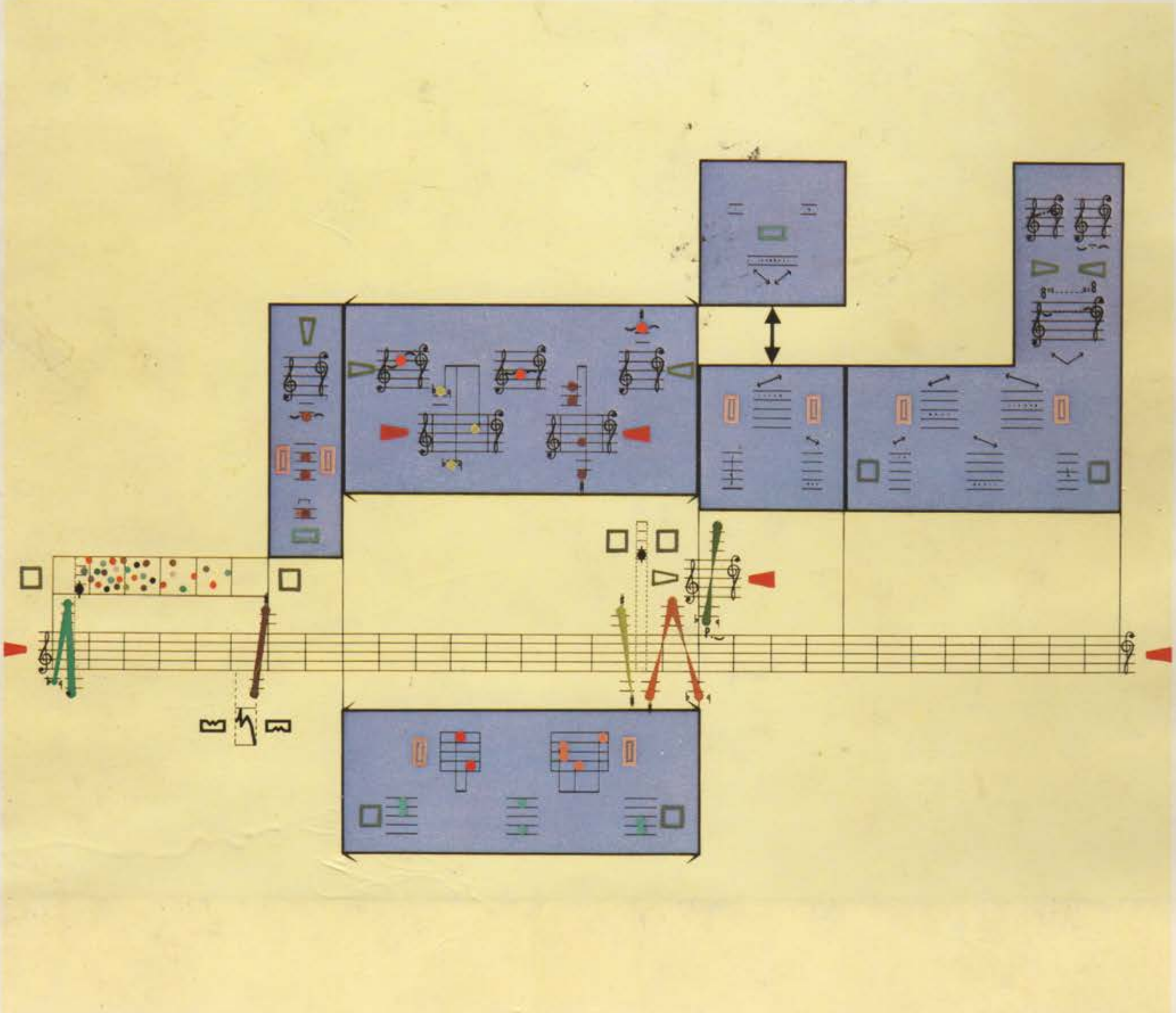
KLANG

Musik mit den Ohren der Physik

John R. Pierce



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Musik entfaltet sich im Klang, der – mit den „Ohren der Physik“ gehört – zur wissenschaftlichen Entdeckungsreise in die Welt der Psychoakustik inspiriert. John R. Pierce lädt den Leser in diesem Buch ein, Töne und Harmonie in ihrer physikalischen Wellennatur kennenzulernen und zu untersuchen, wie sie zustande kommen und warum wir sie überhaupt wahrnehmen und unterscheiden können.

Die akustischen Grundlagen der Harmonie, die schon für die alten Griechen gleichermaßen Ausdruck von Wohlklang und mathematisch erkennbarem Ebenmaß waren, verdeutlicht Pierce an historischen Arbeiten. So kannte bereits Galileo Galilei den Zusammenhang zwischen Tonhöhe und Frequenz, und Hermann von Helmholtz beschrieb Harmonie anhand der Frequenzverhältnisse für die verschiedenen Tonintervalle. Zwischen dem Ideal der Griechen und den gewöhnlichen Tonleitern klafft freilich eine Lücke; darum setzt Bachs Wohltemperiertes Klavier eine raffinierte Stimmung des Instruments voraus.

Um Tonleitern oder neue Harmonien zu testen, bietet sich der Computer an. Ohne den Ballast elektronischer oder mathematischer Details beschreibt Pierce, wie dieses Werkzeug zur Klanganalyse genutzt werden kann, und verdeutlicht die Zusammenhänge durch zahlreiche Illustrationen. Über derartige Analysen hinaus ist der Computer längst selbst zum Musikinstrument geworden, das alle traditionellen Instrumente in sich vereinigen kann, aber auch vollkommen neue Klänge ermöglicht, wie wir sie etwa aus Science-fiction-Filmen kennen. So ist das Buch von Pierce, der das Entstehen der ersten Musikprogramme für Computer und der ersten Synthesizer bei den Bell-Laboratorien miterlebt hat, auch ein Bericht über die Anfänge der Computermusik.

KLANG

Musik mit den Ohren der Physik

John R. Pierce

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Inhalt

Vorwort

Anhang

Vorwort

Dieses Buch ist in gewisser Hinsicht ein „Kind“ der Marconi International Fellowships. Es begann 1979, als ich in den Genuß dieser Förderung kam. Damals ging es zwar noch um meine Arbeiten über Satellitenkommunikation, aber es wurde der Beginn einer weiteren Zusammenarbeit. Ich lernte die Gründerin dieses Förderfonds, Gioia Marconi Braga, und ihren Mann, George Braga, kennen. Es schlossen sich ereignisreiche Treffen in Rom und Sydney an. Ja, und dann ermutigten mich Mrs. Braga und mein alter Freund Dr. Walter Orr Roberts, der im Fellowship Council mitarbeitet, dieses Buch zu schreiben. Schließlich konnte ich von Arbeiten profitieren, die ebenfalls gefördert wurden. Insbesondere betrifft das Beiträge von Professor Jean-Claude Risset und Dr. Elizabeth Cohen, die mir Klangbeispiele für dieses Buch zur Verfügung stellten. Daß es schließlich in der Buchreihe des *Scientific American* seinen Platz fand, geht auf das Engagement und die Begeisterung zurück, mit der sich Gerard Piel dafür einsetzte.

Der Gedanke, ein Buch über musikalische Akustik zu schreiben, hatte mich schon lange gereizt. Als vor etwa 30 Jahren an den Bell-Laboratorien in meiner Abteilung mit der Erforschung von Sprache und Hören begonnen wurde, empfand ich dafür so etwas wie Liebe auf den ersten Blick. Ich wußte damals kaum etwas von der faszinierenden Welt der Töne, und Edward E. David jr., der sich hauptsächlich mit der Aufgabe beschäftigen sollte, war nicht besser daran.

Wir entschlossen uns zu lernen und gingen bald völlig in unserem neuen Arbeitsgebiet auf. Als Teil unseres Lernprozesses entstand *Man's World Sound*, dessen Kapitel wir abwechselnd schrieben. Dabei arbeiteten wir uns immer weiter in die Forschung vor. Wir traten in die Acoustical Society of America ein, wurden Vollmitglieder, nahmen an Tagungen teil, hielten Vorträge und veröffentlichten unsere Ergebnisse.

Es waren glückliche Jahre, die uns prägten, aber seitdem ist die Zeit nicht stillgestanden. Ed David wurde Wissenschaftsberater des Präsidenten der Vereinigten Staaten und schließlich Direktor der Exxon Research and Development Corporation. Ich selbst beschäftigte mich einige Jahre lang mit Satellitenkommunikation und gehörte zu jenen, die die NASA zum Projekt Echo überredeten, jenem Ballon-Satelliten, der 1960 in eine Umlaufbahn gebracht wurde. Von der Welt der Klänge war ich nach wie vor fasziniert, auch nachdem ich 1971 einen Lehrstuhl für Ingenieurwissenschaften am California Institute of Technology annahm. Zwei meiner Schüler promovierten dort mit Themen der Akustik.

Anfang der sechziger Jahre weckte mein Kollege Max V. Mathews ein ganz neues Interesse an Tönen und Klängen. Er hatte einen Weg gefunden, Computer zum Klingen zu bringen. Die ersten Töne wirkten zwar noch sehr elektronisch und undefinierbar, aber die Methode war im Prinzip richtig und hielt, was sie versprach. Damit wird längst anspruchsvolle Musik gemacht, und mit dem Computer erreicht man darüber hinaus ganz einzigartige Klänge. An vielen Universitäten und Musikhochschulen hat die Computermusik inzwischen Einzug gehalten. Ganz vorn steht hier das Institut von Pierre Boulez am Centre Pompidou (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique, abgekürzt IRCAM). Im Frühling 1979 experimentierten Max Mathews und ich dort mit Klängen aus nicht-harmonischen Partialtönen. Um was es dabei ging, soll in diesem Buch noch ausführlich besprochen werden – und ich hoffe, auch von der Begeisterung für die Experimente mit dem Musikinstrument Computer kommt etwas beim Leser an.

Hauptthema sind die mathematischen und physikalischen Eigenschaften von Schallwellen, die dem Hören zugrunde liegen und entscheidend bestimmen, wie Musik auf uns wirkt. Das ist im wesentlichen das Thema der Psychoakustik, eines Zweiges der experimentellen Psychologie. Psychoakustiker untersuchen Zusammenhänge zwischen meßbaren Eigenschaften von Klang und ihrer Wahrnehmung. So wird beispielsweise die Intensität bestimmt, bei der Klänge gerade noch hörbar sind, oder man mißt die kleinsten Intensitätsunterschiede, die eben noch zu merken sind, und die absolute Lautstärke (Lautheit) von Tönen.

Als Titel dieses Buches habe ich die Bezeichnung „Psychoakustik" verworfen, weil er mißverständlich sein könnte – *Klang* ist kein Psychologiebuch. Die wichtigsten Beiträge zur Psychoakustik wurden tatsächlich ja von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren geleistet, die keine diplomierten Psychologen waren.

Der erste und wohl berühmteste war Hermann von Helmholtz, der 1863 *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik* veröffentlichte. Er war damals Professor für Anatomie und Physiologie an der Universität Bonn und nahm später einen Lehrstuhl für Physik an der Universität in Berlin an. Wallace Clement Sabine, der zu Beginn dieses Jahrhunderts die Wissenschaft der Raumakustik begründete, war Professor für Mathematik und Naturphilosophie an der Harvard-Universität. Das zweikanalige Hören wurde zum ersten Mal systematisch von einem Physiker, dem späteren Nobelpreisträger Irving Langmuir, untersucht, der während des Ersten Weltkriegs an Systemen zur U-Boot-Ortung arbeitete. Vieles, was wir über die Funktion des Ohrs wissen, hat ein anderer Nobelpreisträger herausgefunden: George von Békésy, der zwischen 1923 und 1946 Direktor des Ungarischen Forschungslabors für Telefonanlagen war und sich später in Harvard intensiv mit der Psychoakustik beschäftigte. Die ersten genauen akustischen Messungen führten Harvey Fletcher und seine Mitarbeiter mit präzisen elektronischen Geräten durch. Fletcher, der Vorsitzender der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft war, betrachtete sich selbst immer als Physiker. Auch Jan Schouten, der die Residual- oder Periodizitäts-Tonhöhe entdeckte und beschrieb, war Physiker. Damit konnte er zum Beispiel erklären, daß wir Tonhöhen selbst dann richtig hören, wenn bei der Klangwiedergabe etwa eines winzigen Taschentransistorradios die tiefen Frequenzen wegfallen. Ed David und Max Mathews, mit denen ich an den Bell-Laboratorien zusammengearbeitet habe, sind immer Elektroingenieure geblieben; und das gilt auch für mich selbst.

Daß vor allem Naturwissenschaftler und Ingenieure so viel zu einem Zweig der experimentellen Psychologie beigetragen haben, liegt meines Erachtens an den verbesserten Experimentiermethoden der Physik und der Nachrichtentechnik. Neue Meßgeräte und unkonventionelle Methoden, ein Problem anzugehen, führen ja oft zu neuen Entdekkungen. Die Stimmgabeln und Hohlraumresonatoren, mit denen Helmholtz arbeitete, waren rein mechanische Geräte. Die elektronischen Apparate, mit denen Békésy und Fletcher experimentierten, besaßen noch Röhren und hatten deshalb auch ihre Grenzen. Heute verfügen wir über vielseitige und leistungsfähige Digitalrechner. Wenn also ein Elektroingenieur über die Psychoakustik von Klängen schreibt, ist das im Grunde gute Tradition. Und die Meßgeräte – Vakuumröhren, Transistoren und Computer – haben Ingenieure entwickelt.

Der Leser braucht deshalb aber nicht zu befürchten, daß wir uns in komplizierte technische Zusammenhänge verrennen. Hören ist Teil des vertrauten Alltags, egal, wie intensiv wir uns damit befassen. Klänge werden wir letztlich immer daran messen, wie wir sie hören. Ein guter Musiker wird in der Regel richtig beurteilen, was er hört, auch wenn er es nicht immer korrekt erklärt.

Es fällt Musikern zuweilen schwer, sich mitzuteilen, auch dann, wenn sie umwerfende Ideen entwickelt haben. Rameaus berühmtes Traktat über die Harmonie wurde einst für Jean-Jacques Rousseau zur Enttäuschung, als er sich selbst Harmonielehre und Komposition beibringen wollte. Rousseau fand das Werk „so langweilig, so wirr, so ungeordnet", daß er sich anderweitig nach Hilfe umsah. Rameaus revolutionäre Entdeckungen haben dann zwei Zeitgenossen viel verständlicher und schlüssiger dargestellt: der berühmte französische Mathematiker Jean Le Rond d'Alembert und Reverend Bertrand Castel.

In der Wissenschaft ist es nicht ungewöhnlich, daß die Nachfolger viele Dinge besser einordnen und erklären können als die eigentlichen Urheber. Darüber hinaus können Experimente und sorgfältiges Nachdenken den Sinn für altgewohnte Erscheinungen schärfen. Schon als David gekonnt seine Schleuder gegen Goliath schwang, nutzte er Bewegungsgesetze, die Galilei und Newton erst Jahrhunderte später aufstellten.

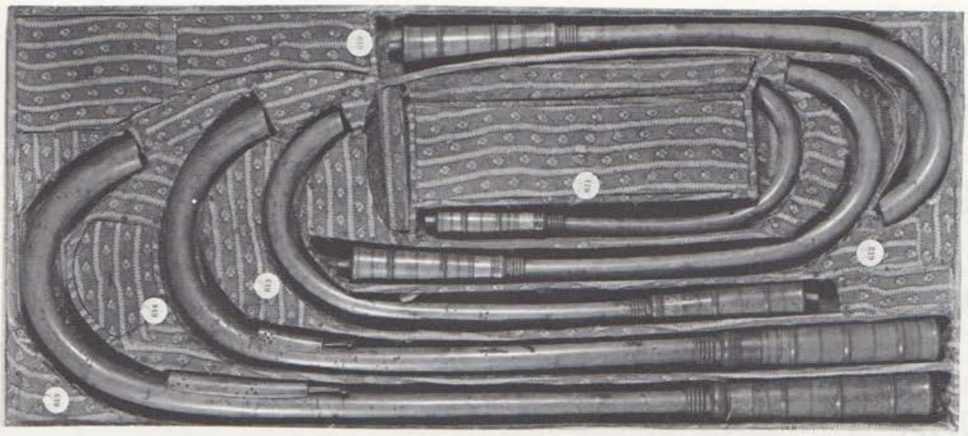
Im Experimentierfeld Klang und Musik sollen komplizierte Meßinstrumente und ausgeklügelte Experimente nie Selbstzweck sein. Sie bleiben Werkzeuge, um die Leistungen unseres Gehörs nachzuvollziehen: seine Schärfe, die Unterscheidung von Tonhöhen und Lautstärken und nicht zuletzt auch seine Grenzen. Schließlich wäre Musik nichts ohne unseren Gehörsinn – auch die elektronische nicht. Computermusik sollte sich nicht als Teil der Elektronik verstehen, sondern im Rahmen der Entwicklung von Musik, von den prähistorischen Trommeln über die antike Leier und die berühmten Instrumentenbauer wie Stradivari bis hin zu den heutigen, teilweise völlig neuen Klängen.

In diesem Buch geht es in erster Linie darum, wie wir Klänge und Töne hören. Dabei muß man natürlich auch über Elektronik, Physiologie und Neurophysiologie sowie die Physik der Schallwellen und ihre Entstehung sprechen. Aber wir werden uns hier immer auf das beschränken, was man unbedingt wissen muß, um das Gehörte zu verstehen oder zu bewerten. Und doch füllt dieses Wenige ein Buch.

Ich habe schon erwähnt, wieviel Jean-Claude Risset und Elizabeth Cohen zu diesem Buch beigetragen haben. John Chowning half mir, Klangbeispiele mit dem Computer zu erzeugen, die verschiedene psychoakustische Erscheinungen demonstrieren. Diana Deutsch und Max Mathews stellten mir zusätzliche Klangbeispiele zur Verfügung, und Max las zudem das Buchmanuskript sorgfältig. Mein Dank gilt darüber hinaus allen, die das Manuskript durchgesehen haben und mich mit ihren Vorschlägen und Anregungen unterstützten: Gerald Strang, Manfred Schroeder, Earl Schubert, Peter Renz von W. H. Freeman und Aidan Kelly, der das Manuskript einfühlsam redigiert hat. Zu danken habe ich schließlich Amy Malina für die Illustrationen, Linda Chaput von W. H. Freeman sowie Patricia Mittelstadt, Heather Wiley, Sarah Segal und Ellen Cash, die an der Herstellung des Buches mitgearbeitet haben. Katherine Sipfle Taylor vom Marconi International Fellowship war jahrelang mein brieflicher Ansprechpartner für das Buchprojekt. Debbie Devoe hat so manches Kapitel getippt. Zum Schluß möchte ich noch meiner Frau dafür danken, daß sie mich immer wieder ermutigt hat und unendliche Geduld mit mir aufbrachte.

John R.Pierce

Klang und Musik



Krummhörner.

Ein Horn mit mehreren Stimmbögen.

Ton und Klang in der Musik sind für die Akustik eigentlich nur deshalb interessant, weil Musik einfach fasziniert und die Klangqualität dort eine überaus wichtige Rolle spielt. Die Art, wie ein Instrument zum Klingen gebracht wird, bestimmt schließlich den Charakter der Musik. Kompositionen für das Hammerklavier unterscheiden sich von der Cembalomusik nicht nur dadurch, daß die einzelnen Töne auf beiden Instrumenten verschieden klingen. Liszt, Chopin und Debussy schöpfen in ihrer Klaviermusik die ganze Fülle der Gestaltungsmöglichkeiten dieses Instruments aus. Und das gleiche gilt für die Klaviersonaten und -konzerte von Mozart und Beethoven. Mozart hat freilich auf Instrumenten gespielt, die leiser waren als unsere heutigen und einen geringeren Dynamikumfang hatten. Moderne Werke kämen darauf nicht zur vollen Entfaltung.

Die Vokalmusik aus Mittelalter und Renaissance kannte noch keine großen Klangkontraste, und auf vielen der alten Blasinstrumente kann man fast nur in derselben Lautstärke spielen. Das gilt besonders für das Krummhorn, bei dessen quäkendem Ton sich die Lautstärke kaum variieren läßt. Das doppelte Rohrblatt steckt nämlich in einer Windkapsel, wo es der Spieler nicht mit den Lippen beeinflussen kann; bläst er fester in das Instrument hinein, um lauter zu spielen, dann schwankt die Tonhöhe ganz unerträglich. Auch bei den Blockflöten beobachten wir diesen Effekt, wenngleich Korrekturen der Tonhöhe hier in geringem Maße möglich sind. Der Dynamikumfang war da bei den alten Trompeten schon größer; sie hatten aber noch keine Ventile, und von ihren Naturtönen konnten einige nur sehr schwer angeblasen werden.

Während der letzten Jahrhunderte und ganz besonders im 19. Jahrhundert wurden Ton- und Dynamikumfang vieler Instrumente erweitert, so daß sich eine Fülle von Ausdrucksmöglichkeiten eröffnete. Bei den Holzblasinstrumenten führte man immer mehr Klappen ein; und eine ausgeklügelte Mechanik erleichterte es, in extremen Tonarten und Lagen zu spielen. Neue Spieltechniken (etwa auf der Violine) unterstützten diese Entwicklung.

Schließlich leisteten auch die Komponisten ihren Beitrag: Sie experimentierten mit Effekten, neuartigen Klangbildern und schufen neue Tonsysteme. Ob wir das alles nun als Fortschritt bezeichnen wollen oder nicht, es

Arnold Schönberg komponierte diese *Gigue* nach einer Zwölftonreihe, die er zuvor handschriftlich festgehalten hatte (oben).

hat die klangliche Vielfalt von Orchester- und Vokalmusik unüberhörbar verändert. Man braucht sich nur die Musik von Bach, Mozart, Wagner, Debussy oder gar Strawinsky in seinem *Frühlingsopfer* vorzustellen, um eine Entwicklung nachzuvollziehen. Diese Komponisten sind – jeder auf seine Weise – in neue musikalische Dimensionen vorgedrungen und auf vorher nicht gekannte Formprinzipien und Klangbilder gestoßen.

Im vorliegenden Buch soll auch einiges über Computer gesagt werden, mit denen man ja auch Musik machen – und analysieren – kann. In den ersten Tagen der Computermusik fühlten sich viele Komponisten angesichts der nahezu unbegrenzten klanglichen Möglichkeiten eines Computers regelrecht beflügelt und befreit. Der Kommentar eines „gestandenen" Musikers (ich glaube, es war Milton Babbitt) lautete aber: „Mir kommt das so vor, als hätte eine Horde Wilder ein Klavier bekommen. Man könnte ihm wunderbare Klänge entlocken, aber tun sie es denn?"

Selbst wenn man zugesteht, daß etwas musikalisch Brauchbares aus Computern herauszuholen wäre, warum sollte sich jemand damit herumplagen? Gibt es denn nicht genügend andere Herausforderungen? Mein Eindruck ist jedoch, daß wir in der Musik auf wirklich neue Anstöße angewiesen sind.

Einige Komponisten des ausgehenden 19. und im beginnenden 20. Jahrhundert sahen jedenfalls keinen Anlaß, in musikalisches Neuland vorzustoßen. Strawinsky orientierte sich nach *Frühlingsopfer* mehr und mehr an Vergangenem und wandte sich später der Zwölftonmusik zu. In Großbritannien ließen sich manche Komponisten von der Volksmusik inspirieren – mit eher gefälligen als innovativen Resultaten. Da ist Bartóks Rückgriff auf ungarische Volksweisen schon etwas ganz anderes. Schließlich haben einige auch Anleihen bei exotischer Musik fremder Kulturen gemacht, aber es ist schwer, etwas ins Gefühl zu bekommen, mit dem man nicht von klein auf vertraut ist. Und selbst wenn es gelingt, was ist damit erreicht?

Überkommene Klischees von Harmonie und Form hat Arnold Schönberg mit seiner Zwölftonmusik hinter sich gelassen, nachdem seine frühen Werke noch der spätromantischen Tradition nach Wagner verhaftet waren. Aber sind die Zwölftonreihe und ihre Regeln nicht doch in gewisser Hinsicht nur ein halbherziger Versuch auf dem Weg nach vorn? Schönberg beugte sich dem Diktat der traditionellen Instrumente und beschränkte sich auf die zwölf Töne der üblichen chromatischen Klaviatur; dann ergeben sich meines Erachtens aus den harmonischen Obertönen automatisch diatonische Tonleitern und harmonische Akkorde, die sich in der mehrstimmigen Musik unumstritten behauptet haben. Schönberg konnte dieser „Erblast" nur in engen Grenzen und auf sehr akademische Weise entgehen.

Die Wissenschaft sucht häufig nach Regeln für etwas, das bereits erfolgreich abgeschlossen wurde. Zum Beispiel wollen Linguisten herausfinden, welche Struktur eine Sprache hat, wie sie gesprochen wird und wie sie sich entwickelt hat. Neue Sprachen einzuführen, ist dagegen nicht ihr Ziel. Ganz ähnlich versuchte J. J. Fux (1660–1741), die Kompositionsregeln festzustellen, denen die alten Kontrapunktiker wie Palestrina gefolgt sind. Und Jean Philippe Rameau (1683–1764) wollte den Begriff der Harmonie für seine Zeit möglichst einfach und zwingend erklären. Dabei durchschaute er die Zusammenhänge weit besser, als ihm selbst bewußt war. Seine Überlegungen hängen unmittelbar mit der Residual-Tonhöhe zusammen, einer Erscheinung, die in den Eigenschaften unseres Gehörsinns verwurzelt ist – wir kommen darauf im Kapitel über Rameau und Harmonie genauer zurück. Wie eine Regel zustande kommt, mag das Beispiel der Sonatenform illustrieren, wie sie die Komponisten der Mannheimer Schule um 1750 bevorzugten. Haydn, Mozart und Beethoven übernahmen diese Form und entwickelten sie weiter, ohne sich dabei sklavisch an einen vorgeschriebenen Regelkanon zu halten. Erst später wurde für die Sonate eine verbindliche Form vorgeschrieben.

Regeln, wie sie Musikwissenschaftler aus Kompositionen herauslesen, sind in vieler Hinsicht nützlich. Natürlich sind sie schon an sich interessant und faszinierend. Sie können dazu beitragen, Musik beim Zuhören besser zu verstehen; wer komponieren lernen will, findet in diesen Regeln eine Stütze. Aber damit läßt sich keineswegs automatisch auch gute Musik schaffen.

Lejaren A. Hiller jr. und L. M. Isaacson haben einen Computer auf Komponieren programmiert; vierstimmige Passagen, die nach den Fuxschen Regeln für den Kontrapunkt entstanden waren, stellten sie zur *Illiac Suite* zusammen. Diese Musik klingt zunächst recht angenehm, wird aber bald langweilig, und man hört nicht mehr aufmerksam hin.

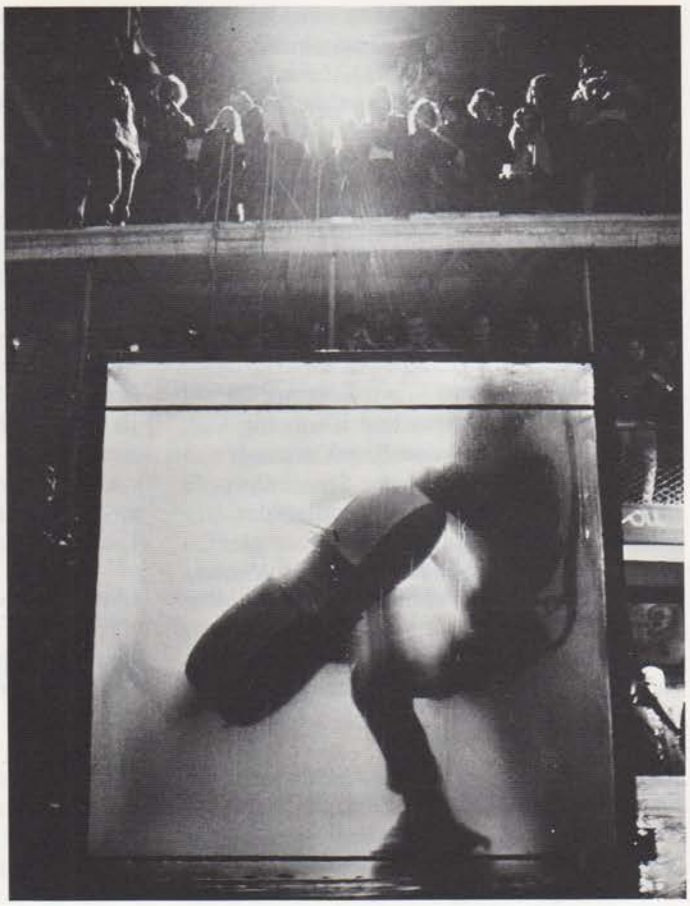
Darauf angesprochen meinte Milton Babbitt, die Regeln des Kontrapunkts hätten nicht den Sinn vorzuschreiben, was man tun soll, sondern was man besser vermeiden sollte.

Ich denke, das gilt auch für die Zwölftonmusik, auch wenn die Regeln in diesem Falle nicht aus einer bewährten Tradition abgeleitet sind. Sie entstanden als theoretischer Leitfaden für eine neue Art von Musik, die die ausgetretenen alten Pfade verläßt. Allerdings kann dieser Vorsatz wieder zunichte werden, wenn die Tonreihe auf raffinierte Weise doch wieder melodisch gewählt wird. Gerald Strang, ein ehemaliger Assistent Schönbergs, hat sich mit so etwas in seiner Doktorarbeit (an der Universität von Südkalifornien) auseinandergesetzt. Das Thema charakterisierte er so: „Eine Sinfonie mehr im Stil von Mozart als von Beethoven; man würde gar nicht merken, daß es Zwölftonmusik ist, wenn man keinen entsprechenden Hinweis bekäme.“ (Betreut hat diese Arbeit noch Ernst Toch und nicht Schönberg.)

Später ging Strang in seiner Computermusik völlig von den üblichen zwölf Tönen ab und benutzte mehr Töne pro Oktave oder auch Töne, die gar keiner Tonleiter mehr zuzurechnen sind.

Gerald Strang.

Pierre Boulez.



Charlotte Moorman spielt eine eigene Unterwasserkomposition auf dem Violoncello.

Nach Schönberg kamen zu den Kompositionsregeln dann auch die Vorschriften. Einige setzten wie John Cage auf rein zufällige Tonfolgen. Dagegen vertraten andere wie Pierre Boulez und Karlheinz Stockhausen eine von Grund auf durchorganisierte Musik. Ihre Kompositionen entwickeln sich gleichsam wie von selbst aus einem musikalischen Basismaterial und einem Satz von Grundregeln. Zwar bleibt es oft den Interpreten überlassen, was sie aus den musikalischen Bausteinen machen, aber gleichwohl finden sich schriftliche Anweisungen, wie die Stücke ausgeführt werden sollen – etwa mit konventionellen Instrumenten oder elektronischen Mitteln. Harry Partch führte eine neue Tonleiter und ein komplettes Orchester neuer Instrumente ein, um seine Musik zu verwirklichen. Umgekehrt gibt es zahlreiche Versuche, den Klang herkömmlicher Instrumente durch neue Spieltechniken zu verfremden. Hier gehört der Klang einer brennenden Geige sicher zu den bizarren Extremen, vorgeführt von Lamont Young und Charlotte Moorman auf einer New Yorker Bühne.

Daneben gab es natürlich auch begabte Komponisten, die ihrer konventionelleren, aber sehr ansprechenden Musik durchaus ihre ganz persönliche Note aufsetzten. Aber wer da nicht – wie zum Beispiel Varèse – auf einem ganz individualistischen Weg zu neuen Ufern aufgebrochen ist, landete oft trotz allen Aufwands in einer Sackgasse.

Für jene, die neue musikalische Welten erobern wollen, kann der Computer eine gute Hilfe sein. Hier ist Platz für alte und neue

Klänge – wenn ein Komponist Zeit und das Zeug dazu hat, sie zu ersinnen und auf dem Computer zu realisieren.

Das erste Musikstück für Computer stammt von Newman Guttman, der es als Linguistikstudent komponierte. Es hieß *Pitch Variations* und wurde noch mit einem sehr einfachen Programm für künstlichen Klang und auch Sprechlaute ausgeführt. Dieses erste Programm war ein Vorläufer von *Music V*, das Max Mathews geschrieben hat. *Pitch Variations* hatte einen raffinierten und subtilen Aufbau, der bei den meisten Zuhörern jedoch gar nicht durchdrang.

Das zweite Computerstück, *Stochatta*, stammte von mir und hörte sich so abgedroschen an, daß es schon weh tat; dieser konventionelle Klang war aber beabsichtigt. Auch Max Mathews komponierte damals einige Computerstücke, insbesondere sein (bewußt) skurriles und dabei hörenswertes *Numerology*.

Nachdem wir einige Computerstücke beisammen hatten, ließ Bruce Strasser, der sich als PR-Mann bei den Bell-Laboratorien um unsere Sache kümmerte, eine kleine Schallplatte mit dem Titel *Music from Mathematics* machen. Wir hofften, damit bei namhaften Komponisten Interesse zu wecken, und schickten die Platte alsbald an Leonard Bernstein und Aaron Copland. Aus Bernsteins Büro kam eine Empfangsbestätigung und von Copland die nachfolgende liebenswürdige Antwort:

31. März 1961

Lieber Mr. Pierce,

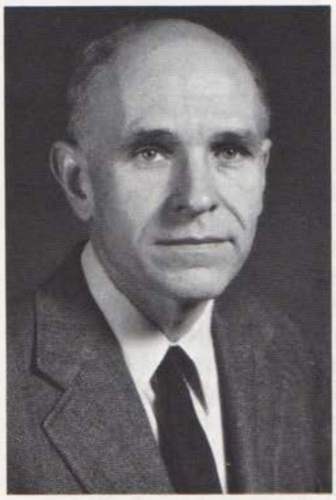
Es war nett von Ihnen, mir die Platte mit *Music from Mathematics* zu schicken.

Es ist verblüffend, was da alles drinsteckt, und wenn ich 20 wäre, würde ich mich ernsthaft mit den vielen Möglichkeiten beschäftigen, die Sie vorschlagen. So aber möchte ich interessiert zusehen und abwarten, wie sich die Dinge entwickeln.

Danke für Ihre freundlichen Worte über meine Musik.

Herzlich Ihr
Aaron Copland

Im ersten Anlauf hatten wir also unser Ziel verfehlt, aber wir ließen uns dadurch nicht entmutigen. Wir kamen schließlich mit bedeutenden Musikern in Kontakt, die sich für

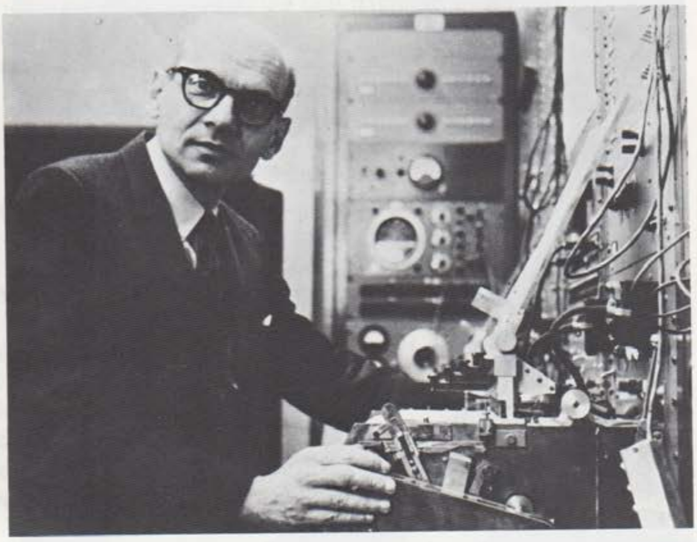


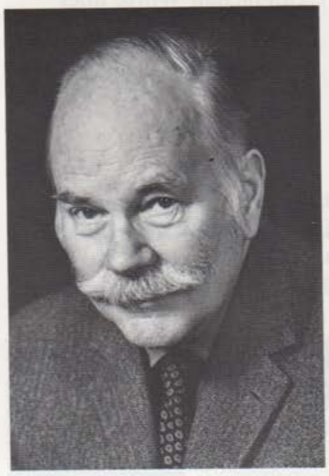
Max V. Mathews.

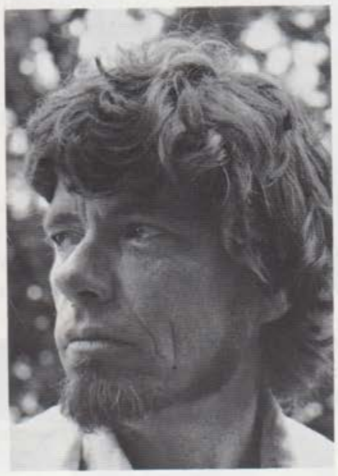
Aaron Copland.

Edgard Varèse.

Milton Babbitt.







Otto Luening.
James Tenney.
John Chowning.

unsere Arbeit interessierten und uns halfen. So lernten wir Edgard Varèse kennen, der fast ein Leben lang auf der Suche nach „seinem“ Instrument war. Auch für ihn kam der Computer – tatsächlich das Instrument, das er suchte – zu spät. Trotzdem konnte uns Varèse mit seiner Musik und seinen fruchtbaren Anregungen weiterhelfen. Und Mathews hat zusammen mit Newman Guttman einige Stunden damit zugebracht, die Geräusche für Varèses Komposition *Déserts* zu erzeugen und aufzunehmen. Es handelt sich dabei um ein Stück für Orchester und Tonband, in dem die unterschiedlichsten Klänge und Geräusche vorkommen, darunter auch das Kreischen einer Säge.

Wir kamen auch mit Milton Babbitt in Kontakt, einem überaus sympathischen und fähigen Komponisten. Zu unserem Pech war er aber bereits auf einen analogen Synthesizer eingeschworen, den Harry F. Olson von der RCA-Corporation gebaut hatte. Verglichen mit dem (digitalen) Computer ist das eine schrecklich beschränkte und empfindliche Maschine, die jederzeit den Lochstreifen

Pierre Boulez (links) in seinem Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (abgekürzt IRCAM) am Centre Pompidou in Paris.

zerreißen kann, der sie steuern soll. Über Babbitt kamen wir mit Otto Luening und Vladimir Ussachevsky in Verbindung, die sich aus dem Columbia-Princeton-Labor für elektronische Musik kannten. Ussachevsky machte sich schließlich mit dem Programm *Music V* vertraut.

Weiterhin überredeten wir James Tenney, einen vielversprechenden jungen Komponisten, nebenbei an den Bell-Laboratorien über Psychoakustik zu arbeiten. Dabei entstand dann unter anderem ein sehr interessantes Stück mit Namen *Noise Study*. Im Rahmen einer Podiumsdiskussion, bei der ich auf Einladung von Simon Ramo 1963 in Los Angeles Computermusik vorstellte, traf ich Ernst Krenek und Gerald Strang, die unter den Musikpädagogen und Komponisten auf dem Podium saßen. Strang kam später für einige Zeit an die Bell-Laboratorien und komponierte danach noch mehrere Stücke für den Computer der Universität von Kalifornien in Los Angeles. Die erste Zwölftonkomposition für Computer, das Stück *Stage One*, entstand Anfang der sechziger Jahre, als David Lewin die Bell-Laboratorien besuchte.

Auch Jean-Claude Risset, ein vielseitig begabter Pianist, Komponist und Physiker, kam damals für längere Zeit, mit einer Unterbrechung durch seinen Militärdienst in Frankreich; er brachte es aber fertig, zu einer Einheit abkommandiert zu werden, die über ein Computerlabor verfügte. In den frühen sechziger Jahren kam schließlich auch John Chowning kurz an die Bell-Laboratorien zu Max Mathews; er nahm unsere Methoden, mit dem Computer umzugehen, durch eine Art Osmose auf und setzte sie nach der Rückkehr an die Universität Stanford im Labor für künstliche Intelligenz ein. Er nutzte den dortigen Computer nach seinen Vorstellungen und krempelte schließlich die gesamte Organisation auf eindrucksvolle Weise um – eine Veränderung, die bis heute Bestand hat.

Probenraum des IRCAM.

Im Laufe der sechziger Jahre wurde der Computer auch von „echten" Musikern und Komponisten akzeptiert; Max Mathews und ich zogen uns deshalb zunehmend zurück, wenngleich wir noch einige Stücke beigesteuert haben. Heute gehört der Computer vielerorts und insbesondere an zahlreichen Musikhochschulen bereits zum Handwerkszeug, wenn es gilt, neue musikalische Klänge zu bilden. Dazu hat nicht zuletzt *Music V* beigetragen, das letzte und ausgefeilteste Programm von Max Mathews. Risset, Chowning und viele andere haben damit gute Musik gemacht.

Immer mehr begabte junge Komponisten zieht es zur Computermusik und an Universitäten oder Konservatorien, die darauf eingerichtet sind.

Wer sich als Komponist auf den Computer einläßt, muß das Für und Wider abwägen. Wie schon gesagt: Im Prinzip lassen sich damit beliebige Klänge schaffen. In der Praxis jedoch war zu Beginn kaum etwas musikalisch Brauchbares aus ihm herauszuholen. Die ersten einfachen Töne klangen langweilig und ziemlich „elektronisch". Wie kompliziert ein Ton zusammengesetzt sein muß, um gut zu klingen, werden wir im vorletzten Kapitel eingehender diskutieren. Mit zunehmendem Wissen über diese Zusammenhänge gelang es immer besser, den Computer zum Musizieren zu bringen,

Lejaren Hiller jr.

Ein Computer ist viel billiger als ein Orchester mit Berufsmusikern, aber für die meisten Musikschulen liegen die Kosten für eine wirklich gute Computerausrüstung noch zu hoch. Schüler und Studenten spielen ja umsonst im Schul- oder Hochschulorchester mit. Und nach der Ausbildung sind Spezialisten für Computermusik wenig gefragt, während Sänger und Instrumentalisten bei Orchestern und an Theatern eine Stelle finden können oder als Lehrer unterkommen. Computermusiker haben allenfalls etwas bessere Chancen als Pianisten. Einträglichere Möglichkeiten bieten sich ihnen in außermusikalischen Bereichen, insbesondere bei Computerfirmen.

Angenommen, ein Komponist hat einen Computer zur Verfügung, was wird er damit anfangen? Er könnte natürlich Stücke schreiben, wie sie traditionell für Orchester komponiert werden, wobei er vielleicht mehr Abstufungen in der Lautstärke und einen „voluminöseren" Klang erreichen kann als mit herkömmlichen Instrumenten. Erfahrungsgemäß gehen gute Komponisten aber einen anderen Weg. Sie wollen die neuen Möglichkeiten nutzen, um eine neue Art von Musik zu schreiben. Für sie ist Musik organisierter Klang, und sie suchen nach neuen Organisations- und Gestaltungsprinzipien für neue Klänge. Solche Computermusik kann man natürlich nur dann ganzheitlich aufnehmen, wenn man sich von alten Hörgewohnheiten frei macht. Beispielsweise gab Risset seiner *Inharmonique*, bei der er die Gesangsstimme mit zischenden und glockenähnlichen Lauten mischte, einen kompositorischen Aufbau, der für den Hörer nicht mehr so leicht zu erfassen ist wie etwa die vertrauten Gestaltungsprinzipien wie Variation, Rondo oder Sonatenform. Ähnlich ist es bei zwei anderen Risset-Stücken, *Songes* und *Contours*. Chowning läßt in seiner Komposition *Turenas* gleichsam Klänge durch den Raum wirbeln; bei *Stria* setzt er nicht-harmonische Obertöne ein, deren Frequenzverhältnis dem Goldenen Schnitt entspricht; in *Phōnē* wandeln sich Glockenklänge zu menschlichen Stimmen. Bei all diesen Stücken mußten die Komponisten musikalische Organisationsformen ausfindig machen.

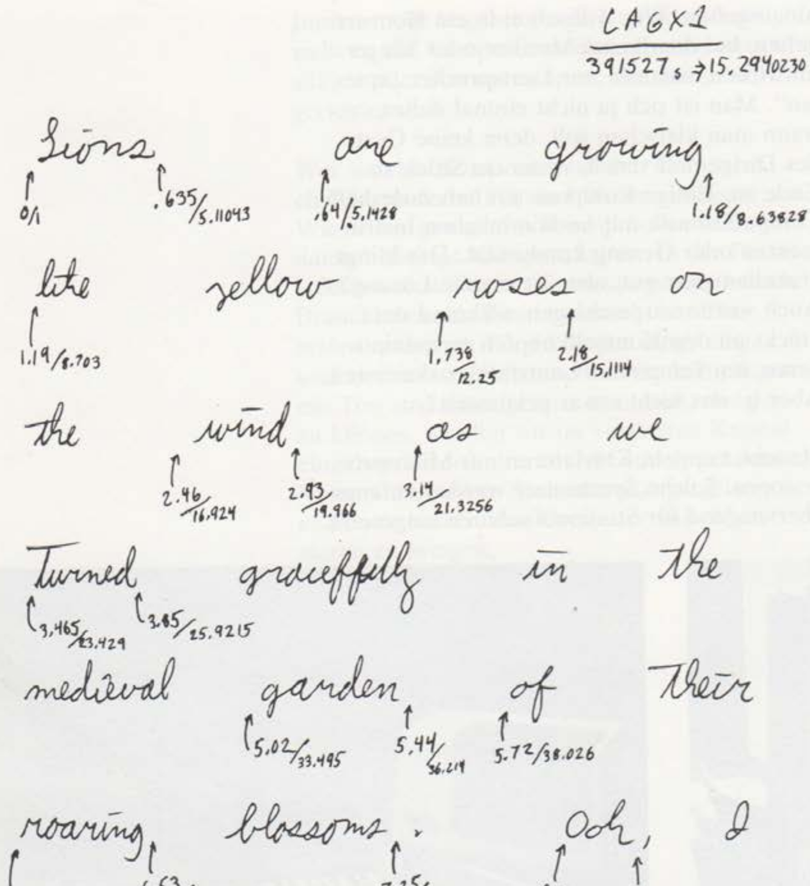
Eine sensible Musikerin aus meinem Bekanntenkreis empfindet Computerkompositionen, die mir sehr gut gefallen, überhaupt nicht als angenehme Musik. Sie fühlt sich zwar von der Klangfülle angesprochen, vermißt aber klare melodische und rhythmische Linien; deshalb hält sie diese Stücke für unmusikalisch. In der Tat gehören Rhythmus, Melodie, Kontrapunkt, Harmonie und verschiedene Muster der Wiederholung und Variation eines Themas zu den Grundpfeilern traditioneller Musik; und wie erfolgreich damit gearbeitet wurde, ist allgemein bekannt. Inwieweit es ebensogut anders geht, läßt sich erst feststellen, wenn man es ausprobiert. Regeln sind noch kein Erfolgsrezept. Und nur wenn man die Ordnung einer Komposition heraushört, wird sie zur Ordnung in der Musik. Ob sie dann auch gefällt, ist damit noch nicht entschieden. Lejaren Hiller sagte einmal: „Musik ist ein Kompromiß zwischen Langeweile und Chaos." Erfolgschancen kann Computermusik – wenn überhaupt – wohl nur dann haben, wenn sie von begabten Komponisten geschaffen wurde.

Herbert A. Deutch mit dem Prototyp des Moog-Synthesizers, den er mit entwickelt hat.

Hier gilt es noch viele Hindernisse zu überwinden, die weit über die rein technischen Schwierigkeiten mit dem neuen „Instrument" hinausgehen. Wer will schon in ein Konzert gehen, bei dem keine Musiker oder Sänger mitwirken, sondern nur Lautsprecher „spielen". Man ist sich ja nicht einmal sicher, wann man klatschen soll, denn keine Geste des Dirigenten verrät, wann ein Stück zu Ende ist. Einige Komponisten haben deshalb Computermusik mit herkömmlichen Instrumenten oder Gesang kombiniert. Das klingt bisweilen ganz gut, aber ist es eine Lösung? Auch wurde vorgeschlagen, während des Stücks an den Kontrollknöpfen zu manipulieren, um Tempo und Lautstärke zu variieren. Aber ist das nicht etwas gekünstelt?

Manche koppeln Klaviaturen mit Mikroprozessoren. Solche Synthesizer wurden anfangs überwiegend für Studioaufnahmen eingesetzt, haben aber heute längst Einzug in die Hausmusik gehalten. Sie zeichnen sich durch einen recht großen Tonumfang aus und ermöglichen interessante Effekte, denn alles, was über die Klaviatur eingegeben wird, kann gespeichert und später wieder abgerufen werden; mit einer zusätzlichen Steuereinheit lassen sich aus dem Synthesizer fast ebenso raffinierte und effektvolle Klänge herausholen wie bei einem richtigen Computer. Mit einer computerähnlichen Elektronik kann man auch den Klang herkömmlicher Instrumente steigern und verfremden, eine Methode, die unter anderem Pierre Boulez genutzt hat.

Ein konventioneller Synthesizer.



Arbeits-„Partitur" des Computerstücks *Lions Are Growing* von Andy Moorer.

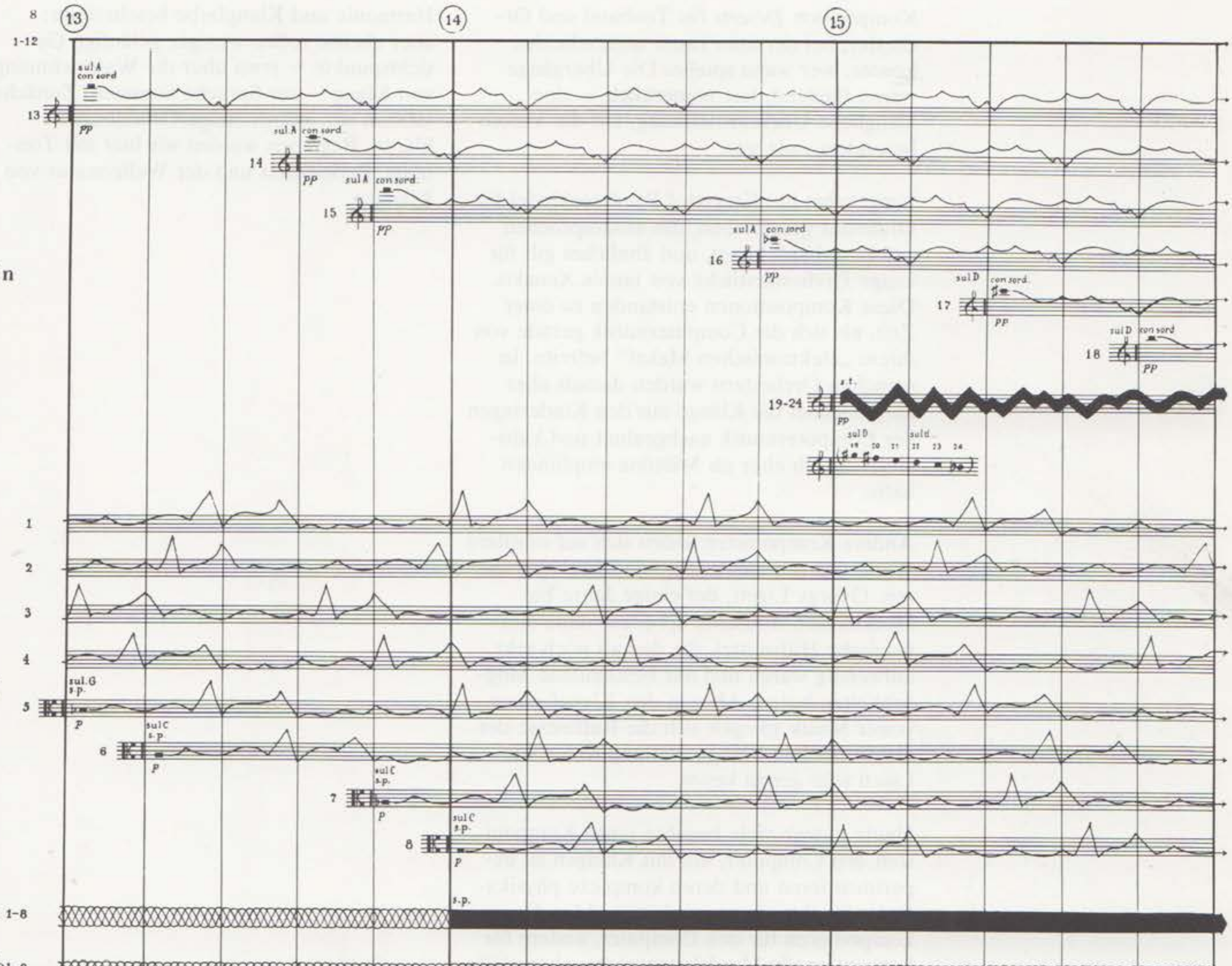
Vielleicht kommt mit den Computerklängen die einst so beliebte Ein-Mann-Kapelle wieder in Mode. Beispielsweise setzt Andy Moorer in *Lions Are Growing*, das er nach einem Gedicht von Richard Brautigan komponierte, nur einen einzigen Musiker ein; der spricht, brüllt, singt ein- oder mehrstimmig mit einer vom Computer verfremdeten Stimme. Passend zur Musik werden Bilder an die Wand projiziert. Moorer arbeitet jetzt bei einer Filmgesellschaft in San Rafael, Kalifornien. Überhaupt richten sich viele Hoffnungen auf den Film, der als Medium für die klangliche Vielfalt des Computers wie geschaffen erscheint.

Die Computermusik steht noch am Anfang, in einem Stadium des Lernens und Entdeckens. Sie muß und wird aus den Kinderschuhen herauswachsen. Eine ähnliche Aussicht mag der junge Lincoln vor Augen gehabt haben, als er – wie erzählt wird – auf seine Schiefertafel folgenden Satz schrieb:

„Abraham Lincoln,
sein Griffel und seine Hand,
er wird mal gut, doch Gott weiß, wann."

Computermusik – ob mit oder ohne begleitende Videobilder – könnte eines Tages ebenso beliebt und selbstverständlich werden wie Rundfunkaufnahmen aus Konzertsälen. Bei einer so interessanten und abwechslungsreichen Musik, die von vornherein für die Wiedergabe per Lautsprecher geschaffen ist, besteht eigentlich kein Grund, warum sie nicht gefallen sollte. Allerdings wird das breite Publikum diese Musik nur zögernd annehmen, solange sie sich nicht voll entfalten kann, weil sie finanziell nicht genug gefördert und von den Medien und Konzertagenturen nicht in die Programme aufgenommen wird.

Um die Zukunft der Computermusik mache ich mir keine Sorgen. Jede Musik lebt vom Klang, und der Computer ist ein einzigartiges Instrument, mit dem sich die phantastischsten Klänge erreichen oder auch erforschen lassen. Insofern ist es nicht erstaunlich, daß die elektronische Musik auch die konventionelle beeinflußt hat. Ein Beispiel dafür war Varèses



Eine Partiturseite von Krzysztof Pendereckis *Polymorphia*.

Komposition *Déserts* für Tonband und Orchester, bei der man kaum unterscheiden konnte, wer wann spielte. Die Übergänge waren fließend, fast unmerklich – eine klangliche Übereinstimmung, auf die Varèse besonders stolz war.

Umgekehrt hat Krzysztof Penderecki viel für Orchester geschrieben, das ausgesprochen „elektronisch" klingt, und ähnliches gilt für einige Orchesterstücke von Iannis Xenakis. Diese Kompositionen entstanden zu einer Zeit, als sich die Computermusik gerade von ihrem „elektronischen Makel" befreite. In manchen Orchestern wurden damals aber ausgerechnet die Klänge aus den Kindertagen der Computermusik nachgeahmt und kultiviert, die ich eher als Mißtöne empfunden hatte.

Andere Komponisten ließen sich auf subtilere Weise von der elektronischen Musik inspirieren. György Ligeti, der einige Jahre bei Stockhausen studierte, arbeitete ohne elektronische Hilfsmittel, die damals noch sehr aufwendig waren und nur bescheidene Möglichkeiten boten. Aber in den Klangformen seiner Musik spiegelt sich die Raffinesse der elektronischen Klanggestaltung wider, die Ligeti sehr genau kennt.

Heute nutzen viele begabte junge Komponisten den Computer, um mit Klängen zu experimentieren und deren komplexe physikalische Struktur kennenzulernen. Manche komponieren für den Computer, andere für konventionelle Musikinstrumente, aber völlig unbeeinflußt bleibt wohl letztlich keiner. Wieviel Neues und Nützliches man mit dem Computer lernen kann, das möchte ich unter anderem auch den Lesern dieses Buches vor Augen führen – und für Computerfans bieten die einschlägigen Zeitschriften hinreichend Anregung, selbst mit einfachen Musikprogrammen zu experimentieren.

Auch wenn im folgenden viel vom Computer die Rede sein wird, Hauptthema ist Klang in seinen vielfältigen musikalischen Nuancierungen. Sie lassen sich mit vertrauten Begriffen wie Tonhöhe, Tonleitern, Konsonanz, Harmonie und Klangfarbe beschreiben, aber ebenso sollen weniger geläufige Gesichtspunkte – etwa über die Wahrnehmung von Klang – zur Sprache kommen. Zunächst müssen wir jedoch einige Grundbegriffe klären. Beginnen werden wir hier mit Tonhöhe, Periodizität und der Wellennatur von Klängen.

Periodizität, Tonhöhe und Wellen

Ein sumerisches Siegel mit dem Bild einer Harfe (unten rechts).

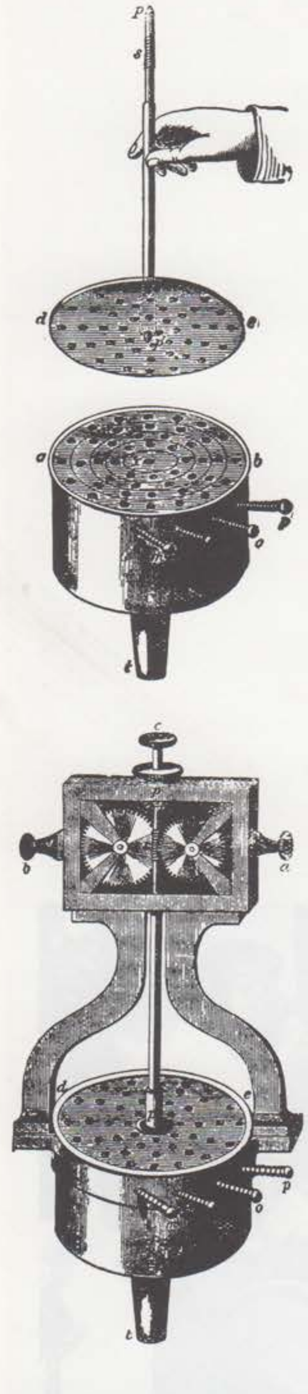
Seit fast 5000 Jahren sind Flöten und nahezu ebenso lange Harfen bekannt – Instrumente mit einer eindeutigen Tonhöhe, aber um Musik machen zu können, reichen schon einfache Klappern. In der Tat sind das die ältesten Instrumente, die man in Ägypten ausgegraben hat. Möglicherweise wurde zum Rhythmus dieser Klappern gesungen, auch wenn die Tonhöhe vielleicht nur sehr eingeschränkt als Gestaltungsmöglichkeit genutzt wurde. Besonders häufige Intervalle in der vorzeitlichen Musik dürften die Quinte (mit sieben Halbtonschritten) und eine etwas unbestimmte Terz (ungefähr vier Halbtonschritte) gewesen sein. Auch Rhythmus allein kann Musik sein. So hat Carlos Chavez eine Toccata für Schlagzeug solo komponiert, und Edgard Varèses Stück *Ionization* lebt hauptsächlich von seinem Rhythmus und seiner Klangfarbe, wenngleich man auch eine Sirene zu hören bekommt.

Was bedeutet nun Tonhöhe? Psychologen sehen darin eine subjektive Empfindung und weniger die physikalischen Eigenschaften einer periodischen Schallwelle, die an unser Ohr dringt. Umgangssprachlich bezeichnen wir Töne als hoch oder tief, um zu kennzeichnen, wie hell und schrill oder dunkel und weich uns Klänge vorkommen. In diesem Sinne würde der Zischlaut *s* höher klingen als das weicher summende *sch*. Im folgenden wollen wir unter Tonhöhe eine genau definierte Eigenschaft von Klängen verstehen, wie sie durch Streich- oder Blasinstrumente, beim Klavier oder beim Singen entstehen.

Die Tonhöhe entspricht in der Musik traditionell einer ganz bestimmten Note einer Tonleiter und wird heute üblicherweise nach dem Kammerton A als musikalischem Standard gestimmt. dem Ton, der bei 440 Schwingungen in der Sekunde entsteht.

Hinter einer gleichbleibenden Tonhöhe steckt immer ein *periodischer* Vorgang: Irgendetwas wiederholt sich über längere Zeit, und zwar stets im gleichen Zeitabstand. So entdeckte Galileo Galilei durch Zufall, daß er mit einem

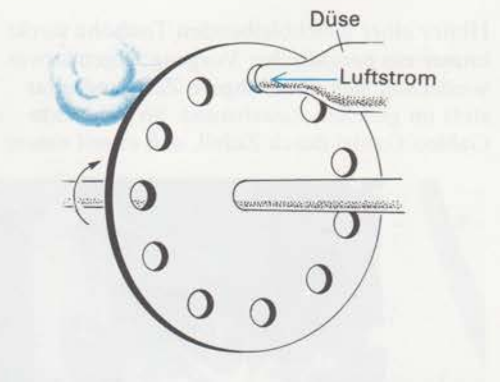
Die brasilianische Samba lebt von Rhythmus.



Die Sirene von Charles Cagniard de la Tour

scharfen Stahlstichel beim Einritzen einer Messingplatte einen Ton mit konstanter Höhe erzeugte, die Schwingungen des quietschenden Stichels hinterließen auf der Platte eindeutige Spuren feine parallele Riefen, die in gleichen Abständen folgten. Galilei hat auf ähnliche Weise auch Münzen zum Klingen gebracht, wie in einem alten Akustikbuch nachzulesen ist. Er strich mit einem Messer rasch über die geriffelte Kante und konnte so eine halbwegs definierte Tonhöhe erreichen. Um das selbst auszuprobieren, braucht man nur mit dem Fingernagel über den Rand eines solchen Geldstücks – oder auch eines Kammes – zu streichen. Der Nagel hüpft an den Kerben auf und nieder und erzeugt dabei ein Geräusch, das fast wie ein gestimmter Ton klingt. Je schneller der Nagel um die Münze fährt, desto höher wird der Ton.

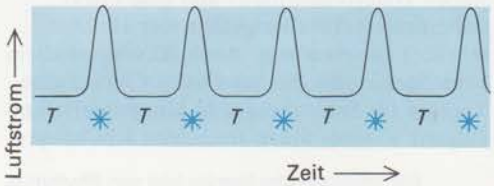
Wie Periodizität und Tonhöhe zusammenhängen, können wir uns anhand einer Sirene klarmachen. In Varèses *Ionization* wurde eine Sirene gespielt, deren Tonhöhe sich über eine Kurbel variieren ließ: Wenn man die Kurbel schneller dreht, wird der Ton höher. Dieser Zusammenhang erklärt sich aus einem Mechanismus, den Charles Cagniard de la Tour 1819 erfunden hat.



Funktionsprinzip einer Sirene. Aus einer Düse strömt Luft auf eine rotierende Scheibe mit Löchern, die in gleichen Abständen auf einem Kreis liegen. Periodisch können Luftstöße durch die Löcher entweichen, so daß der Luftdruck jenseits der Scheibe schwankt. Wieviele Luftstöße pro Sekunde entstehen, kann man am Produkt aus der Zahl der Löcher und der Scheibenumdrehungen pro Sekunde ablesen. Bei 40 Drehungen könnte diese Scheibe mit ihren elf Löchern 440 Pulse in der Sekunde erzeugen. Das entspricht gerade der Frequenz des Kammertons A.

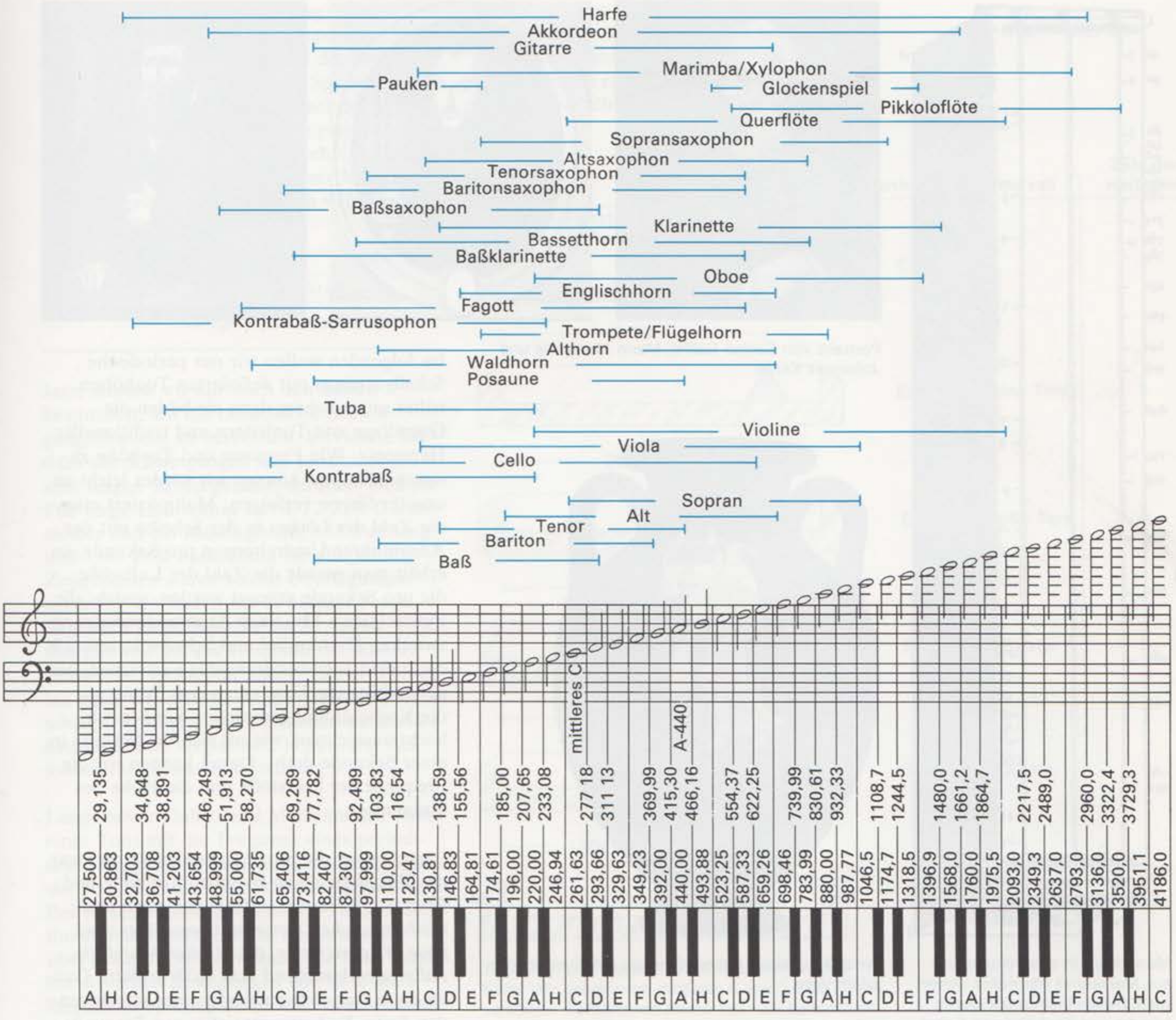
Eine Sirene besteht im wesentlichen aus einer drehbaren Scheibe mit Löchern, die alle den gleichen Abstand zueinander haben. Sie rotiert über einer Düse, durch die Luft gepreßt wird. Der Luftstrahl erzeugt immer dann einen Luftstoß hinter der rotierenden Scheibe, wenn ein Loch „vorbeikommt“ Man kann die Folge dieser Luftstöße als Funktion der Zeit auftragen und erhält dann eine periodische Kurve. Die flachen Minima entstehen periodisch, wenn die Düse verdeckt ist. Die Maxima – die Luftstöße – folgen immer im gleichen Zeitabstand, der *Periode* oder *Schwingungsdauer* (T). Die Zahl der Luftstöße, die während einer festgelegten Zeiteinheit auftreten (man wählt meistens eine Sekunde), heißt *Frequenz* (f).

Die periodischen Luftstöße der Sirene breiten sich als Schallwelle in der umgebenden Luft

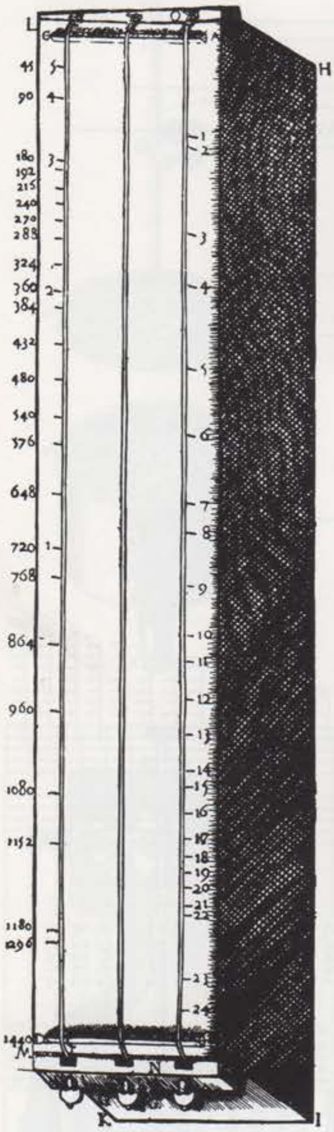


Periodische Luftstöße einer Sirene. Die Zeit zwischen den Maxima der aufeinanderfolgenden Stöße ist die Periode T

aus. Sobald diese periodische Welle unser Ohr erreicht, nehmen wir sie als Ton wahr. So hören wir den Kammerton A, wenn die Sirene mit 440 Luftstößen pro Sekunde läuft, bei 220 Stößen pro Sekunde klingt der Ton eine Oktave tiefer; verdoppelt man die Frequenz auf 880 Stöße in der Sekunde, wird er eine Oktave höher Man kann entsprechend den Tönen eines Klaviers Frequenzen zuordnen und analog dazu den Tonumfang verschiedener Musikinstrumente angeben – wie in der Abbildung rechts. Übrigens zeichnet sich das Klavier nicht nur durch seinen gewaltigen Tonumfang aus, auch die Dynamik



Die Tonhöhe ist bei periodischen musikalischen Klängen durch die Frequenz festgelegt. In dieser Abbildung sieht man, wie Musiknoten, die Tasten eines Klaviers und der Tonumfang verschiedener Musikinstrumente mit den Frequenzen zusammenhängen. Es gibt auch periodische Klänge, die über den Tonumfang des Klaviers hinausgehen, aber sie haben keine klare *musikalische* Tonhöhe.



Monochord in einer Illustration aus Mersennes *Harmonie universelle.* Dieses Instrument wurde benutzt, um Tonhöhe und Saitenlänge in Beziehung zu setzen.

Portraits von Galileo Galilei, Marin Mersenne und Johannes Kepler.

Darstellung eines Kithara-Spielers auf einer griechischen Vase.

zwischen sehr leise und sehr laut ist bemerkenswert, und schließlich lassen sich die einzelnen Töne im Vergleich zu anderen Instrumenten mühelos anschlagen. Um dagegen eine Geige oder Trompete zum Klingen zu bringen, braucht man spezielle Techniken und Übung.

Im folgenden wollen wir nur periodische Schallvorgänge mit definierten Tonhöhen näher untersuchen, denn sie bilden die Grundlage von Tonleitern und traditioneller Harmonie. Wie Frequenz und Tonhöhe zusammenhängen, können wir wieder leicht an unserer Sirene verfolgen. Multipliziert man die Zahl der Löcher in der Scheibe mit der Anzahl ihrer Umdrehungen pro Sekunde, so erhält man gerade die Zahl der Luftstöße, die pro Sekunde erzeugt werden, sprich. die Pulsfrequenz. Mit einer Zahnradübersetzung zwischen Drehkurbel und Scheibe lassen sich die hohen Scheibendrehzahlen erreichen, bei denen hörbare Töne entstehen. Wenn wir die Kurbeldrehungen zählen, können wir leicht ausrechnen, wie oft sich die Scheibe in einer Sekunde dreht. Damit kennen wir die Frequenz der Luftstöße und die Höhe des Sirenentons.

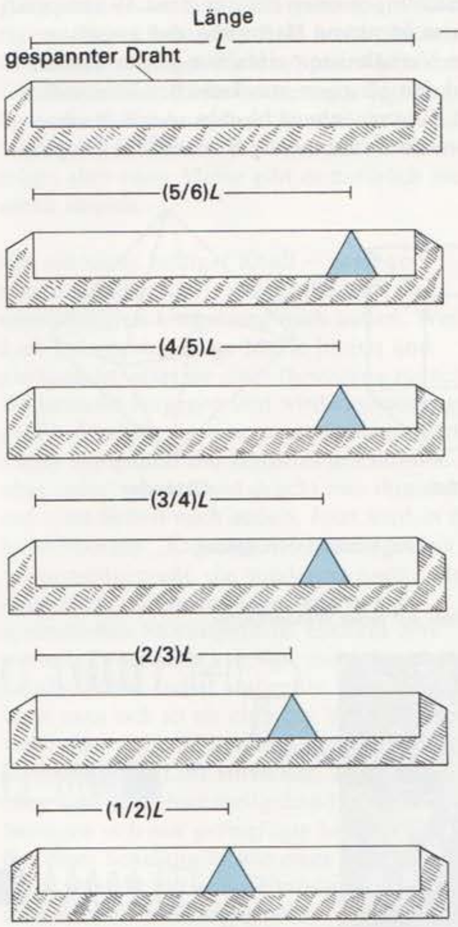
Lange bevor die Sirene erfunden wurde, war der Zusammenhang zwischen Tonhöhe und Frequenz bekannt. In *Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend* von 1638 erklärte Galilei diese Beziehung anhand einer schwingenden Saite. Er bestimmte aber nur Frequenzverhältnisse, die verschiedenen musikalischen Intervallen entsprechen. Um die gleiche Zeit (1636) erschien die *Harmonie universelle* des französischen Geistlichen, Philosophen und Mathematikers Marin Mersenne. Wie Galilei, dessen Arbeiten er kannte, setzte Mersenne die Höhe eines Tons schon mit der Anzahl der Schwingungen in Beziehung: Die Schwingungsfrequenz einer gespannten Saite ist proportional zum Kehrwert der Saitenlänge, sie steigt überdies mit der Spannkraft (proportional zur Quadratwurzel der Spannkraft) und sinkt mit der Masse pro Einheitslänge (die Frequenz ist umgekehrt proportional zur Quadratwurzel aus dieser Masse). All diese Einzelbeziehungen lassen sich wie folgt zusammenfassen.

$$\text{Frequenz} = k \times \frac{\sqrt{\text{Spannkraft}}}{\text{Länge} \times \sqrt{\text{Masse/Länge}}}.$$

Jetzt müssen wir nur noch den Faktor k bestimmen, um die tatsächliche Schwingungsfrequenz zu berechnen. Mersenne hat dazu die Schwingungen von verschiedenen sehr langen Saiten gezählt, darunter eine 90 Fuß lange Hanfschnur mit 1/12 Zoll Durchmesser und ein Messingdraht, 138 Fuß lang und 1/48 Zoll stark. Nicht für alle seine Zeitgenossen waren solche Überlegungen einsichtig. So finden wir in Samuel Pepys Tagebuch unter dem Datum 8. August 1666 den Hinweis auf ein Gespräch mit Robert Hooke, der behauptet habe, „daß er feststellen kann, wie oft eine Fliege mit ihren Flügeln schlägt, wenn man ihr Gebrumm mit musikalischen Tönen vergleicht“ Pepys hielt das jedoch für „etwas zu spitzfindig“

Lange bevor Galilei und Mersenne die Höhe eines Tons mit der Frequenz eines periodischen Vorgangs in Beziehung brachten, spielte die Tonhöhe eine zentrale Rolle in der Musik. Bei verschiedenen griechischen Philosophen findet man entsprechende Bemerkungen über gezupfte Saiten, wobei hohe Töne bereits mit schnellen Bewegungen und tiefe mit langsamen verknüpft wurden, damals konnte zwar noch niemand eine genaue Beziehung zwischen der Geschwindigkeit der Bewegung und der Tonhöhe angeben. Die Griechen hatten aber bereits entdeckt, daß sich harmonische Intervalle aus wunderbar einfachen Zahlenverhältnissen zwischen den Saitenlängen ergeben. Diese Entdeckung wird gewöhnlich Pythagoras zugeschrieben.

