

Sound & Science: Digital Histories

Archives NAG: Publicatie No. 58 van de Geluidstichting, Rijnja, H.A. & Kurtze, G. (1957).
Symposium Ultrageluid. Delft: Geluidstichting, 1957.

<https://acoustics.mpiwg-berlin.mpg.de/text/publicatie-no-58-van-de-geluidstichting>



Scan licensed under: [CC BY-SA 3.0 DE](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/) | Max Planck Institute for the History of Science



SYMPOSIUM ULTRAGELUID

I. TOEPASSING VAN ULTRAGELUID ONDER WATER

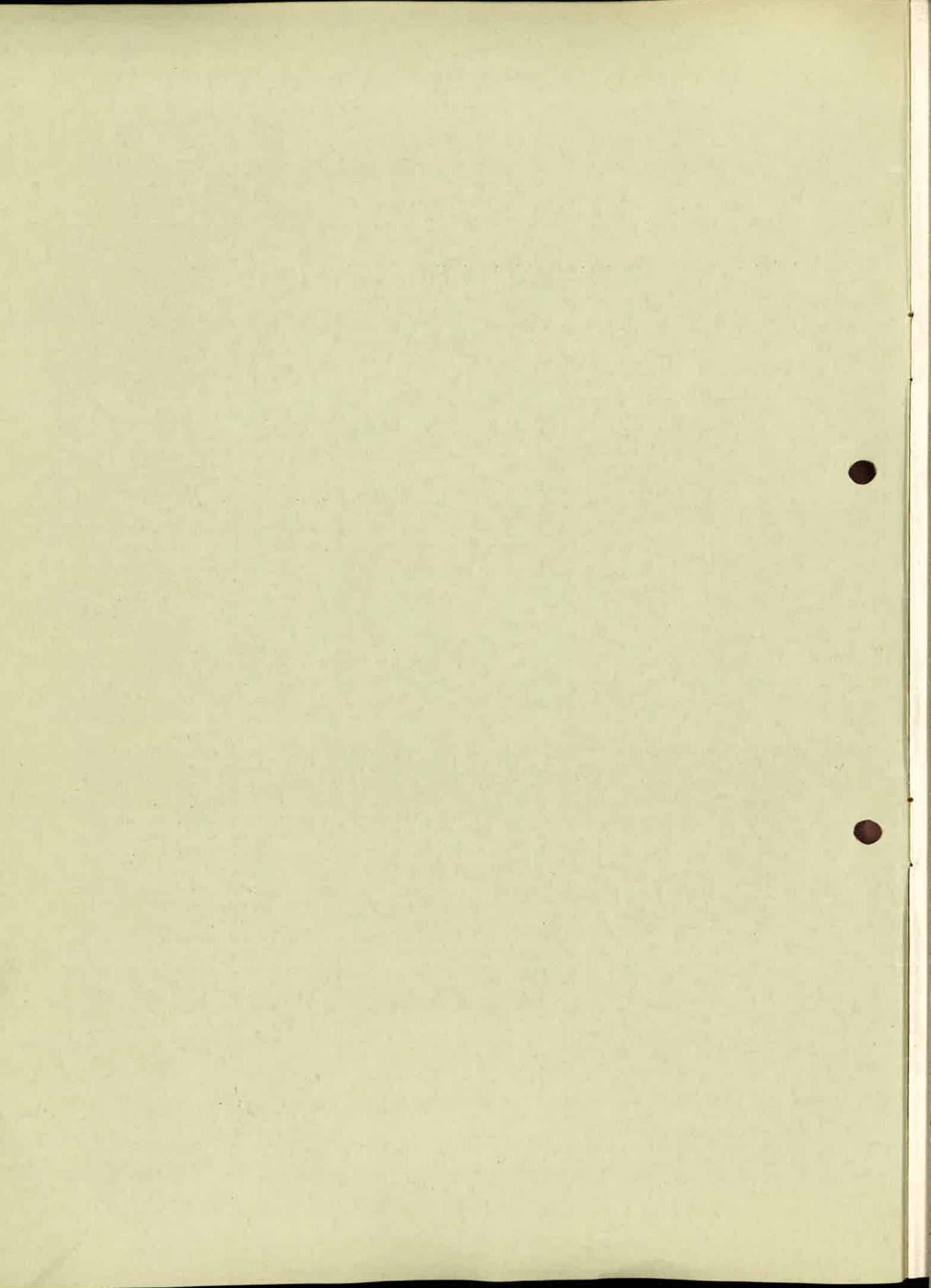
door ir. H. A. J. RIJNJA

II. STRUKTURUNTERSUCHUNGEN MIT ULTRASCHALL

von Dr. G. KURTZE

PUBLICATIE No. 58.....
VAN DE
GELUIDSTICHTING
DELFT - HOLLAND

K 718



Symposium Ultrageluid¹⁾

I Toepassing van Ultrageluid onder water

654.927.2

door ir. H. A. J. RYNJA

Summary: *The application of ultrasound under water.*

When applying sound in various media, we must take into account the limitations imposed by the medium. In seas and oceans the high frequencies of sound especially meet favourable conditions suitable for detecting immersed objects and for underwater telephony.

In consequence of a difference in acoustical impedance, other standards must be taken into account when designing projectors and hydrophones than when designing similar apparatus that will be used in air.

Inleiding

Het verschil tussen geluid en ultrageluid ligt alleen in de beperktheid van het menselijk waarnemingsvermogen. Wij noemen *geluid* datgene wat wij met de oren kunnen waarnemen. Dat is dan: trilling van luchtdeeltjes in het frequentiegebied tussen 20 hertz en 16 kilohertz. Buiten onze waarneming vallen de frequenties beneden 20 hz, die we hier buiten beschouwing laten, en boven 16 khz, die we hier betitelen als *ultrageluid*. Behalve in lucht kennen we ook in vloeistoffen en vaste stoffen geluid en ultrageluid.

Geluidswaarneming is van grote betekenis voor levende wezens.

- 1e: voor waarneming van hun omgeving;
- 2e: voor communicatie met hun soortgenoten.

In beide gevallen is het voor de waarnemer van belang de plaats van de geluidsbron te kennen. Bepaling van de richting, waarin de geluidsbron zich bevindt, geschiedt met behulp van een fase-meting tussen de signalen die door beide oren worden opgevangen. (Zie fig. 1). Wanneer dit faseverschil wordt voorgesteld door φ , dan is

$$\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha$$

Bij lage frequentie is λ groot, en een richtingshoek α geeft dan een kleinere fasehoek φ dan wanneer de frequentie hoger was. De nauwkeurigheid van de richtingsbepaling neemt toe met de frequentie. Wanneer echter de frequentie te hoog wordt, kan de eenduidigheid in de richtingsbepaling verloren gaan doordat φ groter kan worden dan 2π . Er is dus een zekere frequentie, waarbij de richtingsbepaling optimaal kan geschieden; d en λ zijn dan ongeveer even groot. Voor kleinere dieren zou de maximale oorgevoeligheid dus bij hogere frequentie moeten liggen. Dit is experimenteel aangetoond:

	f_{max}	λ_{max}	d
mens	2 khz	17 cm	15 cm
kat	8 khz	4 cm	5 cm
vleermuis	50 khz	0,7 cm	1 cm

Vleermuizen zijn acoustisch zeer interessant, omdat zij met een acoustisch radarsysteem voorwerpen in hun omgeving kunnen lokaliseren. Ook van sommige vissen is deze eigenschap bekend. Het dier zendt met regelmatige tussenpozen korte geluidsstoten uit, terwijl het luistert naar eventuele echo's. Het tijdsverschil tussen zendsignaal en echo geeft de afstand van het reflecterend object, en het faseverschil tussen beide oren geeft de richting.

Ter verhoging van de informatie betreffende nabije objecten neemt de herhaalfrequentie van de geluidsstoten toe wanneer een echo van nabij wordt ontvangen. Normaal ligt deze herhaalfrequentie bij 10 stoten per seconde. Dit zou er op wijzen, dat de actieradius van de echo-installatie van een vleermuis niet groter is dan 15 meter. De grootste snelheid van uitzenden ligt bij 30 stoten per seconde, waaruit volgt, dat wanneer er voorwerpen zeer dichtbij zijn, het dier toch altijd nog aandacht heeft voor alles wat zich bevindt binnen een bol met een straal van 5 meter om hem heen. De frequentie zwaait tussen 70 en 30 khz tijdens de puls, die niet langer duurt dan 1 milliseconde.

Voor vissen die een dergelijk echo-systeem bezitten gelden ongeveer dezelfde gegevens, met dit verschil, dat de geluidssnelheid in water 5 maal groter is dan in lucht, wat dus de actieradius met een factor 5 zou vergroten.

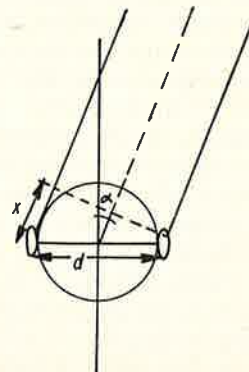


Fig. 1. Richting horen met twee oren.

¹⁾ Gehouden op 30 november 1956 te Leidschendam voor de Afdeling voor Technisch Wetenschappelijk Onderzoek van het K.I.v.I., de Sectie voor Toegepaste Natuurkunde en Kerntechniek van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging en voor de Geluidstichting.

Ultrageluid in de techniek

Met behulp van deze voorbeelden uit de Natuur kunnen wij de Techniek te hulp roepen om geluid en ultrageluid voor allerlei doeleinden te kunnen toepassen. Hierbij hebben wij de beschikking over een frequentiespectrum tussen 0 hertz en vele Mega hertzen. Elke toepassing stelt echter beperkende eisen aan het bruikbare frequentiegebied. De voornaamste factoren zijn:

1. De absorptie van geluid is in alle media frequentieafhankelijk. Meestal neemt deze absorptie continu toe met de frequentie, terwijl resonantie- en relaxatie-effecten bij bepaalde frequenties extra demping kunnen geven.
2. De reflectie van geluid tegen voorwerpen is afhankelijk van de verhouding tussen de afmetingen van die voorwerpen en de golflengte van het geluid. Zijn die voorwerpen kleiner dan de golflengte, dan treedt alleen buiging op en geen reflectie.
3. De hoeveelheid geluidsenergie op een bepaalde plaats wordt per tijdseenheid gegeven door het product van geluidsdruk en deeltjessnelheid: $W = p \times v$. Dit betekent, dat de amplitude van de trillende deeltjes bij toenemende frequentie steeds kleiner wordt, wanneer de geluidsenergie constant blijft.

Enige voorbeelden van toepassingen van geluid en ultrageluid zijn:

Echosystemen voor opsporen van voorwerpen in lucht (blinden-geleiding), in water (onderzeebootbestrijding) en in vaste materie (structuuronderzoek, controle van lassen en gietstukken, medische diagnostiek).

Energieconcentratie voor ultra sonoor wassen, boren, solderen, voor emulgeren, coaguleren en katalyse in chemische industrie, en voor medische therapie, waarbij we opmerken dat de absorptie van bepaalde geluidsfrequenties in beenderen groter is dan in spierweefsels, zodat beenderen verwarmd kunnen worden, zonder dat het weefsel er omheen een hogere temperatuur krijgt. Tenslotte is het mogelijk met ultrageluid zenuwweefsels te vernietigen.

Electro-acoustische transducers

Alle toepassingen van geluid en ultrageluid werden pas goed mogelijk nadat electriciteit dienstbaar was gemaakt aan de acoustici. De overdrager van elektrische energie in acoustische en van acoustische energie in elektrische, heet *transducer*.

