

Ultraschall

Die nachfolgenden Ausführungen stützen sich auf das Werk von L. BERGMANN¹ sowie auf die Berichte über die Ultraschall-Kongresse in Erlangen² 1949 und Rom³ 1950. BERGMANN behandelt das gesamte Gebiet (Theorie, Ultraschallerzeugung, Anwendung, wissenschaftliche Auswertung) erschöpfend. In den Kongreßberichten steht die medizinisch-biologische Seite im Vordergrund, es werden aber auch andere Probleme des Ultraschalles beleuchtet.

Unter Ultraschall (US) versteht man in der Akustik die Schallfrequenzen oberhalb der Hörgrenze des menschlichen Ohres. Unser Ohr nimmt Schallwellen von etwa 15 Schwingungen pro Sekunde bis

maximal 20 000 wahr, so daß beim US Schwingungen von rund 20 kHz an aufwärts in Frage stehen. Heute gelingt es, US-Schwingungen bis etwa $5 \cdot 10^6$ kHz zu erzeugen. In Wellenlängen ausgedrückt bedeutet dies, daß die US-Wellen den Bereich von einigen Zentimetern bis ca. $1 \cdot 10^{-4}$ cm umfassen und die kürzesten US-Wellen bereits in die Größenordnung der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes fallen. Gerade durch die Kleinheit der Wellenlänge haben sich besondere Anwendungen des US auf den verschiedensten Gebieten der Medizin, Naturwissenschaften und Technik ergeben, wobei die große Zahl von mehr als 2000 Arbeiten (das Buch von BERGMANN umfaßt ein Literaturverzeichnis von 2322 Nummern) vorwiegend in den letzten zwei Jahrzehnten erschienen sind.

Ultraschallerzeugung. Sie ist weniger Sache des Chemikers als des Physikers und des Ingenieurs. Wir dürfen uns daher hier mit dem Hinweis begnügen, daß die meisten Geräte zur US-Erzeugung für medizinische und technische Zwecke auf der Magnetostraktion und Piezoelektrizität beruhen.

¹ L. BERGMANN, *Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik*. Fünfte, völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, 748 Seiten, S. Hirzel Verlag, Zürich 1949. Gebunden Fr. 50.—.

² *Der Ultraschall in der Medizin*. Kongreßbericht der Erlanger Ultraschall-Tagung 1949, 485 Seiten. S. Hirzel Verlag, Zürich 1949. Gebunden Fr. 30.—.

³ *Der Ultraschall in der Medizin*, Bd. II. Bericht über den biologisch-medizinischen Teil des internationalen Ultraschall-Kongresses in Rom, 1950, 80 Seiten. S. Hirzel Verlag, Zürich 1950. Broschiert Fr. 5.—.

Der schon 1847 von JOULE entdeckte magnetostruktive Effekt besteht darin, daß ferromagnetische Materialien, vor allem Nickel, beim Einbringen in ein Magnetfeld eine wenn auch sehr kleine (Größenordnung von 10^{-6}) Verlängerung oder Verkürzung erfahren. Diese Erscheinung nennt man Magnetostraktion oder auch «Joule-Effekt». Ein in das Magnetfeld einer von Gleichstrom durchflossenen Spule gebrachter Nickelstah wird um einen winzigen Bruchteil seiner Länge verkürzt, und zwar unabhängig von der Richtung des Magnetfeldes. Überlagert man dem Gleichstrom einen Wechselstrom, so kann man diesen Stah zu Schwingungen anregen. Die Frequenz N dieser Grundschiwingung ist gegeben durch die Beziehung

$$N = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

(E = Elastizitätsmodul in dyn/cm^2 , ρ = Dichte des Stahmaterials in g/cm^3 , l = Länge des Stabes in cm). Außer in der Grundschiwingung lassen sich Stäbe auch in Oberschwingungen anregen. Die Zahl 1 im Zähler vor der Wurzel der Gleichung (1) ist dann durch $k = 1, 2, 3, \dots$, die Ordnungszahlen der Oberschwingungen, zu ersetzen. Für $k = 1$ gilt Gleichung (1). Der Ausdruck $N_1 l$ heißt Schwingungskoeffizient und ist für jeden Stoff charakteristisch. Für Nickel ist $N_1 l \approx 243\,600$, woraus als Grundschiwingung eines Nickelstabes von 10 cm Länge der Wert von 24,3 kHz resultiert. Die Schwingungsamplituden liegen bei Erregung in der Grundschiwingung in der Größenordnung von $10^{-4} l$ (l = Länge des Stabes). Die höchsten Frequenzen, die sich noch mit einiger Intensität erzeugen lassen, liegen bei etwa 60 kHz (es lassen sich allerdings noch höhere Frequenzen erzielen). Da bei diesen hohen Frequenzen in einem massiven Stah große Wirbelstromverluste auftreten, baut man solche Schwinger nicht als massive Stäbe, sondern verwendet dünne, zu Paketen aufeinandergeschichtete Blechlamellen, die zur Isolierung von einer Oxidschicht überzogen sind.