Stellen wir uns vor, ein Draht der Länge L sei wie in der Abbildung rechts unten eingespannt und dabei so gestimmt, daß beim Anzupfen das mittlere C′ erklingt. Wenn wir nun die frei schwingende Länge mit Hilfe



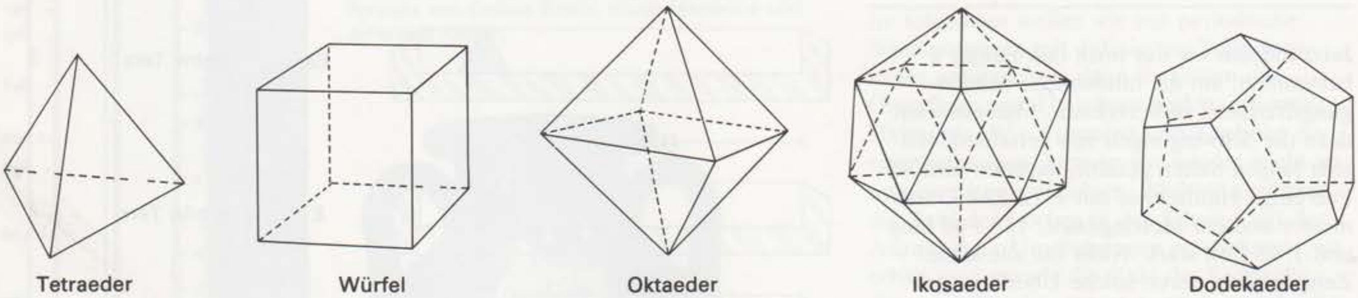
Tonhöhe	Intervall	Zahl der Halbtöne
C	–	–
Es	kleine Terz	3
E	große Terz	4
F	Quarte	5
G	Quinte	7
C′	Oktave	12

Tonhöhen und Frequenzen einer schwingenden Saite. Wir gehen vom mittleren C aus (Länge L) und verkürzen die Saite mit einem Keil; die Saitenspannung bleibt dabei unverändert. Schwingen nur noch 5/6 der ursprünglichen Länge, dann steigt die Frequenz auf 6/5 und die Tonhöhe verschiebt sich um eine kleine Terz nach oben auf den Ton Es. Entsprechend sind die anderen Intervalle für kleinere Längen bis zur Oktave aufgelistet.

eines verschiebbaren Keils verkürzen – ohne die Spannung zu ändern – wird der Ton höher. Reduziert sich die Länge auf 2/3 des Ausgangswerts, so erhöht sich der Ton um eine Quinte (oder sieben Halbtonschritte).

Die Griechen sahen in Zahlen und ihren Beziehungen einen tieferen Sinn. Es entsprach einem Ideal von Harmonie, daß zwischen den Verhältnissen einfacher ganzer Zahlen und den gängigen musikalischen Intervallen ein Zusammenhang besteht. Auch für ihre Bauwerke strebten sie harmonische Proportionen und Größenverhältnisse an. Charakteristisch für dieses Ideal sind auch die fünf regelmäßigen Polyeder, denen Plato die vier klassischen Elemente und den Kosmos zuordnete. dem Tetraeder das Feuer, dem Würfel die Erde, dem Oktaeder die Luft, dem Ikosaeder das Wasser und dem Dodekaeder das Universum.

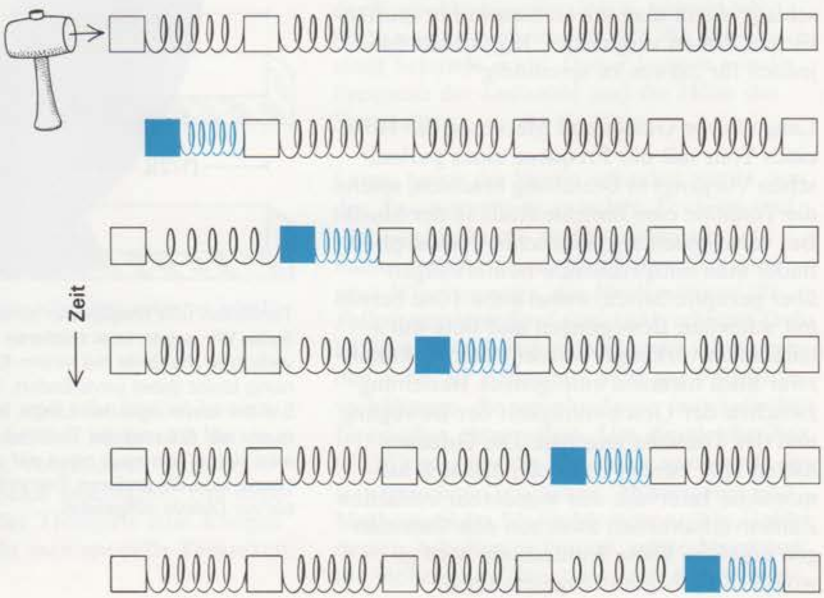
Heute betrachten wir die Zusammenhänge zwischen Saitenlängen und musikalischen Intervallen als Beobachtungstatsache und suchen nach einer physikalischen Erklärung.



Die fünf regelmäßigen Polyeder

Die unten abgebildete Kette aus Federn und Masseklötzen verdeutlicht, wie sich eine Welle fortpflanzt. Auf Masse und Elastizität beruht auch die Ausbreitung von Schallwellen in Luft.

Wellen auf einer Wasserfläche.



Es liegt im Wesen von Wissenschaft, bei komplizierten Vorgängen nach einfachen Gesetzmäßigkeiten zu suchen und diese dann möglichst elegant zu erklären. Der Klang eines Musikinstruments läßt sich am einfachsten mit den periodischen Eigenschaften von Wellen beschreiben.

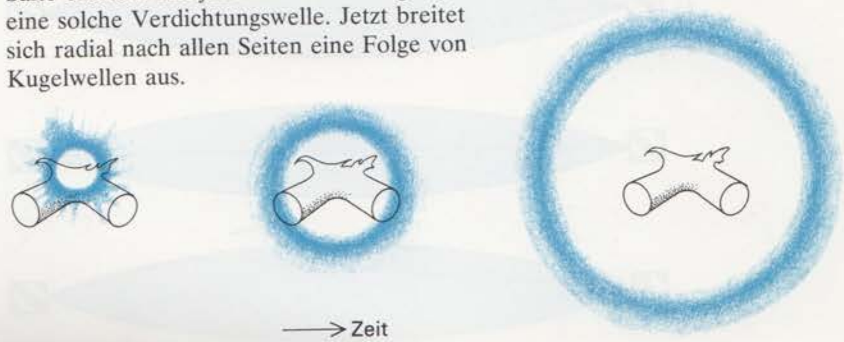
Jeder hat sicher schon einmal verfolgt, wie sich auf einer Wasseroberfläche Wellen ausbreiten, wenn Regentropfen oder Kieselsteine darauf fallen. Auch von einer Schallquelle gehen solche Wellen aus, die sich in der Luft dann in allen Richtungen ausbreiten. Man darf sich das aber nicht so vorstellen, als würden Luftteilchen fortströmen, sie schwingen nur leicht hin und her und bleiben ansonsten an Ort und Stelle. Diese Schwingungen übertragen sie jedoch auf ihre unmittelbaren Nachbarn. Man kann sich das an einer Menschenkette verdeutlichen, in der jemand seinen Nachbarn anstößt, der den Stoß dann an den nächsten weitergibt, und so fort. Die „Welle" wandert über die Menschen hinweg, ohne daß sich jemand auch nur einen Schritt von seinem Platz bewegen müßte.

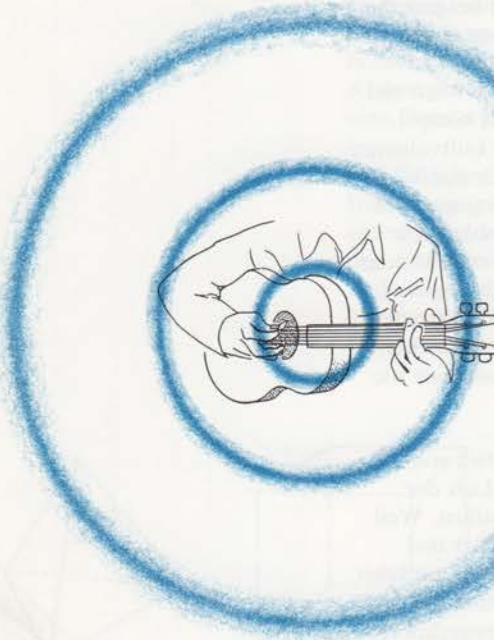
Tagtäglich hören wir den Schall in der Luft, können diese Wellen aber nicht sehen. Die einzelnen Druckstöße folgen ohnehin so schnell, daß wir sie visuell gar nicht wahrnehmen könnten. Eine Ausnahme wären vielleicht die tiefsten Orgelpfeifen. Wir können uns die Schallausbreitung aber an einem einfachen Modell klarmachen. einer Kette aus kleinen Klötzchen, die durch Federn miteinander verbunden sind. Wenn das erste davon einen Stoß bekommt, wird sich diese Störung über die gesamte Kette fortsetzen – wie eine Welle. In der Abbildung links sind die Positionen der Klötze für aufeinanderfolgende Zeitpunkte dargestellt. Bei diesem Modell können sich die Wellen nur geradlinig in einer Richtung ausbreiten, während Schallwellen in alle Raumrichtungen laufen. Aber Federn und Klötze veranschaulichen doch entscheidende Eigenschaften der Luft, auf denen die Schallausbreitung beruht. Es sind Elastizität und Masse.

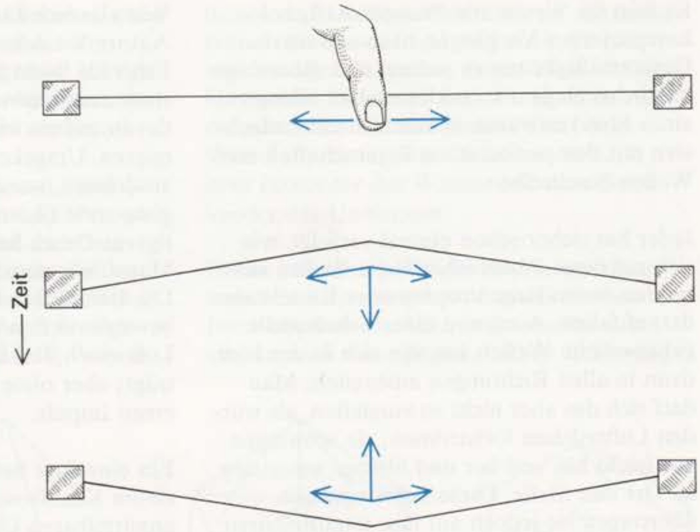
Wie elastisch Luft ist, kann man bei jedem Autoreifen oder beim Aufpumpen eines Fahrrads leicht feststellen. Luft läßt sich stark zusammendrücken, und man kann viel davon auf ein kleineres Volumen komprimieren. Umgekehrt wird sich ein Luftvolumen ausdehnen, wenn der Raum dafür zur Verfügung steht (oder in der Umgebung ein niedrigerer Druck herrscht). Luft besitzt auch Masse, was man bei Wind zu spüren bekommt. Die Blätter der Bäume oder auch Segelboote bewegen sich ja nur deshalb, weil strömende Luft einen Teil ihres Impulses auf sie überträgt, aber ohne Masse gibt es natürlich nie einen Impuls.

Ein einzelner heftiger Knall – etwa von einem Knallfrosch – drückt die Luft der unmittelbaren Umgebung nach außen. Weil Luft jedoch eine träge Masse besitzt und elastisch ist, setzt sie einer Bewegung zunächst Widerstand entgegen und wird zusammengepreßt. Ähnlich wie eine zusammengedrückte Feder expandiert die verdichtete Lufthülle aber sofort wieder und drückt nun ihrerseits auf allen Seiten nach außen. Jetzt wird in der benachbarten „Kugelschale" erneut Luft zusammengepreßt, die wiederum nach außen expandiert und noch weiter von der ursprünglichen Störungsquelle entfernt eine weitere Druckhülle erzeugt, die sich auf die gleiche Weise radial ausbreitet. Einen Knall kann man sich so als einzelne Verdichtungswelle oder expandierende Kugelschale aus komprimierter Luft vorstellen. Die Luftteilchen sind auch hier weitgehend ortsfest und bewegen sich nur geringfügig hin und her. Bei einer Schallquelle wie einer schwingenden Saite entsteht mit jeder Einzelschwingung eine solche Verdichtungswelle. Jetzt breitet sich radial nach allen Seiten eine Folge von Kugelwellen aus.

Wenn ein Knallfrosch explodiert, breitet sich eine Kugelschale mit komprimierter Luft gleichmäßig nach allen Seiten aus.

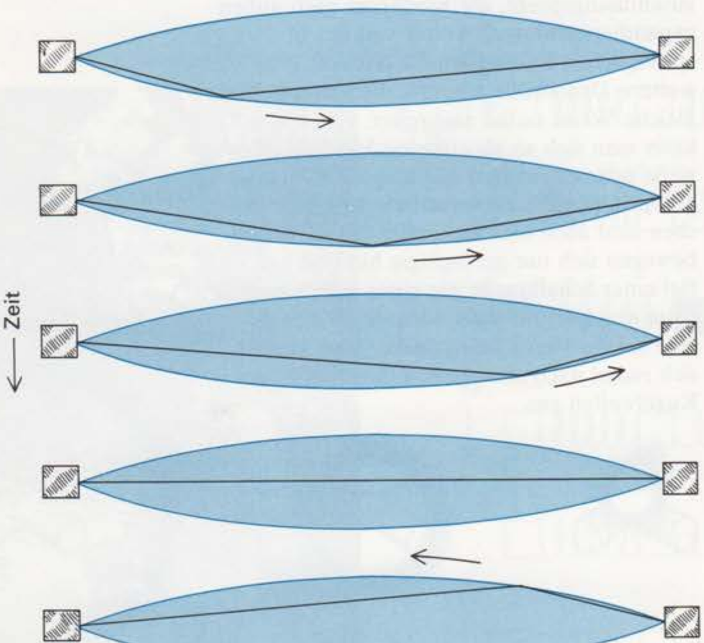






Eine angezupfte Saite wird durch die Rückstellkraft (senkrechte Pfeile) der Spannung in Schwingung versetzt, weil sie aufgrund ihrer Massenträgheit über die Nullage hinausschießt.

Von einer schwingenden Saite gehen periodisch Kugelschalen komprimierter Luft aus. Folgen die Schwingungen und die Druckwellen rasch genug, so hören wir sie als Ton.



Eine angezupfte schwingende Saite sieht aus wie ein schmales Band mit gebogenen Rändern, das sich an den beiden Enden zum Punkt verengt. In Wirklichkeit ist sie aber nur an einer Stelle abgeknickt. Dieser Knick läuft als transversale Welle über die Saite, bis er am eingespannten Ende reflektiert und die Saite nach der entgegengesetzten Richtung ausgelenkt wird.

In unserem Modell elastisch gekoppelter Massen bewegen sich Federn und Klötze parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle, und gleiches gilt für Luftmoleküle und Schall. Man bezeichnet solche Wellen als *longitudinal*. Auf einer Wasserfläche entstehen dagegen *transversale* Wellen. Das Wasser bewegt sich im wesentlichen auf und ab, das heißt quer zur Ausbreitungsrichtung der sichtbaren Welle. Auch auf einer angezupften Saite entstehen transversale Wellen.

Eine gespannte Saite wird, wenn wir sie an irgendeinem Punkt auslenken, aufgrund einer Rückstellkraft wieder zurückschnellen. Wegen ihrer Massenträgheit schwingt sie über ihre Ausgangslage hinaus, bis die zunehmende Spannung erneut eine wachsende Rückstellkraft (allerdings nunmehr in der umgekehrten Richtung) erzeugt und die Saite wieder zurückzieht.

Man kann eine schwingende Saite auch anders beschreiben. Man nimmt die Schwingung als Welle, die über die Saite läuft und an den Enden reflektiert wird.

Angenommen, die Saite wird nach unten ausgelenkt. Nach dem Loslassen läuft dieser Knick als Welle bis zum Saitenende und wird dort wie ein Echo zurückgeworfen. Die Welle kommt aber jetzt gleichsam spiegelbildlich auf der anderen Seite zurück. Am anderen Ende kehrt sie erneut um, und das Ganze beginnt wieder von vorn.

Unter günstigen Bedingungen kann man sehen, wie solche Wellen an langen Saiten auf- und ablaufen, sie sind dann auch an der Hand zu spüren. Im New Yorker State Theater, das sich im Lincoln Center befindet, gibt es hinter der Glasfassade eine Art Vorhang aus einzelnen Drähten, auf denen Metallkugeln wie Perlen auf einer Schnur aufgereiht sind. Von einer Treppe kann man den Vorhang erreichen, von dort habe ich an einer der Schnüre gezupft und dabei tatsächlich eine deutlich erkennbare Welle angeregt, die am Draht hinablief.

Jetzt war ich natürlich neugierig, ob ich das auch mit einfachen Mitteln zu Hause beobachten konnte. Ich versuchte es zunächst mit einigen Metern Bindfaden und befestigte ein Ende an einem Türgriff. Das Ergebnis überzeugte mich nicht, keine Welle, dafür aber, nachdem der Faden wieder aufgewickelt war, ein wirres Knäuel. Mit einer Angelschnur aus Nylon hatte ich mehr Glück. Ich wickelte etwa 20 Meter ab und band ein Ende an einen Baum, wenn ich die leicht gespannte Schnur anzupfte, wanderte eine Welle zum Baum, kam von dort als Echo zurück und wurde schließlich an der Schnurrolle in meiner Hand erneut reflektiert. Sie lief einige Male so hin und her, und jedesmal, wenn sie bei mir ankam, spürte ich einen Ruck in der Hand. An einem festen Hindernis werden ja alle Wellen reflektiert – ob sie nun longitudinal sind wie Schallwellen in Luft oder transversal wie die Wellen auf einer Wasseroberfläche oder einer Saite. (Diese Reflexion ist im Anhang E näher erläutert.)

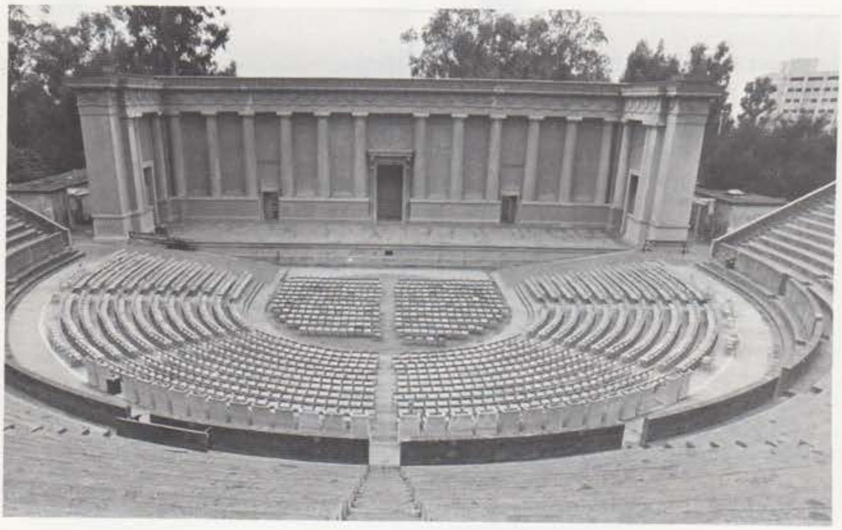
Wir können uns die reflektierte Welle hier als Echo vorstellen, das natürlich Zeit braucht, um zum Ausgangspunkt zurückzukommen. Diese Zeit hängt von der Entfernung und der Geschwindigkeit v der Welle ab, für eine gespannte Saite läßt sich v nach folgender Formel berechnen.

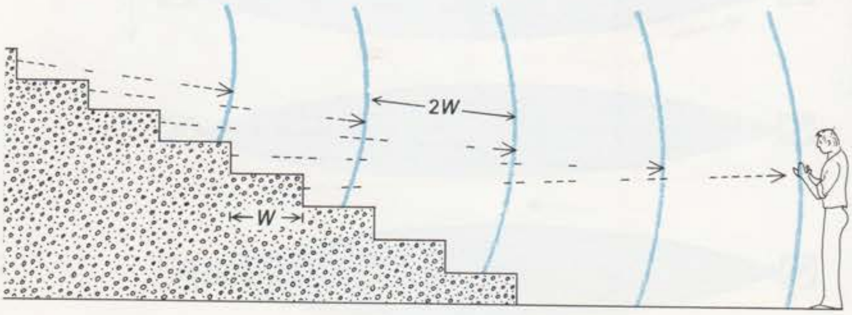
$$v = \sqrt{\frac{S}{M}}.$$

In dieser Gleichung bezeichnet S die Spannkraft der Saite, M die Masse, bezogen auf eine Einheitslänge. (Diese Formel wird in Anhang D abgeleitet.) Auf einer Saite mit großer Masse läuft die Welle also vergleichsweise langsam, bei stärkerer Spannung erhöht sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Max Mathews wurde einmal um Rat bei der Auswahl von Violinsaiten gefragt. Ein Geigenhändler wollte wissen, wie stark Stahlsaiten gespannt sein müssen, um sie auf die gleiche Tonhöhe wie Darmsaiten zu stimmen. Er hatte nicht den Mut, es einfach auszuprobieren, weil er wußte, daß die Metallsaiten stärker gespannt werden müssen, und um sein Instrument fürchtete. Mathews riet, die Saiten zu wiegen. Die Spannkräfte müssen nämlich nach unserer obigen Formel im gleichen Verhältnis zueinander stehen wie die Massen, damit für gleich lange Stahl- und Darmsaiten dieselbe Stimmung oder Tonhöhe garantiert ist.

Griechisches Theater der Universität von Kalifornien in Berkeley.





Vor den Stufen eines Amphitheaters oder den Sitzreihen eines Sportstadions kann man eine periodische Folge von Echos erzeugen, wenn man einmal in die Hände klatscht. Wenn sie laut genug sind, klingen diese Echofolgen bisweilen wie ein gestimmter Ton.

Schauen wir uns noch kurz die Geschwindigkeit v von Schallwellen an. Sie hängt nicht vom Luftdruck ab. Komprimierte Luft hat zwar eine höhere Dichte (und damit eine größere Masse pro Volumeneinheit), so daß die Geschwindigkeit eigentlich sinken müßte. Das wird aber kompensiert, weil die Elastizität der Luft im selben Maße steigt (und mit ihr der Widerstand gegen weitere Verdichtung).

Die Schallgeschwindigkeit erhöht sich hingegen bei steigender Temperatur, weil die Elastizität der Luft auf Bewegungen der Luftmoleküle beruht, die mit zunehmender Erwärmung immer schneller werden. Bei Raumtemperatur (20 Grad Celsius) beträgt die Schallgeschwindigkeit 344 Meter pro Sekunde.

Diese Geschwindigkeit hat Mersenne im Jahre 1636 als erster bestimmt, wenn auch noch etwas ungenau. Dazu hatte er einen Kanonenschuß aus einer größeren Entfernung verfolgt und die Zeit gemessen, die zwischen dem Sehen des Mündungsfeuers und dem Hören des Donners verstrichen war. Um 1750 wurden diese Messungen an der Pariser Akademie der Wissenschaften dann mit höherer Präzision wiederholt. Wir können heute umgekehrt anhand der Schallgeschwindigkeit in Luft mühelos die Entfernung abschätzen, in der bei einem Gewitter der Blitz einschlägt. Wir zählen die Sekunden zwischen Blitz und Donner und multiplizieren sie mit der Schallgeschwindigkeit. Drei Sekunden bedeuten also einen Abstand von etwa einem Kilometer, bei sechs Sekunden sind es zwei Kilometer, und so fort.

Ganz ähnlich kann man unter gewissen Bedingungen die Laufzeiten von Echos bestimmen und den Zusammenhang von Frequenz und Tonhöhe demonstrieren. Besonders geeignet sind dafür hintereinander stehende senkrechte Flächen, die alle in derselben

Abstandsweite *W* folgen. Das können die Sitzreihen eines Fußballstadions oder eines Griechischen Theaters sein oder auch nur die Stufen einer großen Treppe. Mit einem kurzen Händeklatschen kann man dann oft eine Folge von Echos hervorrufen, die von den verschiedenen Flächen zurückgeworfen werden. Um die Zeit zwischen zwei Echos zu bestimmen, müssen wir den Unterschied ihrer Laufstrecken kennen. Er entspricht $2W$ Denn um die jeweils nächste Fläche zu erreichen, muß der Schall zusätzlich eine Strecke *W* zurücklegen, dann wird er zurückgeworfen und muß noch einmal in umgekehrter Richtung den Abstand *W* durchlaufen, bevor er an den Ausgangspunkt zurückkommt. Die Zeit *T* zwischen zwei Echos entspricht also dem zweifachen Abstand *W*, geteilt durch die Schallgeschwindigkeit *v*.

$$T = \frac{2W}{v}.$$

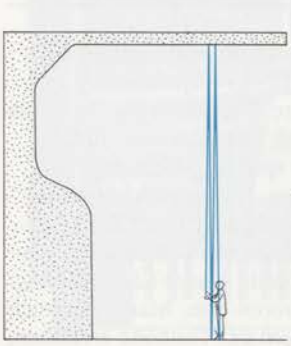
Die Zahl der Echos pro Sekunde ergibt dann eine Frequenz f·

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{2W}.$$

Angenommen, die Sitzreihen haben 90 Zentimeter Abstand, dann entstehen 191 Echos in der Sekunde – was ungefähr der Frequenz des Tons G unter dem mittleren C entspricht (siehe Seite 19). Bei Treppenstufen mit 25 Zentimetern Tiefe müßte die Frequenz 688 Echos pro Sekunde betragen, der korrespondierende Ton ist das zweigestrichene F (F″, eineinhalb Oktaven über dem mittleren C).

Viel deutlicher kann man solche Echofolgen hören, wenn man sich zwischen zwei glatte Wände stellt. So habe ich kürzlich unter dem weit überstehenden Vordach des Drama Building der Universität von Kalifornien in Santa Cruz wiederholte Echos meines Händeklatschens gehört, die immer leiser wurden. Die Decke dieser Überdachung liegt knapp sechs Meter über dem Boden, so daß etwa 28 Echos pro Sekunde entstanden, die freilich nicht mehr den Eindruck von Tonhöhe erweckten. Dagegen müßte in meinem 1,20 Meter breiten Hausflur eine sehr viel höhere Frequenz als Ton zu hören sein. Wenn ich in der Mitte stehe, also gleichzeitig von beiden Wänden Echos kommen, dann sollte er die folgende Frequenz haben.

Unter einem Dachvorsprung auf dem Gelände der Universität von Kalifornien in Santa Cruz entstehen deutliche Echofolgen. Steht man unter der hohen Decke, so läuft der Schall erst bis zur Höhe *H* nach oben und dann wieder als Echo zurück. Schlägt man genau in der Mitte des Gangs die Hände zusammen, so legt der Schall die doppelte Gangbreite *W* zurück.



$$f = \frac{v}{W} = \frac{344}{1{,}2} = 287$$

Das ist fast so hoch wie beim Ton D über dem mittleren C. Ich war mir nicht ganz sicher, ob ich wirklich einen gestimmten Ton gehört hatte, nur in Räumen mit glatten parallelen Wänden gelingt es mir bisweilen, ein „Flattern" zustande zu bringen, das sich tonähnlich anhört.

Die Frequenz, mit der eine Saite schwingt, ergibt sich ganz analog aus der Laufstrecke der transversalen Wellen. Sie legen beim Hin- und Zurücklaufen die zweifache Saitenlänge zurück. Daher beträgt die Zahl der Saitenschwingungen pro Sekunde

$$f = \frac{v}{2L}.$$

Dabei stehen L für die Länge der freischwingenden Saite und v für die Geschwindigkeit der Transversalwelle. Wie wir schon wissen, erhält man diese Geschwindigkeit, indem man die Saitenspannung S durch die Masse pro Längenabschnitt M teilt und daraus die Wurzel zieht. Jetzt können wir die Frequenz einer Saite und damit auch die Tonhöhe berechnen.

Gitarrenspieler.

$$f = \frac{\sqrt{S/M}}{2L}$$

Saiteninstrumente stimmt man anhand der Saitenspannung S. Höhere Spannungen erzeugen dabei höhere Töne, weil die Frequenz mit S zunimmt. Man kann darüber hinaus verschiedene Töne spielen, indem man die Saitenlänge L ändert. Dazu drückt etwa ein Gitarrist die Saite auf einen Bund des Griffbretts, so daß nur noch ein Teilstück schwingen kann. Die verkürzte (freie) Länge bedingt natürlich einen höheren Ton. Man kann auch leichte Schwankungen der Tonhöhe erreichen, indem man den Finger beim Greifen der Saite nicht ruhig hält, sondern leicht hin und her bewegt. Im gleichen Takt schwankt dann die Saitenspannung S und mit ihr die Frequenz f. Es entsteht ein Vibrato.

Da es keine praktikable Methode gibt, die Masse einer Saite zu „stimmen", muß sie von vornherein auf „ihren" Tonbereich ausgelegt sein, so daß die erforderlichen Spannungen nicht zu hoch werden. Beispielsweise sind die langen Baßsaiten eines Klaviers dick umsponnen, um sie schwerer zu machen. Wegen der großen Masse laufen die Wellen nur langsam über die Saite, müssen dabei aber einen längeren Weg zurücklegen als bei den höheren (und leichteren) Saiten. Damit ein Klavier in höheren Tonlagen genauso laut klingt wie im Baß, werden für einen Ton mehrere Saiten angeschlagen – zwei etwas leichter umsponnene für mittlere Lagen und drei nicht umsponnene Saiten für die höchsten Töne.

Bei Blasinstrumenten hängt die Frequenz davon ab, wie lange eine Schallwelle braucht, um in der eingeschlossenen Luftsäule einmal hin und zurück zu laufen. Eine Pfeife der Länge L, die an beiden Enden offen ist, schwingt mit einer Frequenz von.

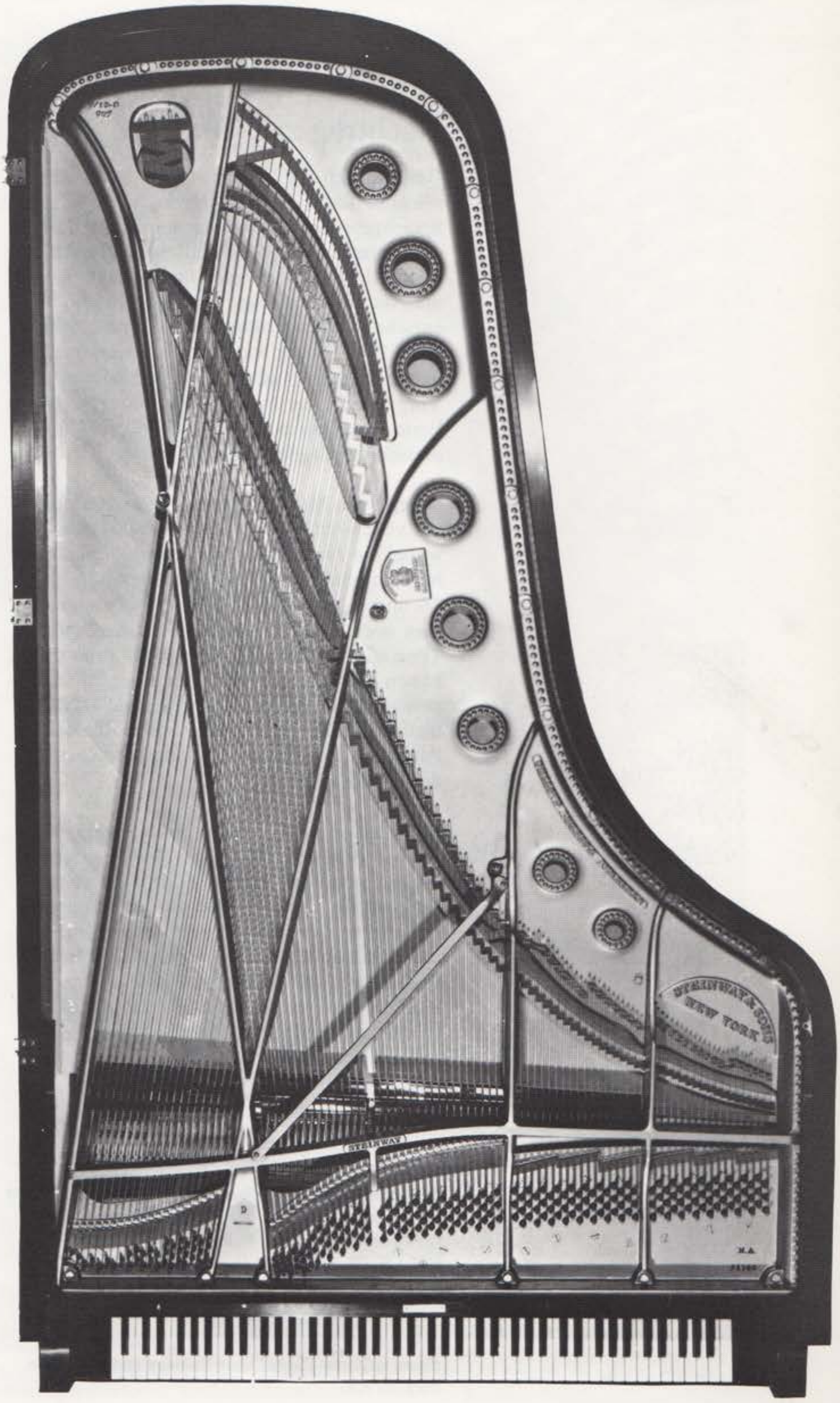
$$f = \frac{v}{2L}.$$

Eine gedackte Pfeife, die an einem Ende verschlossen ist, klingt eine Oktave tiefer als eine offene mit gleicher Länge. Eine Acht-Fuß-Orgelpfeife sollte, wenn sie beidseitig offen ist, bei einer Frequenz von etwa 70 Schwingungen pro Sekunde ungefähr zwei Oktaven unter dem mittleren C klingen. Eine offene, 16 Fuß lange, oder eine gedackte, acht Fuß lange Pfeife ist noch einmal eine Oktave tiefer.

Orgelpfeifen werden in Registern angeordnet. Jedes davon enthält gerade so viele Pfeifen wie die Klaviatur Tasten. Die Stimmlage eines Registers läßt sich an der Länge seiner größten Pfeife kennzeichnen. So klingt ein 16-Fuß-Register eine Oktave höher als ein Acht-Fuß-Register, weil die korrespondierenden Pfeifen doppelt so lang sind.

Darüber hinaus weichen die Pfeifen verschiedener Register auch in ihren Formen oder anderen Merkmalen voneinander ab. So entsteht jeweils ein charakteristisches *Timbre*. Man kann auch mehrere Register ziehen, um besondere Klangfarben zu erzielen. Dafür sind zum Beispiel die *Obertonregister* vorgesehen. der Nazard, ein $2\frac{2}{3}$-Fuß-Register, das eine Oktave und eine Quinte über dem Acht-Fuß-Register klingt, der Tierce mit $1\frac{3}{5}$-Fuß liegt um zwei Oktaven und eine große Terz darüber; und schließlich ist der Larigot, ein $1\frac{1}{3}$-Fuß-Register, um zwei Oktaven und eine Quinte höher als das Acht-Fuß-Register. Diese drei Obertonregister können zusammen mit einem Acht-, Vier- oder Zwei-Fuß-Register manchmal recht herb und fremd klingen. Wer das zum ersten Mal hört, hat dann vielleicht den Eindruck, die Melodie werde von lauter falschen Tönen begleitet.

In diesem Kapitel haben wir untersucht, wie die Höhe eines Tons von der Frequenz einer Schwingung abhängt. Bei einer Sirene ergeben sich Frequenz und Tonhöhe daraus, wieviele Löcher in einer Sekunde an der Düse vorbeikommen. Auch eine Folge von Echos an gleichmäßig gestaffelten Hindernissen kann einen Ton ergeben, wobei die Frequenz durch die Zahl der Echos festgelegt ist, die in einer Sekunde entstehen. Für eine schwingende Saite ist die Zeit maßgebend, in der eine Transversalwelle von einem Ende zum anderen und wieder zurück läuft. Und schließlich ergibt sich die Frequenz einer Orgelpfeife aus der doppelten Laufzeit einer (longitudinalen) Schallwelle durch die Luftsäule im Pfeifenrohr. Im nächsten Kapitel sollen die Begriffe Frequenz und Periodizität am Beispiel von Sinuswellen und Resonanz genauer untersucht werden.



Die Saiten eines Konzertflügels.

Nachtrag zur Tonhöhe

Ursprünglich ein Begriff aus der Musik, bezeichnet *Tonhöhe* im psychologischen Sprachgebrauch eine wahrgenommene Klangeigenschaft. Diese Empfindung für Tonhöhen war in der Musik Allgemeingut, lange bevor man die physikalischen Ursachen fand. Die entscheidende musikalische (und psychologische) Entdeckung war hier der Zusammenhang zwischen Tonhöhe und periodischen Vorgängen einer bestimmten Frequenz. Die Periodizität beruht auf der ständigen Wiederholung der gleichen Wellenform•

Klänge von Musikinstrumenten setzen sich aus vielen einzelnen *Partialtönen* zusammen, wobei die *Frequenzkomponenten* in einem harmonischen Verhältnis stehen. f_0, $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$ und so fort. Neben der Tonhöhe nimmt man noch andere Klangeigenschaften wahr. Töne wirken hell oder gar schrill, wenn die hohen Frequenzkomponenten oder Partialtöne wesentlich stärker vertreten sind als die niedrigen. Dominieren umgekehrt die tiefen Partialtöne, so wirkt die Klangfarbe eher dumpf und dunkel.

Bei Hi-Fi-Anlagen läßt sich die Klangfarbe der Musik über Höhen- und Tiefenregler ändern, ohne daß die Tonhöhe davon beeinflußt würde. Erreicht wird nur, daß nunmehr Partialtöne mit anderen Frequenzen am lautesten wiedergegeben werden. An den Frequenzen selbst ändert sich nichts, insbesondere bleibt die Frequenz f_0 des ersten Partialtons, und das heißt: der *Grundwelle*, konstant••

• Die tatsächliche Tonhöhe solcher periodisch erzeugten Klänge ist nicht immer eindeutig herauszuhören, in einigen Fällen empfindet auch ein Musiker den Ton eine Oktave höher oder tiefer, als er tatsächlich ist.

•• Selbst wenn der erste Partialton physikalisch gar nicht vorhanden ist, bleibt die Tonhöhe erhalten. Auf dieses psychologische Phänomen kommen wir in einem späteren Kapitel über Rameau und Harmonie noch zurück.

In der Musik werden freilich auch Klänge eingesetzt, bei denen man Tonhöhe und Klangfarbe anfangs nur schwer eindeutig bestimmen kann. Dazu gehören reine Sinustöne und Glockentöne, Schnalzlaute, die Klänge der Maultrommel und Rauschen, das sich auf eine gewisse Frequenz-Bandbreite beschränkt.

Sinustöne, die nur aus einem einzelnen harmonischen Partialton bestehen, nehmen hier eine Sonderstellung ein. Sie vermitteln kein so sicheres Gefühl von Tonhöhe wie (zusammengesetzte) periodische Klänge. Hier können die Lautstärke und Unterschiede zwischen beiden Ohren den subjektiven Eindruck geringfügig beeinflussen. Bei periodischen Klängen, die sich aus mehreren Partialtönen zusammensetzen, hat man dagegen ein recht feines Gespür für reine Oktaven. Denn ein Ton A (der gerade eine Oktave über A liegt), ist mit all seinen Partialtönen bereits in den *Obertönen* von A enthalten•

Bei reinen Sinustönen kann man die Oktaven nicht mehr so sicher bestimmen. Da es nur eine Frequenzkomponente gibt, sind Tonhöhe und Klangfarbe nicht mehr zu trennen. Mit musikalisch geschultem Gehör kann man die Tonhöhe von Sinuswellen zwar ohne weiteres feststellen, aber wer diese Erfahrung nicht hat, läßt sich leicht verunsichern. Wie unbefangene Zuhörer auf Frequenzänderungen bei reinen Sinustönen reagieren, hat man in psychologischen Tests untersucht. Die Probanden sollten dabei jeweils angeben, wann sich ihrer Empfindung nach die Tonhöhe verdoppelt hatte. Aus diesen Angaben stellten die Psychologen dann eine „Tonleiter" für Sinuswellen auf, bei der Frequenz und Tonhöhe nicht mehr in einem einfachen Verhältnis zueinander standen. Und so etwas wie die Oktave wird gar nicht mehr als Sonderfall empfunden. Wahrscheinlich entsteht nicht

• Ein Ton A mit der Grundfrequenz a hat Obertöne mit Frequenzen $2a$, $3a$, $4a$ und so fort. Der oktavierte Ton von A hat die Grundfrequenz $2a$, so daß sich für die Obertöne ergibt: $4a$, $6a$, $8a$ und so weiter. All diese Frequenzen sind auch in der Partialtonreihe von A vertreten.

der Eindruck steigender Tonhöhe, sondern die Klangfarbe scheint schrittweise heller zu werden. Nachprüfen ließe sich das freilich nur mit Hilfe von Klängen, bei denen Tonhöhe und Klangfarbe unabhängig voneinander variiert werden können.

Glocken einer Kirche oder als Instrument eines Sinfonieorchesters haben zwar keinen periodischen Klang, aber doch eine halbwegs definierte Tonhöhe, weil die stärksten Partialtöne wenigstens annähernd in einem harmonischen Verhältnis stehen. Deshalb kann man auch Melodien damit spielen.

Schnalzlaute, Zischen und Rauschen sind nicht periodisch, besitzen aber eine Klangfarbe. Auch mit diesen Klängen kann man Melodien spielen, wenngleich sie für harmonische Akkorde nicht zu gebrauchen sind. Daß eine dunklere oder hellere Klangfarbe ähnlich auf uns wirkt wie tiefe oder hohe Töne, auch wenn die Periodizität fehlt, verwundert kaum. Schließlich klingen die höheren Töne eines Musikinstruments gewöhnlich strahlender und heller als die tiefen.

Aber Klänge, die nicht periodisch und harmonisch sind, *suggerieren* nur eine Art Tonhöhe. Ausschlaggebend ist dann, welche Frequenz bei diesen Klängen mit der größten Intensität vertreten ist, anders gesagt, wo das Frequenzspektrum sein Maximum hat. Und das können wir mit dem Klangregler einer Hi-Fi-Anlage ändern, also auch die subjektiv empfundene „Tonhöhe“

Man kann sich auch spezielle periodische Klänge aus Partialtönen vorstellen, die keine eindeutige Tonhöhe haben, aber sie lassen sich nicht mit den traditionellen Musikinstrumenten erzeugen. Bis auf diese Ausnahmen heißt Periodizität jedoch immer, daß Tonhöhe und Frequenz (der Grundschwingung) fest verknüpft sind. Wenn wir im folgenden die Tonhöhe mit der Frequenz identifizieren, dürfte dadurch eigentlich keine Verwirrung entstehen – auch wenn wir die Psychologen damit vor den Kopf stoßen, weil wir eine Empfindung (Tonhöhe) mit einer physikalischen Größe gleichsetzen.

Sinuswellen und Resonanz

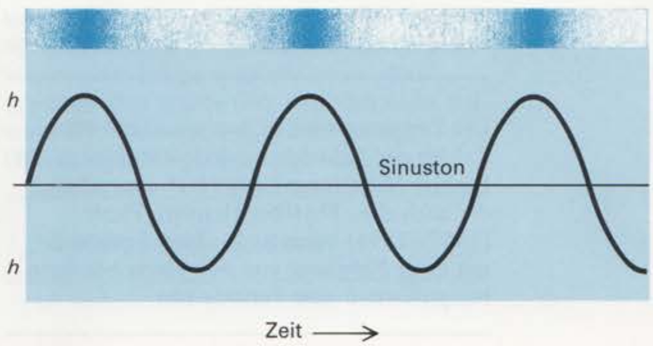
Wir wissen inzwischen, daß die Wellen, die von einer Schallquelle ausgehen, nichts anderes als Schwankungen des Luftdrucks sind. Alles, was wir hören, wird also letzten Endes von solchen Luftdruckschwankungen im Ohr hervorgerufen. Sind es Töne eines Musikinstruments, dann fällt und steigt der Druck im wesentlichen periodisch, und die Frequenz der periodischen Schwankungen entspricht der Tonhöhe.

Wir können das mit einem Mikrofon aufnehmen und mit einem Kathodenstrahloszillographen sichtbar machen, wie sich der Schalldruck in der Luft zeitlich ändert. Auf dem Bildschirm sehen wir die Form einer Schallwelle. Wie man sie untersuchen kann und warum unser Gehör auf die einzelnen Formen verschieden reagiert, das wollen wir in diesem Kapitel diskutieren.

Bei Experimenten benutzt man unter anderem den *reinen Sinuston* oder die *Sinuswelle*, die einer sinusförmigen Luftdruckschwankung entspricht. (Im Nachtrag zu diesem Kapitel sind die mathematischen Zusammenhänge erläutert.) Reine Sinustöne lassen sich eigentlich nur im Labor herstellen, aber auch eine Stimmgabel schwingt beinahe sinusförmig, wenn man sie nur ganz leicht anschlägt.

Musikalisch sind solche Klänge ziemlich uninteressant; tiefe Sinustöne erinnern an ein altes, brummendes Radiogerät, höhere an eintöniges, gleichmäßiges Pfeifen. Sie klingen für uns fremd und unnatürlich. In Räumen mit starkem Nachhall kann man kaum feststellen, aus welcher Richtung sie kommen. Manche Menschen empfinden die Höhe von Sinustönen unterschiedlich, je nachdem, auf welchem Ohr sie sie hören. Die Mediziner nennen das *diplacusis binauralis*. Die Stimmung reiner Sinustöne scheint sich auch bei normalem Gehör zu verschieben, wenn die Lautstärke beträchtlich zu- oder abbnimmt. Bei harmonischen Tönen macht sich das fast nicht bemerkbar. Unterhalb des mittleren C wirken Sinustöne zudem viel leiser als der natürliche Klang eines Musikinstruments – bei gleicher Schallstärke und Tonhöhe.

Zum Glück kommen Sinustöne fast nur in Büchern über Musik oder Psychologie, in Akustiklabors und manchmal auch bei schlechten Synthesizern vor. Warum sind sie überhaupt wichtig, um musikalische Klänge zu verstehen? Das hat zum Teil mathematische Gründe, aber auch physiologische und psychologische Aspekte der Wahrnehmung von Schallwellen überhaupt spielen hier eine Rolle.



Ein reiner Sinuston.

Wenn sich der Luftdruck sinusförmig mit der Zeit ändert, also ein reiner Sinuston entsteht, haben wir es mathematisch mit einer fundamentalen Funktion zu tun. So läßt sich jede beliebige periodische Änderung des Luftdrucks als Summe einzelner Sinuswellen darstellen (wir werdem darauf noch ausführlich eingehen). Umgekehrt kann das menschliche Ohr – neben manchem anderen – aus einem Klanggemisch einzelne sinusförmige Komponenten herausfiltern. Wenn wir ein Musikstück hören, regen die Sinuskomponenten bestimmter Frequenzbereiche unterschiedliche Nervenzellen an, die ihre Signale an das Gehirn weiterleiten. Ähnlich wie bei einer mathematischen Analyse werden Töne so in ihre sinusförmigen Frequenzkomponenten zerlegt.

Eine Sinuswelle läßt sich anhand von drei Eigenschaften vollständig beschreiben. Amplitude, Periode und Phase. Als *Amplitude* bezeichnet man die größte Auslenkung vom Mittelwert der Schwankung oder der Nullage. In der Abbildung oben ist die Amplitude mit *h* bezeichnet. Bei einer Schallwelle schwankt der Luftdruck periodisch zwischen Zunahme

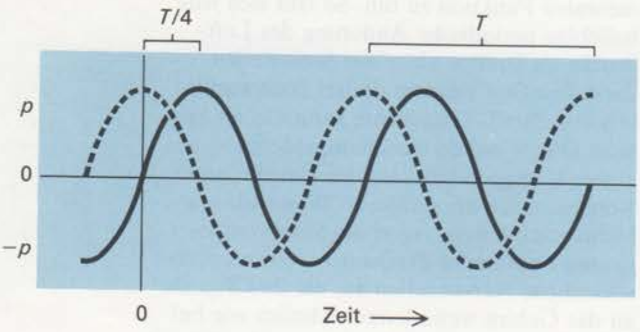
(p) und Abnahme ($-p$) gegenüber einem mittleren Druck (als Nullage).

Die *Periode T* entspricht der Zeit, in der nach einer vollen Schwingung wieder die maximale Auslenkung erreicht wird, sie ist gewöhnlich in Sekunden angegeben. Aus dem Kehrwert von T erhält man die Anzahl der Auslenkungen pro Sekunde, also gerade die Frequenz f der Sinuswelle:

$$f = 1/T$$

Die Frequenz wird in Auslenkungen oder Zyklen pro Sekunde ausgedrückt oder in der Einheit *Hertz* (abgekürzt *Hz*)• angegeben, die nach dem Physiker Heinrich Hertz (1857–1894) benannt ist. Eine Sinuswelle mit einer Frequenz von 440 Hertz hat dann beispielsweise eine Periode von

$$T = 1/440 = 0{,}0022727 \text{ Sekunden.}$$



•Vielfach wird der Begriff Frequenz auch für Schwingungen gebraucht, die sich aus mehreren sinusförmigen Frequenzkomponenten zusammensetzen, um die Periodizität zu kennzeichnen, mit der sich diese Oszillation wiederholt. Wir wollen *Frequenz* und die Einheit *Hertz* im folgenden nur für Sinuswellen verwenden. Bei komplexen Schwingungen werden wir die Zahl der Zyklen pro Sekunde als *Periodizität* bezeichnen. Das ist zwar etwas eigenwillig und erscheint umständlich, aber es hilft, Verwechslungen zu vermeiden.

Umgekehrt entspricht eine Periode von $T = 1/1000$ Sekunden einer Frequenz von

$$f = 1/0{,}001 = 1000 \text{ Hertz.}$$

Als dritte Eigenschaft einer Sinuswelle müssen wir noch die *Phase* erklären. Sie ist in der Abbildung links unten für zwei Sinusschwingungen derselben Frequenz und Amplitude dargestellt, die jedoch zu verschiedenen Zeitpunkten ihre größte Auslenkung erreichen oder durch die Nullage gehen. Die Zeitdifferenz entspricht gerade dem Phasen- oder Gangunterschied der beiden Wellen.

Der französische Mathematiker François Marie Charles Fourier (1772–1837) fand bei seiner Analyse periodischer Wellen heraus, daß sie sich stets als Summe von Sinuswellen beschreiben lassen. Darüber hinaus stehen die Frequenzen der einzelnen Sinuskomponenten in einem einfachen Verhältnis: Sie sind alle ganzzahlige Vielfache derselben Frequenz, also f_0, $2f_0$, $3f_0$ und so fort.

Jede Sinuswelle ist durch drei Größen vollständig bestimmt: *Amplitude* (oder maximale Auslenkung p), *Periode* (die Zeit T zwischen zwei aufeinanderfolgenden Maxima) und die *Phase* (die sich aus dem Zeitunterschied zwischen den Nulldurchgängen verschiedener Sinuswellen ergibt). Die durchgezogene Kurve unterscheidet sich von der gestrichelten nur in der Phase. Sie schneidet die Achse zur Zeit $t=0$, während die gestrichelte Kurve dort bereits ihr Maximum erreicht. Der Nulldurchgang liegt schon eine Viertel Periode zurück. Die Welle, die einer Sinuswelle um einen Phasenunterschied $T/4$ vorausläuft, entspricht einer Kosinuswelle.

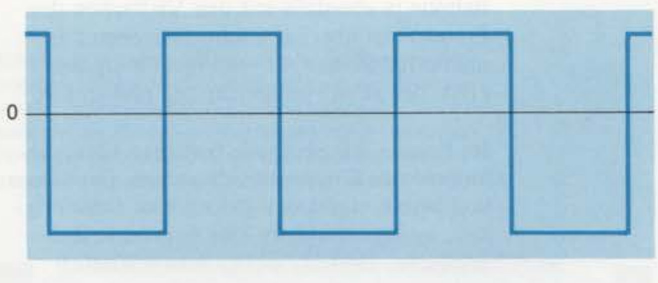
Je nachdem, wie kompliziert eine Wellenform ist, erfordert die Fourier-Analyse mehr oder weniger Sinuskomponenten, es können auch unendlich viele sein. Allerdings läßt sich ihre Zahl reduzieren, wenn man die Welle nur näherungsweise mit der jeweils gewünschten Genauigkeit beschreibt. Das gilt insbesondere für die sehr einfach anmutende *Rechteckschwingung* in der Abbildung rechts unten, deren Fourier-Darstellung unendlich viele Komponenten einschließt. Angenommen, die Amplitude sei 1 und die Frequenz betrage f_0, dann haben die Sinuskomponenten die Frequenzen f_0, $3f_0$, $5f_0$, $7f_0$ … (das geht unendlich so weiter), und die Amplituden betragen 1, 1/3, 1/5, 1/7 … (und so weiter). Natürlich müssen auch die Phasen stimmen, wie die untere Abbildung zeigt. Wenn man die Rechteckkurve näherungsweise mit einer endlichen Zahl von Komponenten beschreibt, werden die Kanten unscharf. Solche Verzerrungen findet man auch bei Rechteckwellen aus einem elektronischen Verstärker.

Bemerkenswert und charakteristisch für die Rechteckkurve sind die ungeradzahligen Frequenzkomponenten. Die meisten periodischen Schallwellen setzen sich dagegen aus geradzahligen *und* ungeradzahligen Frequenzanteilen zusammen. Allerdings machen gedackte Orgelpfeifen und einige Blasinstrumente eine Ausnahme, denn bei ihnen sind überwiegend ungeradzahlige Frequenzkomponenten vertreten.

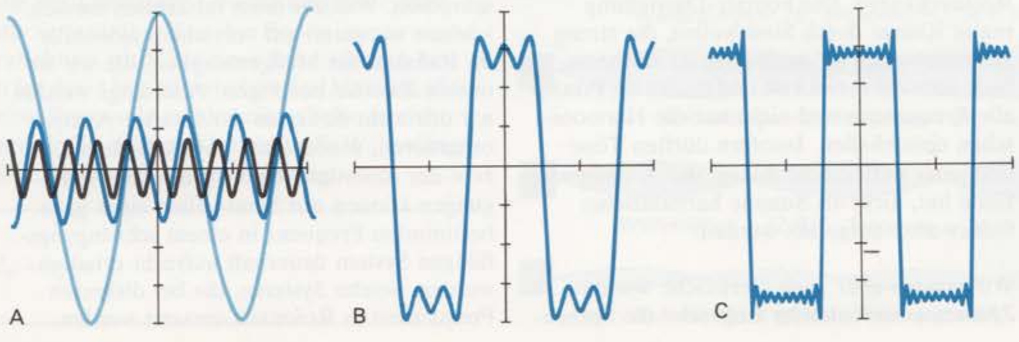
Die Komponenten periodischer Klänge haben eigene Namen, die in der Tabelle auf der nächsten Seite zusammengestellt sind. Hier muß man auf die unterschiedliche Zählweise bei den Obertönen einerseits und den Harmonischen oder Partialtönen andererseits achten. Die Frequenz $4f_0$ entspricht der *vierten* Harmonischen und dem *vierten* Partialton, aber dem *dritten* Oberton.

Bei Tönen (periodischen Klängen) wird man immer von Harmonischen sprechen, es gibt in der Musik aber auch Klänge (etwa von Schlaginstrumenten), deren Frequenzkomponenten nicht alle harmonisch sind und somit keinen ganzzahligen Vielfachen einer niedrigsten Frequenz entsprechen. Beispielsweise könnten die Frequenzanteile eines „frei“ schwingenden Stabes (der natürlich nicht frei schwebt, sondern mit möglichst geringer Dämpfung aufliegt) wie folgt aussehen.

f_0	$2{,}756f_0$	$5{,}404f_0$	$8{,}933f_0$



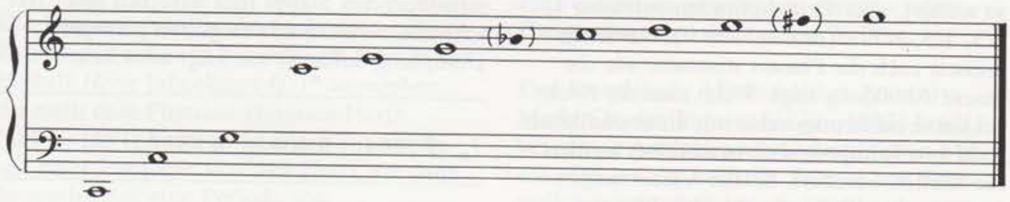
Eine Rechteckwelle.



A. Drei Sinuswellen mit den Frequenzen f_0, $3f_0$ und $5f_0$.
B. Überlagerung der drei Sinuswellen von A durch Addition.
C. Annäherung einer Rechteckwelle durch Sinuskomponenten: die Summe der ersten 19 Glieder der Fourier-Reihe.

Bezeichnungen für die Frequenzkomponenten

Frequenz	Harmonische	Obertöne	Partial- oder Teiltöne
f_0	erste Harmonische oder Grundwelle	Grundton	erster Partialton
$2f_0$	zweite Harmonische	erster Oberton	zweiter Partialton
$3f_0$	dritte Harmonische	zweiter Oberton	dritter Partialton
$4f_0$	vierte Harmonische	dritter Oberton	vierter Partialton



Die zwölf ersten Harmonischen des Tons C^{-1} der zwei Oktaven unter dem mittleren C liegt.

Es wäre widersinnig, hier von „nicht-harmonischen Harmonischen" zu sprechen, man weicht besser auf „nicht-harmonische Partialtöne" aus, zumal die Zählweise der Partialtöne ja ebenfalls mit den Vielfachen der Frequenzen übereinstimmt. Der erste Partialton hat immer die niedrigste Frequenz ($1f_0$), der zweite entspricht $2f_0$, und so fort.

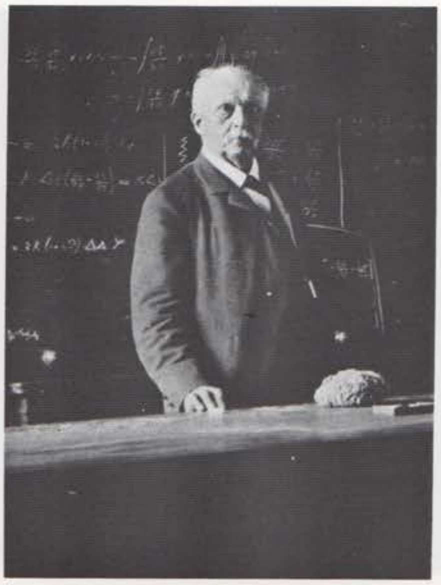
Im Prinzip läßt sich jede beliebige Klang als Summe von Sinuswellen darstellen. Bei Tönen und Musik ergibt sich jedoch eine Schwierigkeit, weil sie nur über eine begrenzte Zeit andauern. Deshalb müßte man unendlich viele verschiedene Harmonische aufsummieren – aus ähnlichen Gründen wie bei der Rechteckkurve. Die Fourier-Darstellung realer Klänge durch Sinuswellen, die streng genommen „ewig" andauern, ist mathematisch überaus verwickelt und müßte im Prinzip alle Frequenzen und nicht nur die Harmonischen einschließen. Insofern dürften Töne und jeder periodische Klang, der Anfang und Ende hat, nicht als Summe harmonischer Sinuswellen aufgefaßt werden.

Wir müssen aber auch Geräusche wie das Zischen ausströmender Luft oder die Sprachlaute *s* und *sch* beschreiben. Man kann sie als Überlagerung von Sinuswellen auffassen, deren Frequenzen dicht beieinanderliegen. Wenn man das *sch* wiederholt und die Wellenform vergleicht, entstehen immer Abweichungen. Zwar wird die Schalleistung in beiden Fällen innerhalb irgendeines kleinen Frequenzbereichs annähernd gleich sein, aber das gilt nicht mehr für die Amplituden und Phasen der einzelnen Komponenten. Allerdings hören wir keinen Unterschied zwischen den beiden *sch*-Lauten.

Trotz dieser Ungereimtheiten dürfen wir getrost auf die Vorstellung von Sinuswellen zurückgreifen, um beliebige Klänge zu beschreiben. Was wir dann tatsächlich messen, können wir damit gut verstehen, jedenfalls im Rahmen der Meßgenauigkeit, die wir für unsere Zwecke benötigen. Allerdings werden wir uns nicht direkt an der Fourier-Analyse orientieren, sondern am physikalischen Konzept der *Resonanz*. Unter speziellen Bedingungen können nur Sinuswellen einer ganz bestimmten Frequenz in einem schwingungsfähigen System dauerhaft aufrecht erhalten werden. Solche Systeme, die bei diskreten Frequenzen in Resonanz versetzt werden, heißen *Resonatoren*. Mit ihnen kann man umgekehrt einzelne Frequenzkomponenten aus einer Schallwelle aussortieren und messen. Im 19. Jahrhundert experimentierte Hermann von Helmholtz mit einfachen Resonatoren aus Glas. Diese *Helmholtz-Resonatoren* waren Hohlkugeln mit zwei gegenüberliegenden Öffnungen, eine davon wurde auf die Schallquelle gerichtet, die andere war passend für das Ohr geformt und wurde wie ein Hörrohr angesetzt. Wenn die Schallquelle Frequenzkomponenten erzeugt, die weitgehend mit der Resonanzfrequenz des Hohlraumresonators übereinstimmen, dann wird er diese Harmonische verstärken, und man hört nur noch sie. Sie klingt sogar nach dem Abstellen der Schallquelle noch für kurze Zeit nach. Helmholtz benutzte Resonatoren mit verschiedenen Eigenfrequenzen, um die Intensitäten von harmonischen Partialtönen zu messen. Darüber hinaus bestimmte er auch die Frequenzen der nicht-harmonischen Partialtöne von Glocken und Gongs.

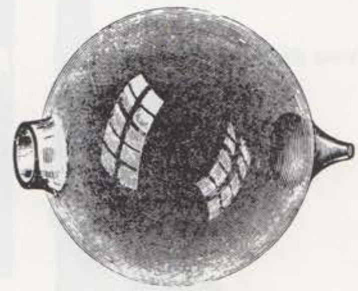
Ähnliche Resonanzen kann man am aufgeklappten Flügel oder Klavier beobachten. Wir treten das Pedal, so daß die Filzdämpfer von den Saiten gehoben werden, und pfeifen oder summen nun dicht über den Saiten. Wenn wir damit aufhören, klingt noch eine Zeitlang ein Ton in gleicher Höhe nach, der immer leiser wird. Die Klaviersaiten wirken wie Resonatoren. Nur Saiten, die mit den Frequenzen des Pfeiftons schwingen können, werden angeregt; die übrigen bleiben stumm. Eine Klaviersaite kann nicht nur mit einer einzigen Frequenz schwingen. Ihren einfachsten Schwingungszustand, die *Grundschwingung*, haben wir bereits als Welle betrachtet, die mit konstanter Geschwindigkeit v über die Saite läuft und an den Enden immer wieder reflektiert wird. Bei einer Saitenlänge L beträgt der Abstand zwischen den Maxima, die eine Sinuswelle auf derselben Seite erreicht, gerade $2L$. Dieser Abstand heißt Wellenlänge. Die Resonanzfrequenz f_0 beträgt

$$f_0 = \frac{v}{2L}.$$



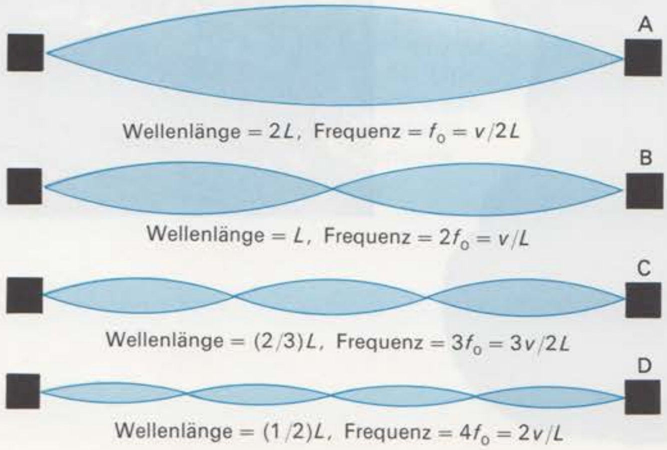
Hermann von Helmholtz.

Helmholtz-Resonator.



Das Schwingungsmuster der Grundfrequenz und der nächsthöheren Resonanzfrequenzen $2f_0$, $3f_0$ und $4f_0$ ist unten auf dieser Seite abgebildet.

Eine Saite schwingt bei verschiedenen Resonanzfrequenzen in anderen Schwingungsformen: stehenden Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen. „Stehen" bedeutet dabei, daß die Amplitude immer im selben Punkt der Saite maximal ist. Die Resonanzschwingungen entsprechen den Harmonischen einer Saite.



Der Kontrabaß wird im Orchester gewöhnlich mit dem Bogen gestrichen...

...oder – vor allem in der Jazzmusik – gezupft, wie hier von Reggie Workman.

Viola d'amore.

Gamelans.

Der Jazz-Trompeter Howard McGee kann mit lockerem Ansatz ziemlich tiefe Töne blasen; sein Kollege Miles Davis schaut zu.

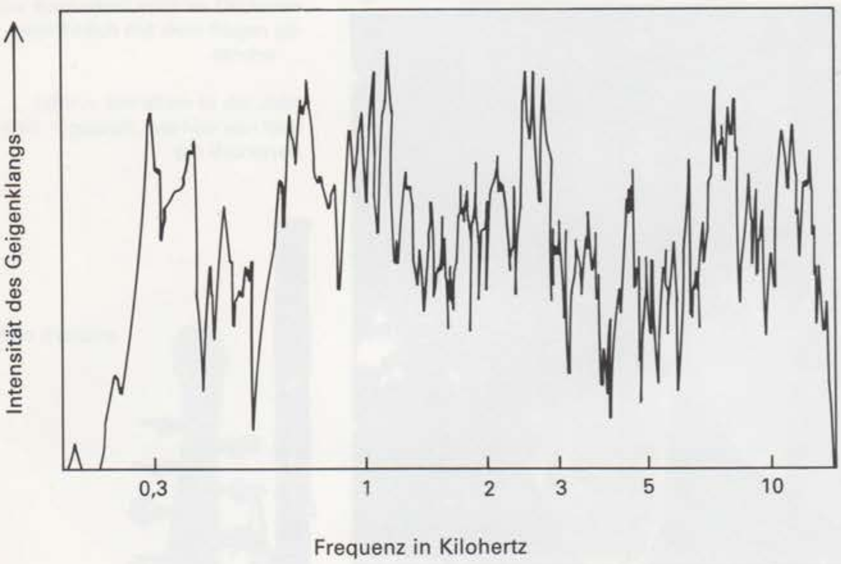
Die schmalen, gespannten Lippen von Woody Shaw verraten, daß er aus seiner Trompete gerade sehr hohe Töne herausholt.

Wenn man eine gespannte Saite anzupft oder anschlägt, werden komplexe Schwingungen aus vielen Harmonischen angeregt. Länge, Masse und Spannung der Saite legen dabei die Tonhöhe (Periodizität) fest, aber nicht die genaue Wellenform. Wie stark die einzelnen Harmonischen anklingen, hängt davon ab, ob man die Saite streicht oder zupft und an welcher Stelle man den Bogen ansetzt. Der Unterschied in der Klangfarbe ist deutlich zu hören, selbst dann, wenn die Resonanzfrequenzen übereinstimmen. Ein gestrichener Ton hat ein völlig anderes Timbre als das (gezupfte) Pizzicato. Auch das Cembalo (mit gezupften Saiten) klingt völlig anders als das (angeschlagene) Klavier.

Viele Musikinstrumente enthalten Resonatoren. Beispielsweise stehen unter den hölzernen Klangstäben der Xylophone und Marimbas senkrechte Metallrohre, und unter den Metallstäben der Gamelans liegt Bambus, um bestimmte Partialtöne der Klangstäbe zu verstärken, so daß sie nachklingen. Die alten Instrumente Viola d'amore und Viola bastarda und das Baryton hatten außer den Spielsaiten noch zusätzliche Resonanzsaiten. Diese *sympathetischen Saiten* gerieten bei bestimmten Partialtönen der gestrichenen Saiten ins Schwingen und klangen weiter, auch wenn bereits ein anderer Ton gegriffen oder der Bogen abgesetzt wurde.

Die Luft in den langen gewundenen Röhren der Blechblasinstrumente gerät bei Eigenfrequenzen in Resonanz, die in einem harmonischen Verhältnis stehen. Welcher Partialton dann tatsächlich angeblasen wird, hängt vom Ansatz, das heißt, im wesentlichen der Lippenspannung, ab. Auch die Innenbohrungen der Holzblasinstrumente sind Resonatoren, deren Länge und Eigenfrequenz variieren, wenn man die Grifflöcher öffnet oder schließt.

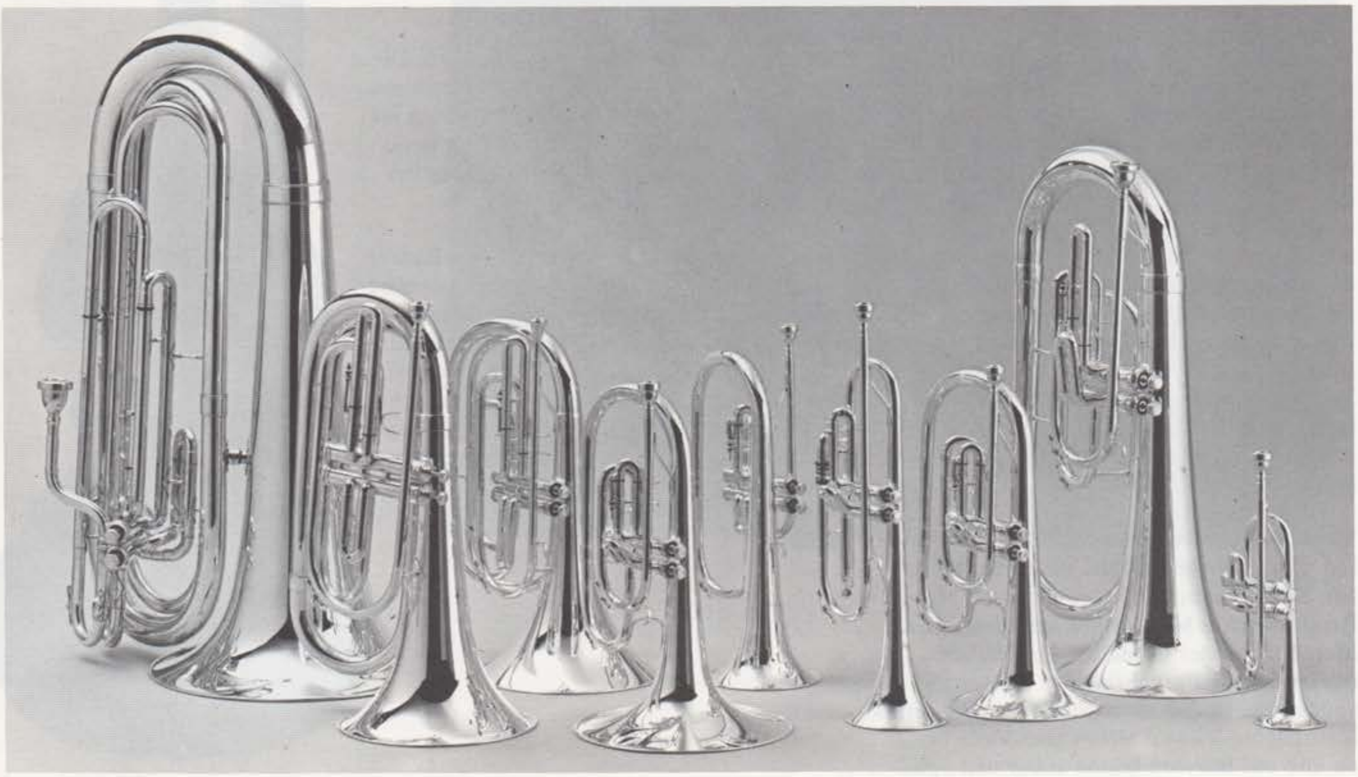
Ein Holzblasinstrument, das Fagott.



Resonanzeigenschaften bestimmen nicht nur bei Musikinstrumenten das Timbre oder die Klangfarbe, sondern sie sortieren auch bei der menschlichen Stimme gewisse Resonanzbereiche aus dem Schwingungsspektrum der Stimmbänder aus. (Wir kommen darauf im vorletzten Kapitel im Zusammenhang mit dem Timbre zurück.) Die Klangeigenschaften spiegeln sich dabei in den Intensitäten wider, mit denen verschiedene Frequenzen vertreten sind. Das ist links oben für eine Violine gezeigt,

Eine Violine gerät bei manchen Frequenzen stärker in Resonanz als bei anderen. Diese Kurve zeigt den Intensitätsverlauf, der bei einer berühmten Guarneri-Geige gemessen wurde. Dazu wurden Sinusschwingungen über den Steg auf Stimmstock und Korpus übertragen, deren Amplitude konstant blieb, während die Frequenz langsam erhöht wurde. Für die jeweils angeregte Schallwelle ließ sich so die Lautstärke registrieren.