De oudste transducer in de natuur is een onweersbui: De elektrische energie van de geladen wolken wordt omgezet in acoustische energie. In de 18e eeuw maakte men een Leidse fles, waarmee de eerste technische vonktransducer was ontstaan. Onbewust had men toen echter ook de eerste electrostatische transducer gemaakt: Bij het ontladen van de fles hoorde men een klik in de fles zelf, ten gevolge van de Coulomb-krachten tussen de bekleedselen. De tegenwoordige electrostatische transducers werken volgens hetzelfde principe. De 19e eeuw brengt achtereen: de elektrische zoemer als eerste electromagnetische transducer, de electromotor die ook als dynamo bleek te werken en waarmee het reciprociteitsprincipe zijn intrede deed. Verder de ontdekking van magnetostrictie en piëzo-electriciteit, en tenslotte de uitvinding van de telefoon. De principes voor de hedendaagse transducers liggen hiermede vóór ons.

Interessant zijn vooral de omkeerbare transducers, die zowel de functie van luidspreker als die van microfoon kunnen vervullen. Ze zijn onder te brengen in een van de vier groepen:

Electro-magnetische transducers.

Hierbij maken we gebruik van de wisselwerking tussen een stroomgeleider en een magnetisch veld. (Lorentzkracht).

Voorbeelden: luidspreker, telefoon.

Electro-statische transducers.

Hierbij gebruiken we de Coulombkracht tussen twee elektrische ladingen.

Voorbeeld: condensatormicrofoon.

Magnetostrictieve transducers.

Deze werken volgens het principe, dat de meeste ferromagnetische stoffen onder invloed van een magnetisch veld een vormverandering ondergaan.

Voorbeeld: onder-water-transducer.

Piëzo-electrische transducers.

Hier geeft een elektrisch veld in bepaalde richtingen in sommige asymmetrische kristallen een vervorming van het kristalrooster.

Voorbeeld: kristalmicrofoon.

Van de niet-omkeerbare transducers noemen we de koolmicrofoon en de ionofoonluidspreker als de meest bekende voorbeelden.

Aanpassing acoustische impedantie

De invloed van het medium waarin de geluidsenergie moet worden uitgestraald openbaart zich in de acoustische impedantie van het medium. Deze impedantie zullen we hier definiëren als de verhouding tussen de druk p en de deeltjessnelheid v :

$$Z_{ac} = \frac{p}{v} = \rho c$$

Hierin is ρ de dichtheid van het medium, en c de voortplantingsnelheid van de geluidsgolven.

Nu is, afgezien van dwarscontractie en warmte-effecten, deze voortplantingsnelheid gegeven door:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{ zodat } \rho c = \sqrt{E \cdot \rho}.$$

Hierin is E de elasticiteitsmodulus voor vaste stoffen, terwijl voor vloeistoffen en gassen hiervoor genomen moet worden de compressiemodulus.

We zien uit de laatste formule, dat zachte en lichte stoffen een lage acoustische impedantie hebben, terwijl voor harde en zware stoffen deze waarde groot is.

Getallenvoorbeeld: $\rho_{\text{lucht}} = 430 \text{ kg/m}^2 \text{ sec}$.

$$\rho_{\text{water}} = 150 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^2 \text{ sec}.$$

Nu is de energieoverdracht tussen twee verschillende media optimaal, wanneer de acoustische impedanties van beide media gelijk zijn. We zien hieruit, dat we een transducer moeten aanpassen aan het medium waarin de geluidsenergie moet worden uitgestraald.

Een transducer in lucht zal bij kleine krachten grote uitwijkingen moeten maken, terwijl in water van deze transducer grote krachten worden gevraagd bij kleine uitwijkingen.

Constructie van transducers

Electromagnetische en electrostatische transducers zijn als onder-water zender ongeschikt, omdat de Lorentzkrachten en de Coulombkrachten vrij klein zijn, wanneer gewerkt wordt met eenvoudig realiseerbare magnetische of elektrische velden. Alleen kleine geluidsenergieën kunnen hiermede worden verkregen. In lucht zijn deze syste-

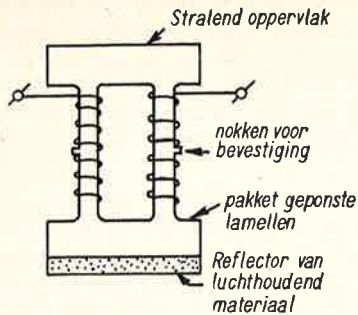


Fig. 2. Magnetostrictieve transducer.

men echter uitermate geschikt, waarbij de electromagnetische de voorkeur heeft bij lage frequenties, omdat een uitgebreid magnetisch veld een grote amplitude kan toelaten. Voor hoge frequenties neemt men een electrostatische luidspreker, omdat hier de massa van het trillende deel zeer klein gehouden kan worden, en een grote amplitude niet zal optreden.

Magnetostrictieve en piëzo-electrische transducers zijn zeer geschikt voor onder-water toepassing. De optredende krachten kunnen zeer groot worden door de grote stijfheid van de toegepaste materialen. Weliswaar is deze stijfheid in alle gevallen te groot, maar wanneer het trillende systeem in resonantie komt zal de amplitude zich opslingeren, waardoor bij gelijk blijvende druk de snelheid toeneemt, zodat een betere aanpassing wordt verkregen. Vooral voor magnetostrictieve transducers kan de aanpassing nog worden verbeterd door het stralend oppervlak te vergroten. (Zie fig. 2). De magnetostrictieve kracht wordt nu verdeeld over een groter oppervlak, waardoor de geluidsdruk daalt. Een voorbeeld van een kristal-transducer geeft fig. 3.

De materialen, die voor *magnetostrictieve-transducers* in aanmerking komen zijn:

1. *Nikkel*. Wegens het sterke magnetostrictieve effect wordt dit het meeste toegepast.
2. *Legeringen van nikkel*, zoals permalloy. Dit materiaal is kostbaarder, en biedt voor onder-water transducers geen voordelen.
3. *Alfer*, een legering van ijzer met 10—15 % aluminium. Door de schaarste aan nikkel gedurende de 2e Wereldoorlog is dit materiaal door de Japanners veel toegepast. Het heeft een hogere soortelijke weerstand dan nikkel, waardoor de wervelstroomverliezen lager zijn. De fabricage van dit materiaal, vooral het uitwalsen, is een vrij kostbaar procédé. In Amerika is het bekend onder de naam *Alferon*.
4. *Ferrieten*. Door Philips zijn nikkel-zink-ferrieten ontwikkeld die sterk magnetostrictief zijn. De keramische eigenschappen van dit materiaal laten toe om bij grote serieproductie de transducers als één massief stuk te persen en te sinteren. De materiaalkosten zijn zeer laag.

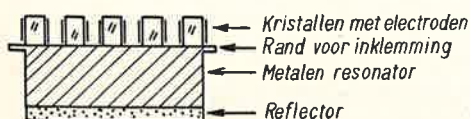


Fig. 3. Piëzo-elektrische transducer.

Piëzo-electrische kristallen voor onder-water transducers zijn:

1. *Kwarts*. Door schaarste van dit materiaal wordt het niet veel meer toegepast.
2. *Seignettezout*. Dit materiaal is sterk piëzo-electrisch. Helaas is seignettezout mechanisch niet sterk, en ligt de maximale werkt temperatuur bij 45° C. Hierboven wordt het electrisch geleidend, en bij 55° C lost het op in zijn eigen kristalwater. Voor zendtransducers met groot vermogen is dit materiaal dus ongeschikt.
3. *A.D.P. Ammoniumdihydrogeen fosfaat*. Dit materiaal is sterker dan seignettezout, en laat temperaturen toe tot 100° C. Het wordt op grote schaal toegepast in allerlei onderwater transducers. De fabricagekosten zijn echter hoog, omdat het groeien van de kristallen zeer lang duurt, en een kleine storing in het groeiproces (mechanische stoot of variatie van de voorgeschreven temperatuur) de kristallen onbruikbaar maakt.
4. *Bariumtitaanaat*. Dit materiaal kan in amorphe of polykristallijne toestand worden gebruikt. Het is keramisch, en kan in allerlei vormen worden vervaardigd. De grondstoffen zijn goedkoop. Dit materiaal ondervindt een toenemende belangstelling, en er zijn reeds vele octrooien verleend op fabricageprocessen. Een nadeel is, dat het materiaal gepolariseerd moet worden, en deze polarisatie door remanentie moet behouden. Door veroudering kan deze polarisatie dan zwakker worden.

Toepassing van Ultrageluid onder water

Reeds in de vorige eeuw kende men de toepassing van geluidsignalen onder water. Aanvankelijk werkte men met een hamer tegen de scheepshuid of tegen een bel. Deze klopsignalen waren, in gecodeerde vorm, bedoeld voor communicatie. De ontvanger van deze signalen legde zijn oor te luisteren tegen de scheepshuid. De uitvinding van de koolmicrofoon was hierin direct al een verbetering, en men kon toen zelfs echo's waarnemen van de zeebodem. Hiermede was het „echolood” uitgevonden, dat nu op vrijwel alle schepen te vinden is.

De uitvinding van betere transducers en de toepassing van electronische versterkers leidde tenslotte tot de perfectie van de hedendaagse *Asdic* en *Sonar* installaties, waarmee men met grote precisie op grote afstanden onderzeeboten en andere ondergedoken voorwerpen kan lokaliseren.

De grootste gevoeligheid van de luister-installatie wordt echter begrensd door de aanwezigheid van geruisbronnen. Deze zijn:

1. Het schroefgeruis van het schip zelf, wanneer het vaart.
2. Het lawaai van machines aan boord.
3. Het geruis van het water dat langs de transducer stroomt.
4. Het geruis van de zee. Dit is afhankelijk van de windkracht.
5. Geluiden van dieren onder water. Vooral bruinvissen en garnalen kunnen op sommige plaatsen en in bepaalde jaargetijden een enorm lawaai produceren.

Al deze geruisniveaus zijn te reduceren door de ontvanginstallatie slechts gevoelig te maken voor een smalle frequentieband. Bovendien kan men de gevoeligheid van de transducer in de ruimte beperken tot een nauwe bundel, door het oppervlak van de vlakke transducer enige malen groter te maken dan de golflengte van het geluid onder water.

De voornaamste toepassingen onder water zijn:

- a. *Communicatie met onderzeeboten.*
- b. *Echo-detectie van ondergedoken voorwerpen.*

Bij de communicatietechniek kan men de spraakfrequenties direct uitzenden. Het is echter moeilijk om een onder-water transducer over een zo grote frequentieband een hoog rendement te geven, terwijl bundeling van de geluidsenergie bij deze lage frequentie een grote transducer vereist. We kunnen deze moeilijkheden omzeilen, door de spraakfrequenties te moduleren op een ultrasonore draaggolf. Hoewel de reikwijdte ten gevolge van de toenemende absorptie bij hogere frequenties steeds kleiner wordt, kunnen we aan de andere zijde energie-winst boeken door een betere bundeling en een hoger rendement.

Het grootste toepassingsgebied van ultrageluid onder water, blijft echter de lokalisering van ondergedoken voorwerpen met behulp van echo-signalen. Voor het verkrijgen van goede resultaten moeten we aan de volgende voorwaarden voldoen:

1. Goede echo's treden slechts dan op, wanneer de afmetingen van het reflecterende voorwerp groter zijn dan de golflengte van het geluid. We streven daarom naar een hoge frequentie.
2. Grote afstanden kunnen overbrugd worden, wanneer de absorptie van het geluid gering is. Omdat deze absorptie echter toeneemt met de frequentie streven we naar een lage frequentie.
3. Bundeling van de geluidsenergie geeft een toename van de signaalsterkte en een lager ruisniveau. De afmetingen van de transducer moeten daarom enige malen groter zijn dan de golflengte. Omdat een kleine transducer gemakkelijker te plaatsen is onder een schip, streven we om deze reden naar een hoge geluidsfrequentie. Hierbij willen we opmerken, dat een te scherpe bundeling het zoeken onder water moeilijker maakt, omdat de trekfaks van de bundel te klein wordt. Er is dus een optimale verhouding tussen golflengte en transducerdiameter.
4. De maximale uit te zenden energie per tijdseenheid wordt begrensd door het optreden van cavitatie. De grens ligt ergens tussen 1 en 5 watt/cm², afhankelijk van de zuiverheid van het water, de aard van het transducer oppervlak, van de tijdsduur van de uitzending, en nog andere factoren. Een transducer met groot oppervlak kan dus meer energie uitzenden dan een kleine transducer.

