

Karlsruher Akademische Reden  
Neue Folge

Nr. 9

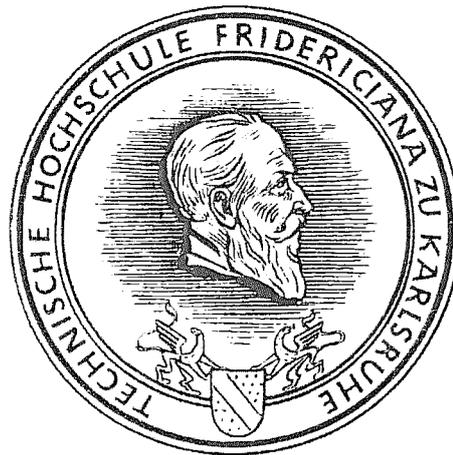
Die Beziehungen zwischen physikalischer  
und physiologischer Akustik

REDE

anlässlich der Rektoratsübernahme  
am 13. Januar 1951

von

Prof. Dr.-phil. HERMANN BACKHAUS



VERLAG C.F. MÜLLER KARLSRUHE

Alle Rechte vorbehalten

Druck: C. F. Müller, Buchdruckerei und Verlag G.m.b.H., Karlsruhe

1952

## Die Beziehungen zwischen physikalischer und physiologischer Akustik

Es ist ein alter akademischer Brauch, daß der neugewählte Rektor bei seiner feierlichen Amtseinführung gewissermaßen seine Visitenkarte als Forscher dadurch abgibt, daß er in seiner Festrede über irgendeinen Fragenkomplex seines Fachgebiets berichtet. In den bewegten Zeiten, die wir jüngst erlebt haben, ist von diesem Brauch häufig abgewichen worden, denn es drängten sich Fragen auf von allgemeinerer Art, deren Behandlung ganz besonders dringlich schien. Es drückte sich darin wohl die Tatsache aus, daß der Rektor, wenigstens während seiner Amtszeit, weniger Lehrer und Forscher ist als vielmehr Verwaltungsmann.

Wenn ich es nun unternehme, zu dem alten Brauch zurückzukehren und Ihnen über Fragen meines Fachgebietes zu berichten, nämlich über die Beziehungen zwischen physikalischer und physiologischer Akustik, so veranlaßt mich dazu die Überzeugung, daß wir, wie auf manchen anderen Gebieten, so auch auf dem der Hochschulpolitik, zu einem Stadium der Stabilisierung gelangt sind, wo wir veranlaßt sind, unser Haus aufzuräumen und zu ordnen, und wo wir nicht versäumen dürfen, auch alte Bräuche, soweit sie heute noch verständlich und berechtigt erscheinen, wieder aufleben zu lassen.

Es besteht freilich bei einem solchen Bericht eine Gefahr: der Forscher bedarf, um seine Ergebnisse klar und übersichtlich anzuordnen, vielfach einer eigenen Sprach- und Begriffsbildung. Auch seine Art zu denken und zu folgern ist oft von der bei anderen Menschen üblichen abweichend. Und so kann es dann kommen, daß solche Berichte zwar eine Fundgrube profunden Wissens und höchst feierlich und damit der Würde des Festes entsprechend, aber für die Mehrzahl der Zuhörer unverständlich sind. Ich will mich nicht vermessen, dieser Gefahr zu entgehen, ich will aber wenigstens versuchen, mit meinen Darlegungen möglichst allgemein verständlich zu bleiben. Deshalb will ich aus dem weiten Gebiet, das ich genannt habe, nur einige wenige einfache Beispiele herausgreifen.

Die Akustik ist die Lehre von den Schwingungen, die wir mit unserem Gehörorgan wahrnehmen können. Von gewissen Erweiterungen des Gebiets zu den nicht mehr hörbaren Vorgängen kann hier abgesehen werden. Die Akustik ist ein wichtiger Teilbereich der Physik, dem die Physik viele Anregungen auch auf anderen Gebieten

verdankt. Die akustische Forschung ist eine Zeitlang von den Physikern etwas vernachlässigt worden, bis sie mit dem Aufkommen des Rundfunks einen neuen bedeutenden Auftrieb erfuhr. Andererseits ist die Physiologie, die sich die Erforschung der physikalischen und chemischen Vorgänge am lebenden Körper zur Aufgabe stellt, in hohem Grade an akustischen Vorgängen interessiert, da sich ja das menschliche Sprachorgan als sehr differenzierter Erzeuger, das Gehörorgan dagegen als nicht minder vollendeter Empfänger akustischer Vorgänge darstellen. Es ist nun recht reizvoll, sich vor Augen zu führen, wie auf diesem ihrem gemeinsamen Forschungsgebiet Physik und Physiologie gearbeitet haben, manchmal in voller Harmonie und glücklichster gegenseitiger Ergänzung, manchmal auch in heftigen Kontroversen gegeneinander, die aber vielfach auch zur Klärung wesentlich beigetragen haben.

Eine besonders glückliche und weitgehende Förderung hat die Akustik durch einen Forscher erfahren, den sowohl die Physiker als auch die Physiologen mit Recht als einen ihrer Größten verehren: durch Hermann v. HELMHOLTZ. Die von ihm gewonnenen Erkenntnisse sind auch heute noch grundlegend und richtunggebend, wenn man natürlich auch in späteren Zeiten in vielen Einzelheiten darüber hinausgekommen ist. Man kann aber wohl sagen, daß alle Versuche im Grundsätzlichen andere Wege gehen, fehlgeschlagen sind oder zu der Erkenntnis geführt haben, daß der scheinbar neue Weg im Grunde genommen identisch mit dem von dem Altmeister Helmholtz gewiesenen ist.