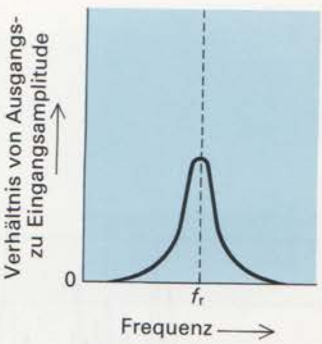
Moderne Blechblasinstrumente.



deren Klangfarbe entscheidend durch die Resonanz von Boden und Decke beeinflußt wird. Die Schwingungen der Saite werden dabei vom Steg auf die Decke und über den Stimmstock auf den Boden übertragen. Damit die Violine gut klingt, müssen bestimmte Partialtöne intensiver („lauter") sein als andere. Wenn in der ungleichmäßig anmutenden Kurve die Intensität nicht an den richtigen Stellen abfällt (und nicht bestimmte Harmonische besonders stark unterdrückt werden), hat sie erheblich schlechtere Klangeigenschaften.

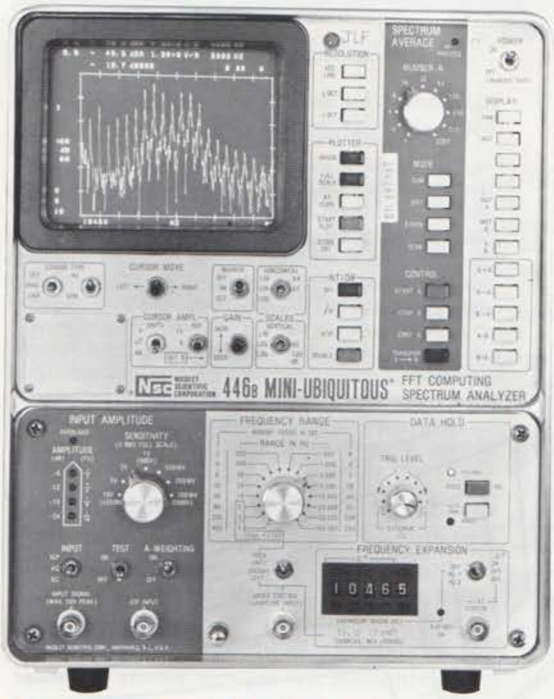
Mechanische Resonatoren oder Hohlraumresonatoren sind meist unerläßlich, um mit Musikinstrumenten einen klangvollen Ton zu erzeugen. Wenn man diese Töne jedoch analysieren will, greift man heute zunehmend auf Meßgeräte zurück, die mit elektronischen Filtern arbeiten. Um die Harmonischen herauszufinden, kann man den Ton mit einem Mikrofon aufnehmen und dessen elektrische Signale mit einem handelsüblichen Gerät auswerten. Wie ein solches Filter arbeitet, läßt sich mit Hilfe der Kurve in der Abbildung oben rechts beschreiben. Dabei ist für die verschiedenen Frequenzen angegeben, in welchem Verhältnis die Signalamplitude hinter dem Filter zur Eingangsamplitude steht. Bei der Resonanzfrequenz f_r ist die relative Ausgangsamplitude am größten, daß heißt, Signale dieser Frequenz werden gut durchgelassen, nur wenig höhere oder tiefere Frequenzen werden unterdrückt.

Partialtöne kann man mit einem *Spektrumanalysator* messen. Dann erscheinen die Signalkurven auf einem Bildschirm, wobei die Intensitäten senkrecht über den Frequenzen aufgetragen sind. Auf dem Photo zeigt der Analysator gerade eine Kurve mit vielen ausgeprägten Spitzen. Jede davon repräsentiert eine ganz bestimmte, diskrete Frequenz, einen Partialton aus dem Gesamtklang. Diese Frequenzspitzen werden gewöhnlich als *Linien* bezeichnet, das gesamte Kurvenbild ist ein *Linienspektrum*.

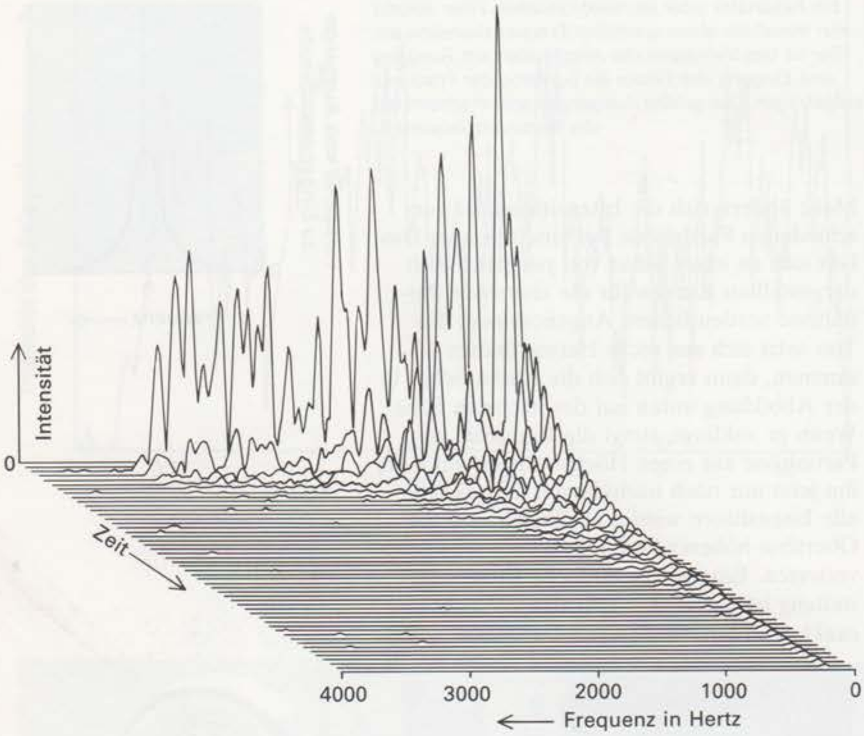


Ein Resonator oder ein elektronisches Filter spricht nur innerhalb eines schmalen Frequenzbereichs an. Hier ist das Verhältnis der Amplituden am Ausgang und Eingang des Filters als Funktion der Frequenz aufgetragen. Das größte Ausgangssignal erscheint bei der Resonanzfrequenz f_r.

Meist ändern sich die Intensitäten der verschiedenen Partialtöne bei einem Klang. Das läßt sich an einer Schar von perspektivisch dargestellten Kurven für die einzelnen Partialtöne verdeutlichen. Angenommen, der Ton setzt sich aus sechs Harmonischen zusammen, dann ergibt sich die Kurvenschar in der Abbildung unten auf der nächsten Seite. Wenn er anklingt, steigt die Intensität aller Partialtöne auf einen Höchstwert, wenn man ihn jetzt nur noch nachklingen läßt, fallen alle Intensitäten wieder ab. Dabei sind die Obertöne höherer Frequenz immer schwächer vertreten. Eine solche einfache Kurvendarstellung ist natürlich mathematisch nicht exakt, weil Sinuswellen per Definition

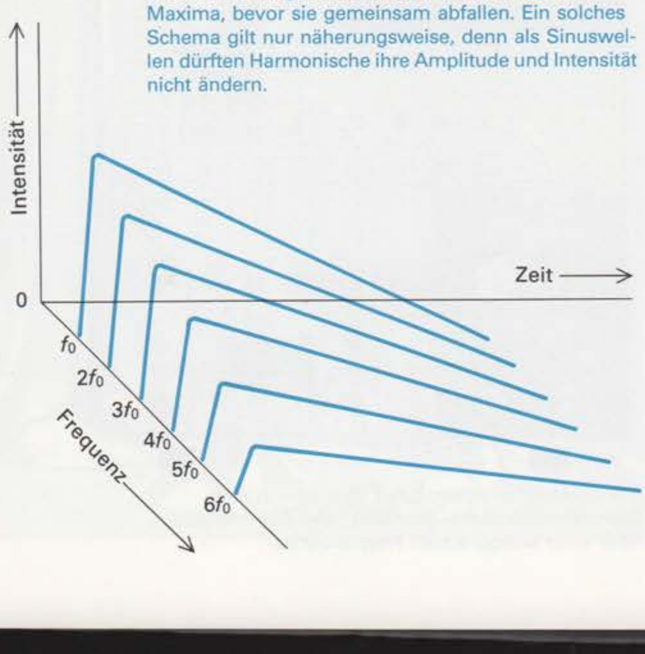


Ein Spektrumanalysator Auf dem Schirm einer Kathodenstrahlröhre erscheint die Intensitätskurve über einer waagerechten Frequenzskala.



Beim Schlag auf ein Tom-Tom, eine Art Trommel, ändert sich das Klangspektrum ganz beträchtlich.

Die Intensitäten für die ersten sechs Harmonischen eines Tons steigen zunächst auf unterschiedliche Maxima, bevor sie gemeinsam abfallen. Ein solches Schema gilt nur näherungsweise, denn als Sinuswellen dürften Harmonische ihre Amplitude und Intensität nicht ändern.



gleichbleibende Amplitude und Intensität haben müssen. Die Kurvenschar oben auf dieser Seite gibt eine Folge von Linienspektren eines Tom-Toms wieder, einer einfachen Trommel. Die zahlreichen Resonanzspitzen sind nicht so scharf und schmal wie die auf dem Bildschirm des Spektrumanalysators.

Wie sich Frequenzen im Laufe der Zeit ändern, läßt sich mit dem *Sonagraphen* oder *Schall-Spektrographen* aufzeichnen, auf dessen Bildschirm man dann *Sonagramme* sieht. Die Frequenz ist diesmal senkrecht aufgetragen und die Zeit waagerecht. Die Intensitäten werden durch verschiedene Graustufen gekennzeichnet. Die beiden rechts abgebildeten Sonagramme der menschlichen Stimme zeigen breite, horizontale Bänder. Sie entsprechen den Resonanzfrequenzen des Stimmapparates, sogenannten Formanten, die sich beim Sprechen nur langsam verschieben. Diese Sonagramme weichen in den Details voneinander ab. Einmal finden wir waagerechte Streifen, die jeweils individuelle Partialtöne der aufgenommenen Stimme wiedergeben. Der Streifenabstand entspricht der Frequenz des Grundtons, also der Tonhöhe. Im anderen Sonagramm treten vertikale Streifen auf; hier kennzeichnet der Abstand die Periode T für die Schwingungen der Stimmbänder; horizontale Streifen gibt es in dieser Darstellung nicht.

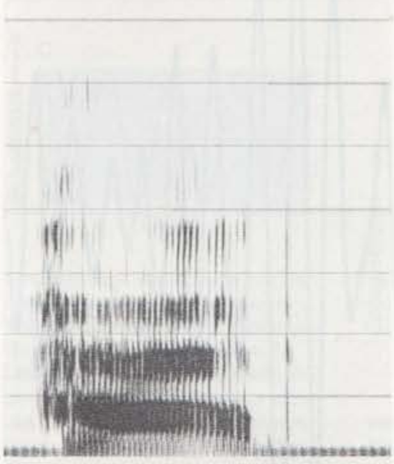
Das „waagerecht gestreifte" Sonagramm wurde mit einem sehr schmalbandigen Filter aufgenommen, das einzelne Harmonische trennen konnte. Solche Filter reagieren kaum auf schnelle Schalldruckänderungen, so daß keine senkrechten Streifen im Zeitabstand T der Periode auftreten. Umgekehrt kann ein breitbandiges Filter die einzelnen Harmonischen nicht mehr trennen, so daß keine horizontalen Streifen für die individuellen Partialtöne im Sonagramm auftauchen. Dieses Filter spricht empfindlich auf die Periode (der Stimmbandschwingung) an, die dann an den senkrechten Streifen im Sonagramm abzulesen ist.

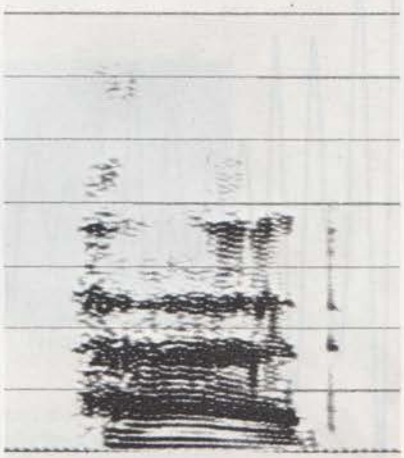
Wenn wir Schallwellen mit Filtern untersuchen, können wir Frequenzen und Perioden nicht gleichzeitig exakt registrieren. Wollen wir dicht beieinanderliegende Frequenzen unterscheiden, dann können wir sehr kleine Zeitabstände nicht mehr auflösen. Umgekehrt lassen sich kleinste Zeitintervalle nur exakt messen, wenn wir darauf verzichten, auch die Frequenz im Detail zu erkennen. Das erklärt auch, warum die sechs Kurven in der Abbildung auf der linken Seite nur eine qualitative Vorstellung vermitteln können. Sie sind so dargestellt, als seien Frequenz und Zeit gleichermaßen exakt bestimmt.

Obwohl ein Ton im strengen Sinne nicht periodisch sein kann, weil er nicht endlos andauert, ist er doch meist nahezu periodisch. Man kann ihn dann näherungsweise mit Hilfe von relativ wenigen sinusähnlichen Wellen beschreiben, deren Amplituden nur sehr langsam zu- oder abnehmen und deren Frequenzen fast in einem harmonischen Verhältnis stehen. Ein Ton läßt sich dann als zeitliche Folge verschiedener Linienspektren darstellen. Wenn beispielsweise das Klavier nach dem Anschlagen einer Saite immer leiser klingt, nimmt im entsprechenden Linienspektrum die Höhe der Spitzen für die harmonischen Partialtöne ab. Bei Glocken und Gongs entsteht kein periodischer Klang, aber auch sie besitzen ein Linienspektrum, dessen Amplituden nach dem Anschlag allmählich kleiner werden.

Was aber, wenn wir ein Klangspektrum aufnehmen und keine scharfen Linien, sondern eine glatte Kurve erhalten? Ein Beispiel dafür zeigt die Abbildung rechts. Hier läßt sich der Klang nicht mehr mit einer endlichen Zahl von Einzelfrequenzen beschreiben, die Partialtöne verteilen sich kontinuierlich über einen weiten Frequenzbereich. Das gilt beispielsweise für geflüsterte Vokale. Ihr Spektrum weist ein oder mehrere Maxima auf, die durch Resonanz (oder Resonanzen) im menschlichen Stimmapparat zustande kommen. Dabei liegen die Resonanzfrequenzen beim Vokal *i* höher als beim *u*, so daß ein geflüstertes *i* höher klingt.

Bei Rauschgeräuschen unterscheidet man anhand des Klangspektrums zwischen *breitbandig* und *schmalbandig*, je nachdem, ob ein breites oder schmales Maximum vorhanden ist. Fehlt ein solches Maximum, so daß die Amplituden bei allen Frequenzen im Mittel gleich groß sind, so spricht man von *Weißem Rauschen*. Wie es sich anhört, merkt man bei einer schlechten Telefonverbindung;

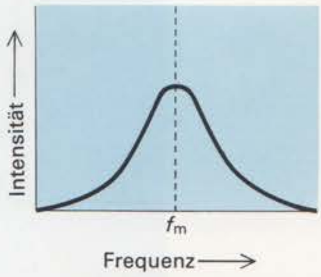




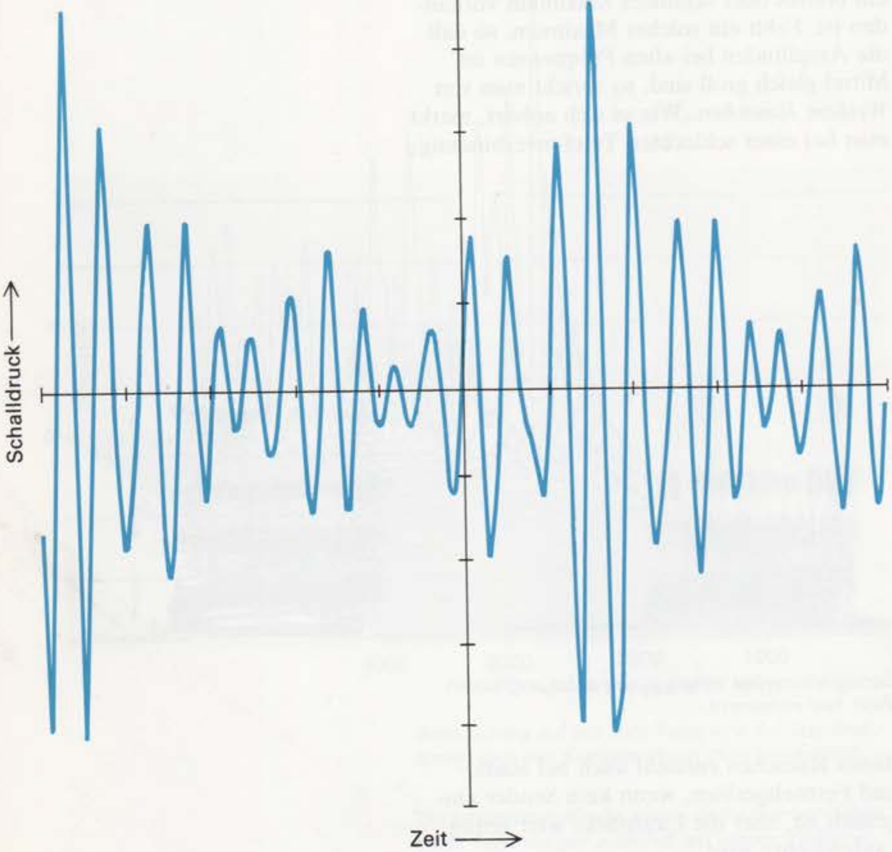
Sonagramme des Vokals *ä*, wie er im englischen Wort *had* vorkommt.

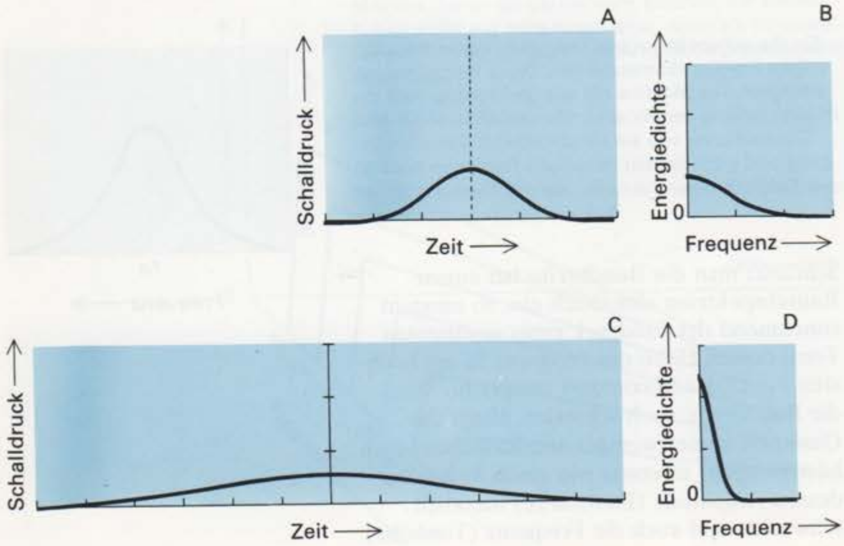
dieses Rauschen entsteht auch bei Radio- und Fernsehgeräten, wenn kein Sender eingestellt ist, aber die Lautstärke weit genug „aufgedreht" wird.

Ein Rauschspektrum aus unendlich vielen sinusförmigen Frequenzkomponenten. Diese Komponenten erreichen ihre Maxima nie alle gleichzeitig, weil die Phasen zufällig verteilt sind. Man erhält deshalb eine Glockenkurve, wie sie für statistische Verteilungen gang und gäbe ist. Ein derartiges Rauschen erweckt den Eindruck einer Tonhöhe, die der Frequenz f_m am Kurvenmaximum entspricht.



Schränkt man die Bandbreite bei einem Rauschspektrum allmählich ein, so entsteht zunehmend der Eindruck eines gestimmten Tons, dessen Höhe der Frequenz f_m am höchsten Punkt des Maximums entspricht. Wird die Bandbreite noch schmaler, klingt das Geräusch immer weniger wie Rauschen, man hört vielmehr so etwas wie einen Sinuston, dessen Amplitude (Lautstärke) merklich schwankt, und auch die Frequenz (Tonhöhe)





„flattert" geringfügig. Rauschen unterschiedlicher Bandbreite wird ab und zu auch in der Computermusik eingesetzt.

Wenn bei einem kontinuierlichen Klangspektrum die Phasen aller sinusähnlichen Komponenten übereinstimmen, also alle Partialtöne gleichzeitig ihr Maximum erreichen, so hört man kein stetiges Rauschen, sondern ein kurzes, scharfes Geräusch. Das gleiche gilt, wenn sich die Phasen nur unmerklich mit der Frequenz ändern.

Das ist in der Abbildung links unten für ein Knackgeräusch dargestellt, das durch einen kurzen Anstieg des Schalldrucks hervorgerufen wird. Dieser Puls (A) setzt sich aus vielen sinusförmigen Komponenten zusammen, deren Frequenzen sich über einen großen Bereich erstrecken (B). Zum Vergleich ist ein Puls (C) gezeigt, dessen Amplitude viel langsamer ansteigt und abnimmt. Anstelle eines hellen Knackens hört man jetzt einen dumpfen Knall. Das beruht auf dem enger begrenzten Frequenzspektrum (D). Im allgemeinen wird ein einzelner Schallpuls um so kürzer sein, je größer der Frequenzumfang ist. Diese

Die Wellenform eines sehr schmalbandigen Rauschens ähnelt einer Sinuskurve mit zufällig schwankender Amplitude, deren Frequenz jedoch nahezu konstant bleibt.

Ein einzelner Druckstoß oder Schallpuls besitzt ein kontinuierliches Spektrum. Die Frequenzkomponenten sind hier kontinuierlich verteilt. Ein kurzer Puls (A) hat ein breites Frequenzspektrum (B) und klingt wie ein helles Knackgeräusch. Bei längeren Pulsen (C) ist das Spektrum schmaler Hier hört man einen dumpfen Knall.

Bandbreite (*B*) ist annähernd proportional zum Kehrwert der Dauer des Klangs.

$$B = 1/D$$

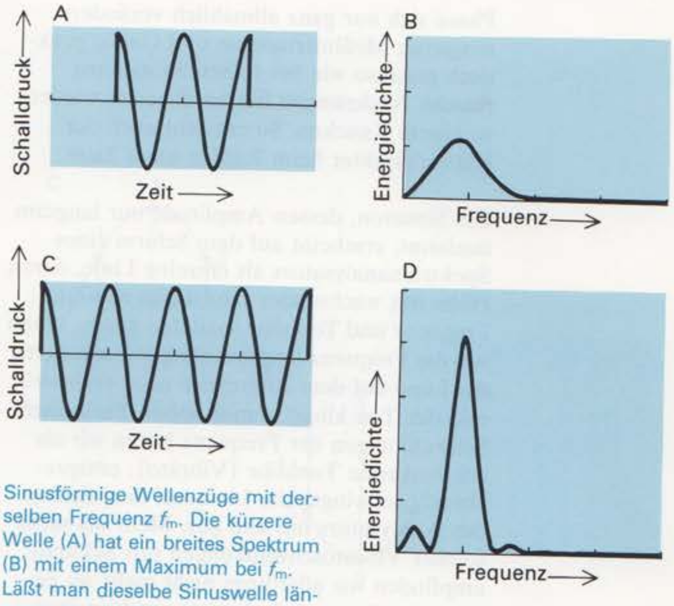
Die meisten kurzen Geräusche sind freilich mehr als ein kurzzeitiges Ansteigen und Absinken des Drucks. Beim Schlag auf einen Holzstab entsteht außer dem Klicken auch ein Ton, der noch eine Zeitlang nachklingt. Das gilt ähnlich für eine große Trommel, deren Fell ebenfalls noch etwas weiterschwingt. Zwar ergibt sich die Frequenzbandbreite immer noch aus dem Kehrwert der Klangdauer, aber das Frequenzspektrum hat jetzt ein Maximum bei den Schwingungsfrequenzen der Schlaginstrumente. Sie liegen um so tiefer, je größer und dumpfer die Instrumente klingen.

Diese Zusammenhänge sind rechts auf dieser Seite für zwei kurze Wellenzüge dargestellt, die sich wie ein kurzes quäkendes „Piep" anhören. Einer davon dauert zwei Perioden (A), der andere doppelt so lang. Die beiden Frequenzspektren (B und D) haben ihr Maximum bei derselben Frequenz, nämlich der Frequenz der Sinuswelle, die Bandbreite des längeren Wellenzugs ist aber nur halb so groß wie die des kürzeren.

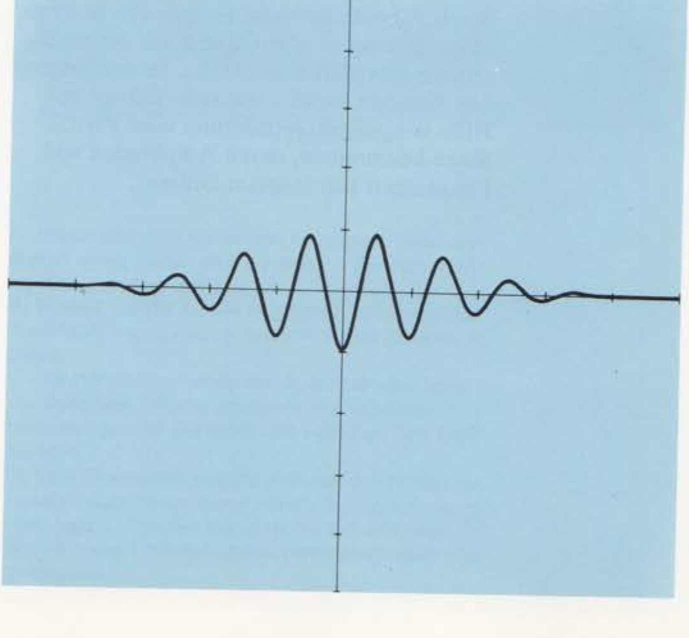
Wenn man eine Sinuswelle plötzlich ein- oder ausschaltet, können dadurch Resonatoren mit den verschiedensten Frequenzen angeregt werden. So hört man ein deutliches Knacken, wenn man ein Lautsprecherkabel aus dem Verstärkerausgang eines Tonfrequenzgenerators zieht.

Um einen Sinuston ohne Störgeräusch an- oder abzustellen, muß man die Amplitude allmählich erhöhen beziehungsweise verringern. Natürlich ist diese „Sinuskurve mit veränderlicher Amplitude" mathematisch gar keine Sinuswelle, auch wenn sie für unsere Ohren ganz ähnlich klingt, der einzige Unterschied besteht darin, daß die Lautstärke zu- und abnimmt. Meßgeräte reagieren dann nahezu so wie bei echten Sinuswellen – bis auf die unterschiedlichen Ausschläge, die ja mit der Intensität ansteigen beziehungsweise abfallen.

In der Praxis können wir mit „langsam veränderlichen Sinuswellen" periodische Klänge von endlicher Dauer erzeugen. Obwohl es sich mathematisch nicht mehr um eine Sinuswelle handelt, entsprechen solche sinusähnlichen Wellen doch einer recht genauen Näherung. Solange Amplitude, Frequenz oder



Sinusförmige Wellenzüge mit derselben Frequenz f_m. Die kürzere Welle (A) hat ein breites Spektrum (B) mit einem Maximum bei f_m. Läßt man dieselbe Sinuswelle länger anstehen (C), so verengt sich das Spektrum (D), sein Maximum liegt unverändert bei f_m. Werden Sinuswellen plötzlich ein- oder ausgeschaltet, hört man dabei ein Knackgeräusch.



Wenn man die Amplitude einer Sinuswelle langsam genug steigert oder reduziert, entsteht kein störendes Knacken. Mathematisch entspricht eine solche Welle keiner Sinusfunktion, aber wir empfinden die Tonhöhe wie bei einer exakten Sinuswelle.

Phase sich nur ganz allmählich verändern, reagieren Meßinstrumente und Gehör praktisch genauso wie bei reinen Sinustönen. Rasche Änderungen führen dagegen wieder zu einem Knacken. So entsteht auch der Klangcharakter beim Zupfen einer Saite.

Ein Sinuston, dessen Amplitude nur langsam zunimmt, erscheint auf dem Schirm eines Spektrumanalysators als einzelne Linie, deren Höhe mit wachsender Lautstärke zunimmt, Frequenz und Tonhöhe variieren kaum. Wenn wir die Frequenz langsam steigern, wandert die Linie auf dem Bildschirm nach rechts und der Ton klingt immer höher. Periodische Schwankungen der Frequenz hören wir als schwankende Tonhöhe (Vibrato), entsprechend „schwingt" die Linie auf dem Schirm des Analysators hin und her. Mehr als sechs solcher Vibratoschwankungen pro Sekunde empfinden wir allerdings nicht mehr als periodische Frequenzänderung, sondern eher als neue, ansprechende Klangfarbe eines Tons.

Was bisher über einzelne, langsam veränderliche Sinuswellen gesagt wurde, läßt sich auch auf Überlagerungen oder Summen aus mehreren solchen Wellen übertragen. Zusammen klingen verschiedene Sinuswellen, deren Amplituden oder Frequenzen sich nur allmählich verschieben, wie Töne mit wechselnder Lautstärke und Höhe. In den folgenden Kapiteln werden wir viele Klänge mit Hilfe von Sinuskomponenten oder Partialtönen beschreiben, deren Amplituden und Frequenzen sich langsam ändern.

Nachtrag zu den Sinuswellen

Eine Sinuswelle ist nicht einfach irgendeine auf und ab schwankende Kurve, sondern eine exakte mathematische Funktion. Sie läßt sich recht einfach beschreiben, wenn man beispielsweise eine Kurbel betrachtet, die sich mit konstanter Geschwindigkeit dreht. Während jeder Umdrehung ändert sich die Höhe h des Kurbelgriffs, wenn wir diese Änderungen als Funktion der Zeit auftragen, erhalten wir eine Sinuskurve.

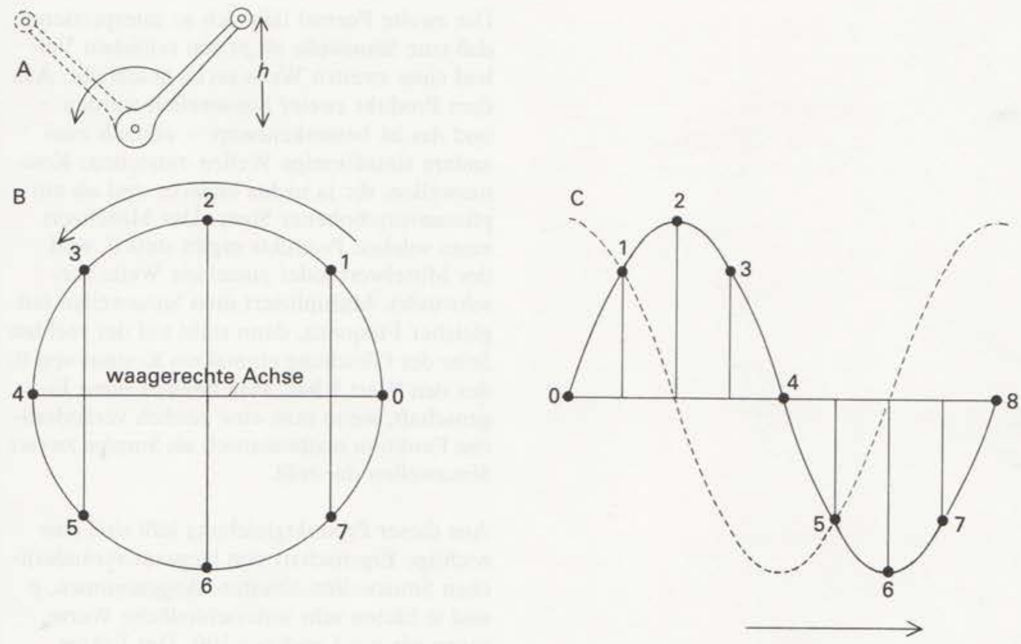
Zunächst markiert man auf dem Kreis, den der Kurbelgriff bei einer Drehung beschreibt, Punkte, die im gleichen Abstand (und das heißt: auch in gleichen Zeitintervallen) aufeinanderfolgen. In der Abbildung rechts sind das acht Punkte mit den Nummern 0 bis 7 Wir beginnen bei Punkt 0 und messen die Höhen über oder unter dem waagerechten Durchmesser. Diese Werte werden nun für alle Punkte über einer waagerechten Zeitachse abgetragen, da die Punkte in gleichen Zeitintervallen aufeinanderfolgen, müssen die Meßpunkte für die Höhen in gleichen Abständen abgetragen werden. Als Verbindungslinie erhält man eine Sinuskurve.

Die Höhe h (die Auslenkung) und die Zeit t sind mathematisch durch die Beziehung

$$h = \sin \omega t$$

verknüpft. Dabei bezeichnet ω die konstante Winkelgeschwindigkeit; sie ergibt sich aus der Frequenz f, multipliziert mit 2π, der doppelten Kreiszahl. Da $f = 1/T$ ist, hängt ω direkt von der Periode T ab. Je öfter die Sinuswelle in einer Sekunde auf und ab schwingt, desto höher ist ihre Frequenz und desto kleiner die Periode.

Neben der Sinusfunktion gibt es auch den *Kosinus*, der sich vom Sinus nur durch seine Phase unterscheidet. Eine Kosinuswelle $h = \cos \omega t$ erreicht ihren höchsten Ausschlag bereits nach einer Viertel Periode ($T/4$), also



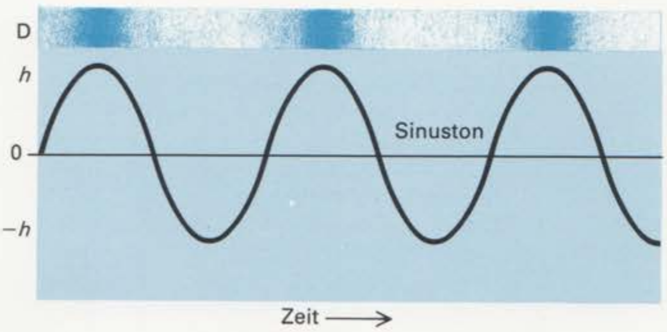
entsprechend früher als die Sinuswelle. Das ist in der Abbildung im oberen Teil A durch die gestrichelte Kurbel angedeutet, die im 90-Grad-Winkel vorausläuft und die gestrichelte Funktionskurve ergibt. Sie beginnt zum Zeitpunkt $t = 0$ im Punkt 2, so daß wir nacheinander die Höhen der Punkte 2, 3, 4 und so fort auftragen müssen.

Dieses einfache mechanische Modell genügt, um Sinuswellen zu verstehen. Wenn man sich näher mit ihren mathematischen Eigenheiten beschäftigt, stößt man auf einige interessante und nützliche Beziehungen. Zum Beispiel gilt

$$(\sin \omega t)^2 + (\cos \omega t)^2 = 1$$

und

$$(\sin pt)\ (\sin \omega t) = (1/2)\ [\cos (\omega - p)\ t - \cos (\omega + p)\ t].$$



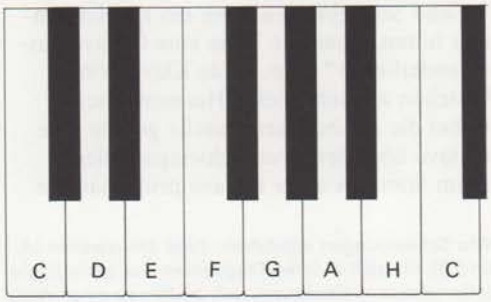
A. Wenn sich eine Kurbel mit konstanter Geschwindigkeit dreht, ändert sich die Höhe h des Handgriffs als Sinusfunktion der Zeit.
B. Punkte, die die Kurbel in gleichen Zeitabständen durchläuft, liegen auch auf dem Kreis im gleichen Abstand.
C. Die Höhen der Punkte von B, aufgetragen über der Zeitachse. Gleiche Abstände der Höhenlinien bedeuten gleiche Zeitabschnitte zwischen den Meßpunkten.
D. Eine Sinuskurve, wie sie sich aus den Höhen für beliebig dicht benachbarte Punkte auf dem Kreisumfang ergibt; über der Kurve ist die sinusförmige Schwankung zusätzlich durch Farbabstufungen wiedergegeben.

Die zweite Formel läßt sich so interpretieren, daß eine Sinuswelle *sin pt* den zeitlichen Verlauf einer zweiten Welle *sin ωt* beschreibt. Aus dem Produkt zweier Sinuswellen werden – und das ist bemerkenswert – einfach zwei andere sinusförmige Wellen entstehen. Kosinuswellen, die ja nichts anderes sind als ein phasenverschobener Sinus. Der Mittelwert eines solchen Produkts ergibt stets 0, weil der Mittelwert jeder einzelnen Welle verschwindet. Multipliziert man Sinuswellen mit gleicher Frequenz, dann steht auf der rechten Seite der Gleichung einmal ein Kosinus von 0, der den Wert 1 hat. Man benutzt diese Eigenschaft, wenn man eine zeitlich veränderliche Funktion mathematisch als Summe zweier Sinuswellen darstellt.

Aus dieser Produktgleichung läßt sich eine wichtige Eigenschaft von langsam veränderlichen Sinuswellen ableiten. Angenommen, p und ω hätten sehr unterschiedliche Werte, sagen wir $p = 1$ und $\omega = 100$. Der Faktor *sin pt* beschreibt dann, wie sich die Amplitude einer schnellen Schwingung *sin ωt* langsam mit der Zeit verändert. Die Gleichung ergibt also:

$$(\sin t)\ (\sin 100t)$$
$$= (1/2)\ (\cos 99t) - (1/2)\ (\cos 101t)$$

Eine langsam veränderliche Sinuswelle besteht mithin nicht aus Komponenten mit ein und derselben Frequenz, sondern mathematisch sind mindestens zwei Frequenzen erforderlich. Sie liegen aber nahe bei der Nennfrequenz der langsam veränderlichen Welle. Eine Sinuswelle, die ein- und ausgeschaltet wird, hat also keineswegs dieselbe Frequenz wie eine andauernd weiterschwingende Welle, auch wenn wir diese Unterschiede nicht hören, solange das Ein- und Ausschalten langsam genug erfolgt.



Die diatonische C-Dur-Tonleiter wird nur auf weißen Klaviertasten gespielt.

Konsonante Intervalle

Intervall	Töne der C-Dur-Tonleiter	theoretisches Frequenzverhältnis	Zahl der Halbtöne
Oktave	C–C	2	12
Quinte	C–G	3/2	7
Quarte	C–F	4/3	5
große Terz	C–E	5/4	4
kleine Terz	E–G	6/5	3
große Sexte	C–A	5/3	9
kleine Sexte	E–C	8/5	8

Schwebung zwischen der zweiten Harmonischen des tieferen Tons und der ersten Harmonischen des höheren. Diese Schwebung muß verschwinden, damit die Oktave stimmt.

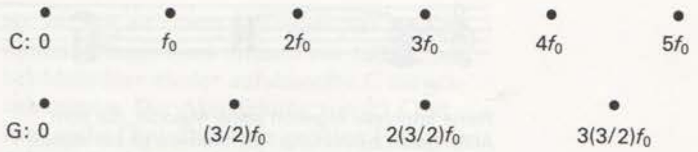
Klaviersaiten haben nicht nur eine Spannung, sondern auch eine geringe Steifheit, so daß die Frequenzen der höheren Partialtöne nicht exakt mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz f_0 übereinstimmen, sondern ein wenig höher sind als $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, $5f_0$ und so weiter.

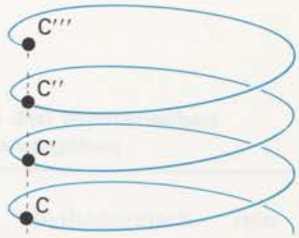
Oktaven, die so gestimmt werden, daß keine Schwebungen auftreten, sind leicht *gestreckt* oder *gespreizt* – das Frequenzverhältnis liegt etwas über 2. Viele Klaviere sind auf gestreckte Oktaven gestimmt, zumal das entsprechend hellere Timbre manchen auch besser gefällt. Wir wollen aber im folgenden von solchen Besonderheiten absehen und die Steifheit vernachlässigen. Wir nehmen also an, daß als Partialtöne nur exakte Harmonische vorkommen, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache des ersten Partialtons sind.

Auch andere Intervalle als die Oktave kann man anhand der Schwebungen stimmen. Das kleinstmögliche Intervall, das man auf dem Klavier spielen kann, ist ein Halbton zwischen einer weißen und schwarzen Taste oder den weißen Tasten E und F beziehungsweise H und C. Eine solche Sekunde gehört allerdings nicht zu den *konsonanten* Intervallen, die auch dann angenehm klingen, wenn die Töne gleichzeitig angeschlagen werden. Für einige konsonante Intervalle sind die Frequenzverhältnisse und die entsprechende Zahl der Halbtonschritte in der Tabelle links auf dieser Seite zusammengestellt.

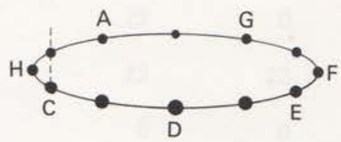
Wie die Schwebungen etwa bei Tönen im Abstand einer Quinte zustande kommen, zeigt die Abbildung oben auf der rechten Seite für das Intervall zwischen C und G. Die Harmonischen sind jeweils in bezug auf die Grundfrequenz f_0 des Tons C ausgedrückt. Schon für die dritte Harmonische des C stimmt die Frequenz $3f_0$ mit einer Harmonischen des G (nämlich der zweiten) überein. Sind beide Töne verstimmt, so hört man zwischen diesen beiden Harmonischen eine Schwebung. Sobald sie verschwindet, stehen die Grundfrequenzen von G und C im Verhältnis 3/2 – eine reine Quinte.

Wir brauchen nun nicht mehr lange zu überlegen, wie etwa eine Quarte bei anderen Noten gestimmt werden kann. Das Frequenzverhältnis beträgt hier 4/3, das heißt, die dritte Harmonische von F muß dieselbe Frequenz haben wie die vierte Harmonische von C (die zwei Oktaven höher ist). Bei der großen Terz mit dem Verhältnis 5/4 haben die vierte Harmonische von E und die fünfte von C dieselbe Frequenz. Eine kleine Terz





Töne wie C und G, zwischen denen eine Quinte liegt, haben ein Frequenzverhältnis von 2/3. Da dieses Verhältnis auch für ihre Harmonischen gilt, fallen die Frequenzen der zweiten Harmonischen von G und der dritten Harmonischen von C zusammen. Dann gilt die Gleichung $3f_0 = 2(3/2)f_0$, die auch für höhere Harmonische wie die vierte von G und die sechste von C erfüllt ist.



Die Noten einer diatonischen Tonleiter sind hier als Punkte einer Schraubenlinie dargestellt. Der Unterschied zwischen dem C und dem eine Oktave höheren C' ist rechts durch die Windungen angedeutet, wobei alle Oktaven eines Tons wie C übereinanderliegen.

ergibt ein Verhältnis 6/5, so daß die fünfte Harmonische von Es mit der sechsten von C übereinstimmt.

Einer meiner Freunde hat einmal versucht, sein Klavier anhand dieser Intervallbeziehungen zu stimmen. Er merkte rasch, daß er die Aufgabe erheblich unterschätzt hatte. Intervalle wie Quinte, Quarte und Terz dürfen gerade nicht völlig schwebungsfrei gestimmt werden. Man muß sie innerhalb einer Oktave vielmehr so einstellen, daß jeweils eine ganz bestimmte Zahl von Schwebungen pro Sekunde auftritt. Diese bewußte Verstimmung nennt man *Temperatur* Mit Hilfe der temperierten (chromatischen) Tonleiter kann man die restlichen Töne über reine (schwebungsfreie) Oktaven stimmen.

Warum spielt die *diatonische Tonleiter* (auf den weißen Tasten des Klaviers) in der Musik vieler Kulturen eine so wichtige Rolle? Es gibt zwar eine Erklärung, aber ob sie zwingend ist, muß jeder für sich selbst entscheiden.

Töne, die genau eine Oktave auseinanderliegen, klingen sehr ähnlich. Die Klangfarbe mancher Instrumente macht es schwer, ihre Oktavlage richtig einzuschätzen. Der Psychologe Roger Shepard hat diese Ähnlichkeit mit Punkten auf einer Schraubenlinie beschrieben, auf deren Windungen jeweils die Noten C, D, E, F, G, A, H liegen. Diese Tonleiter wiederholt sich nach jeder Schraubendrehung in der nächsthöheren Oktave. Über dem Ton C folgen so C', C'' und so fort•, und Entsprechendes gilt für alle anderen Töne und ihre Oktaven.

Wir können uns nun die Harmonischen eines Tons im Notenbild ansehen. Im Beispiel unten sind es die ersten sechs für den Ton C, der eine Oktave unter dem mittleren C•• liegt. Diese Reihe der Harmonischen (Teil I)

Die Intervalle Oktave, Quinte, Quarte, kleine Terz und große Terz ergeben sich aus den ersten sechs Harmonischen eines Tons. Hier sind es die Noten C^0 im Baßschlüssel und C' G' C'' E'' und G'' im Violinschlüssel (I). Wenn wir von G' eine kleine Terz nach oben gehen, kommen wir zum H' und nochmals eine kleine Terz darüber zum D'' (III). Eine Quinte unter dem C'' findet man F' (II). Eine kleine Terz über dem F' folgt schließlich mit dem A' der letzte fehlende Ton der diatonischen C-Dur-Leiter

• Die Striche kennzeichnen, wieviele Oktaven ein Ton höher liegt als ein anderer. Eine Tonleiter, die eine Oktave über CDEFGAH liegt, entspricht also C'D'E'F'G'A H'; in der nächsten Oktave folgen C''D'' und so fort.

•• Das mittlere C (auch C' oder C^1 genannt) heißt so, weil es in der Mitte zwischen den Notensystemen für Baß- und Violinschlüssel steht.

Reine Intervalle ergeben keine Melodie, die zum Anfangston zurückführt. Die Melodie ist bei dieser Akkordfolge durch die schwarzen Noten (C′ A′ D″ G′ C′) angedeutet. Vom Grundton geht es erst eine Sexte, dann eine Quarte aufwärts und in zwei Quintschritten zurück. Würden wir reine Intervalle fordern (ganzzahlige Frequenzverhältnisse von 5/3 für die Sexte, 4/3 für die Quarte und 3/2 für die Quinte), so kämen wir nicht zum Ausgangston mit derselben Stimmung zurück.

lautet also C, C′ (mittleres C), G′, C″, E″ und G″ Alle Intervalle zwischen diesen Tönen sind konsonant: Oktave (C nach C′), Quinte (C′ nach G′), Quarte (G′ nach C″), große Terz (C″ nach E″), kleine Terz (E″ nach G″). Damit haben wir aber erst drei der sieben Töne der C-Tonleiter· C als *Tonika*, E als *Mediante* und G als *Dominante*. Wenn man vom C″ eine Quinte nach unten geht, stößt man auf das fehlende F′, die *Subdominante*; das Frequenzverhältnis F′ zu C′ beträgt 4/3.

Die Intervalle C″–E″ und E″–G″ im Akkord entsprechen einer großen beziehungsweise kleinen Terz (mit den Frequenzverhältnissen 5/4 und 6/5). Insgesamt ergibt sich also für das Frequenzverhältnis C–G der Wert 3/2 – eine Quinte. Diese Intervalle sind übrigens typisch für einen Dur-Dreiklang.

Die Quinte (Dominante) spielt in der Musik eine wichtige Rolle. Es liegt somit durchaus nahe, auch auf dem Ton G einen Dur-Dreiklang aufzubauen, also erst eine große und dann eine kleine Terz nach oben zu gehen. Wir erhalten so die Septime oder den Leitton H und die Sekunde D (Teil III). Da die Quarte als Subdominante in der Musik ebenfalls eine tragende Funktion hat, wollen wir auch auf dem F′ einen Dur-Dreiklang aufbauen (Teil II). Die große Terz ergibt das A (als *Submediante*), die kleine Terz führt zurück zum C. Die Frequenzen von A′ und C″ verhalten sich wie 6:5, das heißt, (6/5) A′ = C″). Weil C″ = 2C′ beträgt, folgt als Frequenzverhältnis von A′ zu C′ der Wert 5/3.

Wir haben jetzt alle sieben Töne der diatonischen Tonleiter gewonnen, die mit C als *Tonika* beginnt. Dabei brauchten wir nur einfache Intervalle mit ganzzahligen Frequenzverhältnissen heranzuziehen.

Diese Intervalle sind natürlich in der Musik sehr wichtig, aber als Basis für eine Tonleiter führen sie zu Schwierigkeiten. Schauen wir uns dazu das folgende Notenbeispiel und insbesondere die schwarz ausgefüllten Noten an. C′, A′, D″, G′, C′ Nennen wir die Frequenz von Cf_0, so hat A′ die Frequenz 5/3f_0; beim D″, eine Quarte über dem A′, müßte sich die Frequenz nochmals im Verhältnis 4/3 erhöhen, also D″ = 4/3A = (4/3) × (5/3) × f_0, also D″ = (20/9) × f_0. Wir kommen nun eine Quinte tiefer zum G′, dessen Frequenz bei $(2/3) \times (20/9) f_0 = (40/27) f_0$ liegen müßte. Eine weitere Quinte nach unten führt uns zurück zum C′, für dessen Frequenz sich dann der Wert $(2/3) \times (40/27) f_0 = (80/81) f_0$ ergibt. Wir haben aber mit der Frequenz f_0 für C′ angefangen!

Eine diatonische Tonleiter geht also nicht einfach aus Intervallen mit exakt ganzzahligen Frequenzverhältnissen hervor. Eine Melodie, die den idealen Intervallsprüngen folgen würde, käme mit jedem Auf und Ab weiter von einer festen Tonleiter weg. Andererseits bilden gerade die reinen Intervalle mit ihren exakt ganzzahligen Frequenzverhältnissen die eigentliche Grundlage der Musik. Schließlich entsprechen sie den Harmonischen musikalischer Töne, die für das menschliche Ohr so wichtig sind. Aber die diatonische Tonleiter, die wir aus reinen Intervallen gewinnen wollten, ist nicht weniger wichtig. Was nun?

Ein Ausweg besteht darin, Klaviere *temperiert* zu stimmen. Was dabei unter *Temperatur* zu verstehen ist, läßt sich mit Hilfe eines sehr, sehr kleinen musikalischen Intervalls angeben. des *Cent*. Ein Cent ist 1/1200 einer Oktave, sein Frequenzverhältnis entspricht der Potenz $2^{1/1200}$ (oder der 1200sten Wurzel aus 2) und hat den Wert 1,00057779.

Anders ausgedrückt, man muß die Frequenzverhältnisse für alle 1200 Cents einer Oktave multiplizieren, um den Wert 2 für die Oktave zu erhalten. also $1{,}00057779^{1200} \times 1200 = 2$. Das Frequenzverhältnis eines gleichschwebend temperierten Halbtonintervalls ergibt sich entsprechend aus der hundertsten Potenz: $1{,}00057779^{100} = 1{,}059463$.

Die Intervalle verschieden temperierter Tonleitern in Cent angegeben

Ton	gleich-schwebend temperiert	pythago-räisch	rein (C-Dur)
C	0	0	0
D	200	204	204
E	400	408	386
F	500	498	498
G	700	702	702
A	900	906	884
H	1100	1110	1088
C	1200	1200	1200

In der Tabelle oben sind die Intervalle der diatonischen Tonleiter für verschiedene Stimmungen in Cent angegeben. nämlich für *gleichschwebende*, *pythagoräische* (mit reinen Quinten) und *reine*. Darunter sind die Abweichungen gegenüber idealen Intervallverhältnissen aufgelistet.

Manche Musiker lieben die reine Stimmung. Harry Partch, der die unmöglichsten Instrumente gebaut hat (die dann genauso seltsam klangen wie ihre Namen und oft nicht ganz eindeutig gestimmt waren), stimmte sein Harmonium rein in C. Stücke in C-Dur klangen wunderbar; dafür hörten sich alle anderen Tonarten abscheulich an. Zum Beispiel weicht die Quinte von D nach A bei reiner Stimmung um 22 Cent vom idealen Verhältnis ab, wie wir an einem Notenbeispiel gezeigt hatten. Diesen Preis müssen wir zahlen, um bei Melodien wieder auf dasselbe C zurückzukommen. Die Abweichung von 22 Cent liegt sechs Cent über dem größten Fehler bei der gleichschwebenden Temperatur. Sie löst gleichzeitig auch das Problem der erhöhten und erniedrigten Töne. Die verminderte

Die Abweichungen temperierter Tonleitern von den theoretischen (ganzzahligen) Frequenzverhältnissen, in Cent angegeben

Ton-abstände	Intervall	gleichschwebend temperiert	pythagoräisch	rein
C–E	große Terz	14	22	0
D–F	kleine Terz	16	22	22
C–F	Quarte	2	0	0
C–G	Quinte	2	0	0
C–A	Sexte	16	22	0
D–A	Quinte	2	22	22

Sexte C–As müßte ein Frequenzverhältnis von 1,6 haben, damit etwa der Ton As eine reine große Terz unter dem C′ liegt. Damit auch das Intervall E–Gis eine reine große Terz ist, muß das Verhältnis für Gis 25/16 = 1,5625 betragen. Gis und As entsprechen aber auf dem Klavier derselben schwarzen Taste! Die gleichschwebende Temperatur weist ihnen auch dasselbe Frequenzverhältnis zu. den Wert 1,5874.

Bei diatonischen Tonleitern, die nicht mit C anfangen, müssen bestimmte Töne (durch die Vorzeichen # oder *b*) erhöht oder erniedrigt werden. Eine Quinte über dem C beginnt die G-Dur-Leiter, in der das F zum Fis erhöht wird. Die D-Dur-Leiter, die eine Quinte über dem G beginnt, enthält bereits zwei erhöhte Töne (Fis und Cis), hier stimmen nur noch fünf Töne mit C-Dur überein.

Wenn wir so im Quintenzirkel der Tonleitern weiterschreiten, erreichen wir nach und nach alle Tasten auf dem Klavier. Auf jedem dieser Töne kann man eine Dur-Leiter aufbauen. Man kann auch, von C ausgehend, in Quinten abwärts gehen, dann kommt man als erstes zum F und der F-Dur-Tonleiter, bei der das H zum B erniedrigt wird.

Da beim gleichschwebend temperierten Klavier alle Intervalle leicht „verstimmt" sind, klingen sämtliche Tonarten gleich gut (oder unsauber). Einer der ersten Verfechter einer Temperatur, mit der man (ohne Nachstimmen!) sämtliche Tonarten spielen konnte, war Johann Sebastian Bach, dessen *Wohltemperiertes Clavier* Stücke in allen Tonarten des Quintenzirkels enthält.

Schon immer gab es Musiker, die eine temperierte Stimmung nicht als ideale Lösung empfanden. So regte Helmholtz – wie andere vor ihm – an, Tasteninstrumente zu bauen, bei denen die Intervalle idealen (ganzzahligen) Frequenzverhältnissen sehr nahe kommen. Diese Instrumente hatten eine sehr komplizierte Tastatur und setzten sich nie durch. Tatsächlich hören viele Menschen (selbst Musiker) keinen Unterschied zwischen reinen und temperierten Intervallen. Das stellte Max Mathews anhand einer Bandaufnahme mit Intervallen und Akkorden in reiner und gleichschwebend temperierter Stimmung fest, die er verschiedenen Leuten vorspielte. Die meisten bemerkten keinen Unterschied, allerdings konnte ein Musiker sehr genau heraushören, ob es sich um eine reine Quinte oder eine (nur um zwei Cent abweichende) gleichschwebend temperierte Quinte handelte.

Es wird häufig darüber diskutiert, ob Musiker bei Solostücken für Streichinstrumente reine oder temperierte Intervalle spielen. Entsprechende Messungen widerlegen beides. Wie wir gesehen haben, ist es ja prinzipiell unmöglich, nach einer Folge von verschiedenen idealen Intervallen wieder zur exakten Tonhöhe der Anfangsnote zu gelangen.

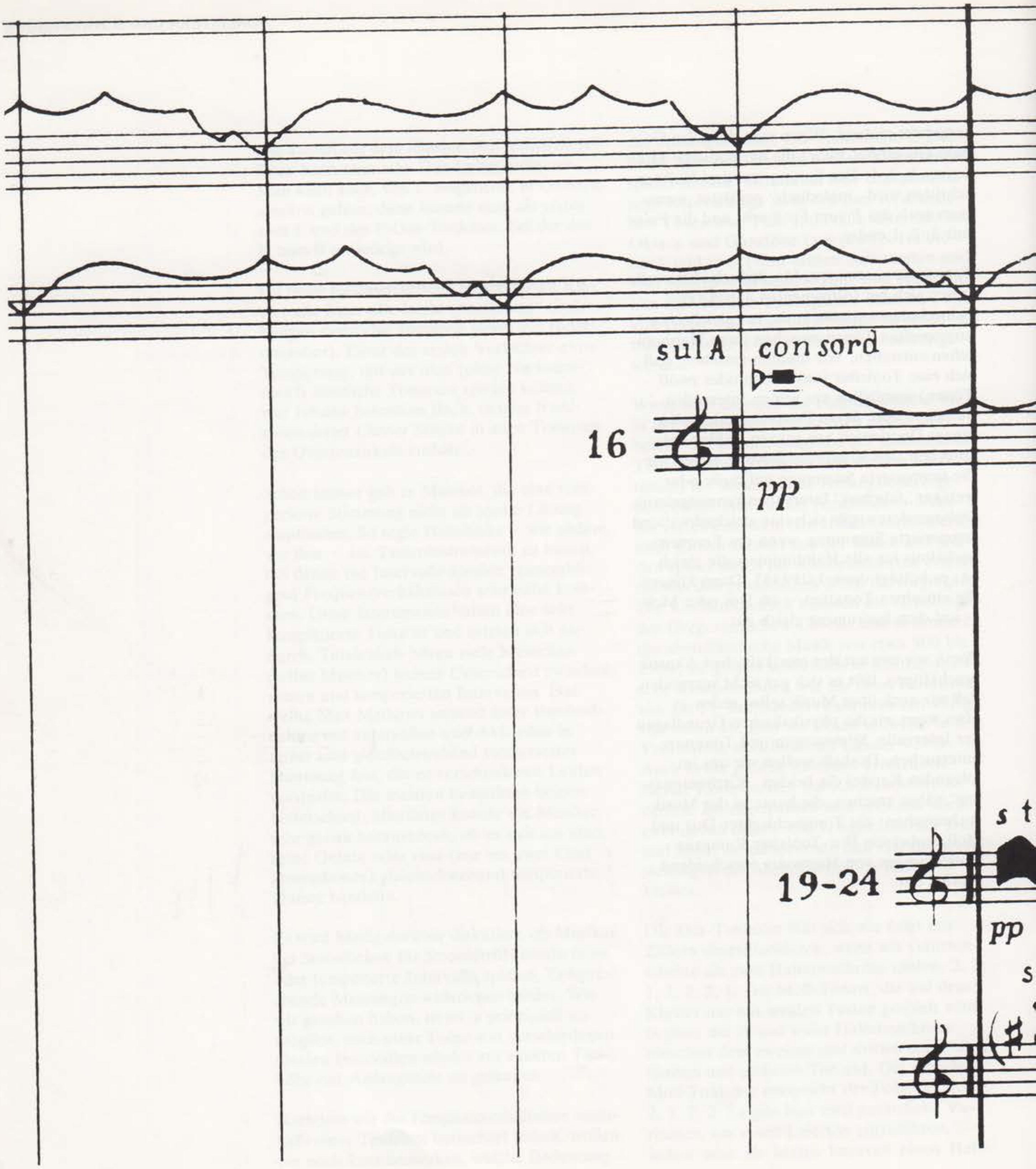
Nachdem wir die Frequenzverhältnisse innerhalb einer Tonleiter betrachtet haben, wollen wir noch kurz anmerken, welche Bedeutung der Anfangston hat. Die diatonische C-Dur-Leiter (die man nur auf weißen Klaviertasten spielt) zeichnet sich durch eine charakteristische Intervallfolge zwischen den verschiedenen Tönen aus. Fünf Intervalle innerhalb der Oktave sind Ganztöne (aus je zwei Halbtönen), und zwei (vom dritten zum vierten und vom siebten zum achten Ton) sind Halbtöne. Um für beliebige Anfangstöne dieselbe Folge von Ganz- und Halbtonschritten zu erhalten, müssen einige Töne erhöht oder erniedrigt werden.

Wenn man dagegen die Halbtonschritte wie in der klassischen griechischen Musik dort beläßt, wo sie sich aufgrund der diatonischen Tonleiter (entsprechend den weißen Klaviertasten) für verschiedene Anfangstöne ergeben, erhält man sieben verschiedene *Modi*. Sie verschwanden in den ersten Jahrhunderten nach Christi Geburt aus der Musik und wurden später durch die Kirchentonarten ersetzt, die aus den griechischen Modi hervorgingen. Die Kirchentonarten bildeten die Grundlage des Gregorianischen Chorals und bestimmten die abendländische Musik von etwa 800 bis 1500, sie gingen schließlich in kontrapunktische Kompositionen wie die eines Palestrina ein. Im 17 Jahrhundert kam man fast völlig von ihnen ab, aber sie lebten teilweise in der Volksmusik verschiedener Länder weiter. Auch heute greifen durchaus ernstzunehmende Komponisten auf Kirchentonarten zurück. Im allgemeinen sind aber nur noch zwei davon üblich. die Tongeschlechter Dur und Moll, sie entsprechen den Harmonievorstellungen des abendländischen Kulturkreises.

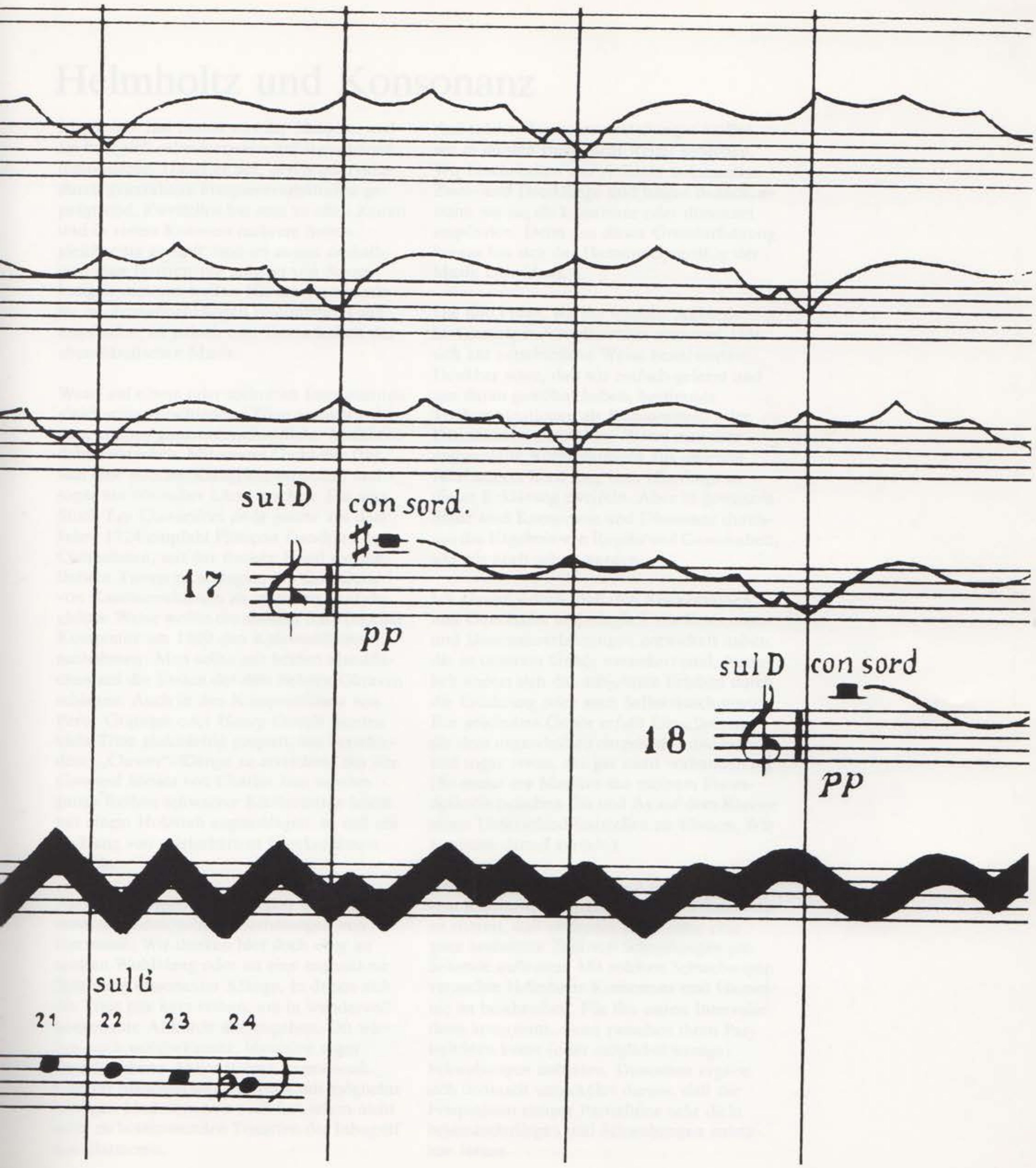
Die Dur-Tonleiter läßt sich wie folgt mit Ziffern charakterisieren, wenn wir Ganztonschritte als zwei Halbtonschritte zählen. 2, 2, 1, 2, 2, 2, 1. Die Moll-Tonart, die auf dem Klavier nur mit weißen Tasten gespielt wird, beginnt mit A und weist Halbtonschritte zwischen dem zweiten und dritten sowie dem fünften und sechsten Ton auf. Die natürliche Moll-Tonleiter entspricht der Folge 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2. Es gibt hier zwei zusätzliche Varianten, um einen Leiterton einzuführen, indem man als letztes Intervall einen Halbtonschritt einbaut. Wenn man dazu das G zum Gis erhöht, endet die harmonische Moll-Leiter 1, 3, 1. Der Sprung von drei Halbtonschritten wird „melodisch" geglättet, wenn man auch das F zum Fis macht und die Folge mit 2, 2, 1 endet.

Fassen wir zusammen. Musikalische Intervalle lassen sich bei Instrumenten anhand der Schwebungen stimmen, die bei gleichzeitig angespielten Tönen zwischen ihren Harmonischen entstehen. Wir mußten einsehen, daß sich eine Tonleiter (aus sieben oder zwölf Tönen) unmöglich aus reinen Intervallen aufbauen läßt, deren Frequenzverhältnisse einem Quotienten aus ganzen Zahlen entsprechen. Als Kompromißlösung hatten wir die temperierte Stimmung mit mehr oder weniger „falschen" Intervallen kennengelernt. Insbesondere ergibt sich eine gleichschwebend temperierte Stimmung, wenn das Frequenzverhältnis für alle Halbtonintervalle gleich ist, es beträgt dann 1,059463. Dann klingen die einzelnen Tonarten – ob Dur oder Moll – auf dem Instrument gleich gut.

Wenn wir uns mit der musikalischen Akustik beschäftigen, läßt es sich gar nicht vermeiden, daß wir auch über Musik selbst reden – etwa wenn wir die physikalischen Grundlagen der Intervalle, Stimmungen und Tonarten untersuchen. Deshalb wollen wir uns im folgenden Kapitel die beiden „Kirchentonarten" näher ansehen, die heute in der Musik vorherrschen. die Tongeschlechter Dur und Moll, wobei die Dur-Tonleiter Rameaus Vorstellungen von Harmonie entscheidend geprägt hat.



sul A
con sord
16
pp
19-24
pp


sul D
con sord.
17
pp
sul D
con sord
18
pp
21
22
23
24

Helmholtz und Konsonanz

Musik lebt fast immer aus der Melodie, und sie baut sich seltsamerweise auf irgendeiner diatonischen Tonleiter auf, deren Intervalle durch ganzzahlige Frequenzverhältnisse geprägt sind. Zweifellos hat man zu allen Zeiten und in vielen Kulturen mehrere Saiten gleichzeitig gezupft, und sei es nur deshalb, weil man Instrumente anhand von Schwebungen stimmen wollte. Harmonie, wie wir sie im Zusammenklingen bestimmter Töne empfinden, ist jedoch eine Besonderheit der abendländischen Musik.

Wenn auf einem oder mehreren Instrumenten gleichzeitig verschiedene Töne gespielt werden, können ganz unterschiedliche Absichten dahinterstecken. Mit einem Orchester läßt sich eine enorme Klangfülle erreichen und sogar ein höllischer Lärm machen. Für sein Stück *Les Charactères de la guerre* aus dem Jahre 1724 empfahl François Dandrieu dem Cembalisten, mit der flachen Hand auf die tiefsten Tasten zu schlagen, um den Klang von Kanonenschüssen zu imitieren. Auf die gleiche Weise wollte ein anderer französischer Komponist um 1800 den Kanonendonner nachahmen. Man sollte mit beiden Handflächen auf die Tasten der drei tiefsten Oktaven schlagen. Auch in den Kompositionen von Percy Grainger oder Henry Cowell werden viele Töne gleichzeitig gespielt, um verschiedene „Cluster"-Klänge zu erreichen. Bei der *Concord Sonata* von Charles Ives werden ganze Reihen schwarzer Klaviertasten leicht mit einem Holzstab angeschlagen, so daß ein Anklang von geisterhaftem Glockenläuten entsteht.

All diese Beispiele entsprechen wohl kaum unseren traditionellen Vorstellungen von Harmonie. Wir denken hier doch eher an sanften Wohlklang oder an eine angenehme Spannung dissonanter Klänge, in denen sich die Töne nur kurz reiben, um in wundervoll konsonante Akkorde überzugehen. Oft wirken auch wohlbekannte, bisweilen sogar abgedroschene Akkordfolgen harmonisch. Und für manchen ist erst Musik mit möglichst häufigen Modulationen nach fast schon nicht mehr zu bestimmenden Tonarten der Inbegriff von Harmonie.

Auf solche Harmonievorstellungen wollen wir in diesem Buch nicht weiter eingehen. Wir beschränken uns vielmehr auf einzelne Zwei- und Dreiklänge und fragen danach, wann wir sie als konsonant oder dissonant empfinden. Denn aus dieser Grunderfahrung heraus hat sich der Harmoniebegriff in der Musik entwickelt.

Die alte Frage, warum manche Akkorde konsonant, andere dissonant anmuten, läßt sich auf verschiedene Weise beantworten. Denkbar wäre, daß wir einfach gelernt und uns daran gewöhnt haben, bestimmte Tonkombinationen als Konsonanzen oder Dissonanzen anzusehen. Wenn man sehr ungewohnte Kompositionen aus unserem Jahrhundert hört, mag man allerdings an dieser Erklärung zweifeln. Aber in gewissem Sinne sind Konsonanz und Dissonanz durchaus das Ergebnis von Regeln und Gewohnheit, wie wir noch sehen werden.

Ich glaube jedoch, daß sich Konventionen und Gebräuche ursprünglich aus Konsonanz- und Dissonanzerfahrungen entwickelt haben, die in unserem Gehör verankert sind. Natürlich ändert sich das subjektive Erleben durch die Erfahrung oder auch Selbsttäuschungen. Ein geschultes Gehör erfaßt Einzelheiten, die dem ungeschulten entgehen – und manchmal sogar etwas, das gar nicht vorhanden ist. (So meint ein Musiker aus meinem Freundeskreis zwischen Gis und As auf dem Klavier einen Unterschied feststellen zu können. Wir kommen darauf zurück.)

Kehren wir zuvor aber noch einmal zu unserem Klavierstimmer zurück, der die Intervalle so stimmt, daß entweder keine oder eine ganz bestimmte Zahl von Schwebungen pro Sekunde auftreten. Mit solchen Schwebungen versuchte Helmholtz Konsonanz und Harmonie zu beschreiben. Für ihn waren Intervalle dann konsonant, wenn zwischen ihren Partialtönen keine (oder möglichst wenige) Schwebungen auftreten. Dissonanz ergäbe sich demnach umgekehrt daraus, daß die Frequenzen einiger Partialtöne sehr dicht beieinanderliegen und Schwebungen entstehen lassen.

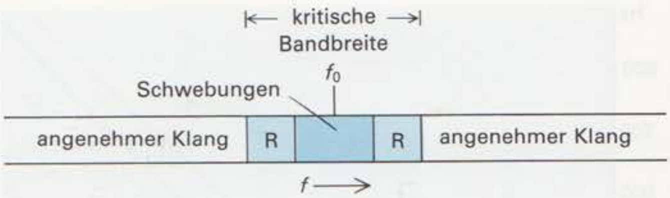
Notenblatt der *Concord Sonata* von Charles Ives, der den Spieler anweist, mehrere schwarze Tasten gleichzeitig mit einem Stab anzuschlagen.

Ganz so einfach ist es freilich nicht, wie R. Plomp (1976) und andere gezeigt haben. Wir empfinden langsame Schwebungen nämlich nicht als dissonant, sondern eher als *Tremolo* einer schwankenden Lautstärke. Wenn man andererseits den Frequenzabstand der überlagerten Sinustöne nach und nach vergrößert, bleibt der Klang auch dann noch unangenehm rauh, wenn keine Schwebungen mehr zu hören sind. Der Frequenzbereich, in dem man solche Rauhigkeit hört, heißt *kritische Bandbreite* oder *Frequenzgruppe*.

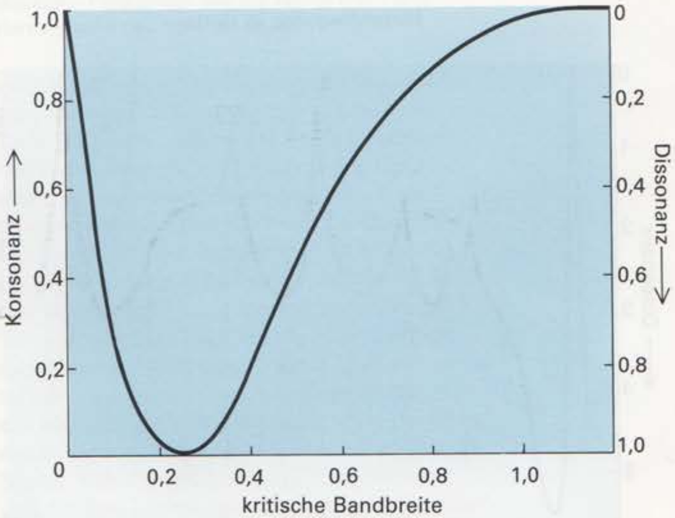
Diese Bandbreite ist eine ganz wichtige empirische Größe beim Hören. Ähnlich wie sich ein Radiogerät auf den Kanal eines Senders einstellen läßt, können wir unser Gehör auf einen engen akustischen Frequenzbereich ausrichten. Wenn Frequenzen weiter auseinanderliegen, so hören wir sie getrennt heraus. Innerhalb der kritischen Bandbreite sind Einzelfrequenzen nicht zu unterscheiden. Allerdings empfinden wir ihre Wechselwirkung als Schwebung, Rauhigkeit oder Rauschen. Diese Bandbreite bestimmt darüber hinaus, welche Lautstärke wir hören, ob wir einen Ton oder nur Lärm wahrnehmen und ob ein Klang einen anderen *maskiert*, so daß er nicht mehr gehört wird.