Op grond van deze vier voorwaarden moeten we voor het opsporen van vissen, mijnen of andere kleine voorwerpen gebruik maken van een hoge geluidsfrequentie. De transducer mag dan niet te groot zijn om een redelijke bundeling te verkrijgen. Het maximale zendvermogen ligt hiermee vast, en door de hoge absorptie blijft de reikwijdte beneden een vrij laag maximum.

Voorbeeld: frequentie 50—100 khz
transducer 10 cm diameter
vermogen 100 watt
reikwijdte maximaal 1 km.

Voor het opsporen van grotere voorwerpen passen we een lagere frequentie toe, waarbij de transducer grotere afmetingen moet krijgen, en dan meer energie kan uitzenden.

Voorbeeld: frequentie 10 khz
transducer 50 cm diameter
vermogen 10 kilowatt
reikwijdte 10 km.

De meest verbreide toepassing van echo-detectie vinden we in de acoustische dieptemeters, zgn. *echo-lood-apparaten*. Een reikwijdte groter dan 1 km is niet nodig. Men is veel meer geïnteresseerd in een nauwkeurige diepte-bepaling van enkele tientallen meters. Men kiest daarom een hoge frequentie en men gebruikt hierbij kleine transducers.

Voor elk specifiek doel kiest men een installatie met voor dat ene doel optimale eigenschappen. Zo heeft men installaties voor het opsporen van onderzeeboten („Asdic” en „Sonar”), met andere installaties jaagt men op walvissen, met weer andere zoekt men naar mijnen, gezonken wrakken of visscholen. Dikwijls gebruikt men het echo-lood-apparaat op vissersschepen tevens voor het opsporen van vissen.

Reikwijdte

De reikwijdte van een echo-installatie, die ontworpen is voor grote afstanden, en die dus een groot vermogen kan produceren bij lage frequenties, wordt vooral bepaald door de toestand van de zee. Een hoog stoor niveau, afkomstig van allerlei eerder genoemde ruisbronnen, kan de reikwijdte een factor 10 reduceren. De grens ligt namelijk daar, waar de echo's verloren gaan in de ruis. Wanneer echter een echo wordt ontvangen van een bewegend voorwerp, dan kan door het optreden van het Doppler-effect de echo-frequentie afwijken van de zendfrequentie. Deze frequentie-verschuiving is evenredig met de verhouding tussen de component van de snelheid van het reflecterende object in de richting van het peilende schip, en de geluidssnelheid. In de praktijk kan deze frequentie-verschuiving van de grootte-orde van 100 hz zijn. Er treedt nu in de ruis, die wordt ontvangen, en die door selectieve versterking een bepaalde voorkeursfrequentie heeft, ineens een signaal op met een afwijkende frequentie. Dit valt op, ook wanneer de amplitude van de echo kleiner is dan de gemiddelde waarde van de ruis. Dit effect komt de reikwijdte ten goede.

Temperatuur en zoutgehalte hebben invloed op de voortplantingssnelheid van de geluidsgolven. Een gradiënt in de temperatuur of in het zoutgehalte kan de geluidsgolf afbuigen. De invloed is zodanig dat de geluidsgolf steeds afbuigt naar het koudere en mindere zoute water. Het resultaat is, dat een riviermond nog ver in zee plaatselijke variaties van temperatuur en zoutgehalte kan veroorzaken. Hierdoor ontstaan in het water zgn. *acoustische muren*, die zelfs echo's kunnen geven. Een onderzeeboot die door een vijand wordt opgespoord, kan deze wetenschap in zijn ontsnappingstactiek verwerken.

Een laagstructuur van temperatuurgradiënten komt dikwijls voor in de oceanen. Het optreden hangt af van het jaargetijde. Een warme laag tussen twee koude (fig. 4) zal de geluidsgolf splitsen in een deel dat omhoog buigt en een deel dat omlaag buigt. In het midden ontstaat op deze manier een schaduwzone, waarin een onderzeeboot zich ongemerkt kan ophouden. Het omgekeerde geval komt eveneens voor: een koude laag tussen twee warme (fig. 5). De geluidsgolf wordt dan gebundeld in de koude laag, waardoor de verzwakking door dispersie in dit geval veel kleiner wordt. Voor communicatie over grote afstanden is deze toestand ideaal.

Conclusie

Het interessante frequentiegebied voor signaaloverdracht onder water ligt tussen 10 en 100 khz.

Men stelt de transducers voor het lage frequentiegebied bij voorkeur samen uit magnetostrictieve elementen, terwijl

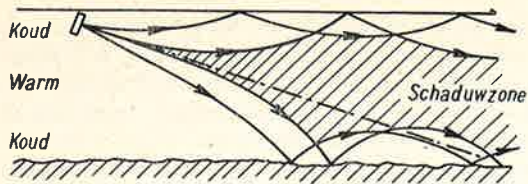


Fig. 4. Voortplanting van geluid bij een warme laag tussen twee koude lagen.

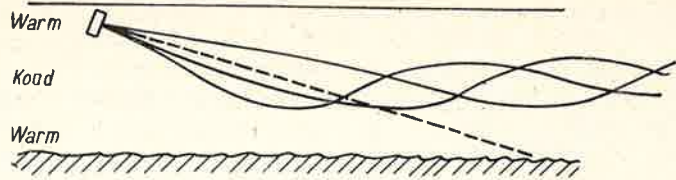


Fig. 5. Voortplanting van geluid in een koude laag.

voor het hogere frequentiegebied piëzo-electrische transducers de voorkeur verdienen.

Met nog praktisch hanteerbare transducer-afmetingen kan men bij de laagste frequenties een vermogen van 10 kilowatt uitzenden.

Het electro-acoustisch rendement ligt bij magnetostrictieve transducers niet boven 50 %, terwijl kristal transducers tot 80 % rendement kunnen vertonen.

De reikwijdte van een communicatie-systeem kan tientallen kilometers bedragen, maar door gunstige temperatuurlagen nog aanmerkelijk worden vergroot.

De reikwijdte van een echo-installatie kan in een gunstig geval 10 km worden, waarbij het Doppler-effect het waarnemen van zwakke echo's belangrijk kan bevorderen.

De plaats van een voorwerp onder water, dat echo's geeft, kan scherp worden bepaald met behulp van een ontvang-transducer die uit twee gescheiden helften bestaat. Men draait de transducer totdat het faseverschil tussen de signalen van beide helften nul is geworden. Deze methode is analoog aan het richtingshoren met twee oren, zoals mensen en dieren dat gewend zijn te doen.

Hoewel onder-water echo-systemen op hetzelfde principe berusten als radar, is een weergave van de hele omgeving op een scherm niet op dezelfde wijze mogelijk, omdat de geluidsgolven veel trager lopen dan de electro-magnetische.

Zoals het bestaan van radar de oorlogsvliegtuigen niet onbruikbaar heeft gemaakt, zijn ook de onderzeeboten nog niet ten dode opgeschreven door de steeds beter wordende Asdic- en Sonar-apparaten. Het is in principe mogelijk een duikboot te bekleden met acoustisch absorberend materiaal. Afgezien hiervan heeft een duikboot nog steeds de mogelijkheid zich te verbergen achter acoustische muren, en weg te duiken in acoustische schaduwzones.

Beraadslaging

Ir. A. LANGEJAN: Zou de heer Rynja iets kunnen zeggen over de mogelijkheid om door ultrageluid iets te weten te komen over de aard van de grondlagen die zich onder water bevinden? In een bepaald geval, waarin men dit heeft geprobeerd, vond men reflecties van verschillende niveaus, maar durfde geen conclusies te trekken t.a.v. de vraag of dit correspondeerde met grondlagen van verschillende vastheid.

Ir. RYNJA: Het komt dikwijls voor, dat een modderige bodem met een harde onderlaag inderdaad een dubbele reflectie geeft. De tweede echo is dan meestal scherper dan de eerste. Een laag van waterplanten of een school vissen vlak boven de bodem kan echter hetzelfde beeld geven, zodat men inderdaad zeer voorzichtig moet zijn met het trekken van conclusies. Reflecties van dieper gelegen grondlagen onder de zeebodem kunnen eveneens optreden, hoewel zij steeds zeer zwak zullen zijn. Ze zijn dan ook moeilijk te onderscheiden tussen de secundaire echo's, die optreden door herhaalde reflectie van de eerste echo tussen bodem en wateroppervlak.

Ir. F. H. KREUGER: Is de koolmicrofoon bruikbaar voor het detecteren van ultrageluid in vaste stoffen? En zo ja, tot welke frequentie?

Ir. RYNJA: Voor het opsporen van geluidsgolven in vaste materie moet het membraan van de microfoon vast verbonden worden met een grensvlak van die materie. De amplitude van het membraan wordt dan echter zo klein, dat de signaal-ruisverhouding beneden een vereist minimum daalt. Immers, de werking van de koolmicrofoon berust juist op het tegen elkaar drukken van de koolkorreltjes, en hiervoor is een grote amplitude van het membraan nodig. Alleen bij de laagste frequenties en boven een bepaalde minimum intensiteit van het geluid zal enig meetbaar resultaat verkregen kunnen worden.

Door het aankoppelen van een massieve exponentiële hoorn aan het metaaloppervlak zou een betere aanpassing kunnen ontstaan, maar het is moeilijk uitvoerbaar om het membraan van de koolmicrofoon aan de spits van die hoorn te bevestigen.

Ir. H. DE ZEEUW: Als een toepassing van ultrageluid onder water wordt de laatste tijd genoemd: Ultrasonore apparaatjes aan de onderkant van een schip om aangroei tegen te gaan (zgn. een middel voor „antifouling”). Wat is de mening van de inleider hierover?

Ir. RYNJA: Het is bekend, dat ultrageluid boven een zekere intensiteit en bij bepaalde frequenties een dodende of verlamdende werking kan hebben op levende organismen, waarbij vooral het zenuwstelsel wordt aangetast. Het effect waar U op doelt werkt echter ongetwijfeld met lage geluids-intensiteiten. Vermoedelijk worden hier de organismen verjaagd door een voor hen onaangename geluidsgewaarwording, voordat zij zich hebben kunnen vasthechten aan de scheepshuid.

Ir. C. E. VAN DE STADT: Kan spreker iets vertellen over het mechanisme dat zich voordoet bij het toepassen van ultrasonore trillingen bij het wasproces en bij het uit elkaar trekken van vezelbundels; voor het laatste doel worden in de papierindustrie mechanisch werkende generatoren van ultrasonore trillingen (supratorator) toegepast.

Ir. RYNJA: Bij het ultrasonoor wassen van kleine metalen voorwerpen zullen de vuildeeltjes door wrijving van de vloeistof langs het metaaloppervlak worden losgemaakt. Wanneer cavitatie optreedt zal dit effect aanzienlijk worden versterkt. Wanneer echter vezelstoffen aan cavitatie worden blootgesteld, dan zullen de soms microscopisch kleine luchtbelletjes die zich altijd tussen de vezels in bevinden, periodiek sterk opzwellen, waardoor de vezelbundels uit elkaar worden getrokken.

Ir. H. PIJLS: Is bij de waswerking de invloed van cavitatie wezenlijk?