Ein sehr interessantes Beispiel hierfür liefert die Theorie der Entstehung der menschlichen Sprachlaute. Das Gerippe unserer Sprache bilden gewissermaßen die Vokale. Die Konsonanten kann man als besondere Formen des Beginns oder der Beendigung von Vokalklängen oder als Übergangserscheinungen zwischen verschiedenen Vokalklängen auffassen. Um die Eigenschaften eines Vokalklanges zu erkennen, muß man ihn nun ganz rein darstellen. Dazu gehört zunächst die Loslösung von allen konsonantartigen Übergangsvorgängen, die man als „Ausgleichsvorgänge“ zu bezeichnen pflegt. Weiter ist es aber auch nötig, den Vokalklang von allen Komplikationen freizuhalten, die ihm wohl im Sprachgebrauch normalerweise anhaften mögen, die ihm aber nicht eigentümlich sind. In der gewöhnlichen Sprache wird ein Vokal meist nicht während seines ganzen Verlaufs mit konstanter Tonhöhe erklingen; ja sogar im Kunstgesang werden gewisse Tonhöheschwankungen z. B. durch Tremolieren gebräuchlich und sogar für den künstlerischen Zweck wünschenswert erscheinen. Wenn aber von alledem abgesehen wird, so bleibt der Vokalklang als solcher dennoch klar erhalten. Einen solchen reinen Vokalklang, der also mit konstanter Tonhöhe und natürlich auch mit konstanter

Stärke gegeben wird, kann man nun mit den modernen Meßgeräten leicht photographisch aufzeichnen und dadurch etwa den Schalldruck in seinem zeitlichen Verlauf darstellen. Es zeigt sich dann, daß der Vorgang streng periodisch verläuft, d. h. nach Ablauf einer gewissen Zeitdauer, einer Periode, sich identisch reproduziert. Man nennt einen solchen akustischen Vorgang einen Klang. Der Verlauf innerhalb einer Periodendauer ist nun meist sehr kompliziert, und deswegen verwendet man ein mathematisches Verfahren der Zerlegung in besonders einfache Teilvorgänge, die nach den bekannten trigonometrischen Sinusfunktionen verlaufen. Eine einzelne solche Sinusschwingung erscheint uns akustisch als weich und leer; man nennt sie einen reinen T o n. Der Vokalklang besteht also aus einer Übereinanderlagerung von solchen reinen Teiltönen, deren Frequenzen übrigens, wie man leicht einsehen kann, alle ganzzahlige Vielfache einer tiefsten unter ihnen, der des Grundtons, sein müssen, der seinerseits der Periode des Gesamtvorgangs entspricht. Diese Teiltöne liegen dann, wie man sagt, harmonisch zueinander.

Je nach der Verteilung der einzelnen Teiltöne hinsichtlich ihrer relativen Stärke, oder wie man sagt ihrer Amplituden, ist der subjektive Charakter des wahrgenommenen Klanges verschieden. Ein reiner Ton ohne Obertöne klingt, wie schon erwähnt, leer und weich. Diese weiche „Klangfarbe“ bleibt erhalten, wenn die Obertöne schwach sind im Vergleich mit dem Grundton, wie das z. B. bei Flötenklängen der Fall ist. Andererseits erzeugen starke Teiltöne in höheren Ordnungen eine scharfe Klangfarbe.

Die absolut sichere Unterscheidbarkeit der verschiedenen Vokale hat nun auch ihren Grund in ihrer Klangfarbe. Es zeigt sich nämlich, daß für jeden Vokal ein oder zwei Bereiche von besonders kräftigen Teiltönen charakteristisch sind, die man als Formantbereiche oder kürzer Formanten bezeichnet. Sie liegen ihrer Tonhöhe nach fest. So liegen z. B. die Formanten für u bei 400 Hz, für a bei etwa 800 Hz, für i bei 400 und 3000 Hz. Wenn man also bei dem Vokal i den hohen Frequenzbereich, der den oberen Formanten bei 3000 Hz enthält, abschneidet, was man leicht durch geeignete elektrische Schaltungsmittel erreichen kann, so bleibt nur der tiefe Formant bei 400 Hz übrig, und der Klang wird einem u ähnlich.

Es fragt sich nun, wie diese Wirkungen zustande kommen und welche Rolle die einzelnen Teilorgane des Stimmapparates dabei spielen. Zunächst wird durch den in der Lunge erzeugten Überdruck ein gleichmäßiger Luftstrom durch den Kehlkopf geblasen. Die Erregung von Schwingungen aus einer solchen gleichförmigen Bewegung kommt in der Natur und Technik sehr häufig vor, und man kann hierbei in sehr vielen Fällen ein gemeinsames Prinzip erkennen, wonach ein Steuerorgan nicht nur von der primären gleichförmigen Be-

wegung, sondern gleichzeitig durch Rückwirkung von der bereits gesteuerten periodischen Bewegung her beeinflußt wird. Dieses sogenannte Rückkopplungsprinzip findet man bei den verschiedensten Vorgängen: bei mechanischen Schwingungen an Wasserhähnen, vielleicht sogar bei den veränderlichen Sternen; bei vielen Musikinstrumenten, bei mechanischen Uhrwerken und auch beim menschlichen Stimmorgan. Eine klare Erkenntnis dieser Vorgänge hat man erst ziemlich spät gewonnen. Das Problem der Erzeugung stationärer Schwingungen beliebiger Frequenz, auf dem unsere ganze moderne Fernmeldetechnik, insbesondere die Rundfunktechnik beruht, bedurfte des Hilfsmittels der elektrischen Entladungsröhre und der Erkenntnis des Rückkopplungsprinzips zu seiner endgültigen Lösung. Es ist wohl kein Zufall, und verdient an dieser Stelle wohl hervorgehoben zu werden, daß unser leider zu früh verstorbener Kollege Gaede, der durch seine grundlegenden Untersuchungen auf dem Gebiet der Hochvakuumtechnik, die Grundlage für die Entwicklung der Elektronenröhre gelegt hat, es war, der als erster dieses Rückkopplungsprinzip als geeignetes Verfahren zur Erzeugung stationärer Schwingungen erkannte.

Die Stimmbänder im menschlichen Kehlkopf lassen nun im Takt der Grundschwingung, der durch geeignete Spannung der Stimmbänder eingestellt wird, Luftstöße austreten, deren Dauer relativ kurz ist zur Periode. Diese Schwingungen regen dann die Höhlungen im Mund- und Rachenraum in verschiedener Weise an. Den einfachsten Überblick erhält man dadurch, daß man den aus den kurzen Stößen bestehenden periodischen Vorgang in sinusförmige harmonische Teilvergänge zerlegt. Jede dieser Teilschwingungen wirkt dann als eingeprägte Kraft auf die verschiedenen Höhlungen des Mund-, Nasen-, Rachenraums. Stimmt nun eine der Eigenfrequenzen dieser Höhlungen mit der Frequenz einer der Teilschwingungen überein, so wird diese Teilschwingung durch Resonanz verstärkt und erscheint in dem Klangvorgang besonders kräftig. Es ist nicht nötig, auf weitere Einzelheiten einzugehen. Jedenfalls ist die skizzierte Theorie, die im wesentlichen schon von Helmholtz aufgestellt worden ist, imstande, alle Vorgänge bei der Entstehung von Vokalklängen in befriedigender Weise zu erklären.