Die kritische Bandbreite ergibt sich im Grunde aus der Art und Weise, wie das Ohr Frequenzen unterscheiden oder *auflösen* kann. Frequenzen, die weiter auseinanderliegen, reizen unterschiedliche Sinneszellen, so daß die Signale über getrennte Nervenfasern zum Gehirn geleitet werden. Das gilt jedenfalls, solange die Lautstärke nicht zu groß wird. Frequenzen innerhalb der kritischen Bandbreite lösen dagegen ein Mischsignal aus, das über dieselbe Nervenfaser läuft.

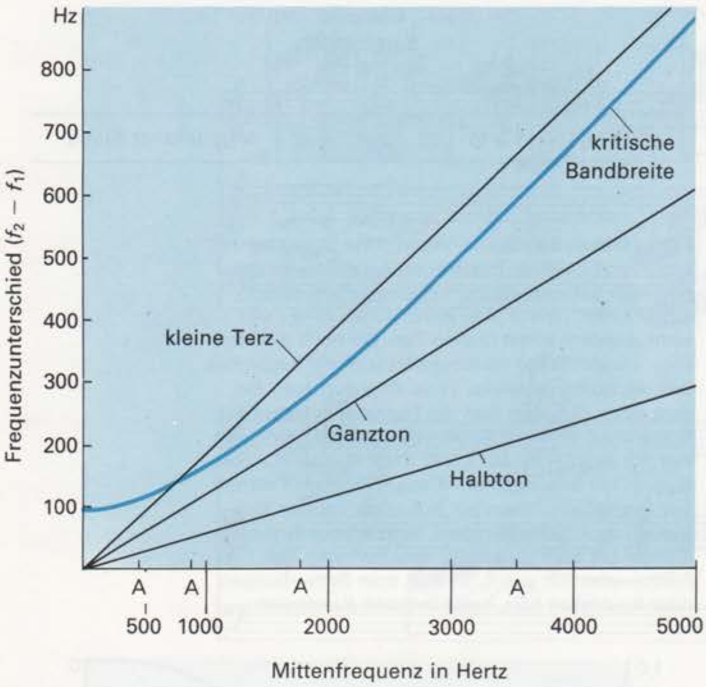
Das Verhältnis zwischen Konsonanz und kritischer Bandbreite ist in der Abbildung oben anhand einer Funktionskurve dargestellt. Frequenzen, die um ein Viertel der kritischen Bandbreite abweichen, empfinden wir am stärksten als Dissonanz. Mit wachsendem Frequenzabstand verstärkt sich der Eindruck von Konsonanz; jenseits der kritischen Bandbreite klingen Schallwellen mit

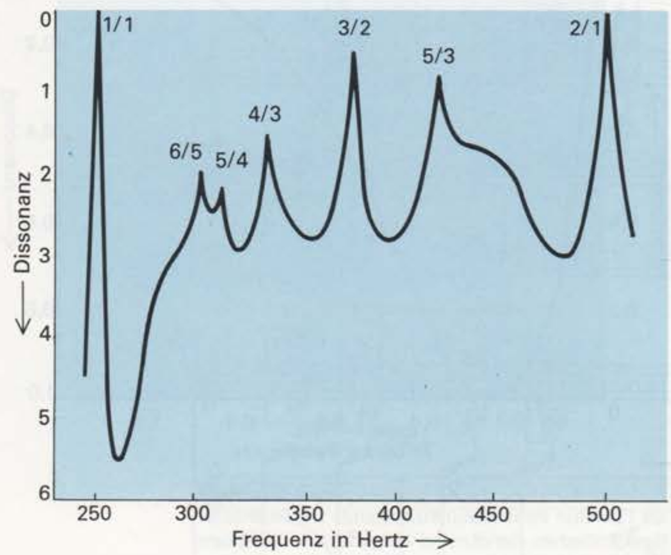


Zur kritischen Bandbreite. Wenn reine Sinustöne mit annähernd gleichen Frequenzen zusammenklingen, hört man Schwebungen; rücken die Frequenzen auseinander, nimmt man keine Schwebung mehr wahr, sondern einen rauhen Ton. Bei noch größeren Frequenzabständen verschwindet auch die Rauhigkeit, und wir hören getrennte Töne. Angenommen, bei dem einen Sinuston liegt die Frequenz konstant bei f_0, während sie beim zweiten Ton variiert. Wir beginnen mit einer Frequenz f weit unter f_0, also in einem Bereich mit angenehmem Klang. Wenn wir f allmählich vergrößern, hören wir früher oder später Rauhigkeit, dann Schwebungen, dann wieder rauhe Klänge, bis auch sie wieder verschwinden. Der Frequenzbereich von f_0, in dem man Schwebungen oder Rauhigkeit hört, heißt *kritische Bandbreite*.



In dieser Kurve ist die Konsonanz zweier Sinustöne als Funktion ihres Frequenzabstands (in Bruchteilen ihrer kritischen Bandbreite) aufgetragen. (Man kann sie auch anhand der rechten Skala als Dissonanzkurve lesen.) Bei kleinen Frequenzabständen treten nur langsame Schwebungen auf, und man empfindet die Töne als konsonant. Auch wenn die Frequenzen weiter als die kritische Bandbreite auseinanderliegen, erweckt das den Eindruck von Konsonanz. Die größte Dissonanz (und kleinste Konsonanz) entsteht bei einem Viertel der kritischen Bandbreite.





verschiedenen Frequenzen dann im wesentlichen konsonant.

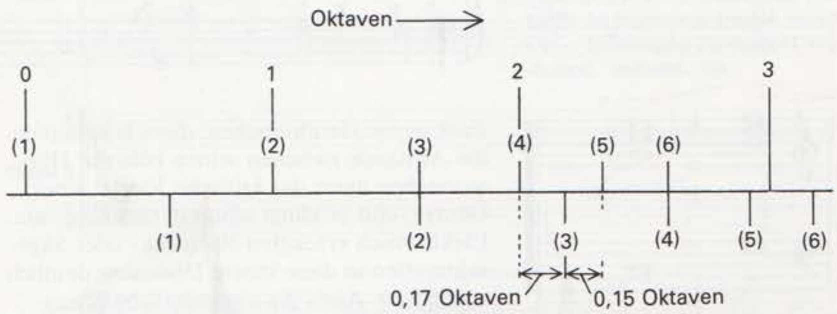
Wenn wir bestimmen wollen, welche Frequenzintervalle bei reinen Sinustönen konsonant sind, müssen wir wissen, wie sich die kritische Bandbreite mit der Frequenz ändert. Das zeigt das Diagramm oben auf dieser Seite. Auf der senkrechten Achse sind die Differenzen für die beiden Grenzfrequenzen f_1 und f_2 der kritischen Bandbreite aufgetragen, die waagerechte Skala gibt den Mittelwert $(f_1 + f_2)/2$ aus beiden Frequenzen an.

Nahezu im gesamten Frequenzbereich von 500 bis 5000 Hertz variiert die kritische

Die kritische Bandbreite als Funktion der Frequenz. Über 500 Hertz verläuft die (farbige) Kurve nahezu geradlinig: Die kritische Bandbreite nimmt proportional zur Frequenz zu. Zum Vergleich sind entsprechende Kurven für drei Intervalle eingezeichnet. Reine Sinustöne mit hohen Frequenzen klingen konsonant, wenn eine kleine Terz zwischen ihnen liegt.

Aus der kritischen Bandbreite und der Konsonanzkurve für Sinustöne läßt sich berechnen, wie dissonant (oder konsonant) zusammengesetzte musikalische Töne sind. Die Kurve zeigt das für zwei Töne aus jeweils sechs Harmonischen, wobei sich der Frequenzabstand ändert. Die Grundfrequenz des einen Tons ist bei 250 Hertz festgehalten, der zweite Ton erhöht sich, ausgehend von etwa 240 Hertz, um etwas mehr als eine Oktave auf bis über 500 Hertz. Die Bruchzahlen an den Konsonanzspitzen entsprechen den Frequenzverhältnissen der Intervalle, die traditionell als konsonant gelten: 1/1 = Einklang, 6/5 = kleine Terz; 5/4 = große Terz; 4/3 = Quarte; 3/2 = Quinte; 5/3 = Sexte; 2/1 = Oktave.

Bandbreite zwischen einer kleinen Terz und einem Ganzton. Für Frequenzen unter 440 Hertz (entsprechend dem Kammerton A) wird sie auch größer als die kleine Terz. Offenbar müssen tiefe Töne weiter getrennt sein, um zusammen konsonant zu klingen. Tatsächlich findet man in der Klaviermusik bei tiefen Akkorden häufig große Intervalle, während die Töne bei Akkorden im Diskant näher zueinanderrücken. Allerdings beeinflussen tiefe Töne das Konsonanzempfinden nicht allzu stark, weil wir meist nur die höheren Partialtöne hören.



Frequenzabstände zwischen den Harmonischen zweier Töne im Abstand einer Quinte. Weil die meisten Harmonischen – hier jeweils sechs – entweder mit einer anderen zusammenfallen oder weiter auseinanderliegen als eine kleine Terz, ist die Quinte ein konsonantes Intervall. Die dritte und die sechste Harmonische des tieferen Tons, also (3) und (6) oberhalb der waagerechten Achsen, haben dieselben Frequenzen wie die zweite und vierte Harmonische des höheren Tons.

Unter anderem liegt das daran, daß ein beachtlicher Teil der Schallenergie auf die höheren Partialtöne entfällt. (Im Extremfall ist es fast die gesamte Energie, etwa wenn die Töne aus einem kleinen Transistorradio kommen.) Außerdem spricht unser Ohr viel empfindlicher auf höhere Frequenzen an als auf tiefe.

Nach alldem können wir folgende Faustregel festhalten. Reine Sinustöne sind dissonant, wenn weniger als eine kleine Terz dazwischenliegt; sobald ihr Frequenzabstand einer kleinen Terz entspricht oder größer wird, klingen sie konsonant – und seien die Frequenzverhältnisse noch so krumm. Das gilt natürlich nicht für die Töne, die man auf Musikinstrumenten spielt, denn sie setzen sich ja aus vielen Harmonischen zusammen. Geschulte Musiker neigen allerdings dazu, sich auch bei reinen Sinustönen an den vertrauten Intervallen zu orientieren, wenn sie über Konsonanz beziehungsweise Dissonanz urteilen sollen.

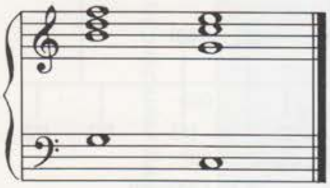
Für zwei musikalische Töne läßt sich anhand ihres Frequenzabstandes und der kritischen Bandbreite berechnen, wann Konsonanz oder Dissonanz auftritt. Die entsprechende Kurve ist in dem Diagramm links unten für zwei Töne abgebildet, die sich jeweils aus sechs Harmonischen zusammensetzen. Für die gewohnten musikalischen Intervalle ergeben sich Konsonanzspitzen. Am einfachsten läßt sich das anhand der Oktave erklären.

Als ersten Partialton legen wir die Frequenz f_0 mit 250 Hertz fest. Die Harmonischen des tieferen Tons entsprechen f_0, $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, $5f_0$ und $6f_0$, für den zweiten, eine Oktave höheren Ton ergibt sich dann. $2f_0$, $4f_0$, $6f_0$, $8f_0$, $10f_0$ und $12f_0$. In diesem Fall stimmen die Partialtöne entweder exakt überein oder sie liegen weit auseinander.

Unter den konsonanten Intervallen rangiert die Quinte traditionell gleich hinter der Oktave. Die Kurve links unten bestätigt das. Anhand des Diagramms oben auf dieser Seite wollen wir die Konsonanz erklären. Auf einer horizontalen Achse sind die Frequenzabstände in Vielfachen von f_0 abgetragen. die sechs Harmonischen des höheren Tons durch die Ziffern (1) bis (6) oberhalb der Achse und die entsprechenden Harmonischen des um eine Quinte höheren Tons durch die untere (verschobene) Zahlenreihe. Die Verschiebung entspricht 0,58 Oktaven (bezogen auf die Oktaven-Skala 0, 1, 2, 3). Wir sehen, daß einige Harmonische beider Töne zusammenfallen und sich die übrigen meist um mehr als eine Viertel Oktave unterscheiden. Aber die dritte Harmonische des höheren Tons (untere Skala) fällt zwischen die vierte und fünfte des tieferen Tons (obere Skala). Die Frequenzabstände zur vierten und fünften Harmonischen betragen hier nur 0,17 und 0,15 Oktaven. Der Abstand von 0,17 Oktaven entspricht etwa einem Ganzton, das ist ein Halbton weniger als die kleine Terz (0,25 Oktaven).

Wir sollten noch anmerken, daß die fünfte und sechste Harmonische bei beiden Tönen nur um 0,26 Oktaven auseinanderliegen, was die kritische Bandbreite gerade übersteigt. Erhöht man bei einem einzelnen Ton die

Eine gewöhnliche Schlußkadenz (links) und ihre Trugschluß-Variante (rechts). Statt der Tonika (C–E–C) kommt hier als letztes ein Sextakkord (E–A–C). Obwohl dieser Akkord konsonant ist, klingt der Trugschluß ungewohnt – wie ein „falscher" Schluß.



Schlußkadenz vom dissonanten Dominantseptimakkord zum konsonanten Tonikaakkord.

Zahl seiner Harmonischen, dann schrumpfen die Abstände zwischen seinen höheren Harmonischen unter das kritische Viertel einer Oktave, und er klingt schon in sich dissonant. Elektronisch erzeugten Rechteck- oder Sägezahnwellen ist diese innere Dissonanz deutlich anzuhören. Auch die eigentümliche Klangfarbe des Cembalos beruht zum Teil auf der großen Zahl höherer Partialtöne. Wenn schon einzelne Töne in gewisser Weise dissonant klingen, wird es erst recht dissonant, wenn man sie zusammen spielt.

Bei allen anderen Intervallen (kleine und große Terz, Quarte und Sexte) lassen sich Diagramme für die Abstände ihrer Partialtöne zeichnen, und immer werden wir feststellen, daß einige Harmonische zusammenfallen und andere mehr oder weniger weit getrennt sind. Halb- und Ganztonintervalle, Tritonus (erhöhte Quarte oder sechs Halbtonschritte) und Septime enthalten jeweils sehr viele Partialtöne, deren Frequenzen um weniger als eine Viertel Oktave abweichen. Diese Intervalle klingen rauh und dissonant.

Beruhen Konsonanz und Harmonie letztendlich nur darauf, daß Partialtöne mit dicht benachbarten Frequenzen vermieden werden und dadurch auch Schwebungen und Rauhigkeit des Klangs wegfallen? Intervalle wie Quinte, Sexte, Quarte, große und kleine Terz mit den Frequenzverhältnissen 3/2, 5/3, 4/3, 5/4 und 6/5 sind bei Tönen mit sechs Harmonischen in der Tat praktisch schwebungsfrei. Ist das allein schon Konsonanz? Vielleicht.

Aber Vorsicht, denn ungeschulte Hörer empfinden *jedes* Intervall aus Sinustönen als konsonant, sobald die Töne durch die kritische Bandbreite und mehr getrennt sind. Das gilt auch für die Septime und selbst für irrationale Frequenzverhältnisse. Erfahrene Musiker werden pflichtgemäß nur Terzen, Quarten, Quinten und Sexten konsonant nennen, die Septime aus Sinustönen ist für sie dissonant.

Töne mit sehr vielen Harmonischen werden auch von Musikern durchaus widersprüchlich beurteilt, etwa wenn sie Schlußkadenzen hören. Im oberen Notenbeispiel auf dieser Seite enden die Kadenz (links) und der isolierte Trugschluß (rechts) mit konsonanten Akkorden, aber manche empfinden den Trugschluß als dissonant. Er klingt „falsch", weil man einen anderen Akkord erwartet.

Sehr gefällig und beliebt ist die Schlußkadenz über den Dominantseptimakkord zur Tonika. Der überleitende Akkord ist dissonant. Liegt es an der konsonanten Auflösung, daß diese Schlußwendung so wirkungsvoll ist? Historisch mag das stimmen. Beide Akkorde haben Max Mathews und ich mit dem Computer erzeugt und dabei alle Partialtöne unterdrückt, die dichter als eine Viertel Oktave beisammenlagen. Der Dominantseptimakkord klang dadurch praktisch konsonant und die Tonika noch etwas konsonanter als gewöhnlich. Musiker erkennen die akustisch dissonanzfrei gemachten Akkorde nach wie vor. Das Entscheidende der Kadenz über den Dominantseptimakkord sind die Halbtonschritte von F nach E und vom Leitton H zum C.

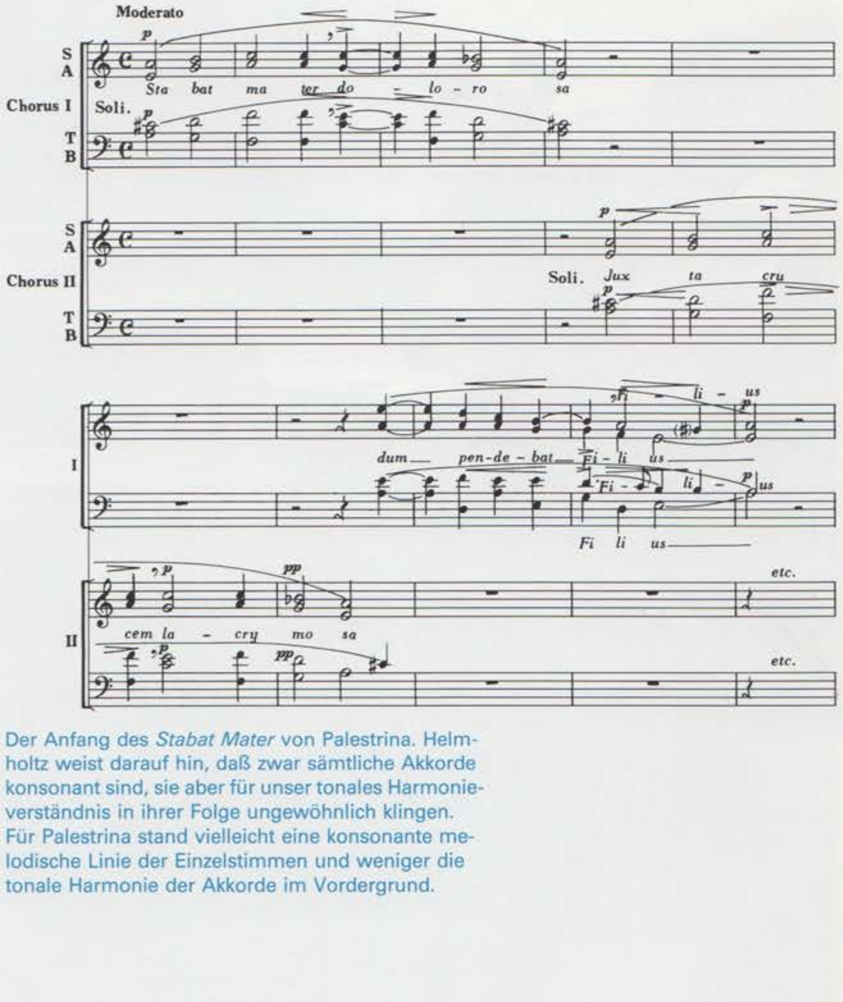
Offenbar beeinflussen Erfahrung und Gewohnheit unser Klangempfinden. Ob wir Konsonanz oder Dissonanz heraushören, entscheiden aber auch die kritische Bandbreite und die Natur des menschlichen Gehörs. Für harmonische Klänge (im Sinne einer harmonischen Tonalität) genügt es nicht, die akustischen Dissonanzen auszuschalten. Das wird deutlich, wenn man das

Notenblatt mit dem Anfang von Palestrinas achtstimmigem *Stabat Mater* betrachtet. Alle Akkorde sind konsonant, aber lesen wir nach, was Helmholtz dazu schreibt:

„Hier finden wir gleich als Anfang eines Stückes, wo wir feste Bezeichnung der Tonart verlangen würden, eine Reihe Akkorde aus den verschiedensten Tonarten von A-Dur bis F-Dur anscheinend regellos durcheinandergewürfelt, gegen alle unsere Regeln der Modulation. Und wer würde ohne Kenntnis der Kirchentonarten aus diesem Anfang die Tonika des Stückes erraten können? Als solche erscheint am Ende der ersten Strophe D, und auf das D weist auch die Erhöhung des C zu Cis im ersten Akkord hin, und die Hauptmelodie, welche der Tenor zu führen hat, läßt von Anfang an D als Tonika erkennen. Aber erst im achten Takt des Satzes erscheint ein D-Moll-Akkord, den ein moderner Komponist auf den ersten guten Taktteil des ersten Taktes hätte setzen müssen."

Ich bat einen modernen Komponisten, der auch Physiker und Akustikwissenschaftler ist, mir die Tonart des Beispiels zu nennen. Erst meinte er, das Stück stünde in D, am nächsten Tag erklärte er mir, das sei aber Ansichtssache. „Eine Kirchentonart", verkündete der musikalisch weitaus erfahrenere Gerald Strang: „Für mich ganz klar dorisch!"

Wie Konsonanz und Harmonie zusammenhängen, das wollen wir im folgenden Kapitel näher untersuchen.



Der Anfang des *Stabat Mater* von Palestrina. Helmholtz weist darauf hin, daß zwar sämtliche Akkorde konsonant sind, sie aber für unser tonales Harmonieverständnis in ihrer Folge ungewöhnlich klingen. Für Palestrina stand vielleicht eine konsonante melodische Linie der Einzelstimmen und weniger die tonale Harmonie der Akkorde im Vordergrund.

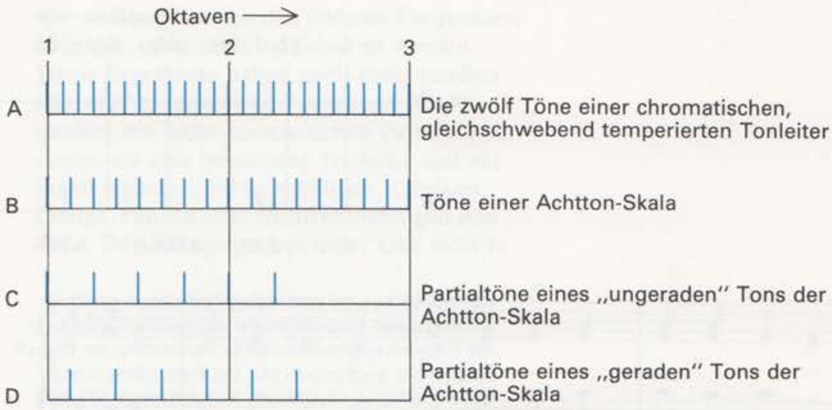
Rameau und Harmonie

Jahrelang sah ich in den Arbeiten von Helmholtz und in ihrer Ergänzung durch Plomp einen Schlüssel, um Konsonanz und Harmonie gemeinsam auf der Basis der Physik und Psychoakustik zu beschreiben. Alles schien einfach. Wenn keine oder nur wenige Partialtöne innerhalb der kritischen Bandbreite liegen, ergeben sich konsonante Akkorde. Auf diese Weise sollten die klassischen konsonanten Intervalle (Oktave oder Quinte) ebenso leicht erklärbar sein wie die dissonanten (Sekunde, Septime).

Harmonie war nach meinem Verständnis im Kontrapunkt mehrstimmiger Kompositionen begründet, bei denen die Akkorde traditionell nur dissonant werden, wenn eine Stimme bewußt gegen eine andere geführt wird. Denn die traditionell als konsonant geltenden Akkorde genügen größtenteils den Helmholtzschen Kriterien.

Die Vorstellungen von Helmholtz und Plomp brachten mich 1966 auf die Idee, eine neue Tonleiter zu entwickeln, die eine vollendete Harmonie erlauben würde. Das Ergebnis war eine Leiter mit acht Tönen innerhalb einer Oktave. Das Frequenzverhältnis für einen Tonschritt betrug 1,0905. Für den ersten und dritten Ton ergab sich ein Frequenzverhältnis von 1,1892, genau wie bei einer kleinen Terz (in gleichschwebend temperierter Stimmung). Tatsächlich bilden die vier „temperierten Töne" C, Es, Ges und A das Grundgerüst der neuen Leiter, wobei die restlichen Töne jeweils 1,5 Halbtöne darüber eingefügt sind.

Auch die Töne waren neu. Sie stammten vom Computer und waren so gewählt, daß die höheren Partialtöne – mit Ausnahme der Oktaven – nicht in einem harmonischen Frequenzverhältnis standen. Als Obertöne wurden einfach die Grundfrequenzen der übrigen Töne aus der neuen Tonleiter genommen. Damit lagen alle Partialtöne automatisch eine (gleichschwebend temperierte) kleine Terz auseinander. Für manche Musiker klang ein solcher Einzelton dann schon fast wie ein verminderter Septimakkord – also dissonant. Ich selbst empfand die Töne keineswegs so, sondern wohlklingend frisch,



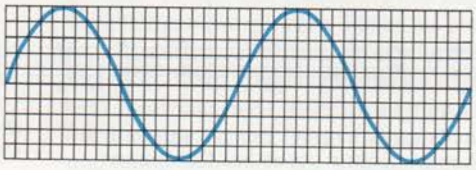
Die Frequenzen für verschiedene Tonleitern sind hier anhand der Abstände zwischen den Oktaven (1, 2, 3) angegeben. Bei der zweiten Oktave hat sich die Frequenz verdoppelt, bei der dritten vervierfacht. Die senkrechten farbigen Striche stehen jeweils für die Grundfrequenzen (erste Harmonische) der einzelnen Töne. Bei der gleichschwebend temperierten (chromatischen) Tonleiter (A) sind es die zwölf Halbtonschritte; die Tonleiter (B) mit acht Tönen wurde für den Achtton-Kanon verwendet. Die ersten sechs Partialtöne dieser Achtton-Leiter sind in C und D für *ungerade* und *gerade* Töne dargestellt. Gerade und ungerade besagen dabei, daß die Frequenz einem geradzahligen oder ungeradzahligen Vielfachen der Grundfrequenz entspricht. Die Partialtöne eines Einzeltons – ob gerade oder ungerade – liegen im Abstand einer Viertel Oktave und fallen für gerade beziehungsweise ungerade Töne jeweils untereinander zusammen. Zwischen den Partialtönen eines geraden und eines ungeraden Tons liegt aber bei dieser „künstlichen" Achtton-Skala nur eine Achtel Oktave, also weniger als die kritische Bandbreite. Es handelt sich denn auch um ein ausgesprochen dissonant klingendes Intervall.

und das entspricht ja auch den Konsonanzkriterien, die wir gerade im vorigen Kapitel diskutiert haben.

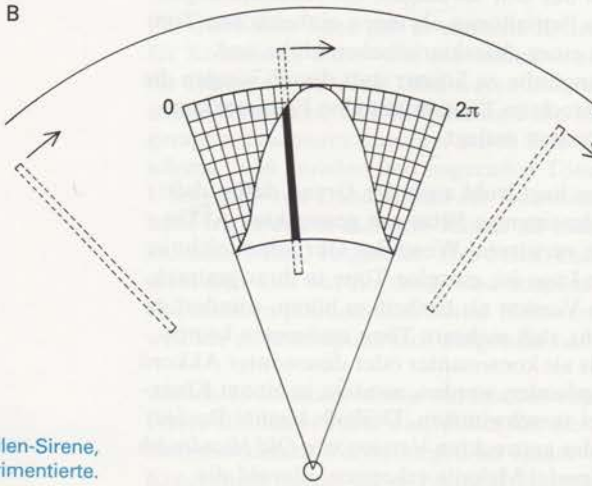
Natürlich klangen nicht alle diese Töne auch zusammen konsonant. Wann Dissonanzen auftreten, läßt sich leicht feststellen, indem man zwischen *geraden* und *ungeraden* Tönen unterscheidet. *Ungerade* sind der erste, dritte, fünfte und siebte Ton, *gerade* der zweite, vierte, sechste und achte. Benachbarte gerade Töne (und all ihre Obertöne) liegen immer ein Viertel einer Oktave auseinander; und dasselbe gilt für zwei aufeinanderfolgende

Jan Schouten.

A



B



Das Prinzip der Wellen-Sirene, mit der Schouten experimentierte.

Frequenzverhältnisse mathematisch völlig mit dem „Original" übereinstimmten und deshalb nach Helmholtz und Plomp auch Konsonanz und Dissonanz erhalten bleiben sollten.

Rückblickend muß ich sagen, daß ich dieses Ergebnis eigentlich schon damals absehen konnte. Jan Schouten hatte mir kurz nach dem Zweiten Weltkrieg in den Philips-Laboratorien im niederländischen Eindhoven ein eindrucksvolles Experiment vorgeführt. Mit einer Art optischer Sirene, die er entwickelt hatte, konnte er Klänge unterschiedlichster Wellenformen erzeugen. Bei Klängen mit harmonischen Partialtönen der Frequenzen f_0, $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$ und so fort konnte Schouten die Grundfrequenz f_0 nach Belieben ausblenden und wieder einfügen. Das war dann zwar zu hören, aber ich hatte nicht den Eindruck, daß sich die Tonhöhe (der periodischen Welle) änderte. Mein Gehör registrierte die Tonhöhe offenbar anhand der Frequenzdifferenz zwischen benachbarten Harmonischen, die ja gerade der Frequenz f_0 der Grundwelle entspricht.

Später stellte ich fest, daß Schouten diese Ergebnisse schon 1938 veröffentlicht hatte, in einer Publikation von 1940 benutzte er den Begriff *Residual-Tonhöhe* für die empfundene Tonhöhe bei fehlender Grundfrequenz f_0. Heute sagt man dazu *Periodizitäts-Tonhöhe*.

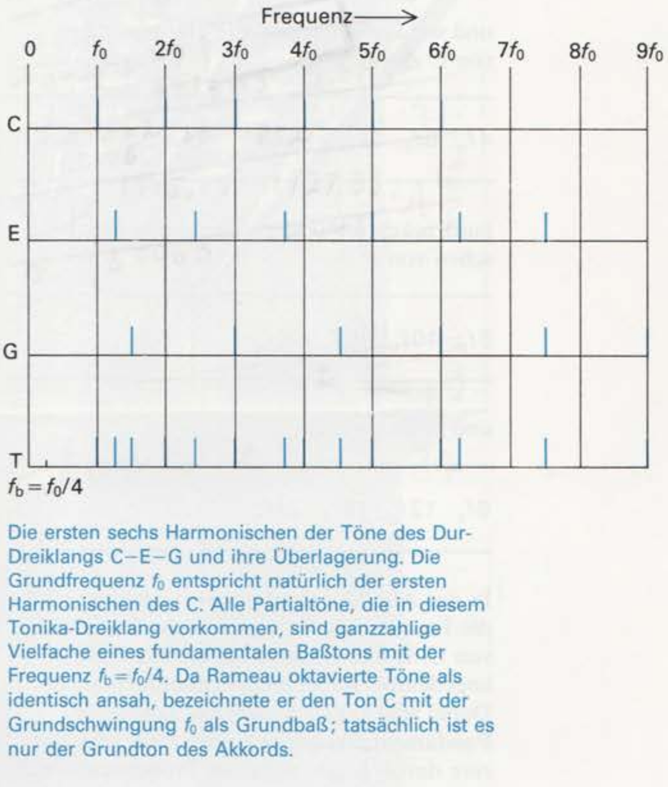
Wer einmal Musik in einem Taschentransistorradio gehört hat, braucht von Schoutens Beobachtungen nicht überrascht sein. Die Lautsprecher sind nämlich so klein, daß sie die Grundfrequenzen der tieferen Töne nur unhörbar schwach wiedergeben. Gleichwohl erkennen wir die richtige Tonhöhe, auch wenn die Musik etwas dünn klingt. Später hat sich dann gezeigt, daß wir die Tonhöhe anhand der Frequenzdifferenz zwischen benachbarten Harmonischen sogar dann noch exakt hören, wenn mehrere tiefere Harmonische fehlen.

Ein geschultes Ohr kann harmonische Klänge bis zu einem gewissen Grade in Partialtöne zerlegen. Schon Helmholtz beobachtete, daß man bis zu drei Harmonische getrennt hören kann. Das hat mir D. E. Broadbent, Leiter des Psychologischen Instituts im britischen Cambridge, vorgeführt. Nacheinander fügte er zu einer Sinuswelle die höheren Harmonischen bis zur sechsten hinzu. Davon empfand ich die ersten drei noch als Einzeltöne mit verschiedenen Tonhöhen. Als jedoch die vierte Harmonische hinzukam, mischten sich die Einzelkomponenten bereits zu einem einzigen Ton mit der Stimmung der Grundwelle. (Es gibt Leute, die angeblich noch bei fünf oder gar sieben Partialtönen einzelne Frequenzkomponenten heraushören.) Offenbar besteht eine starke Tendenz, mehreren Sinustönen mit Frequenzen, die einem ganzzahligen Vielfachen einer Grundfrequenz entsprechen, die Tonhöhe der Grundwelle zuzuschreiben, selbst wenn diese Grundwelle und einige ihrer Harmonischen gar nicht vorhanden sind. Die Intervalle aufeinanderfolgender höherer Partialtöne brauchen nicht einmal völlig gleich zu sein, um den Eindruck einer einheitlichen Tonhöhe zu erwecken. So hat die Stimmung, die wir den Glocken zuschreiben, nichts mit der Frequenz des niedrigsten Partialtons zu tun, hier beruht die Tonhöhe vielmehr auf einem Mittelwert, der sich aus den Frequenzdifferenzen einiger höherer Partialtöne des Glockenklangs ergibt.

Bei den Noten einer gestreckten Tonleiter treten die Partialtöne nicht in gleichen Frequenzabständen auf, wie die Abbildung auf Seite 76 zeigt. Diese Abstände weichen von der Grundfrequenz und auch untereinander so stark ab, daß unser Gehör daraus keine einheitliche Tonhöhe erkennen kann und keinen Gesamtklang empfindet. Wenn schon gestreckte Partialtöne nicht zu einem einzigen Ton mit eigener Klangfarbe verschmelzen, braucht man sich nicht zu wundern, daß Akkorde aus solchen Tönen erst recht nicht musikalisch einheitlich klingen.

Was hat das alles mit Rameau und seinen Harmonievorstellungen zu tun? Für Rameau war jeder Dur-Dreiklang durch eine fundamentale Baßnote, den *Grundbaß*, charakterisiert. Was ist darunter zu verstehen?

Wir wollen das am Beispiel des Dur-Dreiklangs C–E–G erklären. Die Terz (E) über dem C mit der Grundfrequenz f_0 hat die Frequenz $(5/4)f_0$ und die Quinte (G) über dem C $(3/2)f_0$. Für die Harmonischen von C ergeben sich also die Frequenzen.



Die ersten sechs Harmonischen der Töne des Dur-Dreiklangs C–E–G und ihre Überlagerung. Die Grundfrequenz f_0 entspricht natürlich der ersten Harmonischen des C. Alle Partialtöne, die in diesem Tonika-Dreiklang vorkommen, sind ganzzahlige Vielfache eines fundamentalen Baßtons mit der Frequenz $f_b = f_0/4$. Da Rameau oktavierte Töne als identisch ansah, bezeichnete er den Ton C mit der Grundschwingung f_0 als Grundbaß; tatsächlich ist es nur der Grundton des Akkords.

$f_0,\ 2f_0,\ 3f_0,\ 4f_0,$

für die Note E sind es

$(5/4)\,f_0,\ 2(5/4)\,f_0,\ 3(5/4)\,f_0,\ 4(5/4)\,f_0$

und für G schließlich

$(3/2)\,f_0,\ 2(3/2)\,f_0,\ 3(3/2)\,f_0,\ 4(3/2)\,f_0.$

Die Partialtöne der Noten dieses Akkords sind alle ganzzahlige Vielfache einer gemeinsamen Frequenz

$$f_b = (1/4)\, f_0,$$

und wir können somit alle Harmonischen von C als Vielfache

$$4f_b,\ 8f_b,\ 12f_b,\ 16f_b$$

ausdrücken und entsprechend alle Harmonischen von E

$$5f_b,\ 10f_b,\ 15f_b,\ 20f_b$$

und schließlich G

$$6f_b,\ 12f_b,\ 18f_b,\ 24f_b.$$

In der Abbildung auf der vorigen Seite sind die Frequenzen der ersten sechs Partialtöne von C, E und G durch senkrechte Striche angedeutet, wobei einige zusammenfallen. Dabei sind zugleich viele Partialtöne der Fundamentalfrequenz f_b vertreten, und mehrere davon folgen sogar im Frequenzabstand f_b. Das gilt etwa für die ersten Harmonischen von C, E und G, die bei $4f_b$, $5f_b$ und $6f_b$ liegen, weiterhin folgt auf die dritte Harmonische von E bei $15f_b$ die vierte Harmonische von C mit $16f_b$, Entsprechendes gilt schließlich für $24f_b$ (die sechste Harmonische von C) und $25f_b$ (die fünfte Harmonische von E).

Wir müßten also jetzt einen Grundton hören, der zwei Oktaven unter dem C bei der Frequenz $f_b = f_0/4$ liegt. Und das ist auch der Fall, wie die Untersuchungen des deutschen Akustikers Ernst Terhardt und anderer gezeigt haben.

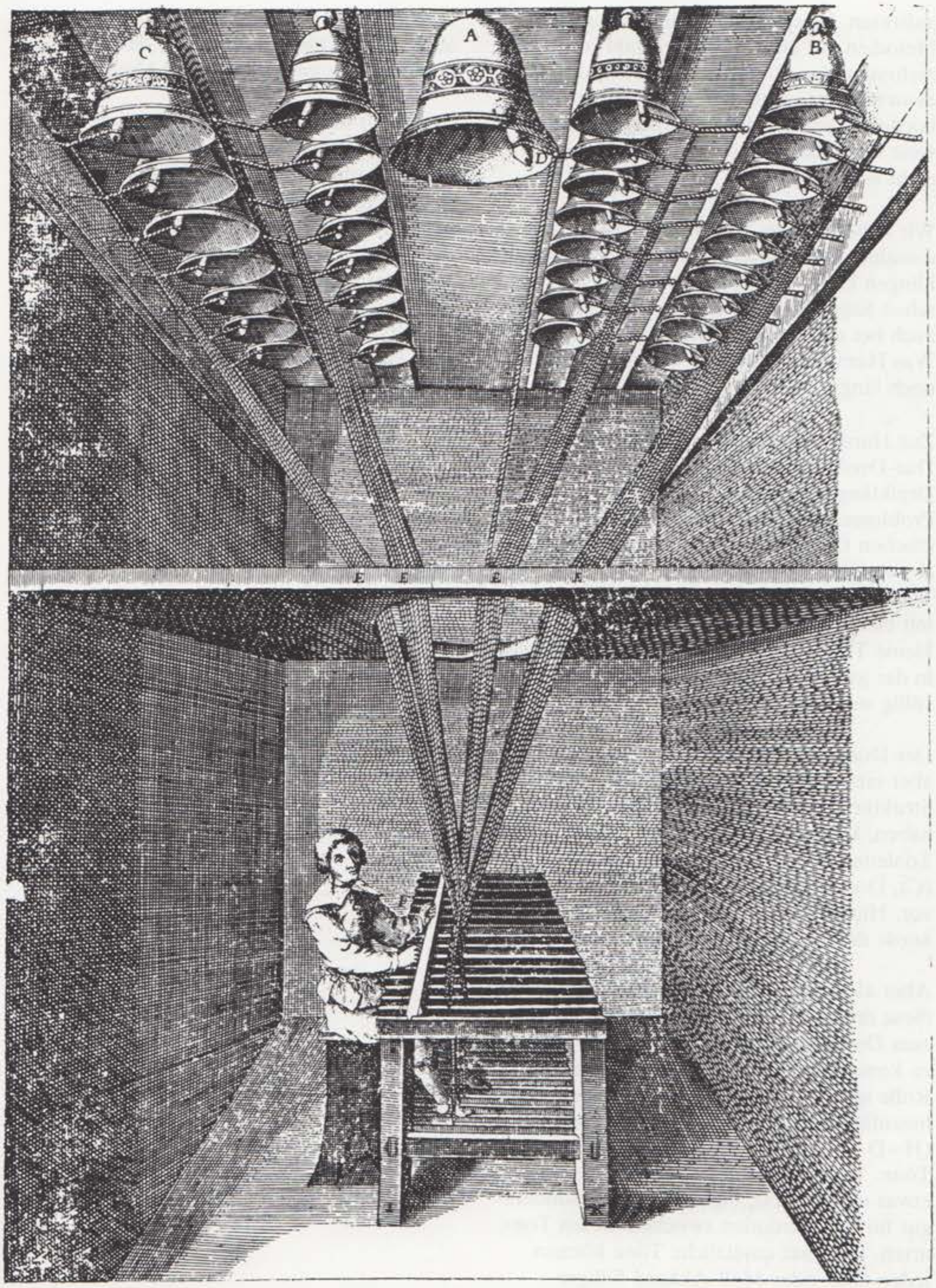
Auch Rameau hat wohl diesen Grundbaß gehört. Da Töne im Abstand von einer oder mehreren Oktaven für ihn jedoch im wesentlichen identisch waren, bezeichnete er den ersten Ton des Dur-Dreiklangs (in unserem Beispiel das C) als Grundbaß, und nicht den zwei Oktaven tiefer liegenden Ton.

Rameau faßte die Umkehrungen eines Akkords erstmals als ein und denselben harmonischen Akkord auf, weil sie alle den gleichen Grundbaß haben. Auch heute betrachten wir den Dreiklang (C–E–G) und seine erste und zweite Umkehrung (E–G–C und G–C–E) als einen Akkord. Vor Rameau hatten die Umkehrungen dagegen verschiedene Namen und galten als eigenständige Akkorde.

Wenn es am Grundbaß liegt, daß wir Dur-Akkorde als Zusammenklingen dreier Töne hören, deren Harmonische auch ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sind, dann leuchtet es ohne weiteres ein, warum gestreckte Akkorde nicht mehr harmonisch klingen. Nach der Streckung sind die Partialtöne eben nicht mehr ganzzahlige Vielfache irgendeiner Frequenz; man kann dann keinen Grundbaß hören. Es gibt nichts Gemeinsames in der Ansammlung gestreckter Töne, an dem sich unser Ohr orientieren könnte, und wir empfinden keine eindeutige Tonhöhe.

Die Töne einer gestreckten Tonleiter wecken beim Zuhörer gleichwohl den Eindruck, daß der Klang in der Stimmung höher wird, auch wenn man bei diesem Klanggemisch aus Sinuskomponenten keine Tonhöhe empfindet. Eine Melodie wird zwar eigenartig verfremdet, ist aber mühelos wiederzuerkennen. Sobald jedoch Töne zusammenklingen, geht durch die Streckung alle Harmonie verloren.

Die Grundlagen der Konsonanz hat Helmholtz großenteils richtig erklärt. Wie Plomp später nachgewiesen hat, wirken Klänge dann rauh oder dissonant, wenn zu viele Partialtöne innerhalb der kritischen Bandbreite liegen. Das gilt unabhängig von irgendwelchen anderen Eigenschaften und erklärt in vielen Fällen, warum Dissonanzen



Das Glockenspiel in der Kathedrale Notre-Dame von Anvers.

auftreten. Beispielsweise klingen einstimmige Melodien auf einem Glockenspiel recht gut, mehrstimmige aber meistens etwas dissonant, denn auch bei nominell „konsonanten" Akkorden liegen bei diesem Schlaginstrument viele nicht-harmonische Partialtöne sehr dicht beieinander.

Wir haben bereits erwähnt, daß selbst ein einzelner musikalischer Ton in sich dissonant klingen kann – etwa im Falle der elektronischen Sägezahn- und Rechteckwellen oder auch bei einzelnen Tönen des Cembalos. Was Harmonie bedeutet, war damit aber noch längst nicht klar.

Zur Harmonie gehört freilich mehr als nur Dur-Dreiklänge. Aber schon mit den Moll-Dreiklängen begannen für Rameau die Probleme, denn sie haben keinen charakteristischen Grundbaß. Und auch die frühen Komponisten taten sich schwer mit den Moll-Tonarten, ihre Schlußkadenzen enden häufig mit einem Tonika-Dreiklang, bei dem die kleine Terz durch eine große ersetzt ist, und in der ganz alten Musik wurde die Terz sogar völlig weggelassen.

Der Dur-Dreiklang und sein Grundbaß bilden aber eine Art Grundgerüst der harmonischen Strukturen. Wie wir schon früher gesehen haben, kommen alle Töne der (diatonischen) Tonleiter in den Dur-Dreiklängen von Tonika (C), Dominante (G) und Subdominante (F) vor. Hintereinander gespielt legen diese Akkorde die Tonart eindeutig fest.

Aber als einzige Quelle von Harmonie wären diese drei Akkorde ziemlich langweilig. Um zum Dominantseptimakkord (G–H–D–F) zu kommen, der traditionell eine wichtige Rolle spielt, muß man einen dissonanten Ton hinzufügen. Der verminderte Septimakkord (H–D–F–As) hat in vier Tonarten dieselben Töne. Weil er nicht ganz eindeutig, sondern etwas unstet wirkt, eignet er sich besonders gut für Modulationen zwischen diesen Tonarten. Ein paar zusätzliche Töne können jeden Dur- oder Moll-Akkord fülliger machen oder auch das Gefühl bewirken, einen anderen Akkord zu hören oder gar eine andere Tonart. Manchmal läßt man auch einfach einige Töne weg, damit ein Akkord vage und unbestimmt klingt.

Bevor wir dieses Kapitel abschließen, möchte ich nochmals auf die wichtige Rolle der nicht-harmonischen Partialtöne hinweisen. Glocken und Gongs verdanken ihnen ihren eigentümlichen Klang. Vielleicht erweisen sich auch die Partialtöne mit völlig ungewohnten Frequenzverhältnissen als musikalisch interessant. Aus meiner eigenen Erfahrung weiß ich jedoch, daß die Suche nach neuen Klängen ihre Tücken hat. Wer hier experimentieren will, muß wissen, daß nicht alles so einfach ist, wie es anfangs aussieht.

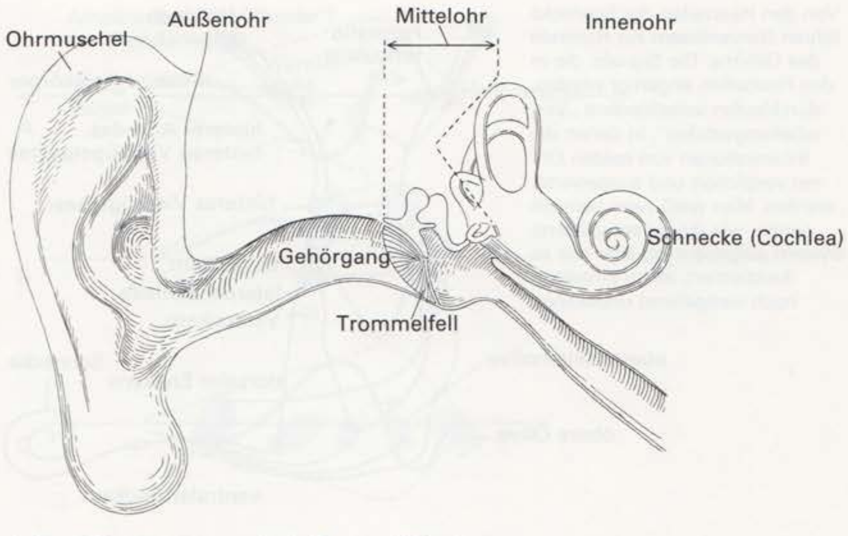
Ohren zum Hören

All die wundervollen Klänge, die wir hören, sind das Ergebnis eines Verarbeitungsprozesses, den Schallwellen hervorrufen. In unseren Ohren lösen sie Signale aus, die über Nervenfasern zum Gehirn geleitet werden. Man weiß zwar ziemlich genau, wie das Ohr aufgebaut ist und wie die Nerven verlaufen, aber der Gehörsinn ist noch lange nicht vollständig verstanden.

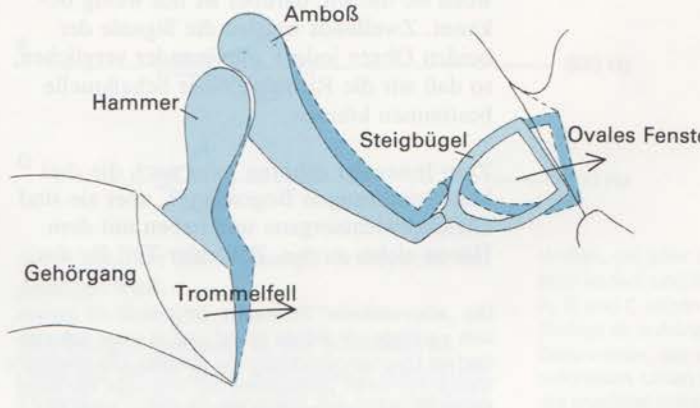
Schauen wir uns die schematische Darstellung des Ohrs an. Die Ohrmuschel (Pinna) wurde lange Zeit in ihrer Bedeutung verkannt, bis Wayne Batteau im Jahre 1967 bewies, wie wichtig sie für die Ortung der Schallquelle ist. Wenn wir die Ohrmuscheln glatt an den Kopf anlegen oder alle Vertiefungen mit Wachs ausfüllen, können wir oft nicht mehr feststellen, aus welcher Richtung der Schall (einer nicht sichtbaren Quelle) kommt. Wenn dann jemand in unmittelbarer Nähe mit einem Schlüsselbund rasselt, läßt sich nicht sicher sagen, ob das Geräusch von vorn, der Seite oder aber von oben kommt. Offenbar trägt die Ohrmuschel dadurch zur Richtungsbestimmung bei, daß die Hörempfindlichkeit je nach Richtung und Frequenz der Schallquelle gewaltig schwankt.

An die Ohrmuschel schließt sich der etwa 2,7 Zentimeter lange Gehörgang (Meatus) an, der am Trommelfell endet. Der Gehörgang wirkt als ziemlich breitbandiger Resonator mit einer Resonanzfrequenz von etwa 2700 Hertz. Aufgrund dieser Resonanz und der Eigenschaften von Mittel- und Innenohr hören wir Frequenzen um 3400 Hertz besonders deutlich.

Das Trommelfell markiert die Grenze zwischen äußerem Ohr und Mittelohr. Es wird durch die Schallwellen im Gehörgang in Schwingung versetzt und überträgt diese Schwingungen auf drei Gehörknöchelchen im Mittelohr: Hammer (Malleus), Amboß (Incus) und Steigbügel (Stapes). Die drei Knöchelchen sind beweglich verbunden und übertragen die Trommelfellschwingungen auf eine Membran über dem sogenannten Ovalen Fenster. Diese Membran schließt das Mittelohr vom flüssigkeitsgefüllten Innenohr ab.

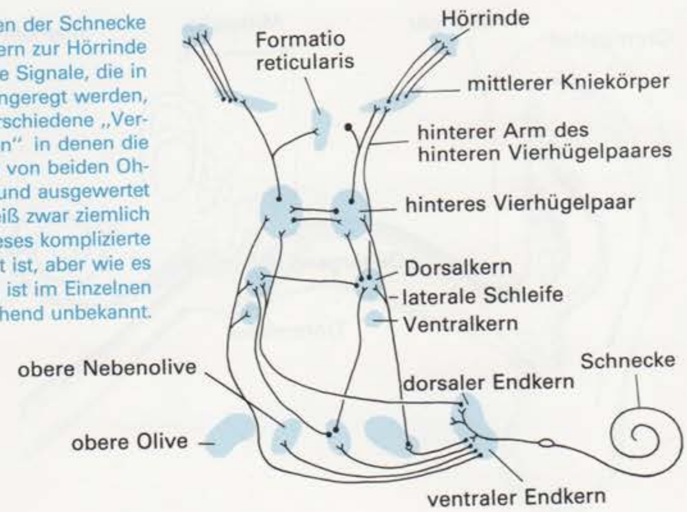


Außen-, Mittel- und Innenohr Außen- und Mittelohr sind durch das Trommelfell getrennt. Beide sind mit Luft gefüllt. Im Innenohr (hinter den Gehörknöchelchen) befinden sich verschiedene Flüssigkeiten. Im Gegensatz zur Schnecke (Cochlea) haben die Bogengänge des Innenohrs nichts mit dem Hören zu tun; sie sind Gleichgewichtsorgane.



Die Gehörknöchelchen im Mittelohr übertragen die Schwingungen des Trommelfells auf eine Membran, die sich über das Ovale Fenster spannt.

Von den Haarzellen der Schnecke führen Nervenfasern zur Hörrinde des Gehirns. Die Signale, die in den Haarzellen angeregt werden, durchlaufen verschiedene „Verarbeitungsstufen" in denen die Informationen von beiden Ohren verglichen und ausgewertet werden. Man weiß zwar ziemlich genau, wie dieses komplizierte System aufgebaut ist, aber wie es funktioniert, ist im Einzelnen noch weitgehend unbekannt.



Im inneren Ohr werden die Schallschwingungen in elektrische Impulse umgesetzt. Diese laufen über ein ziemlich kompliziertes und vernetztes System von Nervenfasern zum Gehirn. Man weiß einiges über den Verlauf dieser Nervenfasern einschließlich der Kreuzungspunkte und Verbindungsstellen, aber wozu sie dienen, darüber ist nur wenig bekannt. Zweifellos werden die Signale der beiden Ohren jedoch miteinander verglichen, so daß wir die Richtung einer Schallquelle bestimmen können.

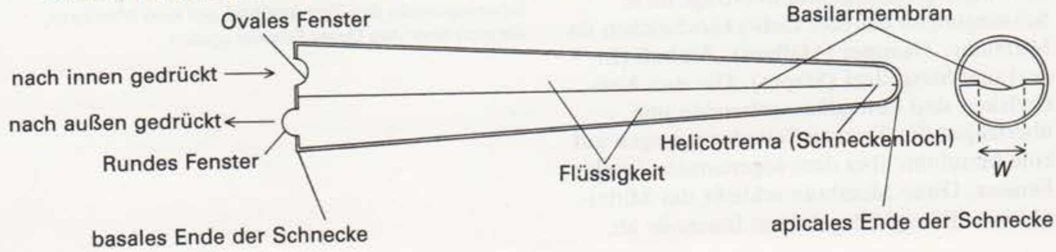
Zum Innenohr gehören zwar auch die drei halbkreisförmigen Bogengänge, aber sie sind Gleichgewichtsorgane und haben mit dem Hören nichts zu tun. Zentraler Teil für das Gehör ist die Schnecke (Cochlea), eine zur Spirale aufgewickelte konische Röhre. Dabei werden etwa zweieinhalb Spiralwindungen erreicht.

Die Schnecke ist abgerollt etwa drei Zentimeter lang und wird gewöhnlich auch so dargestellt, um Aufbau und Funktion deutlich zu machen. Am dickeren Basalende mißt sie etwa 0,9 Zentimeter im Durchmesser, am Apicalende nur noch 0,3 Zentimeter. Fast über die gesamte Länge spannt sich die elastische Basilarmembran, deren Breite *W* in der Querschnittszeichnung rechts in der Abbildung unten angedeutet ist. Wenn der Druck der Flüssigkeit über der Membran größer ist als darunter, biegt sie sich wie in der Abbildung nach unten durch.

Breite und Elastizität der Basilarmembran sind längs der Schnecke verschieden. Am dünneren (apicalen) Ende ist die Membran sehr breit und relativ schlaff, am dickeren (basalen) Ende schmal und steif. Die Basilarmembran reicht nicht ganz bis zum apicalen Ende, sondern hat dort eine Öffnung. Durch dieses Schneckenloch oder Helicotrema kann Flüssigkeit von der Oberseite der Basilarmembran nach unten strömen oder umgekehrt nach oben gedrückt werden.

Am basalen Ende der Schnecke befinden sich zwei Öffnungen, die von dünnen, dehnbaren Membranen verschlossen werden. Die obere davon wird *Ovales Fenster* genannt, und ihre Membran ist mit dem Steigbügel

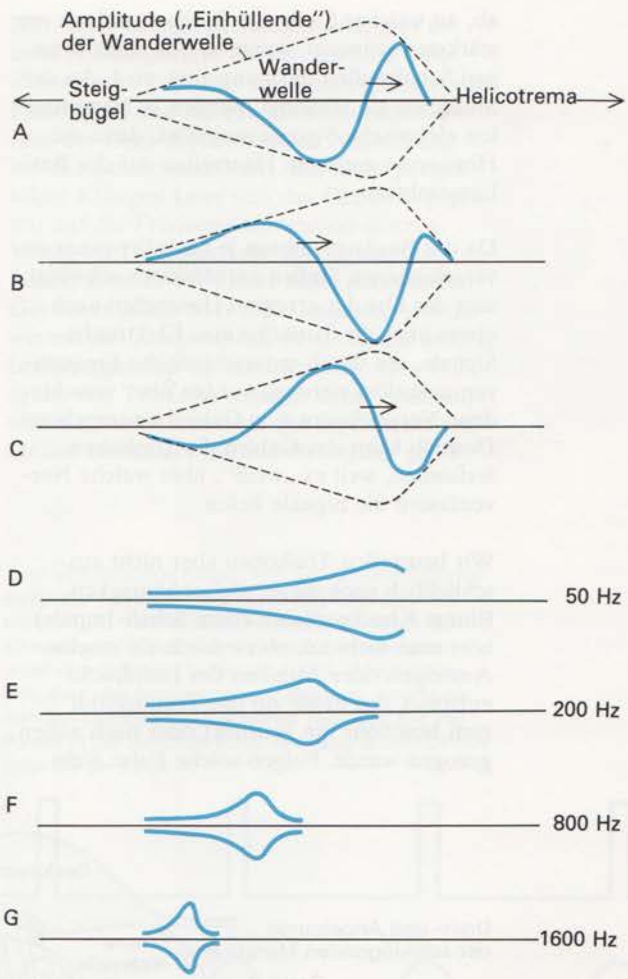
Die „abgewickelte" Schnecke, dargestellt als gerade, sich verjüngende Röhre (links) und in einer schematischen Querschnittszeichnung (rechts). Die elastische Basilarmembran überspannt die Schnecke mit einer Breite *W*, die vom basalen zum apicalen Ende hin zunimmt. Wenn die Membran über dem Ovalen Fenster eingedrückt wird, entsteht in der Flüssigkeit oberhalb der Basilarmembran kurzzeitig erhöhter Druck, so daß eine Wellenbewegung ausgelöst wird. Durch das Schneckenloch oder Helicotrema kann Flüssigkeit von einer Seite der Basilarmembran zur anderen strömen.



verbunden. Wenn er durch eine Schallwelle auf die Membran gedrückt wird, weicht die Flüssigkeit im oberen Teil der Schnecke nach rechts aus, verschiebt sich der Steigbügel jedoch nach außen, so wird die Membran über dem Ovalen Fenster ebenfalls nach außen gezogen, und die Flüssigkeit in der oberen Hälfte strömt zum basalen Ende nach. Die Membran über dem Runden Fenster der Schnecke ist mit keinem Gehörknöchelchen gekoppelt. Sie dehnt sich nur aus und zieht sich wieder zurück, wenn der Druck in der Flüssigkeit unter der Basilarmembran schwankt.

Angenommen, das Ovale Fenster wölbt sich langsam nach innen vor, dann strömt Flüssigkeit über der Basilarmembran zum apicalen Ende, ein Teil durchquert das Helicotrema und drückt die Flüssigkeit unterhalb der Basilarmembran wieder zum basalen Ende, wo sich die Membran über dem Runden Fenster schließlich nach außen biegt. Diese Situation ist in der Zeichnung der (gestreckten) Schnecke dargestellt. In Wirklichkeit bewegt eine Schallwelle den Steigbügel ziemlich schnell hin und her, so daß der Druck über der Basilarmembran im gleichen Takt zu- und abnimmt. Jetzt läuft eine Welle durch die Schnecke, wir können uns das als eine Auf- und Abbewegung der Basilarmembran vorstellen, die zum apicalen Ende wandert.

Wir wollen einmal annehmen, der Steigbügel schwinge mit einer Frequenz *f* sinusförmig hin und her. Diese Frequenz beeinflußt die Geschwindigkeit, mit der die Welle über die Basilarmembran läuft. Wie schnell sich die Welle ausbreitet, hängt darüber hinaus von der Flüssigkeitsmasse (pro Längeneinheit der Schnecke) sowie der Masseverteilung und der Elastizität der Basilarmembran ab. Dabei ist zu berücksichtigen, daß sich der Querschnitt der Schnecke sowie Breite und Elastizität der Basilarmembran vom basalen zum apicalen Ende hin ändern. Eine Welle mit konstanter Frequenz wird immer langsamer, bis die Geschwindigkeit an einem gewissen Punkt auf Null gesunken ist. Ganz in der Nähe dieses Punktes schwingt die Basilarmembran am stärksten auf und ab, so daß



Wellen, die über die Basilarmembran laufen, und ihre Einhüllenden. A, B und C zeigen dieselbe Welle (farbig) zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten, die schwarzen gestrichelten Linien kennzeichnen die maximal mögliche Auslenkung der Basilarmembran für die jeweiligen Teillängen. Diese Kurven heißen Einhüllende. D, E, F und G geben die Einhüllenden von Wellen mit vier unterschiedlichen Frequenzen wieder

die Welle ihre letzte Energie verbraucht und gestoppt wird.

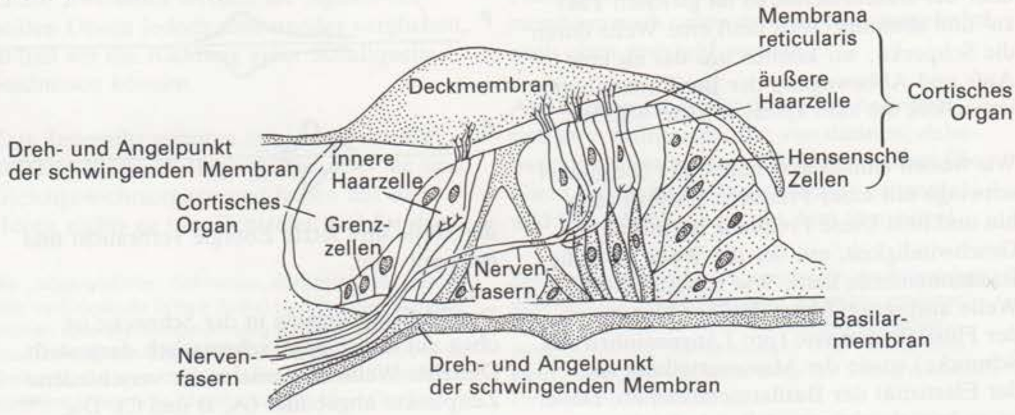
Die Wellenbewegung in der Schnecke ist oben auf dieser Seite schematisch dargestellt. Dieselbe Welle ist zunächst für verschiedene Zeitpunkte abgebildet (A, B und C). Die gestrichelten Linien geben die Einhüllende der Welle wieder, das heißt, die größtmöglichen Auslenkungen der Basilarmembran für die verschiedenen Orte. Sie verändern sich mit der Frequenz, wie die Kurven D bis G verdeutlichen. Bei niedrigen Frequenzen wird die größte Auslenkung der Basilarmembran näher am apicalen Ende erreicht als bei höheren. Mithin hängt es von der Frequenz ab, an welcher Stelle die Basilarmembran am stärksten schwingt, wenn sie von sinusförmigen Schallwellen dazu angeregt wird. An der Stelle, wo sie schwingt, werden in Nervenzellen elektrische Signale ausgelöst, denn die Hörnerven enden in Haarzellen auf der Basilarmembran.

Da die Basilarmembran je nach Frequenz an verschiedenen Stellen am stärksten schwingt, sagt der Ort der erregten Haarzellen auch etwas über die Tonhöhe aus. Elektrische Signale, die durch unterschiedliche Frequenzen ausgelöst werden, werden über verschiedene Nervenfasern zum Gehirn weitergeleitet. Deshalb kann das Gehirn die Tonhöhen feststellen, weil es „weiß", über welche Nervenfasern die Signale liefen.

Wir beurteilen Tonhöhen aber nicht ausschließlich nach dieser Ortsabhängigkeit. Einem Knackgeräusch (dem Schall-Impuls) hört man nicht an, ob es durch ein rasches Ansteigen oder Abfallen des Luftdrucks entstand, das heißt, ob das Trommelfell zum Innenohr hin gedrückt oder nach außen gezogen wurde. Folgen solche Pulse dicht hintereinander, so kann unser Ohr bis zu einem gewissen Grade die Wiederholrate erkennen. Periodisch wiederkehrende Pulse werden bisweilen als Ton einer bestimmten Höhe empfunden.

Die Wiederholrate der Schallpulse, die das Trommelfell erreichen, steht mitunter aber im Widerspruch zur Frequenzanalyse in der Schnecke. Das illustriert die Abbildung rechts für zwei Pulsfolgen. Eine davon enthält nur Schallpulse mit positivem Vorzeichen (A), der Luftdruck steigt hier kurzfristig an, um dann wieder auf den Ausgangswert abzusinken. Bei der zweiten Folge (B) wechseln sich positive und negative Pulse ab; der Luftdruck wird also für kurze Zeit erhöht und später ebenso kurz erniedrigt. Beide Folgen klingen nicht besonders angenehm, und in gewissen Frequenzbereichen fällt es schwer, B eine eindeutige Tonhöhe zuzuschreiben. Aber sie bilden die Grundlage eines Experiments, das etwas Licht in das Dunkel um die Wahrnehmung der Tonhöhe gebracht hat.

Solange die Wiederholrate gering ist, sagen wir 100 Pulse in der Sekunde, hören wir bei beiden Folgen dieselbe Tonhöhe. Steigt diese Rate jedoch auf 200 Pulse pro Sekunde, dann empfinden wir B als tiefer. Damit wir dieselbe Tonhöhe wahrnehmen, müssen bei B 400 Pulse pro Sekunde erreicht werden. Das entspricht auch den Frequenzen der ersten Partialtöne, die in der Abbildung rechts unten jeweils als Sinuswelle unterhalb



Wenn sich die Basilarmembran bewegt, senden die inneren und äußeren Haarzellen elektrische Impulse über Nervenfasern zum Gehirn.

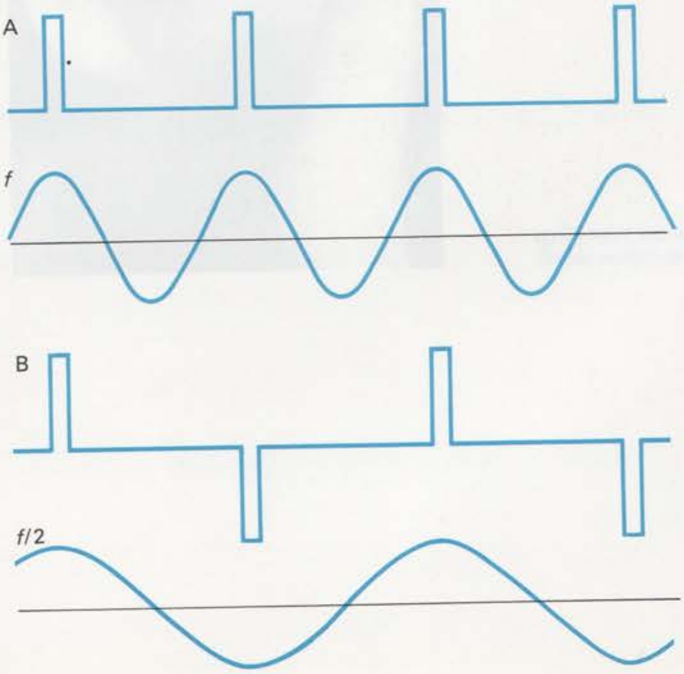
der Pulsfolge dargestellt sind. Im Bereich zwischen 100 und 200 Pulsen pro Sekunde geraten wir in einen Zwiespalt über die Tonhöhe der Folge B. Es kommt zum Widerstreit zwischen der Frequenz, die dem ersten Partialton entspricht, und der Wiederholrate der Schallpulse, die das Gehirn über Nervenfasern aus der Hörschnecke „erfährt". Entsprechendes gilt auch bei höheren Partialtönen für die empfundene Residual-Tonhöhe.

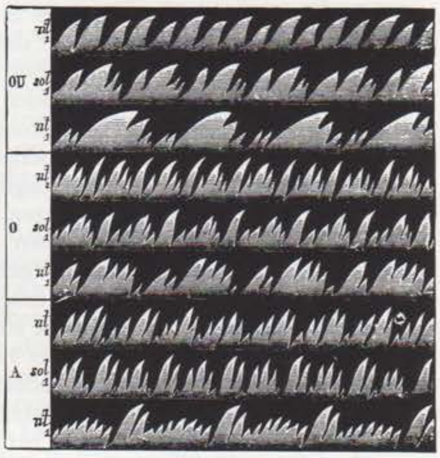
Das Gehirn kann die Tonhöhe ja auf zweierlei Weise bestimmen. Der Ort, an dem die Basilarmembran am stärksten angeregt wird, gibt die Frequenzen einzelner Partialtöne wieder, wie wir anhand der Einhüllenden festgestellt hatten. Das Gehirn kann aber auch auf kurze „Pakete" aus elektrischen Impulsen achten, die periodisch von verschiedenen Stellen der Schnecke über getrennte Nervenleitungen bei ihm ankommen. Diese zweite Methode setzt sich offenbar bei der Pulsfolge B durch, solange die Wiederholrate unter 100 Pulsen pro Sekunde bleibt, die Wiederholfrequenzen der „Impulspakete" werden dann als Tonhöhe gewertet. Bei höheren Wiederholraten gewinnt das ortsabhängige Erkennen von Einzelfrequenzen immer mehr die Oberhand.

Tatsächlich bleibt aber auch dann die Information über den zeitlichen Abstand der „Impulspakete" erhalten. Das läßt sich bei wesentlich höheren Frequenzen nachweisen, wenn beide Ohren über Kopfhörer Sinuswellen ausgesetzt werden, die die gleiche Frequenz haben, sich aber in der Phase unterscheiden. Der Ton scheint dann im Kopf zu entstehen, und zwar etwas näher an dem Ohr, bei dem die Sinuswelle zuerst ihr Maximum erreicht. Dieser Eindruck tritt für Frequenzen zwischen 1000 und 1500 Hertz auf. Bei Sinuswellen mit geringfügig abweichenden Frequenzen hören die meisten Menschen in sich eine Art Schwebung; sie tritt im Bereich unter 1300 bis 1500 Hertz auf. In Tierversuchen hat man die neuronale Aktivität mit feinen Elektroden abgeleitet und festgestellt, daß noch bei Frequenzen von 4000 bis 5000 Hertz Signale über die zeitliche Folge der Impulse entstehen. Ob und wozu diese Information genutzt wird, ist noch unklar.

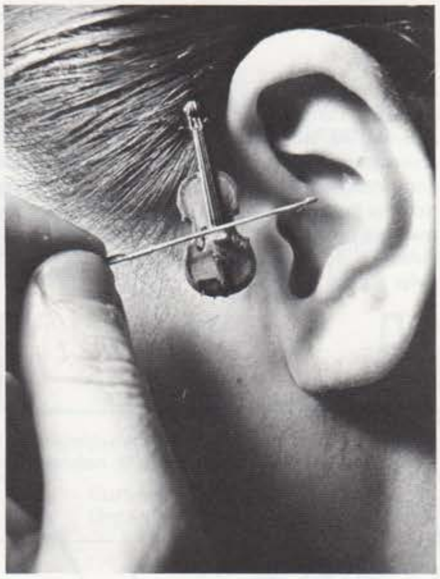
Nur wenn Klänge periodisch sind, gibt es zwei Anhaltspunkte für die Tonhöhe: die Zeitinformation (über die Wiederholrate von Pulsfolgen) und die Frequenzinformation (aus der Lage der maximalen Auslenkung bei der Basilarmembran). Bei nicht-periodischen Klängen kann sich das Gehör dagegen nur auf die Frequenzinformation stützen. Wenn wir Luft durch die Zähne zischen lassen, können wir dieses nicht-periodische Geräusch höher oder tiefer machen, indem wir mit der Zungenspitze an die Zähne stoßen beziehungsweise sie zurückziehen. Der Eindruck von Tonhöhe entsteht dabei dadurch, daß die Basilarmembran nur an bestimmten Stellen besonders stark in Bewegung gerät.

Zwei verschiedene Folgen von Schallpulsen. Einmal steigt der Luftdruck stets kurzfristig über den Normalwert (A), während er in der zweiten Folge (B) abwechselnd ansteigt und danach genauso abrupt unter den mittleren Luftdruck abfällt. Wiederholen sich die Pulse hundertmal pro Sekunde, empfindet man bei beiden Folgen dieselbe Tonhöhe. Bei 200 Pulsen in der Sekunde klingt die Folge B eine Oktave tiefer als die Folge A.





Mit dieser Apparatur aus dem 19. Jahrhundert wurde eine Gasflamme beobachtet, um Schalldruckschwankungen zu verfolgen. Gleiche Vokale erzeugen immer wieder gleiche Störungen des Flammenbildes. Man erhielt so charakteristische periodische Muster, wenn die Flamme über einem Drehspiegel abgebildet wurde.



Die kleinste Geige der Welt klingt ausgesprochen schrill.

Diese Ortsabhängigkeit spielt auch eine wichtige Rolle, wenn wir Timbre oder Klangfarbe von Tönen beurteilen. Beim Singen klingen Vokale auch bei gleicher Tonhöhe unterschiedlich – das „I“ erscheint heller als das „U“

Vokale unterscheiden sich in ihren *Formanten*, darunter sind ganze Frequenzbereiche zu verstehen, deren „Mitte“ mit den Resonanzfrequenzen des Stimmapparates übereinstimmt. Wenn wir sprechen, verändern sich Form und Größe der Hohlräume des menschlichen Stimmapparates und mit ihnen natürlich auch die Formanten. Ihre Frequenzen liegen alle über dem ersten Partialton der gesprochenen oder gesungenen Laute. Wie hoch ein Vokal dabei klingt, spielt für die Frequenzen der Formanten kaum eine Rolle. (Nur in hohen Sopranlagen steigen diese Frequenzen an.) Um Vokale unterscheiden zu können, muß unser Gehör die Formantenfrequenzen anhand der Schwingungen der Basilarmembran registrieren.

