

Informationsblätter zur Fortbildung
von Lehrern an Höheren Schulen

Wissenschaftliche Nachrichten



Gewidmet von der
ZENTRALSARKASSE
DER GEMEINDE WIEN

Nr. 5 - April 1964



Inhalt:

MATHEMATIK, PHYSIK

Zahlen

Das geologische Alter abflußloser Salzseen
Weitere Anwendungen des Mössbauereffektes
Die Entdeckung des Antiprotons
Die Identifizierung von Resonanzen
Das Feldionenmikroskop
Magnetische Plasmakäfige
Berechnung von π auf 100000 Dezimalen
Hyperfragmente
Weltraumobservatorien
Neubestimmung der Venusmasse
Neues vom optischen Maser (= Laser)
Höchstfrequenter Ultraschall
Bericht über Beschleunigungsmaschinen
Dünnste Drähte

Anti-Xi-Null gefunden

Experimentelle Unterscheidung von Neutrinos und
Antineutrinos

CHEMIE

Kernmagnetische Resonanzspektroskopie
Stoffzustände im Bereich hoher Drucke und Temperaturen
(Diamantsynthesen)
Entfernung von Schwefelwasserstoff nach dem Sireford-
Verfahren
Neue Synthesen von Terephthalsäure
Die Verwendung der Seltenen Erden
Die Herstellung von H_2O_2 nach neuen Verfahren
Psychotrope Pharmaka

EXPERIMENTALPHYSIK

Neue österreichische Lehrmittel für den Physik-Unterricht

MATHEMATIK, PHYSIK

Dr. Walter Kranzer

Zahlen

Gegenstand der mathematischen Naturwissenschaften sind die Eigenschaften der Dinge, welche sich auf Zahlen oder räumliche Strukturen abbilden lassen. Die Vielgestaltigkeit der Wirklichkeit gestattet aber nicht immer eine adäquate Beschreibung mit Hilfe der Symbole und Relationen, die unter den Begriff der reellen Zahlen fallen. Aus diesem Grunde wurden auch Erweiterungen des Zahlbereichs in den Naturwissenschaften — besonders in der Physik — verwendet, die bis dahin nur in den mehr oder weniger abstrakten Theorien der Mathematiker eine Rolle spielten. Ihr Eindringen in den Alltag des Physikers und Technikers wurde mit einem gewissen Unbehagen zur Kenntnis genommen, zu dem falsche Auffassungen suggerierende Bezeichnungen nicht wenig beitragen. Imaginäre Zahlen sind ebensowenig „unwirklich“ wie negative Zahlen, wenn man nicht am Anzahlbegriff haften bleibt, sondern in ihnen das Bild andersartiger Beziehungsmengen erkennt.

Was ist also eine Zahl? Das läßt sich wohl ebensowenig definieren wie die räumlichen Grundgebilde Punkt, Gerade, Ebene. Für den größten Teil der in Verwendung stehenden Zahlenarten dürfte aber die nachstehende Charakterisierung zutreffen.

Ein Zahlensystem ist eine Symbolmenge, welche

- a) Symbole natürlicher Zahlen umfaßt;
- b) in der es zwei mit + und \cdot wiedergegebene Verknüpfungsvorschriften gibt, welche
- c) bestimmten Rechenregeln (z. B. assoziatives, distributives Gesetz) genügen,
- d) die eine Teilmenge — den „Kern“ — enthält, der mit einer echten oder unechten Teilmenge der reellen Zahlen isomorph ist.

Zu einem Zahlensystem gehören Modelle, in denen das abstrakte Strukturschema des Systems verwirklicht ist. Die Aufweisung eines Modells für eine zahlenartige Symbolkonstruktion ist daher ein direkter Beweis für die Widerspruchsfreiheit derselben.

Wenn das Zahlensystem s einer Teilmenge S_0 des Systems S isomorph ist, möge S_0 der s -Kern von S heißen. Es liegt auf der Hand, daß kein Modell von s eine Interpretation der außerhalb S_0 liegenden Elemente von S gestattet. (Eine entfernte Analogie weist die Definition der Winkel-funktionen am rechtwinkligen Dreieck und am Einheitskreis auf.) Im Rahmen der s -Modelle sind also gewisse Zahlen von S sinnlos. Eine hervorragende Aufgabe der mathematischen Erziehung besteht darin, eine klare Einsicht in diesen Sachverhalt zu vermitteln und den Lernenden aus dem Kerker spezieller Modellvorstellungen

zu befreien. Erst wenn das erreicht ist, kann seine Skepsis gegen bestimmte Erweiterungen des Zahlbereichs — man denke etwa an die komplexen Zahlen — als überwunden gelten.

Nach diesen allgemeinen Bemerkungen wollen wir uns konkreten Zahlensystemen zuwenden.

1. Die natürlichen Zahlen. Ihr Modell ist das älteste Modell überhaupt, das sie als Mächtigkeiten (= Anzahlen) endlicher Mengen deutet. Der Addition entspricht die Vereinigung von Mengen, der Multiplikation die Bildung aller möglichen Elementpaare von je einem Element jeder Menge.

Seien $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ und $B = \{b_1, b_2, \dots, b_q\}$ zwei elementfremde Mengen der Mächtigkeit $m_A = p$, $m_B = q$. Dann hat die Vereinigungsmenge

$$V = \{a_1, a_2, \dots, a_p, b_1, b_2, \dots, b_q\}$$

und die Menge der Paare

$$P = \left\{ \begin{array}{l} (a_1, b_1), (a_1, b_2), \dots, (a_1, b_q), \\ (a_2, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_2, b_q), \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ (a_p, b_1), (a_p, b_2), \dots, (a_p, b_q) \end{array} \right\}$$

bzw. die Mächtigkeit $m_V = p + q$, $m_P = p \cdot q$.

2. Die ganzen Zahlen. Negative Zahlen sind im Anzahlenmodell sinnlos. Faßt man sie jedoch als Schiebungen der Zahlengeraden um eine oder mehrere Einheitsstrecken e nach links auf, während zu positiven Zahlen Schiebungen nach rechts gehören, so erhält man das einfache, anschauliche Schiebungsmodell. Der Addition entspricht die Zusammensetzung von Schiebungen. Die Deutung der Multiplikation wäre zwar möglich, aber hierfür wird sich später eine bessere Gelegenheit bieten. Der natürliche Kern sind die Schiebungen um $e, 2e, \dots$ nach rechts.

3. Die rationalen Zahlen. Der logisch korrekten Darstellung durch geordnete Zahlenpaare ziehen wir, um die Kontinuität der Modelle zu wahren, das Schiebungsmodell vor, in dem nicht nur Schiebungen um e , sondern auch um kleinere Strecken zugelassen sind. Ein näheres Eingehen darauf ist wohl in diesem Zusammenhang überflüssig. Über die Addition gilt dasselbe wie in 2., die Multiplikation deuten wir später. Der ganzzahlige Kern der rationalen Schiebungen sind die Schiebungen um $0, \pm 1, \pm 2, \dots$.

4. Die reellen Zahlen. Die Einführung der irrationalen Zahlen als Grenzwerte von rationalen Folgen, als innerste Punkte von rationalwertigen Intervallschachtelungen oder als Dedekindsche Schnitte steht hier nicht zur Debatte. Wieder existiert ein additives Schiebungsmodell. Deshalb wenden wir uns sofort der Multiplikation zu.

Die Multiplikation mit positiven Zahlen wirkt wie eine reine Streckung der Zahlengerade g . Die Multiplikation mit negativen Zahlen bedeutet hingegen eine Streckung mit nachfolgender Umklappung um 0 (=Drehung um 180°). Multiplikationen repräsentieren also Drehstreckungen, und zwar um 0° oder 180° , je nach dem Vorzeichen des Faktors.

In diesem Modell der reellen Zahlen besitzt ein Zahlensymbol a drei Interpretationen: 1. a markiert einen Punkt von g ; 2. a ist die Schiebung, welche 0 in den Punkt a überführt; 3. a ist die Drehstreckung, die den Einheitspunkt 1 nach a bringt. Die Operationszeichen $+$ und \cdot ersetzen die nähere Angabe, in welchem Sinne gerade das nachfolgende Zahlensymbol zu verstehen ist. Ohne Künstelei liefert das Modell die Vorzeichenregeln für die Multiplikation, unter denen besonders die letzte $(-)\cdot(-) = +$ im Unterricht didaktische Schwierigkeiten bereitet.

Die komplexen Zahlen. Das arithmetische Modell, in dem die komplexen Zahlen als Zahlenpaare dargestellt werden, setzt — ähnlich wie bei den rationalen Zahlen — ein hohes Maß logischer Reife voraus, das Jugendlichen mit ganz wenigen Ausnahmen nicht zugemutet werden kann. Glücklicherweise ist das Drehstreckungsmodell in voller Allgemeinheit auf die komplexen Zahlen übertragbar.

Die Zahl $z = a + bi$ bedeutet: 1. den Punkt P mit den Koordinaten $x = a, y = b$ in der x - y -Ebene; 2. die Schiebung von 0 nach P ; 3. die Drehstreckung, die $E(1,0)$ in $P(a, b)$ überführt. Das Streckungsverhältnis ist $\sqrt{a^2 + b^2}$, der Drehwinkel $\varphi = \text{arctg } \frac{b}{a}$. Danach steht das Symbol

$i = 0 + 1 \cdot i$ für eine reine Drehung um 90° . $i \cdot i$ führt somit den Punkt $F(0,1)$, der zum Symbol i gehört, in den Punkt $G(-1,0)$ über, der das Symbol -1 trägt. Also gilt $i \cdot i = -1$ und die leidige Einführung der Quadratwurzel aus -1 ergibt sich zwanglos a posteriori, statt sie in einer den Schüler überrumpelnden Art a priori den Erklärungen voranzustellen. Der reelle Kern des komplexen Systems sind die unter 3. angeführten speziellen Drehstreckungen um 0° bzw. 180° .

Die nahezu ausschließliche Verwendung komplexer Zahlen in der Wechselstromtechnik zeigt, daß auch in der physikalischen Wirklichkeit Relationsschemata existieren, die mit dem komplexen System strukturgleich sind und daher am zweckmäßigsten durch dieses beschrieben werden. Der durch $I = I_0 \cdot e^{i\omega t}$ charakterisierte Wechselstrom ist nicht „imaginär“. Der Ausdruck für I ist vielmehr ein arithmetisches Bild, aus dem unmittelbar die (reelle) Stromstärke und die Phase ablesbar sind.

Auch das ebene elektrische Feld oder die ebene Potentialströmung werden am besten durch analytische Funktionen einer komplexen Variablen erfaßt. Als Wurzel der strukturellen Übereinstimmung ist die Laplacesche Differentialgleichung anzusehen, die vom Potential, der Stromfunktion, dem Real- und dem Imaginärteil analytischer Funktionen erfüllt wird. Die Sätze der Funktionentheorie lassen sich durch bloße „Übersetzung“ des Begriffsvokabulars in die Sprache der Potentialtheorie oder der Strömungslehre übertragen. Der Verzicht auf den komplexen Kalkül wäre katastrophal, denn neben dem Verlust der einheitlichen Darstellung müßte auch eine untragbare Komplizierung des Formelapparates in Kauf genommen werden.

6. Die hyperkomplexen Zahlen. Obwohl die Adjunktion der irrationalen Zahlen zum rationalen Bereich umfangreiche und vielseitige Untersuchungen erforderte, die sich um den der frühen Mathematik fremden Grenz-begriff gruppierten, gingen die damit verbundenen Umwälzungen an der Laienwelt ziemlich eindrucksvoll vorüber. Offenbar verdeckte ihr die davon unberührte Schreibweise in Dezimalbrüchen die Bedeutung des Irrationalen. Dafür zeugt auch die Schwierigkeit, dem Nichtmathematiker eine echte Einsicht in die grundsätzliche Verschiedenartigkeit rationaler und irrationaler Zahlen zu verschaffen.

Ganz anders bei den komplexen Zahlen! Hier stößt sich das Verständnis an der $\sqrt{-1}$, die sozusagen aus heiterem Himmel als neues Symbol i in die rechnerische Praxis einbricht. Daher sind bis zum heutigen Tag fast allen Abiturienten die komplexen Zahlen ein spanisches Dorf, ein bloßer Trick, mit welchem dem „gesunden Menschenverstand“ ein Bein gestellt wird. Aber man kann den Trick gelassen hinnehmen, weil er — wie allgemein geglaubt wird — in einem Bezirk geübt wird, der mit der Wirklichkeit kaum mehr zusammenhängt. Die komplexen Zahlen werden also im Gegensatz zu den (begrifflich viel schwierigeren) irrationalen Zahlen als etwas sehr Fremdartiges und deshalb Neues empfunden.

Nachdem sich die Erweiterung des reellen zum komplexen Zahlkörper vielseitig bewährt hatte, wurde die tieferliegende Frage nach anderen Erweiterungsmöglichkeiten aktuell. Wie in der Geometrie traten auch in der Arithmetik axiomatische Probleme in den Vordergrund. Die diesbezüglichen Untersuchungen bewegten sich auf unterschiedlichen Pfaden. Einer führte zu den hyperkomplexen Zahlen, mit deren abstrakter Definition wir nun beginnen wollen.

Unter einem hyperkomplexen System (=einer Algebra) $\Gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_r)$ vom Rang r über dem Zahlkörper A versteht man die Gesamtheit der Ausdrücke

$$c = a_1 \gamma_1 + a_2 \gamma_2 + \dots + a_r \gamma_r,$$

in denen die Koeffizienten $a_k \in A$ angehören und die γ_k Basiselemente heißen. Von den letzteren wird lediglich verlangt, daß sie über A linear unabhängig sind und eine assoziative Multiplikationstabelle besitzen. Die Zahlen

von A sind mit jedem γ_k vertauschbar. Die Baselemente brauchen jedoch nicht kommutativ zu sein.

Spezielle hyperkomplexe Systeme sind die folgenden.

a) Systeme vom Rang 2 über dem reellen Zahlkörper R. Eines der beiden Baselemente ist stets 1, das andere nennen wir γ : $\Gamma = (1, \gamma)$. Die Eigenschaften von Γ richten sich nach dem Wert von γ^2 . Der einfachste Fall liegt vor, wenn γ^2 das Quadrat einer Zahl aus R ist $\gamma^2 = a^2$. Dann wird Γ die direkte Summe zweier Körper R_1, R_2 , die durch Multiplikation der Zahlen von R mit $(\gamma - a)$ bzw. mit $(\gamma + a)$ entstehen. R_1 und R_2 sind isomorph mit R, das Produkt einer Zahl aus R_1 mit einer aus R_2 gibt stets Null.

Ist γ^2 kein Quadrat aus R, dann geht für $(1, \gamma)$ die Darstellung als direkte Summe verloren. Ein Beispiel für diesen Fall bilden die komplexen Zahlen $(1, i)$, weil $\gamma^2 = i^2 = -1$ kein Quadrat einer reellen Zahl ist.

Ersetzt man R durch den rationalen Zahlkörper K, dann ist $\Gamma = (1, \sqrt{a})$ der quadratischer Zahlkörper $K(\sqrt{a})$.

Schließlich muß nach $\gamma^2 = 0$ betrachtet werden. Gewöhnlich wird das Baselement γ mit ϵ und $\Gamma = (1, \epsilon)$ als Dualzahlensystem bezeichnet. Die dualen Zahlen wurden von W. K. Clifford (1845—1879) eingeführt und von Study mittels des nach letzterem benannten Übertragungsprinzips auf die Liniengeometrie angewandt, in der sie sich bestens bewährten. Addition und Multiplikation dualer Zahlen erfolgt gemäß

$$\begin{aligned} (a_1 + a_2 \epsilon) + (b_1 + b_2 \epsilon) &= (a_1 + b_1) + (a_2 + b_2) \epsilon \\ (a_1 + a_2 \epsilon) \cdot (b_1 + b_2 \epsilon) &= (a_1 \cdot b_1) + \epsilon \cdot (a_1 b_2 + a_2 b_1) \end{aligned}$$

Bei den Dualzahlen gibt es echte Nullteiler, denn es ist schon auf Grund der Definitionsgleichung $\epsilon \cdot \epsilon = 0$ die Basiszahl ϵ ein solcher. Die Division ist daher nicht unbeschränkt ausführbar. Hierin unterscheiden sich die dualen Zahlen grundlegend von den komplexen.

b) Die Quaternionen. Das sehr interessante System hat den Rang 4: $Q = (1, i, j, k)$. Es ist, wie aus der Multiplikationstabelle

	i	j	k
i	-1	k	-j
j	-k	-1	i
k	j	-i	-1

ersichtlich, nicht kommutativ. Wird der reelle Körper R zum Grundkörper gewählt, so ist die Division (mit Ausnahme der Division durch 0) eindeutig ausführbar, Q ist frei von echten Nullteilern. Also ist Q ein Körper.

Von den vielseitigen Anwendungen seien eine geometrische und eine zahlentheoretische hervorgehoben.

Mit Hilfe der Quaternionen lassen sich die Raum-drehungen — allerdings in anderer Weise als dies bei den Drehungen in der Ebene durch komplexe Zahlen geschieht — beschreiben. Einer Quaternion $q = a_1 + a_2 i + a_3 j + a_4 k$ ist auf der Einheitskugel ein sphärischer Vektor zugeordnet, der von einem Oberflächenpunkt der Kugel längs eines Großkreisbogens zu einem zweiten führt. Der doppelte Zentriwinkel des Bogens ist der Drehwinkel, die Drehachse steht senkrecht auf der Bogenebene.

In der Zahlentheorie gelingt die Lösung des Waring-schen Problems unter Heranziehung der Quaternionen. Es handelt sich um den Beweis der Behauptung, daß jede natürliche Zahl als Summe von höchstens vier Quadraten ganzer Zahlen darstellbar ist. Z. B.

$$15 = 3^2 + 2^2 + 1^2 + 1^2.$$

Die Eigenschaft der Quaternionen, auf die es dabei entscheidend ankommt, findet in der leicht verifizierbaren Formel

$$a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 = (a_1 + a_2 i + a_3 j + a_4 k) (a_1 - a_2 i - a_3 j - a_4 k)$$

ihren Ausdruck: In Q zerfällt eine Summe von vier Quadraten in zwei Linearfaktoren, während sie im komplexen Zahlkörper irreduzibel ist.

Beide Anwendungen bestätigen die Erfahrung, daß auch sehr abstrakte Begriffsbildungen unerwartete praktische Bedeutung erlangen können, ja, daß gerade in ihnen die Keime völlig neuartiger und deswegen besonders fruchtbarer Methoden der angewandten Mathematik enthalten sind. Die Vernachlässigung der Grundlagenforschung sterilisiert den Fortschritt!

c) Die Biquaternionen. Durch Adjunktion der Dualzahl ϵ zu Q erhält man die Biquaternionen $B = (1, i, j, k, \epsilon, i\epsilon, j\epsilon, k\epsilon)$, die den Rang 8 haben. ϵ ist mit allen Baselementen vertauschbar, weswegen sich die Angabe der Multiplikationstabelle erübrigt. Die Biquaternionen ermöglichen die Beschreibung der Bewegungen im Raum. Das sind Schraubungen, da sie sich aus Drehungen und Translationen zusammensetzen.

d) Die Cliffordschen Zahlen. Bei der Behandlung der relativistischen Schrödingergleichung, in der der vierdimensionale Laplaceoperator

$$\square \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2}{\partial t^2} \equiv \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \quad (l = i.c.f)$$

erscheint, gelang es Dirac durch Einführung eines hyperkomplexen Systems vom Rang 16 den Operator \square symbolisch in ein „Produkt“ von zwei linearen Operatoren zu zerlegen. Die etwas langwierige Rechnung ergab schließlich einen Summanden, der von Dirac physikalisch als Positron gedeutet wurde. Auf Grund dieser theoretischen Vorhersage suchte man nach dem neuen Teilchen, das schließlich von Anderson in einer Nebelkammeraufnahme gefunden und identifiziert wurde. Die abstrakte Algebra hatte einmal mehr ihre Daseinsberechtigung erwiesen, indem sie die Mittel für bahnbrechende Entdeckungen in der Atomphysik bereitstellte. Das Clifford-sche System operiert mit 15 nicht reellen Baselementen, die zusammen mit 1 eine Gruppe der Ordnung 16 bilden. Ihre Untergruppen der Ordnungen 2, 4, 8 sind mit den Gruppen isomorph, die bzw. von den Baselementen der komplexen Zahlen, der Quaternionen und der Biquaternionen gebildet werden.

e) Der Gruppenring einer endlichen Gruppe. Baselemente sind die Gruppenelemente. Die Gruppentafel ist identisch mit der Multiplikationstafel. Die Gruppenordnung ist auch der Rang des Systems.

Die hyperkomplexen Zahlen sind das Ergebnis der systematischen Fortführung der schon bei den komplexen Zahlen angewandten Erweiterungsmethoden. Man darf aber nicht vergessen, daß, sobald über den komplexen Zahlkörper hinausgegangen wird, irgendwelche der ursprünglich gültigen Rechenregeln verlorengehen. Die komplexen Zahlen sind das umfassendste System, in dem die üblichen Rechenregeln gelten.

7. Idealzahlen. Die Theorie der algebraischen Zahlkörper stützt sich weitgehend auf den Begriff der ganzen algebraischen Zahl. Darunter ist jede Zahl zu verstehen, die Wurzel einer algebraischen Gleichung ist, deren Koeffizienten nach Division durch den Koeffizienten der höchsten Potenz von x ausnahmslos ganz rationale Zahlen

sind. So ist $\epsilon = \frac{-1 + i \cdot \sqrt{3}}{2}$ algebraisch ganz, weil ϵ

der Gleichung $x^2 + x + 1 = 0$ genügt. Durch die Definition der ganzen algebraischen Zahlen erhalten die Ausdrücke Primzahl, Teilbarkeit, Einheit, assoziierte Zahlen usw. einen Sinn. Zum allgemeinen Leidwesen stellten sich jedoch bereits bei der Untersuchung quadratischer Zahlkörper heraus, daß die Zerlegung in Primfaktoren nicht immer eindeutig möglich sein muß. Das bekannteste Beispiel ist $K(i \cdot \sqrt{5})$, dessen Zahlen die Form $r_1 + r_2 i \sqrt{5}$ (r_1, r_2 rational) haben. Die Zahl 21 besitzt zwei verschiedene Zerlegungen in je zwei Primzahlen von $K(i \cdot \sqrt{5})$, nämlich

$$21 = 3 \cdot 7 \quad \text{und} \quad 21 = (1 + 2i \sqrt{5}) \cdot (1 - 2i \sqrt{5}),$$

was der eindeutigen Zerlegbarkeit widerspricht. Um diesem Übelstande zu steuern und für beliebige algebraische Zahlkörper gewisse schwer entbehrlche Teilbarkeitsaussagen zu retten, schuf Kummer den Begriff der Idealzahl.

Sei K ein algebraischer Zahlkörper und $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r$ r unabhängige ganze Zahlen aus K. Die Gesamtheit der Linearkombinationen $n_1 \alpha_1 + n_2 \alpha_2 + \dots + n_r \alpha_r$, wo die n_k ganze rationale Zahlen bedeuten, wird als Modul bezeichnet. Läßt man aber als Koeffizienten der α_k sämtliche ganzen algebraischen Zahlen von K zu, dann heißt die Zahlenmenge das von den Baselementen α_k gebildete Ideal. Besteht die Basis nur aus einem Element α , wird von einem Hauptideal gesprochen.

Der entscheidende Schritt Kummers bestand darin, daß er nicht mehr individuelle Zahlen, sondern die durch sie konstituierten Ideale betrachtete. Es gelang ihm, für sie die Teilbarkeit in einer Weise zu definieren, die der üblichen Teilbarkeit der Einzelzahlen (dort wo sie eindeutige Zerlegbarkeit zuließ) nicht widersprach. Das Ideal A heißt Teiler des Ideals B, wenn die Zahlenmenge B Teilmenge von A ist. Ideale ohne echte Teiler (unechte Teiler sind das Ideal selbst und das 1-Ideal, welches alle ganzen algebraischen Zahlen von K umfaßt) werden als Primideale bezeichnet.

Auf Grund der gegebenen Definitionen gilt der Satz von der — bis auf die Reihenfolge — eindeutigen Zerlegbarkeit in Primideale und stellt für alle weiteren Untersuchungen eine Ausgangssituation her, welche die Theorie in geordnete Bahnen lenkt.

8. Kardinalzahlen. Bis jetzt wurden nur Erweiterungen erörtert, welche durch algebraische Methoden zustande kamen. Gegen Ende des vorigen Jahrhunderts beschritt G. Cantor einen anderen Weg, indem er den Anzahlbegriff in sinnvoller Weise auf unendliche Mengen ausdehnte. Das gelang durch die mengentheoretische Klassifikation nach Mächtigkeiten. Die Mengen A, B sind gleich mächtig, wenn zwischen ihren Elementen mindestens eine eineindeutige Zuordnung (eventuell neben anderen Entsprechungen) möglich ist. Solange endliche Mengen der Betrachtung zugrunde liegen, ist die Mächtigkeit eine natürliche Zahl. Bei unendlichen Mengen wird die Einführung neuer Symbole erforderlich, die man als transfinite Kardinalzahlen bezeichnet. Da in jeder unendlichen Menge eine abzählbare Teilmenge steckt — das ist eine Menge, die sich eindeutig auf die natürlichen Zahlen abbilden läßt, man spricht kürzer von einer Folge — ist die Mächtigkeit der natürlichen Zahlen \aleph_0 die kleinste transfinite Zahl. Nun läßt sich zeigen, daß die Menge sämtlicher Teilmengen einer Menge A stets eine höhere Mächtigkeit aufweist als A. (Eine endliche Menge von n Elementen besitzt $2^n > n$ Teilmengen.) Daher kann zu jeder transfiniten Zahl eine größere angegeben werden, die Kette der Kardinalzahlen reißt nie ab. Selbstredend mußte dieser Feststellung der Beweis vorausgehen, daß die Ordnungsrelationen „größer“, „kleiner“ sinnvoll bleiben.

Die Arithmetik der transfiniten Zahlen ist ungemein interessant. Sie enthält sehr ungewohnte Relationen, wie

$$\aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0, \aleph_0 \cdot \aleph_0 = \aleph_0, \aleph_0^n = \aleph_0 \quad (n = \text{natürliche Zahl}),$$

$$2^{\aleph_0} > \aleph_0$$

Die drei ersten Gleichungen erinnern an das oberflächliche Operieren mit dem Symbol ∞ , die vierte geht sogar darüber hinaus und folgt aus dem oben über die Mächtigkeit der Menge aller Teilmengen einer Menge Gesagten.

Die Mächtigkeit der reellen Zahlen übertrifft die der natürlichen Zahlen. Aber letztere sind gleich mächtig mit den rationalen, ja sogar mit den algebraischen Zahlen. Aus diesem Sachverhalt folgt unmittelbar die Existenz transzendenter Zahlen. Die reellen Funktionen haben eine noch größere Mächtigkeit als die reellen Zahlen, und so geht das ohne Ende weiter.

Die Mengenlehre ist aus der heutigen Mathematik ebenso wenig wegzudenken wie aus der theoretischen Physik. Sie hat Beweismittel für Lehrsätze bereitgestellt, die ohne sie nicht ausgesprochen werden könnten und häufig sehr „im Leben“ stehende Gegenstände wie etwa Differentialgleichungen betreffen.

9. Ordinalzahlen. Eine Menge heißt geordnet, wenn eine Ordnungsrelation zwischen ihren Elementen besteht, welche festlegt, welches von zwei beliebigen Elementen „vor“ dem anderen steht. Man kann „vor“ durch das Zeichen $<$ symbolisieren. Die Ordnungsrelation muß transitiv sein, um von Widersprüchen frei zu bleiben. Das heißt aus $a < b$ und $b < c$ muß stets $a < c$ folgen. Nicht jede Menge ist geordnet. Bei Mengen reeller Zahlen liefert der Größenvergleich eine natürliche Ordnungsbeziehung. Hingegen sind komplexe Zahlen in diesem Sinne nicht zu ordnen. Einer der grundlegenden Sätze der Mengenlehre bejaht die Möglichkeit, jede Menge nicht nur zu ordnen, sondern sogar wohlzuordnen. Eine Menge heißt wohlgeordnet, wenn es in jeder Teilmenge ein erstes Element gibt. Allerdings ist es noch nicht gelun-

gen, ein allgemeines Verfahren zur Wohlordnung zu entwickeln. Bei den reellen Zahlen weiß man vorläufig nur, daß sie sich wohlordnen lassen, aber nicht, wie das explizit zu geschehen hat.

Bei endlichen Mengen fällt Ordnungszahl und Kardinalzahl zusammen. Nicht so bei unendlichen Mengen. So haben die natürlichen Zahlen (1, 2, 3, ...) einen anderen Ordnungstyp als die ganzen Zahlen (...-2, -1, 0, 1, 2, ...), weil es wohl bei den ersteren nicht aber bei den letzteren ein erstes Element gibt. Deshalb werden Ordnungszahlen nur für wohlgeordnete Mengen definiert.

Bezeichnet man die Ordnungszahl der Menge der natürlichen Zahlen mit ω , so müssen die Ordnungszahlen der Mengen $\{a_1, a_2, a_3, \dots, b_1\}$, $\{a_1, a_2, a_3, \dots, b_1, b_2\}$, $\{a_1, a_2, a_3, \dots, b_1, b_2, b_3, \dots\}$ bzw. $\omega + 1$, $\omega + 2$, $\omega + \omega$ lauten. Fügt man aber b_1 am Anfang hinzu, dann erhält man die Mengen $\{b_1, a_1, a_2, a_3, \dots\}$, $\{b_1, b_2, a_1, a_2, \dots\}$, $\{b_1, b_2, b_3, \dots, a_1, a_2, \dots\}$ mit den Ordnungszahlen $1 + \omega$, $2 + \omega$, $\omega + \omega$. Der Vergleich mit den ersten drei Mengen erweist die Nichtkommutativität der Addition von Ordinalzahlen. Denn die Anfügung eines Elementes (oder endlich vieler) am Anfang einer Folge ändert den Ordnungstyp derselben nicht, also ist $1 + \omega = 2 + \omega = n + \omega = \omega$. Werden aber die b-Elemente ans Ende gesetzt, dann erhält man einen neuen Typ, dessen Ordnungszahlen $\omega + 1$, $\omega + 2$, keiner Reduktion fähig sind.

Ganz ähnlich verhält es sich bei der Multiplikation der Ordnungszahlen. Seien A, B zwei wohlgeordnete Mengen mit den Ordinalzahlen α , β . Ersetzt man jedes Element von A durch die wohlgeordneten Elemente von B, so erhält man eine neue Menge C, deren Ordnungszahl γ das Produkt von β mit α sein soll: $\gamma = \beta \cdot \alpha$. Die Substitution in verkehrter Reihenfolge hätte eine Menge C, mit $\gamma' = \alpha \cdot \beta$ ergeben. C und C' stimmen zwar überein, weil sie die gleichen Elemente enthalten, aber der Ordnungstyp muß keineswegs derselbe sein, deshalb sind γ und γ' häufig verschieden. Wählen wir zur Illustration $A = \{1, 2, 3, \dots\}$, $B = \{a, b\}$. Dann wird

$$C = \{a_1, b_1; a_2, b_2; \dots\}, \alpha = \omega, \beta = 2, \beta \cdot \alpha = 2 \cdot \omega = \omega,$$

$$C' = \{a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots\}, \alpha \cdot \beta = \omega \cdot 2 \neq \omega.$$

Die Rechengesetze der transfiniten Ordinalzahlen unterscheiden sich, wie man sieht, schon hinsichtlich der einfachsten Operationen von den bei den „üblichen“ Zahlen gewohnten Regeln.