Es ist nun sehr interessant, daß man eine Zeitlang diese Theorie in Zweifel gezogen hat und an ihrer Stelle eine andere Erklärung der Entstehung von Vokalklängen glaubte geben zu müssen. Der Königsberger Physiologe Herrmann beobachtete nämlich, daß bei Klangregistrierungen des Vokals a der Verlauf innerhalb der einzelnen Periode ähnlich verlief wie eine abklingende Schwingung. Er schloß daraus, daß jeder der einzelnen Luftstöße einen geeigneten vorbereiteten Lufthohlraum anstößt und ihn dadurch veranlaßt, wie ein Pendel

Schwingungen seiner Eigenfrequenz auszuführen, die dann natürlich gedämpft verlaufen müssen. Bis hierhin ist diese Darstellung ohne Zweifel richtig, wenn sie auch nicht vermag, den ganzen Vorgang so vollständig zu erfassen wie der Helmholtzsche Ansatz. Es wurde aber nun die Frequenz der erwähnten abklingenden Schwingung, die ja nur von der Einstellung der Hohlräume, aber nicht von den Teilfrequenzen der Stimmbandschwingungen abhängig ist, als Teilfrequenz des Gesamtvorganges angesprochen, woraus man dann schloß, der Vokalklang enthalte unharmonische Teiltöne. Diese letzte Behauptung ist nun offenbar verkehrt; denn es ist unberechtigt, den Begriff des Teiltones, der aus der eindeutigen Zerlegung in harmonische stationäre Sinusschwingungen hergeleitet ist, auf den aus dem bloßen Anblick des Klangbildes entnommenen abklingenden, also nichtstationären Vorgang zu übertragen. Die viel erörterte und umkämpfte Streitfrage kann als längst geklärt betrachtet werden: die Helmholtzsche Theorie gibt die Vorgänge richtig und vollständig wieder; der Herrmannsche Ansatz ist geeignet, eine gute Annäherung in einigen Einzelfällen zu geben. Die Behauptung, daß im Vokalklang unharmonische Teiltöne erhalten seien, ist aber in dieser Form falsch. Die Auffassung, als ob der beobachtete abklingende Schwingungsvorgang für die Empfindung des Vokals a wesentlich sei, konnte außerdem neuerdings in sehr eindrucksvoller Weise dadurch widerlegt werden, daß man eine Schallplattenaufnahme solcher Vorgänge in umgekehrter Richtung abspielte, so daß die Schwingung nicht abfiel, sondern anwuchs. Die Helmholtzsche Theorie verlangte dann, daß der Klangcharakter erhalten blieb. Das wurde eindeutig bestätigt. Der erwähnte Streit um die beiden hier skizzierten Auffassungen hat mehrere Jahrzehnte gedauert, und es wäre wohl zuviel gesagt, daß man sich allgemein geeinigt habe. Noch in jüngster Zeit wurde bei der Schilderung eines elektrischen Musikinstruments die Ausdeutung des Klangbildes in der Herrmannschen Form als besonders nützlich bezeichnet.

Der große Erfolg, den die Betrachtung der Klangfarbe für die Theorie der menschlichen Sprachlaute gebracht hatte, hat zunächst die Hoffnungen erweckt, daß man auch auf anderen Gebieten der Klangforschung mit den gleichen Mitteln zum Ziele kommen könne. Da man geeignete Geräte entwickelt hatte, um bequem sogenannte Klangspektren aufzuzeichnen, d. h. die Stärke der einzelnen Teiltöne zu ermitteln, so trug man sich mit dem Gedanken, einen Klangatlas für alle möglichen stationären Klänge, vor allem solche von Musikinstrumenten, zu schaffen. Es zeigte sich aber bald, daß das nicht gelang: diese Klangspektren waren in überraschender Weise uncharakteristisch. Die Erklärung hierfür liefert eine Tatsache, die schon Helmholtz angedeutet hat, die aber wohl zuerst ganz klar von dem Berliner Psychologen Carl Stumpf, dem die Erforschung der Sprachklänge

sehr viel verdankt, ausgesprochen wurde. Die Stumpfschen Versuche kann man heute mit elektrischen Mitteln in sehr einfacher Weise machen: man überträgt durch Mikrophon und Lautsprecher Musikklänge aus einem Raum in einen anderen. Es zeigt sich dann, daß, mit einigen wenigen Ausnahmen, auch der beste Musikkennner die Klänge von verschiedenen Instrumenten nicht identifizieren kann, wenn ihm nur der stationäre Klang geboten wird, d. h. wenn der Lautsprecher erst dann eingeschaltet wird, wenn die eigentliche Klangerzeugung schon vollendet ist. Es folgt daraus, daß für den Klang eines Musikinstrumentes die Klangfarbe des stationären Klanges nicht, wohl aber die sogenannten Ausgleichsvorgänge charakteristisch sind. Die Erforschung dieser Ausgleichsvorgänge zeigte nun bei Musikinstrumenten relativ langdauernde Vorgänge bis zur Dauer von  $\frac{1}{10}$  sec. von sehr unterschiedlichem Verlauf, der dann auch als charakteristisch für verschiedene Instrumente erkannt werden konnte. Dagegen zeigen die Vokale der menschlichen Stimme so gut wie gar keine Ausgleichsvorgänge: der stationäre Klang erscheint fast unvermittelt. Hier liegt also die Erkennbarkeit ausschließlich in der Klangfarbe.