Der gleiche ortsabhängige Mechanismus dient dazu, Frequenzkomponenten von Klängen zu unterscheiden. Im Prinzip sollte die kritische Bandbreite, bei der man Frequenzen gerade noch als getrennte Töne hört, einem „Frequenzbereich“ längs der Basilarmembran entsprechen. dem Abschnitt, in dem die Membran von einer einzelnen Sinuswelle stark angeregt wird. Wenn sich die Frequenzen zweier Sinuswellen um mehr als die kritische Bandbreite unterscheiden, sollten beide die Basilarmembran in einem anderen Bereich anregen, so daß sich diese Bereiche nicht oder nur wenig überlappen. Inwieweit zwischen kritischer Bandbreite und den Eigenschaften der Wellen auf der Basilarmembran tatsächlich ein quantitativer Zusammenhang besteht, ist noch unklar. Um das zu entscheiden, müßten wir genauer wissen, durch welche Membranbewegungen Haarzellen im einzelnen angeregt werden. Ist es die Auslenkung oder die Durchbiegung der Basilarmembran oder aber die Wellengeschwindigkeit? Darüber hinaus spielt auch die Form der Einhüllenden für die verschiedenen Frequenzen eine Rolle.

Georg von Békésy, der für seine Arbeiten über das Gehör den Nobelpreis erhielt, experimentierte mit Hörschnecken aus menschlichen Leichen. Dabei bestimmte er auch die relativ breiten Einhüllenden für die Bewegungen der Basilarmembran, die wir in unserer Abbildung auf Seite 89 übernommen haben. Versuche mit lebenden Tieren ergaben später allerdings viel schärfer ausgeprägte Einhüllende, die aber nach dem Tod der Tiere breiter wurden. In jedem Fall müssen wohl spezielle Mechanismen hinzukommen, damit die Wellenbewegung der Basilarmembran als schmale Bandbreite interpretiert werden kann, denn sonst wäre nicht zu verstehen, warum Menschen (und Tiere) Töne und Klänge so gut unterscheiden können.

Sicher wissen wir bislang nur folgendes. Tonhöhe und Klangfarbe werden anhand verschiedenartiger Informationen beurteilt: Entscheidend sind hier die Wiederholrate und die Frequenzspektren von Schallwellen, die sich anhand der Auslenkungen der Basilarmembran ergeben. Welche Tonhöhe und Klangfarbe wir empfinden, wird von jeder dieser Teilinformationen mitbestimmt. Vergleiche der Signale von beiden Ohren tragen dazu bei, die Richtung einer Schallquelle festzustellen.

Schalleistung und Lautstärke

Jeder kennt Geschichten von Sängern oder Sängerinnen, die mit ihren gewaltigen Stimmen Gläser zerspringen lassen. Dahinter stecken rein physikalische Vorgänge, die von der Schalleistung und den physikalischen Eigenschaften des Glases abhängen. Klänge können so lautstark sein, daß sie Mauern erschüttern – und uns beeindrucken.

Auch wenn laut und leise einen subjektiven Eindruck wiedergeben – für Taube ist der gewaltigste Klang nicht laut –, beruht die Lautstärke genauso auf einer Eigenschaft von Tönen wie die Tonhöhe. Sie ist mit der Schalleistung verknüpft, wenn auch auf kompliziertere Weise als die Tonhöhe mit der Frequenz oder Periodizität.

Ein Sänger, eine Posaune oder ein Lautsprecher sind Schallquellen, deren gesamte Schalleistung wir in Watt messen können, einer Einheit, die man auch für die elektrische Leistung benutzt. Von den Schallwellen, die sich nach allen Richtungen ausbreiten, erreicht freilich nur ein Teil unsere Ohren, so daß wir ein Maß für diese Teilleistung benötigen. Es ist die *Leistungsdichte* oder *Intensität* der Schallwelle, die man in Watt pro Quadratmeter angibt. Statt Leistungsdichten direkt zu vergleichen, bezieht man sie üblicherweise auf einen *Referenzpegel* und drückt die Leistungsdichte in Vielfachen eines Referenzwertes von 10^{-12} (oder einem Billionstel) Watt pro Quadratmeter aus. Das entspricht so ziemlich der schwächsten Schalleistung, die wir noch hören können.

Die Intensitäten von Tönen übersteigen den Referenzpegel meist um ein Millionenfaches, und man müßte mit riesigen Zahlen hantieren, um Leistungsverhältnisse anzugeben. Das ist einer der Gründe, warum Leistungs- und Intensitätsverhältnisse in *Dezibel*, abgekürzt *dB*, angegeben werden. Dabei handelt es sich um ein logarithmisches Maß: Ein Leistungsverhältnis von 100 entspricht 20 Dezibel, eines von 10 000 läßt sich mit 40 Dezibel ausdrücken. Wie Leistungsverhältnis und Dezibelmaß zahlenmäßig zusammenhängen, ergibt sich aus der Tabelle rechts oben auf dieser Seite.

Leistungsverhältnisse und Pegel in Dezibel

P/P_r•	Leistungsverhältnis in Dezibel••
1 000 000	60 dB
10 000	40 dB
1 000	30 dB
100	20 dB
10	10 dB
4	6 dB
1	0 dB
1/4 (=0,25)	–6 dB
1/10 (=0,1)	–10 dB
1/100 (=0,01)	–20 dB

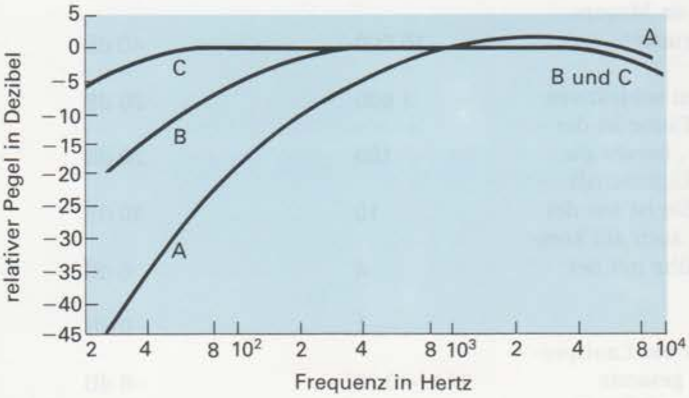
•P ist die gemessene Schalleistung in Watt pro Quadratmeter, P_r die Leistung des Referenzpegels

••Der mathematische Ausdruck für die Anzahl von Dezibel lautet: $10 \log (P/P_r)$, wobei „log" für den Logarithmus zur Basis 10 steht.

Wir wollen Schallintensitäten immer in Dezibel über dem Referenzpegel angeben. Auf Dezibel sind auch die Meßinstrumente für den Schallpegel (bezogen auf den Referenzpegel) geeicht. Genau in diesem Sinne sprechen wir ja häufig von einem *Geräusch-* oder *Lärmpegel* in unserer Umgebung.

Meßgeräte für den Schallpegel geben allerdings nicht die Gesamtleistung aller Frequenzkomponenten eines Klanges wieder. Auch unser Ohr spricht nicht gleich empfindlich auf alle Frequenzen an – sehr tiefe oder hohe können wir überhaupt nicht mehr hören. Ein Schallpegel-Meßgerät *wichtet* die Leistungen oder Intensitäten für die verschiedenen Frequenzkomponenten einer Schallwelle, das heißt, es multipliziert sie mit unterschiedlichen Gewichtsfaktoren, bevor

Zur Messung des Schallpegels. Die Meßgeräte zeigen gewöhnlich nicht die Gesamtleistung an, die sich aus den Intensitäten aller vorhandenen Schallfrequenzen ergibt, sondern die Leistungen werden je nach Frequenz unterschiedlich gewichtet. Die Gewichtsfaktoren für die einzelnen Frequenzen ergeben sich aus den Bewertungskurven A, B oder C. Häufig wird Kurve A zugrunde gelegt, weil die Schallpegel dann den Lautstärken entsprechen, die das menschliche Ohr empfindet. Die so gewichteten Pegel werden in dBA angegeben. Wenn man die tatsächlichen Schalleistungen über einen breiten Frequenzbereich bestimmen will, benutzt man als Standard Kurve C.



sie zur Gesamtanzeige aufaddiert werden. Dabei wird üblicherweise anhand von drei Standardkurven gewichtet, die den verschiedenen Frequenzen unterschiedliche relative Pegel zuordnen.

Wie empfindlich unser Gehör auf Geräusche anspricht, wird deutlich, wenn man sich die Entfernung klar macht, in der wir eine Schallquelle mit einer Leistung von einem Watt und einer Frequenz von 3500 Hertz gerade noch hören. Wenn wir davon ausgehen, daß sich der Schall gleichmäßig nach allen Richtungen ausbreitet, wäre die Hörschwelle (sie liegt hier nahe beim Referenzpegel) erst nach 564 Kilometern erreicht! Ein entsprechendes Experiment ist praktisch nicht durchführbar, weil es zu viele Störgeräusche gibt.

Gewöhnlich werden Klänge in der Nähe des Referenzpegels von Umweltgeräuschen übertönt. Aus Schallpegelwerten in älteren Akustikbüchern können wir schließen, daß es viel lärmender um uns geworden ist. Blätterrauschen im sanften Lufthauch wird mit zehn Dezibel angegeben, der Schallpegel in einem ruhigen Londoner Garten soll nur 20 Dezibel betragen haben. 30 Dezibel waren es damals in einer ruhigen Straße ohne Verkehr, und die abendlichen Geräusche in der Londoner Innenstadt lagen bei etwa 40 Dezibel.

Vergleichbare Umwelt-Lärmpegel, wie sie in der Tabelle rechts außen zusammengestellt sind, liegen fast alle über diesen historischen Werten. Wer es heute leise haben will, muß in ein Aufnahmestudio oder einen Konzertsaal gehen. Wenn alle Plätze besetzt sind, steigt der Schallpegel bereits auf mindestens etwa 40 Dezibel, bei leerem Saal sind es weniger als 35 Dezibel.

Wir sollten uns immer an die Pegel solcher Hintergrundgeräusche erinnern, wenn wir die Lautstärken von Klängen betrachten. Der Schallpegel eines Orchesters kann von etwa 40 (derselbe, den bereits das Publikum verursacht) bis auf 100 Dezibel steigen – eine Leistung, die einemillionmal stärker ist! Eine gewöhnliche Unterhaltung spielt sich zwischen ungefähr 40 und 70 Dezibel ab (die Pegeldifferenz von 30 Dezibel entspricht einer tausendmal größeren Leistung).

Die Spitzenschalleistungen verschiedener Instrumente und ihre Schallpegel bei drei Meter Abstand im freien Schallfeld

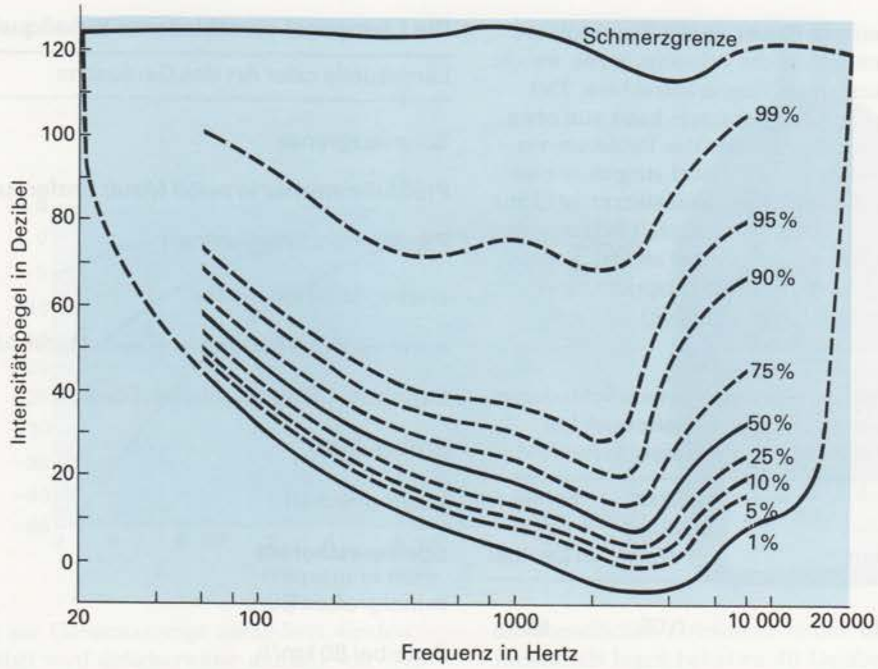
Instrument	Spitzenleistung in Watt	Schallpegel in Dezibel
Klarinette	0,05	86
Kontrabaß	0,16	92
Klavier	0,27	94
Trompete	0,31	94
Posaune	6,0	107
Große Trommel	25,0	113

Für verschiedene Musikinstrumente sind die größtmöglichen Schalleistungen zusammen mit den korrespondierenden Schallpegeln in der Tabelle oben angegeben. Die Pegelwerte wurden für einen Abstand von drei Metern zum Instrument berechnet, und zwar unter der Annahme, daß sich die Schallwellen im Freien ungehindert nach allen Richtungen ausbreiten, ohne an irgendwelchen Wänden oder Hindernissen reflektiert zu werden. In einem Zimmer oder auch einem Konzertsaal läge der Schallpegel aufgrund der Reflexion bei derselben Entfernung zum Instrument merklich höher.

Wie hängt der Schallpegel mit dem Abstand von der Schallquelle zusammen? Solange die

Die Lärmpegel verschiedener Schallquellen und Räumlichkeiten

Lärmquelle oder Art des Geräuschs		Lärmpegel in dBA
Schmerzgrenze		130
Preßlufthammer in zwölf Meter Entfernung		97
Fabriken und Werkstätten		50-75
starker Straßenverkehr		68
normale Unterhaltung in einem Meter Abstand		65
Bahnhofs-, Flughafenhalle, Stadion		55-65
großes Büro		60-65
Ladengeschäft		45-60
Speiserestaurant		45-55
mittelgroßes Büro		45-55
Auto bei 80 km/h		45-50
Autowerkstatt		55
kleines Ladengeschäft		45-55
Hotel, Zimmer		42
Wohnung in der Großstadt		40
Wohnung auf dem Land		30
Kino ohne Publikum	bei vollbesetztem Haus sind es 5 bis 15 dB mehr	25-35
leerer Hörsaal		25-35
Konzertsaal ohne Zuhörer		25-35
leere Kirche		30
Klassenzimmer ohne Schüler		30
Rundfunkstudio ohne Publikum		20-25
Fernsehstudio ohne Publikum		25-35
Aufnahmestudio		20-30
Flüstern		10-20
Hörschwelle		0-5



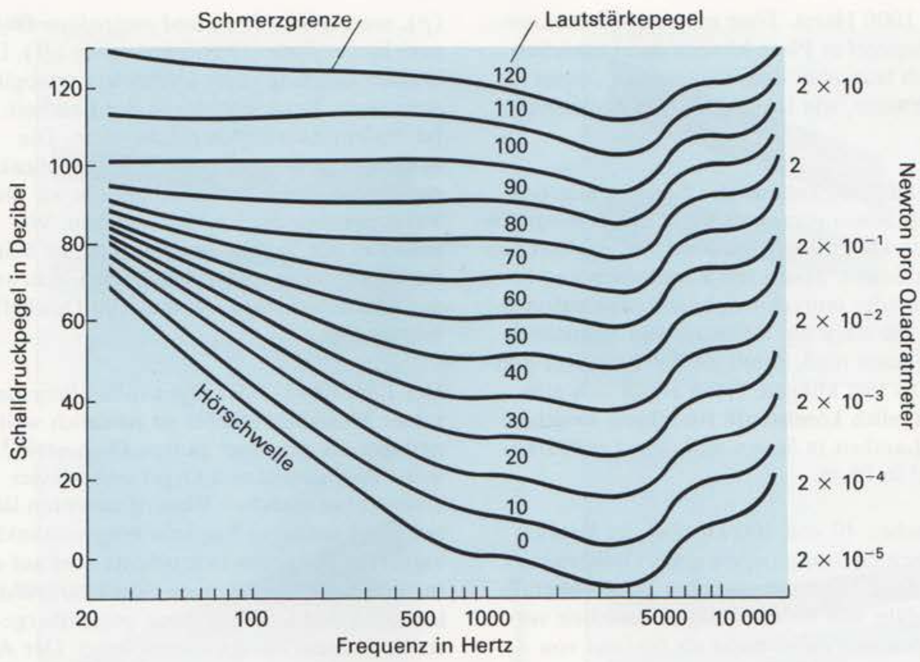
Die Frequenzabhängigkeit der Hörschwelle. Gemessen wurde der Intensitätspegel, bei dem Testhörer einen Sinuston gerade noch feststellen. Dabei hört ein Prozent der untersuchten Gruppe bereits Intensitätspegel auf der Ein-Prozent-Kurve; fünf Prozent registrieren Intensitäten auf der Fünf-Prozent-Kurve, und so fort.

Schallwelle nirgends reflektiert oder unterbrochen wird, sinkt ihre Intensität auf ein Viertel des Ausgangswertes, wenn sich der Abstand verdoppelt. Das entspricht einem Abfall um sechs Dezibel. Beträgt der Pegel drei Meter vom Instrument entfernt zum Beispiel 90 Dezibel, dann sind es bei sechs Metern noch 84, bei zwölf Metern 78 und bei 24 Metern nur noch 72 Dezibel.

Solange wir uns nur um Schalleistungen oder Intensitäten kümmern, liegen die Dinge recht einfach. Die Schallpegel drücken das Verhältnis zwischen einer gemessenen Schallintensität und einem Referenzwert aus, der in der Nähe der Hörschwelle liegt, wobei die unbequemen Verhältniszahlen in Dezibel umgerechnet werden. Was aber unter Lautstärke zu verstehen ist, läßt sich nicht so leicht festlegen.

Jeder Mensch hört anders. Manche registrieren noch das leiseste Geräusch, andere sind völlig taub. Die amerikanische Gesundheitsbehörde ließ in einer umfangreichen Erhebung die Hörschwelle in der Bevölkerung untersuchen. Dabei wurden jeweils die Schallpegel verschiedener Sinusfrequenzen registriert, die der einzelne gerade noch hören konnte.

Die Ergebnisse spiegeln sich in den Kurven auf dieser Seite wider. Die Intensitätspegel sind senkrecht, die Frequenzen waagerecht aufgetragen. Die oberste Kurve markiert einen Pegel von etwa 120 Dezibel, bei dem man den Schall körperlich zu spüren beginnt und gesundheitliche Schädigungen einsetzen. Die übrigen Kurven sind mit Prozentzahlen zwischen eins und 99 gekennzeichnet. Die Ein-Prozent-Kurve besagt, daß von allen Testpersonen nur ein Prozent die jeweilige Frequenz hörte, sobald die Intensität auf oder gerade oberhalb der Kurve lag. Beispielsweise konnte ein Prozent der Probanden eine Frequenz von 1000 Hertz registrieren, sobald der Schallpegel drei Dezibel überschritt. Wie laut Schall vom einzelnen Hörer empfunden wird, ist natürlich sehr subjektiv. Was der eine gerade noch hört, liegt für einen anderen schon zehn oder 20 Dezibel über seiner individuellen Hörschwelle. Die Kurven zeigen aber noch etwas anderes. Es hängt von der Intensität (sprich. Leistungs-



Kurven gleicher Lautstärke. Die Schalldruckpegel von Sinustönen, die gleich laut klingen, ergeben als Funktion der Frequenz eine *Isophone*. Jede davon ist durch einen bestimmten Lautstärkepegel gekennzeichnet. Als Maßeinheit dafür dient die Phonzahl, die den gleichen Betrag hat wie der Schallpegel (in Dezibel) bei der Frequenz 1000 Hertz.

dichte) und der Frequenz ab, ob wir einen Sinuston hören und wie laut er uns erscheint. Wenn die Intensität zunimmt, wird das jeder als wachsende Lautstärke empfinden, aber darüber lassen sich keine allgemeinen quantitativen Angaben machen. Wir müssen uns deshalb auf eine vergleichsweise kleine Personengruppe mit besonders gutem Gehör beschränken.

Für diese Gruppe ergibt sich das Pegeldiagramm oben rechts, es zeigt, wie die wahrgenommene Lautstärke von der Intensität und Frequenz abhängt. Die unterste Kurve markiert die Hörschwelle, also den Schallpegel, bei dem eine bestimmte Frequenz gerade noch gehört wird. Die übrigen Kurven sind *Isophone* und geben Pegel wieder, die als gleiche Lautstärke empfunden wurden. Zwei Sinustöne mit verschiedenen Frequenzen klingen also gleich laut, wenn sie auf derselben Isophone liegen.

Auffällig ist, daß die oberen Kurven viel flacher verlaufen als die unteren. Hohe Schallpegel müssen also nur wenig verändert werden, um bei verschiedenen Frequenzen die gleiche Lautstärke zu vermitteln. Bei leisen Tönen sind dagegen große Abweichungen des Schallpegels erforderlich. Für gleichbleibende Intensitäten schwankt die Lautstärke schwacher Klänge ganz erheblich mit der Frequenz, was sich jedoch bei lauteren Tönen immer weniger bemerkbar macht.

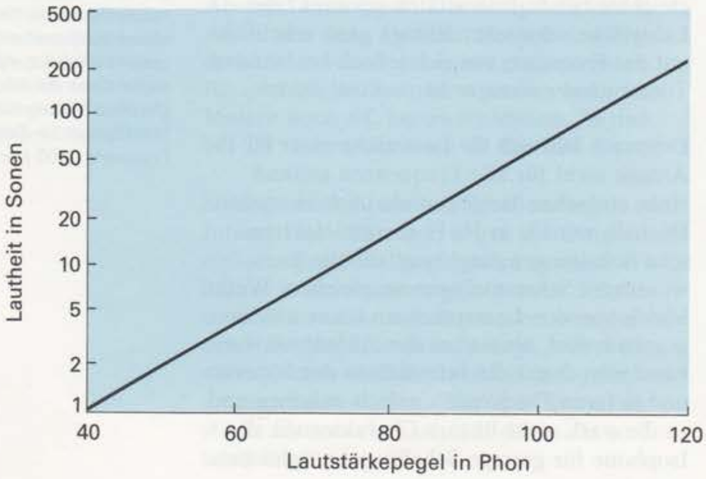
Demnach läßt sich die Lautstärke einer Hi-Fi-Anlage nicht für alle Frequenzen anhand eines einfachen Reglers einheitlich einstellen. Deshalb werden in Hi-Fi-Geräte elektronische Schaltungen eingebaut, die die unerwünschten Schwankungen ausgleichen. Wenn Musik von den Lautsprechern leiser wiedergegeben wird, als sie bei der Aufnahme war, kann man damit die Intensitäten der höheren und tieferen Frequenzen gezielt anheben und so die stark nicht-lineare Charakteristik der Isophone für geringe Schallpegel ausgleichen.

Die Kurven gleicher Lautstärke sind in der Abbildung oben auf dieser Seite mit den Phonzahlen für den zugehörigen Lautstärkepegel versehen. Die Phonzahl ist dabei nichts anderes als der Schalldruckpegel eines Sinustons gleicher Lautstärke bei einer Frequenz von 1000 Hertz. Töne mit demselben *Lautstärkepegel* in Phon klingen dann natürlich gleich laut, aber damit wissen wir immer noch nicht, wie laut sie absolut gemessen sind.

Das läßt sich anhand der *Lautheit* angeben, die in *Sonen* gemessen wird. Ein Ton von 20 Sonen klingt doppelt so laut wie ein Ton von zehn Sonen. Man kann Phonzahlen und Sone ineinander umrechnen, indem man aufzeichnet, wie stark die Intensität von Sinustönen zunehmen muß, damit sie für Testhörer doppelt so laut klingen. Dann ergibt sich eine erstaunlich konsistente Beziehung zwischen der Lautheit in Sonen und dem Lautstärkepegel in Phon.

Zwischen 40 und 100 Dezibel, im Bereich des Schalleistungspegels eines Orchesters, steigt der Lautstärkepegel in Phon ebenfalls ungefähr von 40 auf 100; die Lautheit verdoppelt sich dabei mehr als fünfmal von etwa einem auf 50 Sone.

Die Lautheit, gemessen in Sonen, als Funktion des Lautstärkepegels in Phon.



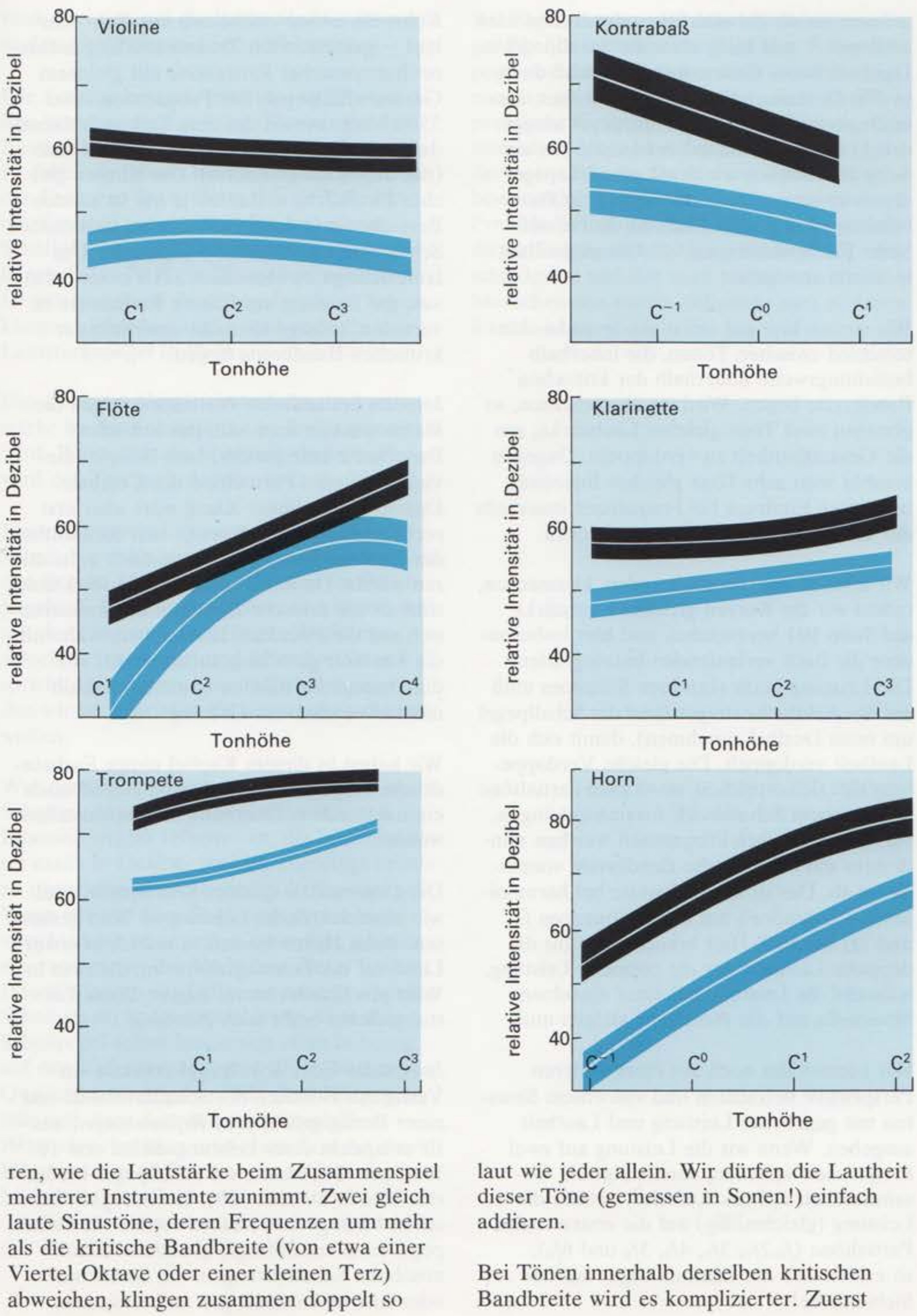
Wir können zwar noch winzige Lautstärkeänderungen feststellen, aber in der Musik hat das praktisch keine Bedeutung. Hier kommt es darauf an, die sechs gebräuchlichsten Lautstärkestufen zu unterscheiden. vom leisesten *pianissimo* (*pp*) über *piano* (*p*), *mezzopiano* (*mp*) und *mezzoforte* (*mf*) zum lauten *forte* (*f*) und *fortissimo* (*ff*). Der Dynamikumfang eines Orchesters ermöglicht etwa sechs Verdoppelungen der Lautheit. Ist das ein Zufall? Ich glaube nicht. Die dynamischen Bezeichnungen in der Musik entsprechen grob jenen Stufen, die wir als Verdoppelung der Lautheit erleben. Wir haben in der Tabelle unten auf dieser Seite die Bezeichnungen *ppp* und *fff* als Grenzwerte des Orchesterklangs (40 und 100 Dezibel) hinzugefügt.

Der Lautstärke- oder Dynamikumfang einzelner Musikinstrumente ist natürlich weit geringer als der eines ganzen Orchesters, wenn man einmal von Orgel und Klavier absieht; bei manchen Blasinstrumenten läßt sich die Lautstärke nur sehr eingeschränkt variieren. Für sechs Instrumente sind auf der rechten Seite die relativen Schallstärken der lautesten und leisesten Töne gegenübergestellt, die man darauf spielen kann. Der Abstand zwischen den Kurven spiegelt jeweils den Dynamikumfang wider. Die begrenzten

Schallintensitäten im Pegelmaß Dezibel

	Intensität (W/m^2)	Verhältnis (I/I_0)	Pegel (dB)
Schmerzgrenze	$10^0 = 1$	10^{12}	120
fff	10^{-2}	10^{10}	100
f	10^{-4}	10^8	80
p	10^{-6}	10^6	60
ppp	10^{-8}	10^4	40
Hörschwelle	10^{-12}	1	0

Möglichkeiten der einzelnen Instrumente lassen sich beim Zusammenspiel im Orchester natürlich erweitern – einer der Gründe, warum Orchestermusik so beliebt wurde. Damit ist das Thema Lautstärke und Lautheit keineswegs erschöpft. Wir müssen noch klä-



Zusammenhang zwischen Dynamikumfang und Tonhöhe bei verschiedenen Musikinstrumenten. Dargestellt sind die Intensitätspegel für die lautesten (schwarz) und leisesten (farbig) Töne, die beim Spielen einer Tonleiter erreicht werden können. Ihr Abstand entspricht dem Dynamikumfang für die jeweilige Tonhöhe. Die Breite der beiden Kurven gibt Lautstärkeschwankungen wieder, die auch dann entstehen, wenn ein Musiker alle Töne vermeintlich gleich laut spielt.

ren, wie die Lautstärke beim Zusammenspiel mehrerer Instrumente zunimmt. Zwei gleich laute Sinustöne, deren Frequenzen um mehr als die kritische Bandbreite (von etwa einer Viertel Oktave oder einer kleinen Terz) abweichen, klingen zusammen doppelt so laut wie jeder allein. Wir dürfen die Lautheit dieser Töne (gemessen in Sonen!) einfach addieren.

Bei Tönen innerhalb derselben kritischen Bandbreite wird es komplizierter. Zuerst müssen wir die Schalldrücke oder Intensitäten addieren – und nicht etwa die Schallpegel in Dezibel! Diese Gesamtintensität muß dann in den Gesamtschallpegel umgerechnet, also in Dezibel über dem Referenzpegel ausgedrückt werden. Anhand der Isophonen auf Seite 101 können wir den Lautstärkepegel dieses zusammengesetzten Klangs in Phon bestimmen und schließlich die Kurve auf Seite 102 benutzen, um die Gesamtlautheit in Sonen anzugeben.

Wir stoßen hier auf einen gravierenden Unterschied zwischen Tönen, die innerhalb beziehungsweise außerhalb der kritischen Bandbreite liegen. Wird sie überschritten, so genügen zwei Töne gleicher Lautstärke, um die Gesamtlautheit zu verdoppeln. Dagegen braucht man acht Töne gleicher Intensität, um diesen Eindruck bei Frequenzen innerhalb der kritischen Bandbreite zu erwecken.

Wir können uns das auch anders klarmachen, indem wir die Kurven gleicher Lautstärke auf Seite 101 heranziehen und hier insbesondere die flach verlaufenden herausgreifen. Die Leistung eines einzelnen Sinustons muß auf das Achtfache steigen (und der Schallpegel um neun Dezibel zunehmen), damit sich die Lautheit verdoppelt. Die gleiche Verdoppelung läßt sich erreichen, wenn zwei Partialtöne mit gleichem Schalldruck zusammenklingen, vorausgesetzt, ihre Frequenzen weichen mindestens um die kritische Bandbreite voneinander ab. Das ist beispielsweise bei harmonischen Partialtönen mit den Frequenzen f_0 und $2f_0$ der Fall. Hier braucht man für die doppelte Lautheit nur die doppelte Leistung, während die Leistung bei einer einzelnen Sinuswelle auf das Achtfache steigen muß.

Wir können das noch aus einer anderen Perspektive betrachten und von einem Sinuston mit gegebener Leistung und Lautheit ausgehen. Wenn wir die Leistung auf zwei Frequenzen verteilen, dann steigt die Gesamtlautheit auf das 1,6fache, entfällt die Leistung (gleichmäßig) auf die ersten sechs Partialtöne (f_0,$2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, $5f_0$ und $6f_0$), so erhöht sich die Lautheit sogar auf das Siebenfache!

Reine Sinustöne erscheinen uns nicht sehr laut – gemessen am Zusammenklang mehrerer harmonischer Partialtöne mit gleichem Gesamtschallpegel. Bei Frequenzen unter 3500 Hertz beruht das zum Teil auch darauf, daß hohe Töne viel lauter klingen als tiefe (mit derselben Intensität). Die Kurven gleicher Lautstärke verlaufen ja nur in kleinen Bereichen und dann auch nur bei bestimmten Schallpegeln annähernd waagerecht. Um laute Klänge zu erreichen, zahlt es sich also aus, die Leistung auf höhere Partialtöne zu verteilen, solange sie nicht innerhalb der kritischen Bandbreite liegen.

Jenseits des sechsten Partialtons folgen die Harmonischen innerhalb der kritischen Bandbreite aufeinander, zum Beispiel die vielen höheren Partialtöne des Cembalo. Dessen eigenwilliger Klang wäre aber erst recht rauh und fremd, wenn sich die Lautheit der höheren Harmonischen einfach aufaddieren würde. Da ihre Frequenzabstände kleiner sind als die kritische Bandbreite, summieren sich nur die einzelnen Intensitäten, während die Lautheit ganz langsam zunimmt. Die dissonanten Partialtöne kommen deshalb nicht allzu stark zur Geltung.

Wir haben in diesem Kapitel einige Fachausdrücke eingeführt, die wir zum Schluß noch einmal in einem Überblick zusammenstellen wollen.

Die *Gesamtleistung* einer Schallquelle wird wie eine elektrische Leistung in Watt gemessen. Beim Hören kommt es jedoch in erster Linie auf die *Leistungsdichte* an, die man in Watt pro Quadratmeter angibt. Diese Leistungsdichte heißt auch *Intensität*.

Intensitäts- oder *Schallpegel* drücken ein Verhältnis zwischen der Schallintensität und einer Bezugsgröße, dem *Referenzpegel*, aus. Er entspricht einer Leistungsdichte von 10^{-12} Watt pro Quadratmeter. Schallpegel-Meßgeräte sind in *Dezibel* (*dB*), einem logarithmischen Maß, geeicht; dabei werden die Schallpegel frequenzabhängig *gewichtet*. Um die absoluten Schalleistungen von Sinustönen oder Instrumentalklängen zu bestimmen, muß man sich auf die flache Standardkurve C in der Abbildung auf Seite 98 beziehen.

Die *Lautstärkepegel*, gemessen in *Phon*, werden benutzt, um *Isophone*, Kurven gleicher Lautstärke, zu kennzeichnen. Die Phonzahl ist dabei als Schall- oder Intensitätspegel bei der Frequenz 1000 Hertz definiert. So hat ein Sinuston von 1000 Hertz und einem Schallpegel von 70 Dezibel einen Lautstärkepegel von 70 Phon, Sinustöne, deren Intensitätspegel auf derselben Isophone liegen, klingen gleich laut und haben denselben Lautstärkepegel in Phon.

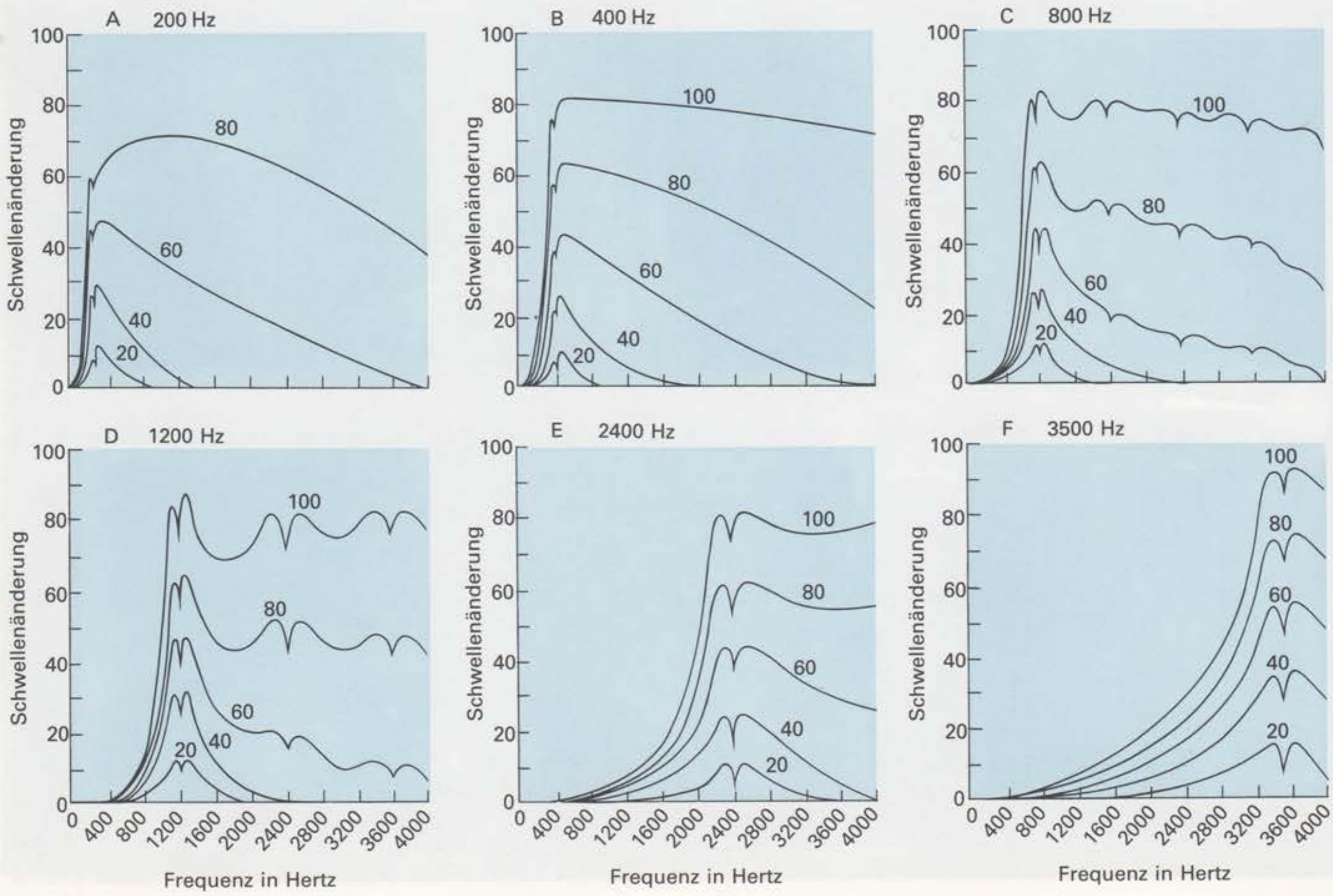
Ein absolutes Vergleichsmaß für die Lautstärke ist die *Lautheit*, die in *Sonen* gemessen wird. Wenn sich die Sonezahl verdoppelt, wird der Ton auch doppelt so laut.

Einen allgemein bekannten Fachausdruck habe ich mir bis zum Schluß aufgehoben. den Begriff *Hörschwelle*. Sie wird im Schallpegelmaß Dezibel angegeben und ändert sich mit der Frequenz. Die (Pegel-)Differenz zwischen Schallpegel und Hörschwelle entspricht dann einem *Empfindlichkeitspegel*, den wir im folgenden als *Hörpegel* bezeichnen wollen.

Was damit gemeint ist, soll das Beispiel einer Schallquelle verdeutlichen, die mit einem Intensitätsregler versehen ist, die Einstellskala sei exakt in Dezibel geeicht, allerdings relativ zu irgendeinem unbekannten Referenzpegel. Wenn wir mit dem Reglerknopf nun zwei verschiedene Intensitäten einstellen, können wir zwar genau das Verhältnis dieser beiden Intensitäten an der Differenz zwischen beiden Schallpegeln in Dezibel ablesen, aber die Schallpegel selbst lassen sich nicht in bezug auf den Referenzpegel von 10^{-12} Watt pro Quadratmeter angeben. Mit dem Hörpegel läßt sich diese Schwierigkeit umschiffen. Beispielsweise kann man einen Ton mit einem Hörpegel von 60 Dezibel wie folgt einstellen: Man dreht den Regler so weit zurück, daß der Ton gerade noch zu hören ist, und erhöht den Pegel dann um 60 Dezibel.

Bei Experimenten gibt man die Schallpegel gewöhnlich nicht in bezug auf den Referenzpegel mit 10^{-12} Watt pro Quadratmeter an, sondern als Hörpegel. Das hat nicht nur praktische Gründe, sondern ist meistens auch sinnvoller. Viele akustische Phänomene, darunter etwa die Maskierung, lassen sich besser anhand der Hörschwelle verstehen. Freilich darf man dabei nicht vergessen, daß dieser Empfindlichkeitspegel individuell verschieden ist und sich auch bei jedem einzelnen Menschen von einem Zeitpunkt zum nächsten ändern kann.

Maskierungskurven geben an, bei welchem Hörpegel Sinustöne gerade noch wahrnehmbar sind, wenn man sie zusammen mit einem gleichbleibenden Ton fester Frequenz und Lautstärke hört. Über jedem der sechs Diagramme (A bis F) ist die Frequenz des maskierenden Tons angegeben; die Frequenzen des maskierten Signals variieren und sind auf den horizontalen Achsen aufgetragen. Die senkrechten Skalen zeigen, um wieviel Dezibel der Intensitätspegel des Signals über der Hörschwelle (ohne Maskenton) liegen muß, damit man es auch mit Maskenton gerade noch hört. Die verschiedenen Kurven innerhalb eines Diagramms ergeben sich für Masken mit unterschiedlichem Hörpegel (20 bis 100 Dezibel). Ein Signal, dessen Hörpegel beispielsweise unterhalb der Kurve für 80 Dezibel bleibt, wird von einem Maskenton mit 80 Dezibel Hörpegel völlig verdeckt.



Maskierte Klänge

Jeder weiß, wie leicht leise Klänge übertönt werden können. Und bei manchem mag sich ein Vergleich mit hellen Lichtquellen aufdrängen, die alles überstrahlen, aber Auge und Ohr reagieren ganz verschieden. Wenn wir in gleißendes Licht geschaut haben, ist das Auge für eine gewisse Zeit geblendet, das Ohr erholt sich dagegen sehr schnell. Im grellen Licht verblassen gleichsam alle Farben, aber ein lauter Ton beeinträchtigt unser Hörvermögen nur für wenige Frequenzen.

Im Jahre 1894 polemisierte Alfred Mayer gegen jene Dirigenten, die den Klang der Geigen mit lauten, tieferen Tönen der Blasinstrumente zudeckten. Er hatte bemerkt, daß die leiseren und höheren Töne in den lauten, tiefen Klängen untergehen, aber hohe Töne umgekehrt nie den Klang der tieferen verdecken können. Diese Beobachtung entspricht dem, was wir über das Gehör und insbesondere die Wellenbewegung entlang der Basilarmembran wissen. Tiefe Frequenzen regen die Basilarmembran am fernen apicalen Ende der Schnecke stark an und hohe Frequenzen am basalen Ende. Auf ihrem Weg durch die Schnecke erreichen die hochfrequenten Wellen daher nie die Stelle, wo die Basilarmembran durch tiefe Töne angeregt ist; dagegen durchlaufen Wellen niedriger Frequenz auch die Bereiche, in denen die Basilarmembran infolge höherer Töne schwingt. Vielleicht kommt es dort zu Wechselwirkungen, die unser Klangempfinden beeinflussen. Das würde erklären, warum ein tieferer Ton, sofern er laut genug ist, unser Hörvermögen bei höheren Tönen verändert.

Laute Klänge, die leise Töne verdecken oder *maskieren*, werden üblicherweise als *Maskierer* bezeichnet, wir wollen im folgenden den etwas anschaulicheren Begriff *Maske* verwenden, weil sie den schwächeren Ton, das *Signal*, wirklich mehr oder weniger überdeckt. Die Klangmaske macht uns gleichsam unempfindlich für das Signal. Die Hörschwelle verschiebt sich merklich zu höheren Intensitätspegeln.

Die ersten systematischen Maskierungs-Experimente haben R. L. Wegel und C. E. Lane 1924 in den Bell-Laboratorien durchgeführt, die Ergebnisse sind auf der linken Seite an sechs Beispielen gezeigt.

Schauen wir uns zunächst die Kurvenschar an, bei der die Maskenfrequenz 1200 Hertz betrug. Die Frequenzen des Signaltons sind waagerecht aufgetragen, die senkrechte Skala gibt die *Schwellenänderung* des Signals in Dezibel wieder. Diese Schwellenänderung wird auch *Mithörpegel* genannt, denn sie kennzeichnet, wie stark der Schallpegel des Signals über die Hörschwelle (ohne Störgeräusche) steigen muß, wenn das Signal trotz der Klangmaske noch hörbar sein soll. Mit dem Hörpegel der Maske (20, 40, 60, 80 und 100 Dezibel) steigt natürlich auch die Hörschwelle des Signals. Die oberste Kurve zeigt das für eine sehr laute Tonmaske mit einem Hörpegel von 100 Dezibel. Damit das Signal hörbar wird, muß sein Hörpegel (die Pegeldifferenz über der Hörschwelle bei fehlender Maske) oberhalb der 100-Dezibel-Kurve liegen.

Angenommen, es werden zwei Signale maskiert, deren Frequenzen beide 1600 Hertz betragen und deren Hörpegel bei 80 und 60 Dezibel liegen. Da die 100-Dezibel-Maske bei 1600 Hertz den Wert 69 Dezibel annimmt, ist das stärkere Signal gerade noch hörbar; das 60-Dezibel-Signal wird völlig übertönt. Der Funktionswert 69 Dezibel besagt, daß die Hörschwelle eines Signals von 1600 Hertz durch eine 100-Dezibel-Maske (mit 1200 Hertz) um etwa 69 Dezibel angehoben wird.

Aus den Kurven läßt sich darüber hinaus ablesen, daß eine Maske mit einer Frequenz von 1200 Hertz und mehr bei Signalfrequenzen unter 400 Hertz nahezu wirkungslos ist. Mag sie auch noch so laut sein, sie kann die Basilarmembran offenbar nie dort merklich zum Schwingen bringen, wo es ein Ton von 400 Hertz tut.

Daß sich die Hörschwelle für höhere Signalfrequenzen nach oben verschiebt, wenn die Lautstärke der Maske zunimmt, war zu erwarten. Im Prinzip ließe sich jedes Signal mit gleichbleibender Intensität früher oder später übertönen, indem man die Lautstärke der Maske immer mehr steigert.

Interessant ist der Kurvenverlauf für 1200-Hertz-Masken mit Hörpegeln von 20 und 40 Dezibel. Signale mit Frequenzen über 2400 Hertz lassen sich von ihnen nie verdecken. Zwar entstehen durch solche schwachen Masken auf der Basilarmembran Wellen, die auf ihrem Weg zur Anregungsstelle für 1200 Hertz auch jene für 2400 Hertz durchlaufen, aber sie können die Wahrnehmung der 2400-Hertz-Töne nicht stören.

Für Masken mit höherem Hörpegel gilt das allerdings nicht mehr; die Kurven fallen jetzt bei höheren Frequenzen nur langsam ab. Sie zeigen zudem einen eigentümlichen Verlauf, den wir anhand der 100-Dezibel-Kurve für die 1200-Hertz-Masken näher betrachten wollen. Hier fallen spitze Einschnitte auf, die bei Signalfrequenzen von 1200, 2400 und 3600 Hertz auftreten. Warum wirkt die Maske bei diesen Frequenzen plötzlich wesentlich schwächer?

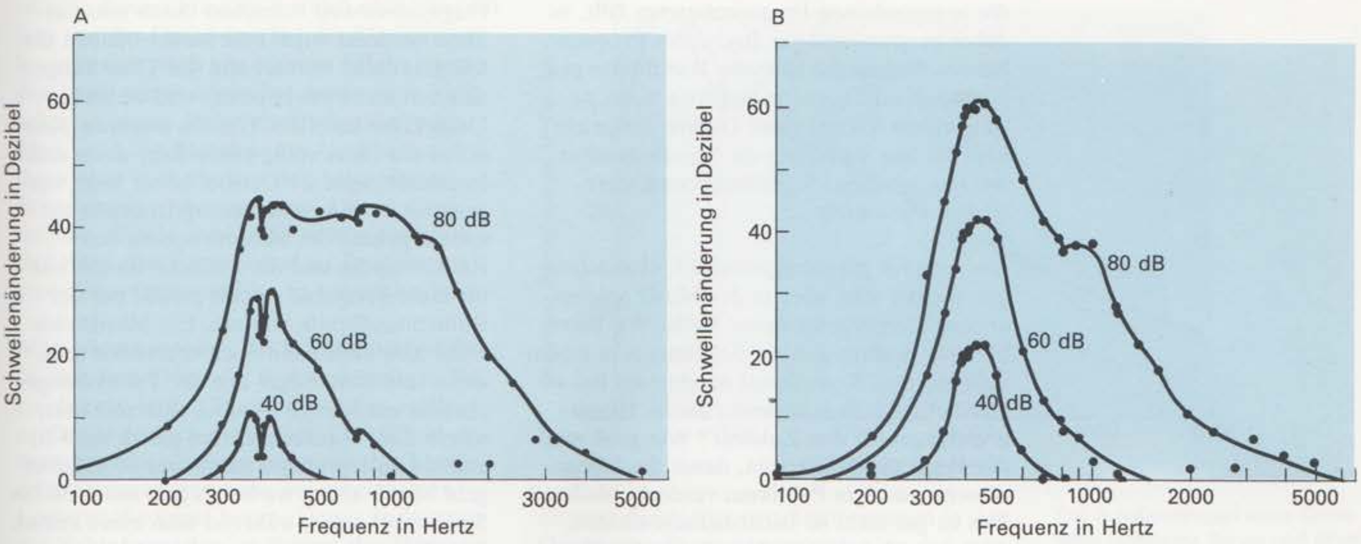
Das wird verständlich, wenn wir ein Signal von 1220 Hertz betrachten, das von einer 1200-Hertz-Maske übertönt werden soll. Bei diesen Tönen treten Schwebungen von 20 Hertz auf, die wir als Schwankungen der Lautstärke hören. Manchmal erreichen die Schallwellen der Maske und des Signals ihre maximale Amplitude zum selben Zeitpunkt, aber etwas später ist der Schalldruck des Signals am kleinsten, während er bei der Maske seinen größten Wert annimmt. Der Gesamtschalldruck ist in diesem Moment besonders gering. Kurz darauf addieren sich die Drücke wieder zu höheren Werten. Dieses Auf und Ab des resultierenden Schalldrucks, die Schwebung zwischen den beiden Tönen, wiederholt sich zwanzigmal in der Sekunde, eben mit der Differenzfrequenz zwischen Maske und Signal. Die Schwebung verrät, daß ein Signal vorhanden ist, auch wenn es selbst nicht als eigenständiger Ton hörbar wird. Schwebungen können auf diese Weise also das Ausmaß der Maskierung – sprich. die Schwellenänderung – ganz erheblich verringern.

Damit ist freilich nur der Einschnitt bei 1200 Hertz in der Maskierungskurve erklärt, doch wie steht es mit jenen spitzen Minima bei 2400 und 3600 Hertz? Ein sehr starker Ton von 1200 Hertz, der auf nicht-lineare Systeme wirkt, kann durchaus harmonische Frequenzkomponenten hervorrufen, und 2400 beziehungsweise 3600 Hertz entsprechen ja gerade der zweiten und dritten Harmonischen von 1200 Hertz. In den elektronischen Geräten oder im Innenohr wären solche nicht-linearen Prozesse durchaus denkbar. Die höheren Harmonischen der 1200-Hertz-Maske lassen die Basilarmembran auch an den Stellen für 2400 und 3600 Hertz schwingen, so daß bei benachbarten Signalfrequenzen wiederum Schwebungen entstehen. Deshalb sinkt die Hörschwelle (für das Signal) bei 2400 und 3600 Hertz ab.

Wenn sehr starke Masken auch Signalfrequenzen oberhalb ihrer eigenen Frequenz weitgehend verdecken, können die großen Schwellenänderungen ebenfalls auf Nichtlinearitäten des Innen- und Mittelohrs beruhen. Bei einer niederfrequenten Welle mit hinreichend großer Amplitude entstehen dann auch Wellen mit den Frequenzen der höheren Harmonischen, sie können Bereiche der Basilarmembran anregen, die für hohe Frequenzen zuständig sind. Das würde unsere Fähigkeit, schwache hochfrequente Signale wahrzunehmen, natürlich entscheidend beeinflussen.

Die Kurven der 20- und 40-Dezibel-Masken machen deutlich, daß die Signale in diesen Fällen nur innerhalb eines begrenzten Frequenzbereichs verdeckt werden. Er liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie die kritische Bandbreite, die über Dissonanz entscheidet und die Lautstärke mit bestimmt.

Bislang haben wir nur untersucht, wie einzelne Sinustöne ein Signal maskieren. Aber auch Rauschen, das aus einem breiten Frequenzband besteht, kann Klänge übertönen. Ich habe zeitweise in einem Büro am West Side Highway in Manhattan gearbeitet, in dem der Verkehrslärm bei geöffnetem Fenster wie eine akustische Trennwand wirkte. Wenn



Maskierungskurven für Sinussignale verschiedener Frequenzen, die von einem Sinuston (A) und durch Rauschen (B) maskiert werden. Die Frequenz des maskierenden Sinustons beträgt 400 Hertz, die Mittenfrequenz des Rauschbandes 410 Hertz. Die Maskenpegel sind hier Schallpegel. Weil die Hörschwelle für 400 Hertz etwa bei einem Schallpegel von zehn Dezibel liegt, muß man von den Pegelzahlen an den Kurven zehn Dezibel abziehen, um den Hörpegel der Masken zu erhalten. Bis zu mittleren Lautstärken und Frequenzen maskiert schmalbandiges Rauschen stärker als ein Sinuston.

sich mein Kollege am Schreibtisch hinter mir mit einem Besucher unterhielt, bekam ich nichts davon mit, ich hörte diesen Besucher auch nicht kommen oder gehen.

Inzwischen hat man bei vielen Experimenten anstelle eines Sinustons auch Rauschen zum Maskieren eines sinusförmigen Signals eingesetzt. Entsprechende Kurven sind in der Abbildung oben für einen Sinuston von 400 Hertz (A) und ein Rauschband von 365 bis 455 Hertz (B) gegenübergestellt, sie wurden beide beim selben Testhörer gemessen. Allerdings sind die einzelnen Kurven diesmal nicht anhand des jeweiligen Hörpegels gekennzeichnet, sondern anhand des Schallpegels (in bezug auf einen Referenzpegel von 10^{-12} Watt pro Quadratmeter). Da die Hörschwelle für 400 Hertz bei einem Schallpegel von zehn Dezibel liegt, entsprechen beispielsweise die 60-Dezibel-Kurven in der Abbildung oben auf dieser Seite den 50-Dezibel-Kurven in den Diagrammen auf Seite 108 (am Beginn dieses Kapitels).

Beim Vergleich der Kurvenbilder für Sinuston und Rauschen fällt auf, daß die Rauschmaske keine Einschnitte hervorruft, die auf Schwebungen hindeuten. Man hört auch keine Schwebung, sondern nur Rauschen und einen einzelnen Sinuston.

Bei nahezu allen Frequenzen und Pegeln kann Rauschen ein Signal weit effektiver maskieren als ein Sinuston. Nur die 80-Dezibel-Kurve fällt für eine sinusförmige Maske bei hohen Frequenzen langsamer ab als für schmalbandiges Rauschen, das hochfrequente Sinustöne also weniger stark verdeckt.

Was passiert, wenn wir die Bandbreite des Rauschens vergrößern? Zur Maskierung eines Sinussignals tragen dabei nur jene Frequenzen bei, die innerhalb einer kritischen Bandbreite (mit dem Signal als Mittenfrequenz) liegen. Insbesondere hat *Weißes Rauschen* eine frequenzunabhängige Leistungsdichte. Alle Frequenzkomponenten haben im Mittel dieselbe Intensität. Die Leistung, die in irgendeinen Frequenzbereich fällt, ist daher proportional zur Breite des Frequenzbandes. Sofern die kritische Bandbreite proportional zur Frequenz ist (etwa wenn sie stets einem Viertel einer Oktave entspricht), wird Weißes Rauschen die Signalintensität mit zunehmender Signalfrequenz immer stärker maskieren.

Das mag für psychoakustische Untersuchungen wichtig sein, aber in der Musik spielen andere Störgeräusche eine Rolle. Wir haben bereits erwähnt, daß der Schallpegel in einem vollbesetzten Konzertsaal mindestens bei 40 Dezibel liegt. Was bedeutet dieser Hintergrundpegel für den Zuhörer? Wie groß muß der Pegel der Musik sein, damit die Störgeräusche aus dem Publikum verdeckt bleiben? Das ist gar nicht so leicht herauszufinden, weil es noch keine Meßergebnisse für diese Maskierung durch Instrumente oder ein Orchester gibt. Wir sind auf Rückschlüsse aus den Beobachtungen bei Sinustönen und Rauschen (als Masken) angewiesen.

Ein Sinussignal, das von einem anderen Sinuston überlagert wird, bleibt noch bei zehn bis 15 Dezibel unter dem Maskierungspegel hörbar, sofern beide Schallpegel in einem niedrigen Bereich liegen. Aber Hintergrundgeräusche sind eben keine Sinustöne.

Wir müssen uns also die Kurven im Diagramm B auf Seite 111 ansehen, um festzustellen, wie Sinustöne von Rauschen maskiert werden. Wir schließen aus ihnen, daß wir einen Sinuston gerade dann noch hören, wenn er etwa sieben Dezibel unter dem schmalbandigen Rauschpegel liegt (in dieser Abbildung entspricht ein Pegelmaß von 40 Dezibel an einer Kurve einem Hörpegel von 30 Dezibel!). Andere Meßwerte weisen darauf hin, daß ein Sinuston im Rauschen untergeht, wenn er zwei bis sechs Dezibel unter dem Maskenpegel liegt und die Bandbreite des Rauschens gerade mit der kritischen Bandbreite des Signaltons übereinstimmt.

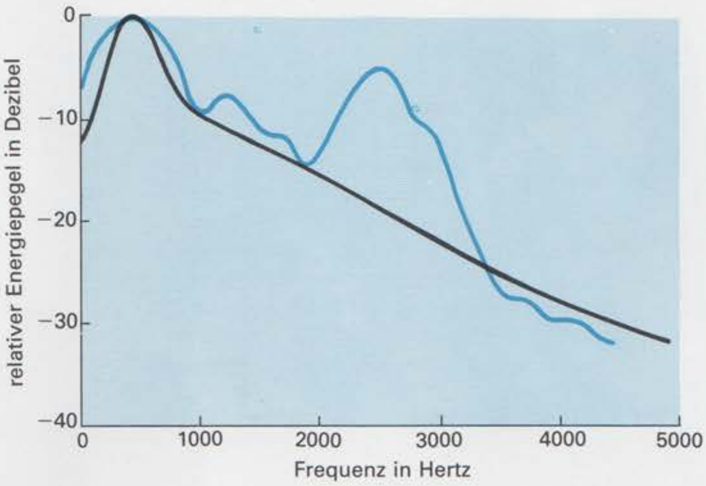
Wir verstehen nun, wie ein Sinuston durch einen zweiten Sinuston oder durch Rauschen maskiert wird. Aber es ist eine völlig andere Frage, inwieweit Rauschen durch einzelne Töne verdeckt wird. Fast immer bleiben die Störgeräusche hörbar, und die Töne klingen dadurch meist etwas unstet und waberig. Umgekehrt kann ein Ton das störende Rauschen nur dann völlig verdecken, wenn sein Intensitätspegel 24 Dezibel höher liegt, vorausgesetzt, seine Maskierungsfrequenz entspricht gerade der Mittenfrequenz des Rauschbandes und die kritische Bandbreite für diese Frequenz stimmt gerade mit der Rauschbandbreite überein. Ein Musikstück sollte also auch dann noch erkennbar sein, wenn sein Schallpegel den der Publikumsgeräusche um wenige Dezibel unterschreitet, sofern die Frequenzspektren gleich sind. In einem Hintergrundgeräusch von 40 Dezibel geht Musik also etwa bei Pegeln unter 34 bis 38 Dezibel unter, während man einen reinen Sinuston sogar bei noch viel niedrigeren Pegeln hören kann. Das liegt daran, daß nur ein kleiner Teil vom Rauschspektrum der Zuhörer in die kritische Bandbreite um den Sinuston fällt; lediglich dieser Anteil kann den Ton wirksam maskieren.

Vielleicht sollten wir an dieser Stelle dem Mißverständnis vorbeugen, daß ein Hintergrundpegel von 40 Dezibel sehr störend sei. Tatsächlich ist ein Publikum mit diesem Pegel recht leise und stört weder ein Ensemble noch Solopartien von Einzelinstrumenten, die *piano* gespielt werden.

Interessant ist dagegen die Frage, warum sich ein Sänger allein gegen ein ganzes Orchester durchsetzen kann. Johann Sundberg hat die Antwort gefunden, indem er die Schalleistungen eines Orchesters und eines Tenors (Jussi Björling) verglich. Die entsprechenden Intensitätsspektren sind auf der rechten Seite wiedergegeben. Der Orchesterpegel erreicht bei etwa 500 Hertz ein Maximum und fällt bei höheren Frequenzen rasch ab; auch die Singstimme hat bei 500 Hertz ein Maximum, aber zusätzlich ein zweites bei etwa 2500 Hertz. Dort übertrifft der Tenor den Orchesterpegel um rund 13 Dezibel, das heißt, er erreicht die zwanzigfache Schallintensität. Auch wenn der Sänger nur ein Zwanzigstel seines Stimmvolumens ausnutzt, ist er in diesem Frequenzbereich noch genauso laut wie das Orchester. Bei der Maskierung kommt aber noch ein anderer Effekt hinzu, den jeder schon erlebt hat, wenn viele Menschen in einem Raum durcheinanderreden. Man kann die Worte seines Nachbarn selbst dann ohne weiteres aus dem allgemeinen Stimmengewirr heraushören. Dieser *Cocktailparty-Effekt* ermöglicht es uns auch, aus der Nähe den Klang einzelner Instrumente eines Kammerensembles zu unterscheiden.

Man könnte meinen, der Cocktailparty-Effekt sei nur eine Frage der Aufmerksamkeit. Sie spielt zwar in der Tat eine wichtige Rolle, erklärt aber noch nicht alles. Der Effekt verschwindet nämlich, wenn wir das Klang- oder Stimmengewirr aus einem einzelnen Lautsprecherkanal hören. Damit ändert sich die Zeitinformation im System der Hörnerven. Angenommen, unser Gesprächspartner steht direkt vor uns und die Störgeräusche kommen von der Seite, dann erreicht seine Stimme unsere Ohren zur selben Zeit und gleichphasig; für die anderen Geräusche trifft das nicht zu. Das Gehör könnte das als Information ausnutzen, indem es die gleichphasigen Sprachsignale in den Nervenfasern addiert und verstärkt, während die übrigen Signale weniger zum Zuge kommen und sich – bei Gegenphase – sogar teilweise kompensieren. Was beim Cocktailparty-Effekt tatsächlich geschieht, ist sicher weitaus komplizierter und noch nicht völlig geklärt. Man kann ja auch verstehen, was jemand sagt, der nicht genau vor uns steht, und Stimmen aus beliebigen Richtungen heraushören.

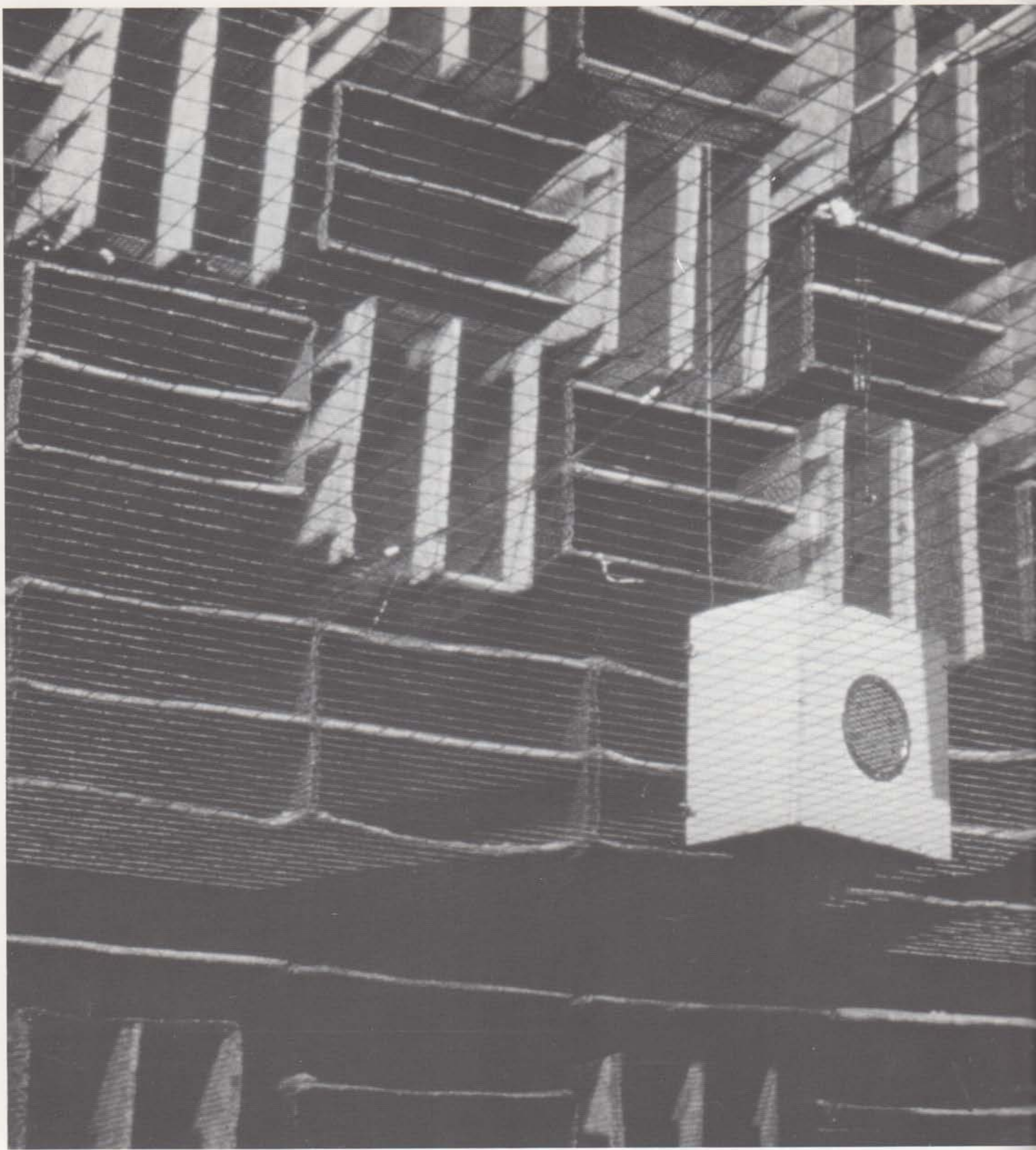
Der Cocktailparty-Effekt spielt eine wichtige Rolle, wenn wir Klänge aus unmittelbarer Nähe hören, vielleicht ist es ihm zu verdanken, daß wir im Konzertsaal das Husten unseres Nachbarn überhören können. Entscheidend für das Hören von Konzerten ist aber die Maskierung, die mit dem zweikanaligen Hören nichts zu tun hat. Auch Verzerrungen, die bei Aufzeichnung und Wiedergabe von Musik entstehen, lassen sich maskieren. Frequenzanteile, die durch nicht-lineare Übertragungssysteme auftreten und im ursprünglichen Klang nicht enthalten sind,



Die Schalleistungen eines Orchesters (schwarze Kurve) und eines Tenors (farbige Kurve) für verschiedene Frequenzen. Verglichen sind hier die Leistungspegel, wobei die Kurven so normiert wurden, daß die Maxima bei 500 Hertz übereinstimmen. Während die Leistungspegel des Orchesters bei steigender Frequenz gleichmäßig sinken, erreicht die Singstimme bei etwa 2500 Hertz ein zweites Maximum, mit einem Anstieg um 13 Dezibel (auf das Zwanzigfache der dortigen Orchesterleistung!).

können durch Frequenzkomponenten in der Originalmusik maskiert werden, so daß man sie nicht hört. Voraussetzung ist dabei natürlich, daß die Frequenzen beider Komponenten dicht genug beieinanderliegen. Fallen die störenden Komponenten jedoch in einen Frequenzbereich, in dem die ursprüngliche Musik nur geringe Intensitäten aufweist, so können die nicht-linearen Verzerrungen den Spaß am Zuhören verderben. Besonders unangenehm macht sich etwa eine dejustierte Lautsprecherspule bemerkbar, wenn sie den Magneten streift und ein schwaches, hochfrequentes Schabegeräusch verursacht. Die Schalleistung ist dabei zwar sehr gering im Vergleich zur Musik, aber wir hören das Kratzen deutlich, weil es von den tieferen Frequenzen der Musik nicht maskiert werden kann.

Neben Tonhöhe und Lautstärke bestimmen Maskierungseffekte den Eindruck, den wir beim Musikhören haben. Verzerrungen bei der Schallaufzeichnung können sehr lästig sein, im Fahrgeräusch eines Autos gehen leisere Passagen eines Musikstücks oft unter, während wir sie im Konzertsaal problemlos hören. Aber nicht nur Störgeräusche können Klänge maskieren, auch Töne überdecken sich bisweilen, wenn sie zusammenklingen. Manche subtile Melodieführung einzelner Stimmen kann dadurch in einer übermäßigen Klangfülle des Orchesters untergehen.



Der kleinste noch erkennbare Intensitätsunterschied (Schwelle) für Sinuswellen in Dezibel

Frequenz in Hertz	Hörpegel											
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
35	9,3	7,8	4,3	1,8	1,8							
70	5,7	4,2	2,4	1,5	1,0	0,75	0,61	0,57				
200	4,7	3,4	1,2	1,2	0,86	0,68	0,53	0,45	0,41	0,41		
1 000	3,0	2,3	1,5	1,0	0,72	0,53	0,41	0,33	0,29	0,29	0,25	0,25
4 000	2,5	1,7	0,97	0,68	0,49	0,41	0,29	0,25	0,25	0,21	0,21	
8 000	4,0	2,8	1,5	0,9	0,68	0,61	0,53	0,49	0,45	0,41		
10 000	4,7	3,3	1,7	1,1	0,86	0,75	0,68	0,61	0,57			

Weitere psychoakustische Effekte

Wenn Psychoakustiker so viele Hörphänomene untersuchen, verfolgen sie damit verschiedene Ziele. Zunächst einmal geht es einfach darum, vergleichbare Meßergebnisse zu bekommen. Je mehr konsistente Daten man gesammelt hat, desto erfolgreicher lassen sich einzelne Hypothesen oder Theorien über das Hören bestätigen oder widerlegen und gegebenenfalls verbessern.

Psychoakustische Messungen haben vielfach kaum einen praktischen Nutzen, was die Musik betrifft, solange man sich nicht um besondere Effekte bemüht. Das gilt etwa für die Experimente mit Sinustönen. Wir erinnern uns: Charakteristisch für die Töne von Musikinstrumenten sind zwei Eigenschaften, nämlich Tonhöhe (aufgrund der Periodizität) und Klangfarbe (aufgrund der relativen Intensitäten der einzelnen Partialtöne). Sinuswellen bestehen dagegen ja nur aus einer einzigen Frequenzkomponente, die ein unbefangener Hörer als gestimmten Ton oder aber als Klangfarbe empfinden kann. Vor übereilten Schlußfolgerungen oder Selbstbetrug können wir uns in solchen Fällen am ehesten schützen, indem wir immer wieder Experimente zu Rate ziehen. Auch wenn hier natürlich Daten für musikalische Klänge wünschenswert wären, sollte man den Nutzen der vorhandenen Meßergebnisse nicht unterschätzen.

Eine klassische Messung der Psychoakustik betrifft den gerade noch erkennbaren Unterschied zwischen den Intensitäten oder Frequenzen von Sinuswellen. Diesen Unterschied bezeichnet man als *Schwelle* oder *Limen*. Allerdings fallen die Meßwerte dafür jedesmal anders aus, je nach Meßmethode und Testperson, und auch für jeden einzelnen ergeben sich für verschiedene Zeitpunkte abweichende Schwellenwerte.

Bei den ersten Messungen wurden Intensitäten oder Frequenzen „gewobbelt“, das heißt. periodisch verändert; man bestimmt dabei, welche Veränderung gerade noch bemerkt wird. Eine andere Möglichkeit besteht darin, nacheinander zwei Töne mit geringen Intensitäts- oder Frequenzunterschieden vorzuspielen und die Testpersonen zu fragen, ob die Intensität oder Frequenz des zweiten Tons größer oder aber kleiner ist als die des ersten.

Welcher Intensitätsunterschied gerade noch erkennbar ist, hängt von Frequenz *und* Intensität ab. Entsprechend schwanken die Schwellenwerte für die Intensitätsunterschiede von Sinuswellen unterschiedlicher Frequenzen und Hörpegel. Bei Hörpegeln über 100 Dezibel und Frequenzen zwischen 1000 und 4000 Hertz werden Intensitätsunterschiede von nur einem Viertel Dezibel bemerkt, und im gesamten Bereich über 100 Hertz und 40 Dezibel (Hörpegel) liegt die Schwelle immer noch unter einem Dezibel.

