das andere. Die entscheidende Wende brachten die Ideen Heisenbergs, Schrödingers und Diracs, die in der Quanten- bzw. Wellenmechanik ihren Niederschlag fanden.

Wie in dem Artikel „Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie“ der Nr. 4 der „Wiss. Nachr.“ auseinandergesetzt wurde, ordnet die Quantenmechanik den physikalischen Größen Operatoren zu, welche auf die  $\psi$ -Funktion einwirken. Für stationäre Zustände geschieht dies — wie rekapitulierend kurz erwähnt sei — in folgender Weise.

Eine physikalische Größe  $L$  läßt sich als Funktion der Orts- und Impulskordinaten  $x, y, z, p_x, p_y, p_z$  eines

Teilchens darstellen. Ersetzt man im Ausdruck  $L(x, y, z, p_x, p_y, p_z)$

$$p_x, p_y, p_z \text{ bzw. durch } -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}, -i\hbar \frac{\partial}{\partial y}, -i\hbar \frac{\partial}{\partial z},$$

so erhält man an Stelle der Funktion  $L$  den Operator

$$\hat{L}\left(x, y, z, -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}, -i\hbar \frac{\partial}{\partial y}, -i\hbar \frac{\partial}{\partial z}\right).$$

Mit ihm wird die zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung

$$\hat{L}\psi = L \cdot \psi$$

gebildet. Plausible Randbedingungen wie Eindeutigkeit, Regularität usw. schränken die Lösungsmöglichkeiten ein. Nur für gewisse Werte  $L_1, L_2, \dots, L_n, \dots$  von  $L$  existiert eine Lösung. Das sind die Eigenwerte der Differentialgleichung, zu deren jedem eine Eigenfunktion aus der Folge

$$\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n, \dots$$

gehört.

Die Größe  $L$  kann im betrachteten Zustand [von ihm hängt der Bau der Funktion  $L(x, \dots, p_x, \dots)$  ab!] nur einen der Eigenwerte  $L_n$  annehmen.  $|\psi|^2$  ist die Wahrscheinlichkeitsdichte, am Ort  $x, y, z$  für  $L$  den Wert  $L_n$  vorzufinden.

Der Operator  $\hat{L}$  läßt sich auch als Matrix mit den Elementen  $L_{mn}$  schreiben, die sich gemäß

$$L_{mn} = \iiint \psi_m^* \hat{L} \psi_n dx$$

berechnen.

Die Einwirkung von  $\hat{L}$  auf eine beliebige Funktion  $f$  liefert eine andere Funktion  $g$ . Hat  $\hat{L}$  die erstgenannte Gestalt eines Differentialoperators, so bietet die Ermittlung von  $g$  keine Schwierigkeiten. Nicht so einfach gelingt die Zuordnung von  $g$ , wenn  $\hat{L}$  Matrixform hat.

Zu diesem Zwecke wird  $f$  nach den Eigenfunktionen  $\psi_n$  entwickelt

$$f = a_1 \psi_1 + a_2 \psi_2 + \dots + a_n \psi_n + \dots$$

und danach die Größen

$$b_m = \sum_n a_n L_{mn}$$

gebildet. Die  $b_m$  sind dann die Koeffizienten in der Entwicklung der zugeordneten Funktion  $g$

$$g = \sum_m b_m \psi_m.$$

Wäre man von einem anderen Orthogonalsystem  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n, \dots$  ausgegangen, so hätte man für denselben Operator  $\hat{L}$  eine andere Matrix erhalten, welche aber  $f$  wieder die gleiche Funktion  $g$  zugeordnet hätte. Unter den möglichen Darstellungen von  $\hat{L}$  befindet sich stets eine, in der die Matrix  $L_{mn}$  Diagonalform hat

$$\begin{pmatrix} L_1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & L_2 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}.$$

Diese Darstellung ist besonders angenehm, weil die Diagonalglieder die Eigenwerte von  $L$  sind.

Die Schrödinger-Gleichung  $\hat{L}\psi = L \cdot \psi$  läßt sich natürlich ebenfalls in die Matrixschreibweise übertragen. Unbekannt sind die Eigenwerte  $L_n$  und die Entwicklungskoeffizienten  $a_n$  der Eigenfunktion  $\psi = \sum_n a_n \psi_n$ . Die  $a_n$  kann man als Komponenten des Vektors  $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, \dots)$  auffassen, so daß die Berechnung von  $\psi$  auf die Ermittlung der  $a_n$  zurückgeführt ist.  $\vec{a}$  repräsentiert sozusagen die Funktion  $\psi$ . Die Schrödinger-Gleichung lautet dann

$$\begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots \\ L_{21} & L_{22} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \end{pmatrix} = L \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \end{pmatrix}.$$

wobei links im Sinne der Matrizenmultiplikation die Zeilen des ersten Faktors mit der einzigen Spalte des zweiten der Reihe nach skalar zu multiplizieren sind. Explizit ist das das lineare homogene Gleichungssystem

$$\begin{aligned} L_{11} a_1 + L_{12} a_2 + \dots &= L \cdot a_1, \\ L_{21} a_1 + L_{22} a_2 + \dots &= L \cdot a_2, \\ \dots & \dots \end{aligned}$$

mit unendlich vielen Unbekannten  $a_1, a_2, \dots$ . Durch Nullsetzen der Determinante erhält man eine (transzendente) Gleichung für  $L$ , deren Wurzeln die gesuchten Eigenwerte sind. Hat  $L_{mn}$  Diagonalform, so vereinfacht sich das System zu

$$\begin{aligned} L_1 a_1 &= L \cdot a_1, \\ L_2 a_2 &= L \cdot a_2, \\ \dots & \dots \end{aligned}$$

und man sieht, daß dann die Diagonalglieder bereits die Eigenwerte sind.

Die Eigenfunktion  $\psi_n$  wird vom Vektor  $(0, \dots, 0, 1, 0, \dots)$  repräsentiert, dessen einzige nichtverschwindende Komponente die  $n$ -te ist. Einsetzen in das letzte System liefert

$$\begin{aligned} L_1 \cdot 0 &= L \cdot 0, \\ L_2 \cdot 0 &= L \cdot 0, \\ \dots & \dots \\ L_n \cdot 1 &= L \cdot 1, \\ L_{n+1} \cdot 0 &= L \cdot 0, \\ \dots & \dots \end{aligned}$$

$L = L_n$  ist also wirklich der  $n$ -te Eigenwert.

Wenden wir nun die gewonnene Einsicht auf den Spin an. Da der Spin  $\vec{s}$  ein Vektor ist  $\vec{s} = (s_x, s_y, s_z)$ , muß auch der Spinoperator drei Komponenten besitzen.  $\hat{s}$  ist also ein Matrix-Vektor-Operator

$$\hat{s} = (\hat{s}_x, \hat{s}_y, \hat{s}_z) \text{ oder } \hat{s} = \left( \frac{\hbar}{2} \hat{\sigma}_x, \frac{\hbar}{2} \hat{\sigma}_y, \frac{\hbar}{2} \hat{\sigma}_z \right)$$

$$\hat{\sigma} = (\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z).$$

Zum Glück sind die Eigenwerte der physikalischen Größe „Spin“ (= Eigendrehimpuls des Elektrons) bekannt:  $+\frac{\hbar}{2}$  und  $-\frac{\hbar}{2}$ . Daher hat  $\sigma$  die Eigenwerte  $+1, -1$  und  $\sigma^2$  die beiden übereinstimmenden Eigenwerte  $1, 1$ . Die Diagonalform des Operators  $\hat{\sigma}^2$  muß daher  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  sein, d. h.

$$\hat{\sigma}_x^2 + \hat{\sigma}_y^2 + \hat{\sigma}_z^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ mal einer Konstanten.}$$

Um die Matrizen der Komponentenoperatoren zu erhalten, ist die Heranziehung der Vertauschungsrelationen erforderlich. Bekanntlich sind nur Operatoren gleichzeitig meßbarer Größen vertauschbar und umgekehrt! Nicht simultan meßbare Größen  $\alpha, \beta$  haben nicht kommutierende Operatoren

$$\hat{\alpha} \hat{\beta} - \hat{\beta} \hat{\alpha} = [\hat{\alpha}, \hat{\beta}] \neq 0.$$

Es liegt nahe, die Spinoperatorvertauschungen — der Spin ist ja als Drehimpuls ein Vektor — ebenso anzusetzen wie die entsprechenden Relationen für den Bahndrehimpuls, die in der Theorie der Quantenmechanik bereits vorliegen. Wir schreiben also

$$[\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y] = \hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y - \hat{\sigma}_y \hat{\sigma}_x = 2i \hat{\sigma}_z,$$

$$[\hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z] = \hat{\sigma}_y \hat{\sigma}_z - \hat{\sigma}_z \hat{\sigma}_y = 2i \hat{\sigma}_x,$$

$$[\hat{\sigma}_z, \hat{\sigma}_x] = \hat{\sigma}_z \hat{\sigma}_x - \hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_z = 2i \hat{\sigma}_y.$$

Unter Berücksichtigung der letzten Gleichungen erhält man (die Rechnung werde übergangen) den Spinoperator

$$\hat{\sigma}_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \hat{\sigma}_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \hat{\sigma}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

(Es gäbe noch andere gleichwertige Matrizen, die angeführten sind die bequemsten.) Daraus folgt

$$\hat{\sigma}_x^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \hat{\sigma}_y^2 = \hat{\sigma}_z^2,$$

also

$$\hat{\sigma}^2 = \hat{\sigma}_x^2 + \hat{\sigma}_y^2 + \hat{\sigma}_z^2 = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$$

oder

$$\hat{s}^2 = \frac{\hbar^2}{4} \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}.$$

Da auch  $\hat{s}^2$  Diagonalform aufweist, sind die Eigenwerte von  $\hat{s}^2$

$$s^2 = \hbar^2 \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} + 1 \right)$$

oder

$$s^2 = \hbar^2 \cdot s \cdot (s + 1) \text{ mit } s = \frac{1}{2}.$$

Die Schrödinger-Gleichung für die Spinfunktion, die wir mit  $\chi$  bezeichnen (sie ist ein Teil der Gesamtwellenfunktion  $\psi$ ), lautet somit

$$\hat{s}^2 \chi = \hbar^2 \cdot s \cdot (s + 1) \cdot \chi.$$

Die Operatoren  $\hat{\sigma}_x$ ,  $\hat{\sigma}_y$ ,  $\hat{\sigma}_z$  kommutieren untereinander

nicht, wohl aber mit  $\hat{\sigma}^2$ . Daher sind die Spinkomponenten nicht alle gleichzeitig scharf meßbar, sondern nur eine einzige. Wir nehmen an, diese sei  $s_z$ , wobei die z-Achse in die Richtung des Magnetfeldes falle. Weil nach den Sätzen der Quantentheorie zu vertauschbaren Operatoren übereinstimmende Systeme von Eigenfunktionen (aber nicht notwendig auch von Eigenwerten!) gehören, besitzt  $\hat{s}_z$  dieselben Eigenlösungen  $\chi$  seiner Schrödinger-Gleichung

$$\hat{s}_z \chi = m_s \cdot \hbar \cdot \chi \quad m_s = \pm \frac{1}{2}.$$

Die (von uns ausgelassene) Rechnung ergibt nämlich für  $s_z$  die Eigenwerte  $\pm \frac{1}{2} \cdot \hbar$ .

Wenden wir nun die Aufmerksamkeit der Spinfunktion zu, richtiger dem Spinteil  $\chi$  der Eigenfunktion  $\psi$  des Elektrons.  $\psi$  hängt von den Koordinaten  $x, y, z$  und von den vier Quantenzahlen  $n, l, m, \sigma$  des Zustandes ab. Man pflegt  $n, l, m, \sigma$  als Indizes von  $\psi$  zu schreiben

$$\psi_{n, l, m, \sigma}(x, y, z),$$

unterdrückt jedoch, wenn Mißverständnisse ausgeschlossen sind, der Kürze halber  $n, l, m$ . Statt  $\sigma$  als Index zu notieren, hat sich die Schreibweise  $\psi = \varphi(x, y, z) \cdot \chi$  eingebürgert, die bei den Separationsansätzen für partielle Differentialgleichungen üblich ist. Falls die Wechselwirkung zwischen den von der Bahnbewegung des Elektrons und seiner Eigenrotation rührenden Magnetfeldern außer acht gelassen wird — in erster Näherung ist das durchaus zulässig, auf feinere Details soll hier nicht eingegangen werden —, dann stimmen die Wellenfunktionen  $\psi$  für beide Spinrichtungen überein, und  $\chi$  dient lediglich der Bezeichnung der Spineinstellung. Dies kann in der Weise geschehen, daß man

$$\chi = \alpha = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \dots \dots \dots \text{Spin „auf“ } \uparrow$$

oder

$$\chi = \beta = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots \text{Spin „ab“ } \downarrow$$

setzt, je nachdem, ob  $\vec{s}$  direkt oder indirekt parallel zur z-Achse (also zur Richtung des herrschenden Magnetfeldes) orientiert ist. Die Verwendung einer Spalte von 2 Gliedern trägt verschiedenen Erfordernissen Rechnung. Einmal ist die Gliederzahl 2 eine Folge der Anzahl 2 der Eigenwerte — und damit der Eigenfunktionen — von  $\hat{s}_z$ . Ferner müssen die Eigenfunktionen stets ein orthonormales Funktionensystem bilden. Das trifft hier

nach den Regeln der skalaren Vektormultiplikation zu, denn

$$\alpha \cdot \alpha = 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 = 1,$$

$$\beta \cdot \beta = 0 \cdot 0 + 1 \cdot 1 = 1,$$

$$\alpha \cdot \beta = 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 = 0.$$

Schreibt man schließlich die zwei Gesamteigenfunktionen  $\psi_1, \psi_2$  ebenfalls als Spalte  $\begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix}$  an, so ist die oben begründete Übereinstimmung (bei fehlender Wechselwirkung von Bahn- und Eigendrehimpuls) von  $\psi_1, \psi_2$  tatsächlich realisiert

$$\psi_1 = \varphi \cdot \alpha = \varphi \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\psi_2 = \varphi \cdot \beta = \varphi \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi \end{pmatrix}.$$

Man erkennt, daß, solange nur der Spin diskutiert wird, die Notierung des Faktors  $\varphi$  überflüssig ist und man sich von Haus aus auf  $\chi$  beschränken darf.

Zusammengefaßt lautet somit der Spinformalismus für ein Teilchen (es muß nicht unbedingt ein Elektron sein) folgendermaßen:

### Spinoperatoren

$$\hat{s} = (\hat{s}_x, \hat{s}_y, \hat{s}_z) = \frac{\hbar}{2} \cdot \hat{\sigma} = \frac{\hbar}{2} \cdot (\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z),$$

$$\hat{\sigma}_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \hat{\sigma}_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \hat{\sigma}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$\hat{s}^2 = \hat{s}_x^2 + \hat{s}_y^2 + \hat{s}_z^2 = \frac{\hbar^2}{4} \hat{\sigma}^2 = \frac{\hbar^2}{4} \cdot s(s+1) \hat{E},$$

$$s = \frac{1}{2}, \hat{E} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

### Vertauschungsrelationen

$$[\hat{s}_1, \hat{s}_2] = i \hbar \hat{s}_3, [\hat{s}_2, \hat{s}_3] = i \hbar \hat{s}_1, [\hat{s}_3, \hat{s}_1] = i \hbar \hat{s}_2,$$

$$[\hat{s}^2, \hat{s}_k] = 0, k = 1, 2, 3.$$

### Gleichungen für die Spineigenfunktionen

$$\hat{s}_z \chi = s_z \chi = \hbar \cdot m_s \cdot \chi, \quad m_s = \pm \frac{1}{2},$$

$$\hat{s}^2 \chi = \hbar^2 \cdot s \cdot (s + 1) \chi, \quad s = \frac{1}{2}.$$

### Spintelle der Eigenfunktionen und Eigenwerte

$$\chi = \alpha = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad m_s = + \frac{1}{2},$$

$$\chi = \beta = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad m_s = - \frac{1}{2}.$$

Wenn die Darstellung der Eigenfunktionen  $\alpha, \beta$  in der Form eines (Spalten-) Vektors stört, der erinnere sich an die weiter oben gegebene Darstellung der Wellenfunktion  $\psi$  durch den Vektor  $(a_1, a_2, \dots, a_n, \dots)$ , dessen Komponenten die Koeffizienten in der Reihenentwicklung von  $\psi$  nach den Eigenfunktionen  $\psi_m$  waren.

Zum besseren Verständnis möge die Richtigkeit der Lösung  $\alpha$  durch Einsetzen von  $\alpha$  in die beiden Gleichungen verifiziert werden. Ebenso die erste Vertauschungsrelation.

$$\begin{aligned} \hat{s}_z \alpha &= \frac{\hbar}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{\hbar}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 \\ 0 \cdot 1 - 1 \cdot 0 \end{pmatrix} = \\ &= \hbar \cdot \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \hbar \cdot m_s \cdot \alpha, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{s}^2 \alpha &= \frac{\hbar^2}{4} \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} + 1 \right) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{3\hbar^2}{4} \cdot \begin{pmatrix} 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 \\ 0 \cdot 1 + 1 \cdot 0 \end{pmatrix} = \\ &= \frac{3\hbar^2}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \hbar^2 \cdot s(s+1) \cdot \alpha, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[\hat{s}_1, \hat{s}_2] &= \hat{s}_1 \hat{s}_2 - \hat{s}_2 \hat{s}_1 = \\
&= \frac{\hbar^2}{4} \cdot \left[ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right] = \\
&= \frac{\hbar^2}{4} \cdot \left[ \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -i & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} \right] = \frac{\hbar^2}{2} \cdot \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} = \\
&= i \cdot \frac{\hbar^2}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = i \frac{\hbar}{2} \cdot \hat{\sigma}_z = i \hbar \hat{s}_z.
\end{aligned}$$

Bei Mehrteilchensystemen setzen sich die Einzelspins  $\hat{s}^{(1)}, \hat{s}^{(2)}$  zum Gesamtspin  $\hat{S}$  zusammen

$$\hat{S} = \sum_i \hat{s}^{(i)}.$$

Die Gleichungen für die Eigenfunktionen lauten dann

$$\hat{S}_z \chi = S_z \chi = \hbar \cdot M_z \chi \quad -S < M_z < +S,$$

$$\hat{S}^2 \chi = \hbar^2 S(S+1) \chi.$$

Bei 2 Teilchen kann S die Werte 1 oder 0 annehmen, je nachdem die Einzelspins  $\hat{s}^{(1)}, \hat{s}^{(2)}$  gleich oder entgegengesetzt orientiert sind. Im ersten Fall addieren sich die Teilspins  $\frac{1}{2} \hbar + \frac{1}{2} \hbar = 1 \cdot \hbar$ , im zweiten Fall annullieren sie einander  $\frac{1}{2} \hbar - \frac{1}{2} \hbar = 0 \cdot \hbar$ . Dementsprechend ist  $S=1$  bzw.  $=0$ . Da die zur dritten Komponente von S gehörige Quantenzahl  $M_z$  zwischen  $-S$  und  $+S$  variiert, existieren insgesamt 4 verschiedene Zustände:

- a)  $S=0, M_z=0, \quad \uparrow\downarrow$
- b)  $S=1, M_z=+1, \quad \uparrow\uparrow$
- c)  $S=1, M_z=0, \quad \rightarrow\rightarrow$
- d)  $S=1, M_z=-1, \quad \downarrow\downarrow$

Die nebengesetzten Pfeile symbolisieren unmißverständlich die Spineinstellungen der beiden Teilchen.