Der Grund hierfür ist leicht zu verstehen. Die meisten Musikinstrumente, ähnlich auch das menschliche Stimmorgan, bestehen aus zwei deutlich getrennten Teilen mit verschiedenen Funktionen: der eine Teil ist der eigentliche Schwingungserzeuger, beim Stimmorgan die Stimmbänder, bei den Streichinstrumenten die Saite, bei den Zungenpfeifen die Zunge. Der zweite Teil ist ein Resonanzgebilde, von dem man näherungsweise annehmen kann, daß es von dem Schwingungserzeuger zu erzwungenen Schwingungen erregt wird. Gleichzeitig findet beim Übergang vom Schwingungserzeuger zum Resonator meist eine Transformation in dem Sinne statt, daß Schwingungen von Körpern kleiner Oberfläche, die aber mit großer Amplitude erfolgen, in kleine Schwingungen großflächiger Körper umgeformt werden. Das hat auch noch den weiteren Vorteil, daß dadurch die Übertragung der Schwingungen in das umgebende Medium, die sogenannte akustische Abstrahlung, günstig beeinflußt wird. Als Resonatoren dienen beim Stimmorgan die Hals-, Nasen-, Rachenhöhlungen, bei den Musikinstrumenten die Instrumentenkörper, bei den Zungenpfeifen das Luftvolumen in der Pfeife. Aus der allgemeinen Theorie solcher erzwungenen Schwingungen ist nun bekannt, daß die Breite der Resonanzgebiete sehr maßgebend durch die Dämpfung beeinflußt wird: je kleiner die Dämpfung ist, um so schärfer und schmaler ist das Resonanzgebiet. Wenn also die erzwungene Schwingung eine Teilfrequenz enthält, die mit einer Resonanzfrequenz übereinstimmt, so wird diese Teilfrequenz kräftig bevorzugt. Entfernt sich aber die Teilfrequenz von der Resonanzfrequenz, so wird die Resonanzwirkung um so schneller abnehmen, je kleiner die Dämpfung ist.

Umgekehrt ist bei großer Dämpfung die Übereinstimmung mit der Resonanzfrequenz viel weniger kritisch, um eine Resonanzwirkung zu erhalten. Ferner zeigt die Theorie der erzwungenen Schwingungen, daß die Ausgleichsvorgänge um so schneller ablaufen, je größer die Dämpfung ist.

In diesen Tatsachen liegt die vollständige Erklärung des geschilderten verschiedenen Verhaltens bei Vokalen und Instrumentalklängen: Bei der schwachen Dämpfung der Instrumentkörper, etwa bei Streichinstrumenten, werden durchaus nicht alle diese Resonanzen durch die Teilschwingungen der Saite angeregt. Bei manchen Klängen werden bestimmte Resonanzen erscheinen, bei anderen wieder nicht. Von ausgesprochenen Formanten kann also hier keine Rede sein. Andererseits hat die kleine Dämpfung ausgeprägte Einschwingvorgänge von nicht unbeträchtlicher Dauer zur Folge. Beim Stimmorgan dagegen sind die auf einen bestimmten Vokal eingestellten Resonanzhöhlungen, die ja von sehr weichen, schleimhautartigen Wänden abgegrenzt werden, gerade hierdurch stark gedämpft; jede Resonanz, die vorhanden ist, wird daher wegen der Breite ihres Bereiches von mindestens einer, u. U. sogar von mehreren Teilschwingungen des Schwingungserzeugers erregt, und das betreffende Frequenzgebiet ist bei jedem Klange deutlich bevorzugt. Andererseits ist die Dämpfung so groß, daß sie die Einschwingvorgänge so weitgehend verkürzt, daß sie als solche kaum erkennbar sind.

Das Gebiet der Musikinstrumente, das ich hier schon gestreift habe, gehört ja eigentlich nicht in den Bereich der Physiologie, weil es sich hier um rein physikalische Vorgänge an nichtorganischen Körpern handelt. Es ist aber dennoch stark von Physiologen bearbeitet worden, und in diesen Fragen haben Physiker und Physiologen in harmonischer Weise zusammengearbeitet und sich sehr glücklich ergänzt. Ich will mich bei dem Bericht hierüber auch auf ein Beispiel beschränken: auf die Streichinstrumente und zwar besonders die Geige.

Die Geige ist ein besonders interessantes Instrument. Sie hat ihre merkwürdige barocke Form seit 300 Jahren nicht geändert. Alle Versuche zu einer Weiterentwicklung und anderer Formgebung, an denen es im Laufe der Zeiten nicht gefehlt hat, sind gescheitert. Es besteht vielmehr in weiten Kreisen die Überzeugung, daß vor etwa drei Jahrhunderten der Geigenbau in den Werkstätten einiger besonders hervorragender Meister, Amati, Stradivari, Guarneri, um nur die Bedeutendsten zu nennen, einen Höhepunkt erreicht hat, über den er nicht mehr hinweggekommen ist, den er sogar nie wieder erreicht hat. Wir besitzen heute noch einige hundert Instrumente aus dieser Zeit, von denen viele unleugbar hervorragende Klangeigenschaften haben. Als Modellaune kann man daher diese alte Überzeugung nicht ohne weiteres abtun, wenn auch die modernen Geigenbauer vielfach

behaupten, daß ihre Erzeugnisse von der gleichen Güte sind wie die klassischen Instrumente. Die Frage, ob die alten Instrumente wirklich Eigenschaften haben, die sie vor allen anderen Instrumenten auszeichnen, und welche Eigenschaften das dann sind, ist also ein echtes Problem, dessen Erforschung die dazu aufgewendete Mühe lohnt.

Man ist längere Zeit hier den Weg gegangen, daß man für den Aufbau der Instrumente gewisse Bestimmungen gab, die mehr oder weniger plausibel schienen. Zu einer objektiven Prüfung der Ergebnisse konnten aber erst die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte die geeigneten Mittel liefern. Ein Gedankengang, der sehr häufig vertreten wurde, ist der, daß man die einzelnen Teile der Geige vor dem Zusammenbau sorgfältig akustisch aufeinander abstimmt. Soweit damit bezweckt wird, die richtige Masse und Formgebung bei dem sehr diffizilen anisotropen und inhomogenen Holzmaterial zu erreichen, ist dagegen nichts einzuwenden. Aber für einen besonders harmonischen Klang des Instruments kann man davon nichts erwarten, wie sich sehr einfach aus der bekannten Tatsache ergibt, daß die mühsam erzielte Abstimmung der Einzelteile beim Zusammenbau wieder völlig verloren geht.