Auch die kleinsten Frequenzunterschiede variieren je nach Frequenz und Intensität. Für Frequenzen um 2000 Hertz und Hörpegel von 30 Dezibel und mehr werden Abweichungen von nur etwa drei Cent noch erkannt,

Der kleinste erkennbare Frequenzunterschied für Sinuswellen in Cent

Frequenz in Hertz	Hörpegel 5	10	20	30	40	50	60	70	80
31	220	150	97	76	70				
62	120	120	85	80	74	61	60		
125	100	73	52	46	43	48	47		
250	61	37	22	19	18	17	17	17	17
500	28	19	12	10	9	7	6	7	
1 000	16	11	7	6	6	6	6	5	5
2 000	14	6	4	3	3	3	3	3	3
4 000	10	8	5	5	4	4	4	4	
8 000	11	9	7	6	5	4	4		
11 700	12	10	6	6	6	5			

und im gesamten Bereich oberhalb von 100 Hertz und 30 Dezibel überschreitet die Schwelle nirgends die 50-Cent-Marke.

Solche Messungen lassen sich nicht unbedingt auf traditionelle Musik übertragen, die ja meist nicht auf Sinustönen aufbaut. Wenn man einen Musiker bittet, auf seinem Instrument eine Tonleiter zu spielen und dabei stets die gleiche Lautstärke beizubehalten, wird die Intensität der Töne doch um etwa fünf Dezibel abweichen – das ist weit mehr als der gerade noch erkennbare kleinste Unterschied.

Wir hatten schon erwähnt, daß die sechs Lautstärkestufen von *pianissimo* (*pp*) bis *fortissimo* (*ff*) bei einem Orchester einen Gesamtumfang von 60 Dezibel abdecken können (mit *fff* und *ppp* als Grenzen). Die Lautstärke könnte sich dann zwischen den sechs Stufen jeweils um etwa zwölf Dezibel unterscheiden. Freilich haben die wenigsten Instrumente einen so großen Dynamikumfang. Daher sind die (ungewollten) Intensitätsschwankungen von fünf Dezibel nicht nur im Vergleich zur Intensitätsschwelle hoch, sondern auch im Hinblick auf den Dynamikumfang.

Wesentlich stärker wirken sich die gerade noch erkennbaren Frequenzunterschiede in der Musik aus. Wenn zwei Töne von einem Streichtrio nacheinander (als Melodie) oder gleichzeitig (als Harmonie) gespielt werden, weichen die Tonhöhen um weit mehr als den Schwellenwert von drei Cent ab. Nach älteren Messungen unterscheiden sich die gespielten Töne während mindestens der Hälfte der Beobachtungszeit um mehr als 18 Cent von den exakten Frequenzen, einzelne Noten wurden sogar mehr als 40 Cent zu hoch oder zu tief gespielt. Neuere Messungen ergaben, daß gute Geiger nur um etwa zehn Cent daneben greifen – was großenteils unter oder doch nicht allzuweit über den Werten für gerade noch erkennbare Frequenzunterschiede liegt.

Diese Schwellenwerte sagen uns, wie genau ein Musiker sein Instrument stimmen kann. Das illustrierte ein elektronischer Test bei einer Ausstellung in Disneyland. Auf Knopfdruck konnte man einen Ton mit konstanter Frequenz oder aber einen zweiten variablen Ton hören, dessen Höhe man nach Belieben verändern konnte. Allerdings waren die Töne nie gleichzeitig zu hören, so daß man sich nicht an den Schwebungen orientieren konnte. Nachdem man die Frequenzen aufeinander abgestimmt hatte, zeigte das Gerät die tatsächlichen Unterschiede an. Bei diesem Test schnitt ich allerdings nie so gut ab wie meine Frau, die als Musikerin natürlich einen Platzvorteil hatte.

Beim Hören von musikalischen Klängen treten jedoch ganz andere Effekte in den Vordergrund, allen voran der *Haas-Effekt*, der auch *Präzedenz-Effekt* genannt wird. Mit einer Stereoanlage kann man das leicht ausprobieren. Man schaltet die Anlage auf Monobetrieb, so daß aus beiden Lautsprechern dieselben Signale kommen. Solange man von jedem gleich weit entfernt ist, entsteht der Eindruck, als kämen alle Töne von einer Phantomschallquelle in der Mitte zwischen den Lautsprechern. Steht man aber etwas dichter bei einem von ihnen, so scheint der Klang nur noch von dort zu kommen. Hier genügt bereits ein Entfernungsunterschied von 30 Zentimetern.

Vor kurzem habe ich den Haas-Effekt bei der Stereoanlage eines Autos ausprobiert. In der Mitte der vorderen Sitzbank hörte ich die Stimme des Ansagers genau von vorne, wie aus einer einzigen Schallquelle zwischen den beiden Lautsprechern. Wenn ich etwas nach rechts rutschte, schien die Schallquelle zuerst diffus, bis ich ganz auf der rechten Seite nur noch den rechten Lautsprecher als Schallquelle empfand.

Ich konnte die Position der imaginären Schallquelle auch mit dem Balanceregler beeinflussen, indem ich die relativen Intensitäten für die Lautsprecher änderte. Bei „Monobetrieb" oder gleicher Intensität auf beiden Kanälen schien beispielsweise die Stimme des Ansagers aus dem linken Lautsprecher zu kommen, wenn ich auf dem Fahrersitz Platz nahm. Der rechte war erst zu hören, sobald ich die Intensität über den Balanceregler einseitig höher drehte – dann stellte sich ein Stereoeffekt ein. Auch wenn die relativen Schallstärken für die Position des Hörers ausgeglichen sind, bleiben die zeitlichen Verzögerungen zwischen den Signalen aus den beiden Lautsprechern bestehen. Dieselben Klänge kommen zu verschiedenen Zeiten am rechten und linken Ohr an. Solange wir von zwei gleich starken Lautsprechern gleich weit entfernt sind, scheint die Stimme des Ansagers aus einer einzigen Schallquelle in einer ganz bestimmten Richtung zu kommen. Stehen beide jedoch in unterschiedlichen Abständen, so können wir zwar die Intensität des weiter entfernten Lautsprechers erhöhen, bis wir ihn hören, aber wir haben dann nicht mehr das Gefühl, daß die Stimme des Ansagers aus einer bestimmten Richtung kommt, die Schallquelle wirkt diffus vergrößert.

Zeitliche Verzögerungen kann man bei zwei gleich starken Schallquellen manchmal deutlich beobachten. Wie schon erwähnt, hören wir alle Töne aus der näheren Schallquelle kommen, wenn ihre Abstände um etwa 30 Zentimeter oder mehr voneinander abweichen. Das gilt allerdings nicht für beliebig große Unterschiede. Sofern die Differenz mehr als 20 oder 25 Meter ausmacht, hört man wieder beide Schallquellen. Aus dem weiter entfernten Lautsprecher kommt eine Art Echo. Daß es gerade bei diesem Abstandsunterschied auftritt, kann man sich mit einem einfachen Experiment klarmachen, das der amerikanische Physiker Joseph Henry bereits um 1849 durchführte. Man stellt sich vor eine große Mauer mit glatter Oberfläche und klatscht in die Hände. Beträgt der Abstand zur Mauer weniger als zehn Meter (so daß der Schall zur Mauer und zurück eine Strecke von weniger als 20 Metern durchläuft), hört man ein einzelnes Klatschen, bei mehr als 13 Metern entsteht ein Echo.

Im Alltag ist es für uns sehr vorteilhaft, einem Schallsignal diejenige Richtung zuzuordnen, aus der es uns zuerst erreicht – auch wenn das den Stereoeffekt bei der Wiedergabe von Musik oft beeinträchtigt. In Räumen mit glatten Wänden läßt sich mühelos feststellen, aus welcher Ecke ein Redner spricht, obwohl ein Großteil des Schalls, der ans Ohr dringt, zuvor mehrfach an den Wänden reflektiert wurde. Der reflektierte Schall erhöht die Gesamtlautstärke, ändert aber nichts an der Richtung, aus der wir die Stimme hören. Das gleiche gilt für Musikinstrumente. Wenn man bei einem Kammerkonzert nur nahe genug bei den Instrumenten sitzt, merkt man leicht, aus welcher Richtung ein Ton kommt, obwohl ein Großteil des Gesamtklangs an den Wänden reflektiert wird.

Wandreflexionen verwirren uns also keineswegs im Hinblick auf die Richtung einer Schallquelle. Sie ändern jedoch Schallstärke und Klangfarbe. Als ich in Paris am IRCAM arbeitete, übte meine Frau in einem Studio mit stark schallschluckenden Wänden an einem großen Yamaha-Konzertflügel. Vergeblich bemühte sie sich, einen vollen Klang zu erreichen – mochte sie noch so sehr in die Tasten greifen, die Lautstärke blieb unbefriedigend. Warum Musik manchmal tot und dumpf wirkt, werden wir noch genauer untersuchen.

Reflexionen vergrößern nicht nur die Schallstärke, sondern sie erleichtern es darüber hinaus, die Entfernung einer Schallquelle einzuschätzen. Sie scheint weiter weg, wenn die einzelnen Töne aus mehreren Lautsprechern in verschiedenen Abständen – und nicht aus einem einzigen – kommen, wobei die Schalleistung beim Hörer in beiden Fällen gleich sein kann. Das leuchtet durchaus ein, wenn man sich an alltägliche Beobachtungen erinnert: In einem geschlossenen Raum hören wir von einem Gesprächspartner in geringer Entfernung fast nur direkten Schall, mit wachsendem Abstand nimmt der Anteil der Schallwellen, die zuvor an den Wänden reflektiert wurden, zu. In einem „schalltoten" Raum (dessen Oberflächen keinen Schall reflektieren) können wir nicht mehr heraushören, wie weit eine flüsternde Person hinter uns steht – sie erscheint immer ganz nahe, egal, wie groß ihr Abstand tatsächlich ist. In seinen Computerkompositionen *Stria* und *Turenas* nutzte John Chowning den Nachhall, um wechselnde Entfernungen zu suggerieren.

Die Absorptionskoeffizienten einiger Baumaterialien

Material	Frequenz in Hertz 125	250	500	1000	2000	4000
Marmor oder glasierte Fliesen	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
ungestrichener Beton	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
asphaltierter Beton	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
dicke Teppiche auf Beton	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
dicke Teppiche auf Filz	0,08	0,27	0,39	0,34	0,48	0,63
Glasplatten	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
normaler Innenputz	0,30	0,15	0,10	0,05	0,04	0,05
Spezialputz (2,5 cm dick)	0,25	0,45	0,78	0,92	0,89	0,87
Sperrholz (0,6 cm dick)	0,60	0,30	0,10	0,09	0,09	0,09
Rohrgeflecht auf Beton (1,2 cm dick)	0,14	0,20	0,76	0,79	0,58	0,37
Rohrgeflecht auf Beton (2,5 cm dick)	0,22	0,47	0,70	0,77	0,70	0,48
Rohrgeflecht in Metallrahmen (2,5 cm dick)	0,48	0,67	0,61	0,68	0,75	0,50

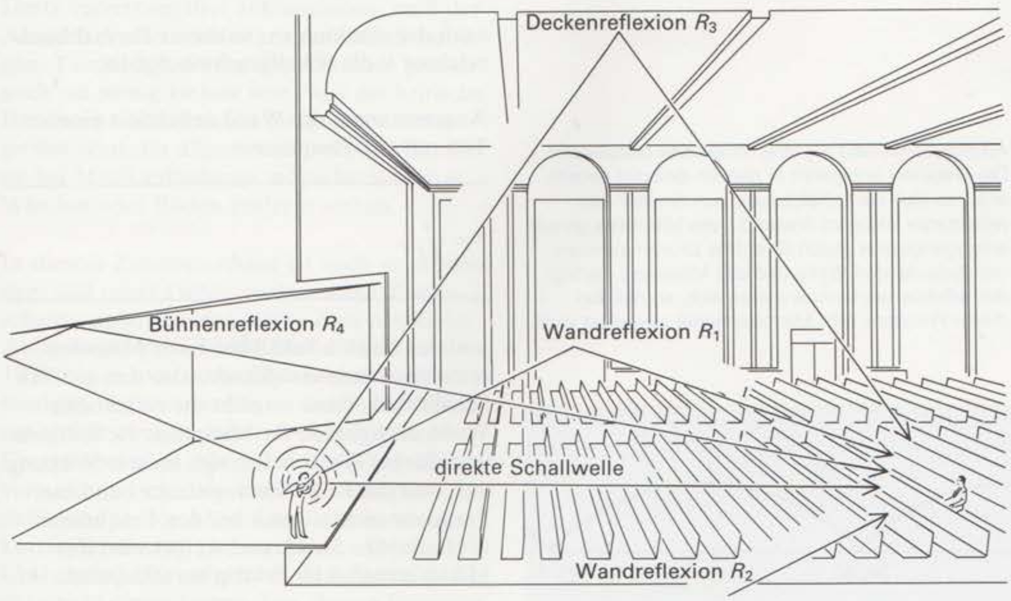
Es kann einen Musiker schon manchmal zur Verzweiflung bringen, wenn er in akustisch toten Räumen spielen muß. Als die Philharmonic Hall (die heute Avery Fisher Hall heißt) im Lincoln Center noch nicht umgebaut war, hörten die Musiker so gut wie nichts von ihren Instrumenten, weil man die Bühnenwand mit schallschluckendem Material verkleidet hatte. Normalerweise hören sie sich selbst am besten, wenn sie fünf bis sechs Meter vor einer reflektierenden Wand sitzen.

Noch wichtiger sind reflektierte Klänge oder Nachhall für die Zuhörer. Besonders eindrucksvoll habe ich das bei einer Aufnahme von Orgelmusik feststellen können, die direkt auf der Empore gemacht worden war. Weil der Nachhall nun bei der Wiedergabe fehlte, wirkte der Klang wie bei einer schlechten elektronischen Orgel. Durch den Nachhall können die Töne verschmelzen und voller klingen. Aber es darf natürlich nicht zuviel werden. Als ich mit meiner Frau bei einer Probe eines Pariser Studentenorchesters in Sainte Chapelle zuhörte, gefiel mir besonders der strahlende Klang der Trompeten, der den ganzen Raum erfüllte. Meine Frau stellte jedoch fest, daß die Spieler etwas aus dem Takt waren, was mir in der waberigen Fülle des Nachhalls entgangen war.

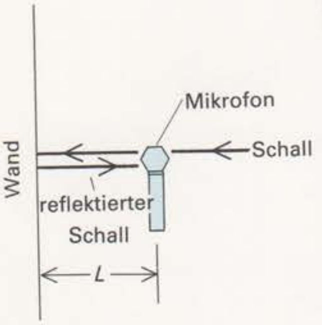
Hier spielt die *Nachhallzeit* eine Rolle. (Sie gibt an, nach welcher Zeit die Anfangsintensität eines Klanges um 60 Dezibel gesunken ist, wir kommen darauf noch zurück.) Für das Sprechen erweisen sich Nachhallzeiten von etwa einer halben Sekunde als günstig; oberhalb einer Sekunde werden die Worte unverständlich. Musik klingt dagegen bei zwei Sekunden am besten, und manche neuere Orgelmusik ist vermutlich für Kirchen mit noch längeren Nachhallzeiten gedacht.

Wie steht es hier mit den störenden Echos? Wir hatten schon gesagt, daß ein Echo entsteht, wenn ein Ton aus zwei Schallquellen kommt und beide mehr als 20 bis 25 Meter auseinanderstehen, dieser Abstand entspricht einer Zeitdifferenz von 60 bis 80 Millisekunden. In Konzertsälen können zeitlich verzögerte Reflexionen an ebenen Oberflächen – wie der Brüstung einer Empore – zu Echos führen. Um das zu verhindern, sorgt man in der Regel schon bei der Planung eines Saals dafür, daß sich möglichst viele Reflexionen überlagern, die zu verschiedenen Zeiten und aus verschiedenen Richtungen beim Zuhörer eintreffen. Dann hören wir nämlich den Schall insgesamt aus der Richtung kommen, aus der er uns auf direktem Wege, ohne Reflexionen, erreicht. Wir haben den richtigen Eindruck von einer begrenzten Schallquelle auf der Bühne, als wäre kein Nachhall vorhanden, nur die Klangfarbe ist völlig anders als beim Fehlen jeder Wandreflexion.

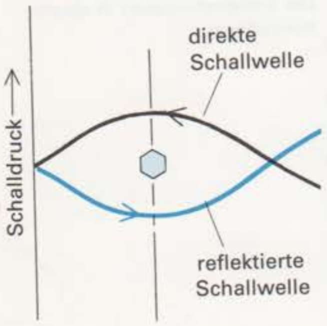
Werden einzelne Reflexionen zu stark, so wirkt sich dies gleichermaßen in größeren Entfernungen zur Wand wie in unmittelbarer Nähe unangenehm aus. Es empfiehlt sich daher, Lautsprecher entweder direkt in eine Wand einzubauen oder unmittelbar davor zu stellen oder aber in großer Entfernung von Wänden oder Böden zu postieren. Noch wichtiger ist ein solcher Mindestabstand bei Mikrofonen. Hält man ein Mikrofon dicht über eine Tischplatte (fünf bis sieben Zentimeter), so wird jede Aufnahme – ob Sprache oder Musik – durch die Reflexion verfälscht. Töne bekommen eine unnatürliche Klangfarbe, weil einige Frequenzen hervorgehoben und andere unterdrückt werden.



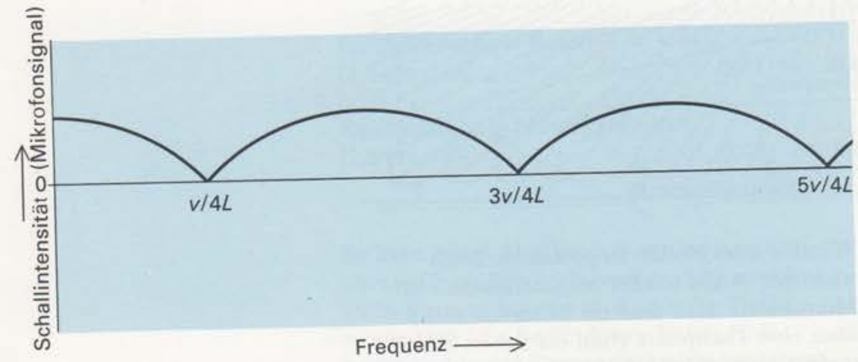
Die Schallreflexionen in einem Konzertsaal.



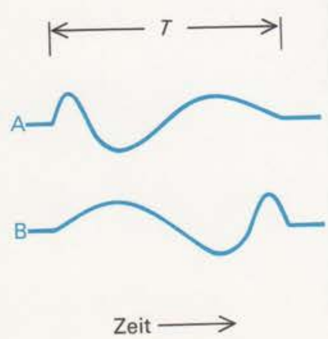
Ein Mikrofon vor einer totalreflektierenden Wand. Der direkt einfallende und der reflektierte Schall erreichen das Mikrofon mit gleichen Intensitäten.



Amplitudenverlauf für eine reflektierte Schallwelle. Die Frequenz entspricht in diesem Beispiel gerade $v/4L$, so daß die Schalldrücke von direkter und reflektierter Welle im Abstand L des Mikrofons gerade entgegengesetzt gleich sind. Das Druckmaximum der einlaufenden Welle und das Minimum (farbig) der reflektierten kompensieren sich, so daß bei dieser Frequenz kein Mikrofonsignal ausgelöst wird.



Ein Mikrofon vor einer schallharten Wand registriert – je nach Frequenz – unterschiedliche Intensitäten. Die Minima liegen bei Frequenzen, für die sich die direkte und die reflektierte Schallwelle beim Mikrofonabstand L auslöschen.



Eine Schallwelle (A) und ihre zeitliche Umkehrung (B). Wenn die Wellen länger als zwei Millisekunden anstehen, hört man den Unterschied, wie Messungen von David M. Green gezeigt haben.

Warum das so ist, wird deutlich, wenn man sich klar macht, wann die direkte und wann die reflektierte Schallwelle beim Mikrofon vor einer reflektierenden Wand eintrifft. Wenn der Abstand zur Wand L beträgt, dann kommt die reflektierte Welle erst mit einem Zeitverzug t von

$$t = \frac{2L}{v}$$

nach der direkten an, in dieser Formel kennzeichnet v die Schallgeschwindigkeit.

Angenommen, die Wand reflektiert einen Ton mit der Frequenz

$$f = \frac{v}{4L},$$

und der direkte Schall hat beim Mikrofon seine maximale Amplitude, also den größten Schalldruck, dann erreicht die reflektierte Welle dort gerade ihr Minimum. Reflektierte und direkte Welle heben sich in ihrer Wirkung auf, und das Mikrofon registriert bei dieser Frequenz nichts. Auch bei den Frequenzen $v/4L$, $3v/4L$, $5v/4L$ und so fort wird das Mikrofonsignal im Prinzip verschwinden.

Das läßt sich umgehen, indem man das Mikrofon unmittelbar vor die Wand stellt. Wenn wir jedoch verhindern wollen, daß die Klangfarbe verfälscht wird, müssen wir es möglichst weit von der Wand wegrücken, dann wird auch der Nachhall des Raums stärker mit aufgenommen. Frequenzdifferenzen zwischen den Signalminima bei $v/4L$, $3v/4L$, $5v/4L$ und so weiter empfinden wir nämlich nicht mehr als Einbruch, wenn sie deutlich kleiner sind als die kritische Bandbreite (also etwa eine kleine Terz). Sie wirken eher wie eine veränderte Klangfarbe. Wenn die Minima der Mikrofonsignale im Frequenzabstand $v/2L$ aufeinanderfolgen, läßt sich die störende Wirkung von Reflexionen unter folgender Bedingung vermeiden.

$$\frac{v}{2L} < (5/4)\,f$$

oder, anders ausgedrückt.

$$L > (2/5)\,(v/f)$$

Um alle Tonfrequenzen bis hinunter zu 100 Hertz verzerrungsfrei aufzunehmen, muß der Abstand L also mindestens drei Meter betragen. Tatsächlich dürfen die Abstände jedoch auch ein wenig kleiner sein, weil die kritische Bandbreite bei so tiefen Frequenzen etwas größer wird. Im allgemeinen sollten Mikrofone bei Musikaufnahmen möglichst weit von Wänden oder Böden entfernt stehen.

In diesem Zusammenhang ist noch zu erwähnen, daß unser Gehör auch winzige Zeitabschnitte unterscheiden kann. Zum zeitlichen Auflösungsvermögen hat David M. Green 1973 einige interessante Meßwerte veröffentlicht. Er untersuchte, in welchem Maße unser Ohr zwei Signale mit einheitlichem Energiespektrum, aber abweichendem Zeitverlauf unterscheiden kann. Als Beispiel dafür sind in der Abbildung links unten ein kurzer Wellenzug (A) und seine zeitliche Umkehrung (B) aufgeführt. Das Signal (A) entspricht einem kurzen Ton, dessen Frequenz abfällt, bei der Umkehrung (B) steigt sie. Green stellte fest, daß der Unterschied gehört wird, wenn die Wellenformen mindestens zwei Millisekunden lang „erklingen“

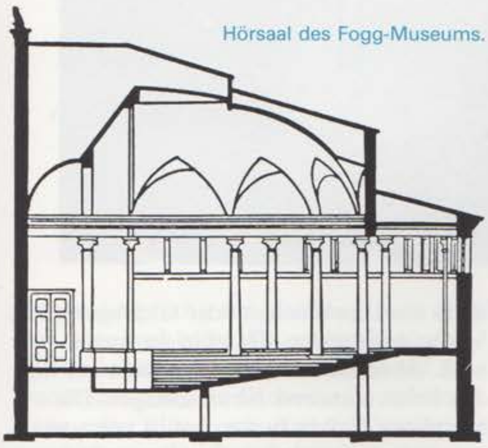
Der Haas-Effekt oder Echos spielen beim Musikhören eine ungemein wichtige Rolle. Bei identischen Signalen aus zwei Schallquellen bewirkt bereits eine zeitliche Verzögerung von einer Millisekunde (entsprechend einem Raumabstand von 30 Zentimetern), daß die Schallwelle des späteren Signals „verschluckt“ wird und wir nur die Richtung der zuerst eintreffenden Schallwelle wahrnehmen. Wächst die Zeitdifferenz auf 60 bis 80 Milli-

des zuerst eintreffenden Schalls. Zeitversetzte Reflexionen können auf diese Weise zu größerer Lautstärke und mehr Klangfülle beitragen, ohne die Wahrnehmung der Richtung zu stören.

Raumakustik

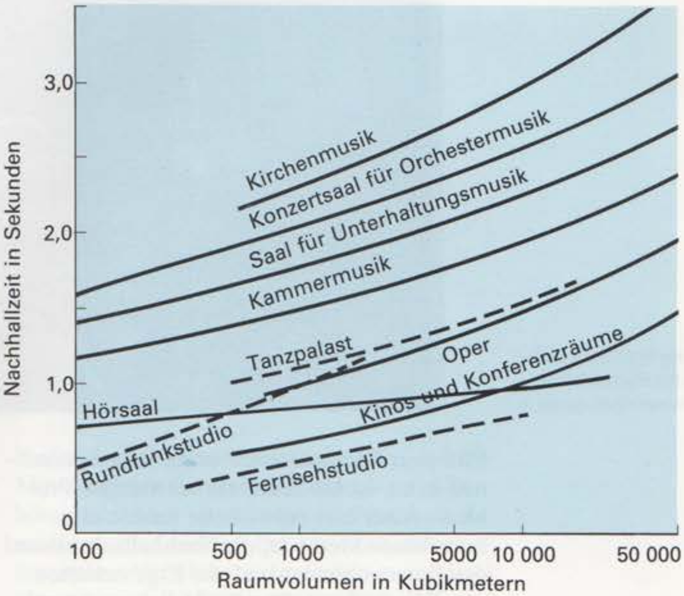
Zwischen 1895 und 1915 begründete Wallace Clement Sabine, Professor für Mathematik und Philosophie an der Harvard-Universität, einen neuen Wissenschaftszweig: die Raumakustik. Bis dahin baute man überwiegend nach dem Vorbild von Konzertsälen mit guter Akustik. Bisweilen grenzten die Methoden dabei schon an Aberglauben – etwa, wenn Drähte durch den oberen Teil eines Kirchenschiffes gespannt wurden.

Hörsaal des Fogg-Museums.



Zur Raumakustik kam Sabine, als man nach der Eröffnung des Fogg-Museums feststellen mußte, daß man im Hörsaal bei Vorlesungen fast nichts verstehen konnte. Als sich die Harvard-Universität 1895 mit der Bitte an Sabine wandte, hier Abhilfe zu schaffen, war das eine außergewöhnliche Gelegenheit für einen außergewöhnlichen Wissenschaftler•

Mit Neugier und Scharfsinn ging Sabine an die Lösung des Problems heran, bei der er sich auf sein Gehör, eine Stoppuhr und eine Orgelpfeife mit Preßluftflasche (als Schallquelle) verließ. Er entdeckte bald, daß im Hörsaal des Fogg-Museums ein zu starker Nachhall für die schlechte Akustik verantwortlich war. Mit Filzbelägen auf verschiedenen Wänden konnte er den Mangel soweit beheben, daß die Redner nun zu verstehen waren. Er selbst meinte, der Raum sei dadurch „zwar nicht überragend, aber im großen und ganzen brauchbar" geworden.



Die Nachhallzeit richtet sich jeweils nach Zweck und Größe eines Saals. Für große Hallen muß sie vergleichsweise lang sein. Zum Beispiel kommt Kirchenmusik in Kathedralen besonders gut zur Geltung. Die Saalgrößen für die verschiedenen Volumina kann man sich an einem Würfel klarmachen: 100 Kubikmeter entsprechen beispielsweise einer Seitenlänge von 4,6 Metern; bei 500000 Kubikmetern wären es 38 Meter.

Sabine definierte erstmals die *Nachhallzeit* als wichtige Größe von Hör- und Konzertsälen. Für ihn war es die Zeitspanne, die nach dem Abschalten der Schallquelle vergeht, bis der Nachhall gerade nicht mehr zu hören ist. Als man Jahre später mit elektronischen Geräten Schallpegel messen konnte, stellte sich heraus, daß der Nachhallpegel in dieser Zeit um 60 Dezibel abfällt, entsprechend hat man dann die Nachhallzeit definiert. Wann sie optimal ist, hängt nicht nur davon ab, ob man Musik, Sprache oder anderen Schall hören will, sondern auch von der Größe des Konzertsaals oder des Theaters.

• Sabine hat all diese Umstände selbst beschrieben; man kann das in seinen Arbeiten nachlesen, die 1922 bei Harvard University Press zum ersten Mal veröffentlicht wurden. Ein Nachdruck von 1964 (bei Dover) ist derzeit leider vergriffen.

Die Symphony Hall in Boston, von Wallace C. Sabine entworfen und 1900 gebaut.

Wie man Nachhallzeiten exakt vorausberechnen kann, ist bis heute ein schwieriges Problem. Auch hier entwickelte Sabine eine brauchbare Methode, die Nachhallzeit anhand des Raumvolumens und der Eigenschaften von Wänden und Oberflächen abzuschätzen.

Mit zäher Ausdauer brachte er viele Stunden in einem unterirdischen Raum mit Wänden aus Beton und Ziegelsteinen zu, um die schallschluckenden Eigenschaften verschiedener Materialien zu untersuchen. Oft wartete er bis tief in die Nacht darauf, daß es ruhig genug würde, um die Absorption seines Probematerials in bezug auf die „Absorption" eines geöffneten Fensters zu eichen. Sabine bestimmte aber nicht nur die schallschluckenden Eigenschaften von vielfältigen Materialien, sondern er untersuchte auch die Schalleitung und die Möglichkeiten zur Schallisolierung – ein Problem, das für Musikschulen und Konservatorien noch immer nicht zufriedenstellend gelöst ist.

Meistens wandte man sich an Sabine, wenn es galt, die schlechte Akustik eines Saals zu verbessern, der nicht selten von einem anerkannten Architekten entworfen worden war. Oft hatte man am Zuhörer vorbei gebaut – sei es aus Unwissenheit oder Gleichgültigkeit. Solche Architekten gibt es leider immer noch. Aber Sabine mußte sich nicht nur mit den Fehlern anderer herumschlagen. Die Symphony Hall in Boston hat er von vornherein nach akustischen Gesichtspunkten entworfen. Sie wurde im Jahre 1900 als Ersatz für die alte Music Hall gebaut und gehört noch immer zu den wenigen wirklich hervorragenden Konzertsälen der Welt.

Auf dem Gebiet der Raumakustik wird in ihrem Ursprungsland heute nur noch wenig geforscht, aber aus anderen Ländern, etwa der Bundesrepublik Deutschland, kommen ausgezeichnete Arbeiten. Dabei geht es im wesentlichen um zwei Hauptprobleme mit jeweils vielen Nebenaspekten. Als erstes müssen wir uns darüber klar werden, was wir überhaupt wollen. Unter welchen Bedingungen können Musiker gut spielen? Und wann klingt ein perfektes Spiel auch für den Zuhörer gut? Die zweite Frage ist dann, wie sich das, was für Musiker und Zuhörer günstig ist, praktisch erreichen läßt.

Bei einer ganzen Reihe von Untersuchungen wurde in der letzten Zeit in verschiedenen Sälen oder unter Laborbedingungen getestet,

Die Philharmonic Hall in ihrer ursprünglichen Ausgestaltung von Leo Beranek.

welche Ansprüche der Musiker jeweils erfüllt sind oder auch nicht. Für einen einzelnen Spieler kommt es nur unwesentlich auf die Nachhallzeit an, ein Orchester ist zufrieden, wenn seine Klänge mit geringer Verzögerung von hinten und oben reflektiert werden. Jeder Spieler muß ja auch alle anderen möglichst zeitgleich hören. Es nützt nichts, wenn nur das Publikum das Orchester gut hört, die Musiker aber nicht gut und entspannt spielen können, weil sie sich nicht hören. Daß Räume mit Holzböden für Musiker und Publikum einen besonders angenehmen Klangeindruck vermitteln – im Gegensatz zu Betonböden –, ist beinahe schon eine Binsenweisheit der Raumakustik.

Ein wichtiger Gesichtspunkt beim Bau von Konzertsälen betrifft Störgeräusche. Schon beim Entwurf muß man darauf achten, daß von außen möglichst kein Lärm eindringen und innen keiner entstehen kann. In vielen Büros und manchmal auch in Konzertsälen sorgen Klimaanlagen für eine lästige Geräuschkulisse.

Das Problem störender Umweltgeräusche bei Freiluftaufführungen ist so alt wie das griechische Theater. Eine reflektierende Fläche hinter dem Orchester hilft auch hier, daß die Mitwirkenden sich selbst hören, für die Zuhörer fehlt aber dann jedweder Nachhall, es sei denn, man erzeugt ihn künstlich mit elektronischen Verstärkern. Im Freien kann Musik also nie so voll klingen wie im Konzertsaal. Wenn Aufführungen in Freilichttheatern so beliebt sind, liegt das sicher nicht an einer guten Akustik.

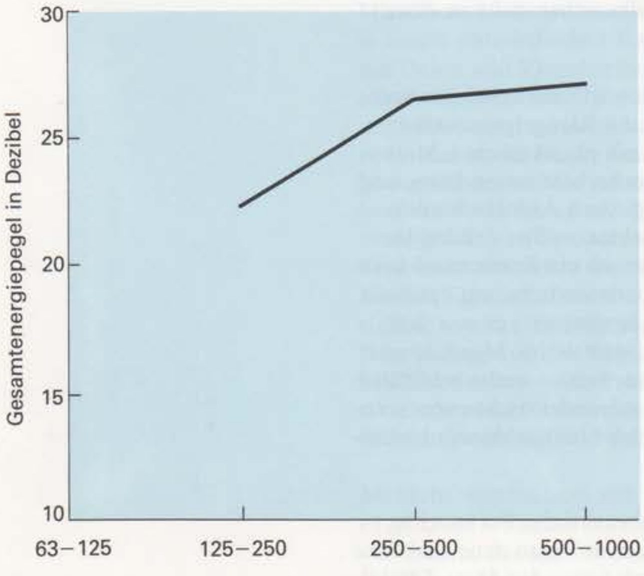
Im folgenden wollen wir uns etwas genauer ansehen, wie man die Klangeigenschaften von Konzertsälen mit physikalischen Methoden messen und vorherbestimmen kann, und auch die psychologischen Aspekte berücksichtigen. Schon Sabine wußte, daß beides darüber entscheidet, ob ein Konzertsaal wirklich gut ist. Er experimentierte, um optimale Nachhallzeiten zu bestimmen, er war sich darüber im klaren, daß sie bei Musik länger sind als bei Sprache. Sabine wußte schließlich auch, wie sich die störenden Echos von vornherein vermeiden oder im nachhinein beseitigen lassen.

Seitdem gelangen beachtliche Fortschritte, nicht zuletzt deshalb, weil man neue Einblicke in die Psychoakustik (etwa den Haas-Effekt) praktisch nutzen konnte. Elektronische

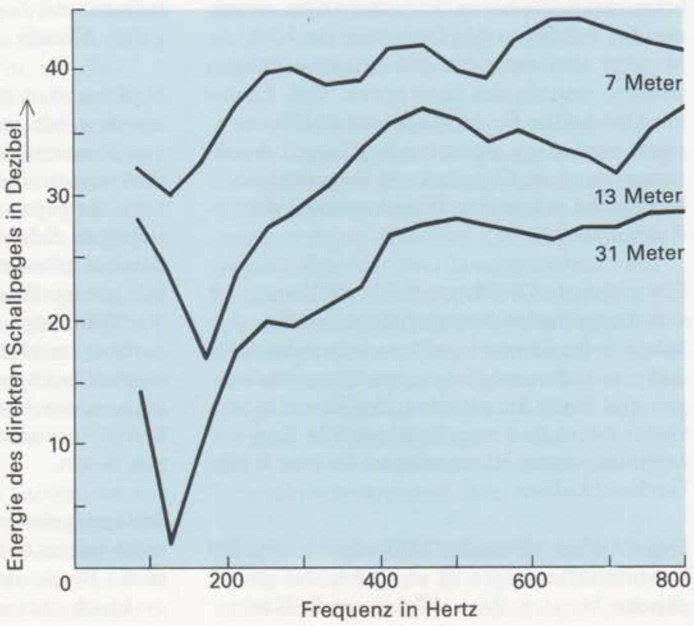
Schallquellen und Meßgeräte, darunter der (digitale) Computer, erwiesen sich dabei als nützliche Hilfsmittel. Aber erst der Pioniergeist einiger scharfsinniger Forscher machte die Raumakustik im Laufe der Jahre zu der Wissenschaft, die sie heute ist.

Gemessen an den praktischen Auswirkungen scheinen die Fortschritte manchmal enttäuschend. So erwies sich die Philharmonic Hall des Lincoln Center in Manhattan als Katastrophe. Dabei hatte sich das Architektenbüro Bolt, Beranek und Newman ganz besonders zugute gehalten, nach einer eingehenden akustischen Analyse geplant zu haben. So schrieb Beranek im Juli 1962, zwei Monate vor der Einweihung der Philharmonic Hall, im Vorwort seines Buches über Raumakustik: „Die Sorgfalt, mit der die Philharmonic Hall geplant und entworfen wurde, gehört zu den besonderen Höhepunkten in diesem Band. Statt sich nur auf das Glück zu verlassen, hat man genau analysiert und nach neuen, aber solide begründeten akustischen Prinzipien gebaut."

Die Gesamtenergie des Schalls, der in der Philharmonic Hall beim Zuhörer ankam, ist hier im Pegelmaß aufgetragen. Die Kurve gibt Mittelwerte für fünf Positionen im Parkett wieder, die jeweils bei drei Frequenzbändern von der Breite einer Oktave gemessen wurden. Im Oktavband zwischen 125 und 250 Hertz ist die Energie um etwa fünf Dezibel geringer als bei 500 bis 1000 Hertz.



Energiepegel der direkten Schallwelle, wie er in der Philharmonic Hall an verschiedenen Stellen im Mittelgang des Parketts gemessen wurde. Bei 31 Metern Entfernung vom Podium hatte ein tiefer Ton mit einer Frequenz von 130 Hertz eine erheblich geringere Schallenergie als ein 500-Hertz-Ton – sie lag etwa 25 Dezibel niedriger Die tiefen Töne von Celli und Kontrabässen waren kaum zu hören.

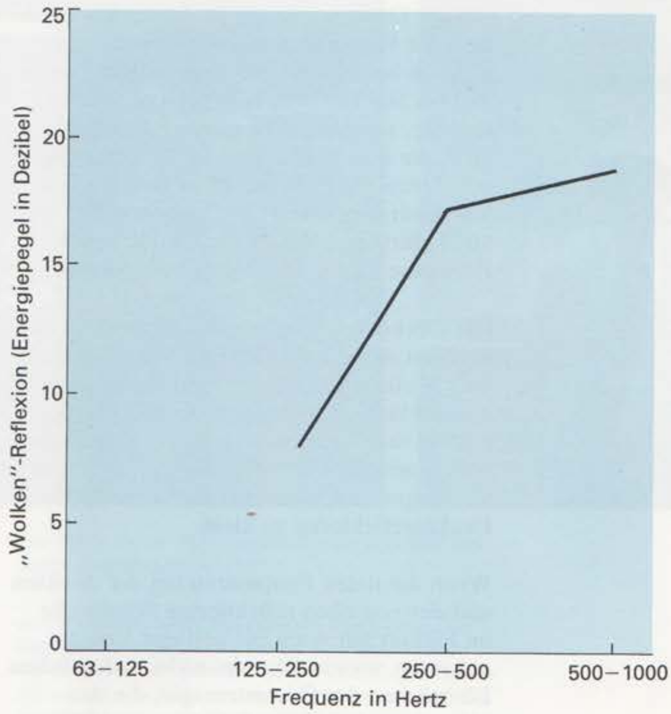


Was ging dabei schief, und warum? Beranek hatte bei seinem Entwurf penibel auf einige Gesichtspunkte geachtet, die er für äußerst wichtig hielt, sich aber andererseits um manches, das sich später als folgenschwer erwies, kaum gekümmert•

Die Folgen – eine lange Liste von Mängeln – kann man ausführlich in den Veröffentlichungen von Manfred Schroeder und seinen Mitarbeitern nachlesen. An manchen Stellen des Zuschauerraums gab es Echos, die Spieler des Orchesters konnten weder sich selbst noch ihre Mitspieler hören, weil die Wand hinter ihnen den Schall schluckte, der Nachhall reichte für ein angenehmes Klangempfinden nicht aus, der Schall verteilte sich nicht gleichmäßig im Raum, und – der schlimmste Mangel – die tiefen Frequenzen wurden verschluckt, so daß Celli und Kontrabässe kaum zu hören waren.

All das sieht man den Meßwerten nicht an, solange die gesamte Schallenergie aufgezeichnet wird, die beim Hörer innerhalb einer Sekunde nach dem Eintreffen der direkten Schallwelle ankommt. Wenn man die Gesamtenergie als Pegel für einige Frequenzbänder (mit Oktavbreite) aufträgt, ergibt sich nur ein geringer Abfall um fünf Dezibel (zwischen den Oktavbändern bei 125 bis 250 und 250 bis 500 Hertz).

Tatsächlich waren die niedrigen Frequenzen von Anfang an zu schwach vertreten, und zwar sowohl in der direkten Schallwelle von der Bühne, als auch im Schall von den wolkenähnlichen Deckenreflektoren, diese „Wolken“, die die Decke der Philharmonic Hall bildeten, ließen sich alle gezielt einstellen.



Der Mittelwert der Deckenreflexion von den „Wolken“ gemessen an fünf Stellen im Parkett an einem Modell der Philharmonic Hall. Der Energiepegel für reflektierte Schallwellen im Oktavband zwischen 125 und 250 Hertz liegt etwa zehn Dezibel unter den Werten für 500 bis 1000 Hertz.

Woran es beim direkten Schall von der Bühne gefehlt hat, zeigt sich, wenn man den Energiepegel des direkten Schalls über der Frequenz aufträgt. Zwischen 100 und 200 Hertz bemerkt man einen ausgeprägten Einschnitt, der mit wachsendem Abstand zum Podium immer tiefer wird. Der Boden der Halle stieg zu den hinteren Rängen ursprünglich nur ganz leicht an. Wenn der Schall über die Sitzreihen strich, wirkte der Raum zwischen den Reihen ähnlich wie ein Resonator· Schallwellen mit tiefen Frequenzen wurden nach oben abgelenkt, am Zuhörer vorbei. Die regelmäßig hintereinander angeordneten Rückenlehnen taten ein übriges. Die

• Beranek vertraute so sehr auf seine Theorien, daß er auf Tests an einem Modell der Halle verzichtete. Seit Sabines Zeiten baut man Modelle, um sie akustisch zu untersuchen, wie Abbildungen in seinem Buch zeigen, anfangs waren solche Tests noch unvollkommen, aber heute lassen sich damit verläßliche Ergebnisse erzielen. Wichtig ist, daß die Wellenlängen des Testschalls zu den Ausmaßen des Modells im selben Verhältnis stehen müssen wie später die Wellenlängen der Musik zur Größe der fertigen Halle. Für ein Modell im Maßstab 1.10 braucht man zum Beispiel eine Testfrequenz von 5000 Hertz, um die Akustik für einen 500-Hertz-Ton zu prüfen.

Schallwelle wurde dort so gebrochen, daß sich die Verluste bei tiefen Frequenzen erhöhten.

Bei der Deckenreflexion ist ein starker Rückgang für Frequenzen zwischen den Oktavbändern bei 125 bis 250 beziehungsweise 250 bis 500 Hertz zu beobachten. Das wird sichtbar, wenn man die mittlere Energie mißt, die innerhalb eines vorgegebenen kurzen Zeitintervalls beim Hörer ankommt. Im Vergleich zum Oktavband zwischen 500 und 1000 Hertz ist bei 125 bis 250 Hertz ein Rückgang um elf Dezibel zu verzeichnen.

Die Deckenreflexion war bei niedrigen Frequenzen einfach deshalb unzureichend, weil die „Wolken" zu klein waren. Damit eine ebene Fläche Schallwellen gut reflektiert, müssen ihre Längenabmessungen erheblich größer sein als die Wellenlängen, aber schon für Frequenzen unter 300 Hertz waren die Deckenreflektoren zu klein.

Wenn die tiefen Frequenzen bei der direkten und der von oben reflektierten Schallwelle im Parkett nur noch mit geringer Energie ankamen, warum führt das nicht zu deutlichen Einbrüchen der Gesamtenergie, die den Hörer innerhalb einer Sekunde erreicht? Hier mißt man ja auch bei tiefen Frequenzen insgesamt beachtliche Werte. Sie schließen aber alle Schallwellen ein, die erst nach mehrfacher Reflexion beim Zuhörer eintreffen, und hier durchlaufen besonders die niederfrequenten einige Male die ganze Halle, so daß sie als verzögerte Klänge nicht mehr mit den Tönen der Celli und Bässe in Verbindung gebracht werden. Losgelöst von ihrer eigentlichen Klangquelle wirken sie wie lästige Nebengeräusche.

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, die Akustik der Philharmonic Hall zu verbessern. Eine feste Bühneneinfassung sorgte dafür, daß sich das Orchester selbst hörte, die Deckenreflektoren wurden neu angeordnet, so daß sie akustisch im wesentlichen wie eine durchgehende Decke wirkten. Die Seitenwände bekamen zusätzliche Reflektoren, die den Schall besser verteilen sollten, und im Parkett wurden neue Sitze aufgestellt, die weniger Schall schluckten. Um die Echos abzuschwächen, wurde die Verkleidung der Empore schräg angebracht und die Rückwand des Saals mit einer schallabsorbierenden Verkleidung versehen. Das alles half zwar, die gröbsten Mängel zu beseitigen, aber die Nachhallzeit war am Ende ziemlich kurz (nur etwa 1,85 Sekunden).

Schließlich entschloß man sich, die Philharmonic Hall völlig neu zu entwerfen und umzubauen, mit dieser Aufgabe wurde Cyril Harris von der Columbia-Universität betraut, einer der besten Raumakustiker in Amerika. Aus der Philharmonic Hall wurde die Avery Fisher Hall. Rückschläge wie bei der Philharmonic Hall sollten aber nicht den Blick auf die erfreulichen Fortschritte in der Raumakustik trüben, die seit den ersten großen Erfolgen von Sabine zu verzeichnen waren. Man kann das an den Arbeiten von Manfred Schroeder von der Universität Göttingen sehen. Beim Entwurf eines Konzertsaals ist es wichtig, die Nachhallzeit möglichst genau zu bestimmen, was – wie schon erwähnt – noch ungelöste Probleme aufwirft. Sabine stellte eine einfache Formel für die Nachhallzeit T auf:

$$T = \frac{13{,}8L}{v\,a}.$$

Dabei ist L die mittlere freie Weglänge, die eine Schallwelle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Reflexionen zurücklegen kann, v die Schallgeschwindigkeit und a der Schallabsorptionskoeffizient, der zwischen 0 (ideale Reflexion) und 1 (völlige Absorption) liegen kann.

Sabine nahm an, daß die mittlere freie Weglänge zur Kubikwurzel des Raumvolumens proportional sei. Allerdings war schon damals aus der kinetischen Gastheorie bekannt, daß die mittlere freie Weglänge aus allen möglichen Wegen berechnet werden muß. Unter dieser sogenannten Ergodenbedingung gilt.

Die Avery Fisher Hall, aufgenommen während des Eröffnungskonzerts.

Cyril Harris.

$$L = \frac{4V}{O}.$$

Hier steht V für das Raumvolumen und O für die Innenfläche dieses Raums.

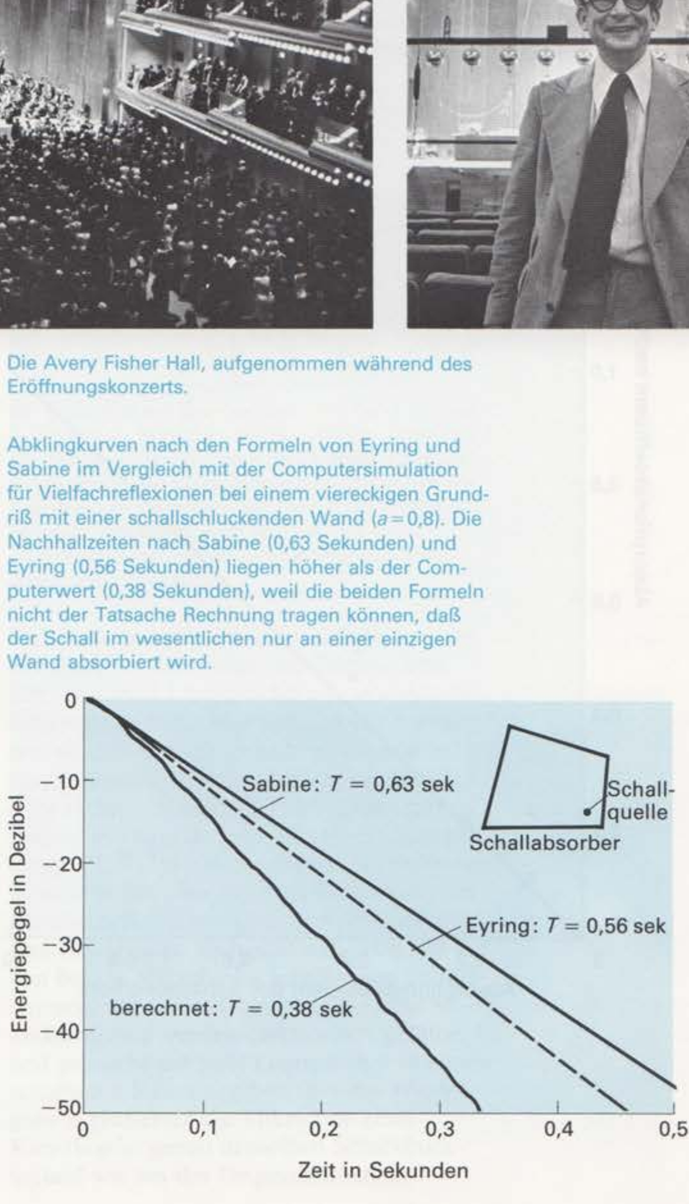
Problematisch wird Sabines Formel, weil sie auch bei vollständiger Absorption ($a = 1$) eine endliche Nachhallzeit voraussagt. 1929 schlugen K. Schuster und E. Waetzmann und 1930 Carl F. Eyring deshalb vor, Sabines Formel wie folgt zu modifizieren.

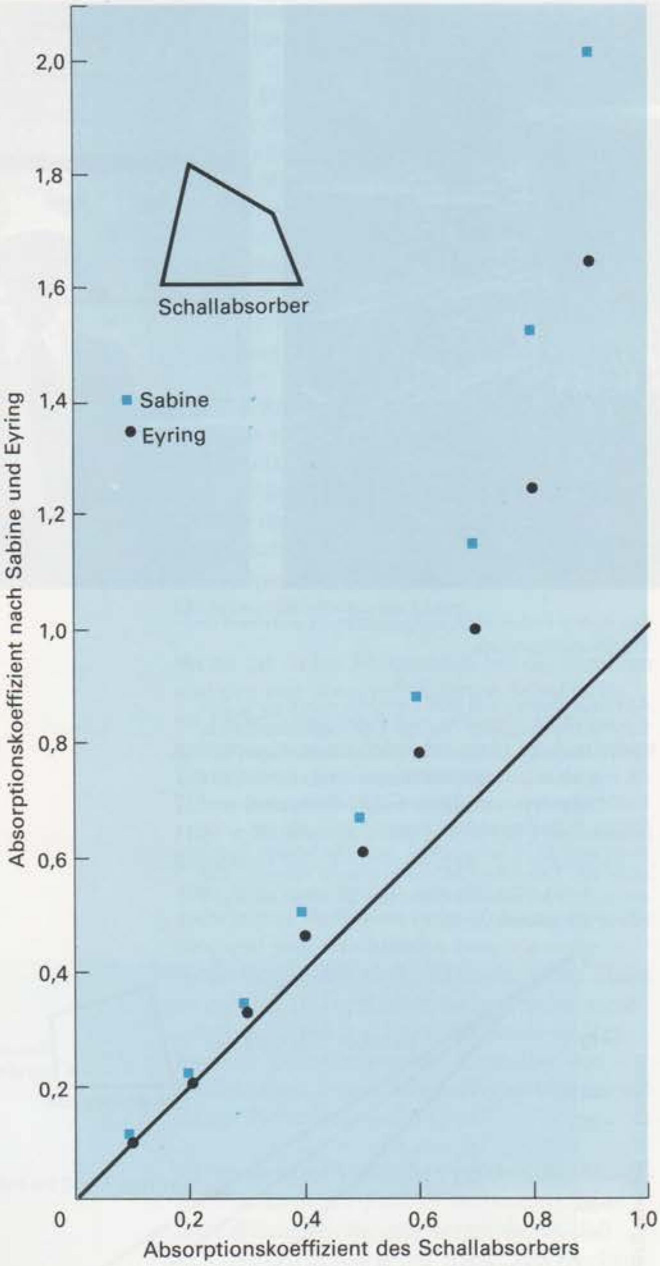
$$T = -13{,}8\,(L/v)/\ln(1-a)$$

Diese Formel wurde über ein halbes Jahrhundert benutzt, wenngleich in den sechziger Jahren erneut Zweifel aufkamen, nachdem man Konzertsäle mit elektronischen Geräten genau ausmessen konnte.

Was war zu tun? Eine Lösungsmöglichkeit bestand darin, die Wege der reflektierten Schallwellen in einem geschlossenen Raum mit dem Computer zu simulieren. Trifft eine

Abklingkurven nach den Formeln von Eyring und Sabine im Vergleich mit der Computersimulation für Vielfachreflexionen bei einem viereckigen Grundriß mit einer schallschluckenden Wand ($a = 0{,}8$). Die Nachhallzeiten nach Sabine (0,63 Sekunden) und Eyring (0,56 Sekunden) liegen höher als der Computerwert (0,38 Sekunden), weil die beiden Formeln nicht der Tatsache Rechnung tragen können, daß der Schall im wesentlichen nur an einer einzigen Wand absorbiert wird.





Welle auf stark schallschluckendes Material, so wird sie mit entsprechend hohen Verlusten reflektiert; bei Reflexionen an Holz oder anderen harten Oberflächen geht dagegen weniger Energie verloren. Mit dieser Methode bestimmte Schroeder die Nachhallzeiten für unregelmäßig geformte zweidimensionale Modelle, deren „Wände" den Schall mehr oder weniger stark absorbierten. Seine Ergebnisse, die er 1970 veröffentlichte, sind in der Abbildung auf der vorigen Seite mit den Kurven verglichen, die sich aus den Formeln von Sabine und Eyring ergeben. Für einen viereckigen Grundriß mit nur einer stark absorbierenden Wand ($a = 0{,}8$) sind die Energiepegel in Dezibel über der Zeit aufgetragen. Aus dem Verlauf der Schroederschen Kurve ergibt sich eine Nachhallzeit von 0,38 Sekunden, das entspricht nur 60 beziehungsweise 70 Prozent der Nachhallzeiten nach Sabines und Eyrings Formeln.

Diese Ergebnisse spielen nicht nur beim Entwurf von Konzertsälen eine Rolle, sondern sind auch beim Messen von Absorptionskoeffizienten schallschluckender Materialien wichtig. Das illustriert die Abbildung links auf dieser Seite.

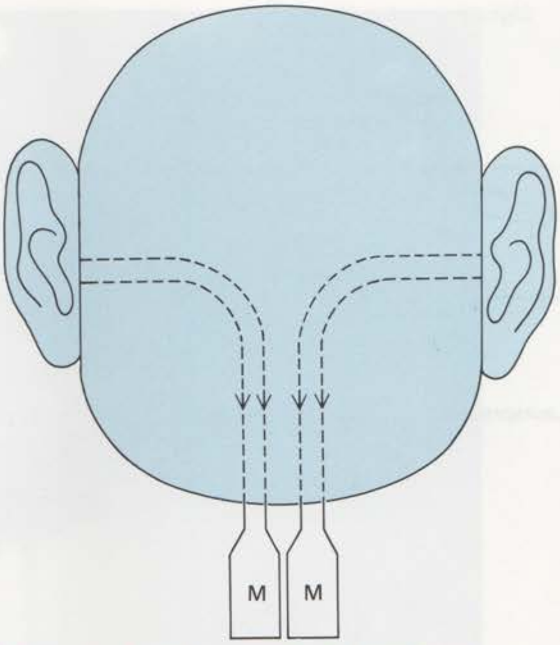
Bei gegebenem Grundriß hängt die Nachhallzeit natürlich davon ab, wieviel schallschluckendes Material vorhanden ist und über welche Flächen es sich verteilt. Wir können nun messen, wie rasch der Schall abklingt, und das Ergebnis benutzen, um anhand der Formeln für die Nachhallzeit den Absorptionskoeffizienten des schallschluckenden Materials zu bestimmen. Die Formeln von Sabine und Eyring ergeben dann allerdings teilweise deutlich höhere Werte als die Computerrechnung für Vielfachreflexion.

Aus der Nachhallzeit kann man den Absorptionskoeffizienten von schallschluckendem Material auf einer Wand berechnen. Hier sind diese theoretischen Absorptionskoeffizienten über den tatsächlich beobachteten aufgetragen, um die Genauigkeit der Formeln von Sabine und Eyring sichtbar zu machen. Korrekt sind die Werte bei der durchgezogenen Geraden. Die Absorptionskoeffizienten nach Sabine (farbige Quadrate) und Eyring (schwarze Kreise) werden bei wachsender Absorption recht ungenau.

Tatsächlich sagen sie manchmal sogar Absorptionskoeffizienten über 100 Prozent voraus, was per Definition ausgeschlossen sein müßte. Wenn man den Computerwerten trauen kann, liefern die Formeln von Sabine und Eyring grundsätzlich überhöhte Absorptionskoeffizienten.

Neuerdings gibt es eine neue Theorie der Nachhallzeit. Man kennt zwar schon seit Jahren eine unhandliche Integralgleichung•, die den Nachhall exakt beschreibt, aber sie ist praktisch unlösbar – trotz leistungsfähiger Näherungsverfahren per Computer E. N. Gilbert von den Bell-Laboratorien konnte nun zeigen, daß man mit einem iterativen•• Verfahren eine Lösung finden kann, wenn man eine zweite, ebenfalls exakte Integralgleichung einbezieht. Damit bekommt man für nicht zu komplizierte Grundrißformen ziemlich genaue Ergebnisse.

So wichtig solche Messungen und Berechnungen von physikalischen Größen auch sind, sie geben allein noch keine Antwort auf die Frage, wie gut ein Orchester in einem bestimmten Konzertsaal klingt. Das ist durch einfaches Zuhören schwer zu beurteilen, denn man muß dann die einzelnen Orchester in verschiedenen Sälen vergleichen. Auch der Zeitpunkt spielt eine Rolle – ein Orchester ist nicht immer gleich gut, und auch beim gutwilligsten Zuhörer wechseln die Stimmungen. Für eine verläßlichere Bewertung müßten die verschiedenen Konzertsäle ohne größeren Zeitverzug zum Hörer gebracht werden. In gewissem Sinne hat man das tatsächlich geschafft.

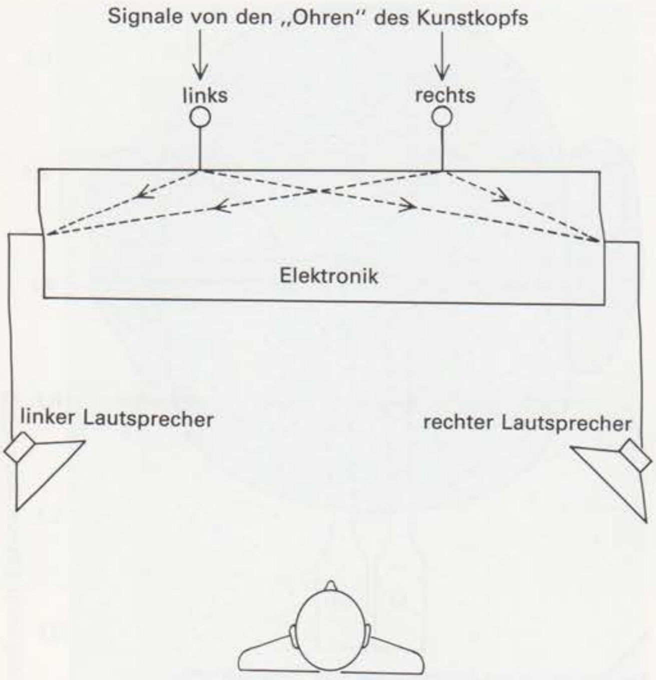


Ein Kunstkopf mit Ohrmuscheln und Gehörgängen, in denen zwei Mikrofone (M) die Druckschwankungen der Schallwelle registrieren (in elektrische Signale umwandeln). Mit Stereoaufnahmen, bei denen der Kunstkopf an verschiedenen Sitzplätzen eines Konzertsaals aufgestellt wird, läßt sich mit dieser Anordnung eine weitgehend authentische Klangwiedergabe erreichen.

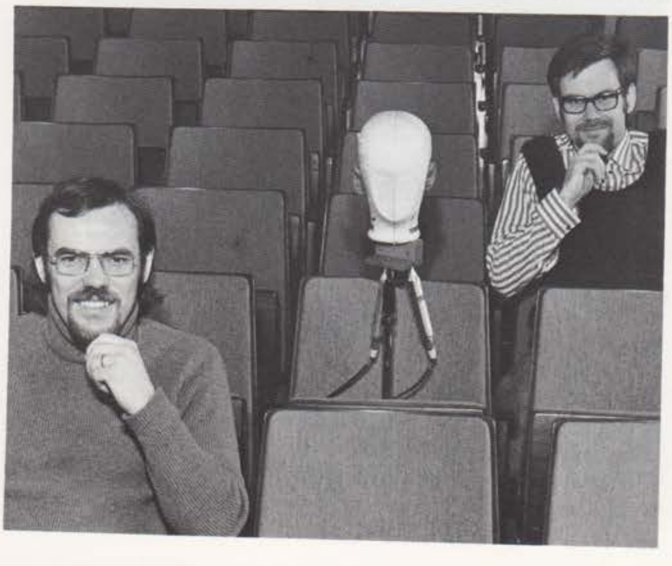
Dabei macht man sich einen Effekt zunutze, den Manfred Schroeder und Bishnu Atal 1967 mit zwei Lautsprechern demonstrierten. Sie konnten damit eine Schallquelle simulieren, die für den Hörer nicht zwischen den Lautsprechern zu liegen schien, sondern links oder rechts von beiden. Zwei Jahre später zeigten P Damaske und V Mellert, daß sich dieser Effekt für ein „perfektes“ Stereosystem ausnutzen ließ Sie machten Tonaufnahmen mit einem Kunstkopf, bei dem Ohrmuscheln und Gehörgänge nachgebildet waren, um mit den beiden Mikrofonen Schallwellen zu registrieren, wie sie im Ohr entstehen. Die Mikrofonsignale wurden elektronisch gefiltert und gemischt auf zwei Lautsprecher in einem schalltoten Raum gegeben. Bei der Wiedergabe registrierten die Mikrofone eines Kunstkopfes genau denselben Schalldruckverlauf wie bei der Originalaufnahme.

• Integralgleichungen sind Beziehungen zwischen Integralen von Variablen, beim Integrieren werden Veränderungen einer Funktion sozusagen in „unendlich kleinen“ Schritten aufsummiert.

•• Wenn man eine Größe nur so als Funktion anderer Größen ausdrücken kann, daß sie auch von sich selbst abhängt, kann man die Funktionsgleichung oft dadurch lösen, daß man immer wieder genäherte Funktionswerte für die gesuchte Größe einsetzt. Dieses Verfahren heißt Iteration.



Wiedergabe von Kunstkopfaufnahmen. Mit zwei Lautsprechern kann man beim Zuhörer (oder Kunstkopf) in einem schalltoten Raum wieder die gleichen Druckschwankungen in den Gehörgängen beider Ohren hervorrufen, wie sie bei der Aufnahme vorhanden waren. Dazu muß man die elektrischen Signale der beiden Mikrofone des Kunstkopfes mit einer speziellen Elektronik mischen und aufbereiten, und zwar passend zu den Tonfrequenzen.



Ein Kunstkopf zwischen D. Gottlob (links) und K. F. Siebrasse (rechts).

Mit dieser Technik kann man Zweikanal-Aufnahmen in verschiedenen Konzertsälen machen. Bei der Wiedergabe in einem schalltoten Raum hört man dann genau das, was der Kunstkopf im Konzertsaal „gehört" hat. Da sich die Aufnahmen beliebig umschalten lassen, kann man sich jederzeit in andere Konzertsäle hineinversetzen.

Schroeder hat zusammen mit D. Gottlob und K. F Siebrasse mehr als 20 europäische Konzertsäle untersucht. Dazu benutzten sie eine Vielkanal-Bandaufnahme von Mozarts *Jupitersinfonie*, gespielt vom Rundfunkorchester der BBC in einem schalltoten Raum. Sie wurde über mehrere Lautsprecher auf den Podien zahlreicher Konzertsäle übertragen und gleichzeitig über Kunstkopf zweikanalig aufgenommen. Das Ganze wurde für verschiedene Sitzplätze wiederholt. Mit diesen Aufnahmen ließ sich in einem schalltoten Raum recht genau der Klangeindruck im jeweiligen Konzertsaal wiedergeben. Schroeder berichtet dazu. „Ich werde den Augenblick nie vergessen, als ich im bequemen Sessel unseres schalltoten Raums in Göttingen saß und mich auf Knopfdruck aus Wiens berühmtem Musikvereinssaal in die Berliner Philharmonie versetzte. Die unterschiedliche Akustik, die man schon immer als gegeben angesehen hatte, war unbeschreiblich gegenwärtig."

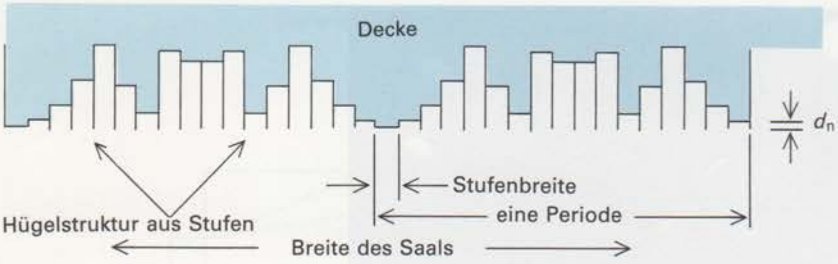
Schroeder und seine Mitarbeiter befragten zahlreiche Hörer, wie der Klang einzelner Säle auf sie wirkt, wobei natürlich auch die jeweiligen Sitzplätze berücksichtigt wurden. Dabei stellten sie fest, was dem durchschnittlichen Hörer am besten gefällt:

Er mag lange Nachhallzeiten (aber unterhalb von etwa 2,2 Sekunden).

Er wünscht sich, daß beide Ohren verschiedene Klänge hören. Je mehr sich die Signale angleichen, desto weniger gefällt der Gesamtklang.

Schmale Säle werden breiten vorgezogen. Das könnte daran liegen, daß unterschiedliche Klänge an beiden Ohren wünschenswert

Blick in den Konzertsaal des IRCAM, den Manfred Schroeder und Victor Peutz entworfen haben.



Eine stufige Decke könnte den einfallenden Schall bei allen Frequenzen innerhalb eines breiten Bereichs nahezu gleich gut und fast verlustfrei streuen – das ergibt sich aus mathematischen Analysen und Computer-Entwürfen wie dem hier gezeigten. So oder ähnlich werden vielleicht in Zukunft Decken und Wände von Konzertsälen aussehen, in denen sich der Schall gut nach allen Seiten ausbreitet und jeder Zuhörer einen angenehmen Klangeindruck bekommt, weil die Schallwellen ja in beiden Ohren immer etwas verschieden sind.

erscheinen. In einem breiten Saal hört man Schallwellen, die von der Decke reflektiert werden, bevor die Reflexionen von den Seitenwänden ankommen. Beim schmalen Saal sind umgekehrt die Wellen von rechts und links schneller, und die sind im allgemeinen verschieden.

Ein guter Konzertsaal muß also eine hinreichend lange Nachhallzeit aufweisen und die Töne so durchmischen, daß an beiden Ohren verschiedene Klänge ankommen. Eine solche Durchmischung begünstigt auch die Schallausbreitung im Saal, was wichtig ist, um für alle Plätze einen guten Klangeindruck zu erreichen.

Neuerdings beschäftigen sich auch einige Mathematiker damit, akustisch günstige Wand- und Deckenstrukturen zu entwerfen, da werden Hügel und Stufen in Decken erwogen, um Schallwellen diffus in alle möglichen Richtungen zu streuen – und nicht wie Licht an einem ebenen Spiegel. Ein Beispiel dafür ist eine Deckenstruktur mit langen, schmalen Stufen – ein Produkt der Zahlentheorie. Wir brauchen uns also nicht zu wundern, wenn wir in einem neuen Konzertsaal rauhe und zerklüftete oder auch pockennarbige Decken und Wände vorfinden.

Schon heute gibt es „abstimmbare" Säle, deren Nachhallzeit den verschiedenen musikalischen Anforderungen angepaßt werden kann. So kann man die Louise M. Davies Symphony Hall in San Francisco und den Espace de Projection am IRCAM mit beweglichen schallschluckenden Elementen mechanisch abstimmen. Die Nachhallzeit läßt sich aber auch elektronisch verändern.

Musik kann nur in einem guten Konzertsaal gut klingen. Der Saal darf keine Störgeräusche entstehen oder eindringen lassen, und an allen Plätzen sollte man annähernd gleich gut hören, keine Frequenzkomponente darf besonders stark verschluckt werden, und die Nachhallzeit muß lang genug sein. Je nach Art der Musik empfehlen sich verschiedene Nachhallzeiten, im Theater muß der Nachhall sogar gering bleiben, damit man die Schauspieler versteht. Weil ungleiche Klänge bei beiden Ohren besonders angenehm wirken, muß dafür gesorgt werden, daß sich die Schallwellen gut durchmischen. Vielleicht gibt es sonst noch einiges zu beachten – und erst einmal zu entdecken. Die Raumakustiker experimentieren und lernen weiter.

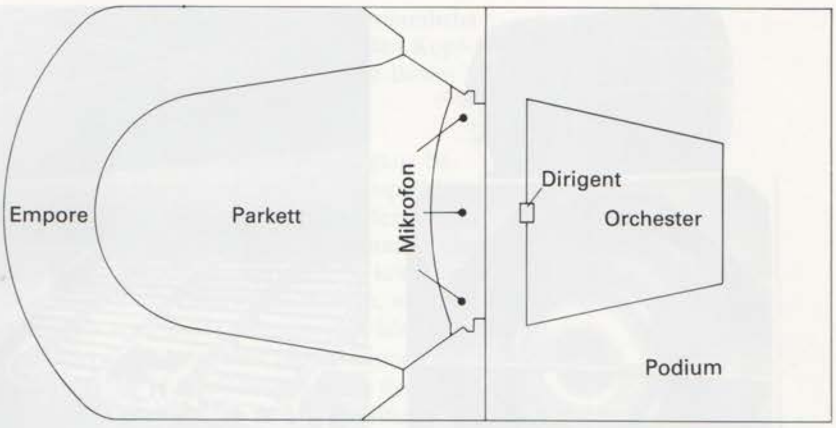
Aufzeichnung und Wiedergabe

Musik hören wir heute überwiegend aus der „elektronischen Konserve" Unterhaltungsmusik verkauft sich traditionell am besten, aber auch die sogenannte „ernste" Musik zieht mit. Um Orchester zu hören, mußte man früher in den Konzertsaal gehen. Heute spielt sich das Musikleben nur noch zum Teil dort ab. Konzertsäle sind teuer und lassen sich nicht beliebig für einen wachsenden Andrang von Zuhörern erweitern. Es ist schwer oder nahezu unmöglich, sehr große Säle mit guter Akustik zu bauen, einige behaupten, 1500 Sitzplätze seien ideal. Säle dieser Größe sind angesichts der Baukosten und der laufenden Ausgaben für Musiker und technisches Personal aber zumeist unrentabel. Ein Sinfonieorchester kann nur mit Zuschüssen der öffentlichen Hand existieren, egal, wie groß Konzertsaal und Zuschauerzahl sind. Selbst wenn Einnahmen aus Platten-, Fernseh- oder Filmaufnahmen hinzukommen, lassen sich die Kosten in der Regel nicht mehr hereinspielen. Trotz alldem wird heute mehr und vielfältigere Musik gehört als je zuvor.

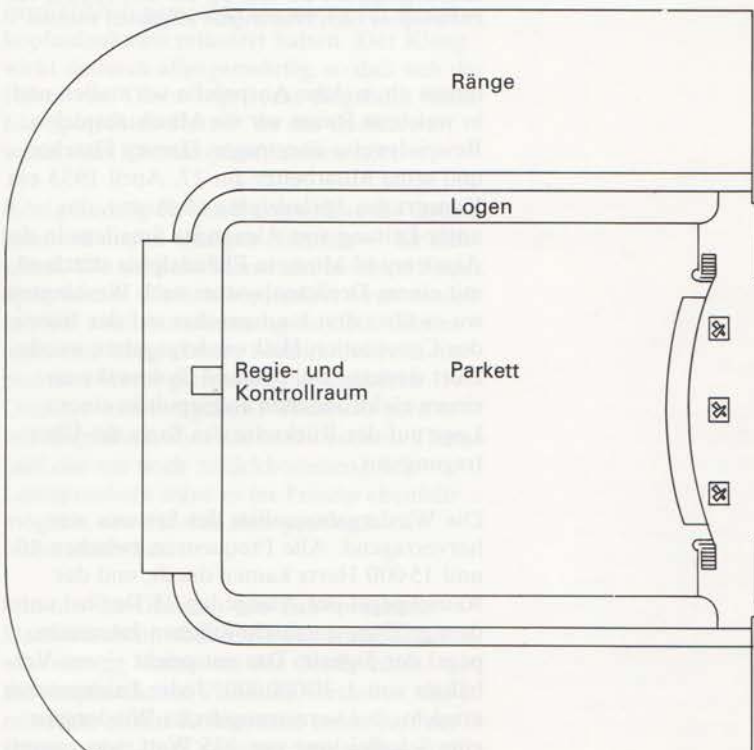
Manche Menschen legen keinen großen Wert darauf, wie gut die Wiedergabe bei Musikkonserven ist. Auch im Taschenradio kann man ein Sinfonieorchester am Klang erkennen und mühelos zuhören. Ich selbst störe mich bei vertrauten Stücken nicht unbedingt an einer bescheidenen Wiedergabequalität, solange die nicht-linearen Verzerrungen erträglich bleiben.

