

# ULTRASCHALL UND MIKROSKOPISCHE METHODEN DER ULTRASCHALLTECHNIK

Mit 3 Abbildungen

Von DOZ. DR. ING. FRITZ GABLER

Die Ultraschalltechnik hat in den letzten 10 bis 15 Jahren ungeahnte Fortschritte erzielt (vgl. vor allem das Standardwerk von BERGMANN [1]). Natürlich ist Ultraschall an sich schon längst bekannt: man versteht darunter Schallschwingungen, die so rasch vor sich gehen, daß ihnen der mechanische Apparat des menschlichen Ohres nicht mehr zu folgen vermag, und die daher unhörbar bleiben. Wenn es aber heute möglich ist, auf den verschiedensten Gebieten von Wissenschaft und Technik Ultraschallmethoden mit dem größten Erfolg einzuführen — man lotet Meerestiefen und bestimmt Schiffspositionen (2); diagnostiziert und bekämpft Tumore (3); stellt kolloidale Lösungen und höchst feinkörnige Emulsionen auch schwerst emulgierbarer Stoffe, wie Quecksilber, her (4); behandelt mit Ultraschall erfolgreich Schwerhörigkeit (5) und Gelenkserkrankungen (6); beschleunigt den Ablauf gewisser chemischer Reaktionen (7); entgast hochwertige Glas- und Metallschmelzen (8); homogenisiert Milch, altert in wenigen Minuten alkoholische Getränke um Jahre, wäscht schmutzige Wäsche, beseitigt Nebel über Flugplätzen (9); schlägt Schwebeteilchen aus Abgasen und Rauch nieder (10) und führt zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen durch (11) — wenn alle diese und eine Unzahl weiterer, hier gar nicht erwähnter Anwendungsmöglichkeiten bestehen, so verdankt man dies in erster Linie der Entwicklung leistungsfähiger und betriebssicherer Ultraschallgeneratoren.

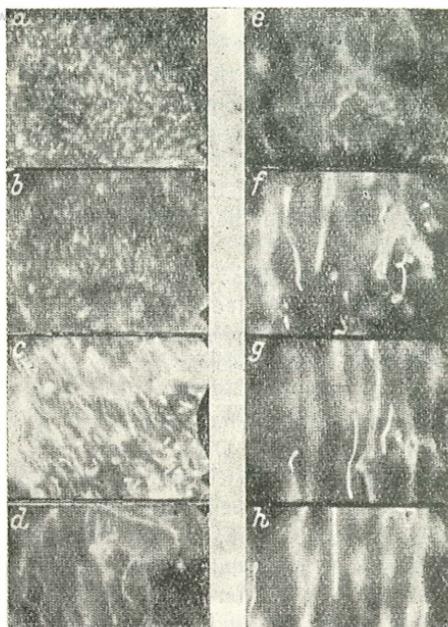
Wir wollen uns hier nur ganz am Rande mit der Frage befassen: wie erzeugt man Ultraschall?

Da Ultraschall, ebenso wie Hörschall, eine fortschreitende (longitudinale) Schwingung der Materie ist, wird, wie bei jeder Schallquelle, ein mechanisches System zu Eigenschwingungen angeregt. (Daraus erkennt man sofort: zum Unterschied von elektromagnetischen Wellen vermag sich Ultraschall im Vakuum nicht auszubreiten!) Nur besitzt im Ultraschallgebiet dieses System (das im Hörbereich durch Pfeife, Saite oder Membran verkörpert ist) eine solche Form, daß seine Eigenschwingungszahl, welche die Tonhöhe festlegt, jenseits der Hörbarkeitsgrenze für das menschliche Ohr, also über etwa 20 kHz<sup>1)</sup> liegt. Bemerkenswert ist übrigens, daß Kleinlebewesen, u. a. Mäuse, Ratten und Fledermäuse, noch viel höhere Frequenzen hören. Letztere besitzen sogar feinste Ultraschallsende- und -empfangsorgane, die den Blindflug dieser Tiere nach dem Echolotungsverfahren ermöglichen. Und in der Legende vom Rattenfänger liegt vermutlich auch ein Körnchen Wahrheit in dem Sinn, daß mit einer Pfeife sehr wohl neben hörbaren Tönen auch solche erzeugt werden können, die zwar nicht für den Menschen, aber für Ratten und Mäuse hörbar sind.