Die genauen Untersuchungen des Klanges und der Wirkungsweise des Instruments haben nun einige interessante Teilresultate ergeben. Zunächst zeigt sich, daß bei den tiefsten Klängen der Grundton praktisch fehlt, obgleich man ihn deutlich zu hören glaubt. Der Grund für dieses Fehlen liegt nicht in der Körperschwingung, die ihrerseits den Grundton durchaus noch enthält. Nur ist das Instrument, kurz gesagt, zu klein, um Schwingungen von so großer Wellenlänge noch merklich abstrahlen zu können. Dasselbe zeigt sich auch bei anderen Streichinstrumenten sogar in noch stärkerem Maße. Auch die bekannte Tatsache, daß ein großer Konzertflügel einen sehr viel kräftigeren Klang im Baß hat als ein Klavier mit seinem erheblich kleineren Resonanzboden, erklärt sich in der gleichen Weise. Solche Beobachtungen führten dann dazu, die Schwingungsformen des Klangkörpers von Geigen zu untersuchen. Auch hier ergaben sich einige überraschende Beobachtungen. Im allgemeinen ist es so, daß solche schwingenden Platten sich unterteilen in Bereiche, die in sich in gleicher Phase schwingen und von den benachbarten Bereichen, die in entgegengesetzter Phase sich bewegen, durch sogenannte Knotenlinien getrennt werden. Für die Abstrahlung ist natürlich eine Schwingungsform um so günstiger, je weniger Knotenlinien sie aufweist. Bei Platten mit einfacher Anregung ist es nun so, daß die Unterteilung und damit die Zahl der Knotenlinien mit der Frequenz anwächst. Bei der Geige ist abweichend davon gefunden worden, daß bei einigen besonders guten Instrumenten die Zahl der Knotenlinien zunächst mit wachsender Frequenz abnimmt, bis bei etwa 600 Hz, also einem musikalisch

besonders bedeutsamen Frequenzbereich, der Körper näherungsweise ohne jede Unterteilung, also als sogenannter Strahler nullter Ordnung schwingt. Es kann kein Zweifel sein, daß diese Tatsache für das klangliche Verhalten des Instruments von größter Bedeutung sein muß.

Bei der Untersuchung der stationären Klänge ist es nach dem früher Gesagten verständlich, daß man als Charakteristikum eines bestimmten Instrumentes nicht bestimmte Frequenzen oder Frequenzbereiche wird feststellen können, da ja ausgesprochene Formanten hier nicht existieren. Es ist aber doch durch Auswertung einer größeren Zahl von Aufnahmen gelungen, als statistisches Ergebnis festzustellen, daß besonders gute und wertvolle Geigen im Mittel erhebliche Klanganteile im Gebiet um 3000 Hz herum besitzen. Das ist das Gebiet des hohen Formanten des Vokals i, und diese Tatsache erklärt vielleicht die alten Bezeichnungen des Instruments: Fidel, Gigue. Mißlich war bei diesen ersten Untersuchungen, daß es zunächst nicht möglich war, wohldefinierte und reproduzierbare Anregungsbedingungen zu schaffen, auf die man die ganzen Ergebnisse beziehen konnte. Man hat zuerst mit mechanischen Anstreichvorrichtungen gearbeitet, die dann sofort auch eine besondere Abgreifvorrichtung für die Seite erforderten. Störend blieb aber immer, daß man beim Anstrich Klänge erhielt, die zuerst noch analysiert werden mußten. Das Problem wurde erst gelöst, als es gelang, den Steg des Instruments elektromagnetisch, und zwar sinusförmig, anzuzupfen, wobei dann natürlich die Saiten in geeigneter Weise abgedämpft werden mußten. Auf diese Weise konnte man nun Resonanzkurven oder Frequenzkurven aufnehmen, die etwa den entstehenden Schalldruck in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz bei konstanter Kraftamplitude wiedergeben. Diese Kurven boten nun abermals eine Überraschung dadurch, daß sie außerordentlich kompliziert waren, und daß von irgendeiner Ausgeglichenheit des Instruments auch bei den besten Geigen keine Rede sein konnte. Es treten hierbei etwa 170 Maxima auf, und die größten Amplituden des Schalldrucks verhalten sich zu den kleinsten etwa wie 10 zu 1. Diese Kurven geben wegen ihrer außerordentlich komplizierten Form zunächst kein Ergebnis. Der richtige Weg ist nun wohl der, daß man die einzelnen Resonanzen untersucht und feststellt, wodurch sie zustandekommen und durch welche Aufbaumaßnahmen am Instrument sie beeinflußt werden können. Diese recht schwierige Aufgabe ist aber bisher nur bei den tiefsten Resonanzen in Angriff genommen worden.

In dieser Verlegenheit ist man nun an mehreren Stellen auf einen sehr merkwürdigen Ausweg verfallen: man hat die Frequenzkurven dadurch künstlich vereinfacht, daß man innerhalb gewisser Frequenzbereiche über die Kurvenamplitude mittelte. Hierdurch hat man den Fortschritt und den Aufwand, der innerhalb 20 Jahren zu den jetzigen

Frequenzkurven führte, wieder rückgängig gemacht. Ja, man ist sogar noch weiter zurückgegangen, denn manche Feinheiten, die man mit dem alten mehr statistischen Verfahren noch bemerken und berücksichtigen konnte, werden durch schematische Mittelbildung verschwinden. Es ist aber noch ein weiteres Bedenken gegen dieses Verfahren zu erheben, und hier ist zu bedauern, daß dabei offenbar die Mitwirkung eines Physiologen gefehlt hat. Dieser hätte sicher darauf hingewiesen, daß eine Mittelbildung über gewisse Frequenzbereiche gerade das Gegenteil von dem ist, was das menschliche Gehörorgan leistet, das vielmehr die verschiedenen Frequenzen sehr weitgehend voneinander trennt. Bei einem Verfahren aber, das objektive Merkmale für Klangeigenschaften liefern soll, darf man keine Maßnahmen ergreifen, die dem Verhalten des menschlichen Gehörorgans nicht voll entsprechen. Das Ergebnis dieser Mittelbildung ist dann auch trotz umfangreicher Untersuchungen an einer sehr großen Zahl von Instrumenten verschiedenster Güteeigenschaften recht entmutigend gewesen: man hat so gut wie gar keine objektiven Gütemerkmale gefunden. Das braucht aber von weiteren Forschungen auf diesem Gebiet nicht abzuschrecken. Man muß es nur vermeiden, an die Natur falsche Fragen zu stellen, wie das hier offenbar geschehen ist. Die Natur hat dann mit einer Antwort gedient, die ebenso sinnlos ist wie die Fragestellung.