10. Nichtarchimedische Zahlen. Für reelle Zahlen gilt das Archimedische Axiom. Danach existiert zu beliebigen Zahlen $a, b \neq 0$ eine natürliche Zahl n, so daß $|a| < n \cdot |b|$. Es ist die arithmetische Formulierung eines analogen Axioms in der Geometrie, welches die Möglichkeit sicherstellt, durch n-maliges Abtragen einer Strecke b eine andere Strecke a zu überdecken. Als Axiom ist es nicht die logische Konsequenz der übrigen Grundaussagen. Der Beweis dieser Behauptung ist erbracht, sobald die Konstruktion eines Zahlensystems gelingt, in dem das erwähnte Axiom nicht gilt.

Man stößt bei der Betrachtung des Verhaltens einer Funktion $f(x)$ in der Umgebung der Abszisse x_0 auf die Notwendigkeit, die Klassifikation mit Hilfe neuartiger Zahlen vorzunehmen. Zur Vereinfachung der Rechnung wählen wir $x_0 = 0$, ohne dadurch die Allgemeinheit einzuschränken. Wir wollen ferner voraussetzen, daß sich $f(x)$ bei $x_0 = 0$ in eine Potenzreihe (in der auch negative Potenzexponenten von x zugelassen sind) entwickeln läßt

$$f(x) = a_n x^n + a_{n+1} x^{n+1} + \dots \quad (n = \text{ganze Zahl}).$$

Je nachdem, ob $n < 0, = 0, > 0$ besitzt $f(x)$ bei $x_0 = 0$ eine Unendlichkeitsstelle (=einen Pol), einen endlichen Wert ($\neq 0, \neq \infty$) oder eine Nullstelle. Schließlich wollen wir uns auf jenen Teil R der Umgebung von $x_0 = 0$ beschränken, der rechts von 0 liegt. Die zu lösende Frage lautet nun, in welcher Weise man aus den Koeffizienten zweier Funktionen $f(x), g(x)$ einen Größenvergleich der Funktionswerte in einer genügend kleinen Halbumgebung R herleiten kann. (Die vorausgesetzte Entwickelbarkeit in Potenzreihen schließt die Möglichkeit aus, daß der Reihenteil mit nichtnegativen Exponenten von x den Konvergenzradius $\rho = 0$ hätte. In einem genügend schmalen R findet daher sicher Konvergenz statt, und es erübrigt sich, dies weiterhin hervorzuheben.)

Ehe wir zwei Funktionen

$$f(x) = a_n x^n + a_{n+1} x^{n+1} + \dots, \quad a_n \neq 0,$$

$$g(x) = b_m x^m + b_{m+1} x^{m+1} + \dots, \quad b_m \neq 0$$

in R vergleichen, definieren wir den Begriff der positiven Funktion:

$$h(x) = h_s x^s + h_{s+1} x^{s+1} + \dots$$

heiße „positiv“, wenn $h_s > 0$, „negativ“, wenn $h_s < 0$. Eine positive Funktion nimmt in R nur positive Werte an, weil das Vorzeichen des ersten Gliedes allein dafür maßgebend ist, solange R genügend schmal bleibt. Die Summe der Beträge der nachfolgenden Terme kann ja durch Verkleinerung von R unter jede Schranke gedrückt werden.

Nun läßt sich der Größenvergleich einfach formulieren: $f(x)$ ist in R größer als $g(x)$, wenn die Differenz $f(x) - g(x)$ positiv ist. Wie äußert sich das in den Koeffizienten? Zu diesem Zwecke sind mehrere Fälle zu diskutieren.

a) $n < m$. Unter Beachtung von $x^n > x^m$, wenn $n < m$ und $0 < x < 1$, wird $f(x) >_R g(x)$ (das tiefgestellte R soll andeuten, daß sich die Ungleichung nur auf R bezieht), falls $a_n > 0$.

b) $n = m$, $a_n \neq b_n$, $f(x) >_R g(x)$, wenn $a_n > b_n$.

c) $n = m$, $a_n = b_n$, $a_{n+1} \neq b_{n+1}$, $f(x) >_R g(x)$, wenn $a_{n+1} > b_{n+1}$.

d) $n = m$, $a_n = b_n$, $a_{n+1} = b_{n+1}$, ... $a_{n+r-1} = b_{n+r-1}$, $a_{n+r} \neq b_{n+r}$, $f(x) >_R g(x)$, wenn $a_{n+r} > b_{n+r}$.

Schreibt man die Potenzreihen von $f(x)$ und $g(x)$ so untereinander, daß gleiche Potenzen von x in derselben Spalte stehen und läßt Vorzeichen und Potenzen weg, so erhält man zwei Koeffizientenfolgen. Falls $n < m$, möge dort, wo noch keine Glieder von $g(x)$ auftreten, eine Null stehen.

$$f(x) \dots a_n, a_{n+1}, a_{n+2}, \dots, a_m, \dots, a_{m+r-1}, a_{m+r}, \dots,$$

$$g(x) \dots b_n = 0, b_{n+1} = 0,$$

$$b_{n+2} = 0, \dots, b_m, \dots, b_{m+r-1}, b_{m+r}, \dots$$

Man darf also in beiden Folgen mit dem selben niedrigsten Index beginnen, egal, ob dadurch einige Anfangskoeffizienten der einen Funktion verschwinden oder nicht.

Nach dieser Festsetzung kann man zusammenfassend sagen: $f(x) >_R g(x)$, wenn das erste nicht übereinstimmende Koeffizientenpaar a_s, b_s die Ungleichung $a_s > b_s$ erfüllt.

Beispiel:

a) $f(x) = \frac{2}{x} - x + 4x^2 + \dots$, Koeff.-Folge ist $(2 | 0, -1, 4, \dots)$,

$g(x) = 1 + x + x^2 + \dots$, Koeff.-Folge ist $(0 | 1, 1, 1, \dots)$.

$f(x) >_R g(x)$, weil $a_{-1} = 2 > b_{-1} = 0$.

b) $f(x) = 2x^2 - x^3 + \frac{1}{2} \cdot x^4 + \frac{1}{3} \cdot x^5 \dots$, Koeff.-Folge ist $(| 0, 0, 2, -1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots)$

$g(x) = 2x^2 - x^3 + \frac{1}{3} \cdot x^4 - x^5 \dots$, Koeff.-Folge ist $(| 0, 0, 2, -1, \frac{1}{3}, -1, \dots)$,

$f(x) >_R g(x)$, weil $a_1 = b_0$, $a_1 = b_1$, $a_2 = b_2$, $a_3 = b_3$, $a_4 = \frac{1}{2} > b_4 = \frac{1}{3}$.

Mit dem lotrechten Strich werde das rechte Ende der Koeffizienten, die zu negativen Exponenten von x gehören, markiert.

Wir haben jetzt alle Vorbereitungen getroffen, um nichtarchimedische Zahlen als Koeffizientenfolgen der

Potenzreihenentwicklung einer Funktion zu definieren

$$\alpha = (a_\nu, a_{\nu+1}, \dots, a_{-1} | a_0, a_1, \dots),$$

$$\beta = (b_\mu, b_{\mu+1}, \dots, b_{-1} | b_0, b_1, \dots).$$

Es erübrigt sich noch, die Grundrechenarten einzuführen und den nichtarchimedischen Charakter des Systems nachzuweisen.

a) Addition. Ist $\nu \neq \mu$ und ν der kleinere Index, dann soll, wie oben vereinbart, $b_\nu = b_{\nu+1} = \dots = b_{\mu-1} = 0$ gesetzt werden, damit ohne Einschränkung der Allgemeinheit stets mit dem kleineren Index begonnen werden kann.

Wir definieren

$$\alpha \pm \beta =$$

$$= (a_\nu \pm b_\nu, a_{\nu+1} \pm b_{\nu+1}, \dots, a_{-1} \pm b_{-1} | a_0 \pm b_0, \dots).$$

Die Addition ist ersichtlich assoziativ, eindeutig und kommutativ. n-malige Addition von α zu sich selbst ergibt

$$n \cdot \alpha = (na_\nu, na_{\nu+1}, \dots, na_{-1} | na_0, \dots).$$

Betrachtet man die Zahlen $\alpha = (|1, 0, 0, \dots, 0, \dots)$, $\beta = (|0, 1, 0, 0, \dots, 0, \dots)$, deren erste die größere ist und bildet $n \cdot \beta = (|0, n, 0, \dots, 0, \dots)$, dann bleibt, gleichgültig, wie groß die natürliche Zahl n gewählt wird, stets $\alpha > n \cdot \beta$. Diese Tatsache widerspricht dem Archimedischen Axiom, das System ist wirklich ein nichtarchimedisches. α gehört zur Funktion $y=1$, $n \cdot \beta$ zur Funktion $y=n \cdot x$. Egal, wie steil die zweite Bildgerade verläuft, die Bildgerade von $y=1$ liegt in R höher. Das Nullelement der Addition ist eine Folge von lauter Nullen.

b) Multiplikation. Zu $\gamma = \alpha \cdot \beta = (a_\nu, a_{\nu+1}, \dots) \cdot (b_\mu, b_{\mu+1}, \dots)$ gehört die Koeffizientenfolge des Produktes der Potenzreihen von $f(x)$ und $g(x)$. Wegen

$$f(x) \cdot g(x) = (a_\nu x^\nu + a_{\nu+1} x^{\nu+1} + \dots) \cdot (b_\mu x^\mu + b_{\mu+1} x^{\mu+1} + \dots) = a_\nu b_\mu x^{\nu+\mu} + (a_\nu b_{\mu+1} + a_{\nu+1} b_\mu) x^{\nu+\mu+1} + (a_\nu b_{\mu+2} + a_{\nu+1} b_{\mu+1} + a_{\nu+2} b_\mu) x^{\nu+\mu+2} + \dots$$

beginnt

$$\gamma = (c_{\nu+\mu}, c_{\nu+\mu+1}, \dots)$$

mit dem Index $\nu + \mu$, worin

$$c_{\nu+\mu} = a_\nu b_\mu,$$

$$c_{\nu+\mu+1} = a_\nu b_{\mu+1} + a_{\nu+1} b_\mu,$$

$$c_{\nu+\mu+k} = a_\nu b_{\mu+k} + a_{\nu+1} b_{\mu+k-1} + \dots + a_{\nu+k} b_\mu.$$

Auch die Multiplikation ist assoziativ, eindeutig und kommutativ. Als Einselement ist

$$\varepsilon = (|1, 0, 0, \dots, 0, \dots)$$

anzusehen.

c) Division. Betrachtet man in den letzten Gleichungen für c_j alle c_j und alle a_ν als bekannt, hingegen die b_μ als unbekannt, so hat man ein System von unendlich vielen linearen Gleichungen für die b -Zahlen vor sich, das wegen $a_\nu \neq 0$ stets eindeutig auflösbar ist. Aus der ersten Gleichung erhält man b_μ , danach aus der zweiten $b_{\mu+1}$ usw. Nur in einem Falle scheitert die Auflösung, nämlich, wenn α das Nullelement ist. Die Division durch 0 bleibt nach wie vor sinnlos. Die nichtarchimedischen Zahlen bilden einen Körper.

Ihre Hauptbedeutung liegt auf dem Gebiet der geometrischen Axiomatik. Durch Skalierung der Koordinatenachsen mit nichtarchimedischen Zahlen erkennt man die Rolle, welche das Archimedische Axiom für den Aufbau der Geometrie spielt.

Auch die „Stärke“ des Anwachsens einer Funktion, wenn $x \rightarrow \infty$ kann durch nichtarchimedische Zahlen in ähnlicher Weise beschrieben werden.

Abschließend werde noch der reelle Kern des Systems angegeben. Er besteht aus den eingliedrigten Zahlen $Q = (|a)$. Der Isomorphismus zwischen ihm und den reellen Zahlen ist unmittelbar evident.

Das geologische Alter abflußloser Salzseen

Die von Libby entwickelte C^{14} -Methode zur Datierung organischer archäologischer Objekte hat zu analoger Verwendung anderer Radioisotope angeregt. So besitzt das im Salz von Gewässern und Lagerstätten enthaltene natürliche Chlor für Neutronen eines bestimmten Energiebereichs einen großen Einfangquerschnitt. Da solche Neutronen in der Höhenstrahlung auftreten, bildet sich ständig im Salz Cl^{36} , welches infolge seiner β -Aktivität nachweisbar ist.

Vom Zeitpunkt des Entstehens eines abflußlosen Salzsees an setzt die Produktion von Cl^{36} ein. Wegen der beträchtlichen Halbwertzeit von 300000 Jahren dauert es ziemlich lange, bis das Gleichgewicht zwischen neugebildeten und zerfallenden Cl^{36} -Atomen hergestellt ist. Zur Zeit t beträgt die Strahlungsintensität I von Cl^{36} , wenn S ihr Sättigungswert ist,

$$I(t) = S \cdot (1 - e^{-\lambda t}).$$

Die Zerfallskonstante λ steht mit der Halbwertzeit τ in der Beziehung $\lambda = \frac{\ln 2}{\tau}$. I wird gemessen, S berechnet. Als Alter ergibt sich

$$t = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{S}{S-I}$$

oder

$$t = \frac{\tau}{0,693} \cdot \ln \frac{S}{S-I}.$$

E. Bagge und H. Willkomm fanden mit Hilfe dieser Methode bei einem Salzsee in der anatolischen Hochebene als wahrscheinlichstes Alter (0,9 bis 1,4) $\cdot 10^6$ Jahre, als Mindestalter (0,5 bis 0,6) $\cdot 10^6$ Jahre. Die effektive Aktivität betrug etwa 87% der Sättigungsaktivität.

Literatur: Die Naturwissenschaften, Heft 7, 1. 4. 63, S. 299.

Weitere Anwendungen des Mössbauereffektes

1. Hyperfeinaufspaltung von γ -Linien. Die Atomkerne besitzen außer dem Grundzustand energetisch verschiedene Anregungszustände, zwischen denen unter Emission typischer γ -Linien Übergänge stattfinden. Unter dem Einfluß starker inneratomarer elektrischer und magnetischer Felder kommt es zur Aufspaltung der Kernniveaus. Das Ausmaß der Aufspaltung gestattet Rückschlüsse auf die Struktur der Felder, was für die Festkörperphysik, besonders für das Studium des magnetischen Verhaltens der Stoffe, von großer Bedeutung ist. Die Geringfügigkeit der Aufspaltung entzog bis jetzt ihr Ausmaß der Messung. Erst durch den Mössbauereffekt konnte die quantitative Bestimmung der Hyperfeinstruktur mit Aussicht auf Erfolg in Angriff genommen werden. Bei Fe^{57} fand man z. B. an Stelle der einzigen Linie bei fehlendem Magnetfeld deren sechs im Magnetfeld.

2. Quadratischer Dopplereffekt. Nach der klassischen Theorie des Dopplereffektes empfängt ein Beobachter, der sich von einer die Frequenz ν ausstrahlenden Lichtquelle in der Strahlrichtung entfernt, die Frequenz

$$\nu' = \nu \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right).$$

Gemäß der speziellen Relativitätstheorie hätte diese Formel jedoch

$$\nu' = \nu \frac{1 - \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

zu lauten. Entwickelt man die rechte Seite nach Potenzen von β , so wird.

$$\begin{aligned} \nu' &= \nu \cdot (1 - \beta) \cdot (1 - \beta^2)^{-1/2} = \nu \left(1 - \beta + \frac{\beta^2}{2} + \dots\right) = \\ &= \nu \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right) + \frac{\nu}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots \end{aligned}$$

Der erste Term stimmt mit dem klassischen Ergebnis überein, der zweite repräsentiert den sogenannten quadratischen Dopplereffekt. Selbst für $v = 30$ km/sek beträgt die quadratische Dopplerverschiebung nur $5 \cdot 10^{-7}\%$ von ν und ist mit konventionellen Methoden nicht nachweisbar. Der Mössbauereffekt gestattet jedoch die einwandfreie Messung der winzigen Abweichung vom klassischen Wert.

Man brachte Emitter und Absorber auf unterschiedliche Temperaturen, wodurch die Geschwindigkeiten der Wärmeschwingungen der Atome in beiden Körpern verschieden wurden. Die Folge war das Verschwinden der Kernresonanzabsorption. Bewegte man nun Absorber und Emitter langsam gegeneinander, so trat bei einer bestimmten Relativgeschwindigkeit w das Resonanzmaximum wieder in Erscheinung. Aus w wurde auf ν' geschlossen und das Ausmaß des quadratischen Dopplereffektes in voller Übereinstimmung mit der Theorie befunden. Der Versuch wurde von R. V. Pound und G. A. Repka an der Harvarduniversität ausgeführt.

(Über den Mössbauereffekt selbst und zwei Anwendungen siehe Nr. 1 und Nr. 4 der „Wiss. Nachr.“).

Literatur: „Die Naturwissenschaften“, Heft 7, 1. 4. 63, S. 282—290.

Die Entdeckung des Antiprotons

Die theoretischen Untersuchungen Diracs über die relativistische Quantenmechanik gipfelten in der Voraussage der Existenz des Positrons, welches daraufhin gesucht und 1932 in der Höhenstrahlung auch gefunden wurde. Diracs Prophezeiung gründete sich auf das Rechenresultat, daß neben den längst bekannten Energieniveaus der Elektronen im Atom, welche deren mögliche Quantenzustände bestimmen, auch negative Niveaus existieren müßten. Der kleinste Unterschied zwischen positiven und negativen Niveaus betrug das doppelte Äquivalent der Elektronenmasse $2 \cdot m_0 \cdot c^2 = 1,02$ MeV. Da keine Übergänge von positiven zu negativen Niveaus beobachtet wurden, machte Dirac die kühne Annahme, daß alle negativen Niveaus besetzt seien, weshalb nach dem Pauliverbot keine Übergänge stattfinden können. Trifft aber ein Photon mit einer Energie $h\nu > 1,02$ MeV ein Atom, so hebt es ein Elektron aus dem negativen in den positiven Zustand. Zurück bleibt ein „Loch“, das als positives Elektron, also als Positron in Erscheinung tritt. Die Bestätigung der Diracschen Hypothese zerstreute schließlich die zahlreichen gegen sie vorgebrachten Bedenken.

Was lag näher, als zu vermuten, daß auch das Proton (p) ein Gegenstück besitzen müßte, nämlich das Antiproton (\bar{p})? Infolge der fast 2000mal größeren Masse waren allerdings Protonen oder schnelle Teilchen mit einer Energie von mindestens 1,9 GeV erforderlich, um ein p - \bar{p} -Paar zu erzeugen. (Die Energiezufuhr darf statt durch ein Photon auch durch Abgabe der kinetischen Energie im Verlaufe einer Kollision erfolgen.) Allerdings bezieht sich der Wert von 1,9 GeV auf das Schwerpunktsystem der zusammenprallenden Teilchen. Im Laborsystem ist die notwendige Schwellenenergie erheblich größer, nämlich 5,6 GeV. Bei Targetkernen mit Moment ermäßigt sie sich auf 4,3 GeV. Aus diesem Grunde konnte die experimentelle Suche nach dem Antiproton erst in Angriff genommen werden, als Beschleunigungsmaschinen von ausreichender Leistungsfähigkeit zur Verfügung standen. Das zu diesem Zwecke 1954—55 in Berkeley konstruierte Bevatron erfüllte alle Anforderungen und ermöglichte schon 1955 den Nachweis des Antiprotons durch E. Segrè, dem dafür der Nobelpreis zuerkannt wurde.

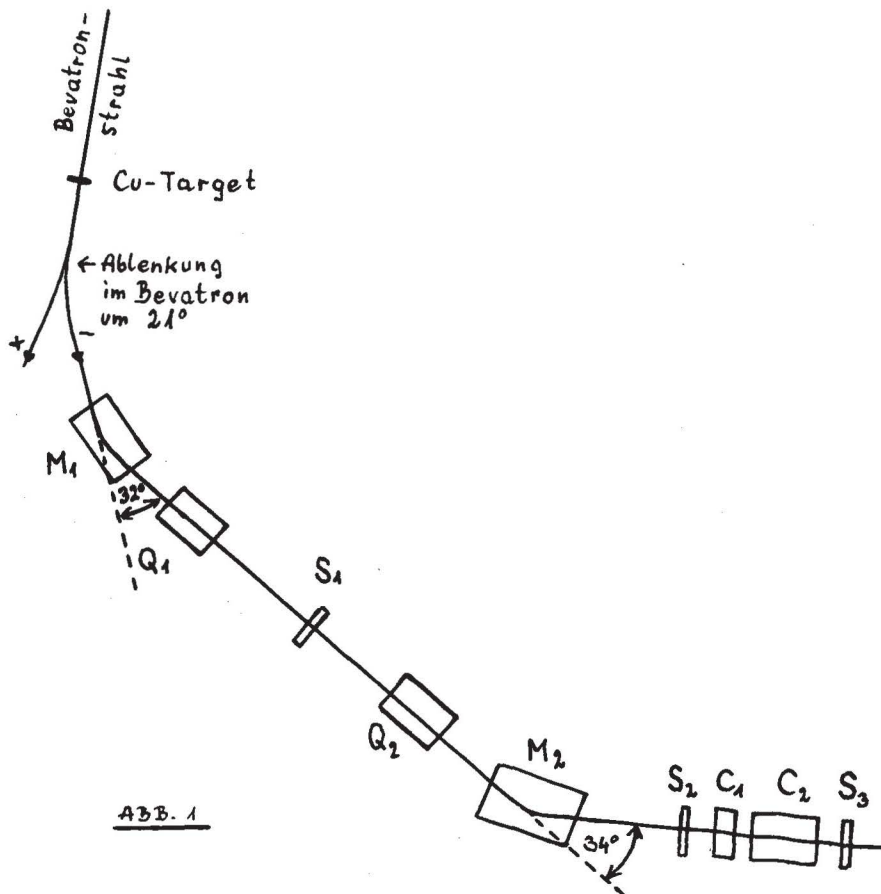


ABB. 1

Segrè lenkte den aus dem Bevatron kommenden Strahl auf ein Cu-Target, in dem sich — wenn die Theorie stimmte — Antiprotonen bildeten, die mit 78% der Lichtgeschwindigkeit wegflogen. Leider entsteht gleichzeitig eine Unmenge von π -Mesonen (50000 auf ein Antiproton!). Die Schwierigkeit bestand in der Feststellung der seltenen Antiprotonen. Das geschah mit Hilfe der in Abb. 1 schematisierten Vorrichtung. In ihr bedeuten

- M_1, M_2 Ablenkmagnete,
- Q_1, Q_2 Quadrupolmagnete, welche die Fokussierung der Teilchen besorgen,
- S_1, S_2, S_3 Szintillationszähler,
- C_1, C_2 Čerenkovzähler.

M_1, M_2 fächern die Teilchen auf, damit nur negative Partikeln eines eng definierten Impulsintervalls um 1,19 GeV/c die nach den Magneten angebrachten Blenden passieren. M_1 lenkte den Strahl um 32° , M_2 um 34° ab. Q_1 fokussierte den Strahl in S_1 , Q_2 in S_2 . In S_2 unterschieden sich die Impulse nur mehr um $\pm 2\%$ von 1,19 GeV/c. Dem entsprach eine Antiprotonengeschwindigkeit mit $\beta = \frac{v}{c} = 0,78$, eine Pionengeschwindigkeit mit $\beta = 0,99$.

C_1 registrierte alle negativen Teilchen mit $\beta > 0,79$, C_2 nur diejenigen mit $0,75 < \beta < 0,78$. Infolge der höheren Geschwindigkeit der Pionen betrug deren Flugzeit zwischen S_1 und S_2 (Abstand rund 13 m) 40 nsek, während die Antiprotonen für dieselbe Strecke 51 nsek benötigten. Durch verzögerte Koinzidenzschaltung von S_1 und S_2 wurden nur die Teilchen mit der längeren Flugzeit, also die Antiprotonen registriert. Damit war eine doppelte Geschwindigkeitskontrolle gewährleistet. Die Koinzidenzschaltung zwischen S_2 und S_3 ließ die ausschließliche Zählung jener langsamen Teilchen zu, die sich in der Bahnrichtung bewegten, der Beitrag aus irgendwelchen Gründen seitlich einfallenden Partikeln wurde eliminiert. Außerdem berücksichtigte man die Abbremsung der Antiprotonen infolge Ionisierung des durchflogenen Materials von $\beta = 0,78$ auf $\beta = 0,765$.

Die Pulse von S_1, S_2, C_1 wurden auf einen Oszillograph angezeigt und fotografiert. Bei Pionen lagen als Folge der kürzeren Flugzeit die Zacken, die zu S_1, S_2 gehörten, auf dem Bildschirm etwas enger beisammen als die von Antiprotonen herrührenden. Bei letzteren verursachte im Gegensatz zu den Pionen C_1 (weil er nur auf $\beta > 0,79$ ansprach) keine Zacke.

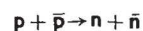
Die Durchführung des Experiments verlief in Einklang mit den Erwartungen. Die von den Antiprotonen stammenden Effekte traten qualitativ und quantitativ richtig ein, womit die Existenz der gesuchten Teilchen gesichert war.

Um ganz sicher zu gehen, polte man sämtliche Magnete um und schickte Protonen durch das Gerät. Sie zeigten dasselbe Verhalten wie die Antiprotonen beim eigentlichen Versuch. Die Masse $m_{\bar{p}}$ stimmte bis auf 5% mit m_p überein. Bei Einstellung der Vorrichtung auf andere Massen als m_p verschwanden die Antiprotoneneffekte.

Die Ausbeute an Antiprotonen steigerte sich binnen kurzem beträchtlich. An den Fortschritten in dieser Richtung war die Verwendung der (rasche Verbreitung findenden) Blaskammer maßgeblich beteiligt. 1955 kam ein Antiproton auf 50000 andere Teilchen und wurde nur alle 15 min beobachtet. Bereits 4 Jahre später erhielt man schon alle 6 sek ein \bar{p} in der Gesellschaft von nur 9 Teilchen. Der experimentellen Verwendung des Antiprotons in größerem Umfang war damit das Tor geöffnet.

Selbstverständlich konzentrierte sich nach dem Gelingen des \bar{p} -Nachweises sofort das Interesse auf das Antineutron \bar{n} . Als elektrisch neutrale Partikel erfordert es eine modifizierte Beobachtungstechnik.

Man ging von der Überlegung aus, daß sich beim Zusammenstoß von p und \bar{p} die Ladungsaustauschreaktionen



gelegentlich ereignen müßte. \bar{n} wäre durch die Vernichtungsstrahlung erkennbar, die bei der Absorption des \bar{n} -Strahles in neutronenhaltigen Substanzen frei wird. Das diesbezügliche Experiment wurde von Cork, Lambertson, Piccinoni und Wenzel mit positivem Ergebnis

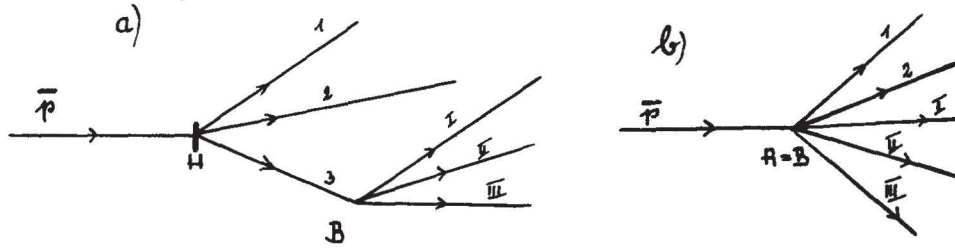
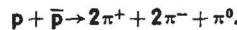
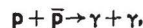


ABB. 2

ausgeführt, obwohl die obige Reaktion viel seltener ist als



Gelegentlich tritt auch direkte Zerstrahlung ein



in ganz seltenen Fällen entstehen K-Mesonen.

Der Ausbau des geschilderten Versuchsschemas ermöglichte schließlich die Entdeckung von Antihyperonen.

Literatur:

1. Phys. Rev., Bd. 100, 1955, S. 947. Chamberlain et al.: „Observation of the Antiproton.“
2. Phys. Blätter, Heft 6, 1960, S. 310—319. Nobelpreisvortrag von E. Segrè: „Nukleare Eigenschaften von Antinukleonen.“

Die Identifizierung von Resonanzen

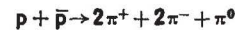
Eine der vordringlichsten Aufgaben der Hochenergiephysik der letzten Jahre bestand — abgesehen von den zahllosen Streuexperimenten — in der Suche nach neuen Elementarteilchen. Die Liste derselben wurde immer länger, nicht zuletzt deshalb, weil man sich von theoretischen Überlegungen leiten lassen konnte, wodurch dem Unternehmen systematische Züge aufgeprägt wurden. Der Verdacht, daß zu jedem Teilchen ein Antiteilchen existiere, verfestigte sich unter dem Eindruck immer neuer Entdeckungen nahezu zur Gewißheit. Ferner konnten die Quantenzahlkombinationen, welche die verschiedenen Partikeln charakterisieren, ziemlich vollständig realen Objekten zugeordnet werden. (Inzwischen sind alle unter diesem Gesichtspunkt denkbaren Teilchen gefunden worden!) Der Suche war also eine klare Richtung gegeben, kannte man doch die günstigsten Bedingungen, die einen Erfolg versprochen.

Trotzdem bestand noch kein Grund zu übertriebenem Optimismus. Die ausständigen Teilchen schienen sich durch extrem kurze Lebensdauer dem experimentellen Zugriff zu entziehen.

Normalerweise wird der aus dem Beschleuniger kommende Teilchenstrom auf das Ziel gelenkt, wo etwa das Targetatom A eine Kollision erleidet. (Abb. 2a). Nehmen wir an, es entständen bei dieser Gelegenheit 3 neue Teilchen, die nach verschiedenen Richtungen wegfliegen. Ihre Bahnspuren 1, 2, 3 werden in der angeschlossenen Blaskammer sichtbar. Falls Teilchen 3 die kürzeste Lebensdauer besitzt und es in dieser Zeit die Blaskammer noch nicht verlassen hat, dann geht von seinem Zerfallsort B ein zweiter Stern von sagen wir wieder 3 Spuren I, II, III aus. Die Unterscheidung der von den 3 primär und den 3 sekundär erzeugten Partikeln stammenden Spuren ist durch den bloßen Anblick möglich, da die Flugrichtung u. a. aus der Bahnkrümmung im Magnetfeld hervorgeht.

Ganz anders liegen die Dinge, wenn sich Teilchen 3 vor dem Zerfall nur um einige Kerndurchmesser weiterbewegt. Dann wird der primäre oder sekundäre Charakter einer Bahngruppe auch im besten Mikroskop nicht unterscheidbar (Abb. 2b). Den Physikern kam in dieser unangenehmen Situation eine reine statistisch Überlegung zu Hilfe.