Die Eigenfunktionen kennzeichnet man am zweckmäßigsten durch Anhängen von Indizes an  $\chi$ . Der obere Index bezieht sich auf  $M_z$ , der untere auf S. Den Zuständen a) bis d) entsprechen daher der Reihe nach die Symbole  $\chi_0^0, \chi_1^1, \chi_1^0, \chi_1^{-1}$ . In konsequenter Weiterführung der bei einem Teilchen benutzten Symbolik können die Eigenfunktionen der Zustände b) und d) sofort explizit angegeben werden

$$\chi_1^1 = \alpha(1)\alpha(2), \quad \chi_1^{-1} = \beta(1)\beta(2)$$

oder kürzer

$$\chi_1^1 = \alpha\alpha, \quad \chi_1^{-1} = \beta\beta.$$

Die Zahlen in den Klammern bedeuten die Teilchennummer. Es muß aber ausdrücklich betont werden, daß hier  $\alpha\alpha$  und  $\beta\beta$  keine skalaren Produkte bedeuten, weil jeder „Faktor“ einem anderen Teilchen zugeordnet ist.

Im Zustand c) erhält man unter Berücksichtigung der Normierungsvorschrift  $\chi_1^0 \cdot \chi_1^0 = 1$  und aus Symmetrieüberlegungen

$$\chi_1^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\alpha(1)\beta(2) + \alpha(2)\beta(1))] = \frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha\beta + \beta\alpha).$$

Im Falle a) erhält man analog

$$\chi_0^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha\beta - \beta\alpha).$$

Der Übergang zu einer größeren Teilchenzahl bietet keine Schwierigkeiten. Da der Maximalwert des Spins von k Partikeln  $k \cdot \frac{\hbar}{2}$  ist (alle Einzelspins sind dann gleichgerichtet), haben Systeme von gerader bzw. ungerader Teilchenzahl ganz- bzw. halbzahlig Spinquantenzahlen S. Zu S gehören 2S+1 Möglichkeiten für  $M_z$ .

Mit diesen Feststellungen beenden wir die Besprechung des Spins. Sie sind etwas ausführlicher ausgefallen als an sich zu erwarten war. Aber die nahezu isomorphe Nachbildung des Spinformalismus beim Isospin erforderte die größere Breite, damit das Folgende leichter verständlich werde und dabei das Hauptgewicht auf die physikalischen Begriffsinhalte verlegt werden könne. Der Spin ist anschaulich leichter zu erfassen als der Isospin.

## B. Der Isospin

Eingehende Untersuchungen theoretischer wie experimenteller Art, die über Proton und Neutron seit vielen Jahren im Gange sind, haben immer mehr die Auffassung beider Partikeln als Modifikationen der gleichen Wesenheit gefestigt. Deshalb spricht man heute allgemein vom Nukleon, das je nach seinem Ladungszustand einmal als Proton, einmal als Neutron in Erscheinung tritt. Die Ladung ist eine Variable, welche die Werte +e (beim Proton) und 0 (beim Neutron) annimmt.

Es war ein glücklicher Gedanke — in Analogie zum Spin, der ebenfalls genau zwei Werte besitzt — e und 0 als Eigenwerte eines Ladungsoperators  $\hat{e}$  aufzufassen. In der Diagonalform wird  $\hat{e}$  durch die Matrix

$$\hat{e} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & e \end{pmatrix}$$

repräsentiert. Macht man noch  $e=1$  zur Ladungseinheit dann lautet die endgültige Form von  $\hat{e}$

$$\hat{e} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

0 und 1 sind dann die Eigenwerte von  $\hat{e}$ . Beim Spin gehörten zu  $\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$  die Spineigenfunktionen

$$\alpha = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \beta = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Also ist es berechtigt, als Eigenfunktionen von  $\hat{e}$

$$\nu = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ für das Neutron,}$$

$$\pi = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ für das Proton anzusetzen.}$$

Substituiert man in der Schrödingergleichung  $\hat{L}\psi = L\psi$  ( $L$ =Eigenwert von  $\hat{L}$ ) für  $\hat{L}, \psi, L$  der Reihe nach  $\hat{e}, \nu, 0$  (=Eigenwert des Neutrons) bzw.  $\hat{e}, \pi, 1$  (=Eigenwert des Protons), so erhält man

$$\hat{e}\nu = 0 \cdot \nu \text{ bzw. } \hat{e}\pi = 1 \cdot \pi.$$

Von der Richtigkeit der beiden Gleichungen überzeugt man sich unmittelbar durch Einsetzen:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 0 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = 1 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

In folgerichtiger Weiterbildung der Analogien haben die Gesamtwellenfunktionen des Neutrons und des Protons zu lauten

$$\psi = \varphi\nu, \quad \varphi = \varphi\pi.$$

$\nu, \pi$  sind hierin die Ladungsteile der Wellenfunktionen, die als Spezialfälle der allgemeinen Ladungseigenfunktion  $\eta$  gelten. Die letzten 2 Gleichungen sind somit in der einheitlichen Relation

$$\psi = \varphi\eta$$

enthalten, je nachdem ob  $\nu$  oder  $\pi$  für  $\eta$  eingesetzt wird.

Die formale Analogie wird vollständig durch die Definition der Vektor-Matrix-Operatoren

$$\hat{t} = (\hat{t}_1, \hat{t}_2, \hat{t}_3) = \frac{1}{2} \hat{\tau} = \frac{1}{2} (\hat{\tau}_1, \hat{\tau}_2, \hat{\tau}_3)$$

$$\hat{\tau}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{\tau}_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{\tau}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

welche den Spinoperatoren  $\hat{s}, \hat{\sigma}$  nachgebildet sind. Wie



für diese gelten die Vertauschungsrelationen

$$[\hat{\tau}_1, \hat{\tau}_2] = 2i \hat{\tau}_3, [\hat{\tau}_2, \hat{\tau}_3] = 2i \hat{\tau}_1, [\hat{\tau}_3, \hat{\tau}_1] = 2i \hat{\tau}_2,$$

$$\hat{t}^2 = \frac{1}{4} [\hat{\tau}_1^2 + \hat{\tau}_2^2 + \hat{\tau}_3^2] = 0$$

und die Formeln

$$\hat{t}_3^2 = \hat{E}, \hat{t}^2 = \frac{1}{4} \hat{\tau}^2 = \frac{1}{4} (\hat{\tau}_1^2 + \hat{\tau}_2^2 + \hat{\tau}_3^2) = \frac{3}{4} \hat{E}.$$

$$\hat{E} \text{ ist wieder der Einheitsoperator } \hat{E} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Führt man die Zahl  $t = \frac{1}{2}$  (analog zu  $s = \frac{1}{2}$ ) ein, so schreibt sich die letzte Gleichung

$$\hat{t}^2 = t \cdot (t + 1) \cdot \hat{E}.$$

$\hat{t}$  erhielt den Namen Isospin-Operator.

Auf Grund der Analogien genügt der Ladungsteil  $\eta$  der Eigenfunktionen des Nukleons den Gleichungen

$$\hat{t}_3^2 \eta = t(t+1)\eta,$$

$$\hat{t}_3 \eta = t_3 \eta, \quad t = \frac{1}{2}.$$

Zu  $\eta = \nu = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  gehört  $t_3 = +\frac{1}{2}$  (Neutronenzustand),

zu  $\eta = \pi = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  gehört  $t_3 = -\frac{1}{2}$  (Protonenzustand).

Unmittelbare physikalische Bedeutung kommt der dritten Komponente  $\hat{t}_3$  des Isospins zu, weil sie eng mit dem Ladungsoperator  $\hat{e}$  zusammenhängt

$$\hat{e} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \hat{E} - \hat{t}_3$$

$\hat{t}_3$  hat Diagonalform, also sind die Zahlen  $t_3 = +\frac{1}{2}$  bzw.  $t_3 = -\frac{1}{2}$  die Eigenwerte von  $\hat{t}_3$ .

Die bisherigen Ausführungen über den Isospin waren rein formaler Art. Im Spinformalismus wurde die Bezeichnung Spin durch das Wort Isospin, die Buchstaben  $s, \sigma$  durch  $t, \tau$  ersetzt. Das einzige physikalische Element war der Ladungsoperator  $\hat{e}$ . Die erste Brücke zur Wirklichkeit bildet die Interpretation der „Richtungen“ des Isospinvektors. Der Spin, also der Eigendrehimpuls des Teilchens, ist ein Vektor, dessen Komponenten in die Koordinatenrichtungen des Konfigurationsraumes fallen, dessen z-Achse durch die Orientierung des Magnetfeldes festgelegt ist. So einfach liegen die Dinge beim Isospin nicht. Man ist vielmehr gezwungen, die Isospinkomponenten in die Achsen eines 3-dimensionalen Ladungsraumes zu verlegen, der ein abstraktes Eigenleben führt. Die Rechtfertigung dieser auf den ersten Blick sonderbaren Gedankenkonstruktion liegt ausschließlich in der damit erzielten erfolgreichen Beschreibungsmöglichkeit des realen Verhaltens der Atomkerne (=Nukleonensysteme). Es wird sich nämlich herausstellen, daß gewisse Aussagen über Spiegelungen und Drehungen (allgemeiner: über Transformationsgruppen) im Ladungsraum mit Aussagen über die Eigenschaften der Kernkräfte äquivalent sind. Ehe wir darauf näher eingehen, ist es notwendig, den Isospin von Mehrnukleonensystemen zu besprechen. Auch hier wird wie beim Spin vorgegangen.

Jeder Kern der Massenzahl  $A$  repräsentiert ein  $A$ -Nukleonensystem. Man nennt diese Kerne Isobare. Sie unterscheiden sich durch die Ladungszahl  $Z$ , die mit der Zahl der Protonen übereinstimmt. Ist  $N$  die Nukleonenzahl, so gilt

$$A = N + Z.$$

Die Operatoren des  $A$ -Nukleonensystems sind naturgemäß die Summen der Ladungsoperatoren der Einzelteilchen, aus denen das System aufgebaut ist. Also wird

$$\hat{Q} = \sum_{i=1}^A \hat{e}_i, \quad \hat{T} = \sum_{i=1}^A \hat{t}_i.$$

Durch Summation der schon früher angeführten Beziehung  $\hat{e}_i = \frac{1}{2} \hat{E} - \hat{t}_{3i}$  erhält man weiter

$$\hat{Q} = \frac{A}{2} \hat{E} - \hat{T}_3 \text{ oder } \hat{T}_3 = \frac{A}{2} \hat{E} - \hat{Q}.$$

Die Eigenwerte von  $\hat{Q}$  sind die möglichen Protonenzahlen  $Z$  der Isobaren des Systems. Daher ist der Eigenwert von  $\hat{T}_3$

$$T_3 = \frac{A}{2} - Z = \frac{N-Z}{2}.$$

Dieses Ergebnis rechtfertigt die Bezeichnung von  $\hat{T}_3$  als „halbem Neutronenüberschußoperator“.

Die vertauschbaren Operatoren  $\hat{T}^2, \hat{T}_3, \hat{Q}$  besitzen ein gemeinsames System von Eigenfunktionen  $\eta$ , welche den Gleichungen

$$\hat{T}^2 \eta = T(T+1)\eta, \quad T = \frac{A}{2} \cdot \frac{A}{2} - 1, \dots, \frac{1}{2} \text{ oder } 0,$$

$$\hat{T}_3 \eta = T_3 \eta, \quad T_3 = -T, -T+1, \dots, T-1, T,$$

$$\hat{Q} \eta = Z \eta, \quad Z = \text{Protonenzahl}$$

genügen.

Betrachten wir als Beispiel ein 2-Teilchensystem ( $A=2$ ). Hier kann  $T$  nur die Werte 1 oder 0 annehmen.

### 1. $T=1$

Für  $T_3$  kommen  $-1, 0, 1$  in Betracht.

a)  $T_3=1$ .  $T_3 = \frac{N-Z}{2} = 1$  führt auf  $N-Z=2$ . Zusammen mit  $N+Z=A=2$  gibt das  $N=2, Z=0$ . Das System besteht aus zwei Neutronen (nn).

b)  $T_3=0$ .  $N-Z=0, N+Z=2, N=1, Z=1$ . Das System ist (np), das ist ein Deuteron.

c)  $T_3=-1$ .  $N-Z=-2, N+Z=2, N=0, Z=2$ . Das System ist ein Diproton (pp).

Zum Isospin  $T=1$  gehören 3 verschiedene Ladungszustände, weshalb man von einem Ladungstriplett spricht.

### 2. $T=0$

Es muß auch  $T_3=0$  sein und das liefert  $N=1, Z=1$  als einzigen Zustand, d. h. ein Ladungssingulett. Das System ist ein Deuteron (np).

Wie nicht näher besprochen werden soll, unterscheiden sich die beiden Deuteronenzustände 1b) und 2) hinsichtlich der Eigenfunktionen  $\eta$ .  $\eta$  ist gegenüber einer Vertauschung der beiden Partikeln symmetrisch im Triplettzustand, antisymmetrisch im Singulettzustand. Der Isospinkalkül enthüllt eine Zustandsverschiedenheit, die ohne ihn unverstündlich wäre.

Da  $T_3$  von  $-T$  bis  $+T$  läuft, bilden im allgemeinen Fall die zu einem bestimmten  $T$  gehörigen  $2T+1$ -Zustände ein Ladungsmultiplett.

Bemerkenswert ist noch die wichtige Tatsache, daß man nach Einbeziehung des Isospins in das System der Quantenzahlen das Pauliprinzip aufrechterhalten kann.

Nunmehr wenden wir uns den physikalisch bedeutungsvollen Konsequenzen des Isospinkalküls zu. Diese bestehen in sehr konkreten Aussagen über die Kernkräfte, nämlich über die Ladungserhaltung, die Ladungssymmetrie und die Ladungsunabhängigkeit derselben. Wir beschränken uns abermals auf 2-Teilchensysteme, da bei ihnen schon alles Wesentliche zutage tritt.

In die Ansätze für das Potential  $V$  der Kernkräfte müssen offenbar neben den Ortskoordinaten und dem Spin der Teilchen auch noch deren Isospins aufgenommen werden. Der Operator  $\hat{V}$  des Potentials ist also eine Funktion von

$$\vec{r}^{(1)}, \vec{r}^{(2)}, \hat{\sigma}^{(1)}, \hat{\sigma}^{(2)}, \hat{\tau}^{(1)}, \hat{\tau}^{(2)},$$

wobei sich Index (1) auf das erste, Index (2) auf das zweite Nukleon bezieht. Da in diesem Zusammenhang weder Orts- noch Spinabhängigkeit interessieren, dürfen wir uns auf den Einfluß von  $\hat{\tau}^{(1)}, \hat{\tau}^{(2)}$  beschränken.

Auf Grund der experimentellen Erfahrung sind die Kernkräfte ladungserhaltend, ladungssymmetrisch und

ladungsunabhängig. Die Abhängigkeit des Potentials von  $\hat{\tau}^{(1)}, \hat{\tau}^{(2)}$  muß somit derart sein, daß die Rechnung in keinen Widerspruch zur Wirklichkeit gerät.

a) **Ladungserhaltung.** In der Quantenmechanik wird gezeigt, daß die Ableitung des zeitlichen Mittelwertes  $\hat{L}$  des Operators  $\hat{L}$  einer physikalischen Größe L (die nicht explizit von der Zeit abhängt) nach der Zeit durch die Gleichung

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = [\hat{H}, \hat{L}]$$

gegeben ist. In ihr bedeutet  $\hat{H}$  den Hamiltonoperator. Die Poissonklammer  $[\hat{H}, \hat{L}]$  steht für  $\hat{H}\hat{L} - \hat{L}\hat{H}$ . Zeitunabhängigkeit von  $\hat{L}$  ist gleichbedeutend mit dem Verschwinden der Poissonklammer.

Im gegenständlichen Fall handelt es sich um die zeitliche Unveränderlichkeit des Ladungsoperators  $Q = \frac{A}{2} \hat{E} - \hat{T}_3$ .

Da  $\hat{E}$  mit jedem Operator, also auch mit  $\hat{H}$  kommutiert, reduziert sich  $[\hat{H}, Q] = 0$  auf  $[\hat{H}, \hat{T}_3] = 0$ . Diese Gleichung ist aber nur dann erfüllt, wenn — wie ohne viel Aufwand verifiziert werden kann — in  $\hat{H}$  und damit in  $\hat{V}$  (der Energieoperator  $\hat{H}$  enthält ja das Potential)  $\hat{\tau}^{(1)}, \hat{\tau}^{(2)}$  nur in den Verbindungen

$$\hat{E}, (\hat{\tau}^{(1)} \hat{\tau}^{(2)}), \hat{\tau}_3^{(1)} \hat{\tau}_3^{(2)}, \hat{\tau}_3^{(1)} \pm \hat{\tau}_3^{(2)}, \hat{\tau}_1^{(1)} \hat{\tau}_2^{(2)} - \hat{\tau}_2^{(1)} \hat{\tau}_1^{(2)}$$

erscheinen. Die unteren Indizes bezeichnen wie üblich die Isospinkomponenten.

Die sechs eben notierten Ausdrücke sind invariant gegen Drehungen des Ladungsraumes um seine 3-Achse. (Das leuchtet unmittelbar ein, wenn man statt  $\hat{\tau}^{(1)}, \hat{\tau}^{(2)}$  zwei gewöhnliche Vektoren  $\vec{a}, \vec{b}$  anschreibt und überlegt, daß sich weder deren skalares Produkt noch deren vektorielles Produkt bei Drehungen um die 3-Achse verändern kann. Ebenso sind die dritten Komponenten gegen die genannten Drehungen unempfindlich.)

Das ist eine sehr bedeutungsvolle Einsicht, denn durch sie werden physikalische Sachverhalte mit Invarianzeigenschaften von Transformationsgruppen (hier bestimmten Drehungen) verknüpft. Die Auffassung, daß das Sosein der elementaren Akte von Symmetrieeigenschaften impliziert wird, erhält dadurch eine starke Stütze. Ihre Verlegung in den Ladungsraum darf niemand stören, der sich klar ist, daß alle unsere Aussagen über die Wirklichkeit Bilder sind, die, sobald sich die Realität der Anschauung vollständig entzieht, in der Sprache logisch-mathematischer Symbole und Relationen die getreueste Fassung erhalten.

b) **Ladungssymmetrie.** Darunter versteht man die Übereinstimmung der Kernkräfte des 2-Protonen-Systems mit denen des 2-Neutronen-Systems, wenn sich beide Paare in gleichen Zuständen befinden. Die Bedingung für Ladungssymmetrie lautet, wie nicht näher ausgeführt werden möge,

$$[\hat{H}, (\hat{\tau}_2^{(1)} \hat{\tau}_2^{(2)})] = 0.$$

Diese Forderung ist nur mit den drei Ausdrücken

$$\hat{E}, (\hat{\tau}^{(1)} \hat{\tau}^{(2)}), \hat{\tau}_3^{(1)} \hat{\tau}_3^{(2)}$$

der unter a) zugelassenen sechs Isospinfunktionen verträglich. Sie sind gegen Drehungen um 180° um die 2-Achse invariant.

c) **Ladungsunabhängigkeit.** Auch diese Eigenschaft wird durch das Verschwinden einer Poissonklammer ausgedrückt

$$[\hat{H}, \hat{T}] = 0.$$

Da der Gesamtsospin ein (Matrix-) Vektor-Operator ist, stecken in der letzten Gleichung die drei Gleichungen

$$[\hat{H}, \hat{T}_1] = [\hat{H}, \hat{T}_2] = [\hat{H}, \hat{T}_3] = 0.$$

$[\hat{H}, \hat{T}] = 0$  bedeutet nach dem unter a) Gesagten die zeitliche Unveränderlichkeit des Isospins, d. h. die Erhaltung desselben.

Diese neu hinzutretende Bedingung läßt den dritten der unter b) verbliebenen Isospinausdrücke ausscheiden.