Es ist bisher immer nur von Schallerzeugern und Schallsendern die Rede gewesen, von der menschlichen Stimme nämlich und Musikinstrumenten. Es soll nun zum Schluß noch etwas über einen akustischen Empfänger gesagt werden, der auch für die Physiologie von großem Interesse ist: von dem menschlichen Gehörorgan. Dieser Empfänger hat eine Reihe von hervorragenden Eigenschaften, die für die Technik oft ein Muster gewesen sind. Ich will hier nur einige der wichtigsten und interessantesten Tatsachen erwähnen und zuerst kurz die Wirkungsweise des Gehörorgans schildern. Der Schall fällt durch den äußeren Gehörgang auf das Trommelfell auf, das seinerseits mit der Kette der Gehörknöchelchen in Verbindung steht. Diese Knöchelchen übertragen dann die Luftschwingungen in das Innenohr, das mit einer Flüssigkeit gefüllt ist. Normalerweise ist der Übergang von Luftschall in Wasser sehr ungünstig: es wird nur sehr wenig Energie in das Wasser übertragen. Die Gehörknöchelkette dient nun dazu, eine günstige Transformation von Luftschall in Flüssigkeitsschwingungen herzustellen. Das gelingt so gut, daß bei den mittleren Frequenzen um etwa 800 Hz die auffallende Schallenergie restlos vom Ohr absorbiert wird. Hier hat das Ohr seine größte Empfindlichkeit. Sie ist so groß, wie sie nur irgend sein kann, ohne daß andere Störungen bemerkbar werden. Wenn die Empfindlichkeit nämlich noch größer wäre, so würde man das uns stets umgebende molekulare Rau-

schen akustisch wahrnehmen können. Außerdem hat das Ohr wie jeder menschliche Sinn einen sogenannten Schwellwert, unterhalb dessen überhaupt nichts wahrgenommen wird.

Das Innenohr enthält die Schnecke, die sich in zwei parallelen flüssigkeitsgefüllten Gängen windet. Die Gänge sind, abgesehen von einer kleinen Verbindungsöffnung, durch eine häutige Membran, die Basilarmembran, getrennt, in der die einzelnen Fasern des Hörnerven enden. Helmholtz hatte angenommen, daß diese Basilarmembran aus einzelnen Fasern besteht, die auf die verschiedenen unterscheidbaren Töne, etwa 3000—4000 an der Zahl, abgestimmt sind. Es würde dann also eine bestimmte Stelle der Basilarmembran für irgendeine Tonhöhe maßgebend sein. Diese sogenannte „Einortstheorie“ hat sich gegenüber anderen Auffassungen bewährt, wenn auch die Vorgänge wesentlich komplizierter sind als Helmholtz sie angenommen hatte. Es ist auch kaum vorstellbar, daß so kurze Fasern, wie sie in der Schnecke nur Platz haben, auf so tiefe Töne abgestimmt sein können, wie wir sie wirklich wahrnehmen. Auch andere Erwägungen, die von den sehr kurzen Einschwingvorgängen des Gehörorgans ausgehen, haben dazu geführt, diese Probleme näher zu untersuchen. Die neueren Erkenntnisse in dieser Frage beruhen hauptsächlich auf den Arbeiten des ungarischen Forschers Bekessy, der umfangreiche Messungen an Modellen und anatomischen Präparaten gemacht hat. Hiernach bleibt die Einortstheorie gültig, nur bewegt sich in der Tat die gesamte Basilarmembran so, daß das Maximum dieser Bewegung je nach der Tonhöhe an einer verschiedenen Stelle liegt. Außerdem scheinen an dieser Stelle in der Flüssigkeit Wirbel zu entstehen, die auf die Basilarmembran von beiden Seiten einen Druck ausüben und damit die betreffende Faser des Hörnervs erregen.

Daß das Frequenzunterscheidungsvermögen des Ohres sehr groß ist, wird aus diesem Aufbau des Organs verständlich. In der Tat hört man Tonhöheveränderungen sehr viel stärker als Änderungen der Lautstärke. Denn es gilt für das Gehörorgan, ebenso wie für alle Sinne, das allgemeine Weber-Fechner'sche physiologische Grundgesetz, wonach die Empfindungsstärke nicht proportional der Reizstärke ist, sondern nur logarithmisch von der Reizstärke abhängt. Die Verdopplung eines Reizes würde hiernach nur eine gerade eben merkbare Vermehrung der Empfindungsstärke bedeuten.

Schließlich seien noch zwei weitere Befähigungen des Gehörorgans erwähnt. Die erste ist die Richtungsempfindlichkeit. Wenn eine Schallwelle das Ohr trifft, so ist man meist in der Lage, die Richtung, aus der der Schall kommt, bis auf einige Winkelgrade genau anzugeben. Bei hohen Frequenzen ist das leicht zu verstehen; denn hier wird bei einem schräg auftreffenden Schallvorgang das eine Ohr im Schallschatten des Kopfes liegen, da diese kurzen Wellen nicht hinreichend

stark um den Kopf herumgebeugt werden. Beide Ohren werden daher einen Intensitätsunterschied empfinden, der zur Richtungsbestimmung benutzt wird. Bei tiefen Frequenzen ist diese Erklärung nicht mehr möglich, weil hier die Beugung um den Kopf herum sehr erheblich ist und die Intensitätsunterschiede zu klein werden würden, um einen Richtungseindruck zu vermitteln. Hier spielt dann, wie eingehende Untersuchungen gezeigt haben, die Zeitdifferenz des Eintreffens des Schallvorgangs an den beiden Ohren eine Rolle. Es ist hierbei beachtlich, daß schon eine Zeitdifferenz von etwa  $\frac{1}{10000}$  Sekunde einer deutlichen Richtungsabweichung entspricht.