Betrachten wir den konkreten Fall des — ursprünglich hypothetischen — ω^0 -Mesons. Man vermutete, daß es bei der Reaktion



als ganz kurzlebiges Intermezzo zwischen den auf beiden Seiten der Reaktionsgleichung symbolisierten Ereignissen auftritt. Die Blaskammer zeigte das in Abb. 3 skizzierte

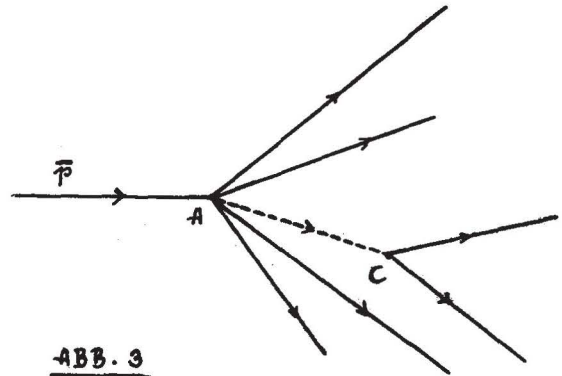


ABB. 3

Bild. Vom Kollisionsort A gingen 4 sichtbare Spuren aus. Masse, Energie und Impuls jedes Pions waren aus der Bahnkrümmung, der spezifischen Ionisierung usw. ohne weiteres feststellbar. Das ungeladene π^0 hinterließ zwar keine Ionenspur (bzw. Bläschen Spur), aber an seinem weiter weg liegenden Zerfallsort C traten neue Spuren auf, die eine einwandfreie Identifizierung erlaubten.

Für den Fall, daß sich ω^0 gebildet hatte, bestanden folgende Möglichkeiten:

- Nur ω^0 entsteht primär, alle 5 Pionen sekundär;
- ω^0 und 1 Pion entstehen primär;
- ω^0 und 2 Pionen entstehen primär;
- ω^0 und 3 Pionen entstehen primär;
- ω^0 und 4 Pionen entstehen primär.

Der letzte Fall widerspricht gewissen Erhaltungssätzen und ist auszuschließen.

Wir behandeln gleich den Fall c), der den richtigen Sachverhalt wiedergibt. Angenommen also, die 3 sekundären Pionen stammten aus dem Zerfall von ω^0 . Dann muß ihre Ruhmassensumme bei jeder Wiederholung des Versuches denselben Wert ergeben, nämlich die ω^0 -

Ruhmasse M_0 . Sind $E_1, E_2, E_3, \vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3$ die Energien bzw. die Impulse der sekundären Pionen, dann ist

$$M_0 = \frac{1}{c^2} \sqrt{(E_1 + E_2 + E_3)^2 - c^2 \cdot (\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3)^2}.$$

Man suchte nun aus den vielen Blaskammerfotos jene heraus, auf denen die dem Fall c) entsprechende Spurenfigur auftrat. Bei der ersten derartigen Figur faßte man auf alle $\binom{5}{3} = 10$ Arten je drei Pionen zusammen und berechnete das zugehörige M_0 . Dasselbe wiederholte man auch bei den anderen gleichartigen Figuren. Und siehe da, jedesmal war eine Kombination darunter, für die M_0 denselben Wert hatte, während die M_0 -Werte der übrigen Kombination die weite Streuung von Zufalls-

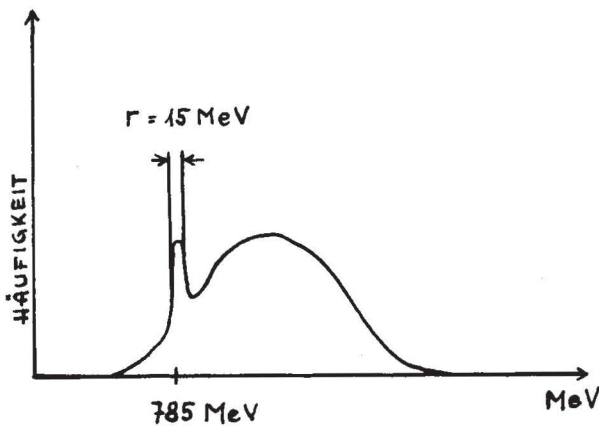


ABB. 4

ereignissen zeigten. In Abb. 4 ist das Streudiagramm zu sehen. Als Abszisse ist $M_0 \cdot c^2$ in MeV aufgetragen, als Ordinate die Häufigkeit der zu einer Summe $M_0 \cdot c^2$ gehörigen Ereignisse. Die Spitze bei 785 MeV ist der Beweis für die Existenz von ω^0 . Nur so ist die ungewöhnliche Häufung dieses Wertes erklärlich.

Selbstverständlich wurden die anderen Fälle ebenso behandelt, wußte man ja nicht, wie viele Teilchen primär, wie viele sekundär entstehen. Nur der Fall c) wies die erwähnte Spitze auf.

Die Halbwertbreite der Spitze $\Gamma = 15$ MeV ließ den Schluß auf die Lebensdauer τ von ω^0 zu. Γ ist das Maß für die Energieunschärfe $\Delta E = \Delta M_0 \cdot c^2$, die mit der Massenunschärfe einhergeht. Aus der Unbestimmtheitsrelation $\Delta E \cdot \tau \geq \frac{h}{2\pi}$ folgt als untere Grenze für die Lebensdauer ein Wert von zirka 10^{-23} sek. Eine genauere Bestimmung von τ ist vorläufig ausgeschlossen, weil das Auflösungsvermögen der zur Verfügung stehenden Geräte mit 3 MeV begrenzt ist. Deshalb könnte Γ auch kleiner sein, was eine Vergrößerung von τ nach sich zöge. M_0 beträgt 1530 Elektronenmassen.

Die Bezeichnung derart kurzlebiger Teilchen als Resonanzen rechtfertigt sich durch das Auftreten der Diagrammspitze, deren Form der graphischen Darstellung von Resonanzerscheinungen weitgehend ähnelt.

Soviel über das ω^0 -Meson.

Es gibt noch andere Resonanzen, die mit derselben Methode aufgespürt wurden. Unter den Mesonenresonanzen (auch Baryonenresonanzen sind bekannt!) sind die mit η und ρ bezeichneten zu nennen. η^0 tritt nur neutral auf, seine Masse ist $1070 \cdot m_0$. η^0 zerfällt in drei Pionen. ρ kann neutral oder geladen sein: ρ^0 , ρ^+ , ρ^- . Seine Masse beträgt $1460 \cdot m_0$, beim Zerfall bilden sich zwei Pionen. Die Lebensdauer liegt bei η und ρ zwischen 10^{-23} und 10^{-22} sek. η ist im Sinne der Quantenfeldtheorie (siehe den Aufsatz in Nr. 4 der „Wiss. Nachr.“) ein skalares, ρ und ω sind Vektorteilchen.

Literatur:

1. Umschau in W. u. T., 1. 7. und 1. 8. 1963, S. 393 und S. 469. A. Citron: Fortschritte in der Hochenergiephysik.
2. Phys. Blätter, Heft 3 und 5, März und Mai 1963, S. 104 und 207. H. Rechenberg: Elementarteilchen.
3. Phys. Rev. Letters, 1. 10. 1961, S. 178.

Das Feldionenmikroskop

Dem Bestreben, mit Hilfe des Mikroskops zu immer stärkeren Vergrößerungen fortzuschreiten, ist eine natürliche Grenze gesetzt. Sobald der Objektdurchmesser die Wellenlänge des einfallenden Lichtes unterschreitet, enden die Möglichkeiten des Lichtmikroskops. Erst die Erfindung des Elektronenmikroskops erlaubte eine radikale Steigerung

des Auflösungsvermögens. Seit etlichen Jahrzehnten leistet es auf allen möglichen Gebieten, vor allem in der Biologie, wertvollste Dienste. Trotz den enormen Vergrößerungen, die damit erreicht wurden, konnte zur atomaren Mikrostruktur nicht vorgedrungen werden. Dies war dem Feldionenmikroskop vorbehalten.

Schon sein Vorgänger, das 1936 von E. W. Müller konstruierte Feldelektronenmikroskop, arbeitet nicht mehr als Durchstrahlungsgerät. Die Elektronen, welche die Oberfläche einer feinsten Metallspitze auf den Leuchtschirm abbilden, werden vielmehr von ihr selbst emittiert. Im Inneren eines vollständig evakuierten Glasgefäßes, das etwa die Form einer Brownschen Röhre hat, befindet sich eine Metallspitze (der Radius der Spitzenkalotte beträgt zirka 10^{-6} cm) als Kathode, die von einer ringförmigen Anode umgeben ist. Zwischen den Elektroden liegt die Spannung von einigen kV. Infolge der Feinheit der Spitze erreicht die Feldstärke 40 Millionen V/cm und zwingt die Metallelektronen, senkrecht zur Oberfläche auszutreten und nach geradlinigem Flug auf dem etwa 10 cm entfernten Schirm ein Bild zu erzeugen.

Ragen aus der Spitzenoberfläche Atome hervor, dann erhöhen sie die Feldinhomogenität und verursachen eine größere Emissionsstromdichte als glatte Oberflächenregionen. Dieser von Einzelatomen effektuierte kräftigere Elektronenstrahl macht sie auf dem Schirm als hellere Scheibchen von etwa 2 mm Durchmesser sichtbar. Die Wärmebewegung erteilt nämlich den Elektronen eine schwache seitliche Geschwindigkeitskomponente, welche für die Streuung verantwortlich ist. Kühlung schränkt die Streuwirkung ein. Der Vergrößerungsfaktor ist der Quotient von Leuchtschirmabstand und Spitzenradius, also $10:10^{-5} = 1$ Million. Wegen der Streuung waren die Einzelatome schlecht erkennbar. Wohl aber konnte die Wärmebewegung des Spitzenmaterials als eigenartige gegenseitige Verschiebung der Bildpunkte wahrgenommen werden. Außerdem werden nur jene Details erfaßt, welche die de Broglie-Wellenlänge der abbildenden Elektronen nicht unterschreiten.

Um das Auflösungsvermögen weiter zu verbessern, entwickelte E. W. Müller 1951 das Feldionenmikroskop. Infolge der größeren Ionenmasse ist

1. die de Broglie-Wellenlänge wesentlich kleiner als bei Elektronen,
2. der Einfluß der Wärmebewegung auf die Streuung von geringerer Bedeutung. Das heißt aber, hinsichtlich der Vergrößerungszahl und der Bildschärfe ist das Ionengerät dem Elektronengerät überlegen.

Seine Wirkungsweise geht aus Abb. 5 hervor. Wieger steht eine submikroskopisch feine Metallspitze dem Leuchtschirm am Boden des Gerätes gegenüber. Sie ist durch Anlegen einer Hochspannung von 10—30 kV von einem

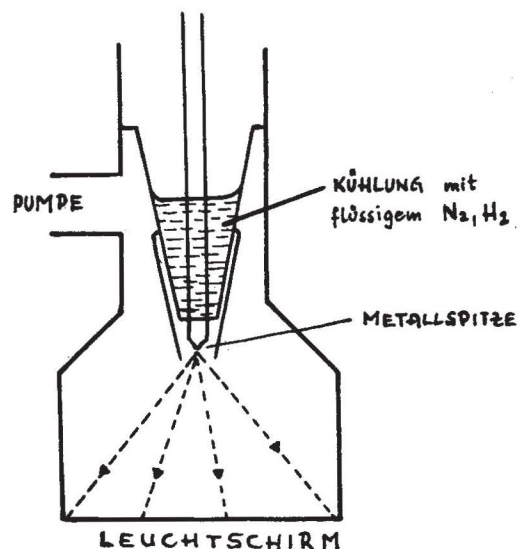


ABB 5

elektrischen Feld umgeben, das infolge der durch die Winzigkeit der Spitze bedingten starken Inhomogenität Feldstärken bis zu 500 MV/cm aufweist. Dadurch wird das Füllgas (Ne oder He) ionisiert. Die Ionen (sie entstehen beim Auftreffen der Gasatome auf die Spitze) bewegen sich von der Spitze aus radial gegen den Schirm, auf dem sie ein Leuchtmuster erzeugen. In unmittelbarer Nähe jedes Atoms der Spitzenoberfläche ist das Feld stärker, so daß von jedem Atom ein kräftigerer Ionenstrahl ausgeht und dort, wo er den Schirm trifft, das Atom abbildet. Um die Verdampfung der Spitzenoberfläche infolge der riesigen Feldstärke zu unterbinden, wird mit flüssigem H₂ oder N₂ gekühlt. Außerdem kommen als Spitzenmaterial nur hochschmelzende Metalle in Betracht.

Der Anblick von Fotos des Leuchtschirmmusters ist wahrhaft erregend. Man sieht Atom neben Atom sitzen in der durch das Kristallgitter vorgeschriebenen regelmäßigen Anordnung. Wird das Bild mit der Lupe systematisch untersucht, so fallen sowohl jene Stellen auf, an denen ein Atom fehlt, als auch solche, wo sich Fremdatome eingenistet haben. Versetzungen von Atomgruppen — also Gitterfehler — treten ebenso in Erscheinung wie die Feinstruktur von Korngrenzen. Auf S. 561 des unten erwähnten Heftes 18, 1963 der „Umschau i. W. u. T.“ befinden sich vier ausgezeichnete gelungene Fotografien von Iridium-, Platin-, Molybdänkristallen und einer Pt-Co-Legierung.

Durch Heranziehen der Farbfotografie wird die Ermittlung von Veränderungen der Atomanordnung im Laufe der Zeit (durch Adsorption, Oxydation, Verdampfen usw.) besonders einfach und übersichtlich. Zuerst erfolgt die Aufnahme mit Rotfilter, nach einer gewissen Zeit mit Grünfilter. Werden nun die beiden Dias exakt zur Deckung gebracht, dann erscheinen die Stellen, wo Atome abgewandert sind, rot die Orte, an denen sich Atome neu festsetzten, grün. Die an ihrem Platz verbliebenen Atome präsentieren sich in einer gelblichen Mischfarbe. Mit dieser Zweifarbertechnik werden sämtliche Veränderungen im bildmäßig erfaßten Bereich gleichzeitig deutlich.

Die Bedeutung des Feldionenmikroskops für Metallurgie und Festkörperphysik ist außerordentlich. Wir nennen als Beispiele die höchst aktuelle Untersuchung der Adsorptions- und Korrosionsvorgänge, der Gleitbahnen bei der Verformung plastischer Stoffe sowie die Erforschung der Feinstruktur von Legierungen.

Das Auflösungsvermögen des Gerätes bei Verwendung von He als Füllgas liegt unter 2,7 Å.

Literatur:

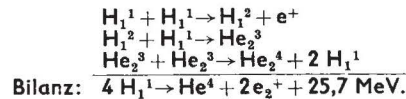
1. Umschau in W. u. Te., 15. 12. 1950, S. 761. E. W. Müller: Das Feldelektronenmikroskop.
2. Umschau in W. u. Te., 1. 10. 1957, S. 573. E. W. Müller: Einzelne Atome jetzt sichtbar.
3. Umschau in W. u. Te., 15. 9. 1963, S. 560. E. W. Müller: Fortschritte in der Feldionenmikroskopie.

Magnetische Plasmakäfige

Der Lebensstandard des Menschen ist in hohem Maße von der ausreichenden Darbietung billiger Energie abhängig. Mit der technischen Nutzbarmachung der Kernenergie erschloß sich eine Quelle, deren spezifische Ergiebigkeit in weitem Abstand die der konventionellen chemischen und elektrischen Energieträger übertrifft. Die Aufschließung der Kernenergie kann durch Kernspaltung oder durch Kernfusion erfolgen. Die erstere hat zum Bau zahlreicher Reaktoren geführt, welche im Energiehaushalt der Welt schon jetzt eine bedeutende Rolle spielen. Dennoch konzentriert sich die Forschung überall mit besonderem Eifer auf die kontrollierte Kernfusion. Das hat seine guten Gründe. Vor allem verfügen wir über den notwendigen Rohstoff, das schwere Wasser, in den Weltmeeren in nahezu unbegrenztem Ausmaß. Das Ziel ist der Aufbau von Helium aus Wasserstoff, weil dabei ein namhafter Teil der umgesetzten Masse in Energie verwandelt wird, ohne daß schädlicher radioaktiver Abfall entsteht.

Helium bildet sich bei den thermonuklearen Reaktionen im Inneren der Fixsterne. Die auftretende Energietönung ermöglicht es ihnen, durch Jahrmilliarden unvorstellbare

Strahlungsmengen in den Weltraum zu senden. Der Prozeß geht nach folgendem Schema vor sich:



Je Gramm und je Mol entstehen also

$$1,5 \cdot 10^8 \text{ kcal/g bzw. } 6 \cdot 10^8 \text{ kcal/Mol.}$$

Voraussetzung für das Eintreten und die Selbsterhaltung der Reaktion ist eine genügend hohe Temperatur des Wasserstoffs. Die Wärmebewegung bewirkt dann Zusammenstöße, bei denen die Annäherung der Teilchen die Reichweite der Kernkräfte unterschreitet. In der Wasserstoffbombe vollzieht sich derselbe Vorgang, wobei ein Zünder für die erforderliche Temperatur sorgt, in dem sich eine Spaltungsreaktion (wie etwa bei der Uranbombe) vollzieht. Da dieser Vorgang außerhalb jeglicher Kontrolle abläuft, ist er für die technische Nutzung wertlos. Gelänge es ihn zu steuern, wäre die Menschheit sämtlicher Energiesorgen für Millionen Jahre entbunden.

Zwei Probleme müssen primär gelöst werden. 1. Wasserstoff — oder zweckmäßiger Deuterium — ist auf mindestens 10—20 Millionen Grad zu erhitzen. 2. Das heiße Plasma ist räumlich zu konfinieren. Da kein materielles Gefäß solchen Anforderungen standhält, versucht man, das Plasma (= heißes ionisiertes Gas) durch kräftige Magnetfelder einzuschließen. Bedauerlicherweise gelingt dies bis heute nur für ganz kurze Zeitintervalle in der Größenordnung weniger µsek.

Vor einigen Jahren schien man in England einen großen Schritt weitergekommen zu sein. Leider stellte sich jedoch bald die Irrigkeit dieser Hoffnung heraus. Trotz intensivsten Forschungsanstrengungen auf der ganzen Welt liegt das Ziel derselben noch in weiter Ferne. Die Stabilisierung der magnetisch eingeschlossenen Plasmasäule auf längere Zeit bleibt vorläufig ein unerfüllter Wunsch.

Dennoch ist es aufschlußreich, von den bisher unternommenen — unzureichenden — Stabilisierungsverfahren zu hören.

1. Das ZETA-Gerät. 1957 füllte man in England einen Al-Torus (Gesamtdurchmesser 3 m, Wandstärke 3 cm, Durchmesser des Hohlraumes 1 m) mit Deuteriumgas, das unter dem schwachen Druck von 0,001 Torr stand und durch hochfrequente elektromagnetische Strahlung leitend gemacht wurde. Den Torus umgaben viele Windungen, die zu einem Kondensatorblock führten, dessen Aufladung 500000 Joule betrug. Der Block entlud sich über die Windungen und induzierte im Deuteriumgas, das die einzige Windung der zweiten „Spule“ repräsentierte, Stromstärken bis zu 200 kA. Der Stromstoß erhitze das Gas auf 5000000°. (Durch Dopplerverbreiterung der Spektrallinien gemessen.) Ein weiteres Magnetfeld diente der Stabilisierung des Gases. Genauso, wie gleichgerichtete Ströme in parallelen Leitern einander anziehen, preßt der ungeheure Strom im Inneren des Torus das Plasma zu einer schmalen Säule längs der Torusachse zusammen. Die Erscheinung wird als Pinch-Effekt bezeichnet. Allerdings dauerte die Stabilität nur 4 msec lang. Die auftretende kräftige Neutronenemission stammte aber, wie eingehendere Untersuchungen zeigten, nicht von der erhofften Kernfusion, sondern von Vorgängen, deren Natur undurchsichtig blieb.

2. Pinchmaschinen. Man unterscheidet zwei Typen von Pinchmaschinen (das ZETA-Gerät fällt unter diese Kategorie). Die eine arbeitet mit dem azimutalen (oder Θ -Pinch), die andere mit dem linearen Pinch (oder z-Pinch). Beim ersteren erzeugt die äußere Spule ein achsiales Magnetfeld, das einen azimutalen (also die Achse des Entladungsröhres aus Al oder Quarz zylindermantelförmig umschließenden) Strom induziert, der das Plasma zur Achse hin komprimiert. Werden Magnetfeldlinien und Stromlinien vertauscht, so erhält man einen z-Pinch. Dieser ist infolge der stärkeren Krümmung der magnetischen Feldlinien ungünstiger. Falls die magnetische Feldstärke gegen die Enden des Entladungsröhres anwächst, spricht man von einer Spiegelmaschine, oder magnetischen Flasche.

Das Naval Research Laboratory baute eine Θ -Pinch-Anlage, in der drei in geeigneten Zeitabständen erfolgende Kondensatorentladungen das Gas auf $12\,000\,000^\circ$ erhitzten. Das Entladungsröhr war 180 cm lang, der Durchmesser betrug 10,5 cm, das D_2 -Plasma nahm ein Volumen von 500 cm^3 ein. Die Teilchendichte belief sich auf 10^{17} cm^{-3} . Die 3 Entladungsstöße erzeugten hintereinander die magnetischen Feldstärken

$$B_z = 10\text{ kG}, 2\text{ kG}, 150\text{ kG}.$$

Im dritten Kondensator war eine Energie von 2 Megajoule gespeichert. Das Magnetfeld war als Spiegelfeld ausgebildet.

3. Spiegelfeldmaschinen. In der UdSSR befindet sich die Spiegelfeldanlage OGRA. In das Magnetfeld wird ein Molekulationstrahl höchster Energie eingeschossen. Die Molekulationen dissoziieren dabei in unbehindert wieder entweichende neutrale Teilchen und in Ionen, welche das Feld nicht mehr verlassen können. Die Funktion des Magnetfeldes ist also die einer Ionenfalle. Die H-Ionendichte betrug 10^7 cm^{-3} , die Stabilitätsphase war sehr kurz, nämlich nur 0,5 μsek .

Vorteilhaft ist auch ein Feldverlauf, der relativ zum Plasma konvex ist. Da aber gewisse Feldlinien unvermeidlich aus dem magnetischen Käfig hinausführen, kommt es durch den Austritt von Ionen in dieser Richtung zu erheblichen Verlusten.

Der Einschub von Ionen erfolgt mittels einer Plasmakanone. In das Vakuum zwischen zwei mit einem Kondensator verbundenen Elektroden gelangt durch ein Ventil eine sehr geringfügige Gasmenge. Danach entlädt sich der Kondensator und ionisiert das Gas. Das Magnetfeld des Entladungsstromes treibt das Plasma mit Geschwindigkeiten bis zu 10^7 cm/sek in die magnetische Flasche.

Wegen der hohen Austrittsgeschwindigkeit denkt man ernstlich daran, mit Plasmakanonen Raumschiffe zu beschleunigen.

4. Stoßwellenmaschinen. Ein Hohlzylinder ist mit Sprengstoff ausgekleidet, der das Plasma allseitig umgibt. Der explodierende Sprengstoff drückt das Plasma gegen die Zylinderachse und erhitzt es auf hohe Temperatur, wobei Neutronen emittiert werden, welche zuverlässig aus Kernfusionen stammen. Zwischen Sprengstoffauskleidung und Plasma liegt eine Vakuumzone, weil das Plasma durch ein zusätzliches Magnetfeld daran gehindert wird, den ganzen Hohlraum auszufüllen.

5. Konfinuierliche Plasmaerhitzung. a) In den Stellarator-Maschinen (USA) wird das von einem Magnetfeld längere Zeit eingeschlossene Plasma durch einen kräftigen Induktionsstrom „Ohmsch“ erwärmt.

b) Beim Astron-Gerät befindet sich das Plasma ebenfalls in einem zylindrischen Röhr mit Spiegelfeld. Im Röhr fließt längs einer konzentrischen Zylindermantelfläche — der sogenannten E-Schicht — ein azimutaler Strom von relativistischen Elektronen, welche Energien bis zu 50 MeV aufweisen. Das Magnetfeld der E-Schicht erhöht die zusammenhaltende Wirkung des Spiegelfeldes beträchtlich. Durch Energieübertragung von seiten der Elektronen erfährt das Plasma die erforderliche Aufheizung allmählich und nicht stoßweise.

Im September 1963 soll nach einer Pressemeldung in Berkeley eine Plasmatemperatur von 200 Millionen Grad erzielt worden sein.

Da für den Zusammenhalt des Plasmas große magnetische Feldstärken erforderlich sind, versucht man in der letzten Zeit, die Kältetechnik zu mobilisieren. In dünnen, durch Abkühlung auf einige Grad Kelvin supraleitend gemachten Metallschichten, deren Dicke etwa 10^{-6} cm beträgt, lassen sich ohne Erwärmung enorme Stromstärken induzieren. In der Umgebung verlaufen dann gigantische Magnetfelder, die auf das Plasma einwirken. Höchste und tiefste Temperaturen auf engem Raum friedlich vereint!

Literatur: Physikalische Blätter, August 1962, S. 353. H. Völcker: Die neueren Arbeiten über Plasmaphysik und kontrollierte Kernfusionsforschung.

Berechnung von π auf 100 000 Dezimalen

Die Berechnung von π auf eine größere Anzahl von Dezimalstellen wurde erst durch die Verwendung der Potenzreihen im Rahmen eines tragbaren Rechenaufwandes möglich gemacht. Die erste Bestimmung von π durch Archimedes war $3\frac{10}{71} < \pi < 3\frac{1}{7}$.

1873 berechnete W. Shanks 707 Dezimalen, eine spätere Überprüfung zeigte aber, daß das Ergebnis nur bis zur 528. Dezimale stimmte.

1946 bestimmten D. F. Ferguson (England) und J. W. Wrench (USA) unabhängig voneinander 808 übereinstimmende Dezimalen.

1949 ermittelte G. W. Reitwieser (USA) mit der elektronischen Rechenmaschine ENIAC 2035 Stellen in einer Rechenzeit von 70 Stunden.

1954 fanden S. C. Nicholson und J. Jeanel mit dem Computer NORC in 13min 3089 Stellen.

1958 benützte F. Genuys (Paris) die IBM 704. Nach 100min waren 10000 Dezimalen bekannt. Sie erwiesen sich nach Überprüfung mit der englischen Rechenmaschine PEGASUS als richtig.

1961 berechnete J. M. Gerard (London) mit der IBM 7090 in 39min 20000 Stellen.

1961 ermittelten D. Shanks und J. W. Wrench jr. ebenfalls mit der IBM 7090 (und zwar zwei Tage vor Gerard) auf zwei Arten in $4\text{h } 22\text{min}$ bzw. $8\text{h } 43\text{min}$ 100265 übereinstimmende Dezimalen von π . Zur Notierung des Ergebnisses waren 20 Druckseiten erforderlich.

Die ersten 60 Stellen lauten:

$$3,1415926535 8979323846 2643383279 5028841971 6939937510 5820974944 \dots$$

In den meisten Fällen benützte man die Formel von John Machin

$$\pi = 16 \cdot \arctg \frac{1}{5} - 4 \cdot \arctg \frac{1}{239}.$$

Literatur: Phys. Blätter, Heft 3, März 1963, S. 111. K. Strubecker: Berechnung von π auf 100000 Dezimalen.

Hyperfragmente

Durch die Entdeckung zahlreicher früher unbekannter Elementarteilchen lernte man auch neue Organisationsformen der Materie kennen. Dazu zählen die Mesonenatome, in denen an Stelle der Elektronen negative Mesonen um den Kern kreisen. Infolge der größeren Masse ist der Bahnradius kleiner und das Mesonenatom nimmt im Vergleich zum normalen Atom ein bedeutend kleineres Volumen ein. Im Positroniumatom kreist ein Elektron und ein Positron um den gemeinsamen Schwerpunkt. Nun ist es auch gelungen, Hyperonen in den Kern einzubauen. Die polnischen Physiker M. Danysz und J. Pniewski beobachteten im Jahre 1953 Kerne, in denen ein Neutron durch ein Λ -Hyperon ersetzt ist. Natürlich sind solche Hyperfragmente instabil, die Lebensdauer des Λ -Teilchens beträgt ja nur $2,5 \cdot 10^{-10}\text{ sek}$.

Die Bildung des Hyperonenfragments beginnt mit der Zerstörung eines Kerns durch ein Höhenstrahlteilchen. In der Fotoemulsion äußert sich die Kollision in einem „Zerfallstern“. Eine der Spuren des Sterns rührt vom Hyperfragment.

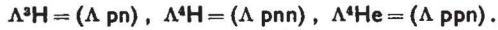
Im Atomforschungsinstitut der CERN bei Genf erhielt man Hyperbruchstücke durch Beschuß der Fotoemulsion mit einem Strahl von negativen Kaonen (=K-Hyperonen), deren Impuls 1,5 GeV/c betrug. Die Spur der Hyperfragmente war nur wenige Millimeter lang. Bis Mai 1963 wurden etliche 100 Hyperfragmente registriert. Aus der Energie-, Massen- und Impulsbilanz geht die Bindungsenergie des Λ -Hyperons hervor (aber nur, wenn lauter geladene Teilchen bei der Reaktion entstehen).

Daraus erhält man weiter Spin und Isospin der verschiedenen Anregungszustände des Hyperkerns.

Im März 1962 konnte bei CERN sogar ein Doppel-Hyperkern festgestellt werden. Das ist ein Kern, in dem 2 Neutronen durch 2 Hyperonen ersetzt sind. Er bildete sich bei Beschuß gewöhnlicher Kerne mit negativen Kaonen vom Impuls 1,5 GeV/c. Unter den Bruchstücken findet sich ein Ξ -Hyperon, das nach einem Wegstück von 357 μ völlig abgebremst wird. Das ruhende Ξ reagiert mit einem leichten Kern (vermutlich C): Von den zwei Spuren, die dabei entstehen, stammt die kürzere (Länge 3 μ) von einem Doppel-Hyperkern (wahrscheinlich von $\Lambda\Lambda$ Be). Aus der Existenz von Doppel-Hyperkernen darf auf eine gegenseitige Anziehung der Λ -Hyperonen geschlossen werden.

Es kam auch vor, daß der nach der Sprengung zurückbleibende Restkern ein Λ -Hyperon eingefangen hatte.

In der He-Blasenkammer wurden beobachtet



Literatur: CERN-Courier, Mai 1963, S. 68. E. S. Burhop und W. C. Lock: International Conference on Hyperfragments.

Weltraumobservatorien

Die Himmelsbeobachtung von Standpunkten außerhalb der Erdatmosphäre hat mit 7. März 1962 begonnen. An diesem Tage wurde OSO (=Orbital Solar Observatory) gestartet. Der Satellit war im Verlaufe von 77 Tagen 1000 Stunden lang in Betrieb und meldete laufend alle möglichen Daten der Sonnenstrahlung.

Die nächste Sonde dieser Art heißt OGO (=Orbital Geophysical Observatory) und soll in Kürze (der Bericht stammt vom August 1963) auf eine Umlaufbahn um die Erde gebracht werden, in der die Instrumente dauernd der Erde zugewandt bleiben. Gemessen wird die Stromdichte der geladenen Teilchen, das Magnetfeld und die Strahlung auf vielen Frequenzen werden.

Für das Jahr 1964 ist schließlich der Start von OAO I (=Orbital Astronomical Observatory) vorgesehen, dessen Masse sich auf 1650 kg belaufen wird. Er enthält vier 8zöllige Spiegelteleskope für die Messung der Ultraviolettstrahlung des gesamten Himmels. Ferner einen 16-Zoll-Reflektor, der die Strahlung von einigen Hundert sorgfältig ausgewählten Fixsternen im Bereich von 1160 bis 3000 \AA ermitteln soll.

1965 soll ihm OAO II mit einem 36-Zoll-Reflektor an Bord folgen.