Ladungsunabhängige Kernpotentiale dürfen  $\hat{\tau}^{(1)}, \hat{\tau}^{(2)}$  nur in den Verbindungen

$$\hat{E}, (\hat{\tau}^{(1)} \hat{\tau}^{(2)})$$

enthalten. Sie haben die Gestalt

$$\hat{V} = V [\hat{E}, (\hat{\tau}^{(1)} \hat{\tau}^{(2)})]$$

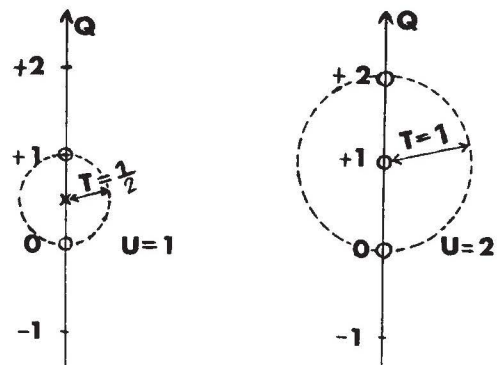
und sind gegen Drehungen um beliebige Achsen im Isoraum (=Ladungsraum) — wie jedes skalare Produkt — invariant.

Die Vertauschbarkeit von  $\hat{H}$  mit  $\hat{T}$  zieht die Relationen  $[\hat{H}, \hat{T}_3] = 0, [\hat{H}, \hat{T}_3] = 0$  nach sich. Daher besitzen  $\hat{H}, \hat{T}_3, \hat{T}_3$  dasselbe System von Eigenfunktionen.

Die ungewohnten und, wie es scheint, an den Haaren herbeigezogenen Begriffe des Isospinkalküls haben sich bei der Beobachtung der Wirklichkeit glänzend bewährt. Es besteht daher kein Grund, ihnen skeptischer gegenüber zu treten als etwa dem Gravitationsgesetz, das auch nicht auf deduktivem Weg gefunden wurde. Wenn seit jener Zeit Formulierung und Inhalt neuer Konzepte abstrakter geworden sind, dann liegt das notwendig am völligen Fehlen jeglicher unmittelbaren sinnlichen Erfahrung mit den Objekten der subatomaren Forschung. Wir müssen vielmehr tiefste Genugtuung über die intuitive Kraft des Menschengenies empfinden, der mit genialem Instinkt imstande ist, jene verborgenen Zusammenhänge zu ahnen und zu erfassen, die den Dingen zu Grunde liegen.

### C) Die Hyperladung

Kennt man von einem Teilchen oder Teilchensystem den Isospin T, so weiß man, daß es in  $2T+1$  Ladungszuständen auftreten kann. Das ist besonders für Einzelteilchen wichtig (bei Atomkernen ist die Sache ziemlich trivial), denn der Isospin wird nicht nur dem Nukleon, sondern ebenso den anderen Partikeln, wie Leptonen, Baryonen, Hyperonen, zugeordnet. So existieren für  $T = \frac{1}{2}$  (das trifft beim Nukleon zu)  $2 \cdot \frac{1}{2} + 1 = 2$  Ladungszustände, das Teilchen bildet ein Ladungsdublett, und es wäre müßig, nach weiteren Teilchen dieser Art zu forschen, sobald



#### LADUNGSDUBLETT

$Q = 0, Q = +1,$   
Hyperladung  $U = +1$   
Ladungsschwerpkt.  $\frac{1}{2}$   
Isospin  $T = \frac{1}{2}$

#### LADUNGSTRIPLETT

$Q = 0, Q = -1, Q = +2,$   
Hyperladung  $U = -2$   
Ladungsschwerpkt.  $+1$   
Isospin  $T = 1$

Abb. 3

beide Vertreter experimentell gefunden sind. Die Suche nach neuen Partikeln kann also wesentlich systematischer betrieben werden, als dies ohne die durch den Isospin bereitgestellten Grundsätze möglich wäre.

Man wird sich jedoch die Frage vorlegen, weshalb die Ladungen des Nukleons 0 bzw. +1 sind und nicht -1,0. Auch in dieser Richtung gelang es, Ordnung in die Vielfalt der Erscheinungen zu bringen, und zwar durch Einführung des Begriffs der Hyperladung U.

Trägt man auf einer Geraden (Abb. 3) die Ladungszahlen  $Q = \dots -2, -1, 0, +1, +2, \dots$  (ausgedrückt in Vielfachen der elektrischen Elementarladung e) auf, so markiert  $\frac{U}{2}$  die Lage des sogenannten Ladungsschwerpunkts des Multipletts. Um ihn als Mittelpunkt wird ein Kreis mit dem Radius T gezogen. Sämtliche Ladungszahlen, die von diesem Kreis erfaßt werden — es sind stets genau  $2T+1$  — stellen die realisierbaren Ladungszahlen der betreffenden Teilchenkomponente dar. Beim Nukleon ist  $U=1$ , also liegt der Ladungsschwerpunkt bei  $\frac{1}{2}$ . Der

Kreisradius ist  $T = \frac{1}{2}$ . Zwischen  $\frac{U}{2} - T = 0$  und  $\frac{U}{2} + T = 1$  liegen die beiden Ladungswerte  $Q=0, Q=1$ , die den Neutron bzw. dem Proton entsprechen. Es liegt, wie wir wissen, ein Ladungsdublett vor.

Wie steht es aber mit dem Antiproton? Bei Antiteilchen kehren sich die Vorzeichen gewisser Quantenzahlen — unter anderem auch von U — um. Daher ist für das Antinukleon  $U=-1$ , T bleibt  $\frac{1}{2}$  und die zugelassenen

Ladungen sind  $Q=-1$  (Antiproton),  $Q=0$  (Antineutron).  $T_3$  ist die dritte Komponente des Isospins (wir wählen anstelle der oben benützten Bezeichnung  $M_z$  das mehr in Gebrauch stehende Symbol  $T_3$ ). Ihr Wert entscheidet darüber, welcher von den  $2T+1$  erlaubten Ladungszuständen im konkreten Fall vorliegt.

Weitere Beispiele sind:

1.  $\omega^0$ -Meson,  
 $\eta^0$ -Meson:  $U=0, T=0$ , Singulett,  $T_3=0, Q=0$ .
2. Kaon:  $U=1, T=\frac{1}{2}$  Dublett,  
 $T_3 = +\frac{1}{2}, Q=1 \dots K^+,$   
 $T_3 = -\frac{1}{2}, Q=0 \dots K^0.$
3. Pion,  
 $\rho$ -Meson:  $U=0, T=1$ , Triplett,  
 $T_3 = +1, Q = +1 \dots \pi^+, \rho^+,$   
 $T_3 = 0, Q = 0 \dots \pi^0, \rho^0,$   
 $T_3 = -1, Q = -1, \dots \pi^-, \rho^-.$

Abschließend werde noch ein potentieller Vorwurf entkräftet. Wozu, könnte man fragen, war der komplizierte Isospinkalkül nötig, wenn die numerischen Verhältnisse in der für C) aufgewendeten Kürze darlegbar sind? Die Antwort ist einfach: Weil nur der vollständige Isospin-formalismus zu den Ladungseigenfunktionen führt und ohne diese sämtliche Rechnungen über Wechselwirkungen aller Art, die sich immer auf die Schrödinger-Gleichung mit ihren Operatoren stützen, unausführbar blieben.

## Die Theorie der superdichten Sterne\*

Die Welterfahrenheit eines Menschen äußert sich besonders bei Begegnungen, die ihn mit Sitten und Gebräuchen ferner Länder in Berührung bringen. Er erblickt in

\* Dies ist der Abdruck des Aufsatzes von Dr. W. Kranzer: „Die Theorie der superdichten Sterne“, der im März 1963 in der Zeitschrift „Der Mittelschullehrer und die Mittelschule“ (die Zeitschrift heißt jetzt „Die allgemeinbildende höhere Schule“) erschien. Der Abdruck erfolgt mit freundlicher Genehmigung der Redaktion. Am Text wurden nur einige ganz geringfügige Änderungen vorgenommen.

ihnen andersartige, von den Normen seiner engeren Umgebung abweichende, aber durchaus gleichberechtigte, in globaler Sicht vielleicht sogar häufigere Möglichkeiten sozialer Konventionen. Im Gegensatz dazu fühlt sich der Tölpel zum Lachen gereizt und wischt, hat er sich wieder beruhigt, das Fremde mit einer wegwerfenden Handbewegung aus seinem Bewußtsein, da ihm allein die Wiederholung einleuchtet.

Die Erziehung der Jugend zu geistiger Reife sieht sich daher der Notwendigkeit gegenüber, den Blickwinkel allmählich zu vergrößern, indem ständig Neuartiges und Ungewohntes in die unterrichtsmäßige Betrachtung einbezogen wird, die es nach angemessener Zeit bei jenen Bewußtseinsinhalten bleibend deponiert, welche die Etikette des Selbstverständlichen und Längstbekanntes tragen.

Die technische Entwicklung gewährt diesem Vorhaben große Unterstützung, wie man an den ins Massenbewußtsein eingehenden Erfahrungen bei Raketenversuchen besonders deutlich erkennt. Während vor zehn Jahren die Schilderung des gewichtslosen Zustandes den Physik-lehrer vor keine einfache Aufgabe stellte, hat sich gerade dies inzwischen grundlegend geändert. Hier ist die Mauer ungläubiger Ablehnung, die immer dann fühlbar wird, wenn die Ausführungen des Lehrers den Verstand mit keinem vertrauten Erfahrungsklischee treffen, vollkommen verschwunden.

Trotzdem ereignet es sich im Physikunterricht häufig genug, daß man nur mit größter Mühe den Schüler von der Richtigkeit der ausgesprochenen Behauptungen zu überzeugen vermag. Dies ist besonders dort der Fall, wo Zustände erörtert werden, deren konstituierende Parameter Werte von extremer Größe oder Kleinheit annehmen wie in der Atomphysik oder der Astronomie.

### 1. Die Weißen Zwerge

Wenn am Ende der 7. Klasse ein wenig Astrophysik betrieben wird, kommen auch die Bedeckungsveränderlichen kurz zur Sprache. Damit bietet sich eine Gelegenheit, den Schüler mit wirklich außergewöhnlichen Zuständen zu konfrontieren, deren quantitative Charakteristika überdies mittels elementarer Rechnungen ableitbar sind. In einer Wiederholungsstunde über den an das Gravitationsgesetz schließenden Stoff der 6. Klasse können einige der nachstehend angedeuteten Überlegungen rechnerisch durchgeführt werden.

Als erstes wird — natürlich ohne jede Rechnung, also rein qualitativ — besprochen werden müssen, auf Grund welcher einfachen Überlegungen die Lichtkurve zusammen mit der periodischen Dopplerverschiebung im Spektrum der beiden Komponenten eines (möglicherweise nur spektroskopischen) Doppelsterns ganz verlässliche Auskunft über die Bahnelemente, die Radien und die Massen jedes Sterns gibt. Ist dies in überzeugender Weise geschehen, so kann die Feststellung folgen, daß man gar nicht so selten auf Sterne stieß, die eine Masse von der Größenordnung der Sonne aufweisen, welche sich jedoch auf ein Volumen konzentriert, das etwa dem der Erde entspricht. Mit anderen Worten, derartige Sterne besitzen Dichten von  $10^6 \text{ g/cm}^3$  und mehr.

In Mayers „Handbuch über das Weltall“ sind auf den Seiten 182 und 183 in einer Tabelle die Daten von sieben Weißen Zwergen zusammengestellt, unter denen LFT 543 die maximale Dichte  $\rho = 7 \cdot 10^7 \text{ g/cm}^3$  zukommt. Die Unsicherheit der Zahlenangaben rührt von der geringen Lichtstärke, nicht von grundsätzlichen Schwierigkeiten. LFT 543 befindet sich in der „nahen“ Sonnen-umgebung, seine Entfernung beträgt knapp 20 Lichtjahre (Parallaxe =  $0,164''$ ). Infolge des kleinen Radius R von höchstens 2100 km ist die scheinbare ebenso wie die absolute Helligkeit äußerst klein, nämlich  $m = 13,04$  bzw.  $M = 14,1$ .

Ausgehend von den (durch den Index 0 gekennzeichneten) Sonnendaten

$$\begin{aligned} R_0 &= 7 \cdot 10^{10} \text{ cm} = 700.000 \text{ km} = \text{Radius} \\ M_0 &= 2 \cdot 10^{33} \text{ g} = \text{Masse} \\ \rho_0 &= 1,41 \text{ g/cm}^3 = \text{mittlere Dichte} \\ G_0 &= 2,74 \cdot 10^4 \text{ cm/sek}^2 = \text{Fallbeschleunigung} \\ &\quad \text{auf der Oberfläche} \end{aligned}$$

ergeben sich für die entsprechenden Größen von LFT 543 folgende Werte:

$$\text{Masse} \dots \dots \dots M = \frac{4 R^3 \pi}{3} \cdot 7 \cdot 10^7 = 2,6 \cdot 10^{33} \text{ g} = 1,3 \cdot M$$

$$\begin{aligned} \text{Fallbeschl} \dots \dots \dots G &= G_0 \cdot \frac{M}{M_0} \cdot \frac{R^2}{R_0} = 2,74 \cdot 10^4 \cdot 1,3 \cdot \frac{10^6}{9} = \\ &= 4 \cdot 10^9 \text{ cm/sek}^2 = 40.000 \text{ km/sek}^2 \end{aligned}$$

Das ist die viermillionenfache Erdbeschleunigung! Daher wiegt 1 cm<sup>3</sup> irdisches Wasser auf dem Stern 4 · 10<sup>6</sup> p = 4 Tonnen. 1 cm<sup>3</sup> der 7 · 10<sup>7</sup>mal dichteren Sternmaterie wiegt sogar 280 Millionen Tonnen.

Die Endgeschwindigkeit nach einer Fallhöhe von nur 1 cm beträgt

$$v = \sqrt{2 \cdot G \cdot h} = 900 \text{ m/sek}$$

und übertrifft die einer Gewehrkugel merklich.

Die Kreisbahngeschwindigkeit einer Rakete (oder irgendeines Trabanten) in geringer Höhe (etwa unter 100 km) ist nach der Formel

$$V = \sqrt{G \cdot R} = 916 \text{ km/sek.}$$

Daraus folgt eine Umlaufdauer von nur 14,5 Sekunden!

Die Fluchtgeschwindigkeit, mit der man diesen buchstäblich unerträglichen Verhältnissen enttrinnen könnte, beliefe sich auf

$$V_{\infty} = \sqrt{2 \cdot G \cdot R} = 1300 \text{ km/sek.}$$

Man sieht, die eben genannten Zahlen eignen sich gut zur unterrichtsmäßigen Herleitung und zu einer starken Belebung des Interesses an der Astrophysik. Wir wollen aber tiefer schürfen und uns mit dem Zustandekommen extremer Dichten befassen. Leider gehen die dabei zur Sprache kommenden Dinge über den Mittelschullehrstoff in einem Maße hinaus, das eine Erörterung in der Schule ausschließt.

## 2. Die Hyperonensterne

Die Existenz der Weißen Zwerge beweist, daß die Skala der Dichten, die im Sonnensystem angetroffen wird, weit davon entfernt ist, die faktische Variationsbreite dieses Parameters zu umfassen. Obwohl die Erweiterung der Skala nach unten durchaus vorstellbar ist, bereitet der Gedanke an extrem hohe Dichten Schwierigkeiten. Zu Unrecht! Denn die Tatsache allein, daß dem Atomradius von der Größenordnung 10<sup>-8</sup> cm ein Kernradius von kaum 10<sup>-12</sup> cm gegenübersteht, zeigt die erschreckende Leere des Raumgebiets, welches das Atom einnimmt. Nur etwa sein 10<sup>12</sup>-ter Teil wird tatsächlich von Materie erfüllt, sofern es überhaupt sinnvoll ist, in diesen Dimensionen den herkömmlichen Teilchenbegriff als eine in ihrer Erstreckung scharf abgegrenzte, jederzeit identifizierbare Wesenheit aufrechtzuerhalten.

Eine beträchtliche Verkleinerung erfährt z. B. das Atom, wenn Mesonen anstelle der Elektronen den Kern umkreisen. (Man spricht dann von einem Mesonenatom.) Die Quantenbahnradien sind nämlich um so kleiner, je größer die Masse der Ladungsträger ist, die auf ihnen laufen. Das folgt aus der Formel für den Radius der n-ten Bohrschen Quantenbahn des Wasserstoffatoms

$$r_n = \frac{h^2 n^2}{4 \pi^2 m e^2},$$

in der m die Elektronenmasse bedeutet. Wird sie durch die einige 100mal größere Mesonenmasse ersetzt, so sinkt r<sub>n</sub> auf den ebensovielfachen Teil, was einen Dichteanstieg auf das vielmillionenfache nach sich zieht. Eine gewaltige Dichtezunahme kann auch der hydrostatische Druck bewirken, falls die Gastemperatur über dem kritischen Wert liegt.

Darüber hinaus ist aber noch zu bedenken, daß auf Grund der Einsteinschen Relation jeder Energie, auch der Packungsenergie, Masse zukommt. Ein Teilchen, das mit einer Geschwindigkeit an uns vorbeirast, die nur um 15 km/sek die Lichtgeschwindigkeit unterschreitet, hat für den ruhenden Beobachter die 101fache Ruhmasse — und damit auch Ruhdichte —, weil das Massenäquivalent seiner Bewegungsenergie das 100fache der Ruhmasse ausmacht. Es darf daher nicht befremden, wenn später

Dichten zur Sprache kommen werden, die sogar die Dichte der Kernmaterie übertreffen.

Der namhafte armenische Astrophysiker V. A. Ambarzumjan untersuchte jüngst zusammen mit G. S. Saakjan in einer bemerkenswerten Arbeit nach quantentheoretischen Gesichtspunkten Möglichkeiten und Bedingungen für die Stabilität extrem dichter Materie. Die Arbeit erschien im Astronomischen Journal der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Band 37, Nr. 2, vom März/April 1960, und kann in englischer Sprache in der Zeitschrift Soviet Astronomy, Bd. 4, Nr. 2 vom September/Oktober 1961, S. 187 bis 201, unter dem Titel „The Degenerate Superdense Gas of Elementary Particles“ nachgelesen werden. Die letztgenannte Zeitschrift ist die Übersetzung des russischen Astronomischen Journals, die im Auftrag des American Institute of Physics erscheint.

Ambarzumjan beginnt mit der Aufzählung dreier Gründe, welche die Annahme stützen, daß die Sternentwicklung in der Richtung abnehmender Sternlichte vor sich geht, wobei ein superdichter Zustand protostellarer Materie früher durchlaufen wird.

Einmal dürfte die Masse der Spiralarme der Galaxien wohl aus dem Kern derselben stammen, nicht aber aus der normalen Sternbevölkerung der Kerngebiete. Trifft dies zu, müßten die galaktischen Kerne größere Mengen protostellarer Materie enthalten.

Zweitens kennt man einen bestimmten Typ von Sternassoziationen, bei denen gewichtige Gründe gegen eine Bildung aus diffusen Gasen spricht. Vielmehr ist die Entstehung durch Teilung eines äußerst dichten Körpers wahrscheinlich.

Schließlich tritt bei den Flare-Sternen vom UV-Ceti-Typus eine sehr große Energiemenge schubweise nach außen, welche als Energietönung beim Übergang vom superdichten in den Normalzustand gedeutet werden könnte.

Gedanken über die Möglichkeit eines superdichten Zustandes sind somit nicht ganz unberechtigt. Wir wollen gleich vorweg nehmen, daß die oben geschilderten Weißen Zwerge recht bescheidene Vorstufen dessen sind, was als superdicht bezeichnet wird. Ferner muß ausdrücklich festgehalten werden, daß bis heute keine realen Himmelsobjekte bekannt sind, deren Dichte die der Weißen Zwerge um Größenordnungen übertrifft. Die Untersuchung ist als rein theoretischer, keineswegs endgültiger Versuch zu werten, sich ein Bild von Existenzformen zu machen, die in unvorstellbarer Weise selbst von den Gebilden einer maßlos überhitzten Phantasie abweichen. Man darf auch nicht glauben, daß ein superdichter Anfangszustand denknötwendig wäre, er ist lediglich auf Grund gewisser Indizien wahrscheinlich. Ambarzumjan war auch nicht der erste, der sich mit solchen Fragen befaßte. Vor ihm haben L. Landau, Oppenheimer und Volkoff Modelle extrem dichter Sterne zu konstruieren versucht.