Ir. RYNJA: Voor het reinigen van metaal-oppervlakken is cavitatie zeer bevorderlijk. Door bundeling kan dan een grote intensiteit op het te reinigen voorwerp worden geconcentreerd. Wanneer echter textiel of andere vezelstoffen gereinigd moeten worden, zou ik cavitatie willen vermijden om het weefsel niet te beschadigen. Bovendien

lijkt het mij moeilijk te verwezenlijken om een wasketel, welke gevuld is met kledingstukken als geheel te laten caviteren. Vermoedelijk zal de cavitatie het sterkste optreden aan het transducer-oppervlak, tenzij men werkt met focuserende transducers.

Ir. H. DE ZEEUW: Cavitatie kan toch overal in een vat optreden en is niet beperkt tot het stralend oppervlak van de transducer?

Ir. RYNJA: Wanneer is een vat door reflectie tegen de wanden staande golven ontstaan, dan kan in de drukbuiken van het staande-golfpatroon cavitatie optreden. Wanneer echter de vloeistof gevuld is met textielgoederen zullen deze een zodanige demping geven, dat van staande golven nauwelijks nog sprake kan zijn.

Drs. A. M. BORREN: Hoe zijn de dimensioneringen van transducer (afmetingen, frequentie enz.) en vat bij het reinigen van grote metalen oppervlakken (tot 30 cm ϕ) met behulp van ultrageluid in vloeistof-milieu?

Hoe staat het met het verwijderen van het losgeslagen vuil?

Ir. RYNJA: Een scherp antwoord op het eerste deel van deze vraag is moeilijk te geven. Het is van belang de apparatuur zodanig te dimensioneren, dat er cavitatie zal optreden over het geheel te reinigen oppervlak. Na de keuze van de vloeistof, die behalve vuil-oplossend ook van geschikte viscositeit en oppervlaktespanning moet zijn, moeten we een temperatuur bereiken, waarbij de cavitatie het gemakkelijkst optreedt. Deze optimale temperatuur is voor elke metaal-vloeistofcombinatie anders. Focuseren van de energie naar een oppervlak van 30 cm diameter lijkt mij moeilijk te verwezenlijken.

Het losgemaakte vuil wordt met de doorstromende vloeistof afgevoerd en in een afzonderlijke separator verwijderd.

C. M. VAN DER BURGT: Zoals reeds door ir. Rynja werd aangestipt, heeft men sinds kort de beschikking over geheel nieuwe piëzo-magnetische of magnetostrictieve materialen, en wel bepaalde keramische *ferroxcube*-materialen of ferrieten, die speciaal bereid worden met het oog op één of elk der navolgende toepassingen van ultrageluidstrillers:

1. Transducenten (Eng. transducers) voor het met hoog rendement bij ultrasonie frequenties omvormen van (elektro)magnetische energie in (ultra)acoustische energie. Toepassingen in industriële schoonmaakinstallaties en in de onderwatersignalering aan boord van schepen.
2. Transducenten met hoge waarden van de gevoeligheidsconstante, toe te passen als ontvangers bij de detectie van onderwatersignalen.
3. Magnetomechanische filterelementen die als oneigenlijke transducenten, geheel analoog aan kwartsresonatorplaatjes, in elektrische bandfilters kunnen worden toegepast.

Deze ferroxcubetrillers worden verkregen door het bij hoge temperatuur sinteren van een in de gewenste vorm geperst poeder van vóorgesinterde metaaloxiden of metaalcarbonaten — b.v. ijzeroxyde, nikkeloxyde (eventueel voor een deel te vervangen door zinkoxyde en/of koperoxyde) en een weinig kobaltoxyde. Tot voor kort werden soortgelijke ferroxcubematerialen — het nikkelferriet ferroxcube 4E en de nikkelzinkferrieten ferroxcube 4D, C, B, A, in volgorde van opklimmend zinkgehalte — alleen voor magnetische toepassingen bereid; het moet dus niet verwonderlijk heten, dat deze, in zuiver magnetisch opzicht goede producten, niet de best bereikbare eigenschappen

met het oog op piëzo-magnetische toepassingen bleken te bezitten. Door enige geringe, doch essentiële wijzigingen in de samenstelling en in de sinterbehandeling zijn thans voor ieder der gewenste toepassingsgebieden speciaal geëigende ferroxcubesoorten ontwikkeld.

De belangrijkste verschillen tussen de *keramische* ferroxcubematerialen en de tot nu toe gebruikelijke *metallische* materialen, nikkel en alfer, zijn:

- A. De zeer hoge waarde van de specifieke elektrische weerstand van ferroxcube, waardoor lamelleren overbodig is. Dit heeft tot gevolg:
 - A1. Een zeer kleine mechanische verlieshoek (geen wrijving tussen lamellen);
 - A2. Een zeer kleine magnetische verlieshoek, ook bij hoge frequenties (geen wervelstroomverliezen);
 - A3. Een ten gevolge van A1 en A2 zeer hoog elektro-acoustisch rendement van een ferroxcubestraller, ook bij hoge frequenties. Bijvoorbeeld, bij 50 kHz vindt men rendementen van 90 tot 70 % bij lage tot hoge belasting.
- B. De hoge waarde van de curietemperatuur (ca. 600° C) waardoor nikkelkobaltferrieten een magnetomechanische koppelingscoëfficiënt vertonen, die bij ongeveer 400° C nog even hoog is als bij kamertemperatuur.
- C. De lage waarde van de verzadigingsinductie van ferroxcube. Hierdoor is het mogelijk de triller vóór te polariseren met behulp van dunne schijfjes van ferroxcure, het sinds enkele jaren verkrijgbare keramische materiaal voor permanente magneten. Bijvoorbeeld, twee dunne schijfjes ferroxcure, met „Araldit” loodrecht op de krachtlijnenweg in een enkelvoudige raamtriller van ferroxcube gekit, kunnen gemakkelijk optimale vóórpolarisatie garanderen. Men zie de publicatie: Y. Kikuchi c.s., „Magnetostrictive Ultrasonic Transducers Made of Ferrites”, Sci. Rep. Res. Inst Tôhoku Univ. B7, 9—15, 1955.
- D. De aan elk keramisch produkt inherente brosheid, waarbij de treksterkte nog afneemt met toenemende porositeit en toenemende doorsnede. Bij de vrij dicht gesinterde ferroxcubematerialen voor onderwatertrillers met porositeiten van 5 % of minder is de treksterkte 5 kgf/mm² of hoger, gemeten bij de bij breukproeven gebruikelijke kleine belaste doorsneden (ca. 5 mm²). Bij de grote doorsneden van onderwatertrillers is de treksterkte echter een factor 2 à 3 lager. Dit gevoegd bij de aan elk keramisch product inherente geringe warmtegeleiding (derhalve een relatief hoge temperatuurgradient bij een dank zij het hoge rendement relatief geringe energiedissipatie in het inwendige) maakt, dat de veilige grens van de intensiteit der acoustische straling van *staastrillers* bij continue werking in vloeistoffen ca. 8 à 12 W/cm² is. Bij *raamtrillers* is de maximale veilige intensiteit van de uit te stralen acoustische golven uiteraard lager, b.v. 5 à 8 W per cm² stralend oppervlak bij continue werking in vloeistoffen. Dit is ruim voldoende voor de meeste toepassingen.
- E. De karakteristieke acoustische impedantie, d.w.z. het product van het soortelijk gewicht (dat voor ferrieten aanzienlijk lager is dan voor metalen, en wel een waarde van ca. 5,35 g/cm³ zou hebben voor de bovenvermelde ferroxcubematerialen als zij geen poriën zouden hebben) en van de voortplantingssnelheid van ultrageluidsgolven (die voor weinig poreuze ferrieten iets groter is dan voor metalen), heeft bij de speciale

ferroxcubesoorten een iets lagere waarde dan bij metalen en wijkt dus minder af van die van water. Hierdoor benadert men met raamstralers uit ferroxcube, beter dan met die uit metaal, het max.-max. rendement, d.w.z. het maximale elektro-acoustische rendement als functie van frequentie en belastingsimpedantie.

Over de bovengenoemde kenmerkende verschillen en over de verdere eigenschappen van ferroxcube als trillermateriaal kan men gedetailleerde gegevens vinden in de navolgende artikelen:

C. M. van der Burgt, "Performance of Ceramic Ferrite Resonators as Transducers and Filter Elements", J. acoust. Soc. Amer. 28, 1956, november-nummer.

C. M. van der Burgt, „Ferroxcubemateriaal voor Piëzo-

magnetische Trillers", Philips techn. Tijdschr. 18, 285—298, 1956.

G. KURTZE: Im III. Physikalischen Institut der Universität Göttingen wurden im Rahmen der Wasserschall-Messtechnik sehr gute Erfahrungen mit elektrostatischen Wandlern gemacht. Bei Benutzung solcher Wandler als Sender und Empfänger erhält man bei konstantem Senderstrom eine Leerlaufspannung am Empfänger, die in einem sehr grossen Bereich frequenzunabhängig ist. Man ist dadurch bei Messungen nicht an bestimmte Resonanzfrequenzen der Sender gebunden und hat überdies den Vorteil, dass alle Ein- und Ausschwingvorgänge wegfallen, die empfangenen Impulse also ausserordentlich scharf begrenzt sind.

II. Strukturuntersuchungen mit Ultraschall

544:620.179.16

von Dr. G. KURTZE,

III. Physik. Inst. der Univ. Göttingen

Summary: *Ultrasonic investigation of the structure of liquids and solids.*

The paper first gives a general survey over the possibilities for the determination of structural details in gases, liquids and solids from acoustical data.

The following items are discussed more in particular: Experimental methods for absorption measurements in liquids; absorption in pure liquids; relaxation absorption in aqueous solutions of electrolytes and conclusions drawn therefrom.

Experimental methods for the determination of the elastic constants connected with extensional, shear and longitudinal waves in solids and the corresponding loss factors; relaxation absorption in rubber-elastic materials.

Einleitung

Der Ultraschall schien in den letzten Jahren zu einem äusserst vielseitigen Hilfsmittel in Technik und Wissenschaft zu werden. In vielen Fällen hat sich jedoch später herausgestellt, dass die erzielten Wirkungen nicht spezifisch für den Ultraschall sind. So sind die meisten mechanischen, chemischen und medizinischen Effekte entweder auf Kavitation oder auf Wärmewirkung zurückzuführen, die beide auch auf andere Weise, also ohne Ultraschall, zu erzielen sind. Zu einem heute unentbehrlichen Hilfsmittel ist der Ultraschall jedoch in der Materialprüfung und Materialuntersuchung geworden. Von letzterer soll hier die Rede sein; allerdings sollte man dabei besser von Schall schlechthin sprechen, da sich die Untersuchungen über den gesamten Frequenzbereich mechanischer Schwingungen erstrecken.

Im Hinblick auf die Anwendung des Ultraschalles zum Zwecke der Materialuntersuchung müssen wir uns zunächst fragen, welche akustischen Grössen der Messung zugänglich sind und welche Aufschlüsse wir von ihnen erwarten können. Dabei wird man zunächst an die Schallgeschwindigkeit denken, bzw. an die Kompressibilität oder, bei festen Stoffen, die elastischen Konstanten, die die Schallgeschwindigkeiten bestimmen.

Die aus der Grösse der Schallgeschwindigkeit zu gewinnenden Aussagen sind bei Gasen trivial. Hier sind Dichte und Adiabatenexponent massgebend. Interessanter sind bereits die bei Flüssigkeiten möglichen Aussagen, da in diesem Fall die Schallgeschwindigkeit durch die zusätzlich auftretenden Kohäsionskräfte zwischen den Molekülen mitbestimmt wird. Hier zeigen vor allem die neueren Arbeiten von Parshad [1] und Schaafs [2] eine

grosse Anzahl von qualitativen und quantitativen Beziehungen zwischen Flüssigkeitsstruktur und Schallgeschwindigkeit bzw. Kompressibilität. Zusätzliche Aufschlüsse kann man, wie z.B. im Falle des Wassers, aus der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit erhalten [3]. Während alle untersuchten Flüssigkeiten negative Temperaturkoeffizienten zeigen, ist der Temperaturkoeffizient im Falle des Wassers bis +74 °C positiv und erst oberhalb dieser Temperatur negativ. Der Grund ist in einer Strukturumwandlung zu suchen, die — nach der Euckenschen Beschreibung — durch den mit steigender Temperatur erfolgenden Abbau der Achteraggregate des Wassers gegeben ist, durch den die Kompressibilität zunächst erhöht wird. (Abb. 1).