<sup>1)</sup> Schwingungszahlen oder Frequenzen drückt man in Hertz (Hz) bzw. Kilohertz (kHz) aus: 1 kHz = 1000 Hz = 1000 Schwingungen pro Sekunde.

Abb. 1. Rauchteilchen in Dunkelfeld-  
beleuchtung.

Expositionszeit:  $\frac{1}{25}$  Sekunde; a vor,  
b—f während und g und h nach  
der Einwirkung von Ultraschall.  
(Nach Brandt und Freund.)



Freilich gibt es die verschiedensten Möglichkeiten zur Erregung von Eigenschwingungen hoher Frequenz. Die gebräuchlichste Methode beruht auf einer als Piezoelektrizität bekannten Eigenschaft vieler Kristalle (12), wie Quarz, Turmalin u. a. Bringt man z. B. eine passend geschliffene Quarzplatte in ein elektrisches Feld, so dehnt sie sich aus oder zieht sich zusammen, je nach der Richtung der elektrischen Kraftlinien. In einem elektrischen Wechselfeld führt die Platte infolgedessen elastische Schwingungen aus, die sich bei „Resonanz“, wenn die Frequenz des elektrischen Feldes mit der Eigenschwingungszahl der Platte übereinstimmt, zu größter Intensität aufschaukeln. Hier ist also die Quarzplatte der Ultraschallgeber, während ein leistungsfähiger Hochfrequenz-Röhrengenerator für ihre Anregung sorgt. Nach einem anderen in der Praxis üblichen Verfahren wird hochfrequenter Wechselstrom durch eine über einen ferromagnetischen Metallstab gesteckte Spule geführt; der Stab gerät im Takte der hochfrequenten Ummagnetisierung in Schwingung und sendet im Resonanzfall intensive Ultraschallwellen aus (sog. „Magnetostriktionssender“ [13]). In neuerer Zeit wurde schließlich eine besonders leistungsfähige „Ultraschallsirene“ entwickelt (14). Diese erlaubt allerdings nur die Erzeugung tiefer Ultraschallfrequenzen, kaum über 30 kHz, während es mit Quarzplatten keine Schwierigkeiten bereitet, 10.000 kHz und darüber zu erzeugen. Als Faustformel ist leicht zu merken: die in kHz ausgedrückte Frequenz einer Quarzplatte der Dicke  $d$  mm wird durch:  $3 \times 10^3/d$  gegeben.

Für die Praxis ist nun entscheidend, daß sich Ultraschall mit ungleich größerer Intensität erzeugen läßt als Hörschall; das hängt unmittelbar mit der hohen Frequenz zusammen. Die Energiedichte moderner Ultraschallsender ist mit maximal 10 Watt/qcm rund 10.000mal größer als jene, die beim Abfeuern eines Geschützes frei wird<sup>1)</sup>. Der hohen Schalleistung solcher Sender (in der Größenordnung von 100 und 1000 Watt) entsprechen die oft verblüffenden Wirkungen der von ihnen erzeugten Ultraschallwellen.

Wie sind nun diese Wirkungen zu verstehen? Zunächst müssen wir uns vor Augen halten, daß die ultrabeschallte Materie im Takt der Schallfrequenz zum Mitschwingen gebracht wird. Ist die Frequenz beispielsweise 300 kHz, so wird jedes Materieteilchen 300.000mal pro Sekunde erst in einer Richtung beschleunigt in Bewegung gesetzt, dann abgestoppt und schließlich rückläufig bewegt. Zwar ist die Geschwindigkeit der Bewegung und auch die von den einzelnen Teilchen zurückgelegte Schwingungsweite klein; die Beschleunigungen übertreffen jedoch die Fallbeschleunigung um mehrere Größenordnungen. Dazu kommt noch, daß die Materie in den Knotenpunkten der Schallwelle abwechselnd hoch komprimiert und dilatiert wird. Nun ist, um bei der Frequenz von 300 kHz zu bleiben, die Schallwellenlänge in Wasser rund 5 mm, so daß es auf kleinem Raum zu beachtlichen Druckdifferenzen kommen kann<sup>2)</sup>.