Der Einfachheit halber beschränkt sich Ambarzumjan auf ein Gas, dessen Temperatur niedrig genug ist, damit alle Fermionen (Teilchen, die der Fermi-Statistik genügen) des Sternes ein entartetes Gas bilden. Ferner interessieren nur Gleichgewichts- und metastabile Zustände.

Der springende Punkt der Untersuchung ist das Langlebigwerden jener schweren Teilchen auf Grund des Pauliverbots, die unter normalen Verhältnissen (von unserem Standpunkt „normal“) in einer Zeitspanne zerfallen, die bei allen, mit Ausnahme der Neutronen (für welche sie etwa 1000 sek beträgt), kürzer als 10<sup>-10</sup> sek ist.

Als schwere Teilchen oder Baryonen werden angesprochen: Protonen, Neutronen, Lambda-, Xi-, Sigma-Hyperonen sowie deren Antiteilchen. Die Protonen sind die einzigen stabilen Baryonen, d. h. sie zerfallen nicht spontan. Die Massen der Hyperonen sind nicht untereinander verschieden und liegen zwischen etwa 2100 und 2600 Elektronenmassen. Die Masse des Protons beträgt 1836, die Masse des Neutrons 1839 Elektronenmassen.

Neutronen und Hyperonen repräsentieren energetisch höhere Zustände, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in tiefere übergehen. Der Protonenzustand ist der tiefste und deswegen kann dieses Teilchen nicht weiter zerfallen. In jedem System von Teilchen vermögen diese nur in ganz bestimmten Zuständen zu existieren, den sogenannten Quantenzuständen. Das ist die wesentliche Aussage der Quantentheorie. Jeder Quantenzustand ist durch einen Satz von Zahlen — die Quantenzahlen — charakterisiert. Der Zustand eines Elektrons im Atom-

verband wird beispielsweise durch vier Quantenzahlen beschrieben. (Zwei von ihnen, die Haupt- und die Nebenquantenzahl, legen die beiden Achsen der Bahnellipse fest, wenn man an der Ausdrucksweise der elementaren Bohrschen Theorie festhält.)

Die eben entwickelten Gedankengänge gestatten eine einfache Formulierung des Pauli-Prinzips (oder auch -verbots): In einem System von Teilchen, die in quantentheoretischer Wechselwirkung stehen, ist es unmöglich, einen Quantenzustand gleichzeitig durch zwei oder mehrere Teilchen zu besetzen. Finden innerhalb des Systems überhaupt Übergänge zwischen den verschiedenen Zuständen statt, dann nur solche in einen vor dem Übergang unbesetzten Zustand. Auf dem Prinzip beruht die Erklärung des Aufbaues der Elektronenhülle der Atome, welche ihrerseits die chemischen Eigenschaften der Elemente determiniert.

Auf Grund quantentheoretischer Überlegungen stellt sich heraus, daß in einem vollständig entarteten Gas bei wachsender Dichte die Quantenzustände niedrigster Energie so stark besetzt werden, daß die instabilen Teilchen höherer Energie nicht mehr zerfallen können. Ihr Zerfall wäre nämlich ein Übergang in einen tieferen, schon besetzten Zustand.

Die Reihenfolge, in der instabile Teilchen langlebig werden, ist

$$n, \Sigma^-, \Lambda, n^*, \Sigma^0, \Xi^-, p^*, \Sigma^+, \Xi^0.$$

(Die Bezeichnung dürfte klar sein. n, p bedeuten Neutron und Proton, der Stern angeregte Zustände derselben, die griechischen Buchstaben beziehen sich auf die entsprechenden Hyperonen. Ein hochgestelltes  $^*$ ,  $^+$ ,  $^0$  heißt elektrisch negativ, positiv bzw. neutral.)

Sehr interessant ist die Methode, mit deren Hilfe die Verteilung der einzelnen Baryonen im Gas als Funktion der Dichte berechnet wird. Ähnlich wie bei zahllosen Problemen der Statistik geht man von der Tatsache aus, daß die potentielle Energie in Gleichgewichts-, also stabilen Zuständen ein Minimum sein muß. Zu dieser Forderung treten zwei plausible Nebenbedingungen. 1. Die Teilchenzahl muß erhalten bleiben. 2. Der Stern muß als Ganzes wie auch in seinen Teilen elektrisch neutral sein. Es ist also eine Extremaufgabe mit Nebenbedingungen zu lösen.

Die Energie je Volumeinheit ist gegeben durch den Ausdruck

$$e = \frac{c}{2\pi h^3} \sum_k \int_0^b p^3 \cdot (M_k^2 c^2 + p^2)^{\frac{1}{2}} dp + N_\pi \cdot m_\pi \cdot c^2.$$

Der Summationsindex k durchläuft die Symbolmenge p, n,  $\Sigma$  usw., welche die Partikeln kennzeichnet, aus denen sich das Gas zusammensetzt. Im Ausdruck bedeutet der Buchstabe p den Impuls, über den bis zur Grenze

$$p_k = \left( \frac{6\pi^2}{\alpha_k} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot h \cdot N_k^{\frac{1}{3}}$$

integriert werden muß, um alle Teilchen k bis zu der ihnen gemäßen Energieschwelle zu erfassen. In  $p_k$  steckt die gesuchte Teilchenzahl  $N_k$ , deren Bestimmung den Gegenstand der Untersuchung bildet. Weiter bedeutet  $M_k$  die Masse,  $\alpha_k = 2s + 1$  die Zahl der Spinzustände des Teilchens k,  $N_\pi$ ,  $m_\pi$  ist Zahl und Masse der Pi-Mesonen. Alle Werte beziehen sich auf 1 cm<sup>3</sup>.

Unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen liefert die Lösung der Extremwertaufgabe zu jeder vorgegebenen Dichte (d. h. zu gegebener  $\sum N_k$  = Gesamtzahl der Teilchen je Volumeinheit) die Anteile  $N_k$ , welche auf die verschiedenen Partikeln in den Gleichgewichtszuständen entfallen. Das Ergebnis läßt sich übersichtlich zusammenfassen, indem man die einzelnen Phasen bespricht, welche das Gas bei monoton zunehmender Dichte  $\rho$  durchläuft.

#### I. Phase = Elektronen-Protonen-Phase

Die Dichte  $\rho$  ist klein, das Gas ist ein Gemisch von gleich vielen Protonen und Elektronen, Neutronen fehlen vollständig.

#### II. und III. Phase = Neutronenphase

Bei  $\rho = \rho_n = 1,28 \cdot 10^7$  g/cm<sup>3</sup> (das ist die Dichte der Weißen Zwerge) erscheinen die ersten Neutronen, deren

Anzahl mit der Dichte rasch zunimmt. Gleichzeitig sinkt die Zahl der Protonen entsprechend ab (Erhaltung der Teilchenzahl!). Die Elektronen sind relativistisch.

#### IV. Phase = Hyperonenphase

Die Dichte ist auf  $\rho = \rho(\Sigma^-) = 1,1 \cdot 10^{15}$  g/cm<sup>3</sup> gestiegen, die ersten  $\Sigma^-$ -Hyperonen erscheinen. Wächst  $\rho$  weiter, so treten die anderen Teilchen in der Reihenfolge  $\Lambda$ -Hyperonen (bei  $\rho = 2,30 \cdot 10^{15}$  g/cm<sup>3</sup>), angeregte Neutronen,  $\Sigma^0$ -Hyperonen,  $\Xi^-$ -Hyperonen, angeregte Protonen,  $\Sigma^+$ -Hyperonen,  $\Xi^0$ -Hyperonen auf.

Zur zahlenmäßigen Illustration führen wir ein Beispiel an. Befinden sich  $4 \cdot 10^{59}$  Neutronen in 1 cm<sup>3</sup>, dann sind in diesem Volumen außerdem  $1,92 \cdot 10^{59}$  Lambda-Hyperonen,  $1,12 \cdot 10^{59}$  Sigma-Hyperonen und  $8,2 \cdot 10^{57}$  Xi-Null-Hyperonen anzutreffen.

Ab  $\rho = 10^{16}$  g/cm<sup>3</sup> enthält das Baryonengas sämtliche aufgezählte Teilchen.

Man könnte noch von einer

#### V. Phase

sprechen, bei der Pi-Mesonen stabil werden. Ihre Konzentration steigt weiter an, die der Elektronen und My-Mesonen bleibt konstant.

Ein Stern, der zu einem erheblichen Teil aus dem Baryonengas der IV. und V. Phase aufgebaut ist, heißt Hyperonens Stern. Er besteht aus einem Hyperonencore, das von einer Lage Neutronen umgeben ist, um welche sich als äußerste Schicht eine Hülle von Nukleonen breitet. Die Dichte der Hyperonensterne ist von der Größenordnung  $10^{15}$  g/cm<sup>3</sup>. Die enorme Dichte kann sich unter dem Einfluß des hydrostatischen Gravitationsdrucks bilden, weil die Partikeln zum überwiegenden Teil elektrisch neutral und daher die Abstoßungskräfte weitgehend ausgeschaltet sind. Die Teilchen scheinen ein undurchdringliches Core vom Radius 0,2 Fermi =  $2 \cdot 10^{-14}$  cm zu besitzen, das eine Steigerung der Dichte über  $N = 10^{40}$  cm<sup>-3</sup> verhindert.

Den Fortschritt auf diesem Gebiet macht ein Vergleich mit einer älteren Arbeit von Zwicky deutlich, die in Band 88 (Juli/Dezember 1938) des Astrophysical Journal, S. 522 bis 525 erschien und sowohl an Ausführlichkeit als auch an theoretischer Fundierung beträchtlich hinter der Publikation Ambarzumjans zurückbleibt. Trotzdem verdienen einige interessante Details Erwähnung.

Die Veröffentlichung Zwickys trug den Titel „On Collapsed Neutron Stars“. Die letzten zwei Worte sollten auf die Existenz elektrisch neutraler Regionen vom linearen Durchmesser  $e^2/mc^2 = 2,8$  Fermi im Stern hinweisen.

Zwicky bemerkt, daß zu jeder mittleren Dichte eine Grenzmasse  $M_G$  gehört (Schwarzschild-Grenze), der eine außergewöhnliche Eigenschaft zukommt, welche eine Konsequenz der allgemeinen Relativitätstheorie ist. Ein Stern, der die Grenzkonfiguration, welche seiner mittleren Dichte entspricht, tatsächlich besitzt, kann mit der übrigen Welt in keine Wechselwirkung treten, d. h. er ist unbeobachtbar. Das folgt aus zwei Umständen:

1. Die Lichtgeschwindigkeit an seiner Oberfläche ist Null.

2. Die Rotverschiebung infolge des Gravitationsfeldes ist derart groß, daß jedes Photon die Außenpunkte mit der Energie Null erreicht.

Es wird die Vermutung ausgesprochen, daß Supernovae Übergänge von gewöhnlichen Sternen zu Neutronensternen sein könnten. Gerade diese Auffassung steht zu den aus wesentlich gründlicheren Untersuchungen entspringenden Ansichten Ambarzumjans über den Entwicklungstrend in Widerspruch. Aus dieser Divergenz wird ersichtlich, wie sehr hier noch alles in Fluß ist, obwohl die theoretische Einkreisung des Problems unverkennbare Fortschritte macht.

Abschließend möge noch an Hand der im ersten Teil herangezogenen Daten der Versuch unternommen werden, die extremen Dichten wenigstens an ihren Wirkungen zu veranschaulichen.

Wir betrachten zu diesem Zweck einen fiktiven Hyperonens Stern von Sonnenmasse  $M_H = M_\odot = 2 \cdot 10^{33}$  g und dem Radius  $R_H = 10^6$  cm = 10 km. (Der Index H beziehe sich auf Hyperonensterne.) Er besäße die mittlere Dichte  $\rho_H = 4,84 \cdot 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>, die natürlich etwas kleiner ist als die Dichte der Hyperonencores.

Die Fallbeschleunigung auf der Oberfläche wäre

$$G_H = 1,34 \cdot 10^{14} \text{ cm/sek}^2 = 1,34 \text{ Mrd.km/sek}^2.$$

Daher wöge dort 1 cm<sup>3</sup> Wasser 137.000 Tonnen! Das Gewicht von 1 cm<sup>3</sup> Sternmaterie wäre gar  $6,64 \cdot 10^{23}$  kp. 1,12 cm<sup>3</sup> der Sternsubstanz erzeugten auf der Sternoberfläche denselben Druck wie der Erdmond, läge er auf der Oberfläche unserer Erde. Ein Stäubchen, nur  $\frac{1}{1000}$  mm dick, hätte noch immer das Gewicht von etwa 50 Millionen Tonnen. Fiele ein Körper einen lächerlichen Zentimeter tief, erreichte er eine Endgeschwindigkeit von 164 km/sek. Die Erwärmung einer Wolke, die um 1 cm absinkt, beliefe sich auf etliche Millionen Grad.

Die Kreisbahngeschwindigkeit knapp über der Oberfläche wäre 116.000 km/sek. Eine Rakete oder ein Mond würde also den Stern 1850mal in einer Sekunde umlaufen. Die Fluchtgeschwindigkeit erreichte mit 164.000 km/sek bereits 55% der Lichtgeschwindigkeit.

Um aus der Sternmaterie einen Körper von der Masse des Erdmondes zu formen, genügte die Entnahme einer Kugel mit einem Radius von 33 Metern.

Der Reigen phantastischer Zahlen wäre mühelos weiter fortzusetzen, doch dürfte das Gebotene eindrucksvoll genug sein. Aus ihm geht nämlich nicht nur hervor, wie tief die Forschung uns schon in die Geheimnisse der Natur einzudringen erlaubte, wir lernen darüber hinaus, das Gewicht unseres heutigen Wissens gering zu achten im Hinblick auf den schier unausspannbaren Reichtum an Erscheinungsformen, in denen sich das Sein verwirklicht. Nicht diese Erscheinungsformen dürfen als phantastisch bezweifelt werden, wenn sie total von den gewohnten abweichen. Vielmehr müssen sie unserem Geist den willkommenen Anstoß bieten, sich ins Kosmische auszuweiten, damit er auch jene Bezirke als seine größere Heimat empfinde, von denen uns beim ersten Hinsehen ein unüberbrückbarer Abgrund zu trennen scheint.

# CHEMIE

Dr. Edith Jarisch

## DNS, RNS und der genetische Code (II)

### Inhalt von Teil I: Die Chemie der Nucleinsäuren

Der Bau von DNS (Desoxyribonucleinsäure) und RNS (Ribonucleinsäure) wird als Doppelhelix eines hochpolymeren Nucleotids erkannt. Je ein Strang der Doppelhelix besteht aus den Pentosen Desoxyribose oder Ribose in Furanoseform, welche jeweils über die C-Atome 3 und 5 durch Phosphorsäure (in Esterbindung) miteinander verkettet sind. Außerdem trägt jeder Pentosering an C-1 die Basen Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (C) oder Thymin (T), bei RNS kommt auch Uracil (U) anstelle von Thymin vor. Die zwei verdrehten Stränge der Doppelhelix werden durch H-Brücken zwischen den Basen in ihrer Lage festgehalten, wobei dem A des einen Stranges immer das T des anderen, dem C immer das G gegenübersteht. Die Größenverhältnisse der Basenpaare A-T und C-G sind fast identisch, wodurch die große Regelmäßigkeit des Moleküls verursacht wird. Die beiden Stränge stehen zueinander in komplementärem Verhältnis. Bei der Reduplikation der DNS werden zwei mit der ursprünglichen DNS identische Doppelhelices erhalten. Der Unterschied zwischen DNS und RNS besteht nicht nur in der Zuckerkomponente und der etwas verschiedenen Ganghöhe der Spiralen, sondern vor allem in der biologischen Funktion dieser Riesenzellen. Die DNS wurde als Träger der Erbinformation erkannt, während RNS bei der Auswertung dieser Information und der zellspezifischen Proteinsynthese eine Rolle spielt. Von RNS sind drei Arten bekannt: 1. die Ribosomen-RNS, 2. die hochmolekulare, aber einsträngige messenger-RNS, 3. die niedermolekulare (nur etwa 80 Nucleotideneinheiten) lösliche RNS (I-RNS oder transfer-RNS) mit drei ungepaarten Basen und einer Aminosäure an einem Kettenende.

### 2. Der genetische Code

Die Erscheinungsform und die artbestimmenden Eigenschaften der Lebewesen, ihr Phänotypus, wird im allgemeinen unverändert von einer Generation zur nächsten vererbt. Die Übertragung dieser Merkmale erfolgt durch die in den Chromosomen enthaltenen Gene, welche aus DNS bestehen. Es muß daher in den Molekülen der DNS das enthalten sein, was den Phänotypus des neuen Individuums bestimmt: die DNS ist ein Informationsträger, welcher die riesige Zahl der Einzeldaten zur Erzielung eines ganz bestimmten Phänotypus enthält. Diese Daten beziehen sich auf alle zum Bau der Zellen notwendigen Substanzen, auf das Reaktionsgeschehen in der Zelle, ihren Stoffwechsel und das richtige Zusammenspielen der Einzelzellen in einem höher organisierten Lebewesen — wie gewaltig muß daher die Zahl der Einzeldaten, die Informationsmenge, sein!

Welche „Schrift“ hält diese Daten fest? Wie kann durch die Moleküle der DNS der „Bauftrag“ für die neue Zelle festgehalten und im richtigen Moment richtig wieder „abgelesen“ werden? Wie wird die Information verschlüsselt, codiert?

DNS besteht aus zwei verdrehten Strängen, die lineare Polyester aus Phosphorsäure und Desoxyribose sind, wobei die Pentose noch eine Base gebunden hält. Die Erkenntnis, daß vier Basen, Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (C) und Thymin (T), am Bau des DNS beteiligt sind, führte zur Annahme, daß durch die Sequenz der Basen innerhalb eines DNS-Moleküls die Erbinformation niedergelegt, gespeichert ist.

Diese vier Basen A, G, C, T stellen ein System aus vier

Buchstaben dar, mit dem der „Bauftrag“ niedergeschrieben ist.

Zur Veranschaulichung soll folgender Vergleich dienen: Moderne Rechenmaschinen verwenden nicht das dekadische Zahlensystem, sondern das Binärsystem, in dem es nur die zwei Zeichen, 0 und 1, gibt, für elektronische Rechenmaschinen ist dieses System ökonomischer, es entspricht ihrem Bau. Wir rechnen im dekadischen System, es entspricht unserer Gewohnheit. Beide Zahlensysteme stehen gleichberechtigt nebeneinander, die Zahlenwerte des einen sind gleich den Zahlenwerten des anderen Systems, nur die Ziffernfolge (Zeichenfolge) sieht anders aus:

Zahlenwert	dekadisch	binär	
null	0	0	oder —
eins	1	1	+
zwei	2	10	+—
drei	3	11	++
vier	4	100	+— —
fünf	5	101	+— +
usw.			

Es ist sofort einzusehen, daß zur Darstellung eines beliebig großen Zahlenwertes im binären System mehr Einzelzeichen notwendig sind als im dekadischen.

Der Erbinformation stehen vier Buchstaben zur Verfügung. Was soll aber durch diese vier Buchstaben dargestellt werden? Wie findet diese Darstellung statt und wie kann sie abgelesen werden? Diese Fragen sind noch nicht für alle Merkmale eines Phänotypus gelöst, aber eine wichtige Teilfrage, die Festlegung des Bauplanes für Proteine, konnte weitgehend geklärt werden (F. H. Crick, Nobelpreis 1962).

Es soll zunächst die Frage diskutiert werden, wie in der DNS die Information über den Bau eines ganz speziellen Proteins gespeichert wird, während die Frage der Realisation dieser Information, also die Vorgänge bei der Proteinsynthese, im dritten Teil dieses Berichtes besprochen werden.