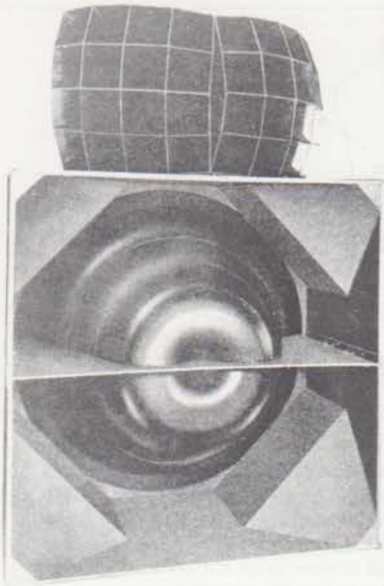
Eine schlechte Wiedergabe macht es allerdings sehr schwer, ungewohnte Musik zu verstehen und zu genießen. Das gilt ganz besonders für Computermusik. Wenn es zum Beispiel darauf ankommt, auch sehr tiefe Baßtöne noch gut zu hören oder räumliche Effekte wie eine scheinbar umherschwebende „Phantomschallquelle" mitzubekommen, kommt die Komposition nur auf einer guten Stereoanlage richtig zur Geltung.

Wie sieht es aber bei Orchestermusik aus? Ist es technisch möglich, sie originalgetreu zu reproduzieren, wenn man nur genügend Aufwand treibt? Die Antwort hängt natürlich



Am 27 April 1933 übertrugen Harvey Fletcher und seine Mitarbeiter ein Sinfoniekonzert aus der Academy of Music in Philadelphia (oben) in die Constitution Hall in Washington (unten). Das Orchester wurde mit drei Mikrofonen zwischen Publikum und Dirigent aufgenommen und die Aufnahme auf der Bühne der Constitution Hall über drei Lautsprecher wiedergegeben. Leopold Stokowsky saß in einer Loge auf der Rückseite des Saals und regelte von dort aus die Lautstärke bei der Wiedergabe.





Lautsprecher, wie sie 1933 bei der Übertragung von Philadelphia nach Washington eingesetzt wurden.

Constitution Hall in Washington.

davon ab, welche Ansprüche wir stellen und in welchem Raum wir die Musik abspielen. Beispielsweise übertrugen Harvey Fletcher und seine Mitarbeiter am 27 April 1933 ein Konzert des *Philadelphia Orchestra*, das unter Leitung von Alexander Smallens in der Academy of Music in Philadelphia stattfand, mit einem Dreikanalsystem nach Washington, wo es über drei Lautsprecher auf der Bühne der Constitution Hall wiedergegeben wurde. Dort steuerte Dr. Leopold Stokowsky an einem elektronischen Regiepult in einer Loge auf der Rückseite des Saals die Übertragung aus.

Die Wiedergabequalität des Systems war hervorragend. Alle Frequenzen zwischen 40 und 15000 Hertz kamen durch, und der Rauschpegel der Anlage lag 75 Dezibel unter dem größten durchschnittlichen Intensitätspegel der Signale. Das entspricht einem Verhältnis von 1 30000000! Jeder Lautsprecher erreichte bei verzerrungsfreier Wiedergabe eine Schalleistung von 135 Watt, was zusammen also 405 Watt ergab. Für die tiefen Frequenzen zwischen 40 bis etwa 300 Hertz war jeweils ein gefalteter Hornlautsprecher vorgesehen, dessen Trichteröffnung einen quadratischen Querschnitt mit einer Seitenlänge von etwa 1,50 Metern hatte. Die höheren Frequenzen wurden von kleineren Hornlautsprechern übertragen, die wabenförmig angeordnet waren.

Die Anlage erreichte eine ungleich höhere Leistung als ein großes Orchester, das höchstens auf etwa 70 Watt kommt. Man hat mir erzählt, Stokowsky habe die Lautstärke immer weiter erhöht, so daß man eine Überlastung der Anlage – und Zuhörer – fürchtete und den regulierbaren Lautstärkeumfang schließlich begrenzte. Was immer an dieser Geschichte wahr sein mag, nach allen Berichten war die Wiedergabe in der Constitution Hall hervorragend. Die Richtungen, aus der die Zuhörer einzelne Instrumente hörten, wichen sicherlich von dem ab, was sie vom wirklichen Orchester in Philadelphia gehört hätten. Aber auf den meisten Plätzen eines großen Saals sitzt man ohnehin so weit von der Bühne entfernt, daß man nur noch diffus zwischen links, Mitte oder rechts unterscheiden kann, meist sind die Zuhörer vom Nachhall der Wände und Decke eingehüllt, so daß bei der Wiedergabe über drei Lautsprecher in einem Saal mit passender Akustik wohl nichts Entscheidendes verloren geht.

Auch Schroeder konnte bei seinen Experimenten mit Mehrspuraufnahmen von einem Orchester einen bemerkenswert originalgetreuen Klangeindruck erreichen, wenn sie über Lautsprecher auf dem Podium eines Konzertsaals abgespielt wurden. Bei Aufnahmen, die Schroeder in einem schalltoten Raum gemacht hat, müßte die Wiedergabe besser sein als bei Fletchers Übertragung, denn der Nachhall aus dem Konzertsaal wurde ja ebenfalls aufgenommen.

Der Klang eines Orchesters läßt sich in einem großen Saal zwar ziemlich originalgetreu wiedergeben, aber entsprechende Anlagen sind kaum gefragt – auch wenn Walt Disneys Spektakel *Fantasia* von 1940 einige Male imitiert wurde. Ursprünglich trafen sich in *Fantasia* die Vorstellungen von Disney, die zum Teil abstrakt waren, mit Zielen von Stokowsky und dem *Philadelphia Orchestra*; bei der Erstaufführung kamen die Klänge nicht nur von Lautsprechern auf der Bühne, sondern für besondere Effekte auch von den Seiten.

Nun denkt man meist weniger über die Wiedergabe von Musik in Konzertsälen nach, sondern wir möchten Sänger, Instrumentalisten oder ganze Orchester auch zu Hause möglichst originalgetreu hören. Wie sich das im Prinzip erreichen läßt, haben wir anhand von Stereoaufnahmen mit dem Kunstkopf bereits gesehen. Dabei muß man freilich drei Einschränkungen machen.

1. Die Wiedergabe ist *nur* in schalltoten Räumen originalgetreu, bei jedem gewöhnlichen Zimmer kommt dessen eigener Nachhall jeweils noch zum Nachhall des Aufnahmeraums hinzu. Das muß sich nicht unbedingt nachteilig auswirken, denn durch den Haas-Effekt hören wir die Richtungen der Klänge nahezu genauso, wie sie bei der Aufnahme waren.

2. Unangenehm ist auch, daß der räumliche Effekt nur bei einer gleichbleibenden Kopfhaltung zustande kommt – was die Bewegungsfreiheit einschränkt.

3. Schließlich muß man in einem ganz bestimmten Abstand vor beiden Lautsprechern sitzen, wobei beide gleich weit entfernt sein müssen. Ansonsten scheint der gesamte Schall aus dem näheren Lautsprecher zu kommen. Auch wenn man sich etwas bewegt, aber trotzdem noch *beide* Lautsprecher hört, verändern sich scheinbar die Positionen der „kompakten" Einzelschallquellen, sie verschwimmen schließlich zu einem diffusen Klangeindruck.

Bei allen Einschränkungen läßt sich die Zweispurwiedergabe doch erheblich verbessern, etwa indem man die Signale beider Kanäle frequenzabhängig mischt. Das wird bei einigen kommerziellen Hi-Fi-Anlagen ganz ähnlich gemacht, wie wir es für Kunstkopfaufnahmen erläutert hatten. Der Klang wirkt dadurch allgegenwärtig, so daß sich der Hörer von Tönen regelrecht eingehüllt fühlt. Ein „perfektes Stereo" ist das freilich nur, wenn man Kunstkopfaufnahmen hört.

König Ludwig II. von Bayern hatte ein Opernhaus mit einem einzigen Sitzplatz – für sich selbst. Die meisten Menschen möchten Musik nicht immer allein hören, selbst wenn es sich nur um eine Aufzeichnung handelt. Gibt es auch eine Möglichkeit, Musikkonserven für mehrere Hörer gleichzeitig in derselben Qualität wiederzugeben? Vielleicht geht es mit Kopfhörer, aber das ist ein anderes Thema (auf das wir noch zurückkommen). Mit Lautsprechern wäre es im Prinzip ebenfalls möglich, erweist sich aber praktisch als undurchführbar.

Um uns die Grenzen von Lautsprechern klarzumachen, wollen wir uns einen abgeschlossenen Raum von der Größe eines durchschnittlichen Zimmers vorstellen, der mitten in einem Konzertsaal steht. Auf der Bühne spielt ein Orchester; wir selbst sitzen in diesem völlig schalldichten Raum und hören nichts. Wenn wir nun ein Loch in eine

Wand bohren, hören wir Musik daraus kommen, ähnlich wie aus einem einzelnen Lautsprecher.

Mit einem zweiten Loch in der Wand erreichen wir Verhältnisse wie bei einer gewöhnlichen Stereoanlage. Sofern wir von beiden Löchern gleich weit entfernt sind, klingt es wie gutes Stereo. Allerdings entsteht nie der Eindruck, daß die Schallquelle links oder rechts von beiden Löchern steht, wie wir es beim perfekten Stereosystem mit den aufbereiteten Signalen vom Kunstkopf beschrieben hatten. Ebensowenig scheinen Töne von Quellen oberhalb oder unterhalb der beiden Löcher zu kommen.

Wenn in jeder Wand dieses schallisolierten Raums ein Loch ist, hören wir Töne aus allen Richtungen – allerdings nur, solange wir von allen Löchern gleich weit entfernt sind, denn sonst dominiert der Schall aus dem nächstgelegenen Loch, so daß der räumliche Klangeindruck verschwindet und wir die Richtung der Töne nicht mehr feststellen können.

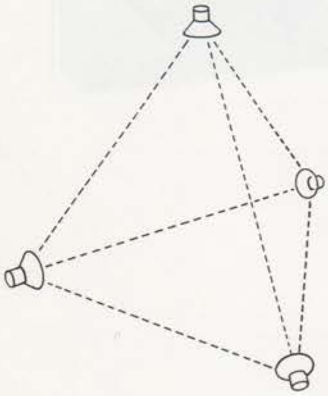
Wir müssen sehr viele Löcher in Wände und Decke des Raums bohren, um in seinem Innern fast ebensogut zu hören, als wenn er gar nicht da wäre. Entsprechend wären viele Lautsprecher an Decke und Wänden eines Zimmers notwendig, um einen originalgetreuen Klangeindruck wenigstens näherungsweise zu erreichen. Jeder davon müßte mit einem eigenen Mikrofon gekoppelt sein, das an der (richtungsmäßig) entsprechenden Stelle draußen im Konzertsaal steht, und das Mikrofonsignal passend verstärken. Ein derartiges Vielkanalsystem wäre natürlich viel zu teuer und unhandlich, um es privat zu nutzen.

Welche Erwartungen lassen sich mit einer Stereoanlage erfüllen? Mit nur zwei Spuren wird man wohl immer nur an einer bestimmten Stelle eines Raums annähernd den gleichen Klangeindruck wie im Konzertsaal gewinnen, wobei auch Kunstkopfaufnahmen vom Nachhall dieses Raums nie befreit werden können.

Als Alternative wurde die Quadrophonie entwickelt – wobei Zweifel erlaubt sind, ob sie so viel besser ist als die Stereophonie. Bei diesen Vierkanalsystemen wird erst gar nicht der Versuch gemacht, den Schalldruck in beiden Ohren des Hörers möglichst genau zu reproduzieren. Was sie exakt wiedergeben können, sind allenfalls Schalldruck und Schallschnelle an einem bestimmten Punkt des Aufnahmestudios. Was unter *Schallschnelle* zu verstehen ist, wird klar, wenn wir uns daran erinnern, daß eine Schallwelle ja nichts anderes ist als der periodische Wechsel zwischen einem Zusammenziehen und Ausdehnen von Luft, deren Moleküle sich hin und her bewegen. Die Geschwindigkeit, mit der sie das tun, heißt Schallschnelle.

Die Veränderungen, die eine beliebige Schallwelle – egal, wie kompliziert sie ist – an irgendeinem Punkt im Luftvolumen hervorruft, lassen sich mit vier Meßgrößen beschreiben. dem schwankenden Luftdruck (Schalldruck) und den drei Komponenten der Schallschnelle, die den drei Raumrichtungen auf–ab, vor–zurück und links–rechts entsprechen. Einige Mikrofone sprechen nur auf den Schalldruck an, andere sind dagegen nur für eine Komponente der Schallschnelle empfindlich.

Im Prinzip könnten wir den Schalldruck und die Komponenten der Schallschnelle bei beliebigen Klängen für irgendeinen Punkt des Aufnahmestudios messen, mit einer Vierspuranlage aufzeichnen und bei uns zu Hause ziemlich genau reproduzieren. Dazu brauchen wir vier Lautsprecher, die am besten an den vier Ecken eines Tetraeders stehen, der Zuhörer sollte genau in der Mitte dieses Tetraeders sitzen. Jeder Lautsprecher erzeugt eine Schallwelle, deren Schalldruck und Schallschnelle durch die Schwingungen der Lautsprechermembran festgelegt sind – die Bewegungsrichtung der Membran entspricht der Richtung der Schallschnelle. Mit den „richtigen“ Signalen an den Lautsprechern kann man daher im Zentrum des Tetraeders jeden gewünschten Schalldruck und jede beliebige Schallschnelle erreichen, und zwar für alle Richtungen.



Mit vier tetraedrisch angeordneten Lautsprechern lassen sich Schalldruck und Schallschnelle für einen Punkt des Aufnahmestudios originalgetreu reproduzieren, sofern der Wiedergaberaum schalltot ist. Bei der Aufnahme braucht man drei Mikrofone für die drei Komponenten der Schallschnelle (auf und ab, vor und zurück, links und rechts), und ein viertes mißt den Schalldruck. Jeder Lautsprecher wird dann mit einer anderen „Mischung“ – genauer: Linearkombination – der vier Mikrofonsignale angesteuert; im Mittelpunkt des Lautsprecher-Tetraeders herrschen daher die gleichen Bedingungen wie im interessierenden Punkt des Aufnahmestudios.

Die Signale der Mikrofone werden elektronisch gemischt, so daß jeder Lautsprecher mit einer *Linearkombination*• aus den ursprünglichen Signalen des Schalldrucks und der drei Schnellekomponenten „gefüttert" wird. Im Zentrum des Tetraeders überlagern sich diese vier Komponenten praktisch wieder genauso wie am „Aufnahmepunkt" des Studios. Wenn sich der Kopf eben dort befindet – und nicht zu groß ist – sollte man praktisch dasselbe hören wie im Studio.

Eine tetraedrische Anordnung der Lautsprecher ermöglicht sozusagen räumliches Hören. Man kann feststellen, ob der Klang von rechts, links, hinten, vorn, oben oder unten kommt. Mit den üblichen einfachen Quadrophonieanlagen bleibt der Eindruck zweidimensional, weil die Lautsprecher in einer Ebene an den Ecken eines Quadrats angeordnet sind. Von den ursprünglich vier Signalen fällt dadurch die senkrechte Komponente der Schallschnelle weg, so daß in diesem System nur drei Kanäle wirklich gebraucht werden. Für Matrix-Quadrophonie reichen sogar zwei unabhängige Kanäle, aus denen dann (elektronisch) vier gemacht werden. Das funktioniert deshalb, weil die mit vier Mikrofonen aufgenommenen Signale nicht alle völlig unabhängig sind.

Obwohl man für die Quadrophonie vier Kanäle braucht, sind entsprechende Anlagen weiter verbreitet als die perfekte Kunstkopf-Stereophonie. Das mag zum großen Teil daran liegen, daß Quadro zuerst da war, und sicher spielt auch eine Rolle, daß sich die Hi-Fi-Industrie nicht nur nach den neueren Erkenntnissen der Psychoakustik gerichtet hat. Es gibt aber noch einen anderen Grund.

Mit vier Kanälen kann man viele interessante Effekte erzielen. Bei der Wiedergabe mit nur einem Lautsprecher hört man eine Stimme oder ein Instrument immer von dort kommen, wo der Lautsprecher steht – unabhängig von unserer eigenen Position. Mit vier Kanälen kann man *allen* Zuhörern, egal, wo sie in einem Raum jeweils sitzen, gleichermaßen das Gefühl vermitteln, von Klang eingehüllt zu sein – und darauf kommt es den meisten Leuten ja auch an, wie Schroeders Untersuchungen gezeigt haben.

Die Ansprüche an die Klangwiedergabe sind keineswegs einheitlich. Hi-Fi-Puristen wollen zu Hause möglichst das hören, was sie auch im Konzertsaal erlebt hätten – selbst wenn sie dazu eine ganz bestimmte Position einnehmen müssen. Wer Unterhaltungsmusik mag, fragt nicht immer nach einer originalgetreuen Wiedergabe, die hier vielfach auch keineswegs geboten wird.

Unterhaltungsmusik (und nicht nur diese) wird mit Vielspurgeräten aufgenommen, die bis zu 64 Kanäle haben können. Bei kleinen Ensembles stellt man vor jedes Instrument ein eigenes Mikrofon hin – mit Ausnahme der elektrischen Gitarren oder Orgeln, die ja direkt angeschlossen werden können. Gesangsstimmen werden meist mit einer eigenen Spur aufgezeichnet; der Sänger bekommt seine Instrumentalbegleitung dann während der Aufnahme über Kopfhörer zugespielt.

Zum Schluß müssen die vielen Tonspuren gemischt und auf zwei oder vier Kanäle reduziert werden. Das ist eine ziemlich komplizierte Aufgabe, für die man ein Mischpult braucht. Hier wird jede Spur zunächst einzeln aufbereitet, bevor man sie mit anderen kombiniert. Die Signale laufen über einen Lautstärkeregler, eine Verzögerungsschaltung (um den Abstand zum Mikrofon auszugleichen) und Netzwerke, mit denen die Frequenzbandbreite oder die Klangfarbe gesteuert werden kann. Vibrato und Tremolo lassen sich nachträglich hinzufügen, für besondere Effekte erzeugt man auch nicht-lineare Verzerrungen, hochfrequente Einzelkomponenten mit großer Amplitude oder frequenzmoduliertes Rauschen. Damit die Signalpegel auf einen vernünftigen Bereich beschränkt bleiben, gibt es Limiter und Dynamikpresser. Die Einstellung der Regler wird bei guten Aufnahmen noch während des Probespiels laufend verändert. Ist der Gesamteindruck

•Linearkombination bezeichnet eine Überlagerung gerichteter Größen, die sich komponentenweise aufaddieren.

Musikbox.

schließlich zufriedenstellend, so müssen alle Regler während der letzten Aufnahme in der optimalen zeitlichen Abfolge eingestellt werden, wenn das sehr aufwendig wird, setzt man dazu einen Computer ein.

Der Publikumsgeschmack ändert sich im Laufe der Zeit. Einst waren die Leute ganz versessen auf tiefe Baßtöne, und die Musikbox galt einmal als große Sache. Aber der Wunsch, von Klängen richtig eingehüllt zu werden, scheint relativ zeitlos. Und das gelingt nicht nur mit Stereo- oder besser noch Quadrophonie, auch mit nur einem Kanal kann man sich diese Illusion verschaffen.

L	R	L	R	L	R	L	R

0 Frequenz →

Pseudostereo läßt sich mit einem einzelnen Tonkanal erreichen, wenn man aufeinanderfolgende Frequenzbänder abwechselnd dem linken (L) und rechten (R) Lautsprecher zuordnet. Um den Effekt noch wirkungsvoller zu machen, kann man auch künstlichen Nachhall frequenzabhängig beimischen. Der Klang eines einzelnen Instruments scheint dann den gesamten Raum zu füllen.

Dazu braucht man die verschiedenen Frequenzanteile des einen Kanals nur auf zwei getrennte Lautsprecher zu geben. Der gesamte Frequenzbereich wird in mehrere Bänder unterteilt, die – wie beim Abzählen zu Zweien – abwechselnd dem rechten und linken Lautsprecher zugewiesen werden. Durch diese „Frequenzaufteilung" bekommt man eine Art Raumklang: ein *Pseudostereo*.

Wenn man künstlichen Nachhall hinzumischt, läßt sich der Klangeindruck zusätzlich verbessern. Dazu kann man eine Art Lautsprecher mit einer großen Messingplatte als Membran benutzen, an verschiedenen Stellen der Platte werden deren Schwingungen in ein elektrisches Signal umgesetzt und dem des Originaltons beigemischt. Überträgt man die Signale von der Messingplatte, die an verschiedenen Punkten registriert werden, über mehrere Lautsprecher, so entsteht ein ähnlicher Raumklang wie in einem Konzertsaal, wo die mehrfach reflektierten Schallwellen aus verschiedenen Richtungen an unser Ohr dringen.

Nachhall kann man auch mit Lautsprechern und Mikrofonen in einem *Hallkeller* erzeugen, einem kleinen Raum mit schallharten Wänden. Vielseitiger und flexibler läßt sich dasselbe mit einem Digitalrechner erreichen, indem man einen Tonkanal bei digitalen Aufnahmesystemen in mehrere aufspaltet. Digitale Hallsysteme sind inzwischen im Handel zu bekommen.

Ein einziger Tonkanal ermöglicht allerdings nur einen Raumklang in dem Sinne, daß sich der Hörer von Klang umgeben fühlt, die Richtung einer Schallquelle läßt sich nicht feststellen. Man hat den Eindruck, daß nicht nur ein Orchester, sondern auch ein Klavier oder ein einzelner Sänger uns einhüllt. Dagegen wehren sich die Puristen.

Für sie gibt es einen anderen Weg, etwas zu hören, wie es ist: mit Kopfhörern. Damit kann man den Unterschied zwischen den einkanaligen Monoaufnahmen und Stereo besonders gut beobachten. Eine veraltete Aufnahmetechnik verhindert jedoch auch bei Stereo, daß wir den Eindruck haben, die Klänge kämen von außen – sie scheinen dann im Kopf zu entstehen. Bei Kunstkopfaufnahmen fällt auch dieser Nachteil automatisch weg. Allerdings müssen die Signale mit Frequenzfiltern modifiziert werden, um dem Einfluß der Ohrmuscheln – des Kunstkopfes bei der Aufnahme und des Hörers bei der Wiedergabe – Rechnung zu tragen.

Manchmal kann man auch bei Kunstkopfaufnahmen nicht sagen, ob die Töne von vorne oder von hinten kommen. Vielleicht würde das besser, wenn man sich selbst als „Aufnahmekopf" zur Verfügung stellte und winzige Mikrofone in die eigenen Ohren steckte. Bei der Wiedergabe müßte die Musik über Kopfhörer dann genauso wie im Konzertsaal klingen. Wenn wir das Ganze zusammen mit Bekannten zu Hause nacherleben wollen, müssen alle Kopfhörer tragen und stur in eine Richtung schauen. Dabei ist fraglich, ob jemand Musik, die mit den Ohren eines anderen aufgenommen wurde, noch originalgetreu hören kann. Mit den heute üblichen Stereoaufnahmen können wir das nicht einmal nachprüfen.

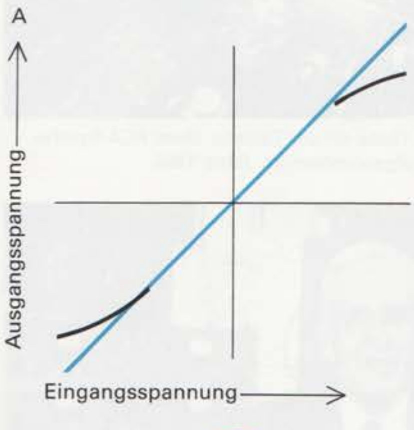
Hi-Fi-Fans behaupten oft, sie hätten ein untrügliches Gehör für Wiedergabemängel, die man nicht einmal mit Meßgeräten entdecken könne. Sie empfinden die nicht-linearen Verzerrungen von schlechten Transistorverstärkern als unangenehm und bevorzugen dann – nicht ganz zu Unrecht – die alten Röhrenverstärker. Auch die sind freilich keineswegs frei von nicht-linearen Verzerrungen, die jedoch anders geartet sind als beim Transistorverstärker.

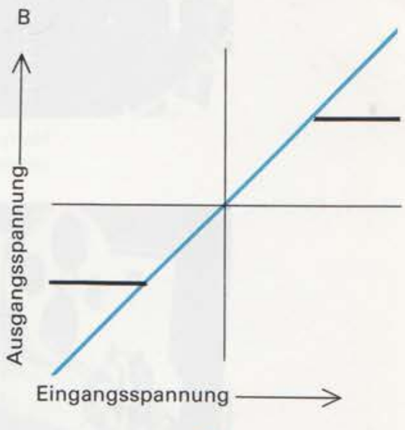
Wie sich „gute" und „schlechte" nicht-lineare Verzerrungen unterscheiden, kann man am Verhältnis zwischen Ausgangs- und Eingangsspannung des Verstärkers sehen. Trägt man beide Spannungen gegeneinander auf, so ergibt sich für einen idealen, verzerrungsfreien Verstärker eine Gerade. „Gut", oder besser· „erträglich", ist die Wiedergabe, wenn die Kurve nur wenig und ganz allmählich von der idealen Geraden abweicht, dagegen ist ein scharfes Abknicken „schlecht" Die „guten" Verzerrungen können manche Klänge sogar verbessern und ein Soloinstrument voller klingen lassen – der Grund, warum man nicht-lineare Verzerrungen bei Studioaufnahmen ganz bewußt am Mischpult erzeugt. Zwar kommt dann auch manchmal eine Wellenform zustande, die so klingt, als würden zwei oder mehr Instrumente verschiedene Töne spielen. Das ist natürlich nicht erstrebenswert, aber auch keine Katastrophe.

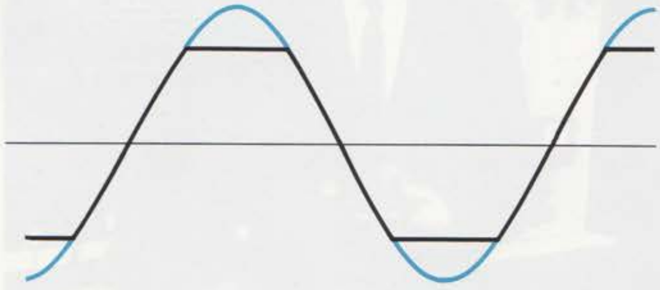
„Schlechte" Verzerrungen sind immer von Nachteil. So wird eine glatte Sinuskurve oben und unten abgeschnitten. Dadurch entsteht eine trapezförmige Welle, die ähnlich hart und verzerrt klingt wie eine Rechteckwelle. Es ist also durchaus vernünftig, einen Röhrenverstärker mit „guten" Verzerrungen gegenüber einem Transistorverstärker mit „schlechten" Verzerrungen vorzuziehen. Manche Leute greifen aber auch wieder zu Vorverstärkern mit Röhren (um die sehr

Kopfhörer. Von Klängen eingehüllt.

„Gute" und „schlechte" nicht-lineare Verzerrungen lassen sich leicht unterscheiden, wenn man die Ausgangsspannung eines Verstärkers über der Eingangsspannung aufträgt und das Ergebnis mit dem idealen geraden Verlauf vergleicht. Sind die Abweichungen gering und die Übergänge fließend (A), so handelt es sich um „gute" oder besser· erträgliche Verzerrungen. Knickt die Kurve abrupt ab (B), so ist auch die Wellenform am Ausgang des Verstärkers stark verzerrt – zum Originalton treten hochfrequente Störsignale hinzu.







So wirken sich „schlechte" nicht-lineare Verzerrungen auf eine Sinuswelle aus. Die Sinuskurve wird oben und unten scharf abgeschnitten und zu einer trapezförmigen Wellenform, die einen unangenehm harten Klangeindruck hervorruft.

Harry F. Olson an der Tastatur eines RCA-Synthesizers, aufgenommen im Jahre 1955.

Harvey Fletcher

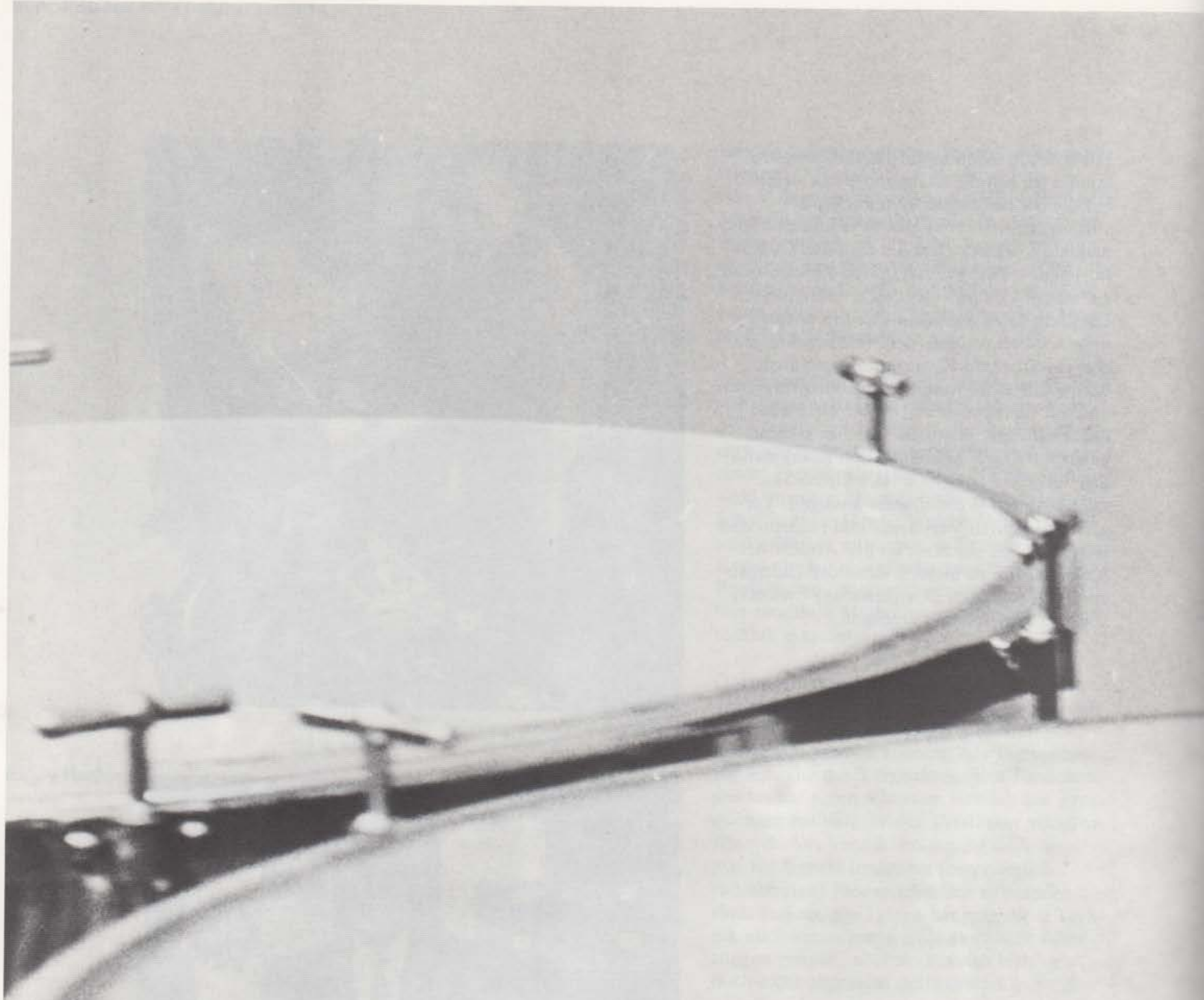
kleinen Signalpegel eines Mikrofons zu verstärken). Ich glaube, sie lassen sich dabei von Messungen irritieren, die Hi-Fi-Firmen durchführen und verbreiten. Sie sagen nicht immer auch etwas darüber, was wir mit unseren eigenen Ohren hören können. Das heißt aber nicht, daß man Messungen überhaupt ablehnen sollte – im Gegenteil. Man muß bessere machen.

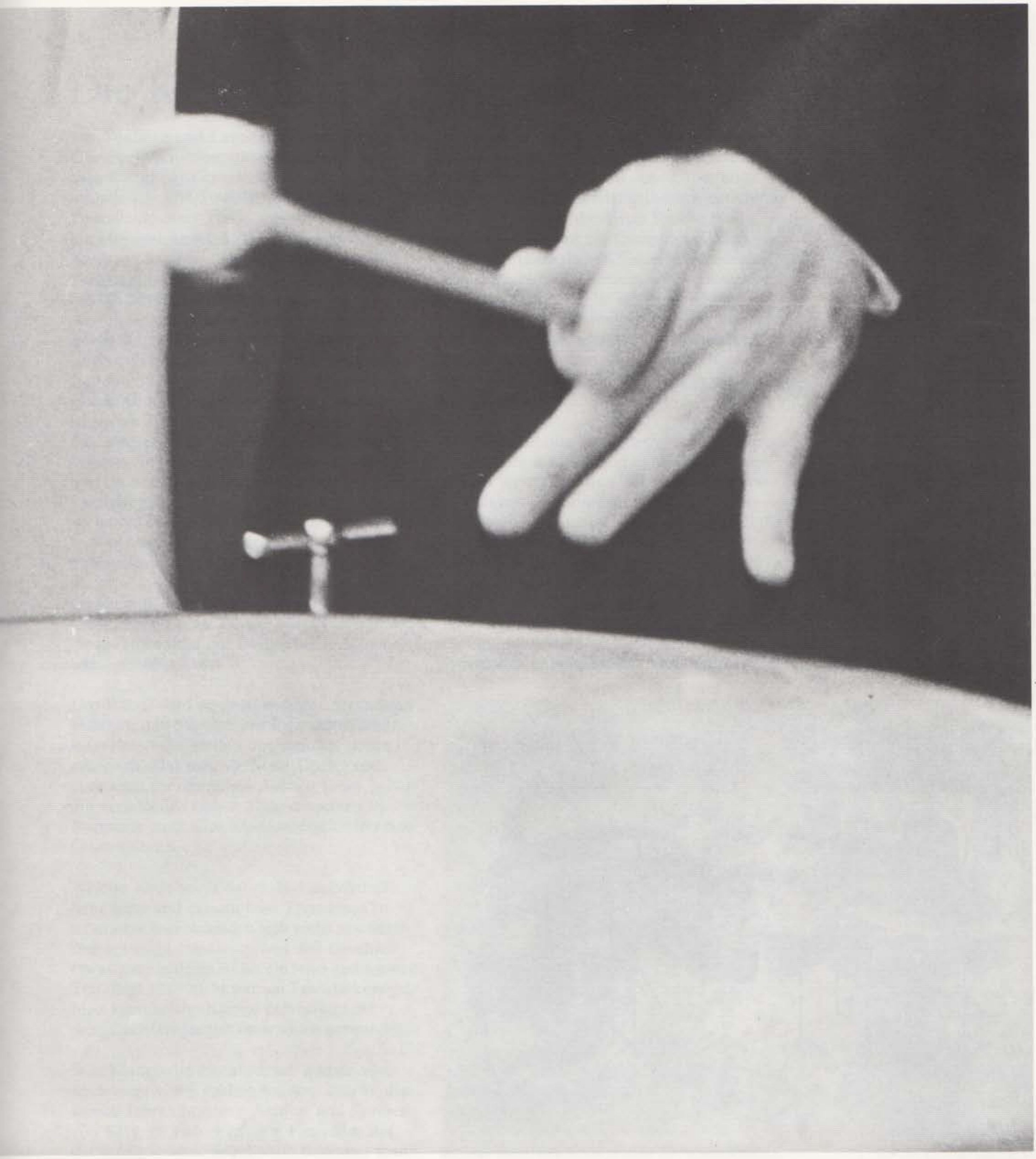
So manches unerwünschte Störsignal wird von einem stärkeren Signal maskiert, wenn die Frequenzen nahe genug beisammenliegen, aber schon die geringste Störung fällt in einem Frequenzbereich ohne Nutzsignal sehr wohl unangenehm auf – wie ein schwarzes Schaf in einer Herde. Welche Verzerrungen im Verstärker entstehen, mißt man in der Regel nur bei einem oder zwei Sinustönen. Realistischer, aber auch schwieriger wäre es, hier bewährte Methoden aus der Telefontechnik einzusetzen.

Dort prüft man Breitbandverstärker, die in Trägerfrequenzsystemen dazu beitragen, daß sehr viele Telefongespräche gleichzeitig übertragen werden können. Als Testsignal am Eingang des Verstärkers dient Rauschen, das bis auf einen schmalen Bereich alle Frequenzen enthält, die der Verstärker verarbeiten soll. Am Verstärkerausgang mißt man, was für Signale in diesem (ursprünglich rauschfreien) Frequenzbereich entstanden sind. Seit einigen Jahren hat man diese Technik auch versuchsweise für akustische Messungen genutzt, aber sie hat sich bislang noch nicht allgemein durchgesetzt.

In den Kindertagen der Hi-Fi-Technik waren es Wissenschaftler und Ingenieure wie Harvey Fletcher und seine Kollegen von den Bell-Laboratorien oder Harry F. Olson von RCA, die die Audiotechnik voranbrachten. Seitdem hat sie sich immer mehr von der Grundlagenforschung entfernt und wurde kommerzialisiert. Mag sein, daß dies richtig und zu begrüßen ist, aber ich bedaure, daß dieser Prozeß in Amerika viel weiter fortgeschritten ist als in Europa. Eine gute Klangwiedergabe setzt nicht nur eine ausgeklügelte Technik, sondern auch profundes Wissen voraus.

Für frischen Wind in der Hi-Fi-Forschung könnte freilich die Computermusik sorgen, auf die die bisherigen Systeme kaum vorbereitet sind. Hier gibt es ja keine Originalklänge, sondern nur die digitalen Computersignale – wie sie sich in den Ziffernfolgen auf einem Computerausdruck widerspiegeln. Diese digitalen Signale müssen in analoge umgewandelt werden, deren Schwankungen den gewünschten Klangänderungen analog entsprechen. Sie werden schließlich verstärkt und auf Lautsprecher gegeben. Erst wenn die Schallwelle vom Lautsprecher kommt, entstehen Töne. Man kann den Klang natürlich auch hier auf große oder kleine Säle oder auch ein Wohnzimmer auslegen. Verzerrungen durch Verstärker und Lautsprecher wären freilich nur noch an der Absicht des Komponisten zu messen, denn der Lautsprecher gibt ja keinen „Originalklang" wieder, sondern muß ihn erst erzeugen.





Die Klangfarbe

Für Tonhöhe und Lautstärke haben wir Erklärungen gefunden, die sich im Vergleich zum Rätsel der Klangfarbe noch einfach ausnehmen. Die Tonhöhe ist fest mit der Periodizität einer Welle verknüpft; wir hören ein eingestrichenes A (A′ entspricht dem Kammerton über dem mittleren C) bei 440 Perioden in der Sekunde. Die Lautstärke ist mit der Schallintensität verknüpft, wobei man berücksichtigen muß, wie groß die Frequenzen der Sinuskomponenten eines Tons sind und ob sie innerhalb einer kritischen Bandbreite liegen. Klangfarbe ist etwas ungleich Komplizierteres. Zweifellos hängt sie irgendwie vom Frequenzspektrum ab, aber das kann nicht alles sein, denn Musiker erkennen die verschiedensten Instrumente auch in der unzulänglichen Wiedergabe eines Taschenradios. Der winzige Lautsprecher verfälscht den Klang schon deshalb enorm, weil er einen großen Bereich der tieferen Frequenzen völlig abschneidet. Und doch bleibt vom Klang etwas Charakteristisches erhalten, so daß man beispielsweise Saxophon, Oboe, Fagott oder Violine ohne weiteres von einem Horn oder der menschlichen Stimme unterscheiden kann.

Das Rätsel wird noch schwieriger, wenn man bedenkt, daß Musiker ein Instrument innerhalb eines sehr großen Tonumfangs sicher erkennen. Das mag vielleicht Übung sein, aber auch für den musikalischen Laien haben die verschieden hohen Töne desselben Instruments trotz aller Klangunterschiede etwas Gemeinsames.

Welche Rolle spielt dabei die Lautstärke? Sehr laute und extrem leise Töne eines Instruments unterscheiden sich nicht nur durch ihre jeweilige Intensität, und daß Geschrei etwas ganz anderes ist als ein leise gesungener Ton, liegt eben nicht nur am Lautstärkepegel. Man kann solche Klänge keineswegs mit dem Lautstärkeregler ineinander umwandeln.

Was Klangfarbe eigentlich ist, konnte zwar noch nicht völlig geklärt werden, aber in den letzten Jahren brachten Analyse und Synthese von Klängen viele wertvolle Hinweise. Bei der Analyse einer Schallwelle bestimmt man ihre Wellenform und ihr Frequenzspektrum. Dabei werden meist recht komplizierte Strukturen sichtbar, von denen aber nicht unbedingt alle zum Klangeindruck beitragen. Hier hilft die Synthese von Schallwellen weiter, etwa wenn ein Computer Klänge aus zeitlich veränderlichen Sinustönen zusammensetzt. Nur so können wir hören, welche Merkmale einer Welle oder eines Frequenzspektrums wirklich wichtig sind und welche wir vereinfachen oder gar vernachlässigen dürfen. Die Synthese macht deutlich, wie verschiedene Wellenformen und Spektren im Endeffekt klingen.

Schon Helmholtz war sich darüber im klaren, wie wichtig Analyse und Synthese sind, um Klänge zu untersuchen. Dafür standen ihm freilich nur sehr einfache Hilfsmittel zur Verfügung – gemessen an unserem heutigen Standard waren seine Beobachtungsinstrumente primitiv. Den Bewegungsablauf bei Schwingungen verfolgte er an den Spuren von hellen Markierungen auf Violinsaiten oder Stimmgabeln. Mit seinen zahlreichen Hohlraumresonatoren konnte er einzelne Partialtöne „herausfiltern" und deren Höhe

Schlaginstrumente eines großen Sinfonieorchesters.

nach Gehör abschätzen, indem er sie mit der einer Stimmgabel oder eines Musikinstruments verglich. Die relativen Intensitäten der Partialtöne gezupfter oder angeschlagener Saiten konnte er dagegen berechnen.

Für die Synthese von Klängen gab es damals kaum exakt kontrollierbare Methoden. Sie beschränkten sich so ziemlich darauf, mehrere Stimmgabeln gleichzeitig anzuschlagen oder Sirenen mit verschiedenen Lochkreisen laufen zu lassen, wenn man einmal von den praktischen Erfahrungen bei der Klangsynthese im Orgelbau absieht. Wer *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik* von Helmholtz gelesen hat, weiß seine großartigen Leistungen zu würdigen. Lange Zeit, bevor man mit Computern auf einfache Weise beliebige Klänge erzeugen konnte, hatte er schon die meisten wichtigen Fragen gestellt und mit zwei Ausnahmen auch alle richtig beantwortet. Geirrt hat Helmholtz mit seinen Vermutungen, daß erstens die Klangfarbe eines Tons nur von den relativen Intensitäten seiner Partialtöne abhinge und daß zweitens die relativen Phasen dieser Partialtöne für das Ohr bedeutungslos seien.

Tatsächlich lassen sich Phasenänderungen eines Klangs unter bestimmten Bedingungen feststellen, wenn man sorgfältig hinhört. Das haben Plomp und andere für Klänge gezeigt, die sich nur aus zwei Partialtönen zusammensetzen, beispielsweise einer ersten Harmonischen und ihrer Oktave. Dann kommt eine Art Schwebung zwischen reinen Sinustönen zustande, die eine Oktave auseinanderliegen. Man empfindet das allerdings nicht als Änderung der Schallstärke, sondern eher als Wechsel der Klangfarbe. Der gleiche Effekt tritt auch bei Frequenzverhältnissen zwischen den Sinustönen auf, die sich anderen konsonanten Intervallen wie Quinte oder Quarte nähern. Aber man muß schon sehr genau zuhören, um zu merken, daß die Klangfarbe mit den relativen Phasen der Sinustöne wechselt. In der Musik hat das auch keine entscheidende Bedeutung.

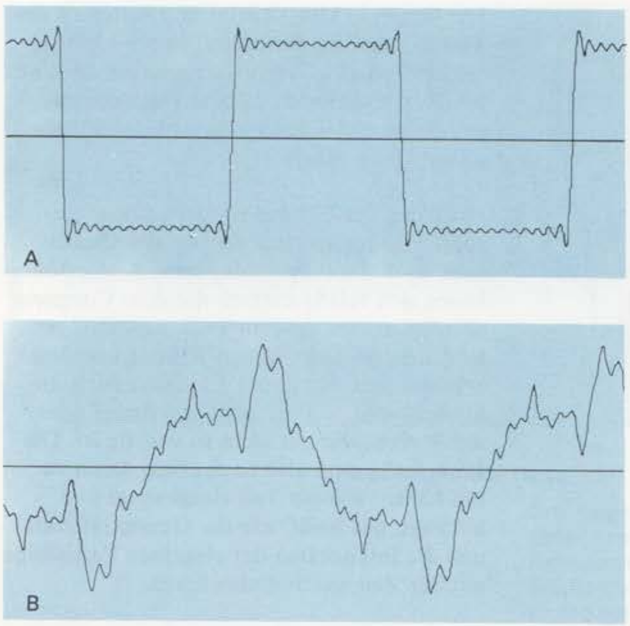
Wir können aus vielen Partialtönen auch eine angenäherte Rechteckwelle zusammensetzen und verfolgen, welchen Einfluß die Phasen hier haben. Solange alle Partialtöne „im Takt" des ersten Partialtons schwingen (und dessen Nulldurchgänge bedeuten, daß auch bei allen höheren Partialtönen die Schalldrücke gerade 0 betragen), kommt eine Rechteckwelle zustande. Sie sieht aus wie im Teil A der Abbildung auf der rechten Seite und klingt hart und etwas kratzend. Wenn die Phasenunterschiede der Partialtöne jedoch zufällig gewählt werden, während die Amplituden unverändert bleiben, ergibt sich eine völlig andere Wellenform (B). Aber klingt sie auch anders? Das läßt sich nicht leicht entscheiden. Die Tonhöhe ist zweifellos dieselbe, auch wenn der Klang vielleicht ein wenig weicher und weniger kratzig wirkt. Am besten läßt sich das beurteilen, wenn man solche Klänge über Kopfhörer verfolgt, um den störenden Nachhall des Wiedergaberaums auszuschalten.

Die Phase spielt in der Musik sicher nicht die Rolle, die manche Puristen ihr einräumen, aber beim Klavier spiegelt sie sich doch hörbar im Klang wider. Wir haben bereits festgestellt, daß die Partialtöne einer Klaviersaite nicht exakt harmonisch sind. Die Schwingungseigenschaften der Saiten hängen von Spannkraft und Steifigkeit ab, die jede Saite immer wieder in die gestreckte Ausgangslage zurücktreiben. Die Steifigkeit wirkt sich dabei besonders auf die höheren Partialtöne aus, die eine Saite in vielen kurzen Abschnitten schwingen lassen. Sie erzeugt bei ihnen eine zusätzliche Kraft, so daß die Frequenzen entsprechend schneller anwachsen. Der fünfzehnte Partialton kann schon so „unharmonisch" sein, daß seine Frequenz das Sechzehnfache der Grundwelle beträgt.

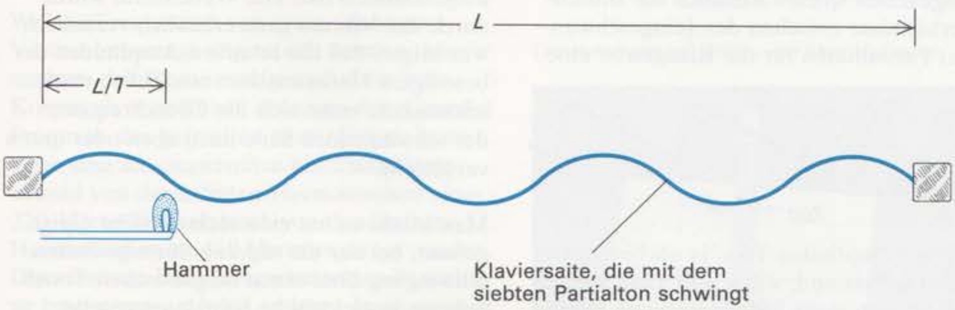
Als Harvey Fletcher und seine Mitarbeiter 1962 untersuchten, wie man den Klang eines Klaviers synthetisieren kann, entdeckten sie, daß diese nicht exakt harmonischen Partialtöne für die charakteristische Klangfarbe und Brillanz eines guten Klaviers verantwortlich sind. Denn diese Brillanz verschwand, sobald Partialtöne mit exakt harmonischen Frequenzen zusammengesetzt wurden, deren Amplituden sich zeitlich genauso veränderten wie im Originalklang. Die synthetischen Töne wurden matt und uninteressant und hatten nichts von dem typischen wogend-warmen Klangcharakter des Klaviers. Er entsteht dadurch, daß sich die Phasen der höheren Partialtöne ständig verschieben und sich die Wellenform fortwährend ändert, eben weil die Partialtöne keine exakten Harmonischen sind.

Die Klangfarbe des Klaviers hängt auch davon ab, an welcher Stelle die Saite vom Hammer angeschlagen wird, und das heißt, welche Partialtöne tatsächlich angeregt werden. Die Klavierhämmer sind gewöhnlich so angebracht, daß sie im Abstand von einer Siebtel Saitenlänge hinter dem tastennahen Ende auftreffen. Dadurch wird verhindert, daß der siebte Partialton für diese Saite angeregt wird, denn er stört – wie in geringerem Maße auch die höheren Partialtöne – die Harmonie, die traditionell (wie die diatonische Tonleiter) auf den Frequenzverhältnissen zwischen den ersten sechs (harmonischen) Partialtönen aufbaut.

Mit welcher Intensität die verschiedenen harmonischen Partialtöne angeregt werden, hängt von der Position, aber auch von anderen Eigenschaften des Hammers ab. Harte Hämmer begünstigen stärker die hohen Partialtöne, wodurch der Klang heller wird. Man kann das leicht feststellen, indem man den Filz des Hammers mehrfach mit einer Nadel durchsticht und ihn so weicher macht: Der Ton wird dunkler, weil die hohen Partialtöne schwächer zum Zuge kommen.



Der Einfluß von Phasen- und Amplitudenschwankungen der Partialtöne auf die Wellenform. Die angenäherte Rechteckwelle (A) besteht aus zwölf Partialtönen, deren Phasen exakt übereinstimmen. Eine völlig andere Form (B) ergibt sich, wenn man zwölf Partialtöne mit denselben Amplituden und Frequenzen zusammensetzt, deren Phasen willkürlich verschoben sind. Trotz der Unterschiede hört man dieselbe Tonhöhe.



Bei vielen Klavieren schlagen die Hämmer die Saiten an einem Punkt an, der etwa eine Siebtel Saitenlänge hinter dem tastennahen Ende liegt. Damit wird verhindert, daß die siebte Harmonische mitschwingt. Der Hammer kann wirkungsvoll nämlich nur diejenigen Partialtöne anregen, die an der Anschlagstelle mit maximaler Amplitude schwingen. Aber die siebte Harmonische müßte bei einer Siebtel Länge gerade einen Knoten haben – wie die farbige Wellenlinie andeutet. Das Anschlagen ist viel komplizierter als das Anzupfen einer Saite, denn nicht nur die Größe des Hammers spielt eine Rolle, sondern auch Art und Dauer des Kontakts mit der Saite. Deshalb kann die siebte Harmonische teilweise selbst dann angeregt werden, wenn der Hammer die Saite bei einer Siebtel Länge trifft. Sie würde voll zum Tragen kommen, wenn die Anschlagstelle bei einer Vierzehntel Saitenlänge läge – wo die siebte Harmonische ihre maximale Amplitude erreicht. Je nach Position des Hammers schwingen verschiedene Harmonische an.

Ein Cembalo klingt härter und heller als ein Klavier, weil die Saiten mit einem kleinen, spitzen Federkiel angerissen werden. Dadurch schwingen sehr viele höhere Harmonische an, die dem Cembalo seinen charakteristischen Klang geben.

Die Töne des Cembalos oder anderer gezupfter Saiteninstrumente wie der Gitarre oder auch die (angeschlagenen) Klaviertöne lassen sich relativ einfach mit dem Computer simulieren. Seit langem weiß man, daß es hier auf einen plötzlichen Anstieg und einen allmählichen Abfall der Klangintensität ankommt, während der genaue Verlauf oder die Wellenform gar nicht so wichtig ist. Die Klangfarbe muß also auch etwas damit zu tun haben, wie ein Ton einschwingt und abklingt, das heißt, wie die Gesamtintensität und die Intensitäten der einzelnen Partialtöne mit der Zeit zu- und abnehmen.

Desungeachtet spielen natürlich die Intensitätsverhältnisse zwischen den (eingeschwungenen) Partialtönen für die Klangfarbe eine Rolle. Wir empfinden Töne ja als besonders hart und schwirrend, wenn sehr viele Partialtöne innerhalb einer Frequenzgruppe oder kritischen Bandbreite liegen. Auch daran können wir das Cembalo vom Klavier unterscheiden.

Sägezahnschwingung einer gestrichenen Violinsaite. Der Bogen nimmt die Saite zunächst ein Stückchen mit, bis die angeregte Welle nach der Reflexion am Saitenende zurückgekehrt ist. In diesem Moment maximaler Auslenkung schnellt die Saite unter dem Bogen zurück, und alles beginnt von vorn.

Ganz besonders machen sich die dicht beieinanderliegenden Partialtöne bemerkbar, wenn man elektronisch erzeugte Sägezahn- oder Rechteckwellen hört. Aber auch eine gestrichene Violinsaite folgt einer Sägezahnkurve – was schon Helmholtz beobachtet hat. Die Saite bleibt für kurze Zeit am Bogen haften und wird ein Stückchen mitgezogen, schnellt dann wieder zurück, bis sie erneut am Bogen haften bleibt und das Ganze von vorn beginnt. Hätten Geigentöne dieselbe sägezahnartige Wellenform, dann würden sie sehr hart und grell klingen. Das verhindert der Korpus einer Violine, dessen zahlreiche Resonanzen nur bestimmte Sinuskomponenten (der Sägezahnwelle) verstärken, während andere unterdrückt werden.

Diese Wirkung des Geigenkorpus wird sichtbar, wenn man verfolgt, wie stark einzelne Sinuskomponenten der Saitenschwingung im Klang der Geige vertreten sind. Bei Partialtönen, deren Frequenzen innerhalb einer schmalen Resonanzspitze liegen, sind die Amplituden erheblich größer als bei geringfügig davon abweichenden Frequenzen. Daher können selbst kleine Frequenzschwankungen, wie sie beim Vibrato auftreten, die Amplituden der beteiligten Harmonischen gewaltig verändern – wie Jean-Claude Risset angemerkt hat. Das Vibrato rückt die Harmonischen in die Resonanzen hinein oder heraus. Besonders deutlich zeigt sich das bei den Wellenformen von Geigentönen, die Mark Dolson am California Institute of Technology aufgenommen hat. Die Wellenform wurde durch das Vibrato ganz erheblich verändert, was zeigte, daß die relativen Amplituden der beteiligten Harmonischen tatsächlich stark schwanken, wenn sich die Grundfrequenz der schwingenden Saite nach oben oder unten verschiebt.

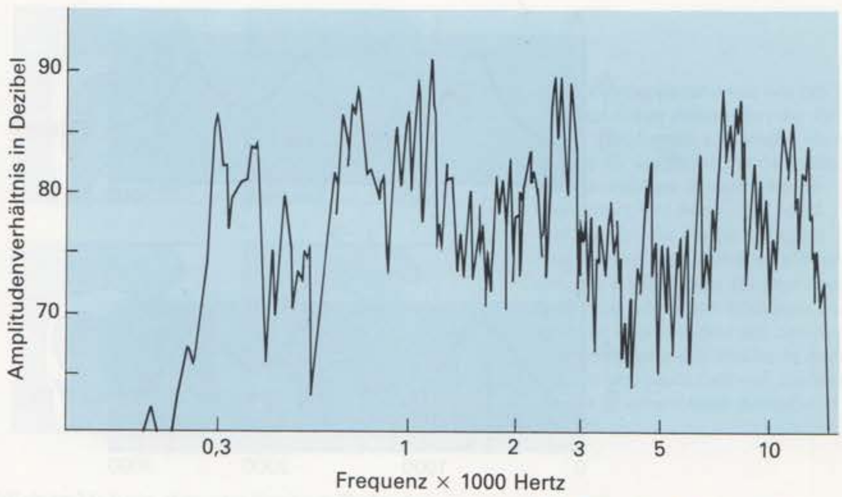
Max Mathews hat eine elektronische Geige gebaut, bei der die sägezahnförmige Saitenschwingung über einen magnetischen Tonabnehmer in elektrische Signale umgesetzt wird. Diese durchlaufen dann eine elektronische Schaltung mit 17 bis 37 Einzelresonanzen, um die Verhältnisse bei einer guten Violine nachzuahmen. Mathews erreichte auch wirklich einen ziemlich guten Geigenklang. Später gelang ihm das sogar ohne die Filter. Die Übertragungskurven von üblichen Lautsprechern weisen nämlich ähnlich viele Sprünge auf, wie man sie im Resonanzspektrum einer Violine findet.

Mathews brauchte für jede Saite einen eigenen Lautsprecher und Verstärker, damit auch Doppelgriffe gut klangen. Solange er für alle vier Saiten nur einen Verstärker und Lautsprecher benutzte, konnten bereits geringe Nichtlinearitäten unangenehme Kombinationstöne verursachen, die zwar schwach, aber doch sehr störend waren.

Später setzte Mathews Tiefpaßfilter ein, deren Bandbreiten mit zunehmender Intensität größer wurden. Die elektronische Geige klang dadurch wie ein Blechblasinstrument – die Ähnlichkeit war verblüffend. Das entsprach aber durchaus Rissets Beobachtung, daß die höheren Partialtöne bei Trompetenklängen verzögert erscheinen. Mit einem Bandpaßfilter, dessen Mittenfrequenz sich mit wachsender Amplitude nach oben verschob, konnte Mathews elektronisch einen Geigenton hervorrufen, der einer Gesangsstimme ähnelte. Er hat später noch mit einem zusätzlichen Resonanzfilter bei 2500 Hertz experimentiert, was in etwa einem Formanten des Stimmapparats entsprach. So angenehm dieser Klang auch ist, eine Orchesterbegleitung mit solchen elektronischen Geigen würde jede Singstimme verdecken!

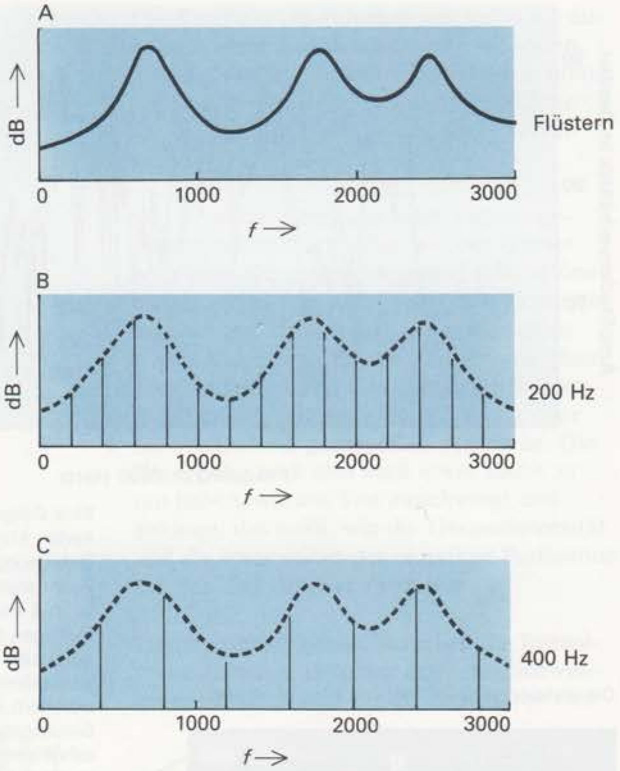
Welche Frequenzen von einer (richtigen) Violine bevorzugt abgestrahlt werden, hängt nur von den Resonanzeigenschaften ihres Korpus ab – und nicht etwa von der (Grund-) Frequenz der gespielten Note. Beispielsweise kann eine Resonanzspitze bei 2200 Hertz sowohl von der zehnten Harmonischen eines 220-Hertz-Tons als auch von der fünften Harmonischen zu 440 Hertz angeregt werden. Die relativen Intensitäten einzelner Partialtöne bestimmen auch bei anderen Instrumenten die Klangfarbe. So hat eine gedackte Orgelpfeife einen „hohlen" Ton, weil hier nur die ungeradzahligen Harmonischen schwingen, offene Pfeifen klingen voller und reicher, weil gleichermaßen gerad- und ungeradzahlige Partialtöne vorhanden sind.

Bei der menschlichen Stimme werden Vokale unabhängig von der Tonhöhe erkannt und unterschieden. Das liegt an drei hauptsächlichen Resonanzen des Stimmapparats, die man *Formanten* nennt. Bei jedem Ton, der durch die Stimmbänder erzeugt wird, werden diejenigen Harmonischen begünstigt, die in die Frequenzbereiche der Formanten fallen, Harmonische, die weit außerhalb liegen, kommen dagegen nur schwach zum Zuge.



Eine Geige hat keineswegs den harten Klang einer Sägezahnwelle. Dafür sorgen vor allem die vielen Resonanzen des Geigenkorpus, so daß trotz der sägezahnförmigen Saitenschwingungen doch eine angenehm klingende Wellenform abgestrahlt wird. In welchem Amplitudenverhältnis Sinuskomponenten aus der sägezahnförmigen Bewegung der Saite in einen Partialton des hörbaren Geigenklangs umgesetzt werden, kann man an dieser Kurve ablesen. Besonders bei hohen Frequenzen häufen sich die Resonanzspitzen, die anzeigen, daß ein Partialton besonders stark vertreten ist. Intensitätseinbrüche bei hochfrequenten Partialtönen tragen erheblich zur Klangfarbe bei. Wie gut die Geige ist, hängt zum großen Teil davon ab, bei welchen Frequenzen die Spitzen und Einbrüche liegen.

Die elektronische Violine von Max Mathews.

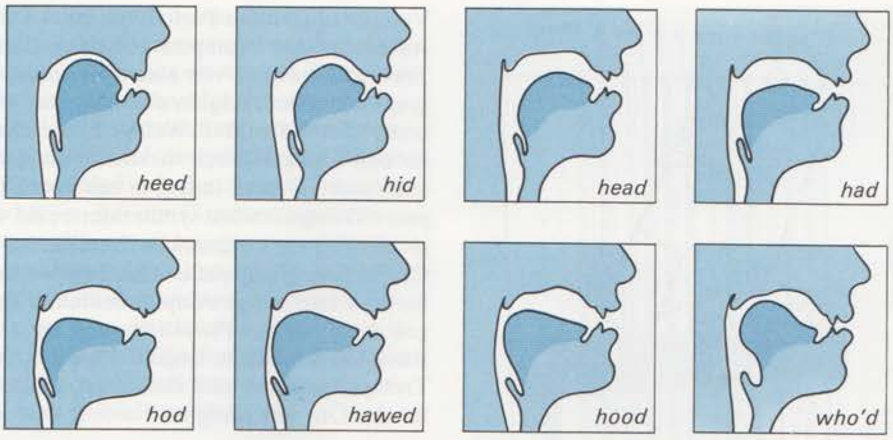


Formanten sind charakteristische Resonanzen des Stimmapparats, die für jeden Vokal andere Intensitätsmaxima aufweisen. Die drei Kurven zeigen das für den Vokal „ä" wie er im englischen Wort *had* vorkommt. Wird der Vokal geflüstert (A), bekommt man eine Art Rauschspektrum, in dem das gesamte Kontinuum der Frequenzen vertreten ist. Spricht man den Vokal mit einer Grundfrequenz von 200 oder 400 Hertz, so klingen nur noch die Harmonischen für diese Frequenzen an (schwarze senkrechte Linien in B und C). Die gestrichelten einhüllenden Kurven deuten an, wie sich die Formantenresonanzen auf die Intensitäten der Partialtöne auswirken. Da die Partialtöne bei einer Grundtonhöhe von 400 Hertz doppelt so weit auseinanderliegen wie bei 200 Hertz, lassen sich die Formanten beim Spektrum C nicht so leicht bestimmen wie bei B. Ganz analog sind Formanten bei Männerstimmen etwas leichter festzustellen als bei Frauenstimmen, deren Partialtöne größere Frequenzabstände aufweisen.

Auch geflüsterte Vokale können wir unterscheiden, obwohl hier alle Frequenzen – und nicht nur eine Folge aus diskreten Harmonischen – vertreten sind. Warum das so ist, zeigen die Formantenkurven auf dieser Seite. In Kurve A sieht man das (kontinuierliche) Spektrum eines geflüsterten „*ä*", wie es im englischen *had* vorkommt. Wie die (diskreten) Spektren beim selben Vokal für eine Tonhöhe von 200 beziehungsweise 400 Hertz aussehen, zeigen die Kurven B und C. Die Hüllkurven von B und C unterscheiden sich nur wenig – sie entsprechen den Resonanzen des Stimmapparats, eben den Formanten. Sie weichen zudem kaum von der Form des geflüsterten Vokals ab.

Die Formantenfrequenzen für einen bestimmten Vokal sind in Wirklichkeit nicht völlig unabhängig von der Tonhöhe. Das hat Johann Sundberg nachgewiesen. Ein Sänger trainiert seine Stimme auf *Gesangsformanten*, so daß sie gerade in dem Frequenzbereich besonders tragend wird, in dem die üblichen Orchester nur geringe Schalleistungen erreichen. Soprane können ihre Formanten sogar in hohen Lagen verschieben. Beides macht die Stimme lauter und ändert zusätzlich die Klangfarbe. Das ist zugleich auch der wesentliche Unterschied zwischen der noch unentwickelten Stimme eines kleinen Mädchens und der einer erwachsenen Frau, wie man durch Computersynthese festgestellt hat. Die Formantenfrequenzen lassen sich beim Singen auch so steuern, daß sie mit bestimmten Harmonischen zusammenfallen. Das hört sich dann an, als würden mehrere Töne gleichzeitig klingen, die natürlich alle Harmonische zur Schwingungsfrequenz der Stimmbänder sind. Der einzigartige Klangcharakter einiger buddhistischer Gesänge beruht auf einer perfekten Kontrolle der Formantenfrequenzen, mit Sprache oder üblichem Gesang ist diese Technik nicht mehr zu vergleichen.

Formantenfrequenzen sind ein ungemein wichtiger Aspekt der menschlichen Stimme, und es lohnt, sie genauer zu betrachten. Wie sich der Rachenraum bei den einzelnen Vokalen verändert und welche Formantenfre-



Der Stimmapparat wirkt wie ein veränderlicher Resonator, der für jeden Vokal anders aussieht. Hier ist das für englische Worte in der amerikanischen Aussprache demonstriert. Bei *heed, hid, head* und *had* ist die Zunge vorn, bei *hod, hawed, hood* und *who'd* hinten. Sie kommt dem Gaumen bei *heed* und *who'd* am nächsten und liegt bei *had* und *hod* am tiefsten. Die Klangfarbe des Vokals in *heed* kommt uns recht hell vor, die des Vokals in *who'd* eher dumpf und dunkel.

Formantenfrequenzen einiger gebräuchlicher Vokale der englischen Sprache

	heed	*hid*	*head*	*had*	*hod*	*hawed*	*hood*	*who'd*	*hud*	*heard*
f_1	270	390	530	660	730	570	440	300	640	490
f_2	2290	1990	1840	1720	1090	840	1020	870	1190	1350
f_3	3010	2550	2480	2410	2440	2410	2240	2240	2390	1690

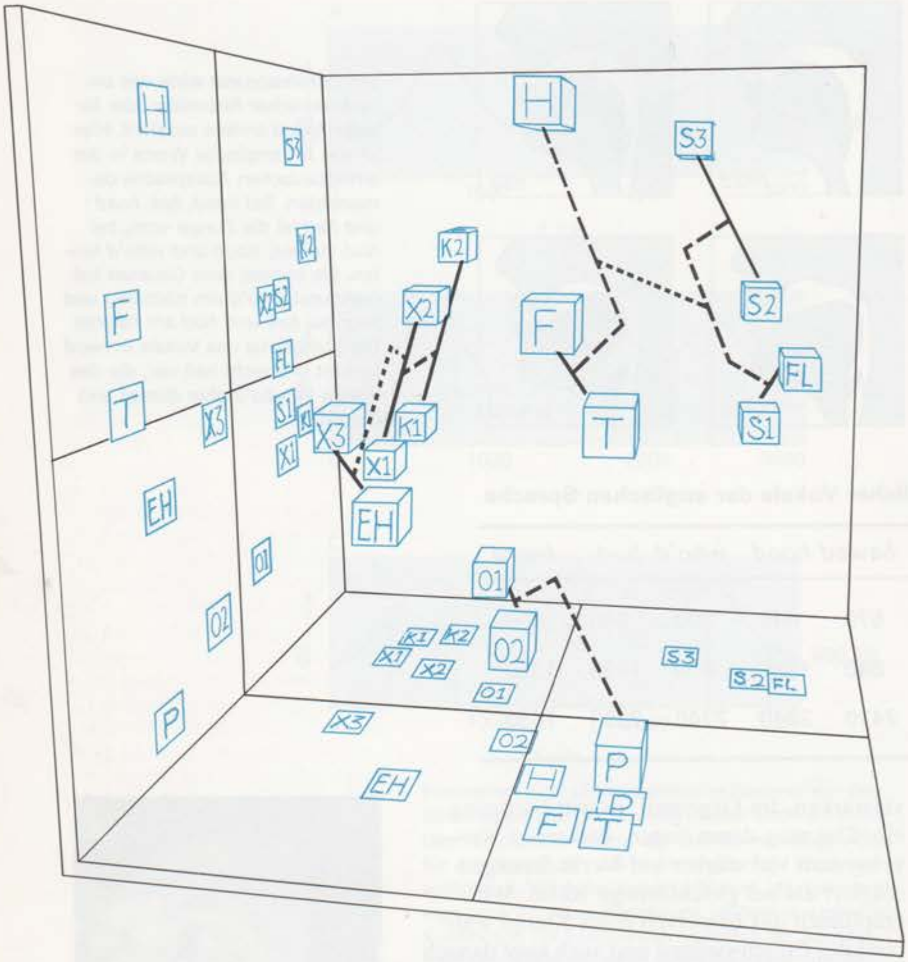
quenzen bei einigen Vokalen der englischen Sprache auftreten, das zeigen die Abbildung und die Tabelle auf dieser Seite.

Man könnte sich zu dem voreiligen Schluß verleiten lassen, das Frequenzspektrum mache bereits den Vokalklang aus. Aber man versuche einmal, ein gedehnt ausgesprochenes „ah.. " über längere Zeit auszuhalten, ohne daß Tonhöhe oder Intensität sich ändern und die Stimme ein Vibrato bekommt. Nach einiger Zeit verliert sich der Charakter des Vokals, der allmählich immer kratziger klingt – wir erleben ihn nicht mehr als artikuliertes „ah", sondern diffus.

Was hier passiert, nennen die Psychologen *semantische Sättigung*. Wenn wir andauernd und immer wieder dasselbe Wort vor uns hinsagen, hören wir es schließlich nur noch als Klang. Die Bedeutung haben wir bereits beim ersten Hören mitbekommen, und das läßt sich durch Wiederholen nicht beliebig verstärken. Im Gegenteil, es tritt Sättigung ein. Das mag daran liegen, daß unser Nervensystem viel stärker auf Veränderungen reagiert als auf gleichförmige Reize. Wir empfinden das Einsetzen eines Klangs während der Einschwingzeit und auch kurz danach anders als den stetigen, späteren Ton. Sie ist offenbar für das Erkennen eines Vokals wichtig. Aber auch bei anderen Klängen sind es gerade die Veränderungen, die das Zuhören interessant machen. Wechsel zwischen *piano* und *forte* oder auch starkem und schwachem Vibrato. Musik wird langweilig, wenn man alle Noten gleich lang und laut ohne verschiedene Nuancierungen herunterspielt.

Wie wichtig Wechsel und Vielfalt für den Klangeindruck sind, hat Jean-Claude Risset – wohl als erster – experimentell an den Bell-Laboratorien untersucht und zwischen 1966 und 1969 veröffentlicht. Mit einem Computer analysierte er in allen Einzelheiten, wie Anstieg, Abfall und auch alle übrigen

Jean-Claude Risset.



Aus diesem dreidimensionalen Diagramm kann man entnehmen, wie ähnlich oder unähnlich Instrumentalklänge sind. Es wurde mit dem Computer aus Ähnlichkeitswerten berechnet, die zuvor wie folgt bestimmt worden waren Für verschiedene Tonpaare hatten Musiker anhand einer Zahlenskala von 1 bis 30 Ähnlichkeiten oder Abweichungen im Klang quantitativ bewertet. Instrumente mit ähnlichem Klang liegen dicht beieinander· je größer die Unterschiede werden, desto weiter rücken auch die Positionen im Diagramm auseinander Einige Instrumente sind in Gruppen (Cluster) zusammengefaßt und durch gestrichelte oder gepunktete Linien verbunden. Die Quadrate auf den Wänden sind Projektionen der Würfel, die die verschiedenen Positionen der Instrumente im dreidimensionalen Raum hervorheben. Die Abkürzungen bedeuten: O1, O2: Oboen; K1, K2: Klarinetten; X1, X2, X3: Saxophon; EH: Englischhorn, H. Horn; S1, S2, S3: Streicher (Cello); T· Trompete; P· Posaune; FL. Flöte; F: Fagott.

Veränderungen der Partialtöne beim kurzen Anblasen einer Trompete aussehen. Die Töne, die übrigens von einem Berufsmusiker gespielt wurden, zeigten eine außerordentlich komplizierte Struktur. Welche Eigenschaften für den Klangeindruck wirklich wichtig sind, untersuchte Risset, indem er mit dem Computer Trompetentöne synthetisierte, sie waren jeweils in ganz bestimmten Einzelheiten dem Originalklang angepaßt. Zum Beispiel simulierte er kurzzeitige Amplitudenschwankungen der einzelnen Partialtöne und kurze Rauschausbrüche zu Beginn des eigentlichen Trompetentons – und stellte fest, daß beides für das Ohr unwichtig ist.

Ganz entscheidend wird der Trompetenklang jedoch dadurch geprägt, daß höhere Partialtöne später anschwingen und früher wieder abklingen als tiefere. Zudem verändern zufällige Frequenzschwankungen der Partialtöne den synthetischen Klang erheblich – dadurch entsteht der typische Blechbläser-Klang wie etwa bei der richtigen Trompete. Auch wenn Frequenzen über 4000 Hertz weggelassen wurden, blieben die künstlichen Klänge mühelos als Trompetentöne erkennbar, die freilich nicht mehr ganz so strahlend wirkten. Man kann also mit vertretbarem Aufwand durchaus gute synthetische Trompetenklänge erzeugen. Zu beachten ist dabei jedoch, daß die Intensitäten der Partialtöne passend ansteigen und abfallen und die Frequenzen die richtigen statistischen Schwankungen (oder Vibratos) aufweisen. Selbst Trompeter können dann bei kurzen Tönen nicht mehr zwischen künstlich und echt unterscheiden.