Diese Druckdifferenzen, welche in Flüssigkeiten zur bekannten Erscheinung der Kavitation führen, sowie die enormen Beschleunigungskräfte, sind für die außerordentlichen mechanischen und wegen der Reibung schließlich auch thermischen Wirkungen von Ultraschall verantwortlich zu machen. Wenn diese Wirkungen auch besonders auffallend sind, so lassen sich aber doch nicht alle durch Ultraschall hervorgebrachten Effekte durch sie allein erklären. Während man sich z. B. die Ultraschallwirkung bei der Einleitung oder Beschleunigung chemischer Reaktionen gewissermaßen als „Aktivierung“ durch die zugeführte Schallenergie denken kann, ist der Einfluß der Ultrabeschallung auf den menschlichen Organismus die Summe der verschiedensten, im einzelnen noch gar nicht restlos geklärten Wirkungen.

Die Mikroskopie hat sich als äußerst wichtiges, ja unentbehrliches Hilfsmittel sowohl zur Erforschung der Ultraschallmethoden und ihrer Wirkungsweisen, als auch zur laufenden Überprüfung einschlägiger technischer Prozesse erwiesen. Spielen sich doch die meisten dabei auftretenden Erscheinungen in Dimensionen ab, die dem freien Auge nicht oder nur unzureichend deutlich werden.

Da sind z. B. alle auf der koagulierenden (zusammenballenden) Wirkung

---

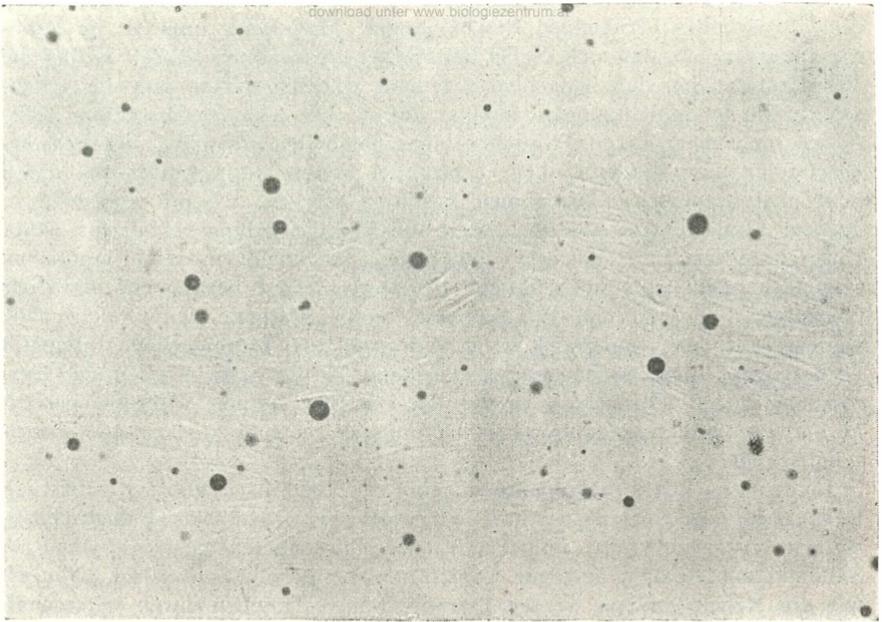
<sup>1)</sup> Zum Vergleich die Energiedichte eines Zimmerlautsprechers bei normaler Lautstärke:  $2 \times 10^{-9}$  Watt/qcm.

<sup>2)</sup> Die Rechnung ergibt bei 300 kHz, Ausbreitung der Ultraschallwellen in Wasser und einer Energiedichte von 10 Watt/qcm folgende abgerundete Werte: Druckdifferenzen 10 At., Maximalgeschwindigkeit 37 cm/Sek., Amplitude 0,2  $\mu$  und Beschleunigung  $7 \times 10^7$  cm/Sek.<sup>2</sup>, das ist etwa das 100.000fache der Fallbeschleunigung!