### Das Codon

Proteine entstehen durch Polykondensation aus Aminosäuren, wobei die Reihenfolge der Aminosäuren für jede Proteinart charakteristisch ist. In den natürlich vorkommenden Proteinen sind rund zwanzig Aminosäuren nachgewiesen worden, somit muß eine Bauvorschrift für ein Protein Auskunft über die genaue Reihenfolge von rund zwanzig Bausteintypen geben, wobei aber ein Protein oft aus hundert und mehr Einzelbausteinen besteht (Hämoglobin: ca. 600). Wir können sagen:

Die Information über die Sequenz von 20 Aminosäuren muß darstellbar sein durch die Sequenz von 4 Basen.

Ein System aus 20 Zeichen muß dargestellt werden durch ein System aus 4 Zeichen.

Damit ergibt sich als nächste Frage: wie viele Zeichen des Vierersystems sind mindestens erforderlich, um 20 Aminosäuren darzustellen. Wir wollen zunächst überlegen, ob zwei Zeichen des Vierersystems bereits genügen, um zwanzig andere Zeichen (=Aminosäuren) zu ersetzen. Die Kombinatorik gibt darüber sofort Auskunft: es sind nur  $4^2=16$  Zeichen darstellbar<sup>1</sup>, also zuwenig für 20 Aminosäuren. Werden jedoch drei Zeichen zur Codierung einer Aminosäure verwendet, so erhält man eine genügend große Zahl an Variationen:  $4^3=64$ . Es genügt also sicher

<sup>1</sup> Variation aus vier Elementen mit Wiederholung:  $vV_n^k = n^k$ ; V = Zahl der Variationen; n = Zahl der Elemente (in unserem Fall 4); k = Klasse (Zahl der Elemente in einer Variation, in unserem Fall zunächst mit 2 angenommen, da aber ungenügend, auf 3 erhöht).

eine Gruppe von drei Basen zur Festlegung der Identität einer Aminosäure. Diese Dreiergruppen werden von Crick ein Codon genannt und sehen z. B. so aus: AAA, AAT, AAG, AAC, ATA usw.

Nicht nur diese rein theoretische Überlegung führt zur Annahme dafür, daß das Codewort für eine Aminosäure durch die Sequenz von drei Basen gebildet wird, sondern auch experimentelle Hinweise wurden dafür gefunden. Es wurde ja festgestellt, daß die I-RNS drei ungepaarte Basen enthält und außerdem eine Aminosäure an einem Kettenende<sup>1</sup> und gerade die I-RNS ist maßgeblich an der Proteinsynthese beteiligt. Sie spielt als Überträger der Information (transfer-RNS!) eine entscheidende Rolle, denn jede transfer-RNS trägt eine ganz bestimmte Aminosäure, also könnte doch offenbar die Art der Aminosäure durch die drei ungepaarten Basen bestimmt sein, wobei allerdings zunächst noch offen bleibt, welches die „richtige“ Schreibweise ist, da doch zu jeder Base eine komplementäre vorhanden ist, daher jedes Codon auch ein komplementäres besitzt — doch davon später.

Es darf heute als sicher gelten, daß die Sequenz der Aminosäuren eines jeden Proteins durch die Sequenz der Codons festgelegt ist.

Über die Anordnung der Codons ergeben sich gleich einige Fragen ganz prinzipieller Natur:

1. Muß das „Lesen“ der Codons von einer bestimmten Stelle des Moleküls, z. B. vom Kettenende, ausgehen?
2. Gibt es Zwischenräume zwischen den Codons, die durch Basen mit „sinnloser“ Anordnung ausgefüllt sind?
3. Können sich Codons überlappen etwa derart, daß die (willkürlich gewählte) Sequenz ATCAAGT... den Codons ATC, CAA, AGT, T... entspricht, oder findet keine Überlappung statt, dann müßte die Sequenz so gelesen werden: ATC, AAG, T..., beide Lesarten hätten einen anderen „Sinn“, sie entsprächen einem anderen Protein.
4. Ist ein Codon wirklich eindeutig, oder können für eine bestimmte Aminosäure auch verschiedene Codons stehen?
5. Welcher Strang der Doppelhelix ist der „richtige“, da ja beide in komplementärem Verhältnis stehen und die Auswertung zu zwei verschiedenen Proteinen führen muß (bei festgelegter Leserichtung!).

Einige dieser Fragen konnten bereits geklärt werden.

Zunächst die Frage 1:

Experimentelle Hinweise lassen den Schluß zu, daß sicher das Lesen von einem bestimmten Punkt des Moleküls her erfolgen muß, wahrscheinlich vom Kettenende aus. Auch die Aminosäuren werden in linearer Reihenfolge vom Aminoende einer Polypeptidkette beginnend aneinandergefügt. Versuche mit künstlichen Mutationen (ein Gen des Bakteriophagen T4 betreffend) zeigten, daß ein Codon in einer bestimmten Richtung gelesen werden muß.

Frage 2:

Die Frage nach den Zwischenräumen läßt sich vorderhand nicht beantworten.

Frage 3:

Es ist ziemlich sicher, daß sich Codons nicht überlappen. Denn würde bei einander überlappenden Codons ein Buchstabe verändert, d. h. eine Base chemisch verändert, so müßte diese Veränderung bei zwei aufeinander folgenden Aminosäuren eines Proteins sich widerspiegeln, was jedoch nie beobachtet wurde. Bei einer Mutation ist i. A. nur eine Base betroffen und auch nur eine Aminosäure verändert (z. B. chem. induzierte Mutation des Tabakmosikavirus durch salpetrige Säure).

Frage 4:

Leider dürfte die absolute Eindeutigkeit nicht zutreffen, wie ein sehr elegantes Experiment (Weisblum-Benzer-Holley, USA) zeigte. So kann Leucin sowohl durch (UUC)<sup>2</sup> als auch durch (UUG) chiffriert sein, wodurch die

<sup>1</sup> ds. Zeitschr. Nr. 6/1964, S. 5.

<sup>2</sup> Die Klammer, in der das Basentriplett steht, soll andeuten, daß die tatsächliche Reihenfolge der Basen innerhalb des Codons nicht bekannt sind, sondern daß das Codon nur aus 2U+C bzw. 2U+G besteht. Da RNS verwendet wurde, tritt an die Stelle von Thymin Uracil.

Zuordnung der einzelnen Triplets zu bestimmten Aminosäuren sich sehr viel schwieriger gestalten wird. Es ist wohl gelungen, Polynucleotide zu synthetisieren, deren Basensequenz an einem Kettenende genau bekannt ist, aber mehr als Hinweise für die Richtigkeit der Hypothese wurde nicht gefunden, Beweise stehen noch aus. Es ist jedoch anzunehmen, daß mehrdeutige Codons doch in der Minderzahl sind.

Da 64 Triplets nur 20 Aminosäuren gegenüberstehen und die Codierung nicht unbedingt eindeutig ist, wird es doch wohl auch wirklich „sinnlose“ Triplets geben können, wahrscheinlich ist jedoch auch ihre Zahl sehr klein. Man kann sich vorstellen, daß schon in einem sehr frühen Stadium der Evolution durch statistisch verteilte Mutationen der genetische Code entstanden ist und so sehr früh schon die Zuordnung von Aminosäuren stattfand und sich „sinnlose“ Triplets nicht erhalten haben.

Frage 5:

Welcher Strang der DNS trägt den „wirklichen Text“? Sind beide komplementären Texte „lesbar“ oder nur einer „sinnvoll“ und der andere „sinnlos“? Ein willkürlich gewähltes Beispiel soll dieses Problem illustrieren:

Strang 1	Strang 2	Codon	Aminosäure
(A ----- T)		TAG	..... 1
(T ----- A)		ATC	..... 2
(C ----- G)		GAT	..... 3
(G ----- C)		CTA	..... 4
(A ----- T)			
(T ----- A)			
(A ----- T)		Polypeptid 1	Polypeptid 2
(T ----- A)		—2—3—1—2—	—1—4—2—1—
(G ----- C)			
(A ----- T)		Polypeptid 3	Polypeptid 4
(T ----- A)		—4—3—1—4—	—3—4—2—3—
(C ----- G)			

Je nachdem, ob Strang 1 oder Strang 2 gelten soll und ob von oben nach unten oder von unten nach oben gelesen werden soll, stellen die hier angenommenen Triplets vier verschiedene Polypeptide dar. Da aber nach den oben erfolgten Darlegungen die Richtung des Lesens festliegt — sie soll von dem Ende der Nucleinsäure ausgehen, wo C<sub>2</sub> und C<sub>3</sub> der Pentose frei sind —, so ist nur mehr zu klären, ob nur ein Strang die sinnvolle Information trägt und daher der komplementäre sinn- und auch wirkungslos ist.

Ochoa und Mitarbeiter konnten zeigen, daß nur ein Strang die Information enthält. Poly-A<sup>1</sup> stimuliert die Bildung von Polylysin, also ist AAA die Chiffre für Lysin. Das komplementäre Codon wäre (für RNS) UUU. Es ist aber durch Poly-U möglich, Polyphenylalanin zu synthetisieren. Also ist das komplementäre Codon „falsch“. Ähnliche Befunde wurden auch durch Poly-(A,C) und dem komplementären Poly-(U,G) erhalten. Daraus muß geschlossen werden: nur eine Helix wird zur Informationsübertragung verwendet, diese ist die „richtige“, mit ihrer Basensequenz werden die Syntheseleitungen der Zelle gesteuert. Die andere, komplementäre, ist „falsch“ in bezug auf den Zellstoffwechsel, aber sie ist notwendig zur Informationsübertragung bei der Reduplikation der DNS, bei der Bildung einer neuen Generation, sie ist der Informationsträger für die „richtige“ Helix.

#### Die Veränderungen des Codes

Jede Änderung auch nur einer einzigen Base in der DNS ist bereits eine Mutation. Veränderungen der Basensequenz können hervorgerufen werden durch:

1. Eliminierung einer Base.
2. Chemischen Umbau einer Base.

Agenzien, die Mutationen hervorrufen, heißen **Mutagen**. Besonders häufig verwendete Mutagen sind salpetrige Säure, Hydroxylamin, Acridinderivate, 5-Bromuracil, Dimethylsulfat, 2-Aminopurin, um nur einige zu nennen. Daneben spielt auch elektromagnetische Strahlung eine große Rolle, besonders Röntgen- und UV-Strahlung.

Bei manchen Mutagenen ist ihre Wirkungsweise bekannt. So wirkt HNO<sub>2</sub> durch Desaminierung besonders auf Adenin und Cytosin. Acridin und seine Derivate können

<sup>1</sup> Polyadenin, synthet. RNS, siehe ds. Zeitschr. 6/1964, 6.



Basen eliminieren, während UV-Strahlung durch Dimerisierung des Thymins wirksam ist.

Durch Untersuchungen an verschiedenen Mikroorganismen, dem Pilz *Neurospora crassa*, der Hefe *Schizosaccharomyces pombe* und dem „fast lebenden“ Bakteriophagen T4, konnte festgestellt werden, daß manche Basensequenzen besonders anfällig für Mutationen sind. Diese anfälligen Stellen innerhalb eines Gens werden „hot spots“ genannt. Hot spots, diese Brennpunkte im Mutationsgeschehen, scheinen an die Stellen des Gens gebunden zu sein, die sich durch eine besonders große Häufigkeit von A—T-Paaren auszeichnen. Hier haben Untersuchungen am Gen rIIA und rIIB des Bakteriophagen T folgende Ergebnisse gebracht:

Von 753 unabhängig voneinander isolierten spontanen Mutationen im Gen rIIA sind 39% an einem einzigen hot spot lokalisiert, im benachbarten Gen rIIB von 855 sogar 60%. Diese Häufung von Mutationen an nur zwei Punkten ist sicher nicht nur von einem einzelnen Basenpaar abhängig, das sicher an vielen anderen Stellen des Gens ebenfalls vorkommt, sondern hier muß die unmittelbare Nachbarschaft auch von Einfluß sein. Wenn man die Basenpaare C—G und A—T vergleicht<sup>1</sup>, so fällt auf, daß C—G durch drei H-Brücken, A—T aber nur durch zwei H-Brücken zusammengehalten wird. Die Folge davon ist, daß bei Bedingungen, die trennend auf die Doppelhelix wirken, diejenige DNS, bei der die A—T-Paare überwiegen, leichter gespalten wird. DNS mit großem  $\frac{A-T}{C-G}$  Verhältnis hat einen geringeren Zusammenhalt.

Eine Hypothese nimmt daher an, daß besonders mutationsanfällige Stellen des Gens mit einer Häufung von A—T-Paaren verbunden ist.

Durch Strahlung bewirkte Genmutationen besitzen ein besonders aktuelles Interesse. Hier die chemischen Vorgänge aufzuklären kann für die Therapie bestimmter Strahlenschäden ausschlaggebend sein. Daß auch in dieser Richtung bereits einige erfolgversprechende Ansätze vorliegen, soll folgendes Beispiel zeigen:

UV-Strahlung führt zu einer Dimerisierung des Thymins der DNS, was für die Zelle letale Folgen hat. Gelingt es jedoch, die Dimerisierung rückgängig zu machen, so bestehen für die Zelle größere Überlebenschancen. Versuche an Hefezellen zeigten, daß durch die Einwirkung von  $H_2O_2$  (!) und Tageslicht, gesondert und vereint angewandt, die Überlebenschance UV-bestrahlter Zellen ganz erheblich gesteigert werden kann. Wahrscheinlich wird durch die „Photoreaktivierung“ und den Sauerstoffwechsel, der sicher mit der Bildung O-hältiger Radikale zusammenhängt, das dimere Thymin wieder gespalten. Dabei ist beachtenswert, daß die angewandte Menge  $H_2O_2$  bei nicht vorher bestrahlten Hefezellen bereits zu einer Inaktivierung führt, auf die bestrahlten Hefezellen jedoch aktivierend wirkt.

Die Erforschung der Mutationsvorgänge, der hot spots und deren Lokalisierung innerhalb der einzelnen wenigen besonders dazu geeigneten „Parade-Gene“ läßt hoffen, einige genauere Kenntnisse über die Basensequenz zu erlangen.

Zum Abschluß soll nur kurz beschrieben werden, wie überhaupt die Lage von Mutationsorten und damit im weiteren auch die Lage bestimmter Codons ermittelt werden kann. Kreuzt man Eltern miteinander, die sich durch zwei lageverschiedene Mutationen innerhalb eines Gens unterscheiden, so erhält man nur dann Nachkommen ohne jeden Mutationsdefekt, wenn zwischen den intakten Genabschnitten der beiden Eltern ein Austausch (crossing over, Kreuzungsversuch) stattgefunden hat. Die Häufigkeit dieser Austausche ist ein Maß für die relativen Abstände zwischen den Mutationsorten. Der Austausch ist um so seltener, je näher die Mutationsorte benachbart sind. Eine geeignete Auswahl von Mutanten wurde auch dazu herangezogen um festzustellen, ob ein Codon aus drei Basen besteht und von wo aus der genetische Code gelesen werden muß. Die genaue Überprüfung der Kreuzungsergebnisse stimmt genau mit dem zu erwartenden Ergebnis überein: das Codon ist ein Triplett, und die Richtung des Lesens hat von einem Kettenende aus zu erfolgen.

#### Literatur:

F. H. Crick, Ang. Chem. 75/1963/425.  
U. Winkler, Umschau i. W. u. T. 11/1963/342.  
Wacker, Ang. Chem. 75/1963/916.

<sup>1</sup> ds. Zeitschr. 6/1964, 5; Abb. 5.

## Endogene Amine im Stoffwechsel des Gehirns und psychotrope Pharmaka

In den letzten Jahren wurde die Kenntnis über Stoffwechsel und Wirkung einer ganzen Reihe von endogenen Aminen erweitert. Bei diesen endogenen Aminen handelt es sich um eine Reihe aromatischer und heterocyclischer Verbindungen, die in direkter Beziehung zu den Aminosäuren der Proteine stehen. Sie werden durch eine Vielzahl von Enzymen im Organismus erzeugt und auch wieder weiter umgewandelt. Von besonderem Interesse ist die Entstehung solcher Amine im Zentralnervensystem, konnten doch für eine jede Hirnregion das Vorhandensein ganz bestimmter Amine nachgewiesen werden.

Psychotrope Pharmaka<sup>1</sup> wirken meist direkt oder indirekt auf die Bildung, Speicherung oder den Abbau zentral wirksamer Amine. Hier konnte bereits eine Reihe von Zusammenhängen erkannt werden, so daß die Entwicklung der Chemie des Gehirns immer besser die Vorgänge im normalen und in dem Gehirn Geisteskranker (akuter, chronischer und erblicher) verstehen läßt.

### 1. Die Amine

Als zentral wirksame Amine sind bis jetzt erkannt worden:

Amine	zugehörige Aminosäure
Dopamin	Catecholamine ..... Tyrosin
Noradrenalin	
Adrenalin	
Tyramin .....	Tyrosin
Serotonin .....	Tryptophan
Tryptamin .....	Tryptophan
Histamin .....	Histidin

Sie entstehen durch enzymatische Reaktionen aus den zugehörigen Aminosäuren, wobei hauptsächlich Decarboxylierungen, Oxydationen (Einführung einer zweiten OH-Gruppe bei den Catecholaminen) und weitere Umwandlungen durch Acetylierungen, Methylierungen und Reduktionen (Enthydroxylierungen) oder Desaminierung stattfinden. Die Speicherung der Amine geschieht vermutlich durch Verknüpfung mit bestimmten Gruppen in Proteinen. Viele dieser Stoffwechselvorgänge sind reversibel und können ein Gleichgewicht erreichen. Ihr Verlauf und ihre Bedeutung hängen ab vom Amin, von der Art der peripheren Applikation (Zufuhr von außen) oder der zentralen Bildung, von der Art der anwesenden Arzneimittel und letzten Endes auch vom Organismus, Tierart oder Mensch.

Ein Enzym, welches mit Medikamenten gehemmt werden kann, ist die Monoaminoxidase (MAO), welche auf das engste mit dem Stoffwechsel der Catecholamine verknüpft ist. Die Catecholamine werden unter Bildung der entsprechenden Aldehyde oxydativ desaminiert, und die gebildeten Aldehyde werden entweder durch Aldehyd-Oxydasen zu Carbonsäuren oder durch -Dehydrogenasen zu Alkoholen. Das Enzym MAO tritt in Mitochondrien auf, ist aber auch in Lösung gebracht worden. Die Hemmung der Monoaminoxidase durch Iproniazid<sup>2</sup> wurde aufgeklärt: Iproniazid wird zunächst nichtenzymatisch sowohl zu Isopropylhydrazin als auch Aceton gespalten, worauf sich eine irreversible Vereinigung von einem Mol Enzym mit zwei Mol Hydrazin anschließt. Es kann sich dabei aber nicht um eine einfache Kombination von Enzym mit Hydrazin handeln, da andere Carbonylreagenzien (z. B. Semicarbazid) das Enzym nicht hemmen; außerdem tritt die Hemmung der MAO nur bei Gegenwart von Sauerstoff ein, sie wird durch Brenztraubensäure verhindert, aber nicht aufgehoben.

Einen (unvollständigen) Überblick gibt Schema 1.

<sup>1</sup> siehe ds. Zeitschr. 5/1964/23 ff.