Den kleineren Kompressibilitäten entsprechend ist bei festen Stoffen die Schallgeschwindigkeit noch höher als

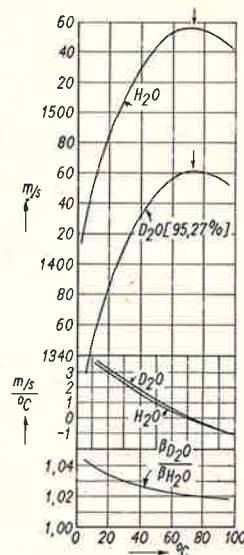


Abb. 1. Schallgeschwindigkeit, Temperaturkoeffizient der Schallgeschwindigkeit und Verhältnis der Kompressibilitäten von normalen und 95 %igem schweren Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur. (Nach Heusiger [3]).

1) Voordracht, gehouden op 30 november 1956 in het Dr. Neher-Laboratorium der PTT te Leidschendam voor de Afdeling voor Technisch Wetenschappelijk Onderzoek van het K.I.v.I., de Sectie voor Toegepaste Natuurkunde en Kerntechniek van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging en voor de Geluidsstichting. Zie ook *De Ingenieur* no. 13 van 29 maart 1957.

bei den Flüssigkeiten. Neben den Dichtewellen treten Schubwellen und bei geeigneter Anregung im endlichen Medium Dehn-, Biege-, Torsions- und Oberflächenwellen auf, aus deren Geschwindigkeiten sich die zugehörigen Moduln ergeben.

Die Absorption oder Dämpfung ist die zweite wichtige akustische Messgrösse. Hinsichtlich der Ursache unterscheidet man zwischen der klassischen und der ausserklassischen Absorption. Erstere ist bedingt durch Schubviskosität und Wärmeleitung und zeigt bei Gasen und Flüssigkeiten einen Anstieg mit dem Quadrat der Frequenz. Ihr überlagert ist die durch irreversible Vorgänge im Schallfeld bedingte Relaxationsabsorption. Bei festen Stoffen ist eine solche Unterscheidung schwierig. Die Absorption ist dort unter anderem von der Wellenart abhängig. So treten bei transversalen Wellen keine adiabatischen Volumenänderungen und damit auch keine Wärmeleitungsverluste auf. Mit zunehmender Frequenz steigt die Absorption bei festen Stoffen innerhalb grosser Bereiche linear an.

Das bekannteste Beispiel für eine Relaxationsabsorption ist die molekulare Schallabsorption in Gasen, die durch die zuerst von Kneser [4] beschriebene verzögerte Anregung bestimmter molekularer Freiheitsgrade zustandekommt. Die Frequenzabhängigkeit einer solchen Absorption ist bekanntlich gegeben durch den Ausdruck

$$\alpha_r = A \frac{\omega^2}{1 + \omega^2\tau^2}$$

wobei α_r den Absorptionskoeffizienten pro Längeneinheit, ω die Kreisfrequenz und τ die Einstellzeit des Gleichgewichtes der Energieverteilung bedeuten. A ist eine frequenzunabhängige Grösse. Auch diese Absorption steigt also für Frequenzen $\omega \ll 1/\tau$ wie die klassische Absorption mit dem Quadrat der Frequenz an, erreicht aber für $\omega \gg 1/\tau$ einen konstanten Wert, so dass sie bei hohen Frequenzen gegen die klassische Absorption vernachlässigt werden kann. Gleichzeitig bedingt der Relaxationsprozess eine Dispersionsstufe in der Nähe der Relaxationsfrequenz $\omega = 1/\tau$, wobei die Schallgeschwindigkeit oberhalb dieser Frequenz wegen der kleineren Kompressibilität stets grösser ist.

Die mit dem Relaxationsprozess verknüpfte Dispersion der Schallgeschwindigkeit kann natürlich ebenso wie die Absorption zur Strukturuntersuchung herangezogen werden. Bei Flüssigkeiten wird der Absorptionsmessung lediglich deshalb der Vorzug gegeben, weil die Dispersion meist klein und schwer zu messen ist.

Relaxationsprozesse können in Gasen verursacht werden durch Rotationsanregung (H_2), Anregung von Knick-schwingungen (CO_2), Dissoziation (N_2O_4), Verdampfung (Luft + H_2O) und in Flüssigkeiten zusätzlich durch Strukturänderungen. Allgemein gesagt können alle Vor-

gänge Anlass zu zusätzlicher Dämpfung geben, die durch Druck- oder Temperaturänderungen angeregt werden können und eine verzögerte Druckänderung direkt oder indirekt zur Folge haben.

Zur Aufklärung solcher Vorgänge liefert uns die Messung der Absorption als Funktion der Frequenz den Betrag der zusätzlichen Absorption und die Relaxationsfrequenz, d.h. die Einstellzeit des Gleichgewichtes. Ausserdem kann durch Messung der Verschiebung des Absorptionsmaximums mit der Temperatur die Aktivierungsenergie des auslösenden Vorganges bestimmt werden.

Wegen der grossen Halbwertsbreite der Relaxationsmaxima, die 4 Oktaven beträgt, und wegen der Tatsache, dass Relaxationen in Flüssigkeiten — wo sie für Strukturuntersuchungen von Interesse sind — im gesamten Ultraschallbereich von wenigen hundert Hz bis zu den höchsten erreichbaren Frequenzen beobachtet werden, sind stets Messungen in grossen Frequenzbereichen erforderlich. Solche Messungen werden durch den Anstieg der Grunddämpfung mit dem Quadrat der Frequenz sehr erschwert (10 % Amplitudenabnahme bei ebenen Wellen in H_2O bei 3000 Hz auf 1000 km Distanz, bei 300 MHz auf 0,1 mm Distanz), so dass experimentelle Anordnungen der verschiedensten Art benutzt werden müssen, deren wichtigste Typen im folgenden kurz beschrieben werden sollen.

Methoden der Absorptionsmessung in Flüssigkeiten

Resonanzmethode

Bei den tiefsten Frequenzen kommen wegen der im allgemeinen in Flüssigkeiten sehr kleinen Dämpfung und wegen der grossen Wellenlängen für die Messung der Absorption nur Resonanzmethoden in Frage [5]. Man füllt ein Gefäss aus möglichst dämpfungsarmen Material mit der zu untersuchenden Flüssigkeit und regt diese zu einer durch die Gefässdimensionen gegebenen Eigenfrequenz an, deren Abklingzeit oder Halbwertsbreite gemessen wird. Um die durch die Gefässwände verursachte zusätzliche Dämpfung möglichst klein zu halten, verwendet man am besten dünnwandige kugelförmige Glas- oder Quarzgefässe, die zu radialen Eigenschwingungen angeregt werden, damit an den Gefässwänden keine wandparallele Schnelle auftritt. Die Anregung kann mit einem auf die Wand geklebten Piezokristall oder, zur selektiven Anregung der radialen Schwingungen, elektrostatisch mit einer um die Kugel gelegten ringförmigen Gegenelektrode erfolgen, wobei die Aussenfläche der Kugel metallisiert wird. Empfangsseitig wird ein auf die Kugel geklebter Piezokristall verwendet. (Abb. 2).

Diese Methode eignet sich für Messungen im Frequenzbereich von etwa 3 kHz bis 1 MHz. Bei tiefen Frequenzen und kleinen Dämpfungen ist es erforderlich, den Aussenraum um die Kugel herum zu evakuieren, da die Strahlungsdämpfung dann einen beträchtlichen Beitrag zur Gesamtdämpfung leistet.

Wegen der unvermeidbaren Gefässdämpfung ist die Resonanzmethode für Absolutmessungen meist ungeeignet. Sie eignet sich jedoch gut für Vergleichsmessungen, z.B. an Lösungen, bei denen die Lösungsmitteldämpfung in Abzug gebracht werden soll, wo also nur Relativmessungen erforderlich sind.

Nachhallmethode

Die in der Raumakustik übliche Methode der Nachhallmessung ist mit Erfolg auch für Messungen in Flüssigkeiten angewandt worden [5]. Dabei wird die Flüssigkeit wiederum in ein frei aufgehängtes Gefäss eingefüllt, das

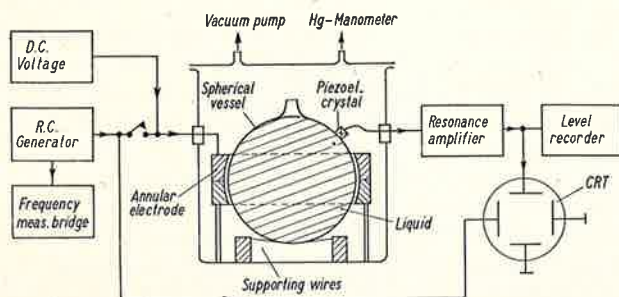


Abb. 2. Blockschaftbild der Resonanzmethode zur Messung der Absorption in Flüssigkeiten [5].

jedoch in diesem Fall möglichst unsymmetrisch sein soll, da die Nachhalltheorie ein diffuses Schallfeld voraussetzt. Aus dem gleichen Grunde erfolgt die Anregung nicht sinusförmig sondern mit Frequenzbändern, deren Breite etwa $\frac{1}{10}$ der Mittelfrequenz, also der Messfrequenz, beträgt, was z.B. dadurch erreicht werden kann, dass mit Impulsen der Messfrequenz angeregt wird. Anregung und Abnahme erfolgen am einfachsten mit ADP- oder Seignettesalz-Kristallen, die auf die Gefässwand aufgeklebt werden. (Abb. 3).

Die Nachhallmethode eignet sich für den Frequenzbereich 50 kHz bis 1 MHz und hat den Vorteil, dass die einzelnen Messfrequenzen nicht durch die Gefässdimensionen vorgegeben sind. Sie eignet sich ausserdem zu Absolutmessungen, sofern zylindrische Gefässe benutzt werden. Man kann dann nämlich durch Messungen bei verschiedener Höhe des Flüssigkeitsspiegels und in verschieden grossen, geometrisch ähnlichen Gefässen die Gefässdämpfung eliminieren.

Optische Methoden

Bei Frequenzen oberhalb 1 MHz ist die Wellenlänge so klein und die Dämpfung im allgemeinen so gross, dass man die Ausbreitungsdämpfung in gerichteten Schallstrahlen mit quasi-ebenen Wellen messen kann. Als Schallsender werden dabei meist Quarz- oder Turmalin-Kristalle benutzt. Zur Abtastung der Schallintensität als Funktion des Abstandes vom Strahler nutzt man hier mit Vorteil den Debye-Sears-Effekt aus, d.h. die Lichtbeugung am Ultraschallgitter. Bei hinreichend kleiner Schallintensität bzw. kleinem Strahlquerschnitt ist bei senkrecht durch den Schallstrahl hindurchtretendem Lichtstrahl die Intensität des in die erste Beugungsordnung abgelenkten Lichtes der Schallintensität proportional. Durch Registrierung des Lichtes der ersten Beugungsordnung mittels einer Photozelle bei gleichzeitiger Änderung des Abstandes zwischen Strahler und Lichtstrahl kann so die Dämpfung direkt gemessen werden. (Abb. 4).

Bei Frequenzen oberhalb etwa 15 MHz wird das Beugungsbild sehr schwach, und man benutzt zweckmässigerweise das bei leicht schräger Einstrahlung unter dem Bragg-Winkel einseitig abgelenkte Licht zur Registrierung.