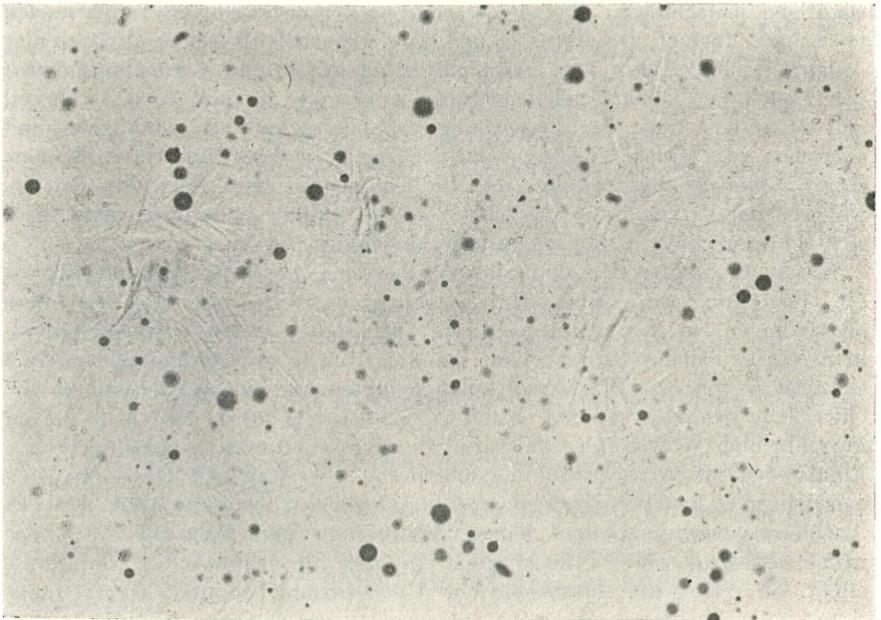
des Ultraschalles beruhenden Erscheinungen. Man fand, zunächst im Laboratoriumsversuch, daß sich Nebel bei starker Beschallung lichtet. Es lag die Vermutung nahe, daß benachbarte feinste Nebeltröpfchen, von der Ultraschallwelle in Schwingungen versetzt, durch ihre lebhafteste Bewegung kollidieren, sich zu größeren Tröpfchen zusammenballen und dann, der Schwerkraft folgend, zu Boden sinken. Tatsächlich konnte diese Auffassung durch mikrophotographische Aufnahmen bestätigt werden, worauf Versuche in großem Maßstab die Ausführbarkeit dieses Entnebelungsverfahrens außer Zweifel stellten. Es ist übrigens naheliegend, anzunehmen, das in ländlichen Gegenden auch heute noch übliche „Wetterschießen“ beruhe auf ähnlicher Grundlage. Die geringe Wirksamkeit dieser Methode leitet sich ohne weiteres aus der Unmöglichkeit ab, Hörschall von hinreichender Intensität zu erzeugen. Liegt doch sogar — vorläufig — die Schwierigkeit der Entnebelung durch Ultraschall, an der die Luftfahrt vitales Interesse besitzt, in der Bereitstellung zahlreicher leistungsfähiger und kostspieliger Ultraschallsender.

In den gleichen Fragenkomplex gehört die technisch und wirtschaftlich bedeutungsvolle Koagulation von Aerosolen (10). Der aus Fabrikschornsteinen austretende, mit feinsten festen Schwebeteilchen, wie z. B. Ruß, Salmiakdampf u. dgl., beladene Gasstrom, ist ein solches Aerosol. Ähnlich wie die Nebeltröpfchen werden hier die feinen Teilchen durch Ultraschall zu größeren zusammengeballt und fallen dann, entgegen dem aufsteigenden Gasstrom, langsam zu Boden, um dort in einer Sammelvorrichtung abgewaschen zu werden. Auch hier hat die mikroskopische Untersuchung zu wichtigen Aufschlüssen über die Korngröße der mitgeführten Teilchen, den jeweiligen Zustand des Aerosols und damit über die Wirtschaftlichkeit der Anlage geführt. Abb. 1 (15) zeigt mikrophotographische Momentaufnahmen von Rauch (in Dunkelfeldbeleuchtung), und zwar a) vor, b—f) während und g) und h) nach der Einwirkung von Ultraschall. Im Anfangszustand schweben die feinen Teilchen; im Bild sind sie als Pünktchen sichtbar. Gegen Ende der Beschallung sind die Teilchen so grob geworden, daß sie während der kurzen Expositionszeit von  $\frac{1}{25}$  Sekunde nahezu das ganze Gesichtsfeld durchfallen und als Striche abgebildet werden.