Neuerdings hat man auch durch sorgfältige Messungen die Tatsache erklären können, daß das Ohr eine Entfernungsempfindung besitzt, daß es also imstande ist, Schallquellen im Raum zu lokalisieren. Es zeigt sich allerdings, daß dies bei Dauertönen und Klängen nur in sehr unvollkommener Weise gelingt; hauptsächlich kommen hier Ausgleichsvorgänge in Betracht. Die Erklärung liegt darin, daß das Ohr, wie auch aus anderen Untersuchungen bekannt ist, kein reiner Druckempfänger ist, wie man längere Zeit angenommen hatte, sondern zu einem nicht unbeträchtlichen Teil auch Geschwindigkeitsempfänger. Bei stationären Schwingungen sind nun Druck und Geschwindigkeit nur in ihrer Phasenlage verschiedene Sinusschwingungen. Bei nichtstationären Vorgängen dagegen werden Druck und Geschwindigkeit durch ganz verschiedene Funktionen dargestellt, wobei die Stärke des geschwindigkeitsgesteuerten Anteils von der Entfernung abhängt. Die Entfernungsempfindung wird dann durch abstandsabhängige Klangfarbenunterschiede vermittelt. Es wird vielleicht möglich sein, durch diesen Entfernungseffekt einige bisher unerklärte Vorgänge besser zu verstehen. In jüngster Zeit ist der Versuch unternommen worden, die bekannte gute Tragfähigkeit alter italienischer Geigen, die sonst schwer verständlich war, durch den Entfernungseffekt zu erklären. Hierüber ist allerdings das letzte Wort noch nicht gesprochen.

Ich bin damit am Schluß meiner Ausführungen zu dem genannten Thema gelangt und möchte mir nun noch erlauben, einige allgemeine Bemerkungen anzuschließen.

Wenn man ein solches wissenschaftliches Arbeitsgebiet in der Weise nachträglich überblickt, daß man, wie ich das hier versucht habe, die Ergebnisse zusammenstellt, die eine große Zahl von Forschern in aller Welt während mehrerer Jahrzehnte erhalten haben, so kann man post festum wohl erkennen, welcher praktische Nutzen sich dabei ergeben hat. In unserem Fall ist es ohne jede weitere Erläuterung verständlich, daß die Fernmeldetechnik und insbesondere die Rundfunktechnik durch diese Forschungen in sehr wirksamer Weise gefördert und bereichert worden ist. Der einzelne Forscher, der durch seine Arbeit ein Steinchen zu diesem Mosaik beigetragen hat, wird aller-

dings diesen Zusammenhang vorher weniger leicht übersehen können. Sogar diejenigen Forscher, die durch ihre Arbeiten die Grundsteine für ganze große Gebiete gelegt haben, sind oft nicht in der Lage gewesen die Konsequenzen ihrer eigenen Forschungsergebnisse zu übersehen. Als Heinrich Hertz hier in Karlsruhe seine grundlegenden Versuche machte, fand er bei einigen wenigen Kennern, vor allem bei seinem Lehrer Helmholtz, viel Lob und Anerkennung. Aber die Zahl derer, die überhaupt verstanden, um was es sich bei diesen Arbeiten handelte, war sehr klein. Und wohl keiner der damaligen Zeitgenossen, auch nicht Hertz selber, hat damals ahnen können, daß diese Arbeiten nicht nur die Grundlagen für eine neue Technik legen würden, sondern geradezu ein neues technisches Zeitalter heraufführen würden. Ein anderes Beispiel dafür liefert die Bestimmung des Wirkungsquantums durch Max Planck. Planck war von den Konsequenzen seiner Entdeckung aus rein theoretischen Erwägungen und ohne jede Beziehung auf irgendwelche Anwendungen zunächst wohl eher entsetzt als begeistert, und er hat sich ja lange bemüht, die tiefe Kluft, die sich dadurch gegenüber der bisherigen klassischen Theorie auftat, auszufüllen. Planck ist es dann noch beschieden gewesen, die Entwicklung des Atomzeitalters, für das er den Grund gelegt hatte, selbst zu erleben.

Beide Beispiele zeigen aber deutlich, daß der Antrieb zur forscherschen Tätigkeit keineswegs in irgendwelchen technischen Anwendungen, sondern ausschließlich in einem reinen Erkenntnisdrang des Forschers liegt. Wenn nun andererseits vielfach die Neigung besteht, die Forschung zu steuern, so sollte dabei so vorsichtig verfahren werden, daß der so sehr fruchtbare reine Erkenntnistrieb nicht verkümmert wird. Wir haben zwei große Zeitabschnitte reiner Zweckforschung hinter uns: die beiden Weltkriege. Das Ergebnis der ersten Periode war das Bombenflugzeug, das der zweiten die Atombombe. Während es aber verhältnismäßig leicht gelang, vom Bombenflugzeug zum friedlichen Verkehrsflugzeug zu gelangen, scheint es, als ob von der Atombombe zu der energetischen Ausnutzung von Atomkernreaktionen für wirtschaftliche Zwecke noch ein weiter Weg zu gehen sein wird.

Die Stellen, an denen eine freie Forschung betrieben werden kann, sind in erster Linie die Universitäts- und Hochschulinstitute. In Industrielaboratorien, die ja jetzt erfreulicherweise wieder entstehen, wird man eher geneigt sein, eine gewisse Steuerung der Forschung stattfinden zu lassen, wenn auch der erste industrielle Gründer eines solchen Forschungslaboratoriums, der 1919 verstorbene Leiter des Siemens-Konzerns, Wilhelm v. Siemens, für sein Laboratorium eine weitgehende Freiheit der Forschung und der Aufgabenstellung vorgesehen hatte. An den Hochschulen bestehen jetzt noch andere Hemmungen,

die vor allem in unzureichender Einrichtung und Mangel an Hilfspersonal liegen. Es muß dankbar anerkannt werden, daß die Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft hier in großzügiger Weise hilft. Aber auch hier bestehen manchmal Hinderungen durch eine zu starke Zweckgebundenheit der bewilligten Mittel. Die beste Hilfe können hier die Länderregierungen leisten. Nur müßte sich bei den Regierungen und Landtagen die Überzeugung noch stärker festsetzen, daß die für die Förderung der Wissenschaft ausgesetzten Mittel sich auf die Dauer reichlich lohnen, auch wenn das zunächst gar nicht ohne weiteres zu erkennen ist. Wenn wirklich das Wort gilt: „Die Forschung von heute ist die Technik von morgen“ — und wir haben keinen Grund, die Richtigkeit dieses Ausspruchs in Zweifel zu ziehen — so muß die Anwendung der Methoden bürgerlicher Sparsamkeit, wie sie für die normalen Behörden in Notzeiten angebracht sein mögen, in ihrer Anwendung auf die Stätten freier Forschung zu sehr gefährlichen Rückschlägen führen, die sich in späterer Zeit für unsere Wirtschaft in höchst peinlicher Weise auswirken würden. Das Gefährlichste daran ist, daß die Entwicklung hier nur sehr langsam geht, so daß Fehler, die hier durch falsche Sparsamkeit gemacht worden sind, erst sehr viel später in ihrer unheilvollen Wirkung erkannt werden. Jedenfalls kann es keinem Zweifel unterliegen, daß das Zurückbleiben unserer Technik auf manchen Gebieten gegenüber dem Ausland auf die wissenschaftsfeindliche Einstellung unserer Regierung in den Jahren zwischen 1933 und dem Beginn des 2. Weltkrieges zurückzuführen ist.