Die optische Methode eignet sich für den Frequenzbereich von 1 MHz bis etwa 100 MHz. Die Messgenauigkeit beträgt im allgemeinen etwa 10 %, kann jedoch bei genügender Sorgfalt oberhalb 5 MHz bis auf etwa 2 % Messfehler gesteigert werden.

Impuls-Methoden

Ebenfalls ab etwa 1 MHz, jedoch bis hinauf zu den höchsten Frequenzen, kann das Impulsverfahren für die Absorptionsmessung angewendet werden. Hierbei stehen die als Sender und Empfänger dienenden Quarz- oder Turmalin-Kristalle einander gegenüber, und die Absorption wird bei konstanter Anregungsspannung punktweise durch Änderung des Abstandes zwischen Sender und Empfänger gemessen. Um Störungen durch stehende Wellen zwischen den beiden Kristallen zu vermeiden, wird mit Impulsen gearbeitet, die kürzer sein müssen als die doppelte Laufzeit vom Sender zum Empfänger.

Eine Variation dieses Verfahrens ist das Echo-Impuls-Verfahren, bei dem nur ein Kristall als Sender und Empfänger benutzt wird, dem ein Reflektor in variablem Abstand gegenübersteht.

Bei Frequenzen oberhalb 100 MHz werden wegen der grossen Dämpfung die Entfernungen zwischen Sender und

Empfänger sehr klein (Bruchteile eines mm), und die Laufzeiten entsprechend kurz. Um dabei Störungen durch elektrisches Übersprechen zu vermeiden, schaltet man zwischen Sender und Flüssigkeit und eventuell auch zwischen Flüssigkeit und Empfänger Verzögerungsleitungen ein, bestehend aus Stäben aus geschmolzenen Quarz. Auf diese Weise können Absorptionsmessungen bis hinauf zu etwa 300 MHz ausgeführt werden [6]. (Abb. 5).

Schallabsorption in Flüssigkeiten

Während bei Gasen zwischen den klassisch berechneten und den gemessenen Absorptionskoeffizienten im allgemeinen keine grossen Unterschiede bestehen, liegt die gemessene Absorption der Flüssigkeiten mit wenigen Ausnahmen um Grössenordnungen höher als die aus

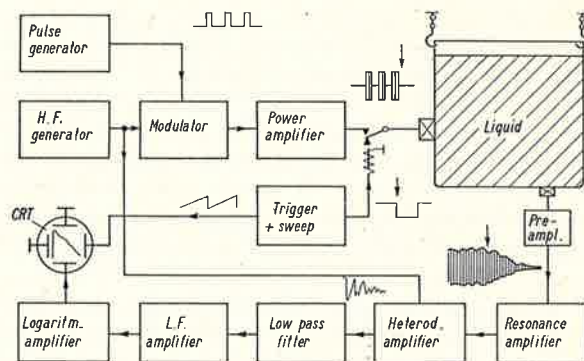


Abb. 3. Blockschaltbild der Nachhallmethode zur Messung der Absorption in Flüssigkeiten [5].

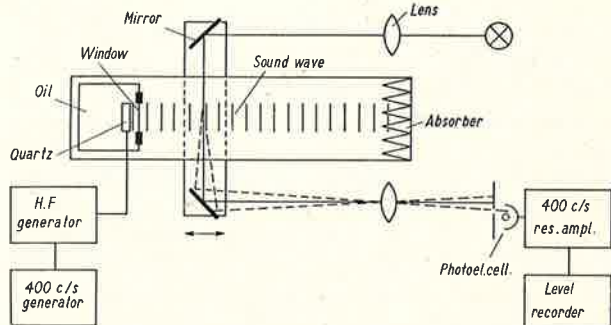


Abb. 4. Blockschaltbild einer optischen Anordnung zur Messung der Absorption in Flüssigkeiten [5].

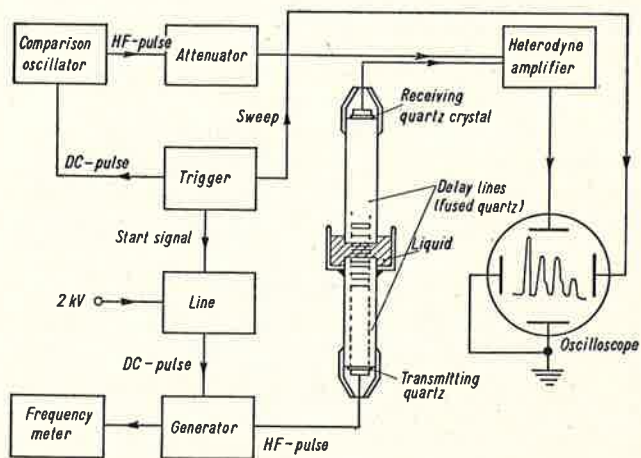


Abb. 5. Blockschaltbild einer Impuls-Messapparatur mit Verzögerungsleitungen zur Messung der Absorption in Flüssigkeiten bei sehr hohen Frequenzen [6].

Wärmeleitung und Viskosität berechneten Werte. Eine Ausnahmestellung nehmen hier nur die verflüssigten Edelgase, sowie Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff ein. Hinzu kommen stark viskose Flüssigkeiten, wie Rizinusöl, Leinöl und Glycerin, bei denen die Reibungsdämpfung und Quecksilber, bei dem die Wärmeleitungsdämpfung so gross ist, dass zusätzliche Dämpfungskomponenten dadurch möglicherweise der Messung entzogen werden.

Im Falle des Wassers liegt die gemessenen Dämpfung um den Faktor 3 höher als der berechnete Wert. Das Verhältnis α/v^2 (v = Frequenz) ist über den gesamten der Messung zugänglichen Frequenzbereich konstant, so dass experimentell über die Ursache dieser zusätzlichen Absorption keine näheren Angaben gemacht werden können. Es handelt sich wahrscheinlich um eine Strukturrelaxation, deren Relaxationsfrequenz bei $10^{10} \dots 10^{12}$ Hz angenommen wird.

Als Paradebeispiel für eine gut messbare Relaxationsdämpfung kann die Essigsäure gelten. Die Absorption liegt hier bei tiefen Frequenzen um den Faktor 5000 höher als die klassisch berechnete Dämpfung und die Relaxationsfrequenz liegt für Zimmertemperatur bei etwa 1000 kHz. Nach Lamb [7] beruht diese Relaxationsdämpfung auf der Dissoziation von Doppelmolekülen, die durch Wasserstoffbrücken miteinander verbunden sind.

Trotz der grossen Anzahl vorliegender Messungen können über die meisten reinen Flüssigkeiten bis jetzt noch keine genauen Angaben gemacht werden, weil sich die Messungen über zu kleine Frequenzbereiche erstrecken oder von verschiedenen Autoren unter verschiedenen

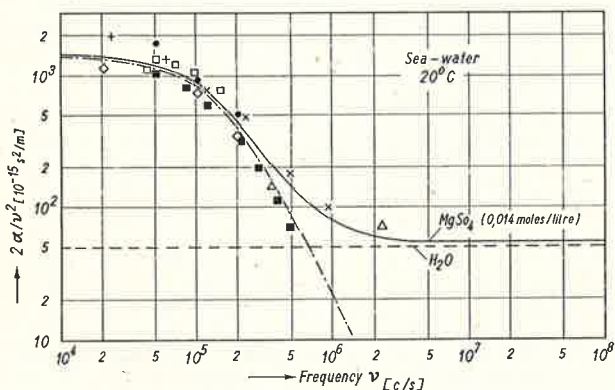


Abb. 6. Absorption in Seewasser als Funktion der Frequenz. Die strichpunktierte Kurve gibt den durch den Relaxationsprozess bedingten Teil der Dämpfung an [5].

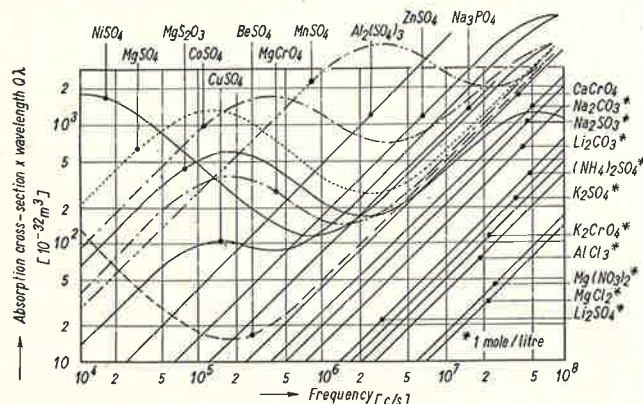


Abb. 7. Absorption mehrwertiger Elektrolyte in wässriger Lösung als Funktion der Frequenz. Der in [5] definierte Ordinatenmassstab ist der Grösse α/v proportional.

Bedingungen gemacht worden sind. Ähnliches gilt für die grosse Zahl von Messungen an Mischungen verschiedener Flüssigkeiten, die meist nur in Abhängigkeit von Mischungsverhältnis und Temperatur, nicht aber auch als Funktion der Frequenz durchgeführt wurden.

Absorption in Elektrolytlösungen

Sehr genaue Messungen über weite Frequenzbereiche liegen für wässrige Elektrolytlösungen vor. Das Interesse für die Absorption von Elektrolytlösungen wurde angeregt durch die seit langem bekannte Tatsache, dass die Schallabsorption in Meerwasser wesentlich höher ist als in Süswasser, wobei ein Relaxationsmaximum bei etwa 150 kHz. beobachtet wird. Als für diese Relaxationsabsorption verantwortlicher Bestandteil des Seewassers wurde das Salz $MgSO_4$ ermittelt, allerdings zeigen reine $MgSO_4$ -Lösungen bei gleicher Konzentration zwar die gleiche Relaxationsfrequenz, aber einen beträchtlich höheren Betrag der Absorption. (Abb. 6).

Zur Klärung der Ursachen wurde in Göttingen [5, 6] eine Systematische Untersuchung insbesondere der 2-2-wertigen Elektrolyte vorgenommen. Dabei zeigte sich, dass alle diese Elektrolyte eine ähnliche Relaxationsabsorption aufweisen und dass ausser dem vom $MgSO_4$ her bekannte Relaxationsmaximum ein zweites Maximum bei Frequenzen oberhalb 100 MHz existiert. Dabei wird die Lage des unteren Maximums durch das betreffende Kation bestimmt und die Maxima folgen — bei tiefen Frequenzen begonnen — in der Reihenfolge Be^{++} , Ni^{++} , Mg^{++} , Co^{++} , Mn^{++} , aufeinander, die der Anordnung nach wachsenden Ionenradien entspricht. (Abb. 7). Das ebenfalls untersuchte Cu^{++} nimmt eine noch ungeklärte Sonderstellung ein. Ein dem Mg^{++} -Ion entsprechendes Maximum wird in schwacher Form — bedingt durch geringe Löslichkeit — auch für $Mg(OH)_2$ beobachtet. Die Lage des zweiten Maximums bei hohen Frequenzen ist durch das Anion gegeben, wobei sich — wiederum nach steigenden Relaxationsfrequenzen geordnet — die Reihenfolge SO_4^{--} , CrO_4^{--} , $S_2O_3^{--}$ ergibt, von denen das $S_2O_3^{--}$ — Maximum bereits oberhalb 300 MHz liegt und daher zahlenmässig nicht mehr gemessen werden konnte. Das dem SO_4^{--} -Ion entsprechende Maximum wurde auch bei H_2SO_4 beobachtet.