Eines der wichtigsten und ältesten Probleme der Ultraschalltechnik ist die Herstellung von Emulsionen. So gelingt es z. B., unter gewissen Voraussetzungen, in Wasser suspendierte Öltröpfchen durch Ultraschall in so kleine Teilchen zu zerreißen, daß sie, trotz ihres kleineren spezifischen Gewichtes, von den Wassermolekülen gehalten und am Aufsteigen an die Oberfläche gehindert werden. Nach diesem Prinzip lassen sich u. a. die im Maschinenbau so wichtigen haltbaren Bohröle fabrizieren; wohlschmeckende Emulsionen als Arzneimittel herstellen und die zwar von Haus aus vorhandene, aber grobkörnige Fettverteilung in der Milch verfeinern, was das Aufrahmen verhindert und höhere Haltbarkeit und Bekömmlichkeit der Milch bedingt. Da die Teilchengröße ein Maß für den erzielten Emulsions-effekt ist, führt die mikroskopische Untersuchung einiger, während des



*Abb. 2 a. Quecksilberemulsion, 10 Sekunden beschallt.*



*Abb. 2 b. Quecksilberemulsion, 5 Minuten beschallt.*



*Abb. 3 a. Antimonschmelze unbeschallt.      Abb. 3 b. Antimonschmelze beschallt.*  
(Nach Schmid und Ehret.)

Arbeitsganges entnommener Proben, rasch zu einem Aufschluß über den Wirkungsgrad des Verfahrens. Die Abb. 2 zeigen z. B. Mikrophotographien einer Emulsion von Quecksilber in Vaseline, die bei  $50^{\circ}\text{C}$  und  $350\text{ kHz}$  hergestellt und nach dem Erstarren in  $0,02\text{ mm}$  dicker Schicht untersucht wurde. Es ist auffallend, daß schon nach 10 Sekunden Beschallungsdauer eine deutliche Trübung die einsetzende Emulsionsbildung anzeigt (Abb. 2 a). Nach 5 Minuten Ultraschalleinwirkung (Abb. 2 b) ist die Emulsion bereits in einer Schichtdicke von wenigen Millimetern undurchsichtig geworden und ändert ihr Aussehen, auch im Mikroskop, bei weiterer Beschallung nicht mehr. Dieses Verhalten ist charakteristisch für die Emulsionsherstellung durch Ultraschall; während die prozentuelle Verteilung auf die verschiedenen Teilchengrößen (bei Quecksilber in Abb. 2 unter  $7\ \mu$ ) angenähert konstant bleibt, strebt die emulgierte Menge einem Grenzwert zu. Er ist erreicht, wenn die emulgierende Wirkung des Ultraschalles bei steigender Konzentration mit dem gegenteiligen Effekt, der Koagulation, im Gleichgewicht steht.

Eine interessante Anwendung des Ultraschalles betrifft die Herstellung kolloidaler Lösungen. So läßt sich z. B. unter der Einwirkung von Ultraschall ein Goldoleosol von höchster therapeutischer Wirksamkeit, vor allem gegen chronische Gelenkerkrankungen und Tuberkulose, erzeugen, das ohne alle toxischen Nebenerscheinungen verträglich ist<sup>1)</sup>. Die zerteilende Wirkung, die Ultraschall auf feste und flüssige Körper ausübt und die teils auf direktes Zerreißen infolge hoher Druckunterschiede, teils auf Zermahlen infolge der Reibung beim Schwingungsvorgang zurückzuführen ist, verhindert die Zusammenballung der entstehenden feinen Goldteilchen zu größeren Komplexen und es entsteht ein Goldkolloid von außerordentlich feiner und gleichmäßiger Verteilung, das auch besonders gute Haltbarkeit besitzt.

<sup>1)</sup> Dieses Präparat wird unter dem Namen „Ultrachrysol“ von der Firma Malis & Co., Laboratorium für chemisch-pharmazeutische Produkte und Ultraschallforschung, Wien, erzeugt und in den Handel gebracht.