Die Entsendung derart kompliziert ausgestatteter Raumsonden hat ihre guten Gründe.

a) Da ist vor allem die Tatsache maßgebend, daß die Lufthülle der Erde weite Bereiche des Spektrums auslöscht,

besonders die ultraviolette und die γ -Strahlung. Um sich die wichtigen Informationen, die in diesem Sektor enthalten sind, zu verschaffen, bleibt nur ein Weg offen: Beobachtungsstationen außerhalb der Atmosphäre.

b) Die tonnenschweren optischen Instrumente sind auf der Erde hohen mechanischen Beanspruchungen durch die Gravitationskräfte ausgesetzt, die bei Konstruktion und Betrieb berücksichtigt werden müssen. Vor allem erfährt der oft riesige Glaskörper mancher Teleskope — z. B. der 5-Meter-Spiegel auf dem Mount Palomar — durch das Eigengewicht Deformationen, die eine merkliche Verschlechterung der optischen Eigenschaften implizieren. Glas verhält sich nämlich wie eine Flüssigkeit von enormer Viskosität. Ein ausgeklügeltes Schwenk- und Stützsystem ist erforderlich, um die Verformungen rückgängig zu machen oder wenigstens in tragbaren Grenzen zu halten. Auf einer Umlaufbahn um die Erde fällt diese Schwierigkeit zur Gänze weg.

c) Die Luftunruhe setzt der Vergrößerung, d. h. dem Winkelaufklärungsvermögen eine unübersteigbare Schranke. Die erfolgreiche Himmelsbeobachtung ist nur in Nächten zweckmäßig, in denen die Atmosphäre genügend ruhig ist. Die maximale Winkelaufklärung von 0,3'' wird schon mit 12-Zoll-Instrumenten erreicht. Der vorgesehene 36-Zoll-Reflektor von OAO wird sie auf 0,1'' verbessern.

Die Luftunruhe verbreitert auch das Bild der Sterne auf der Fotoplatte zu kleinen Fleckchen. Dasselbe Abbild, nach Ausschaltung der Luftstörung aufgenommen, ist wesentlich schärfer. Das Licht konzentriert sich dann auf eine kleinere Fläche und die erforderliche Belichtungszeit verkürzt sich.

d) Schließlich ist bei OAO die unangenehme Streuung des Hintergrundlichtes sowie das Leuchten der höchsten Luftschichten beseitigt.

OAO wird vermutlich Sterne registrieren, die 100mal schwächer sind (das sind fünf Größenklassen) als die schwächsten vom 5-Meter-Spiegel wahrgenommenen Sterne.

Überdies macht man sich auch Gedanken über ein γ -Strahlenteleskop. Der Brechungsindex von γ -Strahlen unterscheidet sich so wenig von 1, daß Linsengeräte völlig ausscheiden. Wohl aber zieht man die Ausnützung der Totalreflexion in Erwägung. An zwei Zylinderflächen mit zueinander senkrechten Achsen werden die von der punktförmigen Strahlungsquelle A ausgehenden γ -Strahlen durch Totalreflexion abgelenkt (Abb. 6a). Sie vereinigen sich wieder in B und geben dort ein scharfes Bild.

Ein anderer Konstruktionsvorschlag verwendet die Beugung an konzentrischen ringförmigen Zonen aus Gold. Die Strahlen treten zwischen den Ringen hindurch, und eine von der Breite d der Ringe und Zwischenräume abhängige Wellenlänge wird in einem Punkt fokussiert. (Abb. 6 b).

Literatur: Scientific American, August 1963, S. 29. A. I. Berman: Observatories in Space.

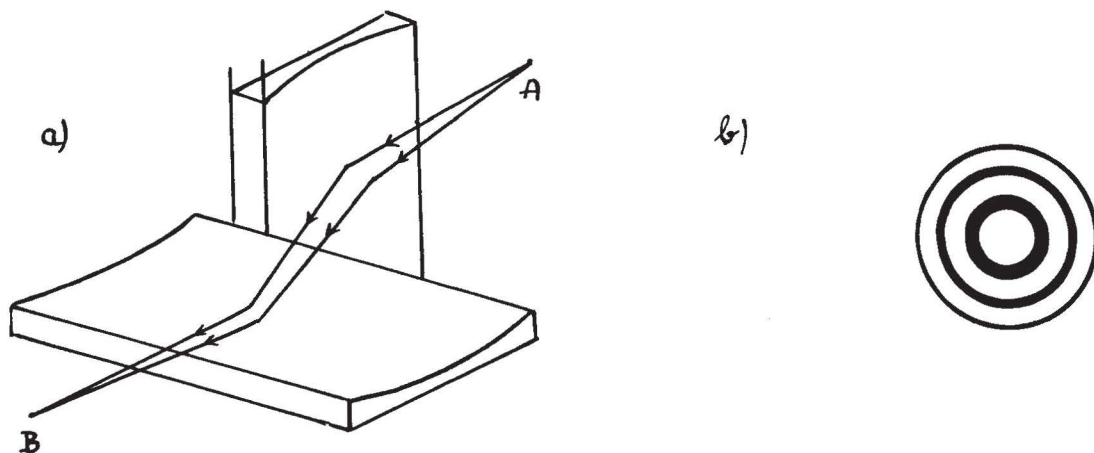


Abb. 6

Neubestimmung der Venusmasse

Eine sehr wichtige Aufgabe bestand für die Venussonde Mariner II in der Neubestimmung der Venusmasse, weil dadurch eine bessere Kenntnis der astronomischen Einheit (=Abstand Erde—Sonne) vermittelt wird. Zu diesem Zweck berechnete man aus dem Bahnverlauf der Sonde (u. a. mit Hilfe von 22000 Messungen des Dopplereffektes) die Venusmasse. Der bisherige Wert von 0,8148 Erdmassen ($\pm 0,05\%$) wurde auf 0,81485 Erdmassen ($\pm 0,005\%$) verbessert.

Mariner II funkte insgesamt 11 Millionen Meßdaten zur Erde, deren Auswertung eine nach Jahren zählende Zeit in Anspruch nehmen dürfte.

Literatur: Scientific American, Juli 1963, S. 70. J. N. James: The Voyage of Mariner II.

Neues vom optischen Maser (=Laser)

Der Ausbau der Masertechnik schreitet stürmisch voran. (Siehe den diesbezüglichen Aufsatz in Nr. 1 der „Wissenschaftlichen Nachrichten“). Seit den ersten Berichten über den optischen Maser (der Mikrowellenmaser wurde schon früher untersucht) sind erst etwa vier Jahre vergangen und schon beschäftigen sich allein in den USA an die 500 Arbeitsgruppen mit der Entwicklung des neuartigen Gerätes. Zahlreiche Erfolge zeugen von der intensiven Forschungstätigkeit. Besonderes Augenmerk wandte man der Vermehrung der ausgestrahlten Frequenzen zu. In dieser Hinsicht bewährten sich vor allem die Gasentladungsmaser, welche Wellenlängen zwischen 5900 Å und 35000 Å liefern. Das ist besonders deshalb wichtig, weil im optischen Bereich 80 Millionen Televisionskanäle zur Verfügung stünden, falls der Maser in der Nachrichtentechnik eingesetzt würde.

Der Bruchteil der Pumpenergie, der vom Maser monochromatisch und kohärent ausgestrahlt wird, ist zwar noch gering, nämlich 1%, doch hofft man mit Halbleitermasern auf 10% und mehr zu kommen.

Bei Festkörpermäsern besteht die Möglichkeit, die Emissionsfrequenz durch geeignete Wahl der Arbeitstemperatur zu beeinflussen. Reines Galliumarsenid liefert beispielsweise bei 20°C eine Wellenlänge von 9000 Å, bei sehr tiefen Temperaturen 8400 Å.

Im folgenden sind einige neuere Anwendungen beschrieben.

1. Der Riesenlaser. Bekanntlich hebt die Pumpstrahlung Elektronen auf ein höheres Energieniveau, von dem sie zunächst auf ein metastabiles Niveau gelangen, das sie nicht verlassen können, dessen Besetzung mit Elektronen also ständig wächst. Erst ein äußerer Anstoß induziert den Übergang zum Grundzustand. Wird nun der eine der beiden Spiegel an den Enden des Lasers durch einen „shutter“ verdeckt, so erreicht die Auffüllung des metastabilen Zustands enorme Werte. Bei Öffnung des shutters erfolgt die Rückkehr der Elektronen augenblicklich in derart großer Zahl, daß die emittierte Strahlung höchste Werte annimmt. Eine solche Anordnung heißt Riesenlaser. In der Praxis haben sich Ausstrahlungsleistungen von 50 MW ergeben, allerdings nur für die kurze Spanne von 10 nsek ($=10^{-8}$ sek). Fügt man in der Längsrichtung des Laserkristalls einen zweiten unverspiegelten Kristall hinzu, dann steigt die Strahlungsenergie unter gleichzeitiger Verkürzung der Emissionszeit an. Auf diese Weise wurde bis heute eine maximale Emissionsleistung von 500 MW erzielt! Die Divergenz des austretenden Strahls blieb unter $3'$, sein Querschnitt unter 1 cm^2 . Die Fokussierung des Strahls mit Hilfe von Linsen auf $10^{-3} \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ bietet keine Schwierigkeiten. Im Brennfleck ist dann die Strahlungsdichte $5 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$ und ruft an dieser Stelle einen Strahlungsdruck von etwa 750000 at hervor. Der Strahl greift also mit $3/4 \text{ kp}$ im Brennfleck an.

Die elektrische Feldstärke im Bereich des Laserstrahls beläuft sich bei den angegebenen Intensitäten auf etwa 10^9 V/cm und konkurriert mit dem inneratomaren Feld.

Für die Wellenlänge 6943 Å konnte sogar das Auftreten der harmonischen Oberschwingung von 3472 Å, ebenso in Nitrobenzen der Ramaneffekt beobachtet werden. Anfänglich betrug die Intensität der Oberschwingung nur das 10^{-6} -fache der Grundschwingungsintensität, doch wurde ihr Anteil bis auf 20% gehoben.

2. Netzhautschweißen. Wird ein ganz schmaler Laserstrahl, dessen Energie 1 Joule unterschreitet, für die Zeit von weniger als 1 msec auf die Stelle gelenkt, an der die Retina des Auges abgelöst oder gerissen ist, so koagulierte das Eiweiß und der lose Lappen wird wieder an seine Unterlage „geschweißt“. Die kurze Bestrahlungszeit erübrigt außerdem die Feststellung des Auges während der Operation. Das Verfahren wurde an Tieren erfolgreich erprobt.

3. Wiederholung des Michelsonversuchs. Man benützte einen He-Ne-Gasentladungsmaser. Die Genauigkeit reichte aus, um bereits bei einer Änderung der Lichtgeschwindigkeit um 3 mm/sec eine deutliche Verschiebung der Interferenzstreifen herbeizuführen. Nichts dergleichen wurde beobachtet.

4. Der Maser als mögliches Navigationsgerät. In Abb. 7 sind S_2, S_3, S_4, S_5 Spiegel, die mit den Seiten der quadratischen Anordnung Winkel von 45° einschließen. S_1 ist eine Glasplatte, durch die das Licht teilweise austritt, teilweise reflektiert wird. Zwischen den Quadratecken sind vier Laser L_1, L_2, L_3, L_4 montiert. Die Lichtstrahlen laufen gleichzeitig in entgegengesetzten Richtungen entlang dem Quadratumfang. Wird nun das Gerät um eine zur Bildebene senkrechte Achse gedreht, so ändert der Dopplereffekt die Frequenz des in verschiedenen Richtungen fortschreitenden Lichtes nach oben und nach unten ein wenig. Es treten Schwebungen auf, die mühelos gemessen werden können.

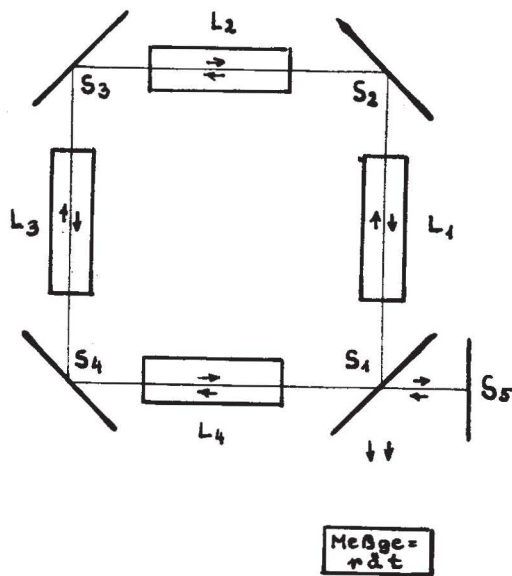


ABB. 7

Für die Wellenlänge $1,1 \mu$ und die Winkelgeschwindigkeit $2^\circ/\text{min}$ beträgt die Schwebungsfrequenz 500 Hz. Die Drehung des Geräts besorgt z. B. ohne unser Zutun die Erdrotation. In New York resultiert aus der Erdrotation die Schwebungsfrequenz von 40 Hz. Da die Winkelgeschwindigkeit von der geographischen Breite abhängt, ergibt sich die Möglichkeit der Bestimmung dieser Koordinate aus der Schwebungsfrequenz.

5. Spektralanalyse ohne Zerstörung des untersuchten Materials. Ein fokussierter gepulster Laserstrahl verdampft augenblicklich eine winzige Menge der Sub-

stanz, auf die er gerichtet ist. Der glühende Dampf gestattet die spektroskopische Untersuchung. Der Durchmesser des abgedampften Kraters beträgt nur 40μ und ist nachher kaum sichtbar.

6. Der Maser in der Radioastronomie. Im Wasserstoffatom kann sich der Spin des Umlaufelektrons nur in zwei Richtungen einstellen: entweder parallel oder antiparallel zum Bahndrehimpuls. Die Energie der beiden Zustände ist etwas verschieden. Beim Umklappen des Spins wird die Energiedifferenz als 21-cm-Radiostrahlung ausgesandt. (Das Umklappen des Spins eines H-Elektrons erfolgt im Weltraum etwa alle 10^8 Jahre.) Die Radioastronomie interessiert sich sehr für die 21-cm-Linie, weil aus ihr weitgehende Schlüsse auf die Verteilung des Wasserstoffs im Weltraum, in den Galaxien usw. gezogen werden können.

Die Gesamtintensität der 21-cm-Wellen, welche die Erdoberfläche treffen, dürfte sich um 10 W bewegen. Nur der millionste Teil dieses Wertes stammt von einer Galaxis, das sind 10^{-6} W. Die Antennenfläche des Radioteleskops der Harvard-Universität ist 300 m^2 . Dies ist — grob kalkuliert — der 10^{14} te Teil der 510 Millionen km^2 großen Erdoberfläche. Daher stammen lediglich 10^{-18} W der von der Antenne empfangenen Leistung aus der 21-cm-Strahlung einer Galaxis. Mit Hilfe eines Maserdetektors, der an das Radioteleskop angeschlossen war, konnte diese unvorstellbar geringfügige Quantität noch festgestellt werden. (Das Eigenrauschen ist ja beim Maser ausgeschaltet.)

Literatur:

1. Scientific American, Juli 1963, S. 34. A. L. Schawlow: Advances in Optical Masers.
2. Scientific American, Juni 1963, S. 94. Morton S. Roberts: Hydrogen in Galaxies.

Höchstfrequenter Ultraschall

Die Erweiterung unserer physikalischen Kenntnisse nährt sich in der Hauptsache aus vier Quellen. In erster Linie wird sie durch die Entdeckung neuartiger Phänomene gefördert, man denke nur an den Froschschenkelversuch, die Röntgenstrahlen, die Radioaktivität. Der Fortschritt hat aber auch eine theoretische Quelle. Sobald ausreichendes Tatsachenmaterial über ein Teilgebiet gesammelt und geordnet ist, beginnt die Suche nach übergeordneten Prinzipien, welche die Mannigfaltigkeit der Erscheinungen unter einem einheitlichen Gesichtspunkt verstehen lassen. Aus dem theoretischen Überbau erwachsen dann Konsequenzen, deren Gegenstand nicht mehr in den bereits bekannten Fakten enthalten ist. Neue Gebiete öffnen sich der Forschung. Die theoretische Vorhersage des Positrons durch Dirac, auf Grund deren dieses Teilchen in der Höhenstrahlung wirklich gefunden wurde, belegt diese Art der wissenschaftlichen Entwicklung besonders eindrucksvoll. Jedoch sind es nicht nur kühne Gedankenkonzeptionen, die uns in entscheidender Weise weiterführen, sondern auch die zähe Suche nach den Ursachen kleinster Unstimmigkeiten. Gar oft stieß man so auf tiefere Zusammenhänge und sah sich plötzlich in eine Landschaft versetzt, die den Wissensdurst auf unbetretenen Pfaden vorwärts lockte. Welche weitreichenden Folgen ergeben sich doch aus der Entdeckung der Feinstruktur der Spektrallinien im Zuge des immer besser werdenden Auflösungsvermögens der Spektroskope.

Schließlich sind es extreme Versuchsbedingungen — von solchen wird dieser Aufsatz berichten —, die jene Abweichungen von der Norm zeigen, welche die Unzulänglichkeit vorliegender Modelle erweisen und deren Modifikation erzwingen.

Theorie und Praxis des Ultraschalls bilden schon lange einen festgefügteten Teil der Akustik. Seit einiger Zeit interessiert man sich besonders für Erscheinungen, die im höheren GHz-Bereich auftreten. Sie versprechen deshalb neue Einsichten, weil dann die Länge der Schallwellen mit der des Lichts vergleichbar wird. Daher bevorzugen die Experimentatoren Anordnungen, in denen auf einen Kristall gleichzeitig Ultraschall und Mikrowellen einwirken. Die Verhaltensweise des bestrahlten Körpers verändert sich sehr, wenn die Frequenz ansteigt. Sendet man z. B. in zueinander senkrechten Richtungen Licht und Ultraschall durch einen Kristall, so erfährt das Licht eine

Beugung wie an einem Raumgitter. Bei 1 GHz hört die Beugung des Lichtes auf. Statt dessen wird das Licht an den Schallwellen reflektiert, sobald der Winkel zwischen beiden Strahlen kein rechter mehr ist. Die Reflexion erfolgt unter der Bragg'schen Bedingung wie die Reflexion kurzwelliger elektromagnetischer Wellen an den Netzebenen eines Raumgitters. Da die Ultraschallwellen mit $v = 4 \cdot 10^5 \text{ cm/sek}$ fortschreiten, sind die Verhältnisse die gleichen wie bei einem bewegten Spiegel. Ein Teil der Lichtenergie wird an die Schallwellen abgegeben und diese erfahren eine Verstärkung. Gleichzeitig erniedrigt sich die Lichtfrequenz.

Um hochfrequenten Ultraschall zu erzeugen wird ein Quarzstab mit einem Ende in einen mit Mikrowellen besetzten Hohlraumresonator gebracht und dort von diesen zum Schwingen angeregt. Die Schallwellen laufen zwischen den Stäben infolge der Reflexion hin und her. Die Dämpfung nach jeder Umkehr wird in einem Oszilloskop sichtbar gemacht. Sie ist bei 20° C ziemlich groß, hört aber bei Temperaturen unter 20° K vollständig auf. Oberhalb 40° K ist sie dem Frequenzquadrat proportional.

Anwendungen:

1. Verstärkung des Ultraschalls. An die Enden eines Halbleiters (CdS, ZnO), in dem Ultraschallschwingungen von 20 GeV laufen, wird eine Spannung gelegt, die den Elektronen dieselbe Geschwindigkeit erteilt, mit der die Schallwelle fortschreitet. Die Schallschwingungen der Gitterionen verursachen periodische Veränderungen der Stärke des sie umgebenden elektrischen Feldes. In seinen Wellentälern sammeln sich die Elektronen. Nun wird die Spannung und damit die Elektronengeschwindigkeit geringfügig erhöht. Die Elektronen eilen den Wellentälern etwas voraus, wobei sie gegen das Feld Arbeit leisten und diesem Energie zuführen, welche die kinetische Energie der Ionen erhöht: Der Ultraschall wird verstärkt, und zwar auf dem Wege von $\frac{1}{2} \text{ mm}$ um den Faktor 10^4 !

Umgekehrt absorbieren die Leitungselektronen der Metalle Ultraschall. Doch endet die Absorption im Temperaturbereich, in dem das Metall supraleitend ist. Die Schallabsorption äußert sich in einer entsprechenden Erwärmung des Metalls. Bei 10 GHz dürften entlang einer Wegstrecke von 0,1 mm 50% der Schallenergie verschluckt werden. Transversale Wellen erfahren eine schwächere Dämpfung als longitudinale.

2. Nachweis von GHz-Schall. Ein Quarz, in dessen Gitter magnetische Atome eingebaut sind, empfängt von einer Seite Ultraschall, von der anderen Seite Mikrowellen. Beide haben die Frequenz 10 GHz. Die Quarztemperatur wird so niedrig gehalten, daß das tiefste Energieniveau viel stärker besetzt ist als das nächsthöhere (entgegengesetzter Spin, sonst gleiche Quantenzahlen). Die Frequenz ist so gewählt, daß von beiden Strahlungsarten entweder Elektronen auf das höhere Niveau gehoben werden (Absorption der Wellen) oder in den Grundzustand zurückkehren (induzierte Emission, d. h. Verstärkung der Strahlung). Im dynamischen Gleichgewicht (gleich viele Elektronen werden gehoben und fallen zurück) findet keine Absorption mehr statt.

Sendet man nun zunächst Mikrowellen durch den Quarz, so werden diese absorbiert. Die Absorption der Mikrowellen hört aber auf, wenn zusätzlich genügend kräftiger Ultraschall durch den Kristall geht, weil er die zurückfallenden Elektronen wieder anhebt, bis beide Niveaus gleich besetzt sind. Dann geben die Mikrowellen keine Energie mehr ab. Auf diese Weise indiziert das Verschwinden der Mikrowellendämpfung die Anwesenheit von Ultraschallwellen.

3. Der akustische Maser. Wir nehmen einen paramagnetischen Kristall mit drei Energieniveaus $E_1 < E_2 < E_3$ und schicken durch ihn Ultraschall- und Mikrowellen in zueinander senkrechten Richtungen. Die Schallfrequenz sei gerade so groß, daß die Energie eines Phonons (=Schwingungsquant) genau den Wert $E_3 - E_2$ hat. Die Energie des Photons der elektromagnetischen Strahlung sei hingegen $E_3 - E_1$. Der Schall bewirkt Übergänge zwischen den Niveaus 2 und 3, die Mikrowellen zwischen 1 und 3. Beide trachten, „ihre“ Niveaus gleich stark zu besetzen. Wenn aber Niveau 3 die meisten Elektronen enthält (das ist der Fall, weil es von zwei Seiten gespeist wird), dann induziert der einfallende Ultraschall ständig Elektronenübergänge von 3 auf 2, während 3 laufend

von den Mikrowellen aufgefüllt wird. In der induzierten Rückkehr nach 2 besteht die Schallverstärkung des Gerätes.

Was die Anordnung betrifft, ist noch zu sagen, daß der paramagnetische Kristall beiderseits durch je einen Quarzstab verlängert wird. Die Schallwellen gehen in der Längsrichtung durch, die Mikrowellen fallen seitlich auf den mittleren (paramagnetischen) Kristall.

An Stelle eines Verstärkers kann auch ein Schalloszillator gebaut werden. Zu diesem Zweck ist für die Reflexion der Schallwellen an den Endflächen des mittleren Kristalls Sorge zu tragen. Der Oszillator arbeitet auch bei Frequenzen, die nicht mehr mit piezoelektrischen Methoden zugänglich sind.

Literatur: Scientific American, Juni 1963, S. 60.
K. Dransfeld: Kilomegacycle Ultrasonics.

Bericht über Beschleunigungsmaschinen

Seit der Fertigstellung des Protonensynchrotrons (abgekürzt: P-S) in Brookhaven (33 MeV) und Meyrin bei Genf (28 GeV) ist einige Zeit verstrichen, ohne daß Meldungen über neuere Entwicklungen allgemein bekannt geworden wären. Dessen ungeachtet ist kein Stillstand eingetreten, vielmehr wurden bemerkenswerte Erfolge erzielt, über die zu berichten es sich lohnt.

1. Beginnen wir mit dem P-S der CERN in Meyrin. Dort lief im Herbst 1963 das großangelegte Neutrinoexperiment an, welches mit verbesserter Technik diesen subatomaren, schwer greifbaren Teilchen ängstlich gehütete Geheimnisse entreißen soll. Im Augenblick, da dieser Bericht geschrieben wird, ist über den Verlauf der Untersuchung nichts Näheres bekannt. Jedoch läßt das Stillschweigen der Beteiligten auf größere Erfolge schließen. Zu dieser Annahme berechtigt auch der zufriedenstellende pausenlose Probelauf vom 13. bis 16. Juni 1963. Den Protonen wurden Energien von 21,1 und 23,8 GeV erteilt. Die Wirkungsweise des P-S ist der Impulsbetrieb. D. h. in kurzen Abständen werden immer neue Protonengruppen beschleunigt. Der einzelne Beschleunigungsakt heißt Puls. Beim Probelauf erfolgte alle drei Sekunden ein Puls, der im Durchschnitt $7 \cdot 10^{11}$ Protonen erfaßte.

Der Protonenstrom wurde auf ein Target von 2 mm Durchmesser gelenkt. Um die entstehenden Pionen zu fokussieren, fand ein Magnethorn Verwendung, in dem die maximale Stromstärke 300 000 A betrug. Stromleiter waren Röhren, in denen Kühlwasser floß. Nach außen war das Gerät durch eine 23 m dicke Stahlwand abgeschirmt. Das Eindringen fremder Partikeln mußte nämlich unter allen Umständen verhindert werden. Zur Untersuchung der interessierenden „Ereignisse“ benützte man eine 20-t-Blasen-kammer (2 m weit und 1,6 m hoch) und eine Funkenkammer. Die Blasen-kammerspuren wurden in 27 000 Fotos festgehalten.

Das Ziel des Versuches ist a) festzustellen, welche Wechselwirkungen zwischen Neutrinos und Antineutrinos stattfinden; b) die Suche nach einem Boson (das ist ein Teilchen mit ganzzahligem Spin), das bei den sogenannten „schwachen“ Wechselwirkungen vermutlich eine ähnliche Rolle spielt wie Pionen und Kaonen bei den „starken“ (starke Wechselwirkungen treten bei Kernkräften auf, mittlere sind die elektromagnetischen und schwache diejenigen zwischen Neutrinos und gewöhnlicher Materie. Je stärker die Wechselwirkung, desto kürzer die Reaktionszeit); c) direkte Beobachtung von Neutrino-Reaktionen in der Blasen-kammer. Der erzielte Neutrino-strom dürfte den bisherigen Höchstwert 100fach übertreffen.

Ein anderes Versuchsprogramm betraf die Reaktion von positiven Pionen mittlerer Energie mit Neutronen. 204 000 Blasen-kammerfotos wurden zu diesem Zweck angefertigt.

Ein für die leidende Menschheit unter Umständen bedeutungsvoller Versuch war die von P. Fowler untersuchte Abbremsung von negativen Pionen in Wasser. Da, wie sich herausstellte, diese den Großteil ihrer Energie erst im allerletzten Teil der Bremsbahn (wenn diese in Wasser verläuft) abgeben, besteht die Möglichkeit, bösartige Tumore (die wasserreich sind) mit Pionen intensiv zu bestrahlen, ohne das vorgelagerte Gewebe stärker zu

schädigen. Noch stehen aber keine Pionenstrahlen ausreichender Intensität zur Verfügung. Daher konzentriert man sich derzeit auch sehr auf die Konstruktion von „Mesonenfabriken“.

In enger Verbindung damit steht das Problem, den im Inneren des P-S laufenden Teilchenstrahl möglichst vollständig nach außen zu werfen. Die Auslenkung von 5% des inneren Strahls galt bereits als staunenswerte Leistung. Durch Konstruktion von sektorfokussierten Maschinen stieg der Prozentsatz auf 30 bis 40, in Oak Ridge sogar auf 85. Die Stromstärke des inneren Protonenstrahls bewegt sich um 50 μ A, es wurden aber auch schon 0,5 mA erreicht.

Am 5. Juni 1963 traf bei CERN eine neue Blasen-kammer mit den Abmessungen $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ein. Sie enthält flüssigen Wasserstoff von -250°C . Das Magnetfeld zur Krümmung der Bahnsuren ist 17 000 Oersted stark. Das Stahlblech der Tankwände ist 6 cm dick. Gesamtgewicht 50 t.

2. In Hamburg nähert sich der Bau eines Elektronensynchrotrons (abgekürzt E-S) für 6 GeV seiner Vollendung. Der Betrieb wird zu Beginn 1964 aufgenommen werden (die Meldung stammt vom September 1963). Dann besitzt Deutschland ein ebenso leistungsfähiges E-S wie derzeit die Harvard-Universität (In England entsteht ein 4-GeV-E-S), doch ist ein späterer Ausbau auf 7,5 GeV vorgesehen.

Höchste Elektronenenergien sind besonders für die Strukturanalyse des Nukleons, aber auch anderer Teilchen unerlässlich, weil nur jene Details des Feinbaus greifbar werden, welche die de Broglie-Wellenlänge der bei den Streuversuchen einfallenden Elektronen überschreiten. Die reduzierte Wellenlänge ist für 6 GeV nach Formel (6) der Nr. 3 der „Wissenschaftlichen Nachrichten“ $\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{1,242}{6,2} = 0,03 \text{ f}$. Das sind etwa 3% des Nukleonendurchmessers. Also stehen in dieser Richtung sehr interessante Untersuchungen bevor.

Die Elektronen treten in das E-S mit 40 MeV ein, die sie in einem linearen Vorbeschleuniger erhalten haben. Sie bewegen sich auf Kreisen vom Radius $R=50 \text{ m}$. 48 Magnete bewirken die Bahnkrümmung, die Beschleunigung erfolgt in 16 Hohlraumresonatoren. Damit die Bahnkrümmung trotz zunehmender Geschwindigkeit konstant bleibt, muß während jedes Beschleunigungsaktes die magnetische Feldstärke ansteigen. Sie variiert zwischen 42 und 6300 Oersted. Die Elektronen erreichen die vorgesehene Endenergie nach 10 000 Umläufen in 10 msec und gelangen durch Einwirkung des Ablenk-magneten ins Ziel. Die Stabilisierung ihrer Bahn erfolgt nach der Methode des alternierenden Gradienten, bei der die Magnete abwechselnd radial fokussieren und defokussieren. Einem konstanten Magnetfeld überlagern sich Quadrupolfelder. Die Placierung der Magnete erfordert die Genauigkeit von 0,1 mm auf 100 m. Die Temperatur muß auf Bruchteile von 1°C konstant gehalten werden. Bodenschwankungen werden von Pendelstützen aufgefangen, welche einen hohlen Betonring tragen, auf dem die 48 Magnete sitzen. Von Puls zu Puls wird die Energie in Kondensatorgruppen gespeichert. Der Schwingkreis Kondensator—Magnetspule hat die Eigenfrequenz 50 Hz. Hierbei findet eine Drosselspule Verwendung, welche 166 t wiegt. Es wurden zwei Experimentierhallen errichtet, damit in einer der nächste Versuch aufgebaut werden kann, während noch in der anderen das jeweilige Experiment läuft.