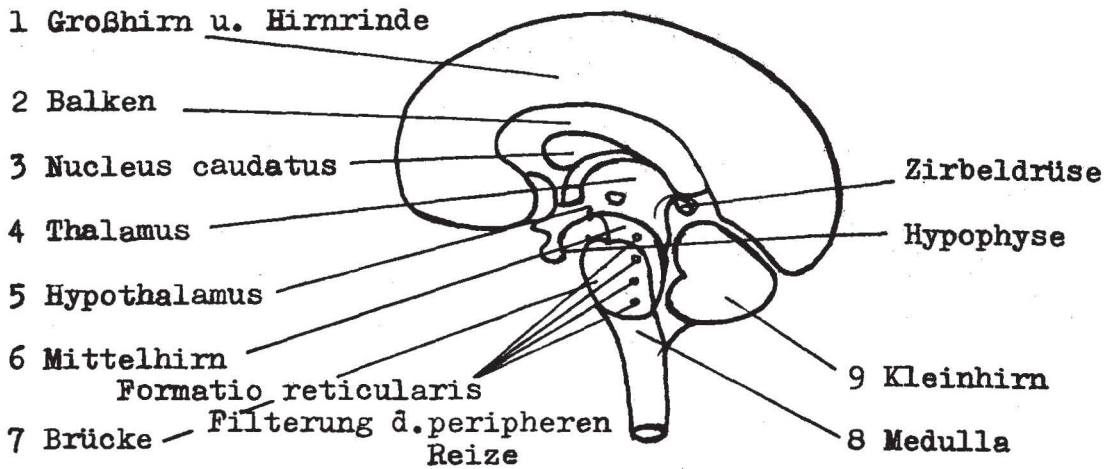
<sup>2</sup> siehe ds. Zeitschr. 5/1964/25.

Schema 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Amine:</b>									
Dopamin	Spur	Spur	++++	++	+	+	Spur	Spur	Spur
Noradrenalin	Spur	Spur	+	+++	++	++	++	++	Spur
Serotonin	Spur	Spur	++	++++	++	++	+	Spur	Spur
<b>Enzyme:</b>									
Decarboxylase	20	30	420	200	130	220	100	70	10
COMT*	80	100	100	90	900	110	1	9	Spur
MAO	800	400	500	160	900	800	900	1100	90
<b>Wirkung einiger Psychopharmaka:</b>									
Reserpin	dämpf.								
Dibenzozepine	dämpf.								
Meproamate	dämpf.								
Barbiturate	dämpf.								
Phenothiazine									
<b>Funktion der Gehirnregion</b>	Bewußtsein Sprache, Assoz. motor., sensor.	Verbind. zw. Gehirnhälften	Integr. motor. Funktionen	Emotion	Empfindungen (Lust, Schmerz)	Motorische Funktionen	sensor. u. motor. Nerven	sensor. u. motor. Nerven	Muskelkoordin. Gleichgewicht

\* Catechol-0-methyl transferase

Schema 2:



**2. Die Verteilung der endogenen Amine im Gehirn**

Durch Verfüterung von <sup>14</sup>C-hältigen Aminosäuren und Aminen konnte an Schnitten von Katzen- und Kaninchenhirnen eine charakteristische Verteilung der Amine in den einzelnen Gehirnregionen gefunden werden. So sind manche Hirnregionen an bestimmten Aminen stark angereichert, die wieder in anderen fast völlig fehlen. Einen Überblick gibt hier Schema 2. Es ist auffällig, daß in dem für die Emotionen zuständigen Hypothalamus gerade Serotonin angereichert ist, das einen gewissen strukturellen Zusammenhang mit den Psychodysleptika<sup>1</sup> d-Lysergsäureamid (Mutterkorn) und Psilocybin (mexik. Zauberpilz) besitzt.

**3. Wechselwirkungen zwischen Arzneimitteln und Aminen**

Die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Pharmaka und den Aminen oder den zuständigen Enzym-

systemen sind sehr komplex, sie können die Entstehung, den Abbau oder Inaktivierungsreaktionen betreffen. So kann ein Arzneimittel den aktiven Transport des Amins oder einer Vorstufe bereits blockieren, Enzyme können gehemmt werden (MAO-Hemmer). Eine große Rolle spielen auch Konkurrenzreaktionen, was die Übertragung von in vitro-Befunden auf Vorgänge in vivo oft problematisch erscheinen läßt, da Reaktionen durch die Anwesenheit der vielen Substanzen in der lebenden Zelle oft ganz wesentlich modifiziert werden können.

Oft ist es schon ein Problem, daß ein Arzneimittel die Stelle seiner Wirkung überhaupt erreicht, ohne vorher durch körpereigene Proteine an anderen Stellen gebunden worden zu sein.

Von einer ganzen Reihe psychotroper Pharmaka konnte trotz der angedeuteten Schwierigkeiten doch die Art der Wirkungsweise wenigstens teilweise erkannt werden:

Reserpin: setzt Amin frei, blockiert Aminaufnahme.  
Chlorpromazin: blockiert Aminfreigabe und Aminaufnahme.

<sup>1</sup> siehe ds. Zeitschr. 5/1964/25.

- Imipramin: blockiert Aminfreigabe.  
 Iproniazid: blockiert Aminfreigabe, hemmt Monoaminoxidase.  
 Cocain: blockiert Aminfreigabe und Aminaufnahme.

Über die Angriffsstellen einiger Gruppen psychotroper Pharmaka gibt Schema 2 einen Überblick.

Gerade die Erforschung dieser äußerst kompliziert miteinander verflochtenen Stoffwechselforgänge ist für die Medizin von allergrößter Bedeutung. So konnte auch eine ganze Reihe von erblichen Krankheiten, die mit geistiger Degeneration verbunden sind, als Störungen des Proteinstoffwechsels erkannt werden. Oft ist durch einen Genschaden nur eine einzige Aminosäure nicht normal abbaubar. Wenn es dann zu Ansammlungen von Aminen im Gehirn kommt, so sind oft schwerste geistige Schäden oder gar der Tod die Folge. Hierher gehört das geradezu klassische Beispiel der Phenylketonurie, einer erblichen Krankheit, gekennzeichnet durch Schwachsinn und dem Auftreten von Phenylbrenztraubensäure im Harn, sowie Anreicherung von Phenylalanin im Blut. Verursacht wird diese Krankheit durch das Fehlen der Phenylalanin-Hydroxylase, so daß sich im Patienten Aminosäuren, Amine und Ketosäuren ansammeln, die dann über einen noch nicht geklärten Mechanismus zur geistigen Degeneration führen. Das rechtzeitige Erkennen dieser Krankheit, womöglich noch in den ersten Lebenswochen, und Einhalten einer möglichst phenylalaninarmen Diät kann den Menschen vor dem Schicksal eines Idioten bewahren. Die Häufigkeit der Phenylketonurie beträgt immerhin 1:10.000, deshalb soll in der Bundesrepublik Deutschland routinemäßig jedes Neugeborene noch im Entbindungsheim auf das latente Vorliegen dieser Krankheit durch einen Serumtest untersucht werden.

Einige, allerdings zum Teil seltene Krankheiten seien hier noch genannt:

Krankheit (Syndrom)	genetischer Defekt	pathologische Erscheinung
Phenylketonurie	Phenylalanin-Hydroxylase fehlt	Geisteschwäche
kongenitale Pellagra	Störung des Tryptophantransportes in Darm und Niere	Geisteschwäche
Leucinosi (Ahornsirupkrankheit)	Ketosäure-Decarboxylase für Leucin, Isoleucin, Valin fehlt	Hirndegeneration (früh-letal)
Histidinämie	Histidase fehlt	Sprachstörungen
Cystathionurie	Störung des Cystathionabbaues	Geisteschwäche

Die Stoffwechselforgänge bei der Schizophrenie konnten bis jetzt nicht geklärt werden. Es gibt wohl einige Hinweise — z. B. die Beziehung Serotonin-Lysergsäure — über die Beteiligung des Tryptophans an dieser Erkrankung, so kann bei geistig Normalen durch Gaben von Tryptophan mit gleichzeitiger MAO-Hemmung künstlich auch eine Psychose erzeugt werden.

#### 4. Neuere Psychopharmaka

Seit der Einführung des Chlorpromazins und Reserpins in die Therapie der psychischen Erkrankungen hat sich eine geradezu stürmische Entwicklung auf diesem Gebiet vollzogen. Durch Variierung der bereits als wirksam erkannten Strukturen konnten unerwünschte Nebenwirkungen ausgeschaltet werden und wurde gleichzeitig auch größere Spezifität erreicht. Auch strukturelle Zusammenhänge zwischen einzelnen Wirkungsgruppen konnten festgestellt werden.

Zu großer Bedeutung sind tricyclische Verbindungen gekommen, wobei je nach Bau des Tricyclus einmal Neuroleptika, einmal Thymoleptika erhalten werden. Diese Substanzen wurden durch Abwandlung des Chlorpromazins erhalten. Im Zusammenhang damit mußten auch einige ganz neuartige Synthesen zur Herstellung dieser Heterocyclus entwickelt werden.

Die Abwandlung des ursprünglich verwendeten Phenothiazingerüsts zu den heute wichtigen Thioxanthenen und einen der vielen verschiedenen Synthesewege bringt Schema 3, um eine der Entwicklungsrichtungen anzudeuten.

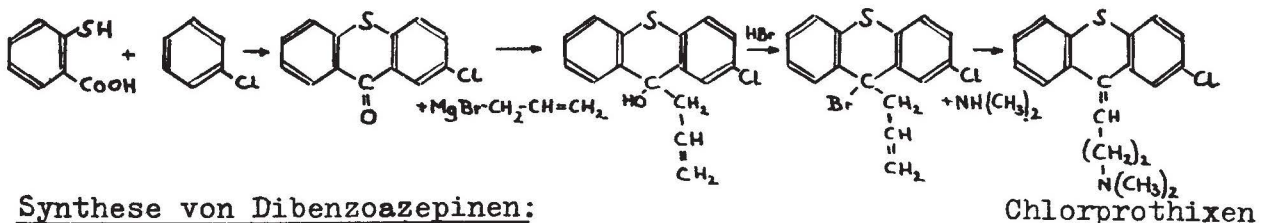
Die Suche nach neuen, besseren Medikamenten hat zu einer derartigen Vielfalt von Substanzen geführt und der jährliche Zuwachs ist so groß, daß es für den Arzt in der Praxis bereits schwierig wird, hier den Überblick nicht zu verlieren. Wie oft kommt es vor, daß zum praktischen Arzt Patienten kommen, die auf Grund irgendeines Zeitungsartikels dieses oder jenes Präparat haben wollen, da sie finden, daß es genau zu ihren Beschwerden paßt. Am liebsten sind hier natürlich einerseits Beruhigungsmittel, andererseits Aufpulverungsmittel. Daß hier eine große Gefahr des Medikamentenmißbrauches besteht, ist leicht einzusehen: um leistungsfähiger zu sein, nimmt man Psychoanaleptika, um seine Ruhe und den Schlaf wiederzufinden, braucht man dann natürlich Tranquilizer oder Hypnotika<sup>1</sup>. Daß aber dadurch der natürliche Stoffwechsel des Zentralnervensystems oft arg durcheinander gebracht wird, wird von vielen Patienten nicht eingesehen.

Die Entwicklung der Psychopharmakologie führt aber auch zu einem sehr ernstem Problem: die „Beeinflussung des Bewußtseins (control of mind)<sup>2</sup>“ hat einen Klang drohender Aktualität. Einigen erscheint sie als ein Ziel, das mit psychotropen Drogen erreichbar ist. Andere halten Erfahrung und Bildung für stärker als irgendein Pharmakon (wie etwa A. Huxleys „Soma“ in „Brave New

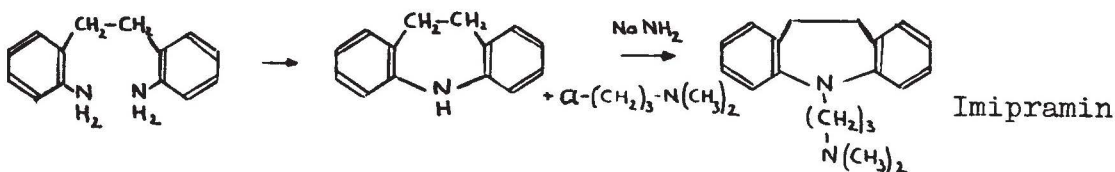
<sup>1</sup> zur Definition dieser Begriffe siehe ds. Zeitschr. 5/1964/26.  
<sup>2</sup> Farber-Wilson: Man and Civilisation: Control of the Mind, New York 1961.

Schema 3

#### Synthese von Thioxanthenderivaten:



#### Synthese von Dibenzazepinen:



World“). Wenn wir es je dazu kommen lassen, daß eine Droge benutzt wird, um das Denken vieler Menschen zu beeinflussen, so ist die Kontrolle über unser Bewußtsein bereits erreicht. Die Droge selbst braucht dann nur noch ein Placebo zu sein“<sup>1</sup>.

**Literatur:**

- J. W. Daly und B. Witkop, Ang. Chem. 75/1963/552.  
 E. Jucker (Sandoz), Ang. Chem. 75/1963/524.  
 F. Flügel (Univ. Nervenklinik Heidelberg), Die Kapsel 16/1964/475.

## Die Anwendung des Mössbauer-Effektes in der Chemie

Seit der Erkenntnis, daß die chemische Bindung doch nicht ganz ohne Einfluß auf den Atomkern ist, wurde die Kernmagnetische Resonanzspektroskopie (NMR-Spektroskopie<sup>2</sup> zu einem wertvollen Hilfsmittel bei der Klärung subtiler Konstitutionsprobleme. Da es sich beim Mössbauer-Effekt ebenfalls um einen Resonanzeffekt der Atomkerne handelt<sup>3</sup>, gewinnt er ebenfalls an Bedeutung für die Aufklärung chemischer Bindungsprobleme.

Resonanzfluoreszenz wird immer nur dann erhalten, wenn die Frequenz der Strahlung des erregenden Systems mit der Frequenz des zur Resonanz gebrachten Systems übereinstimmt. Bei der Kernresonanzfluoreszenz ist aber nur bei sehr scharfer Übereinstimmung der Energiezustände der Atomkerne Absorption — und damit Resonanz — zu erwarten. Ist daher das erregende Atom in einem anderen Bindungszustand als das angeregte, so ist nur dann Resonanz zu erwarten, wenn durch einen Kunstgriff, d. h. zusätzliche Bewegung der Systeme gegeneinander, der Unterschied in der Frequenz der  $\gamma$ -Strahlung durch den Dopplereffekt gerade wieder ausgeglichen wird. Damit lassen sich aus Struktur und Lage der Reso-

<sup>1</sup> S. Kety in <sup>5</sup>. Ein Placebo ist ein medizinisches Leerpräparat.

<sup>2</sup> Wiss. Nachr., Heft 5, April 1964.

<sup>3</sup> Wiss. Nachr., Heft 1, April 1963.

nanzlinien Rückschlüsse auf den Bindungszustand des Atoms ziehen.

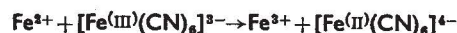
Es wurden zunächst die Bindungstypen einiger Eisenkomplexsalze untersucht, und dabei die alte Streiffrage, ist Berlinerblau und Turnbullsblau dasselbe oder nicht, gelöst.

Als Strahlungsquelle wurde <sup>57</sup>Fe verwendet. Beim Zerfall von <sup>57</sup>Co durch K-Einfang entstehen angeregte <sup>57</sup>Fe-Kerne, die  $\gamma$ -Quanten von einer Energie von 14,4 keV aussenden. Die Linienbreite beträgt  $4,9 \cdot 10^{-9}$  eV, entsprechend einer mittleren Lebensdauer des angeregten Zustandes von  $1,0 \cdot 10^{-7}$  sec.

Als Absorber wurde die zu untersuchende Substanz verwendet. Um die Strahlungsquelle relativ zum Absorber zu bewegen, wurde sie starr mit der Schwingungsspule eines Lautsprechers verbunden. Die Absorption wurde als Funktion der Relativgeschwindigkeit zwischen Absorber und Quelle gemessen. Diese Relativgeschwindigkeiten liegen zwischen 0,01—1,1 mm/sec.

**Ergebnisse:**

„Unlösliches Berlinerblau“, erhalten durch Zusammenfügen einer Lösung von Kaliumhexacyanoferrat-(II),  $K_4[Fe(CN)_6]$  mit einer Lösung von  $Fe^{3+}$ -Ionen, und „Turnbullsblau“, erhalten aus  $K_3[Fe(CN)_6]$  und  $Fe^{2+}$ -Ionen, zeigen das gleiche Resonanzspektrum; das bedeutet aber, daß sie identisch sind. Bei der Bildung von Turnbullsblau entsteht Berlinerblau gemäß:



Entgegen früheren Annahmen konnte bewiesen werden, daß den Eisenatomen genau definierte Oxydationsstufen zukommen:



Die tiefe Farbe des Berlinerblaus kann also nicht auf oszillierende Valenzen oder Resonanz ( $Fe^{II}(CN)_6Fe^{III} \leftrightarrow Fe^{III}(CN)_6Fe^{II}$ ) zurückgeführt werden. Durch Untersuchungen am „löslichen Berlinerblau“  $KFe[Fe(CN)_6]$  wurde gefunden, daß zwischen Fe und N höchstens ganz schwache Bindungen vorliegen, also Fe im wesentlichen als Ion vorliegt.

Im Hexacyanoferrat (II),  $[Fe(CN)_6]^{4-}$  sind die Cyano-Gruppen durch  $\sigma$ -Bindungen an das zentrale Eisenatom gebunden.

**Literatur:** E. Fluck et al., Ang. Chem. 75/1963/461.

# EXPERIMENTALPHYSIK

Prof. Richard Lederer

## Elektrische Schwingungen im Unterricht der Oberstufe

**Einführung und Ergänzung zum Vortrag am 4. Mai 1965 im BG Wien XIII., Fichtnergasse 15, im Rahmen der Fortbildungswoche.**

Auf Wunsch zahlreicher Kollegen wurde das im Vortrag am 21. April 1964 vorgeführte Demonstrationsgerät über elektrische Schwingungen weiter ausgebaut und von einer Lehrmittelfirma erzeugt. Diese Gerätezusammensetzung bekam den Namen „Von der Elektronenröhre zu Rundfunk und Fernsehen“, wird mit 54 Versuchsblättern geliefert und umfaßt Versuche über die Elektronenröhre, Grundversuche zur Automation, grundlegende Versuche über Kondensator und Spule an Gleich- und Wechselspannung, elektrische Schwingungen im Bereich von 1 Hz bis 100 MHz, eingehende Experimente über die Modulation und Demodulation der Hochfrequenz, die Entstehung des Fernsehbildes und Versuche über Resonanz und Kopplung von Schwingkreisen.

Das Demonstrationsgerät ist in einige Teilgruppen (Grundgerät und Ergänzungssätze) gegliedert, damit einerseits die stufenweise Anschaffung ermöglicht wird, hauptsächlich soll aber dadurch den Hauptschulen ermöglicht werden, die für sie geeigneten Versuche auszuwählen. Da die Unterlagen für die Grundstufe genügend ausführlich gestaltet werden mußten, sie aber nicht allzu umfangreich werden sollten, sind in den Versuchsblättern nur wenige Hinweise für die Darstellung des Sachgebietes in der Oberstufe enthalten. Ferner können mit Hilfe des Gerätes zahlreiche Versuche ausgeführt werden, die in den Versuchsblättern nicht angegeben sind.

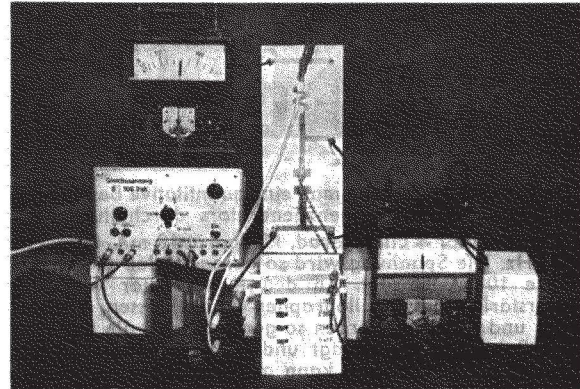
Aus diesem Grunde soll in diesem Aufsatz das ergänzt werden, was für die Oberstufe interessant und wichtig ist. Die Grundstufe kann nur qualitative Versuche bringen, die den Kindern das Verhalten von Spule und Kondensator plausibel machen. In der Oberstufe dagegen sollten wir von Differential- und Integralrechnung, Winkelfunktionen und komplexen Zahlen Gebrauch machen und den Weg über die Wechselstromwiderstände wählen. Wir sind ja heute in der Lage, jedes einzelne Ergebnis der Theorie durch den Versuch zu bestätigen.