Häufiger werden piezoelektrische Schallgeber verwendet. Der piezoelektrische Effekt beruht auf der von J. und P. CURIE 1880 entdeckten Erscheinung, daß bei manchen Kristallen unter dem Einfluß von Druck oder Dehnung in gewissen Richtungen auf bestimmte Kristallflächen elektrische Ladungen auftreten, die den Zug- und Druckkräften proportional sind. Der Vorgang ist umkehrbar, d. h. es kann durch einen solchen Kristall elektrische Energie in Schall umgewandelt werden. Die Erscheinung tritt bei verschiedenen Kristallen auf und ist nicht an eine bestimmte Kristallklasse gebunden. Das gemeinsame Kennzeichen ist das Vorhandensein einer oder mehrerer polarer Achsen bzw. polarer Richtungen oder das Fehlen eines Symmetriezentrums. Am meisten wird Quarz angewendet. Legt man an eine Quarzplatte — unter Berücksichtigung einer bevorzugten

Richtung⁴ — ein elektrisches Wechselfeld an, so wird der Quarz in der einen Phase des Wechselfeldes komprimiert und in der darauffolgenden Phase um den gleichen Betrag dilatiert, d. h. er wird im Takte der Wechselfrequenz zu elastischen Schwingungen angestoßen. Es sind zwei Schwingungsarten möglich, die «Dickenschwingung» und die «Längsschiwingung».

Im Falle der Dickenschwingung berechnet sich die elastische Eigenfrequenz der Grundschiwingung zu

$$N_d = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{c_{11}}{\rho}} \quad (2)$$

(d [cm] = Plattendicke, ρ [g/cm^3] = Dichte, c_{11} [dyn/cm^2] = Elastizitätsmodul). Für Quarz ist $\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$ und $c_{11} = 85,5 \cdot 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$. Hieraus ergibt sich

$$N_d = \frac{285\,600}{d} \text{ Hz.} \quad (3)$$

Die Grundfrequenz der Längsschiwingung eines Quarzstabes von der Länge l [cm] beträgt

$$N_l = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4)$$

(E = Elastizitätsmodul). Für $E = 77,22 \cdot 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$ ist

$$N_l = \frac{269\,900}{l} \text{ Hz.} \quad (5)$$

Gleichungen (3) und (5) geben die theoretisch berechneten Werte für die Grundschiwingungen einer Quarzplatte bzw. eines Quarzstabes, die jedoch nur in erster Näherung gelten. Die einzelnen US-Gebir sind im Buch von BERGMANN ausführlich beschrieben, es sei darauf verwiesen.

Nachweis und Messung des US. Es interessieren Wellenlänge, Intensität und Absorption. Allerdings sind die in der Akustik des Hörbereiches benutzten Methoden nur im Gebiete der tieferen US-Frequenzen, wo die Schallwellen noch in der Größenordnung von Zentimetern liegen, anwendbar. Bei den höheren US-Frequenzen dienen im wesentlichen optische Methoden. Das Schlierenverfahren liefert ein unmittelbares Bild der Schallwelle, indem diejenigen Stellen des Mediums sichtbar werden, an denen der Brechungsindex durch die Schallwelle verändert wird. An den in Flüssigkeiten verlaufenden Schallwellen tritt eine Beugung des Lichtes ein, die ganz ähnliche Erscheinungen hervorruft wie die Beugung des Lichtes an einem gewöhnlichen optischen Strichgitter. Ein weiteres optisches Verfahren ist das der «sekundären Interferenzen» bei der Beugung des Lichtes an mehreren sich kreuzenden Schallwellen.

Anwendung des US. Sie ist in Physik, Chemie, Medizin und Technik mannigfach; eines der

⁴ Näheres vgl. BERGMANN, l. c.

Hauptanwendungsgebiete betrifft die US-Geschwindigkeitsmessung. Bei Flüssigkeiten liegt ihre Hauptbedeutung in der dadurch möglichen Bestimmung der adiabatischen Kompressibilität. Die bis heute vorliegenden Versuche lassen einen Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Konstitution organischer Verbindungen erkennen. Wichtig ist auch die Schallabsorption in Flüssigkeiten. Durchläuft eine ebene Schallwelle eine Strecke x , so sinkt die Schallamplitude A_0 auf den Betrag

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x} \quad (6)$$

(α = Absorptionskoeffizient der Schallamplitude). Für die Entfernung der Schallintensität I mit der Entfernung x gilt die Gleichung

$$I_x = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (7)$$

Die Schallabsorption wird in erster Linie durch die innere Reibung oder Zähigkeit des schalleitenden Mediums bestimmt. Auch die Schallabsorption wird mit der chemischen Konstitution in Beziehung gebracht. Wie in Flüssigkeiten so werden Geschwindigkeit und Absorption auch in festen Körpern und in Gasen gemessen⁵. Die Theorie steht jedoch noch in der Entwicklung.