Die Energiezufuhr an die Elektronen beläuft sich je Umlauf auf 6 MeV, von denen jedoch 2,6 MeV (das sind über 40% der eingespeisten Energie) durch Synchrotronstrahlung verlorengehen. Als Synchrotronstrahlung wird die Energiemenge W bezeichnet, die im Synchrotron — ebenso wie bei jeder Bewegung von Ladung längs gekrümmter Bahn — auf Kosten der kinetischen Energie der geladenen Partikeln emittiert wird. W berechnet sich im relativistischen Bereich aus der Formel

$$W = \frac{2}{3} e^2 \cdot \frac{c}{R^2} \left(\frac{E}{m_0 c^2} \right)^4,$$

in welcher e die Elementarladung, R der Bahnradius, c die Lichtgeschwindigkeit, m_0 die Ruhmasse und E die Energie der Teilchen bedeutet. Man erkennt aus der Formel, daß W für Protonen infolge der höheren Ruhmasse um einige Größenordnungen kleiner bleibt als für

Elektronen, also im P-S eine unbedeutende Rolle spielt. Deshalb kann im P-S langsam und muß im E-S rasch beschleunigt werden.

Die Beschleunigung besorgen Mikrowellen von 500 MHz, also mit der Wellenlänge $\lambda=60$ cm, mit der Durchschnittsleistung von 100 kW (Maximaleistung 400 kW). Die Länge der Beschleunigungsstrecke in jedem der 16 Hohlraumresonatoren ist $\frac{\lambda}{2} = 30$ cm. Man erwartet einen Elektronenstrahl von 10^{11} Elektronen je Puls.

Das vordringlichste Versuchsprogramm der Anlage betrifft folgende Fragenkomplexe:

a) Photoproduktionsprozesse, z. B. Erzeugung von Mesonen aus γ -Quanten. Zu diesem Zweck wurde in Paris eine Flüssigwasserstoff-Blasen-kammer von 80 cm Durchmesser in Auftrag gegeben.

b) Streuung von Elektronen an Nucleonen. Damit werden die bahnbrechenden Arbeiten von R. Hofstadter (siehe Nr. 3 der „Wissenschaftlichen Nachrichten“) und seinem Team mit wirksameren Mitteln fortgesetzt werden. Das Magnetspektrometer wird den Teilchenimpuls bis maximal 6 GeV/c auf 1% genau messen. Seine beiden Ablenkmagnete wiegen zusammen 80 t.

c) Simultane Erzeugung mehrerer Partikeln. Der Nachweis erfolgt u. a. durch einige Funkenkammern. Jede ist 2 m breit und hat einen 180 t schweren Ablenkmagnet.

Die Kosten des Hamburger E-S belaufen sich auf 110 Millionen DM. Davon entfallen 85 Millionen DM auf den eigentlichen Bau, 25 Millionen DM auf die experimentellen Einrichtungen. Schon jetzt beschäftigt das Institut 350 Personen, unter ihnen 70 Physiker.

3. In Erevan (UdSSR) befindet sich derzeit ein 7-GeV-E-S in Bau.

In den USA schreitet die Errichtung einer noch gewaltigeren Anlage gut voran, deren Bauzeit sich auf mehrere Jahre erstreckt. Es handelt sich hierbei um kein E-S, sondern um einen Elektronenlinearbeschleuniger, der nach der ersten Ausbaustufe 20 GeV, nach der zweiten sogar 40 bis 45 GeV erzielen soll. Das evakuierte geradlinige Beschleunigungsrohr wird die statliche Länge von 3048 m besitzen!

4. Zukunftspläne. a) Das Komitee für künftige Beschleuniger unter Prof. E. Amaldi schlug den an CERN beteiligten Regierungen vor, den Bau folgender Anlagen zu finanzieren:

- Protonenbeschleuniger für 300 GeV;
- Elektronenbeschleuniger für über 10 GeV;
- Hochstromprotonenbeschleuniger für 10 GeV zur Produktion von Kaonen, Antiprotonen und Neutrinos in größerem Umfang;
- Hochstrom-Protonenbeschleuniger für 0,5 bis 0,75 GeV als „Pionenfabrik“.

b) In den USA unterbreiteten Forscher des General Advisory Committee of the Atomic Energy Commission ähnliche Vorschläge, und zwar

- ein 200-GeV-P-S in Berkeley;
- Vorarbeiten für ein 600- bis 1000-GeV-P-S in Brookhaven. Allenfalls in Zusammenarbeit mit der Sowjetunion.

Literatur:

1. CERN-Courier, Heft 7 und 8, Juli und August 1963.
 2. Phys. Blätter, Heft 9, September 1963, S. 407.
- W. Jentschke und P. Stähelin: Das deutsche Elektronensynchrotron.

Dünkste Drähte

Wie aus einer Meldung der Umschau in Wissenschaft und Technik, Heft 20, vom 15. Oktober 1963, S. 644, hervorgeht, ist man bereits in der Lage, Drähte herzustellen, deren Durchmesser 1μ unterschreitet. Ihre Fertigung ist für Kleinstgeräte erforderlich, die in modernen elektronischen Anlagen Verwendung finden.

Da das Ziehen derart dünner Drähte aus mechanischen Gründen zum Bruch führt, bettete man den Draht in ein Glasröhrchen, erwärmte es und dehnte es, sobald der plastische Zustand erreicht war, auf 1000 und mehr Meter aus. Der Glasmantel verhinderte die Zerstörung des Drahtes. Bis jetzt war das erreichte Durchmesserminimum etwa 25μ .

Anti-Xi-Null gefunden

An anderer Stelle (vergleiche den Aufsatz „Identifizierung der Resonanzen“ in dieser Nr. der „Wissenschaftlichen Nachrichten“) wurde angedeutet, wie man sich bei der Suche nach neuen Elementarteilchen (diese etwas problematische Bezeichnung möge aus Gründen der Sprachökonomie beibehalten werden) von den noch nicht realisierten Quantenzahlkombinationen und dem empirisch gut fundierten Glauben an die Existenz des Antiteilchens zu jedem Teilchen leiten lassen kann. Der letzte Vertreter aus der Familie der bis jetzt in Erscheinung tretenden Teilchen, der noch nicht aufgefunden war, war das Antiteilchen $\bar{\Xi}^0$ zum neutralen Xi-Hyperon. Das Xi-Hyperon — die Masse liegt bei etwa $2600 m_0$ ($m_0 =$ Elektronenmasse) — kommt in zwei Ladungszuständen vor, die durch Anhängen von „0“ oder „-“ an das Symbol Ξ kenntlich sind: Ξ^0, Ξ^- . Die zugehörigen Antiteilchen sind $\bar{\Xi}^0, \bar{\Xi}^+$.

Nun meldeten C. Baltay, J. Sandweib, H. D. Taft unter dem Titel „Observation of the Production of a $\bar{\Xi}^0$ -Particle“ in Phys. Rev. Lett. vom 15. August 1963, S. 165, die Entdeckung von $\bar{\Xi}^0$ in der dem Synchrotron von Brookhaven angeschlossenen 20-Zoll-Blasen-kammer (Füllung mit flüssigem Wasserstoff). Die späte Auffindung ist begreiflich, weil ein neutrales Teilchen keine Spuren hinterläßt und in diesem Falle auch die primären Zerfallsprodukte von $\bar{\Xi}^0$ ungeladen sind.

Man lenkte einen im Synchrotron erzeugten Antiprotonenstrahl vom Impuls 3,69 GeV/c auf Protonen und erwartete die Reaktion

$$\bar{p} + p \rightarrow \Xi^- + \bar{\Xi}^0 + \pi^+ \quad (1)$$

Die Umwandlungsmodi von Ξ^+ und Ξ^0 waren bekannt, nämlich

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^- \quad (2)$$

$$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0 \quad (3)$$

Danach müßte $\bar{\Xi}^0$ gemäß

$$\bar{\Xi}^0 \rightarrow \bar{\Lambda}^0 + \pi^0 \quad (4)$$

zerfallen (π^0 ist sein eigenes Antiteilchen).

Die neutralen Λ -Hyperonen (Masse $2183 m_0$) sind ebenfalls instabil. Sie gehen in ein geladenes Nucleon und ein Pion über

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^- \quad (5)$$

$$\bar{\Lambda}^0 \rightarrow \bar{p} + \pi^+ \quad (6)$$

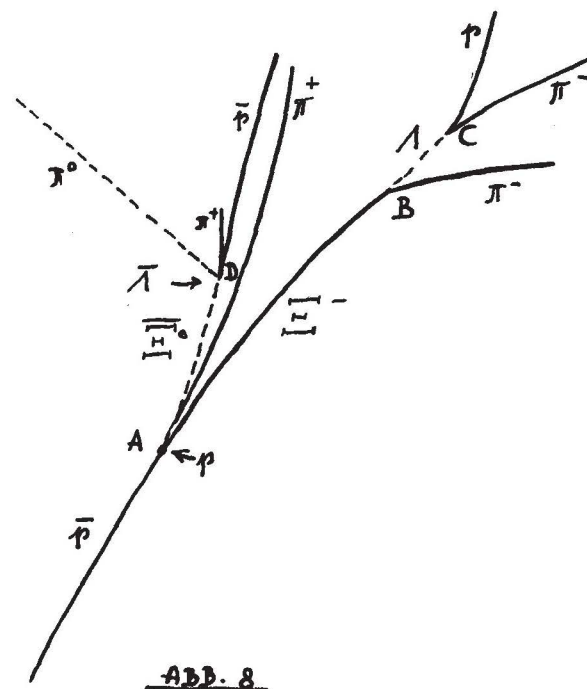


Abb. 8

Abb. 8 zeigt schematisch den Spurenverlauf des eben beschriebenen Ereignisses. Ein Antiproton \bar{p} geeigneter Energie trifft im Punkt A auf ein Proton, Reaktion (1) findet statt. Nur die Spuren von π^+ und Ξ^- sind sichtbar. Ihre Krümmung im Magnetfeld ist auf Grund des verschiedenen Ladungsvorzeichens nach entgegengesetzten Seiten orientiert. Die strichlierte Linie steht für die nicht existente Spur von Ξ^0 . Im Punkt B ereignet sich die Reaktion (2). Die Λ^0 -Spur fehlt, erst ab C erkennt man die Zerfallsprodukte von Λ^0 nach (5).

Fatalerweise zerfällt Ξ^0 in zwei neutrale Partikeln gemäß (4). Vom Punkt D an, wo Λ^0 zu bestehen aufhört, sind wieder die von (6) geforderten Spuren von \bar{p} und π^+ sichtbar.

Es wurden 300000 Fotos der Blasenkamerspuren angefertigt. Auf dreien konnten Ereignisse der gesuchten Art nachgewiesen werden. Bahnkrümmung, spezifische Ionisierung, Energien, Impulse und Streuwinkel aller beteiligten Partikeln wurden auf Grund der Meßergebnisse von einem IBM-Computer ermittelt und in Einklang mit den theoretischen Forderungen befunden. Damit ist der Existenznachweis für Ξ^0 in zuverlässiger Weise erbracht.

Experimentelle Unterscheidung von Neutrinos und Antineutrinos

Die Verschiedenartigkeit von Teilchen und Antiteilchen kann derzeit mit zwei Methoden festgestellt werden, entweder durch Paarvernichtung (bzw. Paarerzeugung) oder durch Beobachtung der inversen Reaktion.

Das bekannteste Beispiel für die erste Methode ist die Paarvernichtung von Elektron und Positron

$$e^- + e^+ = \gamma + \gamma.$$

Dabei entstehen zwei Photonen von je 0,511 MeV Energie. Ebenso beweiskräftig ist der inverse Vorgang der Paarerzeugung, der ein γ -Quant von mindestens 1,02 MeV

unter Mitwirkung eines Atoms (das ist wegen der Impuls- und Spinerhaltung nötig) in ein e^+ , e^- -Paar umwandelt. Die Anwendung dieser Methode setzt voraus, daß 1. ausreichend starke Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Objekten statthaben und daß 2. die zur Verfügung stehenden Teilchenstromdichten groß genug sind. Erleichtert werden die Experimente sehr, wenn die Partikeln geladen sind, weil sie dann von Magnetfeldern getrennt werden.

Die zweite Methode muß bei ungeladenen Partikeln mit schwacher Wechselwirkung angewandt werden. Zu diesen Teilchen gehören die Neutrinos.

Wie an anderer Stelle bemerkt, steht uns nur in Kernreaktoren eine ergiebige Antineutrinoquelle zur Verfügung, da in dieser der Zerfall freier Neutronen gemäß



sehr häufig stattfindet. Cowan und Reines ließen den Antineutrinostrom auf Protonen fallen und beobachteten die Reaktion



Die inverse Reaktion zu (1) ist



Die Realisierung von (2) ist derzeit aussichtslos, weil man noch keine Neutrinoquelle extremer Ergiebigkeit zur Verfügung hat.

Deshalb versuchte R. Davis auf indirektem Wege, die Verschiedenheit von ν und $\bar{\nu}$ nachzuweisen. Wären ν und $\bar{\nu}$ identisch, dann müßte der Prozeß (2) auch eintreten, wenn Neutronen dem Antineutrinostrom eines Reaktors ausgesetzt werden. In Ermangelung freier Neutronen verwendete er die im Kern von Cl^{37} gebundenen Neutronen. Die Umwandlung eines Neutrons des Cl^{37} -Kerns in ein Proton führt Cl^{37} in A^{37} über. Wie das Experiment zeigte, entstand jedoch kein Argon, obwohl die Nachweisgenauigkeit ausgereicht hätte, selbst ein Zehntel der zu erwartenden A-Menge mit Sicherheit festzustellen.

Damit ist ein erster Versuch erfolgreich abgeschlossen, aus dem auf die Unterschiedlichkeit von Neutrinos und Antineutrinos geschlossen werden darf.

Literatur: Physikalische Blätter, Heft 1, Jänner 1963. W. Braunbeck: Neutrinos überall.

CHEMIE

Dr. Edith Jarisch

Kernmagnetische Resonanzspektroskopie

Zur Strukturklärung organischer Verbindungen haben neben den klassischen Methoden der organischen Analytik in den letzten Jahrzehnten zunehmend physikalische Methoden an Bedeutung gewonnen. Im allgemeinen bieten diese Methoden den Vorteil, daß sie für die zu untersuchenden Substanzen nicht nur sehr schonend sind, sondern auch Fragen beantworten können, die die Analytik allein nicht klären kann. Diese Fragen betreffen insbesondere den sterischen Bau organischer Verbindungen und die Wechselwirkungen der einzelnen, zu einem Molekülverband zusammengeschlossenen Atome aufeinander. So wurden z. B. durch die Bestimmung der Absorptionsbanden im sichtbaren, IR- und UV-Bereich, durch Elektronenbeugungsaufnahmen und im besonderen durch die Röntgenstrukturanalyse viele neue Erkenntnisse über den Feinbau organischer Verbindungen gewonnen, welche auf rein chemisch-analytischem Wege nie erreicht werden konnten.

In den letzten Jahren wurde eine neue Untersuchungsmethode, die kernmagnetische Resonanzspektroskopie entwickelt, mit deren Hilfe es bereits gelang, noch subtilere und schwierigere Fragen zu klären, als je mit einem anderen Verfahren zuvor. Mit Hilfe dieses Verfahrens, welches die magnetischen Eigenschaften der Atomkerne ausnützt, wurden bereits sehr interessante Probleme der Stereochemie und der Dynamik organischer Moleküle geklärt. Praktische Bedeutung erlangte diese Methode bereits auch, z. B. bei der Erdölverarbeitung, da sie leicht den Anteil an paraffinisch, olefinisch oder aromatisch gebundenem Wasserstoff bestimmen läßt und so für die einzelnen Erdölfraktionen zu Durchschnittsformeln führt.

Kernmagnetische Resonanzspektren, abgekürzt NMR-Spektren (Nuclear Magnetic Resonance), werden erhalten, weil Atomkerne mit magnetischen Eigenschaften sich in einem Magnetfeld nur in bestimmten Vorzugslagen orientieren können und beim Übergang von einer Lage in die andere elektromagnetische Strahlung aus dem Hochfrequenzbereich absorbieren können. Die Frequenz der absorbierten Strahlung hängt außer vom Atomkern selbst, auch von der Stärke des angelegten Magnetfeldes ab. Ein Atomkern ist aber immer von Elektronen umgeben und zwar nicht nur von seinen eigenen, sondern auch von den Elektronen benachbarter Atome. Je nach der Anzahl dieser den Kern umgebenden Elektronen wird das äußere Magnetfeld geschwächt und somit die Absorptionslinie in einen anderen Frequenzbereich verschoben. Die Stärke des Abschirmungseffektes hängt daher offensichtlich von der chemischen Umgebung des betreffenden Kernes ab.

Die magnetischen Eigenschaften der Atomkerne

Es gibt vier Kerntypen mit folgender Charakterisierung:

1. Kerne mit kugelsymmetrischer Ladungsverteilung und ohne Spin. Sie besitzen daher kein magnetisches Moment; diese Kerne geben kein NMR-Spektrum. Sie besitzen die Kernspinquantenzahl $I=0$.

Beispiele: ^{12}C , ^{16}O .

2. Kerne mit kugelsymmetrischer Ladungsverteilung und Spin. Infolge der Ladungsrotation besitzen sie ein magnetisches Moment, ihre Kernspinquantenzahl $I=1/2$.

Beispiele: ^1H , ^{19}F .

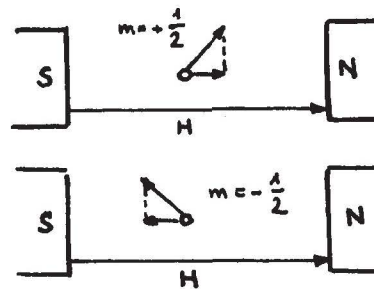
Typ 1 und 2 besitzt das Quadrupolmoment $eQ=0$.

3. und 4. Kerne mit ellipsoider Ladungsverteilung und Spin. Ihre Kernspinquantenzahlen $I > 1/2$, ihr Quadrupolmoment ist positiv oder negativ.

Von besonderem Interesse sind die Kerne des Typs 2, mit $I=1/2$, wie z. B. Wasserstoff- und Fluoratome, da mit

Hilfe des NMR-Spektrums ihre Stellung und räumliche Lage und auch eventuelle Lageänderung bestimmt werden können.

Ein Kern mit $I=1/2$ kann sich grundsätzlich nur in zwei Richtungen zu einem äußeren Magnetfeld einstellen (Richtungsquantelung, Analogie zum Zeeman-Effekt).



Orientierung der magnet. Kernmomente in einem Magnetfeld

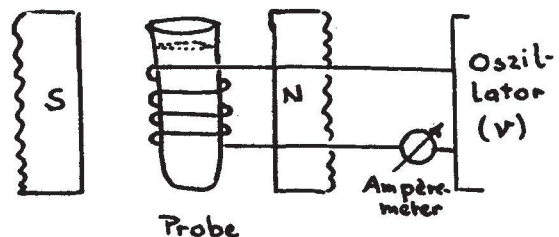
Diese beiden Richtungen entsprechen der magnetischen Kernspinquantenzahl $m=+1/2$ und $m=-1/2$. Bei der Einstellung für $m=+1/2$ hat die Projektion der Richtung des magnetischen Kernmomentes auf die Achse des von außen wirkenden Magnetfeldes die gleiche Richtung wie dieses, bei $m=-1/2$ die entgegengesetzte.

Dementsprechend besitzt ein Kern mit $m=+1/2$ gegenüber einem Kern mit $m=-1/2$ eine günstigere Lage und muß zum Übergang in die andere Lage Energie absorbieren. Die Größe der Energiedifferenz ΔE zwischen den beiden Kernzuständen hängt von der Stärke des äußeren Feldes H und den magnetischen Eigenschaften des Atomkerns (gyromagnetisches Verhältnis γ) ab. Bei Energiezufuhr kann es zur Absorption eines Quants der Größe $h\nu=\Delta E$ kommen. Die Frequenz hängt somit von H , der Stärke des äußeren Feldes, und γ , den Eigenschaften des Atoms ab. Somit gilt:

$$\Delta E = \frac{\gamma h}{2\pi} H = h\nu \quad (1)$$

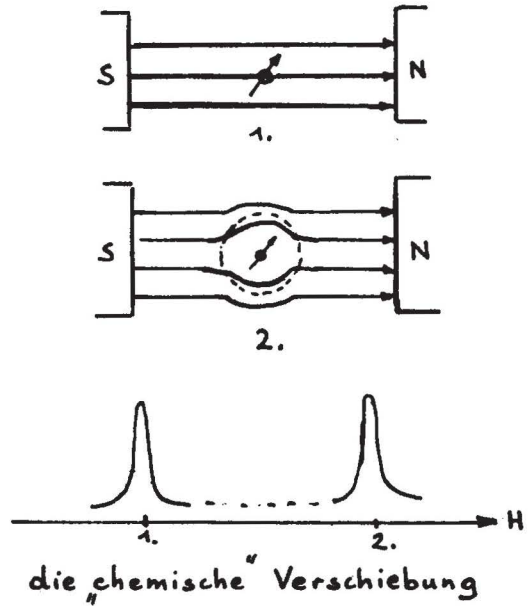
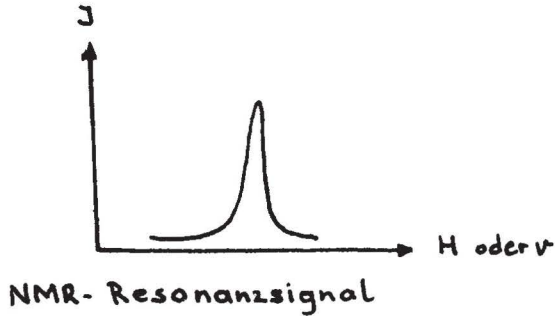
Die Aufnahme eines NMR-Spektrums:

Die zu untersuchende Probe befindet sich in einem Gefäß, welches im Inneren einer Induktionsspule liegt, die von einem hochfrequenten Wechselfeld (~ 60 MHz) gespeist wird. Probe und Induktionsspule werden in ein Magnetfeld gebracht, dessen Feldstärke H variiert werden kann.



Aufnahme eines NMR-Spektrums

Bei einer bestimmten Feldstärke, die der Resonanzbedingung entspricht, nimmt die Probe Energie aus dem Wechselfeld auf, was sich durch einen Stromanstieg bemerkbar macht, der sich mittels eines Amperemeters, welches sich im Stromkreis von Induktionsspule und elektrischem Oszillator befindet, registrieren läßt.* Wird der Resonanzbereich überschritten, durch weitere Verstärkung von H, so ist die Gleichung 1 nicht mehr erfüllt und die Stromstärke sinkt wieder auf ihren Ausgangswert zurück, man hat ein NMR-Signal für eine bestimmte Atomart erhalten.



Bei Veränderung der magnetischen Feldstärke im Bereich der Größenordnung $14 \cdot 10^3$ Oerstedt** kann auf diese Weise eine ganze Reihe von Absorptionslinien festgestellt werden, ein NMR-Spektrum wird erhalten.

Selbstverständlich kann die Versuchsanordnung auch in der Weise abgeändert werden, daß die Feldstärke H konstant gehalten, dafür aber die Frequenz des Oszillators kontinuierlich geändert wird.

Die „chemische“ Verschiebung der Resonanzlinien

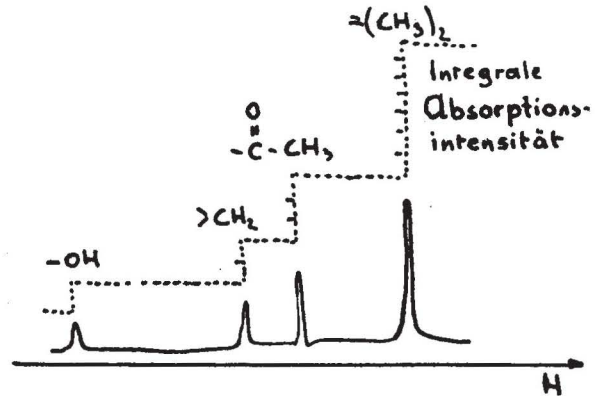
Die große Bedeutung der NMR-Spektroskopie für die Chemie liegt nun darin, daß die Resonanzlinien einzelner Atome, z. B. von Protonen, durch die Einflüsse der Umgebung, wie benachbarte C- oder O-Atome, verschoben werden, da deren Elektronensysteme das von außen auf die Protonen wirkende Feld abschirmen, also schwächen. Daher wird die Resonanzlinie erst bei einer größeren Außenfeldstärke zu beobachten sein.

Ein Atomkern mit $l=1/2$, der vollkommen frei von umgebenden Elektronen angenommen werden soll, unterliegt dem Einfluß eines magnetischen Feldes, dessen Kraftlinien durch diesen Kern nicht verändert werden, und soll bei einer bestimmten Größe von H eine Absorptionslinie zeigen. Ist der gleiche Kern jedoch von Elektronen umgeben, so werden diese mit dem Magnetfeld in Wechselwirkung treten und dieses daher in unmittelbarer Nähe des Kernes schwächen. Das bedeutet aber, daß erst bei einer entsprechend größeren Feldstärke des äußeren Magnetfeldes der für die Resonanzbedingung notwendige Wert von H in unmittelbarer Kernnähe erreicht wird.

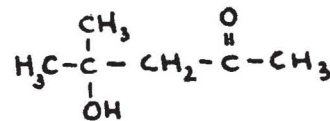
Je nach der elektronischen, d. h. chemischen Umgebung wird dieser Abschirmungseffekt eine mehr oder weniger starke Verschiebung der Absorptionslinie zur Folge haben. Es wird daher für Kerne gleicher Art, je nach ihrer Stellung innerhalb eines Moleküls ein ganzes Spektrum von Resonanzlinien erhalten. Besondere Bedeutung für die Strukturaufklärung organischer Verbindungen haben die Protonenresonanzspektren erhalten, da ein Proton, welches sich in einer CH_3 -, CH_2 -, $(\text{CH}_2)_2$ - oder OH-Gruppe etc. befindet, eine charakteristische Lage seiner Absorptionslinie zeigt.

Beispiele zur Lösung von Strukturfragen:

Ein typisches Protonenresonanzspektrum zeigt z. B. die Verbindung 2-Hydroxy-2-methylpentan-4-on. Die Gruppen -OH, $-\text{CH}_2$ -, $-\text{CO}-\text{CH}_3$ und $(\text{CH}_3)_2$ zeigen jeweils eine bestimmte Resonanzlinie, deren Intensität von der Zahl der entsprechenden Protonen abhängt.



NMR-Spektrum von



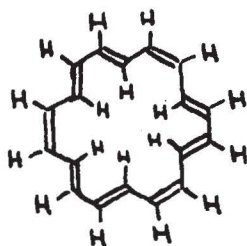
Durch elektronische Integration der Kurve findet man für die Fläche unter den Resonanzsignalen das Verhältnis 1:2:3:6, welches die Zahl der in den einzelnen Gruppen enthaltenen H-Atome angibt. Es läßt sich daher, da diese Integration bis auf 0,5% Genauigkeit durchführbar ist, diese Methode auf viele analytische Probleme anwenden.

Als besonders anschauliches Beispiel sei hier die Strukturaufklärung des C_{18} -Annulens genannt. $\text{C}_{18}\text{H}_{18}$ ist ein cyclisches Polyolefin. Wie ist nun diese Verbindung tatsächlich gebaut? Das NMR-Spektrum zeigt zunächst, daß die Resonanzlinie für 12 H-Atome in der Gegend der Resonanzlinie des Benzols liegt, dem C_{18} -Annulen also aromatischer Charakter, d. h. ebener Bau zukommt. 6 H-Atome zeigen eine, zu viel höherer Feldstärke ver-

* Anmerkung: Bei Energieabsorption der Probe tritt eine Änderung der Selbstinduktion der Spule ein.

** Anmerkung: In der Literatur wird fast überall die Bezeichnung Gauss verwendet, da im Vakuum (und praktisch auch in der Luft) die magnetische Feldstärke (gemessen in Oerstedt) numerisch gleich der magnetischen Flußdichte (gemessen in Gauss) ist.

schobene Resonanzlinie, sie befinden sich im Inneren des Ringsystems und sind daher verhältnismäßig stark abgeschirmt.



C_{18} -Annulene

Die große Differenz zwischen den extra- und intramolekularen Wasserstoffatomen wird auf diamagnetische Effekte der, unter dem Einfluß des äußeren Magnetfeldes innerhalb des C-Ringsystems zirkulierenden π -Elektronen zurückgeführt.

Bei einer Verbindung C_7H_8 war zu klären, ob es sich um ein Cycloheptatrien oder um eine Verbindung aus einem Cyclohexen mit annelliertem Dreiring handelt.



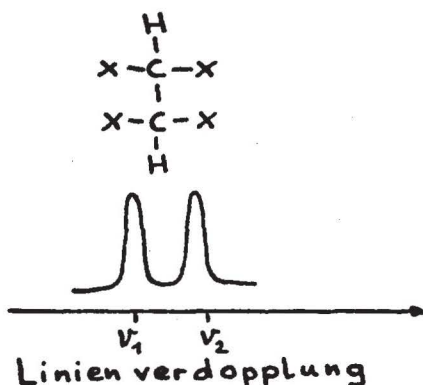
Cycloheptatrien

Es war auch zu klären, ob diese beiden Strukturen sich vielleicht in einem Gleichgewicht befinden und sich ineinander umlagern können. Hier konnte die NMR-Spektroskopie den eindeutigen Beweis liefern, daß nur die Struktur des Cycloheptatriens vorliegt.

Linienaufspaltung

Eine interessante Beobachtung, die Aufspaltung von Linien in Dubletts und Triplets, die ihre Ursache in Kopplungserscheinungen findet, konnte einige weitere Fragengruppen bei Strukturaufklärungen beantworten.

Sind z. B. in einer Verbindung mit zwei C-Atomen außer je einem H-Atom nur solche Atomarten enthalten, die keine NMR-Spektren geben, so tritt zwischen den beiden Protonen eine Spin-Spin-Wechselwirkung ein, die zu einer Linienverdopplung führt.



Linienverdopplung

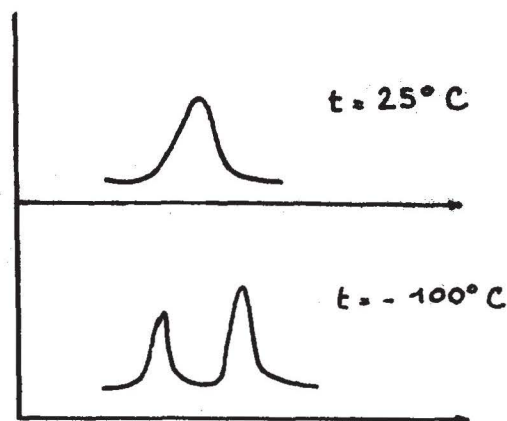
Diese, als Kopplung zu erklärende Tatsache ermöglicht festzustellen, inwieweit sich Protonen innerhalb eines Moleküls beeinflussen können, bzw. in welcher räumlichen Lage sie sich zu einander befinden, damit eine gegen-

seitige Wechselwirkung feststellbar wird. Kopplungswerte für chemisch gleichartig gebundene H-Atome, die aus der Frequenzdifferenz der Linienaufspaltung erhalten werden, hängen sehr stark von der Geometrie des Moleküls ab. Daher ermöglicht die Bestimmung von Linienaufspaltung eindeutige Aussagen über die Konformation und über cis-trans-Formen ringförmiger Moleküle zu machen.