### **Feierliche Immatrikulation der neueingetretenen Studierenden**

Sie stehen hier als die Repräsentanten von 465 Kommilitonen, die das akademische Bürgerrecht an unserer Hochschule erwerben wollen. Ich begrüße Sie herzlich im Namen der Hochschule und wünsche Ihnen ein erfolgreiches Studium. Es ist dazu nötig, daß Sie sich mit Freude, Begeisterung und Hingebung dem von Ihnen gewählten Fache widmen.

Ein großer Teil der neu zu immatrikulierenden Studenten kommt heute wieder aus den engen Verhältnissen der höheren Schule, eng insofern, als Ihrer eigenen Freiheit in materieller und fachlicher Hinsicht mancherlei Grenzen gesteckt waren. An der Hochschule sollen Sie nun dagegen eine weitgehende akademische Freiheit genießen. Wenn Ihnen eine solche Freiheit auch nicht in völlig schrankenlosem Ausmaß gewährt werden kann, so liegt das an gewissen Gegebenheiten, die nun einmal mit der Einordnung in eine große Gemeinschaft notwendig verbunden sind. Der absoluten Lernfreiheit sind durch die Studienpläne gewisse Grenzen gezogen. Wenn diese Pläne

auch nicht als spanische Stiefel gemeint sind, in die Sie von Anfang an eingeschnallt werden sollen, so wird Ihnen doch geraten, hiernach zu verfahren, weil Sie auf diese Weise am schnellsten und glattesten zu dem von Ihnen gewünschten Studienabschluß kommen können. Wir sind uns darüber im klaren, wie wenig wünschenswert eine Bindung an starre Studienpläne ist und sind auch dauernd bemüht, diese Bindung möglichst weitgehend aufzulockern. Aber bei einem technischen Studium liegen die Dinge nun doch einmal so, daß es ohne einen solchen Anhalt nicht geht. Im allgemeinen aber achten wir Ihre akademische Freiheit durchaus, denn wir sehen gerade darin, daß jeder sich seinen Weg nach freier Wahl suchen muß, ein außerordentlich wertvolles Erziehungsmittel für den verantwortlich handelnden Menschen. Wer in der Jugend angehalten worden ist, sein eigenes Schicksal verantwortlich zu lenken, wird auch später sich vor Verantwortung nicht scheuen und ihr nicht grundsätzlich aus dem Wege gehen.

Auf eine Möglichkeit Ihres Studiums möchte ich Sie bei dieser Gelegenheit besonders aufmerksam machen: auf das sogenannte studium generale. Es ist deutlich zu erkennen, daß der Techniker, und vielleicht gerade er in besonders starkem Maße, der Gefahr unterliegt, die Dinge seiner Umwelt in rein materialistischer Weise zu sehen. Eine Zeitlang hat man ja geglaubt, daß man alle Erscheinungen in dieser Weise verstehen und erklären könne. Zwar weiß unsere heutige Naturwissenschaft, daß das ein Irrtum war, aber der Techniker kann auch heute noch leicht in Versuchung kommen, an den tieferen naturwissenschaftlichen Erkenntnissen, die ihn bis an die Grenze der Philosophie führen, vorbeizugehen. Unser Rat an Sie geht nun dahin, daß Sie bei Ihren rein technischen Studien solche Dinge nicht vernachlässigen möchten, die zwar nicht zu Ihrem eigentlichen Fachgebiet gehören, die Ihnen aber eine weitere Überschau, auch über andere berechnete menschliche Interessengebiete gewähren. In der Auswahl dieser Fächer soll Ihnen weitgehende Freiheit gewährt werden, auch soll Ihnen die Qual, die in Prüfungen liegt, auf diesem Gebiet möglichst erleichtert werden. Es wird aber entscheidender Wert darauf gelegt, daß das Studium solcher allgemeinbildender Fächer Sie während Ihrer ganzen Hochschulzeit begleitet. Wir hoffen damit der Gefahr einer zu starken technischen Ausschließlichkeit, die man dann vielleicht auch als technischen Hochmut bezeichnen kann, vorzubeugen. Bei einem richtig durchgeführten studium generale muß es schließlich dahin kommen, daß Sie das Gefühl haben, hiermit Ihrem Bedürfnis nach Entspannung nachzukommen und daß Sie an solchen Vorlesungen eine aufrichtige Freude empfinden.

Überhaupt soll Ihnen die Lebensfreude während Ihres Studiums nicht verkümmert werden. Sie werden die Möglichkeit haben, mit

gleichgesinnten Kommilitonen zusammenzuleben und sich zu befreunden, auch studentischen Korporationen beizutreten.

Und wenn es auch heute nicht als wünschenswert erscheint, daß alle alten Formen des studentischen Lebens so wiederaufstehen, wie sie früher einmal waren, so soll Ihnen auch auf diesem Gebiet nicht in grämlicher doktrinärer Weise entgegengetreten werden. Wir bitten Sie vielmehr, zu Ihren akademischen Lehrern, die ja alle selbst einmal Studenten gewesen sind und sich dieser Jugendzeit mit Freude erinnern, das Vertrauen zu haben, daß sie nicht den Wunsch haben, Ihre berechnete akademische Freiheit in irgendeiner Weise anzutasten oder gar zu verkümmern.

Ich bitte Sie, die rechte Hand zu erheben und mir die folgenden Worte nachzusprechen:

Ich verpflichte mich,  
die Verfassung getreulich zu achten,  
Frieden zu wahren und die Ordnung zu schützen,  
allezeit mein Wissen nach besten Kräften zu mehren,  
dem Geist der Wissenschaft zu huldigen  
— im Dienste der Wahrheit, zum Wohle der Menschheit —  
und damit auch meinem Vaterlande  
am besten zu dienen.

Ich begrüße Sie herzlich als unsere neuen akademischen Bürger und begrüße in Ihnen alle in diesem Semester neu aufgenommenen Studierenden.