Letzteres ist im Hinblick auf die bekannte Neigung kolloidaler Metallpräparate zur Instabilität besonders bemerkenswert. Die Lichtmikroskopie ist bei der Untersuchung dieses Goldpräparates an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit angelangt. Die überwiegende Menge aller Goldpartikel ist kleiner als  $10^{-5}$  mm und kann demnach auch bei intensiver Beleuchtung mit dem Dunkelfeldkondensator nicht in ihre Einzelbestandteile aufgelöst, sondern nur als milchiger Schleier beobachtet werden. Es ist dies ein typisches Anwendungsgebiet für das Elektronenmikroskop.

Auch die Metallurgie hat Ultraschallmethoden eingeführt, z. B. zeigen die Wiedergaben mikrographischer Aufnahmen von SCHMID und EHRET (13) in Abb. 3 die Wirkung von Ultraschall auf erstarrende Metallschmelzen. Man erkennt deutlich die erzielte Kornverfeinerung im Kristallgefüge. Sie ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß die Keime während des Erstarrens zerreißen und so ihre Anzahl vermehrt wird. Dadurch vermindert sich, was technisch sehr wichtig ist, die Sprödigkeit des Metalles ganz wesentlich.

Zum Schluß sei noch auf ein ganz neues, weite medizinische Perspektiven eröffnendes Ultraschallverfahren hingewiesen, das, von CORONINI und LASSMANN zum Teil in Zusammenarbeit mit dem Verfasser entwickelt, die Versilberung des nervösen Gewebes nach GRATZL histologischen Präparaten betrifft. LASSMANN (16) hat hierüber bereits an anderer Stelle kurz referiert. Im übrigen soll der ausführlichen, demnächst in dieser Zeitschrift erscheinenden Veröffentlichung nicht vorgegriffen werden.

### Literatur

1. Bergmann L., Der Ultraschall. 3. Aufl. VDI-Verlag, Berlin, 1941.
2. Langevin M. P., Franz. Pat. 502913 (1918).  
— Rev. gén. Electr. **23** (1928): 626.  
Kunze W., Schiffbau **35** (1934): 379.
3. Dussik K. Th., Dussik F. und Wyt L., Wr. Med. Wsch. **97** (1947): 425.
4. Wood R. W. und Loomis A. L., Phil. Mag., VII. Folge, **4** (1927): 417.  
Bondy C. und Söllner K., Trans. Faraday Soc. **32** (1936): 556.  
Malis M., Österr. Patentanmeldung 1948; Belg. Pat. Nr. 482.720.
5. Wyt L., Wr. Med. Wsch. **98** (1948): 405.
6. Hintzelmann U., Dtsch. Med. Wsch. (1947): 350.
7. Beuthe H., Z. physik. Chem. A, **163** (1933): 161.
8. Krüger F., Glastechn. Ber. **16** (1938): 233.
9. Herzl V. Österr. Pat. Nr. 142 886 (1934).
10. Protopopow B. A., Russ. Pat. Nr. 59911 (1938).  
Manchester H., The Atlantic Monthly **180** (1947): 54.
11. Porter R. W., Chemical Engineering (1948): 100.
12. Meyer E. und Buchmann G., Akust. Z. **3** (1938): 132.
13. Curie J. und P., C. R. Acad. Sci., Paris, **91** (1880): 294.
14. Schmid G. und Ehret L., Z. Elektrochem. **43** (1937): 869.
15. Allen C. H. und Rudnick I., Journ. Acoust. Soc. Amer. **19** (1947): 857.
16. Brandt O. und Freund H., Bl. Unters. u. Forsch. Inst. **25** (1935): 415.
17. Lassmann G., Diskussionsbemerkung auf der 2. österr. Ärztetagung in Salzburg, 1948.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mikroskopie - Zentralblatt für Mikroskopische Forschung und Methodik](#)

Jahr/Year: 1948

Band/Volume: [3](#)

Autor(en)/Author(s): Gabler Fritz

Artikel/Article: [Ultraschall und mikroskopische Methoden der Ultraschalltechnik. 218-224](#)