### Die Wechselstromwiderstände

Ausgangspunkt der Betrachtung kann einer der beiden folgenden Versuche sein:

Entweder man zeigt an der Parallelschaltung von Widerstand und Kondensator an Gleichspannung das Voreilen des Stromes im Kondensatorzweig (Versuch 23 der Serie) und stellt im Anschluß daran die Frage, was an Wechselspannung zu erwarten ist.

Oder, wenn man es spannender machen will, bildet man



zuerst eine Serienschaltung von zwei gleichen Widerständen und wiederholt die Kirchhoffschen Gesetze: Die Summe der Teilspannungen ergibt die Gesamtspannung (6,3 V). Dann werden eine Spule mit 1200 Windungen und ein Kondensator von 10 Mikrofarad in Serie geschaltet und auf Resonanz gestellt.

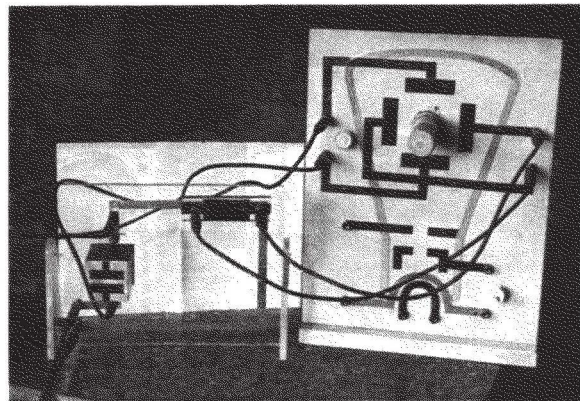
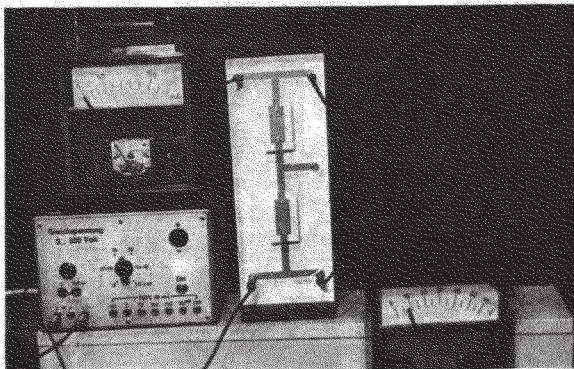
Die Teilspannungen betragen nun etwa 25 Volt! Wird eines der beiden Schaltelemente kurzgeschlossen, dann sinkt die Stromstärke, während doch das Gegenteil zu erwarten wäre! Wie kommt diese paradoxe Erscheinung zustande?

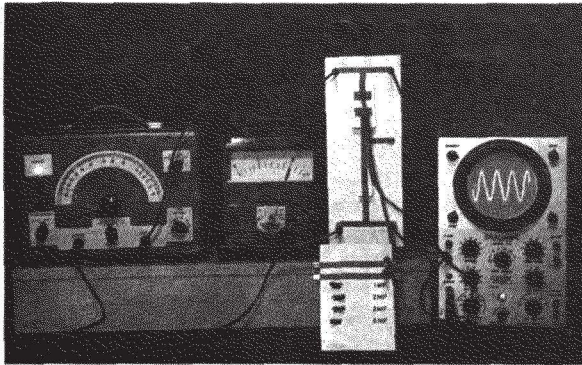
Die mathematische Ableitung (Lehrbuch von Dr. Schreiner, S. 212—215) bringt uns die Erkenntnis über die Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung und die Formeln für die Wechselstromwiderstände von Spule und Kondensator.

Der Nachweis der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke erfolgt mit Hilfe eines Kleinkatodenstrahloszillographen (siehe Wissenschaftliche Nachrichten, Heft 5 vom April 1964. Versuchsdaten werden mit dem Kleinoszillographen mitgeliefert). Außerdem kann man sehr anschaulich nachweisen, daß man auf dem Bildschirm die Stromstärke auch durch den Spannungsabfall, den sie in einem Ohmschen Widerstand (der aber klein genug sein muß, um den Kreis nicht zu stören!) erzeugt, darstellen kann. Diese Tatsache, von der wir in der weiteren Arbeit immer wieder Gebrauch machen werden, muß man einmal wirklich überzeugend darstellen.

Die Frequenzabhängigkeit des Wechselstromwiderstandes kann qualitativ bestätigt werden:

- a) mit Hilfe des Drehwiderstandes der Fa. Universitas
- b) mit Hilfe rotierender Umschalter
- c) sehr einfach und anschaulich nach Versuch 29 der Serie.





In der Oberstufe sollte man eine quantitative Bestätigung mit Hilfe des Tonfrequenzgenerators durchführen:

Kondensator 4 Mikrofarad, Meßgerät 10 mA, Frequenz 1000 Hz. Die Spannung wird so geregelt, daß die Stromstärke 10 mA beträgt. An den Kondensator wird der Y-Verstärker des Oszillographen angeschlossen, Verstärkung und Kippung werden so geregelt, daß die Bildhöhe zum Beispiel 6 cm beträgt und 4 Perioden erscheinen. Parallel zum Y-Eingang kann man außerdem einen NF-Verstärker anschalten, wodurch die Frequenz auch akustisch beobachtet werden kann. Dann wird die Frequenz auf 500 und 250 Hz geändert und die vom TFG abgegebene Spannung so geändert, daß die Bildhöhe des Oszillogramms unverändert 6 cm beträgt. Es zeigt sich, daß die Stromstärke nun 5 und 2,5 mA beträgt, also der Widerstand zweimal und viermal so groß wurde.

Die so aufgebaute Schaltung ermöglicht die gleichzeitige Beobachtung von Stromstärke, Spannung und (visuell und akustisch) Frequenz.

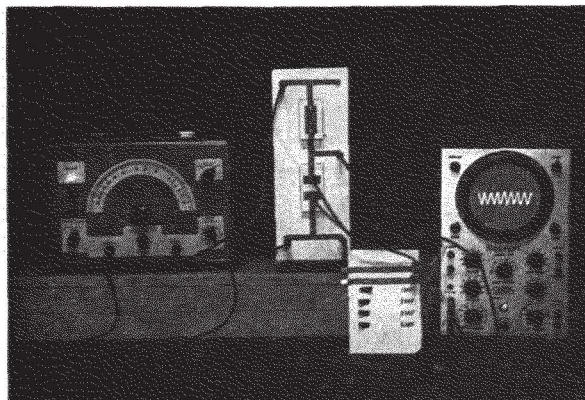
Durch Messung der NF-Spannung kann man mit Hilfe der Formel  $R = \frac{1}{\omega C}$  die Stromstärke vorausberechnen und im Experiment bestätigen.

Hat man im Unterricht einige Minuten Zeit, kann man sehr rasch noch die Wirkung von Hoch- und Tiefpässen in der Elektroakustik demonstrieren. Wir sehen im Bild eine Serienschaltung aus einem 1 kOhm-Widerstand und einem Kondensator 1 Mikrofarad.

Schließt man als Vorversuch den Y-Eingang des Oszillographen an die Endpunkte der Serienschaltung und ändert die Frequenz, dann erkennt man, daß die Spannung (Bildhöhe des Oszillogramms) konstant bleibt. Schließt man Y nun an den Kondensator an (siehe Bild), dann erkennt man bei Frequenzerhöhung immer kleinere Ausgangsspannung. Es liegt also ein Tiefpaß vor.

Ersetzt man den Kondensator durch eine Spule mit 600 Windungen auf Kern, dann wird bei Frequenzerhöhung die Ausgangsspannung größer (Hochpaß).

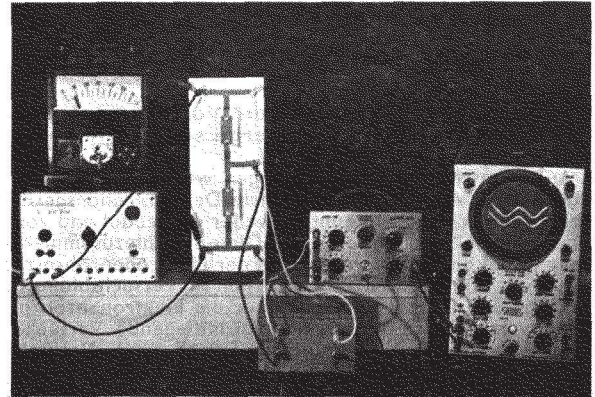
Im Zeitalter der Tonblenden und Tieftonlautsprecher haben diese Grundversuche große praktische Bedeutung. Durch den rationalen Aufbau verursachen sie gar keinen Zeitverlust.



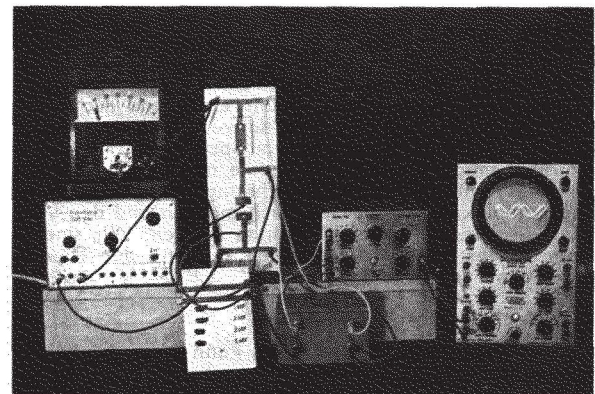
### Serienschwingkreis

Das Zeigerdiagramm ermöglicht uns die Berechnung des Serienkreises. (Schreiner S. 216—220). Die experimentelle Bestätigung wird durch die folgenden Bilder illustriert:

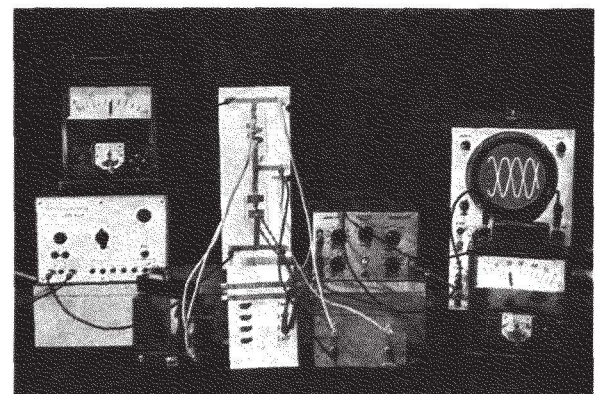
1. Je 1000 Ohm an 6,3 V. Die Teilspannungen werden an den elektronischen Umschalter geführt. Die beiden Teilspannungen können zur Deckung gebracht werden, sie sind also gleich groß und in Phase.



2. Einer der beiden Widerstände wird durch einen Kondensator 3 Mikrofarad ersetzt. Wir erkennen die Phasenverschiebung um 90 Grad, und zwar erkennt man durch mehrmaliges Ab- und Anschalten einer Teilspannung, daß die Teilspannung am Kondensator um 90 Grad hinter der Teilspannung am Widerstand nach-eilt. Analog zeigt man das Voreilen der Teilspannung an einer Spule (1200 Windungen auf geschlossenem Kern).

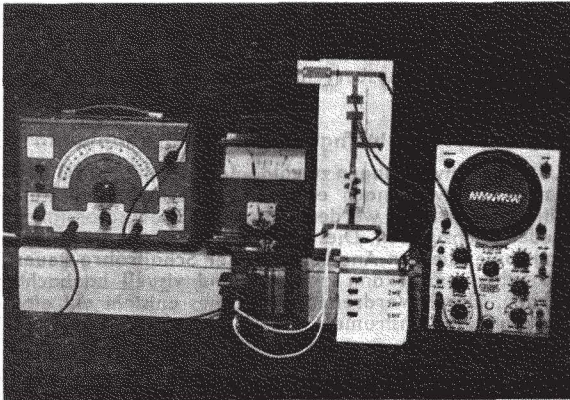
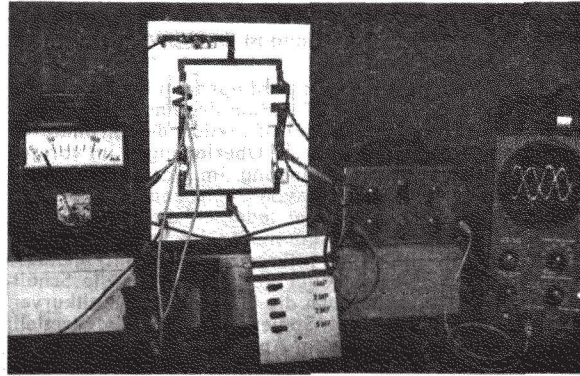


3. Ohne die eingestellte Verstärkung zu ändern, schalten wir nun 10 Mikrofarad und 1200 Windungen auf geschlossenem Kern in Serie und drehen das Joch auf



Resonanz. Das Schirmbild zeigt uns die nun viermal so großen Teilspannungen (auch durch 50-V-Meßgerät nachzuweisen!), ihren Phasenwinkel von 180 Grad und mit einem Meßgerät 100 mA erkennen wir das Stromstärkemaximum bei Resonanzeinstellung. Durch Kurzschließen zum Beispiel der Spule erkennt man zugleich Zusammenbruch der hohen Teilspannungen, Verringerung der Stromstärke und damit Erhöhung des Gesamtwiderstandes.

4. Liegt hier wirklich eine Resonanzerscheinung vor, das heißt also, gehört zu jedem Wertepaar von L und C eine bestimmte Frequenz, bei der der Wechselstromwiderstand ein Minimum ist? Die nachfolgend abgebildete Schaltung ermöglicht einfach und übersichtlich die Aufnahme des Diagramms auf Seite 219 im Lehrbuch von Dr. Schreiner. Der Vorwiderstand von 1000 Ohm sichert eine konstante Ausgangsspannung des TFG (in Vorversuch beweisen!). C=1 Mikروفarad,

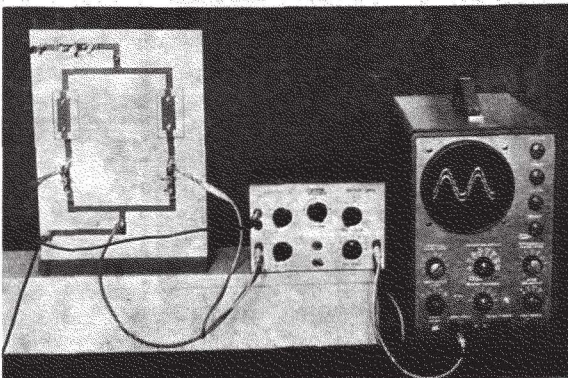


L gebildet durch Uni-Spule mit 600 Wdg. auf Kern. Die Resonanzfrequenz liegt zwischen 400 und 500 Hz. Das Meßgerät zeigt die maximale Stromstärke, die Bildhöhe des Oszillogramms die minimale Schwingkreisspannung.

#### Parallelschwingkreis

Nach den Erfahrungen, die die Schüler durch die Berechnung des Serienkreises gewonnen haben, sind sie selbst in der Lage, das Zeigerdiagramm und die daraus abgeleiteten Gesetze für den Parallelkreis aufzustellen (Schreiner, S. 220—222). Die Folgerungen sind für sie jedoch zunächst unglaublich! Da sollen in den Zweigen Ströme fließen, während in der Zuleitung kein Strom fließen soll! Wie ist das möglich?

Der Versuch bestätigt das Ergebnis der Ableitung. Das Stromstärkeminimum wird mit Hilfe des Meßgerätes und des Lämpchens in der Zuleitung gezeigt, die Phasenverschiebung um fast 180 Grad dadurch, daß der Spannungsabfall an den beiden Glühlämpchen zum elektronischen Umschalter geführt wird und dadurch beide Stromdiagramme zugleich auf dem Bildschirm erscheinen (Gegenversuch mit zwei Widerständen von je 1000 Ohm). Auch



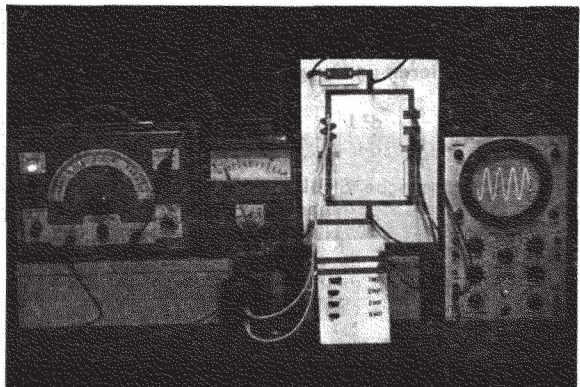
das Maximum an Gesamtwiderstand ist leicht nachzuweisen (Versuch 31 der Serie).

Anschließend erfolgt die bekannte Erklärung des Experiments, die folgende Punkte enthalten muß:

1. Die Ladung schwingt zwischen den Kondensatorplatten hin und her, wobei die Selbstinduktion der Spule bewirkt, daß die Platten immer wieder aufgeladen werden.
2. Die Schwingung bleibt ungedämpft, weil die angelegte Wechselspannung genau im richtigen Takt die Energieverluste ergänzt. Die Eigenfrequenz der Schwingung stimmt im Resonanzfall mit der Frequenz der angelegten Wechselspannung überein. Darum hat die notwendige Energiezufuhr auch ihren kleinsten Wert (Vergleich mit Pendelschwingung).
3. Die Formel zwischen  $f$ , L und C, die aus dem Zeigerdiagramm für den Resonanzfall abgeleitet wurde, gilt dann auch oder sogar eigentlich für die Eigenfrequenz des Schwingkreises. Bei Resonanz zwischen Eigenfrequenz und „Erregerfrequenz“ kommt es also zu den beobachteten Extrembedingungen.

#### Analogie zur Mechanik

Analog den mechanischen und akustischen Resonanzversuchen gibt es eine bestimmte Erregerfrequenz, die die stärkste Eigenschwingung der Ladung hervorruft. Dies zeigen wir mit Hilfe des TFG. Die Werte sind genau gleich den beim Versuch zur Serienresonanz angegebenen. Das Meßgerät zeigt den minimalen Zuleitungsstrom, der Bildschirm die maximale Schwingkreisspannung („der Widerstand ist ein Maximum“).



Ein Spannung-Frequenz-Diagramm zeigt die Resonanzkurve; will man die Zeit für seine Aufnahme nicht aufwenden, genügt das Durchdrehen des Frequenzreglers. Parallelschalten eines NF-Verstärkers ermöglicht die akustische Wahrnehmung der Frequenz.

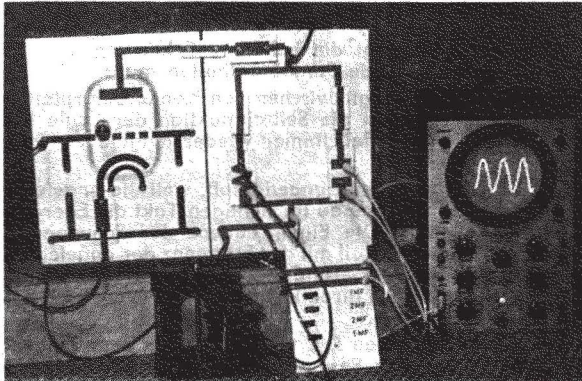
Schaltet man 4 statt 1 Mikروفarad ein, sinkt die Resonanzfrequenz auf die Hälfte. Dies zeigt man visuell durch die halbe Anzahl von Perioden pro Kippung auf dem Bildschirm und akustisch durch Erklängen der tieferen Oktav.

Eine direkte Bestätigung der Thomson-Formel erfolgt im Versuch 16.