Andererseits scheint eine Kopplung zwischen H-Atomen bei starr gebauten Molekülen über viele Bindungen hinweg dann besonders stark zu sein, wenn es sich um mesomeriefähige Systeme mit einem großen Anteil radikalischer Strukturen handelt. So findet die Linienaufspaltung der NMR-Spektren auch zur Klärung von Mesomeriefragen Anwendung. Es konnte für ungesättigte Verbindungen vom Typus des Di- und Triacetyls gezeigt werden, daß einerseits eine Kopplung des Spins der Protonen sogar über 9 Bindungen hinweg erfolgt, und daß andererseits an der Mesomerie hauptsächlich diradikalische Strukturen beteiligt sind.

Dynamische Effekte

Die räumliche Umlagerung von Molekülen, wie die Rotation von C-Atomen um ihre Bindungsachse, die Umlagerung der beiden Sesselformen des Cyclohexans oder die Verschiebung der Doppelbindungen im Cyclooctatetraen läßt sich ebenfalls mit Hilfe der NMR-Spektroskopie untersuchen.

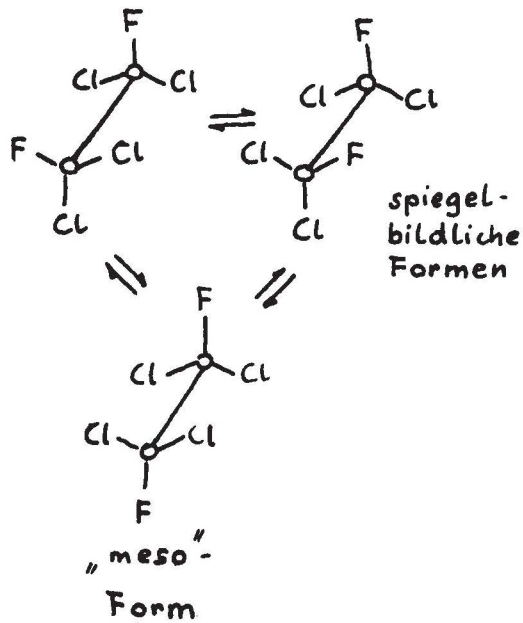


Die Temperaturabhängigkeit der Lage, Form und Aufspaltung der Resonanzlinien zeigt die Möglichkeiten, auch solche dynamische Effekte zu untersuchen.

Als Beispiel sei das 1,2-Difluor-tetrachlor-äthan gebracht. Diese Verbindung zeigt bei Zimmertemperatur eine (etwas verbreiterte) Absorptionslinie, welche durch die Fluoratome verursacht wird. Kühlt man jedoch auf -100°C ab, so zeigt sich eine Linienverdopplung. Diese Verbindung existiert tatsächlich in drei verschiedenen räumlichen Formen, den drei „Konformeren“, die aber bei Zimmertemperatur durch Rotation der beiden C-Atome sehr rasch ineinander übergehen.

Daher wird bei 25°C nur ein „Durchschnittsspektrum“ der drei Formen erhalten. Bei tiefen Temperaturen nimmt die Rotationstendenz der C-Atome ab, dadurch wird die Lebensdauer jedes einzelnen Konformeren länger. Da nun die Lage der Resonanzlinien von der Stellung der F-Atome abhängt, tritt eine Linienverdopplung ein, wobei die eine Linie den beiden spiegelbildlichen Formen, die andere der „meso“-Form zukommt.

Ähnliche Linienaufspaltung liefert auch das 1,1-Difluor-cyclohexan, mit Hilfe dessen die Aktivierungsenergie zur Umlagerung der beiden Sesselformen des Cyclohexans (ca. 12 kcal/Mol) berechnet wurde. Verwendet man an Stelle ^{12}C das Isotop ^{13}C so ergeben sich neue Aspekte. ^{13}C ist ein Atom mit $I=1/2$ und kann daher durch Spin-Spin-Wechselwirkung mit anderen Atomen, H- und F-Atomen, zu Linienaufspaltung führen. Es werden meist an ^{13}C angereicherte Substanzen verwendet, bei sehr empfindlichen Versuchsanordnungen genügt der natür-



Umwandlung von Konformeren

liche Gehalt an diesem Isotop. Diese Methode konnte die Umlagerungsgeschwindigkeit der Doppelbindungen im Cyclooctatetraen messen lassen, wobei die Temperaturabhängigkeit der Kopplungsgrößen die Deutung zuläßt, daß die Umlagerung über eine ebene Form führt, während in Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen auch das NMR-Spektrum für diese Verbindung einen nicht-aromatischen Bau erkennen läßt.

Dieser Überblick sollte das Prinzip der kernmagnetischen Resonanzspektroskopie kurz erläutern und einige Beispiele für die Anwendung dieser modernen Untersuchungsmethode geben, für die fast täglich neue Einsatzmöglichkeiten gefunden werden, und die in ihrer Leistungsfähigkeit praktisch unübertroffen ist.

Literatur: Ang. Chem. 75/1/20

Stoffzustände im Bereich hoher Drücke und Temperaturen (Diamantsynthesen)

Seitdem H. Moissau im Jahre 1893 über seine Diamantsynthese berichtete, ist im Zusammenhang mit den vielfältigen Versuchen anderer Forscher diese Synthese zu wiederholen, der Bereich höchster Drücke und Temperaturen und die Frage nach den Stoffzuständen in diesen Bereichen von besonderem Interesse geworden. Daher ist die experimentelle Erschließung dieser Bereiche immer eng an die Versuche einer Diamantsynthese geknüpft gewesen.

Um die Bedingungen zur Bildung von Diamanten zu erkennen, war zunächst die genaue Kenntnis des Zustandsdiagrammes des Kohlenstoffes notwendig. Die um 1900 einsetzenden Arbeiten zeigten aber bald, daß größte Schwierigkeiten zu überwinden waren und führten zur Notwendigkeit des technischen Beherrschens höchster Temperaturen bei höchsten Drücken. Mehr als 50jährige

Entwicklungsarbeit führte zur experimentellen und theoretischen Festlegung des Zustandsdiagrammes des Kohlenstoffes. Entscheidend dafür waren: 1. die Bestimmung des Tripelpunktes und 2. die Bestimmung der Umwandlungskurve Graphit-Diamant.

Aus thermodynamischen Daten war die Umwandlungskurve bereits von F. Simon (1924) im Prinzip richtig errechnet worden. Sie wurde später ergänzt (Leypunsky), so daß bis zu einer Temperatur von 1200 K der Kurvenverlauf festgelegt war. Durch die Entwicklung neuer Experimentiertechniken (Bridgeman 1947—1949 und Bundy 1959—1962) konnten folgende Tripelpunkte des Kohlenstoffes festgestellt werden:

1. Tripelpunkt: $C_{\text{graphit}}-C_{\text{flüss}}-C_{\text{Gas}}$ bei 4000 °K und 1000 at
2. Tripelpunkt: $C_{\text{Diamant}}-C_{\text{Graphit}}-C_{\text{flüss}}$ bei 1100 °K und 125000 at
3. Tripelpunkt: $C_{\text{Diamant}}-C_{\text{III}}-C_{\text{flüss}}$ bei 1100 °K und 650000 at.

C_{III} stellt eine dritte Modifikation des Kohlenstoffes dar, die um 15—20% dichter als Diamant ist, sie besitzt vermutlich metallischen Charakter und die Struktur von weißem Zinn.

Konnte man schon durch statische Methoden in den Bereich von 100000 at vordringen, so haben in der letzten Zeit die „dynamischen“ Methoden die Druckbereiche über 100000 at zugänglich gemacht. Diese höchsten Drücke werden mit Hilfe von Explosionswellen hoher Beschleunigungen erreicht. Die Reaktionszeiten, die für die Umwandlung von Graphit in Diamant zur Verfügung stehen sind allerdings oft äußerst kurz (1 msec-1 μ sec), es scheint jedoch gerade bei sehr hohen Drücken die Umwandlung von Graphit in Diamant besonders leicht zu verlaufen.

Bei niedrigeren Drücken (bis 100000 at) und Temperaturen im Bereich von 1200° K—3000° K kann die Umwandlung von Graphit in Diamant durch Nickel-Katalysatoren beschleunigt werden. Die Zeit beträgt hier einige Minuten bis Stunden. Die Wirkungsweise dieser Katalysatoren ist nicht bekannt.

Die Erkenntnisse, die die Anwendung dieser neuen Hochdruck-Hochtemperatur-Technik auch auf andere anorganische Stoffe gebracht hat, führte zu einer neuen Theorie über die Stoffzustände.

Durch Druckerhöhung bedingte Modifikationswechsel führen ganz allgemein — nach dem Prinzip des kleinsten Zwanges — zu Zuständen größerer Dichte, das bedeutet aber gleichzeitig auch eine Erhöhung der Koordinationszahl (K-Zahl-Regel, M. Buerger). An einer Vielzahl von Kristallen konnte diese Drucktransformation überprüft werden.

Einige Beispiele:

Koordinationszahlwechsel von

(3) → (4)	Graphit	→	Diamant
(4) → (6)	Diamant	→	C_{III}
	Quarz	→	Stishovit
(6) → (8)	KCl	→	KCl
	(NaCl-Typ)	→	(CsCl-Typ)
(8) → (12)	Ba	→	Ba
	kub. innen-	→	kub. flächen-
	zentriert	→	zentriert
	α Fe	→	γ Fe

Auch bei einigen anderen Nichtmetallen, wie Phosphor, wird eine Koordinationszahlerhöhung bei Drucksteigerung festgestellt. Gleichzeitig findet ein Übergang in den metallischen Zustand statt:



Auch für den Wasserstoff nimmt man die Existenz eines metallischen Zustandes an:



Da einer Koordinationszahlerhöhung immer auch eine Vergrößerung der spezifischen Dichte entspricht und andererseits die Metalle sich durch hohe Koordinationszahlen schon bei Normaldruck auszeichnen, hat Druckerhöhung den Übergang eines Nichtmetalls zu einer Sub-

stanz mit zunehmend metallischen Eigenschaften zur Folge:

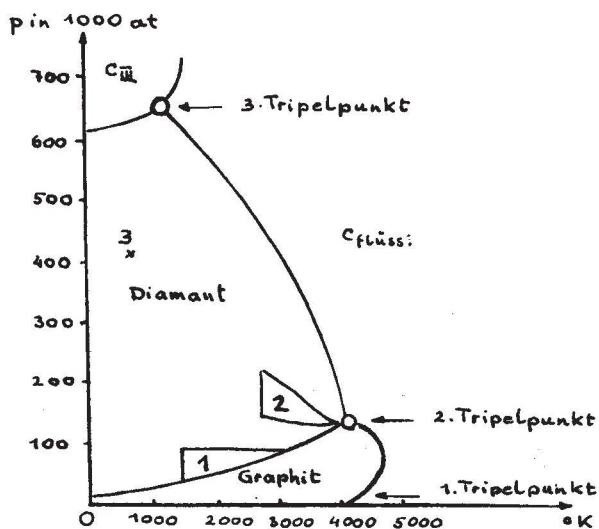
Es scheint daher allgemein zu gelten:



Dem Druck entgegen steht die Wirkung der Temperatur. Temperaturerhöhung wirkt koordinationszahlerniedrigend. Daraus läßt sich der Schluß ziehen, daß man offenbar jeden Stoff in irgendeinen Zustand zwischen metallischer und nichtmetallischer Art überführen kann, sofern nur die geeigneten Druck- und Temperaturverhältnisse auf ihn einwirken.

Zustandsdiagramm des Kohlenstoffs (F. P. Bundy)

- 1: Gebiet der katalysierten, statischen Synthese
- 2: Gebiet der Direktsynthese
- 3: Dynamische Synthese bei tiefer Temperatur



Literatur: Umschau i. W. u. T. 63/17/521, Ang. Chem. 75/4/220.

Entfernung von Schwefelwasserstoff nach dem Stretford-Verfahren

Aus Abgasen, Naturgasen, Kohlengasen aber auch verunreinigter Luft kann Schwefelwasserstoff unter Gewinnung von elementarem Schwefel nach einem neuen Verfahren abgeschieden werden. Mehrere Patente sind zu diesem, in der Praxis bestens bewährten Verfahren angemeldet worden.

Das Stretford-Verfahren umfaßt drei Stufen:

1. Das Auswaschen des Schwefelwasserstoffes aus dem Gas mit einer alkalischen Waschflüssigkeit. Diese Waschflüssigkeit enthält Salze der Anthrachinondisulfosäure (diese Verbindungen sind leicht erhältlich, da sie Zwischenprodukte bei Farbstoffsynthesen darstellen).
2. Der Schwefelwasserstoff setzt sich mit dem Carbonylradikal der Anthrachinondisulfosäure zu Schwefel und dem Reduktionsprodukt der Anthrachinondisulfosäure um.
3. Die Regeneration der Anthrachinondisulfosäure erfolgt durch Oxydation mit Luft.

Für das Auswaschen des Schwefelwasserstoffes ist ein p_{H} von 8,5 bis 9,5 erforderlich, auch muß Anthrachinondisulfosäure im Überschuß verwendet werden, in der Regel

drei- bis viermal so hoch, als die äquivalente Menge des Schwefelwasserstoffes.

Literatur: Mitteilungen d. Chem. Forschungsinst. d. Wirtschaft Österr. Jahrg. 15/2/47.

Neue Synthesen von Terephthalsäure

Terephthalsäure gewinnt als Rohstoff der Kunststoffindustrie immer größere Bedeutung. Das übliche Verfahren zu ihrer Herstellung beruht auf der Oxydation von p-Xylol. Die Abtrennung von p-Xylol aus Xylolgemischen stellt aber ein verhältnismäßig teures Verfahren dar, so daß ein neues, welches Toluol als Rohstoff verwendet, ökonomischer arbeitet (Bergbau-Forschung Essen). Die Reinheit dieser aus Toluol gewonnenen Terephthalsäure übertrifft die, der nach anderen Methoden gewonnenen Terephthalsäure.

Toluol wird mit Paraformaldehyd und konz. Salzsäure bei 70° C zur Reaktion gebracht, die wäßrige Phase von der organischen abgetrennt und diese mit Salpetersäure oxydiert. Die Oxydation geht über zwei Stufen. Zuerst wird chlorfreie Toluylsäure erhalten, welche bei weiterer Oxydation (20 at Druck und 160° C) ein Gemisch aus 40% o-Phthalsäure und 60% Terephthalsäure liefert. Terephthalsäure kristallisiert leicht und wird abzentrifugiert.

Ein neues russisches Verfahren beruht auf der oxydativen Ammonolyse von Dialkylbenzolen. Als Rohstoffe können neben p-Xylol auch Terpene verwendet werden. Bei der oxydativen Ammonolyse von Dialkylbenzolen erhält man Dinitrile, welche nach Verseifung Dicarbonsäuren liefern. Die Ammonolyse erfolgt bei Gegenwart von Katalysatoren, wie z. B. V_2O_5 mit Zusätzen von Ti und Sn, wobei die Anwesenheit von Sauerstoff wichtig ist.

Literatur: Mitt. d. chem. Forschungsinst. d. Wirtsch. Österr., Jahrg. 15/1/7,8.

Die Verwendung der Seltenen Erden

Die eigentlichen Seltenen Erden umfassen nur die 15 Elemente der Lanthaniden, es werden jedoch oft auch Yttrium und Scandium zu ihnen gezählt. Man teilt sie in zwei Gruppen: die leichteren oder Ceriterden, welche die Elemente mit den Ordnungszahlen 57—63 umfassen, und die schweren oder Yttererden, mit den Ordnungszahlen 64—75 und Y=39.

Bis 1948 war Monazitsand aus Indien, Brasilien, Australien und Skandinavien der alleinige Rohstoff; in den fünfziger Jahren sind jedoch riesige Lagerstätten von Monazitsand in den USA und in Südafrika entdeckt worden, so daß kein Mangel an Rohstoff zur Gewinnung dieser Elemente mehr herrscht. Der amerikanische Monazitsand enthält bis zu 6% Thorium, und so werden seit Anlaufen des Atomprogramms in den USA immer größere Mengen Monazitsand aufgearbeitet und auch Seltene Erden mit einem Reinheitsgrad von 99,99% hergestellt.

Die Aufarbeitung: Der Rohstoff wird durch elektromagnetische Verfahren zunächst in drei Gruppen geteilt: Zink-, Titaneisensand, Monazit. Die Seltenen Erden werden dann auf Grund der verschiedenen Löslichkeit ihrer Sulfate, Oxalate und Nitrate durch fraktionierte Kristallisation voneinander getrennt. Reduktions- und Oxydationsverfahren liefern die verschiedenen Wertigkeitsstufen dieser Elemente. Die Reindarstellung der Seltenen Erden erfolgt aus den Chloriden.

Das immer steigende Angebot und die damit verbundenen, zum Teil enormen Preisermäßigungen, erschlossen neue Verwendungsmöglichkeiten für diese Elemente.

Verwendung:

Elektronik und Nukleonik
Keramik- und Glasindustrie: CeO_2 und gemischte Oxyde der Seltenen Erden werden als Polier-, Färbe- und Deckmittel verwendet, Y_2O_3 und CeS_2 erhöhen die Schmelzpunkte von Porzellan.

Metallurgie: Zusätze von Cer und Yttrium erhöhen die Festigkeit und elektrische Leitfähigkeit von Aluminium-, Magnesiumlegierungen, Roheisen und Stahl.

Apparatebau: Die hochschmelzenden Seltenen Erden und ihre schmelzpunkterhöhende Wirkung als Zusatz zu anderen Metallen erschließt hier viele neue Möglichkeiten.

Papier-, Textil- und Lederindustrie: Cersalze zur wasserabweisenden Imprägnierung.

Anstrichfarben- und Plastikindustrie: Oxyde und Sulfide werden als Farbpigmente und Streckmittel verwendet.

Literatur: Mitt. d. chem. Forschungsinst. d. Wirtsch. Österr., Jahrg. 14/5/114

Die Herstellung von H_2O_2 nach neuen Verfahren

Um den ständig steigenden Bedarf an Wasserstoffperoxyd zu decken, reichen die konventionellen Verfahren der Hydrolyse von Perschwefelsäure oder die Zersetzung von Bariumperoxyd bei weitem nicht mehr aus. 50% der Gesamtmenge des hergestellten H_2O_2 nimmt die Papier-, Textil- und Zelluloseindustrie ab. Aber auch die chemische Industrie verwendet in steigendem Maße H_2O_2 zur Glycerinherstellung aus Propanol, zur Epoxydation von Fetten und Ölen, als Polymerisationskatalysator in der Kunststoffindustrie, zum Schäumen von Kautschuklatex, Polystrol und Polyurethanen (mit Dimethylamin als Zersetzungskatalysator). Ein neuer Großabnehmer für H_2O_2 ist in den USA die Raketentechnik geworden: seit 1948 ist der Verbrauch an Wasserstoffperoxyd auf das $3\frac{1}{2}$ -fache angestiegen. Ähnlich liegen die Verhältnisse auch in England und anderen Ländern. So sind seit 1953 neue Verfahren von Du Pont und von der Shell Chem. Co. entwickelt worden, um H_2O_2 mittels petrochemischer Rohstoffe herzustellen.

1. Alkylanthrachinonverfahren:

2-Alkylanthrachinon wird zu Anthrahydrochinon reduziert, welches bei Autoxydation wieder Alkylanthrachinon neben H_2O_2 zurückbildet. Zwei petrochemische Rohstoffe, Äthylbenzol und Phthalsäureanhydrid, liefern das Ausgangsprodukt.

2. Alkohol-Verfahren:

Die Oxydation von i-Propanol liefert Azeton und H_2O_2 . Als Oxydationsmittel dient Sauerstoff, Katalysatorzusatz ist nicht notwendig. Zwei Varianten sind möglich:

a) Arbeitet man in flüssiger Phase bei einem Druck von 15–20 at und 90–140°C, so wird etwas H_2O_2 als Initiator zugesetzt, worauf die Reaktion von selbst abläuft. Durch fraktionierte Destillation, wobei allerdings zur Vermeidung von Explosionen mit Wasser verdünnt werden muß, wird gleich 6–16%iges H_2O_2 erhalten; die Ausbeute beträgt 87%.

b) Wird in der Gasphase oxydiert, so dient Luft als Oxydationsmittel, Katalysator ist nicht notwendig. Da bei 350–500°C gearbeitet wird, muß das Reaktionsgemisch sehr rasch abgekühlt und die Berührung mit Metallen unbedingt vermieden werden.

Literatur: Mitt. d. Forsch. Inst. d. Wirtsch. Öst., Jhg. 15/5/124

Psychotrope Pharmaka

Am 16. Jänner 1964 ging durch die Presse die Nachricht, daß ein Student in Schweden verhaftet wurde, weil er Narkotika eingeschmuggelt habe; die Polizei beschlagnahmte bei ihm 15000 Tabletten Preludin. In dieser Meldung tritt deutlich zutage, daß die Begriffe, wie Narko-

tika und Suchtgifte in einen Topf geworfen werden, wozu noch die Rauschgifte kommen und so zu einer vollständigen Begriffsverwirrung führen. Narkotika und Rauschgifte gehören zu Substanzen, die die psychischen Äußerungen und Reaktionen, die Empfindungen und das Denkvermögen des Menschen verändern. Solche Stoffe werden psychotrope Pharmaka genannt. Jedoch ist ein Suchtgift, wie z. B. Preludin, noch lange kein Narkotikum oder wirklich ein Rauschgift.

Als Suchtgifte wirken jene Substanzen, die bei (einer länger dauernden) Zufuhr, die immer mit einer für den Betreffenden angenehm empfundenen Wirkung verbunden ist, eine Gewöhnung an das Mittel zur Folge haben. Wird ein Suchtgift plötzlich abgesetzt, dann treten Ausfallerscheinungen auf, die sowohl psychisch als auch somatisch (wie bei Morphlin) derart belastend für den Süchtigen werden können, daß er meist jede Möglichkeit wahrnimmt, um durch neuerliche Einnahme des Suchtgiftes Erleichterung zu finden. Suchtgifte sind meist psychotrope Pharmaka.

Ein Rauschgift wird wohl immer ein Suchtgift und auch eine psychotrope Substanz sein. Es wird stark euphorisierend wirken und bei hoher Dosierung auch Halluzinationen verursachen.

Unter einem Narkotikum aber wird eine Substanz mit vorwiegend betäubender Wirkung verstanden, wobei der narkotisierenden Wirkung eine kurze Erregung vorausgehen kann (z. B. Äther, Lachgas).

Dieser Bericht soll helfen, hier Begriffe zu klären und die Wirkungen der einzelnen psychotropen Pharmaka gegeneinander abzugrenzen, gleichzeitig aber auch ihre große Bedeutung für die Medizin, vor allem die Psychiatrie, kurz darzustellen.

Der Mensch benützt schon sehr lange die Wirkung psychotroper Stoffe, um ihre anregende und Unlustgefühle bekämpfende Wirkung auszunützen und, sofern sie auch Halluzinationen verursachen, sie für kultische Zwecke einzusetzen. Zu den ältesten Anwendungen dieser Substanzen gehört das Kauen von Cocablättern und Betelnüssen, das Rauchen von Opium und Haschisch, das Einnehmen von Alkohol und das Essen von „Zauberpilzen“ (Mexiko, 2000 v. Chr.) und anderen Zauberdrogen.

Auch unfreiwillige Einnahme psychotroper Stoffe kam vor, wie z. B. das Verwenden von Mehl aus Getreide mit Mutterkorn, welches zu Massenpsychosen führte, wie dies zuletzt kurz nach dem zweiten Weltkrieg in Frankreich geschah.

Die Voraussetzung für eine zielbewußte Verwendung psychotroper Pharmaka in der Medizin konnte aber erst die Wissenschaft in den letzten Jahrzehnten schaffen, durch systematische Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen chemischer Konstitution und psychischer Wirkung. Viele neuartige Substanzen mit ganz bestimmten Effekten wurden synthetisiert, wobei auch der Zufall manchmal eine große Rolle spielte. Verbindungen, die zunächst für ganz andere medizinische Zwecke bestimmt waren, zeigten oft Nebenwirkungen, die ganz neue Anwendungsmöglichkeiten erschlossen. Hier sei z. B. das Chlorpromazin, ein Phenothiazinderivat, genannt. Diese Verbindung wurde in der Reihe der zur Bekämpfung allergischer Reaktionen hergestellten Antihistamine erhalten. Ihre Wirkung in dieser Hinsicht zeigte sich aber als unzulänglich, wohl aber bemerkte man, daß unzweckmäßige Gegenregulationen des Körpers nach chirurgischen Eingriffen durch Chlorpromazin verhindert und blockiert wurden. Dieser als Neuroplegie bezeichnete Effekt führte dann zur Einführung des Chlorpromazins in die Psychiatrie (1952). Die stark erregungsdämpfende Wirkung führte zu einer völligen Normalisierung des krankhaften Erlebens bei Psychotikern. Damit war der Psychiatrie ein völlig neuartiges Heilmittel gegeben worden, denn bis dahin standen nur die Schockmethoden (Elektroschock, Insulinschock) zur Behandlung von Manikern, Depressiven und Zwangsneurotikern zur Verfügung.

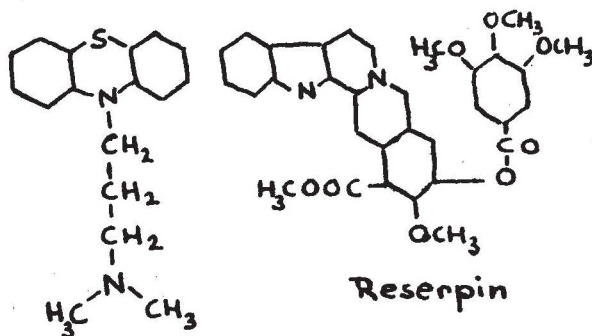
Die bis jetzt bekannten psychotropen Pharmaka führen über eine ganze Skala von Wirkungen: von ausgesprochenen Schlafmitteln über erregungsdämpfende Mittel zu solchen mit anregender Wirkung, die bis zur Euphorie, Excitation, Halluzination und Depersonalisation reicht. Die Einteilung dieser Psychopharmaka kann daher nach ihrer Wirkungsweise erfolgen.

Als erste Gruppe sollen die sogenannten

Psycholeptika

beschrieben werden. Hier handelt es sich um Stoffe, die vorwiegend dämpfend auf die Psyche wirken. Die am stärksten dämpfenden Mittel sind Schlafmittel, z. B. vom Typ der Derivate der Barbitursäure. Sie werden Hypnotika genannt.

Eine weitere Gruppe von Substanzen dämpfen Antrieb und Erregung und erzeugen dabei affektive Gleichgültigkeit (Neuroleptika). Sie bringen Wahnvorstellungen und Sinnestäuschungen zum Abklingen. Es handelt sich dabei um besonders in der Psychiatrie verwendbare Substanzen, von denen Chlorpromazin bereits erwähnt wurde. Chlorpromazin selbst wird allerdings jetzt nicht mehr verwendet, sondern andere Derivate des Phenothiazins. Neben den Phenothiazinen ist von besonderer Bedeutung ein aus *Rauwolfia serpentina* gewonnenes Alkaloid, das Reserpin (seit 1954). Es wird zur Behandlung von Schizophrenie und Psychosen mit bestem Erfolg verwendet. Die Pflanze selbst wurde seit alters her in Indien als Heilmittel gegen Geisteskrankheiten verwendet.

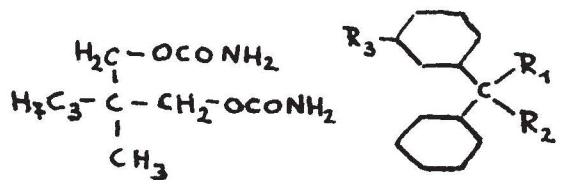


Chlorpromazin

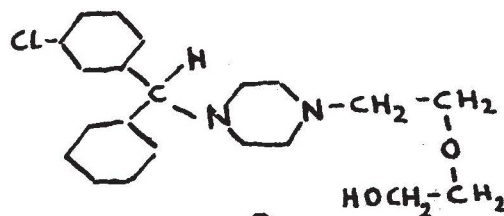
Die Wirkung der Neuroleptika zeigt sich im Beseitigen von Angst und Spannung und den damit verbundenen körperlichen Begleiterscheinungen. Wahrscheinlich können sie eine Veränderung der Hirnfunktion bewirken, die über eine sehr lang andauernde Behandlung zum vollkommenen Abklingen krankhafter psychischer Zustände führt.

In ihrer Wirkung den Neuroleptika sehr ähnlich sind die in den letzten Jahren zu immer größerer Bedeutung gekommenen sogenannten Tranquilizer. Ein Tranquilizer zeigt wohl die beruhigende und spannunglösende Wirkung der Neuroleptika, aber darüber hinaus verursacht er eine gewisse seelische Ausgeglichenheit (= Ataraxie), man nennt sie daher auch häufig Ataraktika. Die vielfältigen und fast ununterbrochen einwirkenden Eindrücke, die der moderne Mensch täglich zu verarbeiten hat, bedeuten eine nicht zu unterschätzende psychische Belastung. Dazu kommt das ständige Auseinandersetzen mit vielen unangenehmen Situationen, Gefahren, wie sie die Teilnahme am modernen Verkehr mit sich bringt, so daß psychisch labile Personen aus dem seelischen Gleichgewicht kommen können. Spannungszustände werden manifest, es treten Nervosität und Schlaflosigkeit auf, und damit kommen die verschiedenartigsten somatischen Begleiterscheinungen zum Durchbruch. Hier geben die Tranquilizer dem Arzt die Möglichkeit, eine Psychotherapie mit medikamentöser Unterstützung durchzuführen. Es besteht allerdings die Gefahr, daß der moderne Mensch durch die Wirkungen dieser, Unlustgefühle beseitigenden und künstlich spannungslose Ausgeglichenheit hervorrufenden Substanzen glaubt, die Anforderungen des täglichen Lebens nur mit Hilfe eines chemischen Präparates überwinden zu können. Er wird damit, auf dem Wege über eine durch Chemikalien veränderte Psyche, zum Süchtigen. Es ist jedoch sicher nicht der Zweck dieser Ataraktika, eine chemische Korrektur der Persönlichkeit des Menschen hervorzurufen. Daher sollen diese Substanzen nur unter ärztlicher Kontrolle und auf jeden Fall nur zeitlich begrenzt verwendet werden.

Vom chemischen Standpunkt aus handelt es sich bei den Tranquilizern um Verbindungen sehr unterschiedlicher



Meprobamat Diphenylmethan-derivate



Atarax

Bauart. Hier seien z. B. das Meprobamat, eine aliphatische Verbindung mit quartärem C-Atom, und Abkömmlinge des Diphenylmethans genannt. Bei den Derivaten des Diphenylmethans konnte gezeigt werden, daß durch Substitution am Methan-C-Atom eine ganze Reihe physiologisch wirksamer Substanzen erhalten wird, wobei neben Tranquilizern auch Stimulantien, Analgetika, Antihistaminika und Mittel gegen Parkinsonismus, Husten, Durchfall und zur Erweiterung der Herzkranzgefäße eine große Rolle in der Medizin spielen.

Den dämpfenden Wirkungen der Psycholeptika entgegengesetzt sind die der

Psychoanaleptika.