Diese Tatsache und einige weitere Beobachtungen, die hier nicht diskutiert werden können, führten zu folgender Deutung: Die 2-2-wertigen Elektrolyte sind in Wasser unvollständig dissoziiert, wobei jedoch unter dem undissoziierten Zustand der Komplex $MgO \begin{smallmatrix} H \\ O \\ S \\ O \end{smallmatrix} \begin{smallmatrix} H \\ O \\ S \\ O \end{smallmatrix}$ zu verstehen

ist. Dieser Komplex dissoziiert nun in zwei Stufen zunächst in $MgOH^+ + HSO_4^-$ und schliesslich in $Mg^{++} + OH^- + H^+ + SO_4^{--}$. Dieser letzte Schritt ist mit einer beträchtlichen Änderung des scheinbaren Molvolumens verbunden, da die entstehenden kleinen zweiwertigen Ionen die Wasserstruktur in ihrer Umgebung stark ändern. Er ist daher druckabhängig und kann durch den Wechseldruck der Schallwelle beeinflusst werden. Sowohl Betrag der Absorption als auch Lage des Maximums können mit diesem Modell aus Dissoziationsgrad, Dissoziationswärme und scheinbarem Molvolumen berechnet werden [8].

Durch die gleichzeitige Einwertigkeit einwertiger Ionen wird dieser Dissoziationsprozess gestört. Daraus erklärt sich die Tatsache, dass die $MgSO_4$ -Absorption im Seewasser, also bei gleichzeitiger Anwesenheit von $NaCl$, beträchtlich kleiner ist als in reinen Lösungen. Auch hier

ist eine quantitative Deutung mit dem genannten Modell möglich.

3-1-, 1-2- und 2-1-wertige Elektrolyte zeigen ebenfalls Relaxationsabsorption, doch liegen die Maxima fast durchweg oberhalb 300 MHz, so dass keine genaueren Angaben gemacht werden können.

Bei den meisten 1-1-wertigen Salzen ist keine Absorption messbar. Sie kann jedoch durch den Einfluss der einwertigen Ionen auf die Wasserstruktur, also eine Verringerung der Absorption des Lösungsmittels, kompensiert sein. Für diese Tatsache spricht, dass gelegentlich in solchen Lösungen Absorptionswerte gemessen wurden, die kleiner als die des Wassers sind. Eine Ausnahme machen nur die schwach dissoziierenden Elektrolyte, wie z.B. NH_4OH mit einem ebenfalls berechenbaren Relaxationsmaximum bei etwa 20 MHz.

Methoden zur Messung der elastischen Konstanten in festen Stoffen

Zur Geschwindigkeits- und Absorptionsmessung in festen Stoffen bei Ultraschallfrequenzen wird meist das bereits bei den Flüssigkeiten erwähnte Impuls- oder Echo-Impuls-Verfahren angewendet. Dabei werden entweder die zu untersuchenden Proben zwischen Sender und Empfänger — bzw. Reflektor — in eine geeignete Flüssigkeit eingetaucht, oder es werden Sender und Empfänger direkt an die zu messende Probe angekoppelt. Bei hohen Frequenzen werden ebenso wie bei Flüssigkeiten Verzögerungsleitungen aus geschmolzenem Quarz zwischengeschaltet. Dabei werden Geschwindigkeitsmessungen durch Phasenvergleich mit einem zweiten, kalibrierten Verzögerungsglied ausgeführt. Da die zur Absorptionsmessung notwendige Veränderung der Probendicke schwierig ist, wird hier das Abklingen der in der Probe, bzw. in Verzögerungsleitung + Probe, hin- und herreflektierten Impulse gemessen. Dazu muss allerdings vorher der Reflexionsfaktor an den Begrenzungsflächen der Probe bestimmt werden. In dieser Anordnung können mittels geeignet geschnittener Kristalle auch Schub- und Torsionswellen angeregt werden.

Eine einfache Resonanzmethode zur Messung des Longitudinalwellenmoduls und des zugehörigen Verlustfaktors wurde von Koppelman [9] angegeben. Es werden Kreisscheiben des zu untersuchenden Materials, deren Durchmesser gross gegen die Wellenlänge ist, frei aufgehängt und von einer Seite her elektrostatisch in Resonanz angeregt. Dabei kann die metallisierte Oberfläche der Scheibe gleich als bewegliche Elektrode verwendet werden. Die Abnahme erfolgt ebenfalls elektrostatisch mit einer gleichartigen Anordnung an der anderen Seite. Resonanzfrequenz und — je nach der Grösse des Verlustfaktors — Abklingzeit oder Halbwertsbreite liefern die gewünschten Daten.

Bei Untersuchungen an Kunststoffen sind meist die Werte des Elastizitätsmoduls sowie der zugehörigen Verlustfaktoren für tiefe Frequenzen von Interesse. Hier benutzt man oft Stäbe des zu untersuchenden Materials, die in bekannter Weise zu Dehn-, Biege- oder Torsionsschwingungen angeregt werden, wobei wiederum Resonanzfrequenz und Abklingzeit oder Halbwertsbreite gemessen werden. Bei kleinen Verlusten müssen solche Messungen im Vakuum vorgenommen werden.

Eine von Kuhl entwickelte und von Tamm und Naake [10] in Göttingen benutzte Methode zur Dämpfungsmessung an kautschuk-elastischen Substanzen bei Ultraschallfrequenzen mag deshalb hier etwas eingehender erläutert werden, weil sie von den allgemein üblichen

Methoden abweicht. Gemessen wird die Amplitude als Funktion des Abstandes vom Sender längs einer stabförmigen Probe von quadratischem Querschnitt. Die Anregung zu longitudinalen Schwingungen erfolgt vom oberen Ende des senkrecht aufgehängten Stabes her mit einem piezoelektrischen System. Zur Abtastung der Amplitude wird nun nicht ein Körperschallempfänger benutzt, der die Schallausbreitung im Stab stören würde, vielmehr lässt man das Stabende in ein mit Wasser gefülltes Gefäss eintauchen und ändert kontinuierlich die Eintauchtiefe. Ein an beliebiger Stelle im Gefäss angebrachtes Wasserschallmikrophon liefert dann eine Ausgangsspannung, die der Amplitude innerhalb des Stabes z.B. an der Wasseroberfläche proportional ist. Bedingung dabei ist, dass innerhalb des Stabes keine stehenden Wellen auftreten, d.h. dass er hinreichend lang ist, und dass die Nachhallzeit im Gefäss nicht durch den mehr oder minder tief eintauchenden Stab verändert wird. Aus diesem Grunde sind die Gefässwände schallabsorbierend ausgekleidet. Messungen der Schallgeschwindigkeit können mit der gleichen Apparatur durch Phasenvergleich zwischen Sende- und Empfangsspannung bei gleichzeitiger Änderung der Eintauchtiefe vorgenommen werden. (Abb. 8).

Die Auswertung der auf diese Weise vorgenommenen Messungen bezüglich der elastischen Moduln und ihrer Verlustfaktoren gestaltet sich deswegen nicht ganz einfach, weil die Ausbreitungsbedingungen zumindest innerhalb eines bestimmten Frequenzbereiches recht unübersichtlich sind. Das zunächst notwendige Studium dieser durch die Abmessungen des Stabes gegebenen Ausbreitungsbedingungen ergibt jedoch schon recht interessante Resultate.

Bei tiefen Frequenzen beobachtet man eine linear mit der Frequenz ansteigende Dämpfung und eine Ausbreitungsgeschwindigkeit, die der aus dem statischen Elastizitätsmodul errechneten Dehnwellengeschwindigkeit entspricht. Es folgt dann ein Bereich nahezu konstanter Dämpfung mit unmessbar grosser Phasengeschwindigkeit, während bei noch höheren Frequenzen die Dämpfung plötzlich wieder stark absinkt und die Ausbreitungsgeschwindigkeit, aus den Unendlichen kommend, gegen die Longitudinalwellengeschwindigkeit konvergiert. Der interessante mittlere Bereich kommt dadurch zustande, dass bei Gummisorten, deren Querkontraktionszahl nahe 0,5 liegt, für die Ausbreitung der Longitudinalwellen eine untere Grenzfrequenz existiert. Unterhalb dieser Grenzfrequenz ist wie bei einer weich begrenzten Flüssigkeitssäule die Phasengeschwindigkeit unendlich, d.h. der Stab bewegt sich überall gleichphasig, und es existiert eine

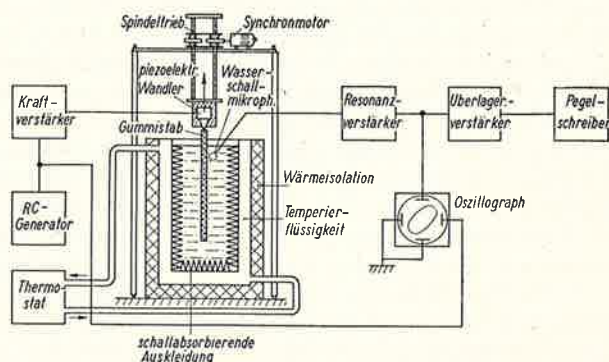


Abb. 8. Schema der von Tamm und Naake benutzten Apparatur zur Messung der elastischen Konstanten von Stäben aus kautschuk-elastischem Material bei Ultraschallfrequenzen.

grosse, aber immerhin endliche Blinddämpfung. Sowie nun, von tiefen Frequenzen her kommend, die linear mit der Frequenz ansteigende Dämpfung in die Grössenordnung dieser Blinddämpfung kommt, wird die Schallausbreitung bereits durch die Longitudinalwellen bestimmt und die Dämpfung bleibt konstant bis zur eigentlichen Grenzfrequenz der Longitudinalwellen, wo sie natürlich stark abnimmt. Dieses soweit noch recht klare Bild wird unübersichtlich durch eine grosse Zahl von Schubwellenmoden, die theoretisch in diesem Bereich vorhanden sein sollten, wenn die Poisson-Konstante von 0,5 abweicht. Bei den untersuchten Gummisorten war deren Einfluss jedoch wegen zu grosser Dämpfung nicht messbar und es wurden lediglich bei hohen Frequenzen die Dispersionsäste der höheren Longitudinalwellenmoden gemessen.

Während die Messung des Elastizitätsmoduls und des Schubmoduls bei tiefen Frequenzen mittels Biege- und Torsionswellen relativ einfach ist, ergeben sich für die Bestimmung des Longitudinalwellenmoduls wegen der grossen Wellenlängen einige Schwierigkeiten. Um dennoch mit kleinen Proben messen zu können, wurde in Göttingen das bei den Flüssigkeiten erwähnte Kugelresonatorverfahren zur Messung des Kompressionsmoduls und seines Verlustfaktors angewandt. Zu diesem Zweck wurde eine Probe des zu untersuchenden Materials, deren Abmessungen klein gegen die Wellenlänge sind, in das Zentrum der wassergefüllten Kugel gebracht, wo bei radialen Schwingungen stets ein Druckmaximum ist, die Probe also allseitiger Kompression und Dilatation ausgesetzt ist. Aus der gemessenen Verstimmung des Resonators und der durch die Probe verursachten Änderung der Dämpfung ergibt sich dann der Kompressionsmodul und sein Verlustfaktor.

Um einen grösseren Frequenzbereich überstreichen zu können, wurde die Methode später dahingehend abgewandelt, dass ein starkwandiges zylindrisches Stahlrohr benutzt wurde, in dessen Innern eine Wassersäule zu Längsschwingungen angeregt wurde [11]. Die in diesem Fall scheibenförmigen Proben wurden wiederum in ein Druckmaximum gebracht. Durch Verändern der Wasserhöhe kann der Resonator in diesem Fall kontinuierlich verstimmt werden.

Schallabsorption in festen Stoffen

Für die Schallabsorption in festen Stoffen sind zunächst, wie bei Flüssigkeiten, innere Reibung und Wärmeleitung verantwortlich. Dazu kommen aber auch Verluste durch elastische Hysterese, die einen frequenzunabhängigen Verlustfaktor und damit einen linearen Anstieg der Absorption mit der Frequenz liefern, und plastisches Fließen, sowie thermische oder elastische Relaxationserscheinungen. Die Absorption ist nicht für alle Wellenarten gleich, da z.B., wie schon erwähnt, bei transversalen Wellen keine Wärmeleitungsverluste auftreten, so dass diese im allgemeinen schwächer gedämpft sind.