Die Erscheinung, daß sich hochfrequente Schallwellen in homogenen festen Stoffen, insbesondere in Metallen, als gerichtete Strahlen ohne große Absorption fortpflanzen können, aber an der Grenze Metall-Luft praktisch vollständig reflektiert werden, gestattet mittels US eine Prüfung von Werkstoffen auf innere Inhomogenität (Hohlräume, Risse usw.) vorzunehmen⁶.

Heute sind besonders wichtig dispergierende und kolloid-chemische Wirkungen des US, die die Herstellung von Emulsionen, die Dispergierung fester Stoffe in Flüssigkeiten, die Spaltung hochpolymerer Moleküle, die Anwendung des US bei der Peptisation usw. ermöglichen. Interessant ist auch die durch US verursachte Doppelbrechung. Wichtig sind schließlich die bakteriziden Wirkungen des US und seine therapeutischen Wirkungen, die in den Berichten über die Tagungen in Erlangen und Rom eingehend behandelt sind.

Kavitation. Um dem Wesen der beim US auftretenden Kräfte etwas näher zu kommen, betrachten wir als Beispiel den Abbau von Makromolekülen durch US⁷. Im Gegensatz zum Wärmeabbau führt der US-Abbau nicht zum völlig abgebauten Grundmolekül, sondern hört bei einem gewissen asymmetrisch angestrebten Endmolekül von noch immer

beträchtlicher Größe (z. B. 27 000 bei Polystyrol in Toluol) auf. Es gilt folgender kinetischer Ansatz

$$\frac{dx}{dt} = k N_t (P - P_e) \quad (8)$$

(x = Zahl der zerrissenen Bindungen in 1 Liter Lösung, P = Polymerisationsgrad zur Zeit t , P_e = Endpolymerisationsgrad, N_t = Loschmidsche Zahl, k = Geschwindigkeitskonstante). Die «Schallausbeute», d. h. der Bruchteil der vorhandenen Makromoleküle, die durch eine einzelne US-Schwingung durchschnittlich zerrissen wird, ist nur etwa 10^{-2} , es bedarf also schon des Zusammenwirkens von mindestens 10^2 Einzelmolekülen, damit durch eine einzelne US-Schwingung eine Bindung zerrissen wird. Ferner ist zu beachten, daß die US-Frequenz (rund $3 \cdot 10^6$) um viele Größenordnungen niedriger ist als die Eigenfrequenz des Moleküls (rund 10^{14}) und daß die US-Wellenlänge in der Lösung (ca. 5 mm) um mehrere Größenordnungen höher liegt als die Länge der längsten Makromoleküle (ca. 1μ). Eine Deutung des Abbaues als Resonanzanregung scheidet daher ebenso aus wie etwa die einfache Deutung, daß ein einzelnes Molekül in verschiedene bewegte Zonen der Schallwelle gelange und dadurch deformiert und auseinandergezogen werde. Das Molekül ist vielmehr einem winzigen, sehr dünnen Fäserchen (z. B. 1 cm lang und 1μ dick) in einer sehr langen Meereswelle (z. B. 50 m lang) zu vergleichen.

Heute neigt man zur Ansicht, daß der Abbau von Makromolekülen sowie chemische und mechanische Wirkungen des US im allgemeinen Folgeerscheinungen der Gaskavitation sind. In der Hydrodynamik versteht man unter Kavitation die Erscheinung, daß sich in einer Flüssigkeit bei genügend großer Zugspannung Hohlräume bilden, die dann im nächsten Augenblick mit großer Heftigkeit wieder zusammenstürzen und dabei die Energie eines bestimmten Umgebungsgebietes auf sich ziehen und in einen Punkt konzentrieren. Durch diese Energiekonzentration treten Drücke bis etwa 1000 Atmosphären, Temperaturen von einigen hundert Grad und Bewegungsstöße auf, die normale Schallfeldgrößen um zwei bis drei Zehnerpotenzen übersteigen. Daß hierbei auch festere Bindungen an Makromolekülen aufgelöst werden, ist verständlich⁸.

Ausblick. Die Anwendung des US in der Technik erscheint erfolgversprechend, doch fehlen für die Großbetriebe noch die erforderlichen genügend wirtschaftlichen US-Generatoren. Die Entwicklung ist hier abzuwarten. Aus dem wissenschaftlichen Laboratorium, aus der Meß- und Prüftechnik sowie der Biologie und der Medizin ist der US heute nicht mehr wegzudenken.

H. MOHLER

⁵ Technisch wichtig ist die Zusammenballung von Rauch-, Nebel- und Staubiellen durch US.

⁶ R. V. BAUM, Ultraschall-Diagnostik im Materialprüfungswesen. Übersicht, Erfahrungen und Entwicklung. Erlanger Bericht 1949.

⁷ G. SCHMID, Abbau von Makromolekülen durch Ultraschall. Erlanger Bericht 1949.

⁸ H. KELTER, Ein Beitrag zum Wesen der Kavitation. Erlanger Tagung 1949. Bei der medizinischen Anwendung des US bereitet das Problem der Kavitation Sorge, weil sie Schäden im Körperinnern verursachen kann.