Hier handelt es sich um psychisch anregende Substanzen. Sie können teils überhaupt die psychische Leistungsfähigkeit steigern, als Psychotonika (z. B. Coffein) wirken, oder krankhaft herabgesetzte Vitalität steigern, als Thymoleptika, oder regelrecht euphorisierend wirken. Zu dieser letzten Gruppe, den Euphorika, gehören Alkohol, Opium, Morphin. Von besonders aktuellem Interesse ist hier wieder die erste Gruppe, die Psychotonika. Diese Psychotonika umfassen wieder chemisch sehr verschiedenartige Substanzen. Kennzeichnend für sie ist aber, daß sie Ermüdungserscheinungen aufheben und somit leistungssteigernd wirken. Zum Teil wirken sie auch stimmungverbessernd und besitzen damit gewisse Voraussetzungen zur Erzeugung einer Süchtigkeit. Im allgemeinen vergrößern sie die allgemeine Aktivität und haben als „Weckamine“ (Pervitin, Rilatin)* besondere Anwendung erfahren. Zu diesen Substanzen gehört auch das eingangs erwähnte Preludin, eine Verbindung, die gleichzeitig auch als Appetitzügler verwendet wird. Gerade wegen seiner aktivitätsteigernden Wirkung wird Preludin** zur Behandlung der Fettsucht — die meist auch mit Trägheit verbunden ist — eingesetzt. Jedoch ist Preludin wegen einer gewissen euphorisierenden Wirkung — die „graue“ Welt erscheint nach Einnahme plötzlich „rosa-rot“ — als Suchtgift eingestuft. Es wirkt Unlustgefühle vermindern und damit auch das Unlustgefühl des Hungers beseitigend. Eine besondere Stellung unter den Psychotonika nimmt die Glutaminsäure ein, auf die sehr große Hoffnungen wegen ihrer intelligenzsteigernden Eigenschaften gesetzt worden war. Tatsächlich läßt sich eine intellektuelle Minderbegabung durch Glutaminsäure nicht korrigieren, doch steigert sie die psychische Aktivität und beseitigt damit die Hemmungen vor einem intensiveren Lernvorgang, der nun unter etwas verbesserten Voraussetzungen erfolgen kann.

Eine besondere Gruppe von psychischen Störungen, die durch depressive Stimmungen gekennzeichnet sind, wobei aber diese Depressionen irgendeine rein körperliche Ursache (Krankheiten wie Tuberkulose) besitzen, können

* Pervitin = 1-Phenyl-2-methyl-aminopropan

** Preludin = 2-Phenyl-3-methyl-tetra-hydro-1, 4-oxazin

durch Thymoleptika behandelt werden. Über ihre Wirkungsweise im Organismus ist bekannt, daß sie im Stammhirn durch Hemmung des Fermentes Monoaminoxidase zur Vermehrung von 5-Hydroxytryptamin (Serotonin) führen. Monoaminoxidasehemmer bewirken eine besondere Art von Stimmungsaufhellung. Es handelt sich bei ihnen um Derivate des Hydrazins. Hydrazinderivate wurden ursprünglich gegen Tuberkulose verwendet und bei einem dieser Mittel konnte diese stimmungverbessernde Wirkung als höchst erfreuliche Nebenerscheinung festgestellt werden. Das ursprünglich angewendete Iproniazid wurde 1956 in die psychiatrische Therapie eingeführt, aber in der Folge von besser verträglichen Mitteln des gleichen Bauprinzips abgelöst. Thymoleptika werden in der Psychiatrie vor allem zur Bekämpfung von Depressionen mit somatischer Ursache verwendet. Die antriebmehrende Wirkung und der stimulierende Effekt tritt auch bei Gesunden in Erscheinung, so daß sie manchmal zur Schlafeinsparung empfohlen wurden, eine Indikation, die aber sicher vom medizinischen Standpunkt aus als nicht vertretbar angesehen werden muß.

Eine ganz eigenartige Wirkung der Thymoleptika wird in der Psychiatrie auch zur Erkennung einer schizophrenen Erkrankung verwendet. Oft ist eine Schizophrenie unter dem Erscheinungsbild einer Depression verborgen. Wird nun ein Thymoleptikum verabreicht, so wird die Schizophrenie aktiviert, kommt mit ihrem ganzen Symptomenreichtum voll zum Durchbruch und ist in diesem Zustand erfahrungsgemäß einer Behandlung viel besser zugänglich.

Die psychisch dämpfenden und psychisch anregenden Mittel besitzen alle große Bedeutung, doch werden solche mit psychisch besonders drastischen Wirkungen durch verschiedenste Pressemeldungen häufig in ihrer Bedeutung sensationell aufgebauscht, wie dies vor einiger Zeit bei Selbstversuchen von Ärzten mit Lysergsäurederivaten der Fall war.

Diese sogenannten

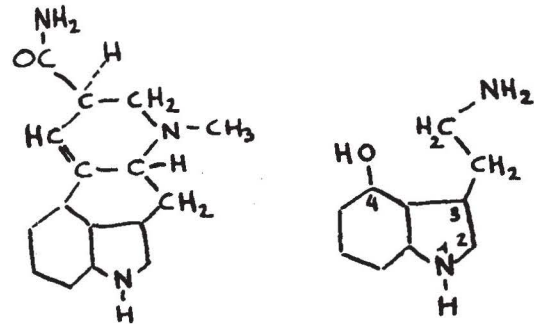
Psychodysleptika

sind Substanzen, die bei Gesunden Psychosen hervorrufen können, deren Erscheinungsbild viel Ähnlichkeit mit einigen Geisteskrankheiten besitzen kann. Man unterscheidet Halluzinogene, das sind Stoffe, die vorwiegend Sinnestäuschungen hervorrufen, von den Depersonalisationsmitteln, bei denen die Depersonalisationserscheinungen (z. B. der eigene Arm wird nicht mehr als zum eigenen Körper gehörig empfunden, obwohl erkannt wird, daß er zum eigenen Körper gehört) überwiegen.

Zu den halluzinogenen Verbindungen gehört das Mescaline, aus einer mittelamerikanischen Kakteenart (Gattung Anhalonium), der Haschisch, aus den Samen von Cannabis indica, der leider als Marihuana (aus Minnesota-Wildhanf) gerade heute auch in Mitteleuropa eine immer größere Rolle als Rauschgift spielt. Mescaline verursacht farbige Sinnestäuschungen, bei denen auch das Gefühl für die Proportionen des eigenen Körpers und der Zeitsinn verändert werden. Analogie zu schizophrenen Zustandsbildern, wie Verfolgungswahn, führte zur Hoffnung, dadurch die Stoffwechselstörungen bei dieser Geisteskrankheit

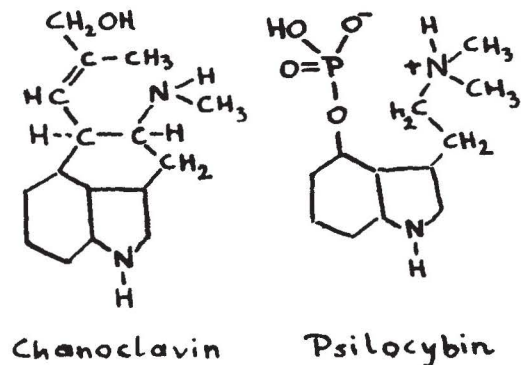
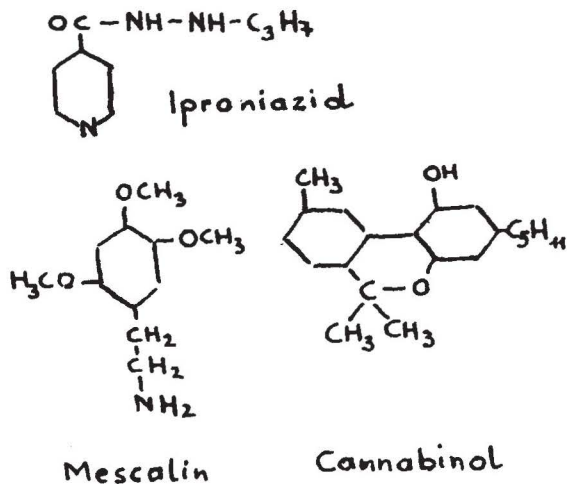
zu klären, zeigte jedoch keinen Erfolg. Ähnliche Wirkungen wie Mescaline, z.B. Störungen des Denkvorganges und des Wahrnehmungsvermögens, ruft auch das Cannabinol des Haschisch hervor.

Treten die halluzinogenen Wirkungen gegenüber den Depersonalisationserscheinungen zurück, so kommt man zu einer Gruppe von Verbindungen, die alle ein gemeinsames Konstitutionsmerkmal besitzen. Es handelt sich bei ihnen um Abkömmlinge des Indols, welche alle an der Stellung 4 substituiert sind. Zu diesen Substanzen gehört das, als erstes in seiner Konstitution aufgeklärte Alkaloid des Mutterkorns, die Lysergsäure und ihre Deri-



d-Lysergsäureamid 4-Hydroxytryptamin

vate. Auch einige mexikanische „Zauberdrogen“, die bereits in einem Werk des 16. Jahrhunderts, welches die Pflanzenwelt Mexikos beschreibt, genannt werden, haben sich als Alkaloide vom Typ der Lysergsäure erwiesen. So berichtet der spanische Arzt Francisco Hernandez (1550) von „coatlcoxouhqui“ (grüne Schlange), dessen Samen Ololiuqui genannt werden: „Dieser Same betäubt und verwirrt die Sinne. Die Eingeborenen geben ihn jenen, denen sie Schaden zufügen wollen; wer ihn zu sich nimmt, bekommt Visionen und sieht schreckliche Dinge...“ Erst um 1960 konnte dieser Bericht voll bestätigt werden. Es handelt sich um Samen von zwei Windengewächsen (Rivea corymbosa und Ipomea tricolor), die auch jetzt noch von zapotekischen Indianern Süd Mexikos verwendet werden. Die pharmakologisch wirksamen Substanzen dieser Samen sind d-Isolysergsäureamid, d-Lysergsäure und Chanoclavin, Stoffe, die bis dahin nur aus saprophytischen Kulturen des Mutterkorns isoliert werden konnten. Neben dem Ololiuqui spielte im alten Mexiko auch Teonanacatl, der Zauberpilz, eine große Rolle. Priesterärzte und Wahrsager nahmen diese Pilze zu festlichen Anlässen ein, gerieten dadurch in eine Art Traumzustand, der ihnen hellseherische Fähigkeiten verlieh und sie befähigte, Krankheiten zu erkennen und zu heilen. Daß diese Pilze göttliche Verehrung erfuhren und der indianische Pilzkult sicher bis 2000 v. Chr. zurückgeht, kann daraus geschlossen werden, daß zahlreiche Steinplastiken dämonischer Gestalten mit Pilzhüten gefunden wurden. Erst 1956 wurden diese Pilze mykologisch (R. Heim) erforscht: es sind Blätterpilze der Gattung Psilocybe. Zunächst wurden sie künstlich



gezüchtet (Sandoz, Basel), um die Wirkstoffe in genügender Menge zu erhalten. Ein Selbstversuch (A. Hofmann) unter ärztlicher Kontrolle übertraf alle Erwartungen (Halluzinationen, die über 6 Stunden anhielten). Die Trennung des Alkaloidgemisches aus den Pilzen erfolgte säulenchromatographisch, die Strukturaufklärung ergab wieder Abkömmlinge des Indols (Hydroxytryptamine). Die reinen Wirkstoffe Psilocin und Psilocybin unterscheiden sich nur dadurch, daß eine freie OH-Gruppe des Psilocins beim Psilocybin durch Phosphorsäure verestert ist.

Der Konstitutionsaufklärung schloß sich die chemische Synthese an. Als Ausgangsprodukt wurde 4-Benzoxylindol verwendet und führte über 10 Stufen zu Psilocybin. Dieses wird jetzt in technischem Maßstab synthetisch hergestellt, da die Synthese wesentlich ökonomischer ist, als das Extrahieren aus den gezüchteten Pilzen.

Alle diese Indolderivate zeichnen sich dadurch aus, daß sie bei geringer Dosierung längst vergangene Erlebnisse, auch aus frühester Kindheit, in das unmittelbare Erleben rücken. Diese traumartig auftauchenden Erlebnisse werden so einer Analyse zugänglich gemacht. Dadurch kann bei Psychotikern die Ursache ihrer Psychosen erkennbar werden. Man bezeichnet diese medikamentöse unterstützte und aktivierte Psychoseetherapie als Psycholyse. Die emotionale Auflockerung durch Psycholytika, besonders d-Lysergsäure-diäthylamid und Psilocybin, erleichtert dem Psychotiker die Kontaktnahme mit der Umgebung, so daß dem erfahrenen Arzt und Tiefenpsychologen, besonders bei Gruppenbehandlungen, die Möglichkeit gegeben ist, in Diskussionen die Ursachen der Psychose aufzudecken, sie in ihren Einzelheiten zu analysieren und damit sie zum Abklingen zu bringen.

Zusammenfassung

Psychotrope Substanzen verändern bei psychisch Gesunden und Kranken die psychische Aktivität. Hemmung der Aktivität erlaubt eine gezielte Behandlung bei Geisteskrankheiten mit Erregungszuständen, die zu einer Heilung, d. h. zum Abklingen der Symptomatik, führen kann. Der moderne „gesunde“ Mensch sucht oft Zuflucht zu Tranquilizern, die neben einer erregungshemmenden Wirkung noch eine psychische Ausgeglichenheit verursachen. Zur Leistungssteigerung und Stimmungsaufhellung wird oft eine Erhöhung der psychischen Aktivität erwünscht, hier helfen die Psychoanaleptika. So liegt es in der Hand des Menschen, seine psychischen Verhaltensweisen durch chemische Mittel zu verändern, gewissermaßen den Charakter teilweise chemisch umzuformen, eine Möglichkeit, die sicher nur dort, und mit Vorbedacht, anzuwenden ist, wo es sich um die Besserung pathologischer Zustände handelt. Zu den euphorisch und halluzinogen wirkenden Substanzen gehören eine Reihe von Rauschgiften. Überwiegt bei den halluzinogen wirksamen Stoffen die Depersonalisation, so erhält man Mittel zur Psycholyse, einer medikamentös unterstützten Psychotherapie, die der modernen Psychiatrie neue Möglichkeiten erschloß.

Literatur: Umschau: W. u. T. 62/4/108 u. 61/17/522; Panorama (Sandoz) 1961/III/8 u. 1962/II/6; Mitt. d. chem. Forsch. inst. d. W. Österr. Jhg. 14/5/122 u. Jhg. 15/3/75.

Tabelle: die Einteilung der psychotropen Pharmak

- I. Psycholeptika:
 - wirken vorwiegend erregungsdämpfend)
 - a) Hypnotika (Schlafmittel):
 - Derivate der Barbitursäure
 - b) Neuroleptika
 - (dämpfend bei Erregungszuständen):
 - Phenothiazinderivate
 - Rauwolfia-Alkaloide
 - c) Tranquillizer (Beruhigungsmittel):
 - Meprobamat
 - Diphenylmethanderivate
 - Baldrian
- II. Psychoanaleptika:
 - (Psychisch anregende Mittel)
 - a) Psychotonika
 - (steigern die psych. Leistungsfähigkeit):
 - Weckamine
 - Preludin
 - Gutaminsäure
 - Coffein
 - Vitamine, Hormone
 - b) Thymoleptika (erhöhen die krankhaft herabgesetzte psych. Vitalität)
 - Monoaminoxidasehemmer
 - Hydrazinderivate
 - c) Euphorika
 - (vorwiegend euphorisierende Wirkung)
 - Alkohol
 - Opium, Morphin
 - N₂O
- III. Psychodysleptika
 - (erzeugen künstliche Psychosen)
 - a) Halluzinogene Substanzen (bewirken vorwiegend Sinnestäuschungen)
 - Mescaline
 - Haschisch (Marihuana)
 - b) Depersonalisantia
 - (bewirken vorwiegend Depersonalisation)
 - Lysergsäurederivate (Mutterkorn)
 - Psilocybin, Psilocin

EXPERIMENTALPHYSIK

Prof. Richard Lederer

Neue österreichische Lehrmittel für den Physik-Unterricht

In den letzten Jahren wurden im Bundes-Gymnasium Wien 13 Versuchsanordnungen entwickelt, die durch ihren übersichtlichen Aufbau bei Schulbehörde und Kollegenschaft den Wunsch erweckten; sie auch den anderen Schulen zur Verfügung zu stellen.

Planung und Produktion sind für einzelne Exemplare unwirtschaftlich. Es soll daher festgestellt werden, wie viele Schulen an den Geräten interessiert sind. Dazu wird folgender Weg beschrieben:

- 1) Während der Fortbildungswoche, und zwar am Dienstag, 21. April 1964, um 9.30 Uhr findet im BG 13 ein Vortrag statt, in dem die in Betracht kommenden Geräte vor allem den Kollegen aus den Bundesländern vorgeführt werden.
- 2) Wenn für ein Gerät genügend Interesse besteht, wird es durch eine Lehrmittelfirma erzeugt werden.
- 3) Das Bundesministerium für Unterricht wird im Rahmen seiner finanziellen Möglichkeiten die Beschaffung dieser Geräte unterstützen.

In den „Wissenschaftlichen Nachrichten“ werden die Geräte beschrieben und es werden methodische Hinweise für den Einbau in den Unterricht gegeben.

Ein Teil der Geräte ist in der vorliegenden Ausgabe enthalten. In der nächsten Ausgabe wird vor allem eine Versuchsreihe über elektrische Schwingungen ausführlich beschrieben werden.

Gefahren bei der Verwendung von elektrischen Geräten und die erforderlichen Schutzmaßnahmen

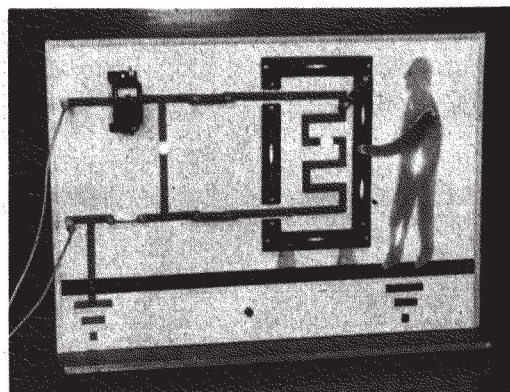
Sinn dieses Gerätes:

Während bei Gas- und Wasserinstallationen immer der Fachmann herangezogen wird, glauben viele Menschen, sich ihn bei elektrischen Installationen ersparen zu können, weil sie keine Ahnung davon haben, daß durch die Erdung des einen Netzleiters zusätzliche Gefahren entstehen. Erdleitungen und Schuko-Stecker werden als unnötige Laune der E-Werke betrachtet. Die Folge sind Unfälle, die besonders tragisch sind, wenn Angehörige des Schuldtragenden davon betroffen werden.

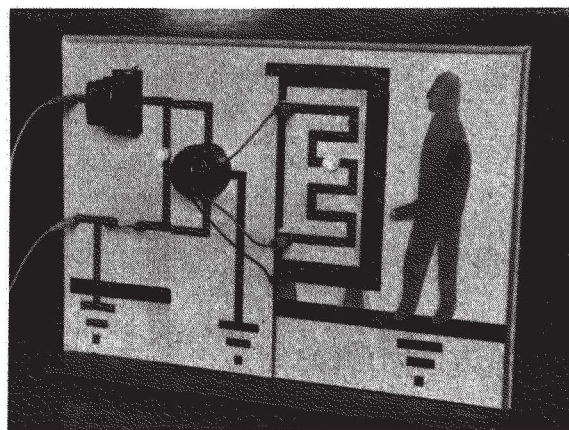
Hier kann und muß nun die Schule eingreifen und den Kindern anschaulich und eindringlich zeigen, wie die Gefahr entsteht und wie man sich dagegen schützen kann.

Ablauf der Versuchsreihe:

- 1) Erklärung der Installation, Hinweis auf die Erdung des einen Netzleiters.
- 2) Gehäuseschluß und Todesfall: In einem schadhaften Gerät kann eine Verbindung des spannungsführenden Leiters mit dem Gehäuse entstehen (die Aufladung des Gehäuses wird durch Aufleuchten angezeigt). Bei Berührung des Gehäuses fließt der Strom über den Menschen zur Erde ab (ebenfalls durch Aufleuchten angezeigt).

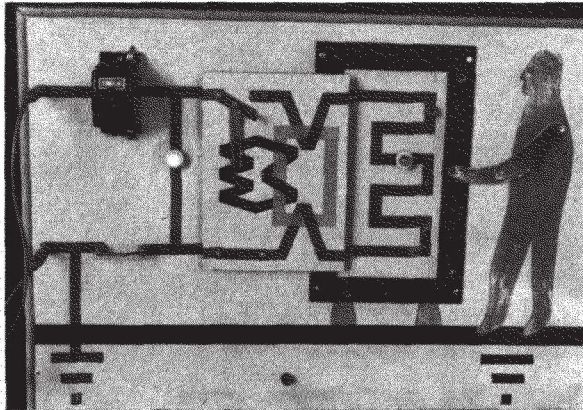


- 3) Eine Schutzerdung wird angebracht, und nun wird gezeigt, wie beim Entstehen eines Gehäuseschlusses der zur Erde abfließende starke Strom die Sicherung zum Abschalten veranlaßt.
- 4) Kleiner Erdungswiderstand ist notwendig! Durch Einstecken eines Widerstandsdrahtes kann gezeigt werden, daß eine schlechte Erdung wertlos ist. Hier ist auf die Heranziehung des Fachmannes hinzuweisen; nur er kann auf Grund seiner Meßgeräte die Verantwortung übernehmen.
- 5) Schuko-Stecker: Ortsveränderliche Geräte müssen über einen Stecker mit Schutzkontakt, der das Gehäuse mit der Erde verbindet, angeschlossen werden. Bei Fehlen der dritten Leitung (Schutzleitung) kommt es wieder zum Unfall.



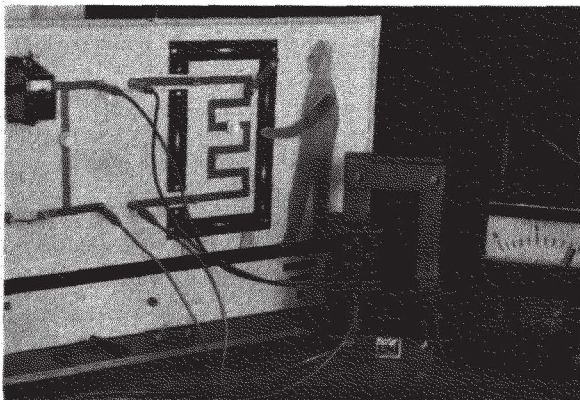
- 6) Fehlerspannungsschalter: Seine Funktionsweise wird an einem einsteckbaren Modell erläutert. Wenn der kleine zulässige Erdungswiderstand der Schutzerdung nicht erreicht werden kann, dann bringt dieser Schalter Abhilfe. Eine am Gehäuse liegende „Fehlerspannung“ von 65 V aufwärts muß die Abschaltung des fehlerhaften Gerätes bewirken. Da etwa 30 mA für die Betätigung des Magnetschalters ausreichen, kann der Erdungswiderstand entsprechend größer sein.

- 7) Fehlerstrom-Schalter: Diese modernste und beste Schutzmaßnahme wird ebenfalls an einem einsteckbaren Modell erläutert.



- 8) Modellversuch zum Fehlerstrom-Schalter: Der Schalter selbst wäre zu teuer und auch zu unanschaulich. An einem Modellversuch kann aber die Wirkungsweise sehr leicht demonstriert werden. Notwendig sind zwei U-Kerne, zwei Spulen 100 Wdg., eine Spule 1200 Wdg. und ein Meßgerät 10 V. Es wird gezeigt, daß im Sekundärkreis dieses Stromwandlers keine Induktion auftritt, wenn der in das Gerät geflossene Strom auch wieder zurückkommt. Wenn aber Strom über die Erdleitung oder auch über den Menschen verlorengeht, entsteht Induktion (das Meßgerät zeigt an).

Dieser Sekundärstrom wird nun zum Abschalten benötigt. Nun müßte man eindringlich aufzeigen, um wieviel günstiger der Ankauf eines solchen Schutzschalters gegenüber dem Risiko eines Todesfalles ist!



- 9) Gefahren der Nullung: Viele Kinder wissen bereits von der Erdung des einen Netzleiters, suchen sich mit Hilfe einer Glühlampe den geerdeten Leiter heraus und benutzen ihn als Erdleitung für Detektorapparate. Auch könnten sie nach den vorhergehenden Versuchen meinen, die billigste Lösung wäre die Verwendung des geerdeten Leiters als Schutzleitung („Nullung“). In einfacher Weise kann nun gezeigt werden, wie gefährlich diese Nullung werden kann und warum die Vorschriften die Nullung nur unter ganz bestimmten Voraussetzungen gestatten.

Als Spannungsquelle ist ein 6-V-Transformator zu verwenden. Dadurch können alle Umschaltungen gefahrlos während der Durchführung der Versuchsreihe ausgeführt werden, ohne die Spannung abzuschalten.

Dieses Gerät ist wie auch alle anderen hier zur Besprechung gelangenden Geräte in Farben gestaltet, so daß ein Höchstmaß an Übersichtlichkeit gewährleistet ist. Natürlich kommen die Farben in den Schwarzweiß-photographien nicht zur Geltung.

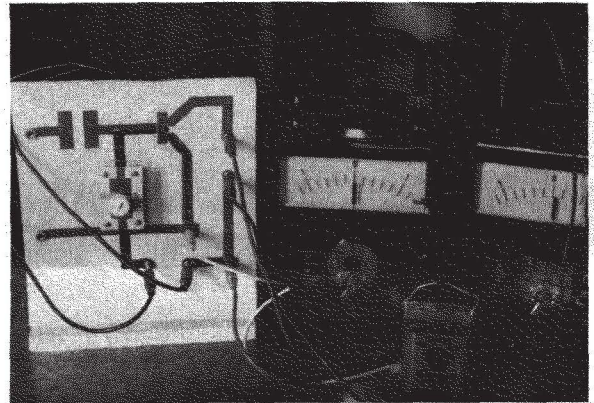
Transistorserie

Für die Behandlung des Transistors im Unterricht erschienen im Lehrmittelhandel Baukästen, die für Bastelstunden wohl ganz interessant sind, für den Unterricht aber nicht geeignet sind. Es wurde daher der Versuch unternommen, die wichtigsten Grundversuche und Anwendungen in einer Serie zusammenzufassen.

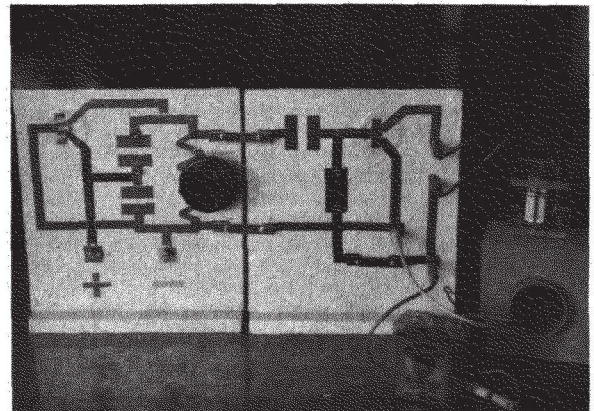
Diese Geräteserie besteht aus folgenden Teilgeräten: Einstufiger Verstärker (zugleich für Demonstration der Stromverstärkung), Detektor, zweistufiger Verstärker, NF-Generator, HF-Generator, Phototransistor.

Versuche:

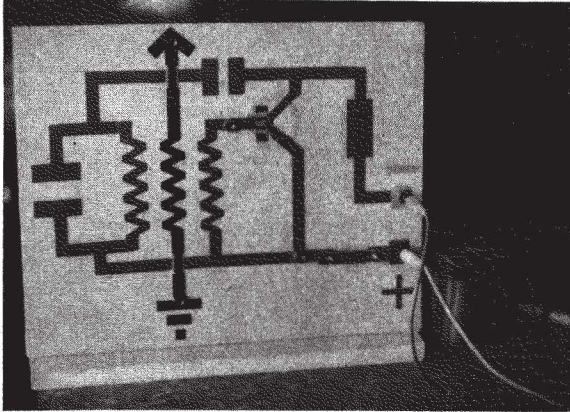
- 1) Wirkungsweise: Mit Hilfe eines veränderlichen Widerstandes im Basiskreis wird die Stromstärke geändert. Mit zwei Meßgeräten wird gezeigt, daß die Schwankungen des Kollektorstromes ein Vielfaches der Schwankungen des Basisstromes betragen.



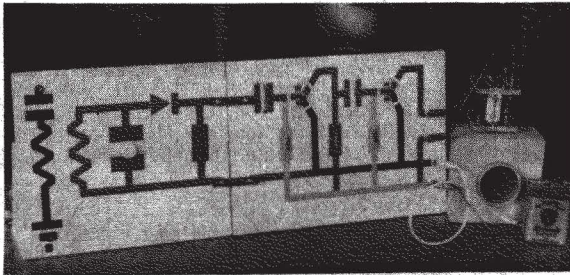
- 2) Ein NF-Generator erzeugt in kapazitiver Dreipunktschaltung einen Ton, der im Kopfhörer zu hören ist.
3) Der einstufige Verstärker von Versuch 1 verstärkt diesen Ton so, daß er im Lautsprecher hörbar gemacht werden kann.



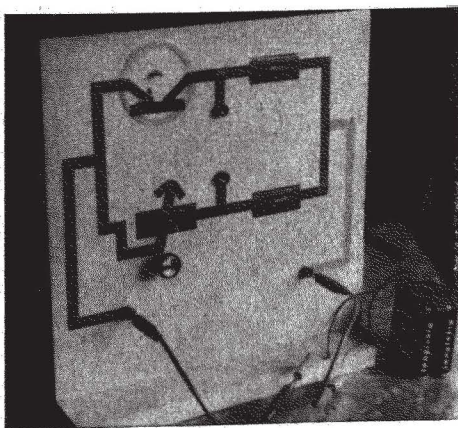
- 4) Ein HF-Generator in induktiver Rückkopplungsschaltung erzeugt eine Schwingung im Mittelwellenbereich, die durch einen Transistorempfänger überall im Klassenraum empfangen werden kann.



- 5) Diese HF-Schwingung kann durch 6-V-Wechselspannung oder durch den Ton des NF-Generators von Versuch 2 oder durch einen Tonfrequenzgenerator oder durch ein Kohlemikrofon moduliert werden. Nachweis wieder durch einen Transistorempfänger.
- 6) Das Prinzip des Geradeaus-Empfängers wird mit dem Detektor und dem zweistufigen Verstärker gezeigt. Beide Mittelwellensender können empfangen werden.



- 7) Phototransistor in Brückenschaltung: Die Erhöhung der Leitfähigkeit durch Belichtung (innerer photoelektrischer Effekt) kann gezeigt werden (Meßgerät 1 mA in der Brücke), ferner kann das Gerät mit Hilfe eines Relais als automatischer Lichtschalter verwendet werden.



Zusammensetzung und Interferenz phasenverschobener Schwingungen

Inhalt dieser Versuchsreihe:
Neben der mathematischen und der zeichnerischen Ableitung kann experimentell gezeigt werden, daß zwei phasenverschobene Schwingungen bei Zusammensetzung unter einem rechten Winkel die Lissajous-Kurven ergeben, während bei Überlagerung in derselben Schwin-

gungsrichtung je nach dem Phasenwinkel Verstärkung, Schwächung oder Auslöschung eintritt. Dabei ist der Phasenwinkel veränderlich und direkt sichtbar.