In Metallen tritt eine zusätzliche scheinbare Absorption auf durch die Rayleigh-Streuung an Mikrokristalliten, die wirksam ist, solange die Wellenlänge noch grösser als der Korndurchmesser ist. Bei höheren Frequenzen, d.h. wenn die Wellenlänge den Korndurchmesser unterschreitet, wird diffuse Reflexion an den Korngrenzen beobachtet, die z.B. von Mason und McSkimin [12] beschrieben wurde. Beide Erscheinungen sind ausser von der Korngrösse von der Anisotropie der Kristallite und von der Wellenart abhängig. Bei Scherwellen ist diese scheinbare Absorption grösser als bei Longitudinalwellen.

Die Streuung oder diffuse Reflexion könnte ein wertvolles Hilfsmittel für die Untersuchung der kristallinen Struktur von Metallen sein, jedoch wären dazu noch weitere Untersuchungen an dem Phänomen selbst erforderlich.

Weitgehend angewendet wird der Ultraschall heute bei der Untersuchung von hochpolymeren Stoffen. Allerdings sollte man hier besser von „Schalluntersuchungen“ sprechen, da die bei diesen Stoffen beobachteten Relaxationsvorgänge meist im Hörschallbereich liegen.

Hochpolymere sind charakterisiert durch den breiten Übergangsbereich zwischen festem und flüssigem Zustand. Unterhalb der Einfriertemperatur, im glasig-amorphen Bereich, sind ihre elastischen Eigenschaften durch die Bindungskräfte zwischen benachbarten Atomen gegeben (Energieelastizität). Der Elastizitätsmodul liegt in der bei festen Stoffen üblichen Grössenordnung und ist praktisch frequenzunabhängig. Die Verluste sind relativ klein ($\eta < 0,1$).

Mit zunehmender Temperatur werden die Kettensegmente der Moleküle in zunehmendem Masse frei, so dass Platzwechsel stattfinden können. Der E-Modul nimmt ab und wird frequenzabhängig. Bei hohen Frequenzen, denen die Platzwechsel nicht folgen können, bleibt er in seiner ursprünglichen Grösse erhalten, während bei tiefen Frequenzen und hohen Temperaturen wiederum ein Gebiet praktisch konstanten E-Moduls erreicht wird. In diesem „kautschuk-elastischen“ Zustand ist der E-Modul um Grössenordnungen kleiner als im eingefrorenen Zustand. Kleine Kräfte führen zu grossen Formveränderungen, die grösstenteils reversibel sind. Da die Rückstellkräfte durch das Bestreben der Kettenmoleküle, ihren ursprünglichen verschlungenen Zustand grösster Entropie wiederherzustellen, gegeben sind, spricht man von Entropieelastizität.

Bei weiter ansteigender Temperatur tritt plastisches Fließen und schliesslich Verflüssigung ein.

Die genannten einzelnen Stadien können durch Messungen des E-Moduls und seines Verlustfaktors bei einer festen, tiefen Frequenz in Abhängigkeit von der Temperatur untersucht werden. Insbesondere interessiert dabei die Grösse des komplexen E-Moduls im kautschukelastischen Zustand und seine Abhängigkeit vom Vernetzungsgrad und von Füllstoffen. Nach Becker und Oberst [13] ergibt sich hierbei eine deutliche Klassifizierung in lineare, vernetzte und gefüllte Hochpolymere, die einen in der genannten Reihenfolge ansteigenden E-Modul im kautschukelastischen Zustand zeigen.

Für die Untersuchung der durch die Platzwechselvorgänge verursachten Relaxationsprozesse sind Messungen in Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur erforderlich. Hier sei auf die Arbeiten von Becker [14] und Koppelman [9] verwiesen.

Charakteristisch für die Relaxationsprozesse in Hochpolymeren ist zunächst, dass eine definierte Relaxationsfrequenz nicht mehr existiert, vielmehr ist diese über einen weiten Bereich verschmiert, was in einer Verbreiterung der Absorptionsmaxima zum Ausdruck kommt. Während die Relaxationskurven, deren Maximum sich mit steigender Temperatur zu höheren Frequenzen verschiebt, bei Auftragung in logarithmischen Frequenzmassstab stets miteinander zu Deckung gebracht werden können, wenn sie durch einen einzelnen Prozess mit definierter Relaxationszeit verursacht werden, ist das nicht mehr der Fall, wenn mehrere, voneinander unabhängige Vorgänge beteiligt sind. Da dennoch die Kurven innerhalb gewisser Temperaturbereiche ihre Form beibehalten, nimmt Koppelman [9]

eine Verknüpfung der einzelnen Vorgänge in bezug auf ihre zeitliche und räumliche Reihenfolge an. Mit Hilfe dieses Platzwechselmodelles ist es möglich, eine Deutung des Verlaufes der Messkurven zu geben, jedoch würde eine ins Einzelne gehende Diskussion in diesem Zusammenhang zu weit führen.

Interessant ist ferner, dass die Dispersionsgebiete für die einzelnen Moduln in verschiedenen Frequenzbereichen liegen, d.h., dass das Relaxationsverhalten von der Art der Beanspruchung abhängt. Ferner treten innerhalb der einzelnen Dispersionsgebiete Abweichungen von den in der Elastizitätstheorie gültigen Beziehungen zwischen den einzelnen Moduln auf, d.h. für die aus Schub- und Elastizitätsmodul berechnete Querkontraktionszahl ergibt sich kein konstanter Wert. Dabei ist das Letztere natürlich nur eine Konsequenz des Ersten, denn wenn die Relaxationsprozesse von der Beanspruchungsart abhängen, was möglicherweise auf die Kettenform der Moleküle zurückzuführen ist, dann ist die Berechnung anderer Moduln über die Poisson-Konstante nicht mehr zulässig.

Schluss

Die vorstehende Übersicht über die Möglichkeiten, Praktiken und Resultate der Strukturuntersuchungen mit Ultraschall konnte natürlich besonders hinsichtlich der Ergebnisse Vieles nur andeuten. Speziell auf dem Gebiet der akustischen Untersuchungen an Hochpolymeren existiert heute bereits eine recht umfangreiche Literatur. Die Übersicht reicht aber vielleicht aus, um zu zeigen, dass auf dem Gebiete der Strukturuntersuchungen heute trotzdem erst ein Anfang vorliegt und dass es sich hier um eine der wichtigsten — wenn nicht sogar um die wichtigste Anwendungsmöglichkeit des Ultraschalls handelt.

Literatur

- [1] PARSHAD, R., *Ind. Journ. Phys.* 19 (1945) 47.
- [2] SCHAAFFS, W., siehe L. BERGMANN „Der Ultraschall“, 6. Auflage, Hirzel-Verlag Stuttgart 1954.
- [3] HEUSINGER, P. P., *Acustica* 1 (1951) AB3.
- [4] KNESER, H. O., *Z. Techn. Phys.* 16 (1935) 213.
- [5] KURTZE, G., TAMM, K., *Acustica* 3 (1953) 33.
- [6] TAMM, K., KURTZE, G., KAISER, R., *Acustica* 4 (1954) 380.
- [7] LAMB, J., PINKERTON, J. M. M., *Proc. Royal Soc. A* 199 (1949) 114.
- [8] EIGEN, M., KURTZE, G., TAMM, K., *Zs. Elektrochemie* 57 (1953) 103.
- [9] KOPPELMANN, J., *Kolloid-Zeitschr.*, 144 (1955) 12.
- [10] TAMM, K., NAAKE, H. J. erscheint demnächst in *Acustica*.
- [11] MEYER, E., TAMM, K., *Akust. Zs.* 7 (1942) 45.
- [12] MASON, P. W., MC SKIMIN, H. J., *J. Acoust. Soc. Am.* 19 (1947) 466.
- [13] BECKFR, G. W., OBERST, H., *Kolloid-Zeitschr.* 148 (1956) 6.
- [14] BECKER, G. W., *Kolloid-Zeitschr.* 140 (1955) 1.

Diskussion

P. J. GELLINGS: Wenn man absorption misst in Festkörpern die in Flüssigkeiten untergetaucht sind wird

dann nicht eine grössere Dämpfung gemessen als wenn man das Objekt z.B. im Vakuum aufhängt?

Dr. KURTZE: Der genannte Fall würde eintreten, wenn man etwa die Abklingzeit eines akustisch angeregten Körpers unter Wasser misst. Hier wird jedoch die Amplitudenabnahme beim Durchgang einer seitlich scharf begrenzten ebenen Welle durch die scheibenförmige Probe bestimmt. Da dabei keine Schallenergie seitlich abgestrahlt wird, kann der gemessene Energieverlust nur auf Absorption in der Probe zurückzuführen sein.

Dr. Ir. G. P. DE LOOR: Welche Beziehung gibt es zwischen der akustisch gemessenen Relaxation und der dielektrischen Relaxation?

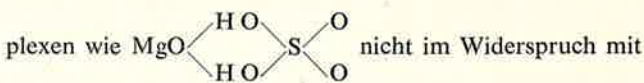
Dr. KURTZE: Beziehungen können nur bestehen, wenn der zugrundeliegende Vorgang sowohl akustisch wie auch elektrisch angeregt werden kann. Das ist im allgemeinen nicht der Fall. Die Relaxation durch Dissoziation in Elektrolyten kann aber z.B. aus Leitfähigkeitsmessungen in Abhängigkeit von der Feldstärke ermittelt werden. Dabei zeigt sich bei hohen Feldstärken (ca. 100 kV/cm) ein Ansteigen der Leitfähigkeit.

R. DAVID: Sie haben erzählt, wie man Absorptionen misst an Festkörpern mit Hilfe nur eines Kristalles. Aus welchen physikalischer Grössen bestimmt man den Reflexionsfaktor (z.B. aus der Temperatur) und in Folge dessen: Welche Sorten von relativen Messungen kann man machen ohne den Reflexionsfaktor bestimmt zu haben?

Dr. KURTZE: Der Reflexionsfaktor r ergibt sich aus den Wellenwiderständen Z_1 und Z_2 der beiden Medien ($Z = \text{Dichte} \times \text{Schallgeschwindigkeit}$) $r = (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2)$, wobei jedoch idealer Kontakt vorausgesetzt ist. Experimentell kann er bestimmt werden, indem bei Benutzung nur eines Kristalles als Sender und Empfänger je eine Messung mit und ohne den (nicht benutzten) zweiten Kristall gemacht wird. — Bei Relativmessungen von Schallgeschwindigkeit und Absorption ist die Kenntnis des Reflexionsfaktors nicht erforderlich, allerdings steigt die Messgenauigkeit mit zunehmendem r .

Für Absolutmessungen der Schallgeschwindigkeit ist die Kenntnis des Phasensprunges bei der Reflexion und für absolute Absorptionsmessungen die Kenntnis des Betrages des Reflexionsfaktors Bedingung.

Drs. M. S. DE GROOT: Ist die Annahme von Com-



der von den Experimenten bestätigten Debye- und Hückelschen Theorie? In dieser Theorie vermeidet man doch diese Art Verbindungen indem man sie ersetzt durch 'Ionenwolken'.

Dr. KURTZE: Das Auftreten von 2 Relaxationsfrequenzen z.B. bei MgSO_4 ist mit der Debye-Hückel Theorie nicht zu erklären. Für diesen Fall ist die Annahme vollständiger Dissoziation bei starken Elektrolyten eine unzulässige Vereinfachung. Tatsächlich muss natürlich immer ein Gleichgewicht zwischen dissoziierten und undissoziierten Molekülen bestehen, und zwar beträgt — wie z.B. auch aus Messungen der Lösungsenthalpie bestätigt ist — der undissoziierte Anteil beim MgSO_4 in 0,01 bis 1 molarer Lösung nahezu konzentrationsunabhängig etwa 10 %.