### Anstoß durch Gleichspannung

Der folgende Gedankengang ist für das Verständnis der Rückkopplung sehr wichtig:

Die Ableitung aus dem Zeigerdiagramm könnte zu dem Schluß verleiten, die Sinus-Funktion der angelegten Spannung bewirke eben eine Sinus-Funktion der Stromstärke im Parallelkreis. Nach unseren Überlegungen im vorigen Kapitel ist aber die Schwingung im Parallelkreis eine Folge der Parallelschaltung von Spule und Kondensator, die angelegte Spannung hat lediglich die Aufgabe, die Verluste auszugleichen. Dann müßte der Vorgang bei Anlegen von Gleichspannung (im richtigen Takt!) genauso verlaufen! Als 50-Hz-Schalter verwenden wir die Schalt-röhre, mit deren Hilfe auch die Ein- und Ausschaltkurven von Kondensatoren und Spulen sehr schön dargestellt werden können (Heft 5 vom April 1964 und Versuche 14 und 15 der Serie).



Die Sinus-Funktion der Stromstärke rührt also vom Schwingkreis selbst her. Und nun ist der Zeitpunkt gekommen, die mathematische Ableitung des Schwingungsvorganges zu bringen.

Wenn ein Kondensator geladen ist, die Spannung abgeschaltet wird, kein Verlustwiderstand im Kreis ist und der Kondensator sich über eine Spule entladen kann, dann entsteht aus dem verallgemeinerten Ohmschen Gesetz

$$U - L \frac{dJ}{dt} - \frac{Q}{C} - RJ = 0$$

in diesem Fall

$$-L \frac{dJ}{dt} - \frac{Q}{C} = 0$$

nach Differenzieren und wegen  $\frac{dQ}{dt} = J$

$$\frac{d^2 J}{dt^2} = -\frac{1}{LC} J$$

Die mathematische Struktur dieses elektrischen Vorganges entspricht der einer mechanischen Schwingung:

$$K = -ky$$

$$\frac{m d^2 y}{dt^2} = -ky$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{k}{m} \cdot y$$

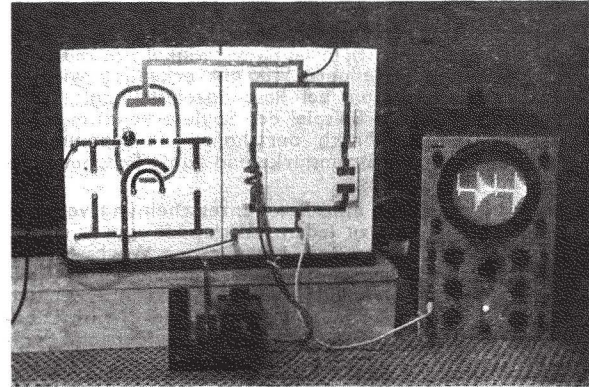
Lösung ist in beiden Fällen die Sinus-Funktion  $y = A \sin \omega t$

$$\text{mit } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ und } \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

### Gedämpfte Schwingung

Was wird geschehen, wenn wir weiterhin 50mal pro Sekunde Gleichspannung einschalten, aber durch Verkleinerung der Kapazität auf den 80. Teil die Eigenfrequenz erhöhen?

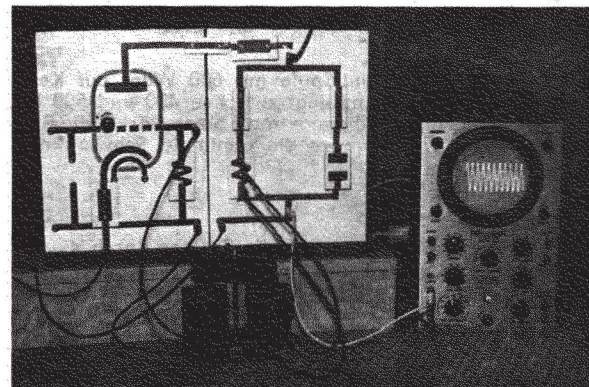
Dann müssen zwischen den 50 Anstößen pro Sekunde immer wieder gedämpfte Schwingungen entstehen.



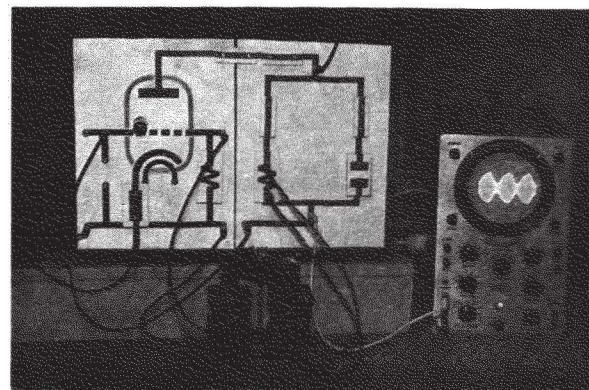
Mit Hilfe der Schaltröhre und einer Spezialspule, deren Induktivität man berechnen kann, gelingt eine direkte Bestätigung der Schwingungsformel von Thomson. Man kann die Frequenz vorausberechnen und auf dem Bildschirm bestätigen.

### Ungedämpfte Schwingung durch Rückkopplung

Um die Schwingungen zu entdämpfen, müßte die Gleichspannung jeweils nach einer vollen Schwingung kurzzeitig eingeschaltet werden, um den Kondensator immer wieder nachzuladen. Dies geschieht durch die Rückkopplungsspule, die den Anodenstrom der Schaltröhre steuert. Die Schwingung kann akustisch und visuell beobachtet werden. Durch Verdrehen des Joches entsteht ein elektronisches Musikinstrument.



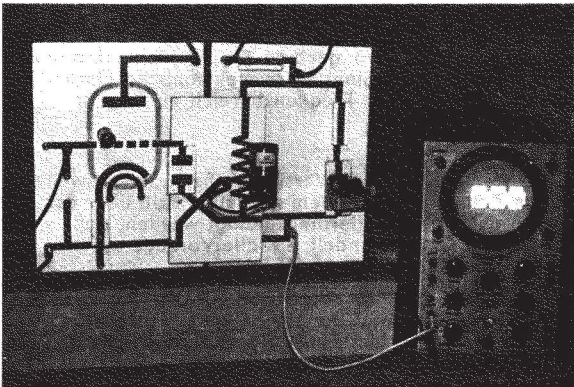
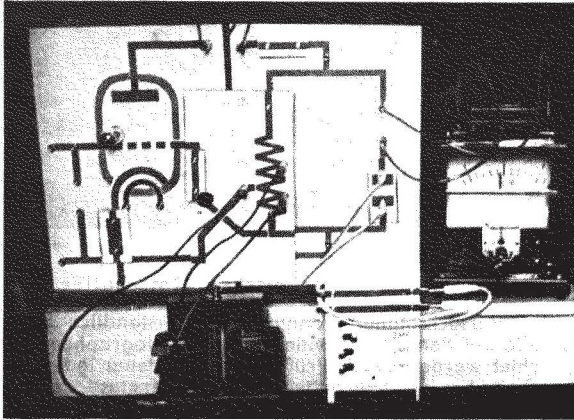
Durch Verändern der Werte von L und C erhält man Schwingungen von etwa 1 Hz bis 1,5 MHz. Verschiedene Möglichkeiten der Modulation werden in den Versuchsblättern geschildert. Das Bild zeigt einen Modellversuch zur Amplitudenmodulation, bei dem eine niederfrequente Schwingung (im Tonbereich) durch eine 50-Hz-Wechselspannung moduliert wird.





### Dreipunktschaltung

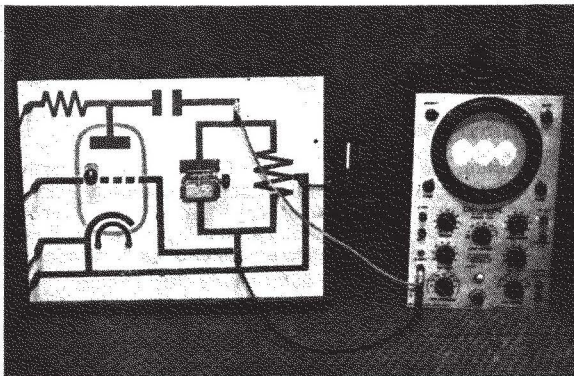
Durch Aufstecken eines Schaltbrettes erhält man eine übersichtliche Dreipunktschaltung für einen Frequenzbereich von 1 Hz bis 100 MHz. Die Bilder zeigen eine Schaltung für langsame Schwingungen, die mit Hilfe des Drehspulgerätes gezeigt werden können, und einen Mittelwellensender, bei dem die Hochfrequenz durch 50 Hz moduliert und durch einen Transistorempfänger im Raum empfangen werden kann.



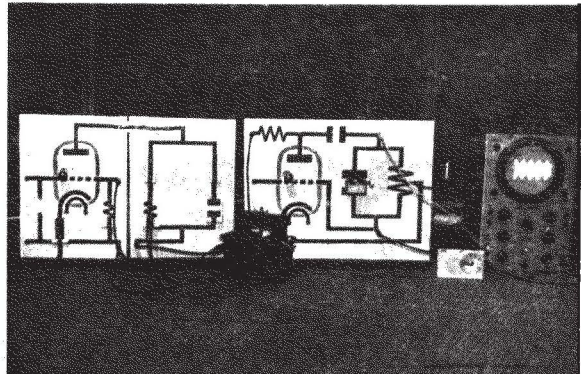
An dieser Stelle wird später eine Versuchsserie über die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen, Lecher-Drähte usw. angeschlossen. Diese Fortsetzung wird anlässlich der Fortbildungswoche 1966 vorgeführt werden.

### Modulation und Demodulation

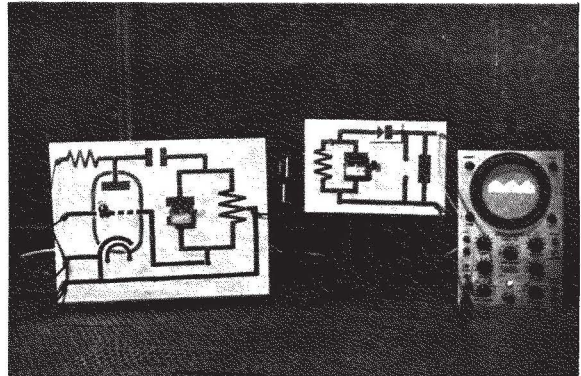
In einer Versuchsreihe wird die Gittermodulation ausführlich untersucht, wobei sich interessante Einblicke in den Verstärkungsvorgang, die Wirkung einer elektrischen Weiche und Probleme der Überlagerung von Schwingungen ergeben.



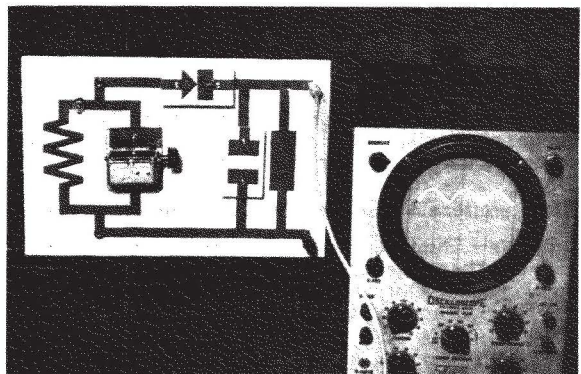
Das folgende Bild zeigt einen der schönsten Versuche der Serie. Die von einem Schwingkreis erzeugte Hochfrequenz wird durch die von einem zweiten Schwingkreis erzeugte Niederfrequenz moduliert, wobei durch Verdrehen des Joches musiziert werden kann. Der Empfang erfolgt durch einen Transistorempfänger, gleichzeitig kann das Oszillogramm beobachtet werden.



Anschließend wird gezeigt, wie die modulierte Hochfrequenz im Empfänger demoduliert wird. Das Bild zeigt die durch den Gleichrichter „halbierte“ Hochfrequenz.



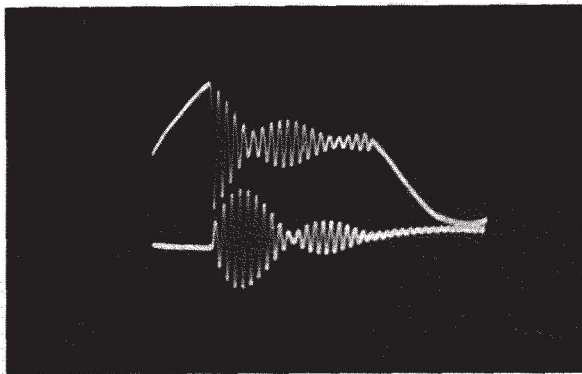
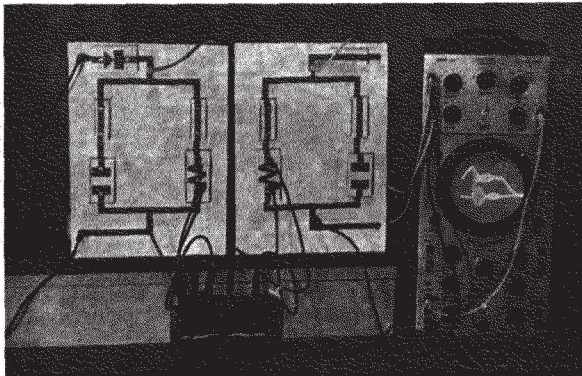
Der dabei verwendete Empfängerkreis kann auch für den Empfang des Ortssenders und für die Demonstration seines Oszillogrammes verwendet werden. Das folgende Bild zeigt die durch Demodulation wieder von der Trägerwelle „abgeladene“ Niederfrequenz.



Mit diesen einfach und schnell durchzuführenden Versuchen kann das allgemein interessante Kapitel „Rundfunk“ anschaulich und ohne Zeitverlust demonstriert werden. Später werden an dieser Stelle Grundversuche zur Frequenzmodulation angefügt werden.

## Resonanz und Kopplung von Schwingkreisen

Für die Oberstufe ist dieser Abschnitt von prinzipieller Bedeutung. In der Mechanik und Akustik wird gezeigt, daß ein gleichgestimmtes schwingungsfähiges Gebilde zum Mitschwingen angeregt werden kann. Das zeigen wir nun auch für zwei elektrische Schwingkreise und erhalten Versuchsergebnisse, die für die Praxis wichtig sind. Bei dem Versuch mit dem Doppelpendel erkennen wir, daß zwischen den beiden Pendeln eine wechselseitige Energieübertragung erfolgt, wobei die Schnelligkeit der Übertragung durch die Stärke der Kopplung verändert werden kann. Kommt es zu dieser Energieübertragung auch bei anderen Resonanzerscheinungen?



Wenn wir nun den Schülern dieselbe Gesetzmäßigkeit auch bei elektrischen Schwingkreisen zeigen, dann erzielen wir vielleicht Verständnis für das eigentliche Wesen der Physik: „Struktur“ nennt Prof. March an vielen Stellen seines Buches das mathematische Gerippe, das schließlich Inhalt unserer Arbeit ist.

Warum zeigen so viele Erscheinungen aus ganz verschiedenen Gebieten der Physik gemeinsame Züge? Weil sie die gleiche mathematische Struktur besitzen! Diese Gedankengänge tragen ihre Früchte bei der Erarbeitung der modernen Physik, in der wir oft nur mehr die Struktur erkennen und nicht mehr das Gebilde selbst.

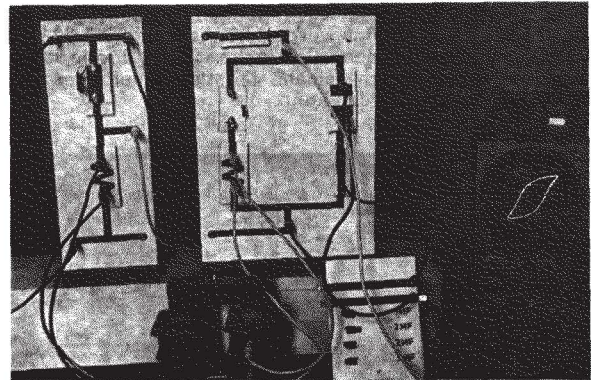
### Viele weitere Versuche können ausgeführt werden

Die Versuchsblätter beschreiben natürlich nur Versuche, die zum Thema gehören, also elektrische Schwingungen und Rundfunk. Darüber hinaus gestatten die Schaltbretter und Schaltteile viele Versuche, die nicht zu diesem Thema gehören.

Zum Beispiel sind das Parallelschaltungsbrett und das Anodenkreisbrett von Anfang an für die Verzweigungsgesetze von großem Vorteil, weil die Schaltung übersichtlich wird (Vertikalaufbau).

Als Beispiel sehen wir die Aufzeichnung der Hysteresis-Schleife. Viele Kollegen werden die bei Leybold beschriebene Schaltung in Erinnerung haben. Um wieviel übersichtlicher wird hier die Schaltung! Vom Widerstand im

oberen Teil des links stehenden Anodenkreisbrettes bekommen wir die H-Achse, vom Kondensator rechts im Parallelschaltungsbrett die B-Achse.



### Oszillograph und elektronischer Umschalter

Die Versuchsblätter konnten selbstverständlich nicht für alle auf dem Markt befindlichen Oszillographen eingerichtet werden. Nach Prüfung verschiedener Industrieangebote hat die Lehrmittelfirma „Universitas“ das für den Unterricht an Preiswürdigkeit und Leistung beste Gerät ausgewählt und in ihr Lieferprogramm aufgenommen. Diese Geräte sind bei Neuvanschaffungen unbedingt zu empfehlen. Es hat keinen Sinn, Oszillographen um 15.000 Schilling zu kaufen, wenn diese keinen Gleichspannungseingang und zu geringe Empfindlichkeit besitzen. Es hat auch keinen Sinn, teure elektronische Umschalter zu kaufen, wenn ihr Frequenzbereich zu eng ist.

### Zuwenig Zeit?

Die Aufnahme neuer Versuchsreihen macht zweifellos unsere Zeitnot ärger. In dem speziellen Fall, über den wir hier sprechen, muß allerdings gesagt werden, daß es sich hier um ein Gebiet handelt, das alle Vorzüge aufweist, die man überhaupt erwarten kann:

1. Es handelt sich um ein Gebiet, das in der hier vorgeschlagenen Darstellung eine tiefe Verflechtung von mathematischer Untersuchung und physikalischen Gedankengängen aufweist.
2. Jedes Teilergebnis der Theorie kann experimentell bestätigt werden.
3. Die behandelten Probleme sind praktisch sehr wichtig, was für unsere Arbeit in der Oberstufe zwar kein Kriterium, aber doch Ansporn sein sollte!
4. Das spontane Interesse der Jugend wirkt sich auf den Unterrichtsertrag günstig aus.

Die Gestaltung der Geräte in farbig gedruckter Schaltung gestattet übersichtliches Experimentieren mit dem Schaltplan. Schaltungsfehler sind fast ausgeschlossen, was sowohl den Geräten als auch dem Ruf des Lehrers förderlich ist.

Schließlich ist es nicht unsere Aufgabe, die Schüler mit totem Fachwissen vollzustopfen, sondern die Bedeutung der Physik als Teil menschlicher Geistesarbeit aufzuzeigen. Und einer nach dieser Richtlinie vorgenommenen Lichtung des Stoffes wird das Kapitel über elektrische Schwingungen sicher nicht zum Opfer fallen!

### Zusammenfassung

Vor allem die Kollegen aus den Bundesländern werden herzlich eingeladen, sich in dem oben erwähnten Vortrag über die Demonstrationsmöglichkeiten, die die Gerätezusammenstellung „Von der Elektronenröhre zu Rundfunk und Fernsehen“ bietet, eingehend zu informieren.

Dieser Aufsatz sollte erläutern, wie das Thema „Elektrische Schwingungen“ in der Oberstufe ausgeführt werden kann, weil diese Frage in den Versuchsblättern zu wenig behandelt wird und manche der hier angegebenen Versuche nicht enthalten sind.