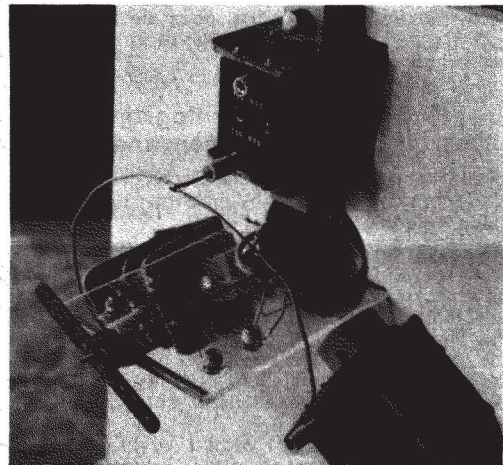
Notwendige Geräte:

Drehfeldinduktionsgerät,
elektronischer Umschalter, rotierender Umschalter oder einfacher Kippumschalter,
Mischpult,
NF-Verstärker (nicht unbedingt),
Elektronenstrahloszillograph.

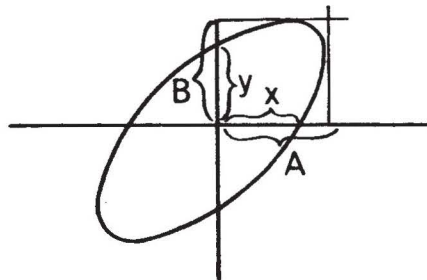
Durchführung:

Ein Drehfeld induziert in zwei Spulen, die gegeneinander drehbar angeordnet sind, Wechselspannungen. Durch die Drehung der einen Spule ist die Phasenverschiebung zwischen den beiden Wechselspannungen veränderlich. Der Phasenwinkel kann unmittelbar abgemessen werden.

- 1a) Die beiden Spannungen werden an die Eingänge des elektronischen Umschalters gelegt, dessen Ausgang wird an den Vertikalverstärker des Oszillographen angeschlossen. Netzsynchrisation! Auf dem Bildschirm sieht man beide Kurven, die Phasenverschiebung wird von 0 Grad bis 360 Grad verändert.
- 1b) Wenn weder ein elektronischer noch ein rotierender Umschalter zur Verfügung steht, genügt zur Not auch ein einfacher Kippumschalter, der die beiden Spannungen abwechselnd an den Oszillographen anschließt.

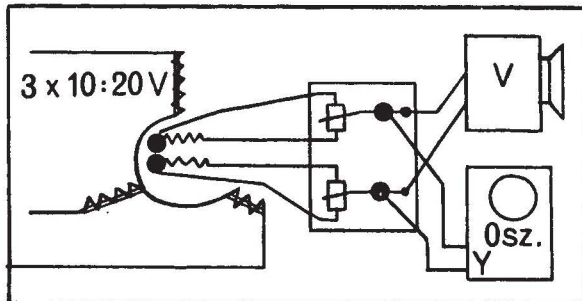


- 2) Zusammensetzung im rechten Winkel:
Zuerst wird auf 0 Grad Phasenwinkel eingestellt. Die Spannung der einen Induktionsspule kommt an den Y-Verstärker, die der anderen an den X-Verstärker. Beide Spannungen jeweils allein anschließen und auf gleiche Amplitude einregeln! Bei Veränderung des Phasenwinkels von 0 auf 180 Grad verändert sich die Gerade über Ellipse und Kreis zur Ellipse und Geraden in den anderen Quadranten.
Mit Hilfe der Formel $\sin \varphi = \frac{x}{A} = \frac{y}{B}$ kann umgekehrt aus der Figur der Phasenwinkel errechnet werden.



Dies benötigen wir später für die Phasenverschiebungen im Wechselstromkreis.

- 3) Interferenz:
Die beiden Induktionsspannungen werden in einem Mischpult überlagert, den Ausgang schließt man an einen NF-Verstärker und an den Y-Verstärker des Oszillographen an.



Zuerst die Spannungen einzeln anlegen und mit den Mischpultreglern auf gleiche Amplitude einstellen (Kippung 25 Hz), Verstärker auf mittlere Lautstärke, dann überlagern und Phasenwinkel ändern. Bei 180 Grad Phasenverschiebung wird die Gesamtamplitude 0 und der Brummtone des Verstärkers wird unhörbar. Schaltet man aber jeweils eine Spannung ab, dann erkennt man: Jede einzelne Schwingung ist vorhanden, aber die Interferenz bei 180 Grad Phasenwinkel gibt Auslöschung der Gesamtschwingung.

Kleinst-Kathodenstrahloszillograph (3-cm-Schirm) als Zusatz zu einem Industriegerät

Erfreulicherweise werden die Oszillographen an den Schulen immer zahlreicher. Wir können sie grob in drei Gruppen teilen:

- 1) Offene Braunsche Röhren ohne Verstärker, mit primitiven Kippanordnungen, Möglichkeit zur magnetischen Ablenkung (z. B. Neva). Diese Geräte sind nur für Einführungsversuche geeignet.
- 2) Die Phywe- und Leybold-Geräte, sehr teuer, unhandlich, weil schwer transportabel und langwierig im Aufbau, wenig empfindlich, aber großer Bildschirm, Möglichkeit zur magnetischen Ablenkung in einer Richtung.
- 3) Industriegeräte (Eico, Heathkit u. a.), sehr schnell einsatzbereit, empfindlich, billig, Schirm für normale Lehrsäle genügend groß. Für die tägliche Arbeit muß man unbedingt ein Gerät dieser Gruppe anraten. Nachteile: Keine Möglichkeit zur magnetischen Ablenkung, geheimnisvolle graue Kästen mit geheimnisvollen Knöpfen. Die Funktionsweise wird entweder gar nicht verstanden oder muß mühsam an Hand von Schaltbildern erklärt werden.

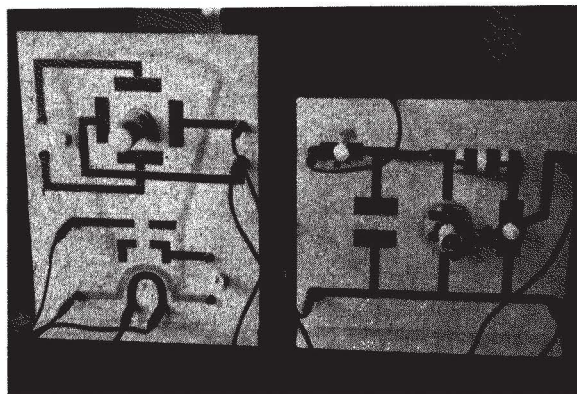
Um diese Nachteile wettzumachen, wurde ein Kleinoszillograph in offener Schaltung gebaut, der nun genauer geschildert werden soll.

Dieses Gerät besteht aus folgenden Einzelteilen:

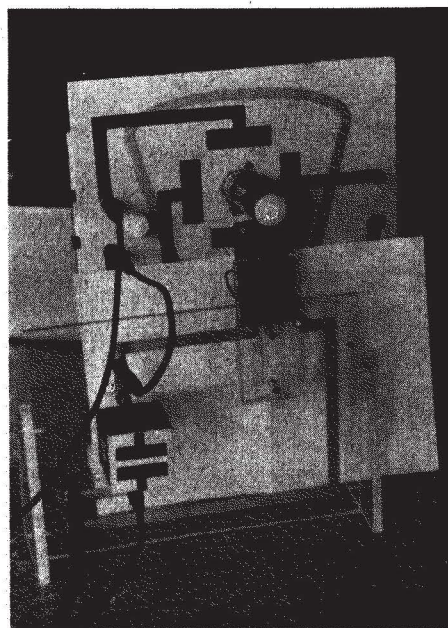
- Oszillographenröhre mit Schaltung,
- Kippperät,
- Brett für die Befestigung der Ablenkspulen,
- Zusatz für Phasenverschiebung im Wechselstromkreis,
- Spule für $\frac{e}{m}$ -Bestimmung.

Versuche:

- 1) Ablenkung des Leuchtflecks durch Gleichspannung 0—50 V und durch einen Stabmagnet (Dreifingerregel).
- 2) 50-V-Wechselspannung an die Y-Platten, Betrachtung des Leuchtstrichs im Drehspiegel.
- 3) Kipperschwingung: An einer Glühlampen-Kippschaltung wird die Abhängigkeit der Frequenz von Kapazität, Ladewiderstand und Spannung gezeigt (die Kippfrequenz kann im Lautsprecher hörbar gemacht werden).

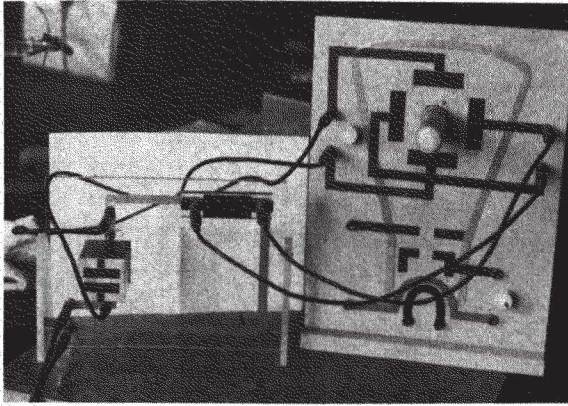


- 4) Darstellung der Netzwechselspannung mit Hilfe der Kippung, Besprechung des Linearisierungsproblems.
- 5) Helligkeitsmodulation: Eine 6-V-Wechselspannung wird an Wehnelt-Zylinder und Kathode gelegt: Eine Hälfte der im 4. Versuch dargestellten 50-Hz-Kurve ist verschwunden, die andere verstärkt. Umpolen!
- 6) $\frac{e}{m}$ -Bestimmung nach der Methode von Busch. Zusätzlich sind nur ein Akkumulator und ein Meßgerät 5 A Wechselstrom erforderlich.
- 7) Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom: In das Zusatzgerät wird ein Ohmscher Widerstand, eine Spule oder ein Kondensator eingesteckt. Die Spannung wird an die Y-Platten geführt, während die Stromstärke durch das von ihr bewirkte Magnetfeld einer eisenlosen Spule, die die Phasenlage nicht beeinflusst, die Horizontalablenkung bewirkt.



Ergebnis: Ohmscher Widerstand erzeugt Gerade, $\varphi = 0$ Grad
Kondensator erzeugt Kreis, $\varphi = 90$ Grad
Spule erzeugt Ellipse, $\varphi = 60-80$ Grad

Da der Spannungsabfall am Ohmschen Widerstand in Phase mit der Stromstärke ist, können wir die Magnetspule also durch einen relativ kleinen Ohmschen Widerstand ersetzen und seinen Spannungsabfall an die X-Platten führen: es ändert sich nichts.



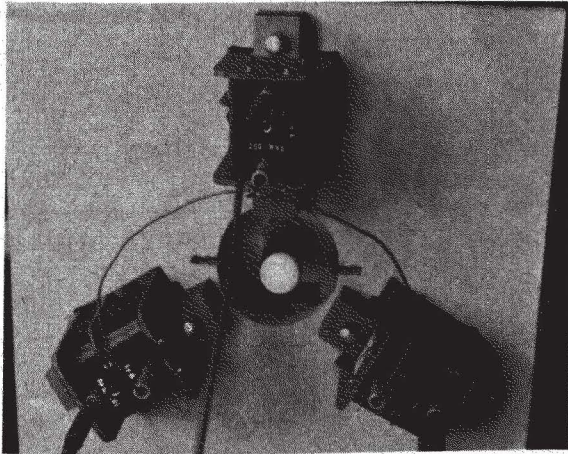
Dieser Versuch ist wichtig, weil wir bei späteren Versuchen mit dem großen Gerät immer die Stromstärke durch den von ihr erzeugten Spannungsabfall an einem Ohmschen Widerstand darstellen!

- 8) Frequenzmessung durch Helligkeitsmodulation: Wir erzeugen mit Kondensator und Widerstand einen Kreis und legen den Ausgang eines Tonfrequenzgenerators an Wehnelt-Zylinder und Kathode. Bei Frequenzerhöhung ergeben sich bei allen Vielfachen der Netzfrequenz stehende Bilder:



Bei 450 Hz vergleichen wir mit dem Ton der a'-Stimmgabel: Sie klingt nur ganz wenig tiefer.

- 9) An einem Brett können Spulen für horizontale und vertikale magnetische Ablenkung befestigt werden. Das folgende Bild zeigt die Ablenkung in einem Drehfeld:

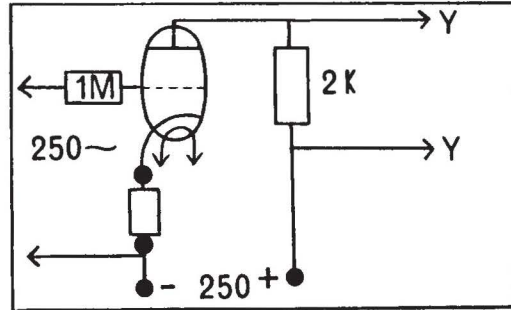


Ein- und Ausschaltvorgänge

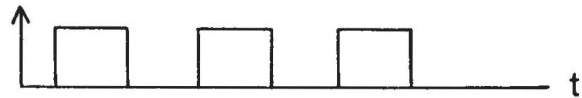
Der Anstieg und Abfall von Spannung und Stromstärke kann nur mit einem trägheitslosen Meßgerät, also mit dem Elektronenstrahloszillographen, beobachtet werden. Dazu ist aber eine Schaltfrequenz von mindestens 20 Hz erforderlich. Anlegen und Abschalten der Gleichspannung erfolgt daher mit rotierenden Schaltern. Diese sind teuer, erfordern erhöhten, oft unübersichtlichen Aufwand und geben nicht immer ruhige Bilder. Wesentlich besser bewährt sich die folgende Anordnung, die auch sehr billig ist.

Vorversuche (die schon beim Kapitel Elektronenröhre durchgeführt werden können):

- Vergrößern und Verkleinern des Anodenstromes durch die Gitterspannung (9-V-Anode).
- Kleine Wechselfspannung (1 V) an Gitter und Kathode gibt verzerrten Anodenwechselstrom.
- Entzerrung durch Einstellung auf den Arbeitspunkt: Gittervorspannung durch Batterie oder automatische Vorspannung durch Kathodenwiderstand.

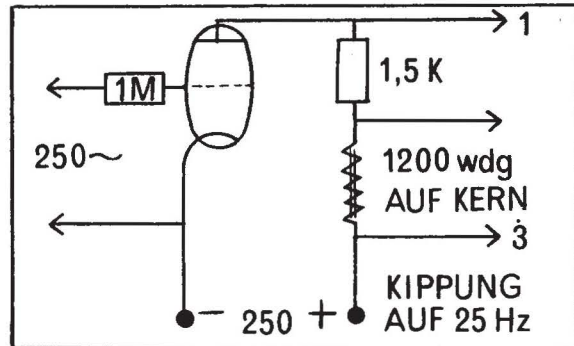


- d) Bei höherer Gitterwechselfspannung zeigt sich Verzerrung der Anodenstromschwankungen (Übersteuerung; Erklärung mit Hilfe der Kennlinie). Bei sehr hoher Spannung (250 V, über 1 MOhm zugeführt) zeigt der Anodenstrom einen rechteckigen Verlauf:

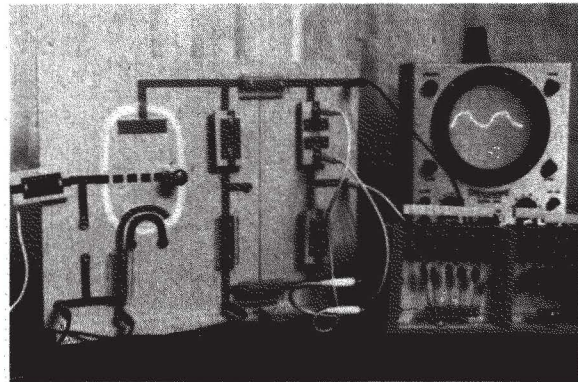


Also wirkt die Röhre jetzt als Schalter mit der Schaltfrequenz 50 Hz.

1) Schaltvorgang bei Spulen



Werden die Anschlüsse 1 und 2 an den Y-Verstärker gelegt, erhält man den zeitlichen Verlauf der Stromstärke (durch den von ihr erzeugten Spannungsabfall).



Wir verallgemeinern das Ohmsche Gesetz durch den Gedanken, daß in Induktivitäten durch die Feldänderung eine Gegenspannung induziert wird:

$$U - L \frac{di}{dt} = RI$$

Beim Einschalten wird eine konstante Spannung U_0 angelegt:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_0}{L} - \frac{R}{L} \cdot i$$

Wäre der Ohmsche Widerstand sehr klein und daher zu vernachlässigen, ergäbe sich

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_0}{L} \quad i = \frac{U_0}{L} \cdot t$$

also ein linearer Anstieg der Stromstärke, bis die durch den Ohmschen Widerstand gegebene Grenze $i = \frac{U_0}{R}$ erreicht ist.

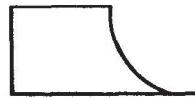
Das vernachlässigte Glied $-\frac{R}{L} \cdot i$ bedeutet nun:

Der Anstieg der Stromstärke wird vermindert um ein der jeweiligen Stromstärke proportionales Glied. Beim Einschalten ist $i=0$, daher ist der Anstieg wirklich $\frac{U_0}{L}$.

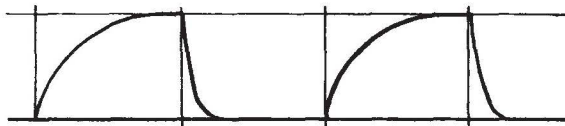
Wenn aber die Stromstärke immer mehr zunimmt, wird der Anstieg immer stärker verkleinert:

Beim Ausschalten wird $U_0=0$, $\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot i$.

Also ist der Anstieg negativ, d. h. die Stromstärke fällt ab, und zwar zuerst am steilsten, später, wenn die Stromstärke immer kleiner wird, fällt sie immer weniger steil:

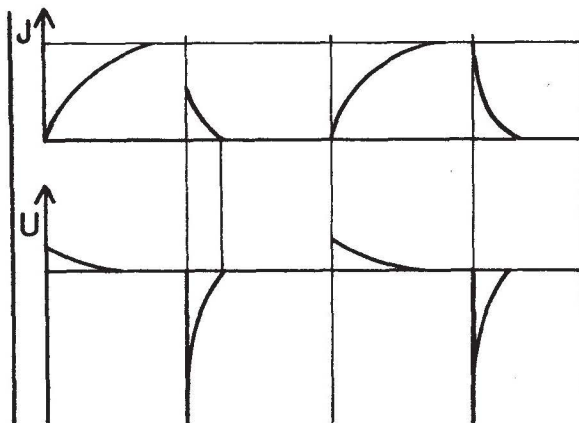


Im Einklang mit der Theorie ergibt sich das Schirmbild:

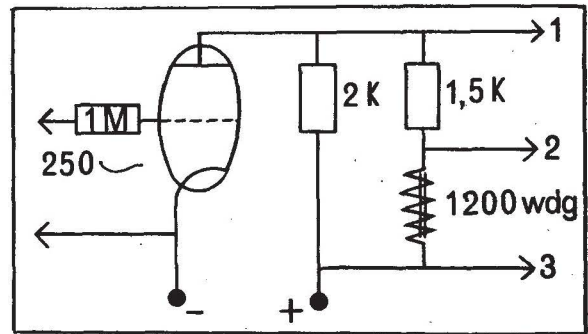


Schließt man den Y-Verstärker an 2 und 3 an, erhält man die Spannung an der Spule. Da sie durch $U_L = L \frac{di}{dt}$

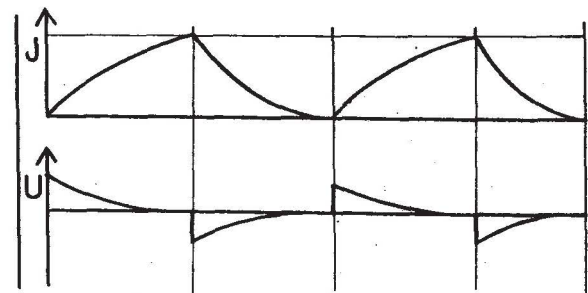
gegeben, also proportional $\frac{di}{dt}$ ist, erscheint nun die erste Ableitung der Stromstärkekurve. Sie kann durch die Schüler erarbeitet und nachher auf dem Bildschirm bestätigt werden:



Will man diesen Gedankengang noch ein wenig ausbauen, könnte man die Schaltung ein wenig verändern:



Wegen der Parallelschaltung ist die Spannung jetzt geringer, daher steigt die Stromstärke weniger steil an, und da sie kleiner bleibt, ist auch der Abfall verzögert:

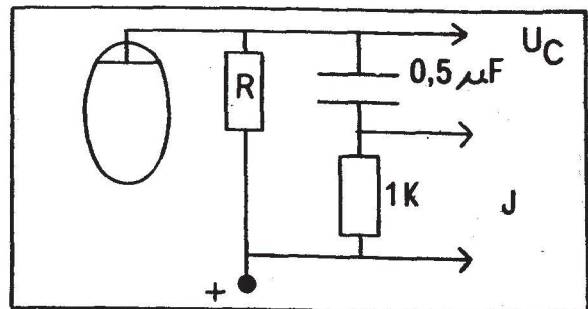


An den Anschlüssen 2 und 3 erhält man wieder die Spannung. Man beachte den Unterschied zu den Schirmbildern der früheren Schaltung, die man durch Herausziehen von $R=2\text{ k}\Omega$ sofort wiederherstellen kann!

Mit Hilfe eines elektronischen Umschalters könnte man die i - und U -Kurve gleichzeitig darstellen, jedoch wird dadurch die Schaltung unübersichtlicher!

2) Kondensatoren

Auch hier könnte man mit der Funktion $U = \frac{Q}{C} = RI$ beginnen und mathematisch ableiten, doch würde ich in diesem Fall die qualitative Überlegung vorziehen.

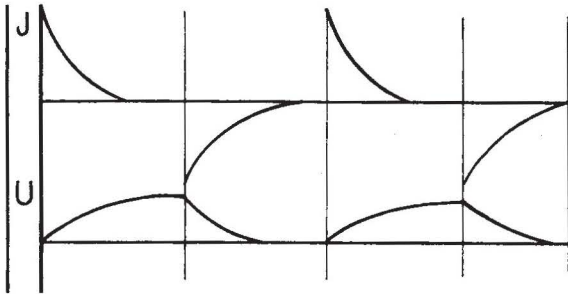


R ist zuerst $1,5\text{ k}\Omega$.

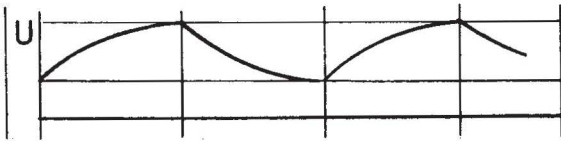
Die Stromstärke hat beim Einschalten ihren Maximalwert, später wird sie durch die Gegenspannung des sich aufladenden Kondensators verkleinert.

Beim Ausschalten bewirkt die Spannung des Kondensators das Abfließen der Ladung, das bei sinkender Spannung natürlich verlangsamt wird.

Aus der Ladestromkurve kann man leicht die Spannung am Kondensator überlegen.



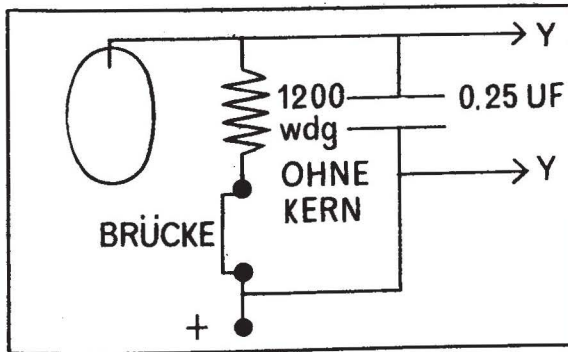
Die Entladung erfolgt über den Widerstand R. Wird R auf 5 oder 10 kOhm vergrößert, erfolgt die Entladung langsamer. Wenn der Oszillograph einen Gleichspannungseingang besitzt, kann man bei R=50 kOhm sehen, daß sich der Kondensator nicht mehr vollständig entladen kann:



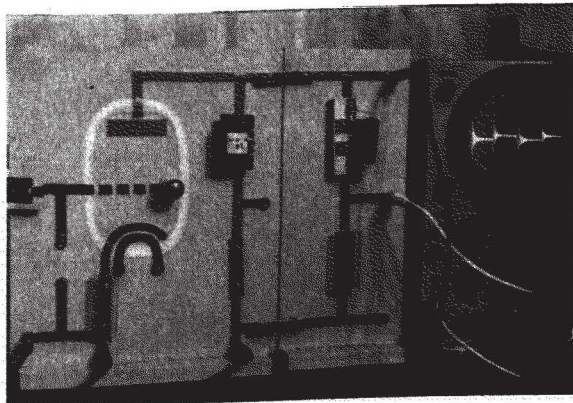
Schließlich wird noch der Kondensator variiert (bei R=1,5 kOhm). Der Ladevorgang wird bei 0,25, 0,5, 1 und 2 Mikrofard beobachtet. Man erkennt, daß die Aufladung immer länger dauert.

3) Gedämpfte Schwingungen

Es gibt einige Verfahren, die gedämpfte elektrische Schwingung zu demonstrieren. Wenn es darum geht, den Weg von der gedämpften zur ungedämpften und zur Hochfrequenz-Schwingung zu durchschreiten, ist das hier geschilderte Verfahren methodisch nicht das beste. Aber durch die exakte, 50mal pro Sekunde erfolgende Aufladung des Kondensators ist dieser Versuch sehr geeignet, wenn die Schwingungsformel von Thomson experimentell bewiesen werden soll.



a) Nach jeder Hundertstelsekunde beginnt eine neue Schwingung. Durch Auszählen der Schwingungen erhält man leicht die Frequenz.



b) Statt der Brücke werden immer größere Widerstände (am besten ein Potentiometer 500 Ohm) eingesetzt. Man erkennt die stärkere Dämpfung.

c) Nachweis der Proportionalitäten der Schwingungsformel:

I) Statt 0,25 μ F wird 1 μ F eingesetzt.

II) Statt der Spule 1200 Wdg. zwei in Serie geschaltete Spulen anschließen.

d) Nachweis der Schwingungsformel $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

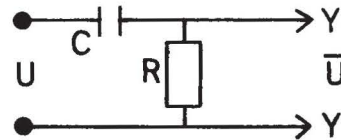
Eine Zylinderspule mit 600 Windungen, deren L berechnet werden kann, und ein Kondensator 1 μ F werden angeschlossen. Bei Auszählen der Schwingungen erhält man genaue Übereinstimmung zwischen der berechneten und der beobachteten Frequenz.

Differenzieren und Integrieren auf dem Bildschirm

Für eine Serienschaltung aus Kondensator und Widerstand gilt:

$$U = \frac{Q}{C} + RI \quad I = \frac{dQ}{dt}$$

1) Differenzieren:



R sei klein (etwa 500 Ohm), C ebenfalls klein (60 nF). In diesem Fall kann der kleine Spannungsabfall an R vernachlässigt werden, und es gilt angenähert

$$U = \frac{Q}{C} \quad \frac{dU}{dt} = \frac{1}{C} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad \frac{dU}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I$$

Die Stromstärke I erzeugt am Widerstand R einen Spannungsabfall \bar{U} , der dem Vertikalverstärker des Oszillographen zugeführt wird.

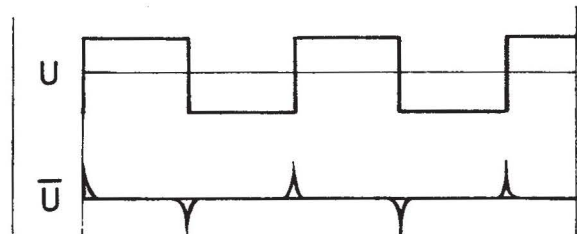
$$\bar{U} = R \cdot I$$

$$I = \frac{\bar{U}}{R}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C} \cdot \frac{\bar{U}}{R} \quad \bar{U} = CR \cdot \frac{dU}{dt}$$

Also ist die auf dem Bildschirm erscheinende Spannung proportional dem Differentialquotienten der an das RC-Glied angelegten Spannung.

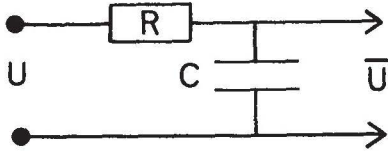
Die im Kapitel „Schaltvorgänge“ erzeugte Rechteckspannung wird angelegt:



Eine sinusförmige Spannung ergibt eine um 90 Grad vorverschobene, unter Umständen durch die Netzober-schwingungen stark zerklüftete Kurve.

Durch ein zweites, gleichartiges RC-Glied erhält man den zweiten Differentialquotienten.

2) Integrieren



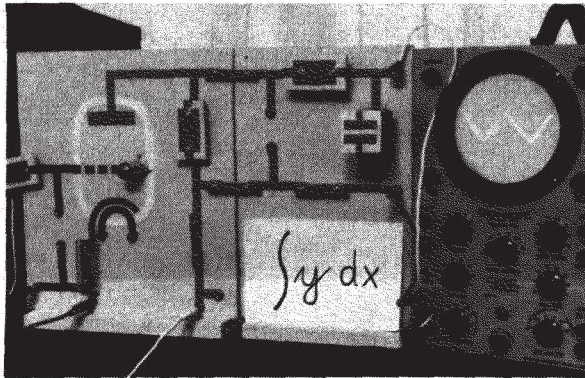
R ist möglichst groß, C ebenfalls.
 In diesem Fall ist die Stromstärke praktisch nur durch den Ohmschen Widerstand begrenzt: $I = \frac{U}{R}$
 Auf dem Bildschirm wird die Spannung am Kondensator betrachtet:

$$\bar{U} = \frac{Q}{C} \quad Q = \int I dt$$

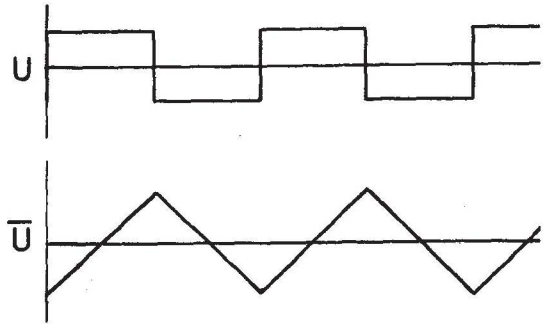
$$\bar{U} = \frac{1}{C} \cdot \int I dt$$

$$= \frac{1}{C} \int \frac{U}{R} dt = \frac{1}{RC} \int U dt$$

Auf dem Bildschirm muß also die Integralfunktion zur angelegten Spannung erscheinen.



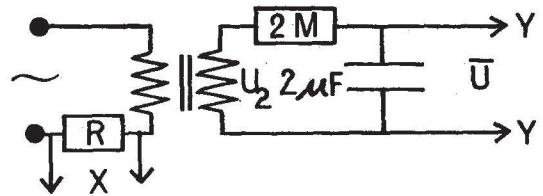
Beispiel:



3) Hintereinanderschalten eines Differenzier- und eines Integriergliedes ergibt wieder die ursprüngliche Rechteckfunktion: Differenzieren und Integrieren sind also inverse Operationen.

Solche Differenzier- und Integrierglieder werden in der Technik verwendet (z. B. beim Fernsehempfänger).

Aber auch wir brauchen für die Darstellung der Hysteresis-Schleife ein Integrierglied:



Der für die Horizontalablenkung verwendete Spannungsabfall an R ist ein Maß für die Stromstärke und damit auch für die Erregungsstärke H. Also muß man noch vertikal B aufzeichnen. Nach dem Induktionsgesetz gilt:

$$U_2 = n \cdot \frac{d\Phi}{dt} = nF \frac{dB}{dt} \quad B = \frac{1}{nF} \int U_2 dt$$

Wird daher die Sekundärspannung einem Integrierglied zugeführt, dann wird vertikal die Kraftflußdichte B aufgezeichnet.