Bei einem Trompetenton kann man den Klangcharakter genausowenig über den Lautstärkeregler eines Verstärkers ändern wie beim Übergang von leisem Sprechen in Geschrei. Je lauter ein Trompetenton ist, um so mehr Energie wird – prozentual gesehen – an höhere Partialtöne vergeben.

In seinen frühen Arbeiten hat Risset nur kurze Einzeltöne synthetisiert, später gelangen Dexter Morrill von der Colgate-Universität längere Trompetenpassagen, die ebenfalls überzeugend klangen. In ähnlichen

Untersuchungen wurden schließlich auch andere Musikinstrumente einbezogen, man beschränkte sich aber oft nur auf Einzeltöne. In Stanford ging John M. Grey der Frage nach, welche Eigenschaften von Instrumentalklängen auch für das geübte Ohr keinen oder nur wenig Einfluß auf den Gesamteindruck haben. Bei der Computersynthese konnten solche – oft komplexen – Merkmale weggelassen werden, ohne daß die künstlichen Klänge unnatürlich wirkten. Sie waren oft nur schwer oder überhaupt nicht von gleich langen und lauten Tönen derselben Höhe zu unterscheiden, die auf dem nachgeahmten Instrument gespielt wurden.

Grey fragte geübte Musiker danach, wie sie die Ähnlichkeit zwischen jeweils zwei Tönen anhand einer Zahlenskala von 1 bis 30 bewerteten. Starke Abweichungen konnten zwischen 1 und 10 abgestuft werden, 11 bis 20 kennzeichneten unähnliche und 21 bis 30 sehr ähnliche Klänge. Auf diese Weise konnte er die Ähnlichkeiten zwischen „Tonpaaren“ messen und mit dem Computer für verschiedene Instrumente in einer dreidimensionalen Darstellung zusammenfassen. Dabei wird jedes Instrument durch einen Würfel wiedergegeben, der gleichsam im Raum schwebt, kleine Abstände zwischen den Würfeln stehen für große Ähnlichkeiten im Klang.

Auf dieser Basis kann man die Instrumente in drei Familien einteilen (die sich wiederum in mehrere Unterfamilien aufgliedern)

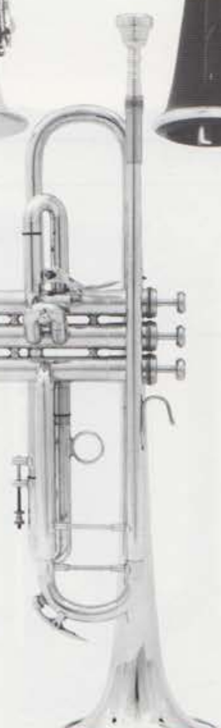
1. Es-Klarinette (K1), Sopransaxophon (X), wobei die Lautstärken *mezzoforte* (X1), *piano* (X2) und *forte* (X3) getrennt analysiert wurden, Baß-Klarinette (K2), Englischhorn (EH).
2. Oboe (O), Posaune mit Dämpfer (P).
3. Fagott (F), Horn (H), Violoncello in drei Spielweisen. *sul ponticello*, nah am Steg gestrichen (S1), normal (S2) und *sulla tastiera*, nah am Griffbrett (S3), Trompete (T) und Flöte (FL).

Als nächstes schaute sich Grey die physikalischen Klangeigenschaften genauer an, die für die beobachteten Ähnlichkeiten verantwortlich sind. So hängen die senkrechten Koordinaten (Höhen) der Würfel offenbar mit der *spektralen Energieverteilung* zusammen. Instrumente, die wie Horn und Cello (H und S3) weit oben im Diagramm stehen, haben ein schmales Frequenzspektrum, bei dem sich die meiste Energie auf ziemlich niedrige Frequenzen verteilt. Ihr Klang ist *grundtönig*. Umgekehrt ist das Spektrum des gedämpften Posaunenklangs (P) breit, und die Energie konzentriert sich stärker auf die höheren Partialtöne. Hier haben wir es mit einem *obertönigen* Klang zu tun. Instrumente wie die Trompete und das Sopransaxophon (T und X) nehmen eine Mittelstellung ein. Was genau unter der spektralen Energieverteilung bei der senkrechten Richtung zu

Orchesterglocken.

Sopransaxophon.

Es-Klarinette.



B-Trompete.

verstehen ist, konnte noch nicht völlig geklärt werden. Vielleicht handelt es sich hier um Mittelwerte der Partialtonfrequenzen, die anhand der jeweils berechneten Lautstärken gewichtet wurden.

Wie weit ein Instrument links oder rechts im Diagramm angesiedelt ist, hängt mit dem Anstieg und Abfall der einzelnen Partialtöne zusammen. Links findet man Holzblasinstrumente, deren Partialtöne im wesentlichen gleichzeitig anschwingen und abklingen. Für Flöte und Fagott gilt das nicht mehr; sie liegen weit rechts – genau wie einige Streich- und Blechblasinstrumente.

Die dritte Dimension schließlich, die Tiefe, scheint mit dem Anklingen des Tons verknüpft zu sein. Bei Flöten- (FL) und Streichinstrumenten (S1, S2, S3) geht dem Ton immer ein kurzer Rauschausbruch voraus, der die jeweiligen Klangeigenschaften entscheidend mitbestimmt, die entsprechenden Würfel des Diagramms liegen ziemlich weit hinten. Dagegen findet man Trompete (T), Posaune (P) und Fagott (F) vorn, weil hier das „Anfangsrauschen" kaum eine Rolle spielt. Auch bei synthetischen Geigentönen sollte es nicht allzu lange andauern, weil sie sonst wie das berüchtigte „Kratzen" eines Anfängers klingen.

Partialtöne eines Glockenspiels

1	2.	3.	4.	5.	6.	7
f_0	$2{,}76\,f_0$	$5{,}40\,f_0$	$8{,}93\,f_0$	$13{,}34\,f_0$	$18{,}64\,f_0$	$31{,}87\,f_0$
–	–	$(4{,}5\,f_0)$	$2 \times 4{,}47\,f_0$	$3 \times 4{,}45\,f_0$	$4 \times 4{,}66\,f_0$	$7 \times 4{,}55\,f_0$

Viele physikalische Eigenschaften von Tönen tragen zur Klangfarbe bei. Eine wichtige Rolle spielen zweifellos die Frequenzspektren, durch die wir ja auch Vokale unterscheiden. Bei Blechblasinstrumenten (mit Kesselmundstück) hängt der Klang ganz entscheidend davon ab, wann die verschiedenen Partialtöne einsetzen und wie stark sie dabei vertreten sind. Ein anfänglicher, hochfrequenter Rauschausbruch bestimmt das Timbre der Flöten und Streichinstrumente. Wenn ein Ton plötzlich einsetzt und dann nur ganz allmählich abfällt, klingt es nach gezupften oder angeschlagenen Saiten.

Auch Glocken und Gongs werden angeschlagen, aber hier sind die Partialtöne nicht mehr harmonisch wie etwa bei Klaviersaiten. Trotzdem empfindet man eine Art Tonhöhe. Deshalb kann man ja auch gut Melodien darauf spielen. Mehrstimmige Musik klingt auf diesen Instrumenten fremd, weil sie unser traditionelles Harmoniempfinden verletzen. Die konventionellen Kriterien für Konsonanz und Dissonanz sind nicht mehr erfüllt.

Glocken, Gongs und ähnliche Schlaginstrumente hat man eingehend untersucht, insbesondere Glocken, wie sie im Orchester benutzt werden. Sie bestehen aus langen, einheitlichen Metallröhren, die lose an einem Ende aufgehängt sind und daher ungehindert frei schwingen. Für solche Glocken sind die Frequenzen der ersten sieben Partialtöne zur Grundfrequenz f_0 links auf dieser Seite in einer Tabelle zusammengestellt. Sie entsprechen oberhalb des vierten Partialtons jeweils ungefähr einer Harmonischen zur Frequenz $4{,}5 f_0$, die als (Residual-)Tonhöhe wahrgenommen wird. Bei Orchesterglocken, deren Röhren keinen exakt kreisrunden Querschnitt haben, sondern die schwach elliptisch geformt sind, gibt es zwei Partialtonreihen, deren Frequenzen geringfügig gegeneinander verstimmt sind. Das liegt daran, daß sich die flachere Seite leichter verbiegt als die schmale. Solche Glocken klingen waberig, weil zwischen den Partialtönen Schwebungen auftreten. Das ist im Orchester unerwünscht. Allerdings gehören solche Schwebungen bei Gongs zu den wesentlichen Klangmerkmalen, die man bei der Computersynthese unbedingt berücksichtigen muß.

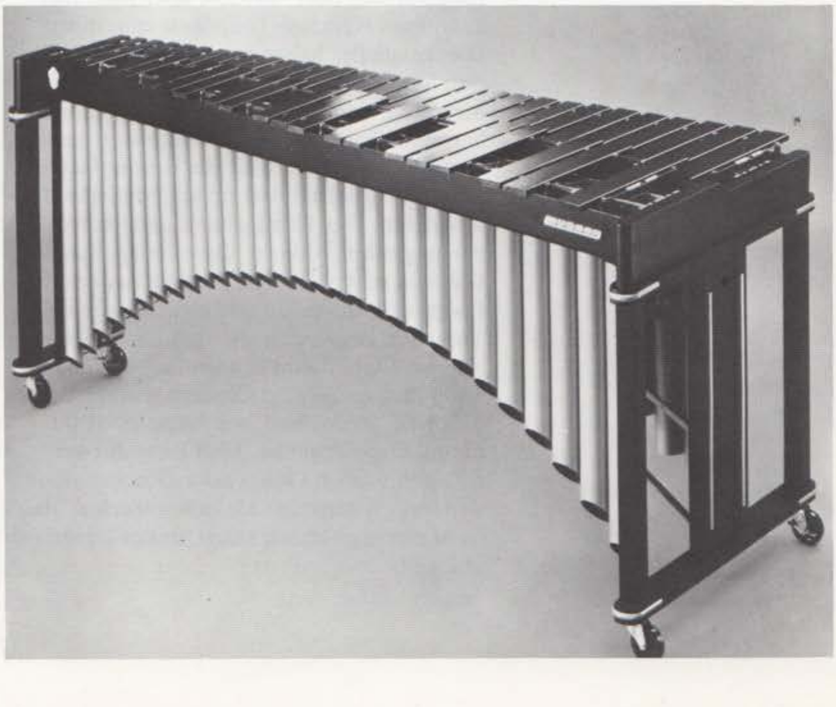
Die hohen Töne eines Glockenspiels werden in der Orchesterpartitur zwei Oktaven tiefer notiert, als sie tatsächlich klingen. Ein Glokkenspiel besteht aus lose aufgelegten Metallstäben. Durch die vielen möglichen Biege- und Drehschwingungen entstehen zahlreiche hohe Partialtöne, die nach dem Anschlagen jedoch sehr rasch abklingen. Als Tonhöhe wird die Frequenz der niedrigsten Biegeschwingung wahrgenommen.

Marimbaphone und Xylophone haben Klangstäbe aus Holz oder Kunststoffen. Sie sind in der Mitte dünner als an den Enden. Dadurch liegt bei den Marimbaphonen der zweite Partialton zwei Oktaven über dem ersten. Die Stäbe des Xylophons verdünnen sich in der Mitte nicht so stark, weshalb der zweite Partialton erst drei Oktaven über dem ersten folgt.

In beiden Fällen sind unter den Klangstäben Hohlraumresonatoren angebracht, die die Schallintensität des ersten Partialtons verstärken und zugleich bewirken, daß der Ton schneller abklingt. Die (einseitig) geschlossenen Resonatoren der Xylophone verstärken auch die dreifache Frequenz des Grundtons und begünstigen somit auch den zweiten Partialton. Das trägt mit dazu bei, daß Xylophone heller klingen als Marimbaphone. Meist werden Xylophone allerdings mit härteren Schlegeln gespielt als Marimbaphone und bekommen schon deshalb eine hellere Klangfarbe.

Ein Vibraphon besitzt Klangstäbe aus Aluminium, die ähnlich geformt sind wie beim Marimbaphon, aber die Töne verklingen etwas langsamer. Motorgetriebene Klappen zwischen den Klangstäben und Resonatoren des Vibraphons sorgen dafür, daß nur zeitweise Schwingungen in den Resonatoren angeregt werden und den Klang verstärken. Dadurch erhält das Vibraphon sein etwas waberiges Timbre.

Xylophon.



Marimbaphon.

Glocke der Gebrüder Hemony.

Partialtöne gestimmter Glocken

Partialton	Verhältnis zur Frequenz f_e, die der Hörer empfindet	
„subharmonischer" Ton	$0{,}5\,f_e$	Oktave (nach unten)
Prime	f_e	
Terz	$1{,}2\,f_e$	kleine Terz
Quinte	$1{,}5\,f_e$	Quinte
Oktave	$2\,f_e$	Oktave
Dezime	$2{,}5\,f_e$	Oktave und große Terz
Duodezime	$3\,f_e$	Oktave und Quinte

Kirchenglocken haben komplizierte Schwingungsformen oder -moden, aber auch hier kann man Residual-Tonhöhen empfinden. Glockengießer haben in einer langen Tradition herausgefunden, wie man Glocken formen muß, damit die niedrigen Partialtöne in harmonischen Frequenzverhältnissen stehen. Das gilt insbesondere für die Brüder Hemony, die im 17 Jahrhundert in den Niederlanden arbeiteten. Der Klang ähnelt dann schon fast einem ganzen Akkord. Gewöhnlich haben Glocken sehr viel mehr Partialtöne, und die Frequenzverhältnisse sind nicht so regelmäßig. Trotzdem empfinden wir auch ihren Klang als eine Einheit und ordnen ihm bestimmte Tonhöhen zu. Kleine Glocken klingen immer höher als große, egal, wie kompliziert ihr Frequenzspektrum ist. Man kann auf verschieden großen Gongs oder Glocken ohne weiteres einstimmige Melodien spielen, aber mehrstimmige Musik klingt immer irgendwie „falsch"

Kesselpauken besitzen viele Partialtöne, von denen der sogenannte *Prinzipalton* als Tonhöhe empfunden wird. Nun gibt es auch Partialtöne, deren Frequenzen annähernd einem ganzzahligen Vielfachen der halben Prinzipaltonfrequenz entsprechen, aber aus unerklärlichen Gründen nehmen wir nicht sie als Tonhöhe der Kesselpauke wahr, sondern den eine Oktave höheren Prinzipalton. Bei einigen indischen Schlaginstrumenten sind die Trommelfelle auf raffinierte Weise so gestaltet, daß die Schwingungsfrequenzen beinahe harmonisch werden und eine eindeutige Tonhöhe entsteht. Aber die meisten großen und kleinen Trommeln, Tom-Toms, Congas oder Bongos haben keine eindeutige Tonhöhe und werden vorwiegend als Rhythmusinstrumente eingesetzt.

Es ist gar nicht so selbstverständlich, daß wir nicht-harmonische Partialtöne als einheitlichen Klang wahrnehmen. Wir haben ja schon von Computerklängen gesprochen, deren Partialtöne man getrennt hört, weil die höheren nicht mehr mit den tieferen verschmelzen.

Warum haben wir bei Glocken, Gongs, Trommeln und sogar Kastagnetten, wo nur zwei Hölzer zusammenschlagen, den Eindruck eines einheitlichen Klangs. Teilweise erscheinen uns die nicht-harmonischen Partialtöne wohl deshalb zusammenhängend, weil sie erst nach einem gemeinsamen, plötzlichen Beginn jeder für sich abklingen. Elizabeth Cohen hat das auch für Klänge mit leicht gestreckten Partialtönen nachgewiesen.

Möglicherweise erkennen wir auch kompliziertere natürliche Klänge aufgrund unserer Erfahrung: Wir haben sie ja oft genug gehört und gelernt, aus welcher Quelle sie kommen. Wenn wir allerdings bei Glocken oder Gongs aufmerksam hinhören, wird uns wohl kaum entgehen, daß hier einzelne Frequenzkomponenten zusammenklingen, trotzdem fällt es nicht schwer, darin den einheitlichen Klangcharakter eines bestimmten Instruments wiederzuerkennen. Aber vielleicht gehören dazu noch einige Eigenschaften von Klang, die wir bislang noch gar nicht berücksichtigt haben.

Indische Pauke.

Wahrnehmungstäuschungen und musikalische Effekte

Wenn der Mensch sein Gehör oder andere weitgehend unverstandene Funktionen seines eigenen Körpers erforscht, gleicht das in manchem einer Entdeckungsreise in unbekannte Länder, von denen es nur unzureichende Karten gibt. Die Grenzen unserer akustischen Wahrnehmungsfähigkeit können wir natürlich nie überschreiten. Für manche Klänge ist unser Ohr einfach taub, auf andere spricht es erstaunlich fein an, und schließlich ist manches, was wir zu hören glauben, nur eine Täuschung. Seit langem verstehen es die Komponisten, mit den Klängen der traditionellen Instrumente gezielt einen bestimmten Eindruck beim Zuhörer zu wecken – sei es, daß Töne kontrastieren oder einer den anderen maskiert. Wer Computermusik komponiert, weiß, warum eine papierene Lautsprechermembran wie eine Glocke oder Trompete klingen oder sogar „sprechen" kann wie mit einer menschlichen Stimme. Und schließlich bietet der Computer ganz neue Möglichkeiten, auch täuschende Klänge zu erzeugen.

Wenn wir Musik machen oder hören, sind daran viele Körperfunktionen beteiligt, vor allem natürlich unsere Sinne und die Verarbeitungsmechanismen des Nervensystems und des Gehirns. Wir wissen recht wenig darüber, wie das alles funktioniert, und unsere Entdeckungen enthüllen oft nur dieses Unwissen.

Mediziner versuchen bisweilen auf recht merkwürdige Weise zu erklären, warum manche Menschen *unmusikalisch* sind. indem sie diverse organische Ursachen im Gehirn anführen – etwa wenn jemand keine Melodie nachsummen kann, Noten nicht beherrscht oder bekannte Stücke nicht erkennt. Allerdings gibt es auch verläßliche Studien über organische Defekte, durch die ganz spezielle Fertigkeiten beeinträchtigt werden können. Wenn Töne nicht mehr in der richtigen zeitlichen Reihenfolge wahrgenommen werden oder Schwierigkeiten entstehen, Gleichzeitigkeit oder Dauer von Klängen einzuschätzen, und wenn jedes rhythmische Empfinden fehlt, geht das bisweilen mit Funktionsschwächen der linken, „dominanten" Gehirnhälfte einher, in der bei Rechtshändern unter anderem das Sprachzentrum liegt. Es wäre aber zu kurz gegriffen, wollte man solche Mängel an musikalischem Urteilsvermögen immer gleich mit neurophysiologischen Ursachen oder gar Sprachstörungen verknüpfen.

Man weiß jedoch, daß Rechtshänder mit schweren Schäden in der linken Hirnhälfte Schwierigkeiten haben, Worte zu sprechen und zu verstehen. Roger Sperry (und andere nach ihm) untersuchte Patienten, denen man aufgrund medizinischer Indikation die Verbindung zwischen den Hirnhemisphären durchtrennt hatte. Aufgrund dieser Untersuchungen kennt und versteht man die Zusammenhänge heute besser. Die rechte Hemisphäre ermöglicht bereits allein eine elementare Sprache, und wenn es darum geht, schwierige geometrische Probleme zu lösen, übertrifft sie die linke sogar. Diese Dominanz ist auch bei einigen anderen Fähigkeiten lange bekannt, aber man hat sie immer noch nicht völlig verstanden.

Wie steht es hier mit der Musikalität? Darüber gehen die Meinungen auseinander. Seit langem weiß man, daß ein Mensch die Fähigkeit zu singen oder ein Lied zu pfeifen verlieren kann (nicht muß!), wenn seine linke Hemisphäre geschädigt ist. Denn 1966 stellte ein Patient, dessen linke Hemisphäre vollständig entfernt war und der nicht mehr sprechen konnte, unter Beweis, daß er bekannte Lieder mit nur wenigen Artikulationsfehlern singen konnte.

All das zeigt, wie komplex die Mechanismen sind, die uns befähigen, wenn wir Musik spielen oder hören. Inzwischen kann man mit Hilfe radioaktiv markierter Substanzen sogar verfolgen, in welchen Bereichen des Gehirns die neuronale Aktivität zunimmt. Die Testperson bekommt diesen Marker ins Blut injiziert. Er wird dann verstärkt in jenen Teilen des Gehirns aufgenommen, die beim Musikhören oder -spielen aktiviert werden. Man hat das zum Beispiel bei Probanden untersucht, die Unterschiede oder Ähnlichkeiten zwischen zwei Tonfolgen herausfinden sollten. Einige lösten die Aufgabe, indem sie sich die einzelnen Töne als Melodie ins

Gedächtnis riefen, dabei war dann die rechte Hemisphäre stärker beteiligt. Andere Testhörer ordneten die Töne im Geiste auf den Linien eines Notensystems an, was zu einer höheren Aktivität in der linken Gehirnhälfte führte. Schon diese einfache musikalische Aufgabe wurde individuell verschieden in Angriff genommen, was sich in der Gehirnaktivität manifestiert.

Wie immer dieser Befund im einzelnen zu interpretieren sein mag, fest steht, daß Musik auf vielfältige und komplizierte Weise wahrgenommen und von jedem Hörer etwas anders gehört wird.

Besonders interessant – und frappierend – sind hier etliche musikalische Täuschungen, an denen einige Wahrnehmungsleistungen deutlich werden. Im Oktober 1975 beschrieb Diana Deutsch solche Täuschungen im *Scientific American*, darunter auch das folgende Beispiel. Über Kopfhörer wurden beiden Ohren Oktavsprünge vorgespielt, wobei das linke Ohr den hohen Ton stets in dem Moment hörte, wenn beim rechten gerade der tiefe erklang. Aus diesen gegenläufigen Melodien macht die Wahrnehmung bei den meisten Rechtshändern etwas völlig anderes. Sie hören die hohen Töne immer im rechten Ohr und die tiefen entsprechend im linken. Aber gerade zu dem Zeitpunkt, an dem man links einen tiefen Ton zu hören meint, wird er über den rechten Kopfhörer eingespielt. Diana Deutsch führt das darauf zurück, daß nur ein Ohr (in diesem Fall das rechte) die Tonhöhe wahrnimmt, lokalisiert wird der Klang dann über einen getrennten Mechanismus, der offenbar mit der höheren Stimmung zusammenhängt.

Bei dieser musikalischen Täuschung von Diana Deutsch werden über Kopfhörer zwei verschiedene Tonfolgen abgespielt, wobei am rechten Ohr genau in dem Moment ein hoher Ton auftritt, wenn am linken ein tiefer zu hören ist (A). Wie das Ganze für den Hörer erscheint, zeigt die Notation in B. Die meisten Menschen (wenn auch nicht alle) meinen, rechts nur hohe und links nur tiefe Töne zu hören.

Ein anderes Beispiel von Diana Deutsch dürfte besonders Musiker interessieren, denn diese Täuschung bringt Ordnung in ein scheinbares Durcheinander von Noten. Die Sprünge im Notenbeispiel unten auf der rechten Seite werden wie zwei gegenläufige Tonleiterbewegungen empfunden.

Was immer hinter solchen Hörphänomenen steckt, sie sollten jeden Computermusiker vor allzu eifrigem Überschwang warnen. In der traditionellen Musik sind solche Effekte durch die zweikanalige Wiedergabe nicht vorgesehen. Aber andere Täuschungen trifft man häufiger an, und gerade hier lohnt es sich, mit dem Computer genauer nachzuforschen.

Dazu hat David L. Wessel 1978 das folgende Experiment beschrieben. Bei gebrochenen Dreiklängen wechselte die Klangfarbe der Töne – das ist im oberen Notensystem rechts anhand verschiedener Kreuze angedeutet, die die üblichen Notenköpfe ersetzen.

Solange die Klangfarben übereinstimmen oder nur geringfügig abweichen, hört man die aufsteigende Tonfolge, wie sie im System A notiert ist. Sobald der Unterschied größer wird, entsteht der Eindruck getrennter Stimmen (B). In jeder davon wiederholen sich A, E und H, allerdings zeitlich versetzt. Inzwischen wurden diese *Strömungseffekte* genauer untersucht, insbesondere auch von

Wessel und Albert S. Bregman. Es hat sich herausgestellt, daß Töne vorgegebener Höhe nach ihrem Frequenzspektrum zu einer melodischen Folge verbunden werden, während das Einschwingverhalten keine Rolle spielt.

Da die Klangfarbe entscheidend für diesen Effekt ist, betrachtete Wessel sie als eigenständige musikalische Größe, die ihrem Rang nach der Tonhöhe oder Lautstärke gleichgestellt ist. Er knüpfte an die Arbeiten von Grey zur dreidimensionalen Darstellung von Klangfarben an, um sie systematisch in einem „Klangfarbenraum" zu ordnen. Können wir also Musik machen, indem wir einfach vorgezeichneten Wegen in einem solchen Raum folgen? Tatsächlich benutzt Chowning in seinen Stücken *Turenas* und *Phōnē* den Wechsel der Klangfarbe als ein wirkungsvolles Gestaltungsmittel, und ähnliches gilt für einige Kompositionen von Risset.

Auch in der traditionellen Musik machen sich Komponisten die Tatsache zunutze, daß eine Folge von Tönen mit wechselnden Klangfarben oft wie zwei eigenständige Stimmen wirkt. Diesen Kunstgriff setzt etwa Bach in seinen Solostücken für Violine geschickt

Die Klangfarbe erzeugt bei manchen aufsteigenden Tonfolgen eine Täuschung, wie sie David Wessel beschrieben hat. Die verschiedenen Kreuze in den Notensystemen kennzeichnen variable Klangfarben. Solange sie bei allen Tönen gleich sind, hört man gebrochene Akkorde aus aufsteigenden Tönen (A). Weichen die Klangfarben genügend voneinander ab, so hört man zwei Stimmen, die zeitlich versetzt jeweils eine absteigende Folge aus drei Tönen wiederholen.

Eine andere musikalische Täuschung von Diana Deutsch. Im Notensystem A stehen wieder die tatsächlich überspielten Signale und in B der wahrgenommene Eindruck. Das rechte Ohr hört eine ab- und dann wieder aufsteigende Tonfolge, während eine ähnliche (halbe) Tonleiter beim linken Ohr gegenläufig auf- und wieder absteigt.

Ciaccona

Bachs *Ciaccona* aus seiner vierten Sonate für Violine *solo* schreibt am Anfang Akkorde mit vier Tönen vor, obwohl ein Geiger mit Doppelgriffen höchstens zwei Noten gleichzeitig spielen kann. Diese Akkorde können nur „angenähert" werden, indem man sie *arpeggio*, als rasch aufeinanderfolgende Töne, spielt. Ab Takt 10 hört man drei Stimmen. Unser Ohr kann sie trennen, weil sie nur in kleinen Intervallen fortschreiten und sich nicht kreuzen. Zusätzlich kann man jede Stimme durch Lautstärke und Klangfarbe hervorheben.

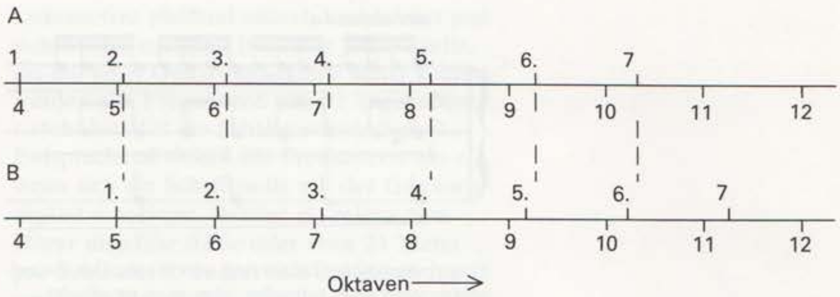
ein. Man kann das sehr gut bei der *Ciaccona* hören, von der auf dieser Seite ein Auszug wiedergegeben ist. Die Stimmen sind durch die Tonhöhen deutlich getrennt; das entspricht der Beobachtung von Diana Deutsch. Ein guter Geiger wird die Akkorde, welche *arpeggio* als rasch aufeinanderfolgende Töne gespielt werden müssen, durch verschiedene Klangfarben so gestalten, daß getrennte Stimmen hervortreten, das entspricht Wessels Täuschungsbeispiel.

In der neueren Musik werden melodische Linien häufig durch große Intervallsprünge unterbrochen, und manche Komponisten verlangen, daß aufeinanderfolgende Töne einer melodischen Figur von verschiedenen Instrumenten gespielt werden. Aber unser Ohr wehrt sich gleichsam dagegen, große Tonsprünge wahrzunehmen, und bringt bevorzugt Töne gleicher Klangfarbe in einen melodischen Zusammenhang. Deshalb stellt eine extreme Stimmführung hohe Anforderungen an die Hörer und vor allem auch an die Musiker. Traditionell werden große oder wiederholte Sprünge nur dann eingesetzt, wenn man ganz besondere Effekte erreichen will. Berühmte Beispiele dafür sind die beiden *Königin der Nacht*-Arien aus Mozarts *Zauberflöte* oder das Hornsignal in *Non piu andrai'* aus *Figaros Hochzeit*. Verschiedene Klangfarben wurden gewöhnlich genutzt, um verschiedene Stimmführungen voneinander abzusetzen.

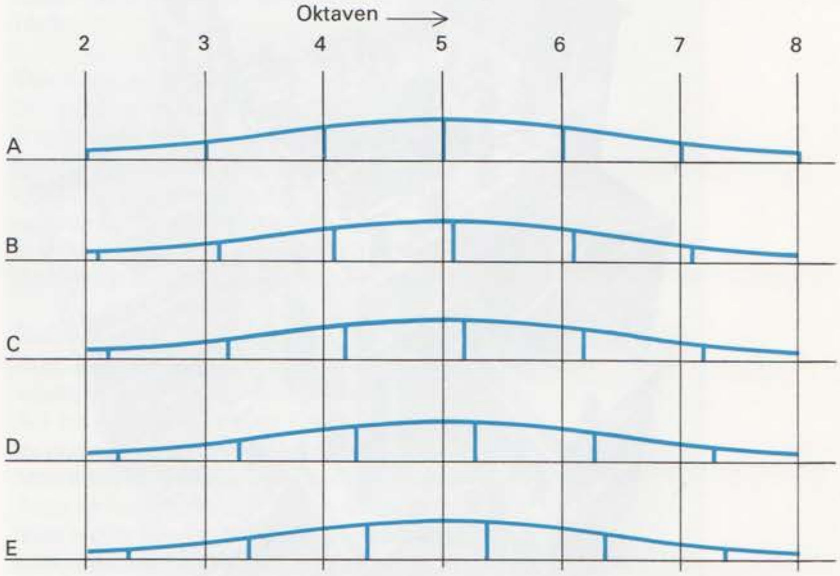
Mit einem Computer kann man außer den genannten Täuschungen auch völlig neuartige Effekte erzielen. Risset hat zum Beispiel einen Ton auf Band aufgenommen, der erstaunlicherweise *tiefer* klingt, wenn sich die

Bandgeschwindigkeit verdoppelt (von 9,5 Zentimeter pro Sekunde auf 19 Zentimeter pro Sekunde). Aber wie kann ein Ton tiefer werden, wenn sich die Frequenzen aller Sinuskomponenten erhöhen?

Schauen wir uns dazu die Frequenzen der Partialtöne im „Oktavmaßstab“ oben auf dieser Seite an. Teil A der Abbildung zeigt die Frequenzabstände für eine Bandgeschwindigkeit von 9,5 Zentimetern pro Sekunde. Alle Partialtöne sind durch 1,1 Oktaven von ihren Nachbarn getrennt. Steigt die Geschwindigkeit auf 19 Zentimeter pro Sekunde, so verdoppeln sich die Frequenzen, und alle Partialtöne verschieben sich um eine Oktave nach oben. Der erhöhte erste Partialton liegt jetzt (in der B-Skala) etwa eine Zehntel Oktave *unter* der Frequenz, die ursprünglich der zweite Partialton (in der A-Skala) hatte, dasselbe Verhältnis ergibt sich für den vierten (A) und fünften Partialton (B), und so fort. Auf diese Weise werden praktisch alle Partialtöne durch einen etwas tieferen „ersetzt“, die Tonhöhe scheint um eine Zehntel Oktave nach unten verschoben. Unser Gehör nimmt einfach nicht wahr, daß es für den ursprünglich schwachen ersten Partialton keinen Ersatz gibt und zusätzlich ein neuer, aber ebenfalls schwacher Partialton auftaucht, der eine Oktave über dem zuvor höchsten Partialton liegt.



Ein Ton kann tiefer klingen, obwohl sich alle beteiligten Frequenzen erhöhen. In diesem Beispiel von Risset sind die Frequenzen des Ausgangstons über einer Oktav-Skala aufgetragen (A), der Abstand der Partialtöne untereinander beträgt 1,1 Oktaven. Wenn dieser Ton bei einer Bandaufnahme mit doppelter Geschwindigkeit abgespielt wird, verdoppeln sich natürlich alle Frequenzen (B). Man hört dennoch einen tieferen Ton, weil die meisten Partialtöne gleichsam durch niedrigere Frequenzen ersetzt werden – die jeweils eine Zehntel Oktave nach unten verschoben sind. Das Ohr bemerkt nämlich nicht, daß der ursprünglich erste Partialton verschwindet und ein neuer, hochfrequenter auftaucht.

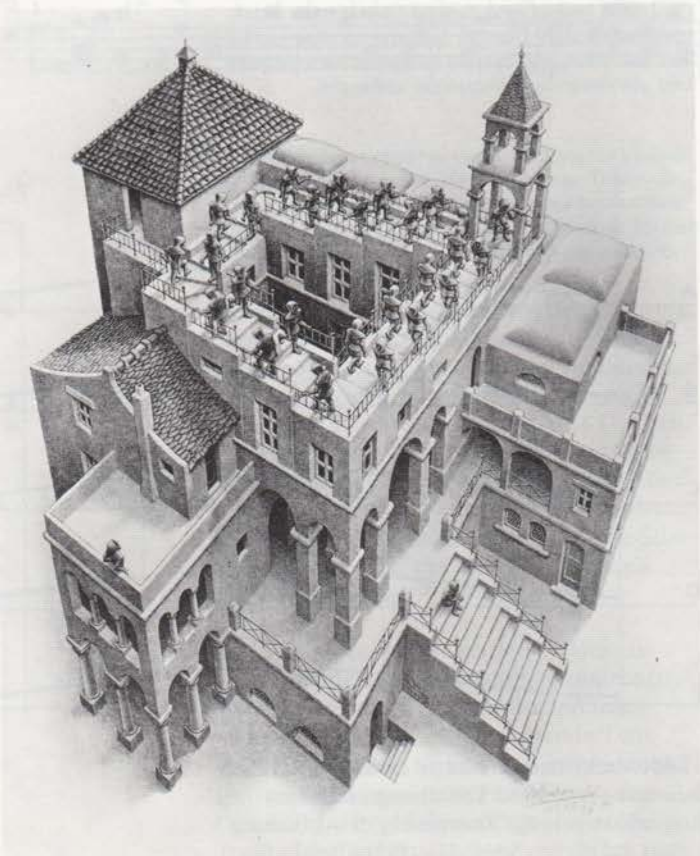


Der scheinbar unendlich steigende Ton von Shepard. Die Partialtöne folgen hier im Abstand einer Oktave, und ihre Amplituden werden durch eine fest vorgegebene Einhüllende bestimmt. Wenn alle Partialtöne gleichsam unter der Einhüllenden hinweg um einen Halbton nach oben verschoben werden, empfinden wir die Stimmung entsprechend höher (B). Nach zwölf Halbtonschritten (von denen hier nur die ersten vier gezeigt sind) wird wieder die anfängliche Situation A erreicht, weil die tiefen Partialtöne stets neu ergänzt werden. Von A fortschreitend beginnt der Zyklus wieder von vorn, und wir empfinden ihn als eine endlos ansteigende Tonhöhe.

Vor Risset hatte der Psychologe Roger Shepard mit Hilfe eines Computers eine ganz ähnliche Täuschung erreicht. Es handelte sich dabei um eine Tonfolge, die sich in Halbtonschritten scheinbar endlos nach oben bewegte. Wie diese Täuschung zustande kommt, zeigen die Kurven in der Abbildung unten auf dieser Seite. Die Einhüllende für

Eine rhythmische Täuschung von Risset. Der Grundschlag wird zwar schneller, aber man empfindet das als Verlangsamung des Rhythmus. Die kurzen Sechzehntel (oben) werden durch ein *decrescendo* allmählich ausgeblendet, während die längeren Achtel (Mitte) und zuletzt die Viertel (unten) in den Vordergrund treten.

„Treppauf–Treppab" von Maurits Escher



die Intensitäten der Partialtöne wurde bei Shepards Ton unverändert beibehalten. Mit jedem Halbtonschritt nach oben (Schritte B bis E) wurden die Intensitäten der verschobenen Partialtöne an die Vorgabe der Einhüllenden angepaßt. Die oberen Partialtöne schwächen sich also etwas ab, wenn die Tonhöhe steigt, und die unteren werden fast unmerklich nachgeschoben. Nach zwölf Schritten wird wieder der ursprüngliche Zustand (A) erreicht, die Tonhöhe kann so weiter steigen, obwohl sich eigentlich nichts verändert.

Statt in Halbtonschritten die Stimmung zu erhöhen, kann man die Tonhöhe auch kontinuierlich und scheinbar endlos nach oben oder unten verändern. Diesen Effekt setzte Risset in der Musik zu Pierre Halets Schauspiel *Little Boy* ein. Es handelt von Eatherly, dem Piloten eines Aufklärungsflugzeugs, der in einem Alptraum den Abwurf der Hiroshimabombe erlebt. Er hört die Bombe mit einem Ton fallen, der scheinbar endlos tiefer wird.

Risset hat auch Klänge erzeugt, bei denen sich die Einhüllende zu höheren Frequenzen hin verschiebt, wohingegen die Partialtöne selbst tiefer werden. Während die Tonhöhe sinkt, wird die Klangfarbe immer heller und schriller. Ähnlich paradox mutet die Tonhöhe bei einigen glockenähnlichen Klängen an, die Risset aus nicht-harmonischen Partialtönen zusammensetzte. Der Hörer orientiert sich hier an einer der beiden stärksten Sinuskomponenten.

Von Risset und Kenneth Knowlton (von den Bell-Laboratorien) gibt es auch interessante rhythmische Täuschungen. Obwohl der Grundrhythmus immer schneller wird, scheint er sich zu verlangsamen. So etwas kann beispielsweise passieren, wenn Sechzehntel-, Achtel- und Viertelnoten *accelerando*, mit wachsendem Tempo, gespielt werden, aber die Lautstärke der Sechzehntel im *decrescendo* verringert wird, während sie bei den Vierteln stetig steigt und bei den Achteln erst zu- und dann abnimmt. Dann bestimmen schließlich nur noch die Viertel das Tempo.

Zu den eindrucksvollsten Täuschungen der Computermusik gehören Klänge, die geisterhaft durch den Raum wandern. Wir hatten bereits davon gesprochen, daß Schallquellen in der Stereowiedergabe regelrecht raumfüllend wirken können. In John Chownings *Turenas* wirbeln die Klänge über die Köpfe der Hörer; dieser Effekt kommt besonders überzeugend auf einer Vierspuranlage zur Geltung, deren Lautsprecher an den Ecken eines Quadrats postiert sind. Anders als bei der quadrophonischen Wiedergabe von Instrumentalmusik kommt es hier nicht entscheidend darauf an, wo der Hörer sitzt.

Mit dem Computer lassen sich Richtung, Entfernung und Bewegung der Schallquelle unabhängig voneinander simulieren. Chowning bestimmte die Richtung (Azimutwinkel), indem er die Intensität in einem entsprechenden Verhältnis auf zwei Lautsprecher verteilte und dafür sorgte, daß die Signale dieselbe Phase oder Zeitverzögerung hatten.

Der Nachhall, der zum direkten Schall hinzukommt, läßt eine Schallquelle näher oder weiter entfernt erscheinen. Aus der Nähe hören wir vor allem den direkten Schall – und entsprechend wenig Nachhall. Die Amplitude des direkten Schalls (sprich. der Schalldruck) ist umgekehrt proportional zum Abstand, so daß sich die Intensität bei wachsender Entfernung mit dem Kehrwert des Abstands verringert. In kleinen Räumen hat der Nachhall überall annähernd die gleiche Intensität, in großen wird sie dagegen etwas abnehmen, wenn man sich von der Schallquelle entfernt. Chowning hat die Intensität des Nachhalls umgekehrt proportional zum Abstand von der Schallquelle vermindert.

Damit der Eindruck einer langsam durch den Raum schwebenden Schallquelle entsteht, genügt es, ihre (scheinbare) Entfernung und Richtung zu verändern. Schnellere Bewegungen lassen sich mit Hilfe des Dopplereffekts darstellen. Dadurch scheinen die Frequenzen einer Schallquelle, die auf uns zukommt, für uns erhöht, umgekehrt werden sie niedriger, wenn die Bewegung von uns wegführt. Man kann das leicht feststellen, wenn sich eine Lokomotive pfeifend nähert, vorbeifährt und sich wieder entfernt. Bei einer Schallquelle, die mit einer Geschwindigkeit v näher kommt, werden alle Frequenzen um v/c angehoben, c steht hier für die Schallgeschwindigkeit. Entsprechend sinken die Frequenzen um v/c, wenn sich die Schallquelle mit der Geschwindigkeit v entfernt. Beträgt sie relativ zum Hörer ungefähr $0{,}06c$ oder etwa 21 Meter pro Sekunde, so ändert sich die Stimmung um einen Halbton.

Um Entfernungen darzustellen, braucht man künstlichen Nachhall. Zum ursprünglichen Computerklang werden zeitlich verzögerte Anteile hinzugemischt. Es hat einigen Aufwand gekostet, bis dieser Nachhall natürlich wirkte und das wahrgenommene Klangspektrum nicht mehr veränderte. Das gelingt, wenn Nachhall und Originalklang dasselbe Leistungsspektrum aufweisen – wie es Manfred Schroeder erstmals beschrieben hat. Man kann aber ebensogut das Spektrum sehr stark mit der Frequenz variieren, so daß die mittlere Energie des Nachhalls innerhalb einer Frequenzgruppe annähernd gleich bleibt.

Die Illusion einer bewegten Schallquelle ist bei quadrophonischen Anlagen besonders frappierend, aber auch mit nur zwei Lautsprechern möglich. Hier scheint die Schallquelle nicht nur zwischen den beiden Lautsprechern hin und her zu wandern, sondern man könnte meinen, sie stünde in keiner Beziehung zur Position der Lautsprecher.

Daß Schall aus einer unerwarteten Richtung kam, habe ich zu meiner eigenen Überraschung in ganz alltäglichen Situationen erlebt. Als ich einmal bei einem Freund eine Aufnahme mit recht gewöhnlicher elektronischer Musik hörte, die sehr viele hohe, zirpende Töne enthielt, schienen einige davon links oder rechts von beiden Lautsprechern zu entstehen oder sogar aus dem hinteren Teil des Raums zu kommen. Ein anderes Mal hörte ich im Radio eine Stereosendung mit hochfrequentem Vogelgezwitscher, dessen Richtungen zum Teil völlig losgelöst von der Basis beider Lautsprecher schienen.

Möglicherweise kommt der räumliche Klangeindruck hier durch Zufall auf ähnliche Weise zustande, wie es im perfekten Stereosystem mit Kunstkopfaufnahmen erreicht wird. Es kann aber auch einfach daran liegen, daß sich die direkten Schallwellen von den Lautsprechern mit den reflektierten Wellen von Wänden und Decke so überlagern, daß wir das resultierende Muster räumlich interpretieren. Vielleicht laufen dann beide Erklärungen im Grunde auf dasselbe hinaus. Wie dem auch sei, mit einem Zweispurstereosystem kann man hochfrequente Klänge aus fast allen Richtungen ertönen lassen, und ich finde, man sollte davon in der Computermusik Gebrauch machen.

Hier gibt es wirklich sehr reizvolle und eigentümliche Effekte. So führte mir Malcolm Singer in Stanford Klänge vor, die aus einem einzelnen Lautsprecher ausbrachen und schließlich meinen Kopf umhüllten. Der Ton war anfangs tief und wurde immer höher. Was ich tatsächlich gehört habe, will ich erst gar nicht näher zu erklären versuchen. Ich möchte nur darauf hinweisen, daß die Ohrmuscheln entscheidend beteiligt sind, wenn wir Klänge von oben oder unten und vielleicht auch von vorne oder hinten hören. Diesen räumlichen Eindruck können sie nur dadurch bewirken, daß sie den hochfrequenten Teil des dort eintreffenden Schallspektrums verändern; anhand dieser Veränderungen könnten wir im Prinzip feststellen, ob Klänge von oben, unten, vorn oder hinten kommen. Demnach müßte es auch möglich sein, hochfrequente Spektren von Klängen gezielt zu verändern, so daß sie den Eindruck erwecken, die Schallquelle würde sich bewegen.

Egal, welche Effekte man mit einem Computer verwirklicht, sie sollen natürlich in erster Linie gut klingen. Die ersten Computertöne wirkten freilich noch ziemlich „elektronisch" und „künstlich" Aber das hat sich längst geändert, denn gerade der Computer hat enorm dazu beigetragen zu verstehen, was einen guten Instrumentalklang ausmacht. Mit ihm kann man Musikinstrumente täuschend echt simulieren, so daß der synthetische Klang vom Original nicht mehr zu unterscheiden ist. Der Computer hat aber auch Klänge möglich gemacht, wie man sie vorher noch nie hören konnte, denn auf ihm kann man harmonische und anharmonische Partialtöne beliebig verändern – im Gegensatz zu allen traditionellen oder irgendwelchen neuen mechanischen Instrumenten. Der Computer kann Klänge ineinander übergehen lassen. Glockentöne zerfließen oder verwandeln sich in Singstimmen, eine Stimme wird zum Gebrüll eines Löwen und dergleichen. Oder es schweben Instrumente, die von jeder Materie losgelöst scheinen, geisterhaft durch den Raum.

All diese Effekte spiegeln Erfahrungen wider, die man bei Analyse und Synthese von Tönen und Klängen gesammelt hat. Wie sie dann wahrgenommen werden, ist freilich noch nicht vollständig geklärt. So bleibt es einstweilen rätselhaft, ob wir Töne ähnlich *kategorisch* wahrnehmen wie *Phoneme*, die das Alphabet der (gesprochenen) Sprachlaute bilden. In allen Sprachen gibt es spezifische Phoneme, die für die Konsonanten und Vokalklänge der deutschen Sprache ganz anders klingen als beim amerikanischen oder britischen Englisch. Phoneme sind keine physikalisch meßbaren Klänge, sondern unsere Wahrnehmung davon. Wenn wir eine Schallwelle als *b*, *g*, *k*, *o* oder *n* erkennen, dann muß sie bei verschiedenen Wörtern keineswegs gleich aussehen. Gewöhnlich ist die Variationsbreite bei jedem Phonem jedoch klein genug, um es unabhängig vom jeweiligen Zusammenhang richtig zu erkennen. So sind „Guß" und „Kuß" kaum zu verwechseln, obwohl *g* und *k* sehr ähnlich klingen.

Bei den künstlichen Sprachlauten eines Computers können wir die Eigenschaften einer Schallwelle so ändern, daß ein Phonem ganz allmählich in ein anderes übergeht. Hören wird man dann aber immer nur eines davon, und nicht etwa irgendeine Übergangsform dazwischen. Dieses Entweder-Oder meinen wir, wenn wir von kategorischer Wahrnehmung sprechen. Man entscheidet sich für etwas Bestimmtes, wenn auch nicht notwendig das Richtige. Zum Beispiel kann man bisweilen ein undeutlich gesprochenes *g* als *k* hören oder umgekehrt, aber niemals etwas dazwischen – jedenfalls kein Phonem der deutschen oder englischen Sprache.

Gibt es auch bei Tönen so etwas wie eine kategorische Wahrnehmung? Das scheint nahezuliegen, wenn man bedenkt, daß jeder erfahrene Musiker eine Violine von einer Bratsche oder ein Horn von einem Saxophon unterscheiden kann. Nun hat John Grey mit dem Computer Töne erzeugt, deren Klangfarbe genau zwischen zwei Instrumenten lag – im dreidimensionalen Klangfarbenraum (wie auf Seite 162) nahmen die entsprechenden Würfel dann eine Mittelposition ein. Solche Töne wurden von den Zuhörern jedoch mit keinem der beiden Instrumente in Verbindung gebracht. Der Klang hatte von jedem etwas und wirkte eher wie eine Mischung. Das widerspricht einer kategorischen Wahrnehmung, die nur ein Entweder-Oder kennt. Andererseits gibt es im Hinblick auf die Tonhöhe gewisse Parallelen zur kategorischen Wahrnehmung. Auch Musiker verschätzen sich manchmal in der Tonlage, und zwar genau um eine Oktave. Auch Tonleitern werden unabhängig von den Frequenzdifferenzen zwischen reiner, pythagoräischer oder gleichschwebend temperierter Stimmung kategorisch erkannt. Für den erfahrenen Musiker ändert sich die Note nicht, wenn jemand unsauber singt oder spielt, vielmehr ist sofort klar, daß der Ton zu hoch oder zu tief klingt. Musiker registrieren hier offenbar etwas Ähnliches wie „Tonhöhen-Phoneme" mit Akzent durch falsche Intonation. Auch Akkorde nimmt der geübte Hörer kategorisch wahr, egal, auf welchem Instrument sie gespielt werden.

In der traditionellen Musik unseres Kulturkreises sind nur bestimmte Tonhöhen vorgesehen (oder erlaubt) – ähnlich wie es in jeder Sprache nur bestimmte Phoneme gibt. Wenn also Tonhöhen oder Akkorde kategorisch wahrgenommen würden, wäre das keineswegs überraschend. Tatsächlich haben wir so etwas im Zusammenhang mit Kadenzen bereits beim Dominantseptimakkord gesehen. Selbst wenn dieser Akkord künstlich „konsonant" gemacht wird, bleibt er für den Musiker eindeutig erkennbar.

Auch bei der Klangfarbe vermute ich so etwas wie eine kategorische Wahrnehmung, die dann freilich schwächer ausgeprägt sein dürfte als bei der Sprache. Solange wir nur einen kleinen Teil des dreidimensionalen Klangfarbenraums durchmessen, ist von dieser Art kategorischer Wahrnehmung noch nichts zu merken. Wenn es hier überhaupt Kategorien gibt, dann dürften sie wohl kaum zwischen trompetenähnlichen oder posaunenähnlichen Klängen trennen, sondern vielmehr den Charakter von Rohrblatt- oder Blechblasinstrumenten (mit Kesselmundstück) als Familien kennzeichnen. Andere Kategorien könnten den Klang gestrichener, gezupfter oder angeschlagener Saiten charakterisieren oder wiedergeben, ob ein Schlag glocken-, gong- oder trommelähnlich oder aber wie bei Holz klingt. Wir erkennen im Alltag ja auch viele natürliche Geräusche und können oft sogar unterscheiden, was für ein Material schwingt und wie es dazu angeregt wurde.

Bietet eine kategorische Wahrnehmung in der Musik Vorteile oder ist sie eher hinderlich? Bei Tonleitern oder Akkorden hilft sie zweifellos, Zusammenhänge zu erkennen, aber andererseits macht sie es gerade dadurch schwerer, sich auf ungewohnte Klangfarben einzustellen. Das betrifft auch neue Tonleitern oder Akkorde, die wir deswegen vielleicht nicht mehr als solche wahrnehmen. So ist es jedenfalls bei unserer Muttersprache, deren Phoneme wir so gründlich gelernt haben, daß wir sie nur kategorisch unterscheiden und von den weit vielfältigeren Lauten dazwischen nichts mehr hören. Für Erwachsene ist es fast unmöglich, Sprachgewohnheiten rückgängig zu machen. So ist es für einen Japaner sehr schwer, *r* anders als *l* auszusprechen, wenn er es nicht bereits als Kind gelernt hat. Vor ganz ähnlichen Schwierigkeiten stehen wir bei neuartigen Klängen in der Musik. Glücklicherweise sind sie aber nicht unüberwindlich.

Seit Helmholtz im 19. Jahrhundert mit einfachsten Mitteln wahre Wunderdinge vollbrachte und die Grundlagen zum Verständnis von Harmonie und Klang legte, haben sich nicht nur die Methoden der Klanganalyse geändert, sondern eben auch diejenigen der Klangerzeugung. Aus der Telefontechnik entwickelte sich der Computer als neues Musikinstrument. Er sprengt viele Fesseln herkömmlicher Klangquellen, weil er gleichsam alle Musikinstrumente in sich vereinigen kann, indem er sie nachahmt. Darüber hinaus lernen wir damit jetzt mehr über musikalische Effekte – ob es sich nun um alte oder völlig neuartige Klänge handelt. Aber wozu sollten wir das alles nutzen?

Einige Komponisten sahen sich veranlaßt, subtilere Klangfarben einzubeziehen – und das ist meines Erachtens weitaus fruchtbarer, als mit übertrieben formalen Klangmustern zu arbeiten oder um jeden Preis „spontan“ sein zu wollen und herumzuimprovisieren.

Natürlich haben Spontaneität und Regeln gleichermaßen Platz in der Musik. Und die Vorstellung, einem Bach, Mozart oder Debussy beim Improvisieren zuzuhören, ist ungemein faszinierend. Aber zum Komponieren gehören einfach auch profundes Wissen und handfeste Arbeit, und wahrscheinlich ist das, was die großen Meister in Noten festgehalten haben, der bessere Teil ihrer Musik.

Solche Werke können Ansporn und Inspiration, aber auch eine Last der Vergangenheit sein, die neue Wege für die Zukunft beschwerlicher macht. Wie kann sich ein Musiker davon befreien? Naturwissenschaftler haben es hier viel leichter, sich vom Genius eines Newton oder Einstein nicht entmutigen zu lassen, denn sie verfügen über einen erweiterten Schatz an Erfahrungen und Kenntnissen. Egal, welchen absoluten Wert man Wissenschaft beimißt, erfolgreich ist sie nur, solange sie sich weiter entwickelt und nach Neuem sucht.

Könnte es nicht auch in der Musik so sein? Damit neue Musik Erfolg hat, muß sie so gehört und verstanden werden, wie sie der Komponist gemeint hat. Sie muß beim Zuhörer ankommen und sein Interesse wecken. Dazu können Forschung und Wissen über Klänge und Töne beitragen. Das Entscheidende entzieht sich freilich der Wissenschaft: Genie und Musikalität.

Anhang

A: Terminologie

Wenn Naturwissenschaftler und Ingenieure über meßbare physikalische Eigenschaften sprechen, dann drücken sie das in unzweideutigen und wohldefinierten Größen aus. So ist *Zeit* das, was man mit einer Uhr messen kann, entsprechend wird *Masse* mit einer Balkenwaage oder *Länge* mit einem Maßstab bestimmt. Anhand der Meßvorschriften ist klar, was gemeint ist.

Viele physikalische Größen sind aber nicht annähernd so einfach und lassen sich nicht mit wenigen Worten erklären. Um sie zu verstehen und auch richtig anzuwenden, muß man sich eingehender mit ihnen beschäftigen.

Es führt jedenfalls meist nicht viel weiter, wenn man versucht, solche Größen einfach in umgangssprachlichen Worten zu definieren. Im täglichen Leben und in der Wissenschaft wächst die Einsicht erst mit der Erfahrung. Ich habe jedoch versucht, in diesem Buch eine allgemeinverständliche Sprache zu gebrauchen, auch wenn sie nicht ganz eindeutig ist.

In der Musik haben wir es mit vielen schwierigen Zusammenhängen zu tun, die in der Fachsprache der Musiker nicht unbedingt verständlicher werden. Auch die Terminologie der Psychologen hilft kaum weiter. Die Hauptschwierigkeiten liegen wohl in der Materie selbst. Es fehlt hier eher an Erfahrung als an Worten. Definitionen habe ich, wenn sie denn unumgänglich waren, in den Textzusammenhang gestellt. Einige Fachausdrücke seien aber trotzdem noch einmal in einer Kurzdefinition für den Leser zusammengefaßt.

Klang oder *Schall* ist das, was wir hören, wenn eine *Schallwelle* unser Ohr erreicht hat. Sie ist nur der *Reiz*, der – wie die Psychologen sagen – eine bestimmte *Wahrnehmung auslöst*. Nach dieser Definition kann es keinen Klang oder Schall geben, solange niemand zuhört (oder alle Anwesenden taub sind). Dann existieren höchstens Druckschwankungen in der Luft, die die Schallwelle ausmachen.

Noten sind Zeichen im Notensystem, die man als *Töne* spielt. Um Mißverständnisse zu vermeiden, sollte man nur den Klang, den man beim Spielen einer Note hört, als Ton bezeichnen.

Ein *Ton* ist ein Klang mit einer eindeutigen *Stimmung* oder *Tonhöhe*. In gewissem Sinn kann man auch bei einer Glocke von einem Ton sprechen, aber nicht mehr bei einer Trommel. Charakteristisch für einen Ton ist die *Peridiozität* der Schallwellen, bei denen sich die Luftdruckschwankungen zyklisch wiederholen. Beim *reinen Sinuston* schwankt der Luftdruck sinusförmig. Musiker sagen manchmal, ein Instrument oder Spieler habe einen schönen Ton, und meinen damit eigentlich die Klangqualität. Wir haben diese Ausdrucksweise vermieden.

Eine *Tonhöhe* haben nur periodische oder annähernd periodische Klänge. Sie ist fest mit der Periodizität oder Frequenz der Schallwelle verknüpft. Das eingestrichene A (der Kammerton, A′) schwingt mit einer Frequenz von 440 Schwingungen in der Sekunde (440 Hertz). Die Frequenz ist ein (quantitatives) Maß für die Tonhöhe.

Das Wort *Lautstärke* wird nicht immer eindeutig gebraucht. Genaugenommen läßt sie sich stets nur relativ zur Lautstärke eines anderen Tons angeben. Es besteht allerdings ein Zusammenhang mit der *Intensität* und – weniger direkt – der Frequenz der Schallwelle. Die Intensität ist eine eindeutige physikalische Größe, welche in Watt pro Quadratmeter gemessen wird.

Das absolute Vergleichsmaß für Lautstärken ist die *Lautheit*, die in Einheiten von Sonen gemessen wird.

Neben Tonhöhe und Lautstärke spielt in der Musik auch die *Klangfarbe* oder das *Timbre* eine wichtige Rolle. Auch wenn Klänge keine eindeutige Tonhöhe aufweisen, können sie verschiedene Klangfarben haben, das gilt etwa für Trommelwirbel oder angeschlagene Holzblöcke. Umgangssprachlich bezeichnen wir Klangfarben als *schrill*, *warm*, *herb*, *dunkel* oder *hell* und so fort. Diese Begriffe geben handfeste Unterschiede zwischen Schallwellen und unserem Empfinden wieder, aber es ist keineswegs leicht, diese Unterschiede eindeutig anhand physikalischer Größen dann exakt festzulegen.

Ist es wirklich die Klangfarbe, die der gute Geiger dem Anfänger voraus hat? Wenn Physiker behaupten, daß ein einzelner Klavierton, der von einem guten Pianisten angeschlagen wird, nicht anders klingt, als wenn ein entsprechend schweres Gewicht auf die Taste fällt, dann läßt sich das kaum bestreiten. Trotzdem haben zweifellos einige Pianisten einen besseren Anschlag als andere. Worin der Unterschied besteht, läßt sich nicht so leicht in Worte fassen. „Es muß singen“ – das mag schon so mancher Musikschüler von seinem Lehrer gehört haben. Was gemeint ist, scheint noch klar, aber wie man es bewerkstelligen könnte, darüber darf man dann beim Üben nachdenken.

B: Mathematische Grundregeln

Ich habe versucht, Rechnungen und Formeln auf das Notwendigste zu beschränken und so einfach wie möglich darzustellen. Mit physikalischen Größen wie der Masse m und der Länge l kann man allerdings leicht rechnen.

Sollen zwei Größen wie l und m multipliziert werden, so schreiben wir sie – ähnlich wie Zahlen – als Produkt: also $m \times l$ oder kurz

$$ml$$

Wird ein und dieselbe Größe mehrfach mit sich selbst multipliziert, so schreibt man sie als Potenz. Beispielsweise ist

$$ttt = t^3$$

Der Kehrwert einer solchen Potenz läßt sich mit einem Minuszeichen im Exponenten kennzeichnen.

$$1/t^3 = t^{-3} = (1/t)\,(1/t)\,(1/t).$$

Eine interessante, wenn auch zunächst etwas unübersichtliche Potenz gibt das Frequenzverhältnis eines Halbtonintervalls der gleichschwebend temperierten Tonleiter wieder·

$$2^{1/12} = 1{,}059468.$$

Manchmal schreibt man besonders große Zahlen auf einfache Weise als Zehnerpotenz:

$$540\,000 = 5{,}4 \times 10^5$$

Sehr kleine Dezimalzahlen kann man ganz analog „abkürzen", etwa.

$$0{,}00062 = 6{,}2 \times 10^{-4}$$

Wir können Potenz- und Produktschreibweise bei physikalischen Größen kombinieren, etwa bei dem Ausdruck

$$ml/t^2$$

Wir können umgekehrt aus Potenzen verschiedene Wurzeln ziehen. So ist die Quadratwurzel einer Größe x gleich $\sqrt{x}$, wobei

$$\sqrt{x} \times \sqrt{x} = x$$

ist. Zum Beispiel ist

$$\sqrt{4} = 2 \quad \text{oder} \quad \sqrt{t^2} = t$$

Die Umkehrfunktion, die Potenzen mit variablen Exponenten gleichsam „rückgängig" macht, ist der Logarithmus. Wenn gilt

$$a^y = x$$

so ergibt sich für den Logarithmus von x zur Basis a

$$\lg x = y$$

In mehreren Kapiteln begegnet uns das logarithmische Maß Dezibel (dB), mit dem man Leistungsverhältnisse anhand von Zehnerlogarithmen ausdrückt. Wenn P_1 und P_2 Leistungen sind (die man gewöhnlich in Watt mißt) und P_2 größer ist als P_1, so ergibt sich als Leistungspegel in Dezibel.

$$10 \log (P_2/P_1)$$

Die 10 vor dem Zehnerlogarithmus trägt dem „dezi" Rechnung (1 Bel = 10 Dezibel). Zum Beispiel ergibt sich bei einem Leistungsverhältnis von 100

$$10 \log 100 = 10 \log 10^2 = 10 \times 2 = 20.$$

Logarithmen und das Pegelmaß Dezibel (dB)

Leistungsverhältnis R	Amplitudenverhältnis $\sqrt{R}$	$10 \log R$
0,0001	0,01	−40 dB
0,001	0,0316	−30 dB
0,01	0,1	−20 dB
0,1	0,316	−10 dB
1	1	0 dB
10	3,16	10 dB
100	10	20 dB
1 000	31,6	30 dB
10 000	100	40 dB
2	1,4	3 dB
1/2	0,71	−3 dB

Bei Zahlen, die keine glatten Zehnerpotenzen sind, kann man die Logarithmen in einer Tafel nachschlagen oder sie mit dem Taschenrechner ermitteln. Die Tabelle auf der linken Seite vermittelt eine ungefähre Vorstellung von Logarithmen und dem Pegelmaß Dezibel.

C: Physikalische Größen und Maßeinheiten

Als Maßsystem für physikalische Größen benutzen wir das MKS-System mit den Einheiten Meter, Kilogramm und Sekunde. Dieses System ist mit den elektrischen Energie- und Leistungseinheiten kompatibel. Die wichtigsten physikalischen Größen sind.

Maßeinheiten im MKS-System

Größe	Einheit
Masse (m)	Kilogramm (kg)
Länge (l)	Meter (m)
Zeit (t)	Sekunde (sek)
Kraft (F)	Newton (N)
Leistung (P)	Watt (W)
Intensität (I)	Watt pro Quadratzentimeter (W/cm^2)
Energie (E)	Joule (J oder Nm)
Druck (p)	Newton pro Quadratzentimeter (N/cm^2)

Die Krafteinheit Newton läßt sich anhand der Schwerkraft leicht verstehen, die eine frei fallende Masse m beschleunigt. Die Fallbeschleunigung beträgt dabei etwa $g = 9{,}81$ Meter pro Quadratsekunde. Die Gewichtskraft, die auf eine Masse m wirkt, beträgt Masse mal Beschleunigung gleich mg. Bei einem Kilogramm Masse sind es also 9,81 Newton.

Wenn man einen Gegenstand mit einer Kraft von einem Newton einen Meter verschiebt, entspricht das einer Energie von einem Joule. In welcher Zeit diese Energie aufgebracht wird, drückt sich in der Leistung aus. der Energie pro Zeiteinheit. Die Leistungseinheit ist Joule pro Sekunde oder Watt – beide Maße stimmen zahlenmäßig überein. Im MKS-System werden Drücke in Newton pro Quadratmeter angegeben, einer Einheit, die man auch kurz als Pascal bezeichnet.

D: Mathematik der Wellen

Im Zusammenhang mit Periodizität und Tonhöhe wird auf Seite 24 beschrieben, wie Wellen als eine Art Störung über Saiten laufen oder sich in Luft ausbreiten. Eine solche Störung geht mit einer andauernden Impulsänderung einher, die durch eine Kraft hervorgerufen wird. Sie kann durch die Spannung der Saite oder durch komprimierte Luft zustande kommen. Daß sich die Kraft bei einer gespannten Saite oder einer Schallwelle dauernd ändert, liegt daran, daß die Saite immer wieder ausgelenkt beziehungsweise die Luft periodisch komprimiert und entspannt wird.

Die Eigenschaften von transversalen und longitudinalen Wellen und ihre Ausbreitung lassen sich mathematisch ohne weiteres beschreiben, aber dazu müßte man ziemlich weit ausholen. Wir wollen uns hier auf Wellen beschränken, deren Amplituden vergleichsweise klein sind, denn sie lassen sich relativ einfach in Formeln wiedergeben. Solange beispielsweise eine gespannte Saite nicht zu weit ausgelenkt wird oder eine Schallwelle den Luftdruck nicht zu stark schwanken läßt, verhalten sich solche Wellen kleiner Amplitude *linear*, das heißt, mehrere von ihnen können sich auf derselben Saite oder im selben Luftraum ungestört überlagern, weil sie sich nicht gegenseitig beeinflussen. Jede Welle pflanzt sich so fort, als wären die anderen nicht vorhanden. Man kann die Überlagerung der Amplituden (Auslenkungen), Geschwindigkeiten oder Drücke von zwei oder mehr Wellen dann sehr einfach beschreiben: indem man sie (linear) aufaddiert.

Wir wollen uns im folgenden nicht mit der mathematischen Wellentheorie herumschlagen, sondern eher heuristisch überlegen, wie die Eigenschaften von Wellen kleiner Amplitude mit fundamentalen physikalischen Größen zusammenhängen. Dabei werden wir vor allem *Dimensionsbetrachtungen* anstellen, die uns auf scheinbar wundersame Weise die richtigen Formeln liefern.

Physikalische Größen wie Kraft, Geschwindigkeit, Impuls und so weiter besitzen eine Maßeinheit oder Dimension, sie läßt sich als Kombination aus Grunddimensionen ausdrücken, wie sie für Zeit, Masse und Länge festgelegt sind. Die Zeit wird im MKS-System in Sekunden angegeben, aber mit ihrer Dimension läßt sich unabhängig vom Maßsystem rechnen. Dazu drückt man Größen symbolisch durch Buchstaben aus – etwa die Zeit durch t – und kennzeichnet ihre Dimension üblicherweise mit eckigen Klammern, $[t]$ bedeutet also: Dimension von t. Entsprechend stehen $[m]$ und $[l]$ für die Dimensionen von Masse und Länge.

Grunddimensionen

physikalische Größe	Symbol für die physikalische Größe	Symbol für die Dimension
Zeit	t	$[t]$
Masse	m	$[m]$
Länge	l	$[l]$

Bei einfachen zusammengesetzten Größen läßt sich das Prinzip der Dimensionsbetrachtung leicht illustrieren. Schauen wir uns das für die Frequenz f, also die Periodizität einer Welle, an. Sie entspricht einer Anzahl (von Ereignissen pro Sekunde). Eine Zahl ist naturgemäß dimensionslos, so daß die Frequenz einfach die Dimension

$$[f] = [1/t]$$

hat. Für die Geschwindigkeit v, die als Entfernung pro Zeiteinheit definiert ist, ergibt sich

$$[v] = [l/t] = [l]/[t]$$

Die Beschleunigung gibt an, um wieviel sich eine Geschwindigkeit pro Zeiteinheit ändert. Ihre Dimension $[a]$ entspricht also

$$[a] = [v/t] = [l]/[t]^2$$

Bislang haben wir nur auf Definitionen von Größen zurückgegriffen. Für die Kraft müssen wir ein physikalisches Gesetz anwenden, das Newton aufgestellt hat. Es besagt, daß die Kraft F gleich dem Produkt aus Masse m und Beschleunigung a ist. Demnach gilt für die Dimension

$$[F] = [m]\,[l]/[t]^2$$

Multipliziert mit einer Länge ergibt sich daraus die Dimension der Energie E oder Arbeit:

$$[E] = [F]\,[l] = [m]\,[l]^2/[t]^2$$

Wir können das auch so schreiben.

$$[E] = [m]\,[v]^2$$

Diese Dimensionsgleichung entspricht bis auf einen (dimensionslosen) Zahlenfaktor der Formel für die kinetische (oder Bewegungs-)Energie einer Masse m, die sich mit einer Geschwindigkeit v bewegt:

$$E = 1/2\,mv^2$$

Bei unserer Dimensionsbetrachtung haben wir nicht nur eine Beziehung für die Einheiten der Energie gefunden, sondern auch bereits das Grundgerüst der Formel für die kinetische Energie. Wir wollen nun prüfen, ob wir mit diesem Erfolgsrezept auch bei Wellen weiterkommen.

Schauen wir uns als erstes Beispiel die Geschwindigkeit v einer transversalen Welle an, die über eine Saite läuft. Die Saite wird durch die Spannkraft S (gemessen in Newton) gestreckt und hat pro Längenabschnitt eine Masse M (angegeben in Kilogramm pro Meter). Die Dimensionen von M und S können wir also einfach hinschreiben.

$$[M] = [m]/[l]$$

und

$$[S] = [F] = [m]\,[l]/[t]^2$$

Können wir M und S nun so verknüpfen, daß sich die Dimension einer Geschwindigkeit v, also $[l]/[t]$ ergibt? Tatsächlich braucht man beide nur zu dividieren, um eine Dimensionsgleichung für v zu erhalten.

$$[S]/[M] = ([m]\,[l]/[t]^2)/([m]/[l]) = [l]^2/[t]^2 = [v]^2$$

Wir müssen nun nur noch die Wurzel ziehen.

$$[v] = \sqrt{[S]/[M]}$$

Tatsächlich haben wir damit bereits den richtigen Ausdruck für die Geschwindigkeit v gefunden, mit der eine Welle über eine gespannte Saite läuft:

$$v = \sqrt{S/M}$$

Daß der Zahlenfaktor (Proportionalitätsfaktor) hier 1 beträgt, läßt sich aber mit einer bloßen Dimensionsbetrachtung noch nicht feststellen, das zeigt erst die korrekte Rechnung.

Eine sehr wichtige Kenngröße von ebenen Schallwellen in Luft ist die Leistungsdichte oder Intensität I, die in Watt pro Quadratmeter gemessen wird. Die Leistung P hatten wir in Anhang C bereits als Energie pro Zeiteinheit definiert. Da die Energie dimensionsmäßig einer Kraft mal Länge entspricht und die Intensität I Leistung pro Quadratmeter ist, folgt

$$[I] = ([F]\,[l]/[t])/[l]^2 = [F]/[l]\,[t] = [m]/[t]^3$$

Bei Schallwellen in Luft interessiert uns aber nicht die Kraft F, sondern der Druck p, also eine Kraft pro Fläche. Seine Dimension ist:

$$[p] = [F]/[l]^2$$

Aus den beiden Beziehungen für $[I]$ und $[p]$ erhalten wir als Dimension $[I]$ der Intensität:

$$[I] = [p]\,[l]/[t]$$

Demnach scheint die Intensität mit einem schwankenden Luftdruck p einer Schallwelle verknüpft – dem Schalldruck, und in der Geschwindigkeit l/t wird man die schwankende Geschwindigkeit u der Luftmoleküle vermuten, also die Schallschnelle. Die Intensität einer Schallwelle könnte dann vielleicht

$$I = p\,u$$

sein. Nicht nur die Dimensionen stimmen, sondern diese Gleichung ist auch zahlenmäßig richtig.

Wir hätten das auch auf direktem Weg herausfinden können. Der Schalldruck p läßt sich bei linearen Schallwellen nämlich als Produkt aus der Schallschnelle u und einer Konstanten auffassen, die wir Z nennen wollen.

$$p = Z u$$

Mit Hilfe dieser Gleichung können wir Intensitäten entweder durch u oder p ausdrücken.

$$I = Z u^2$$

oder

$$I = (1/Z)\,p^2$$

Die Größe, die wir mit Z eingeführt haben, heißt *Wellenwiderstand* der ebenen Schallwelle. Jetzt wollen wir natürlich einem Ausdruck dafür finden. Die Dimension von Z ist:

$$[Z] = [I]/[v^2] = ([m]/[t]^3)/([l]^2/[t]^2) = [m]/([l]^2\,[t])$$

Wir können das auch anders schreiben.

$$[Z] = ([m]/[l]^3) \times [v]$$

so daß Z als Funktion einer Massendichte (m/l^3) und einer Geschwindigkeit erscheint. Wenn wir die Dichte mit ϱ bezeichnen, führt unsere Dimensionsbetrachtung zu folgender Formel.

$$Z = \rho v$$

Dabei muß ϱ natürlich die Dichte der Luft und v die Schallgeschwindigkeit sein. In der Tat ist die Gleichung dimensions- und zahlenmäßig richtig. Das kann man sich leicht plausibel machen, wenn man die Beziehung zwischen I und Z ausnutzt:

$$I = (\rho u^2)/v$$

denn ϱu^2 ist proportional der kinetischen Energie, die im Einheitsvolumen Luft bei einer Schallschnelle u vorliegt. In gewissem Sinn wird die Energie mit einer Geschwindigkeit v durch die Luft transportiert, wobei die kinetische Energie nur die Hälfte des insgesamt transportierten Betrags ausmacht. Es gibt einen gleich großen Anteil an potentieller Energie, der mit der Kompression der Luft zusammenhängt.

Wir können die Intensität I einer Schallwelle auch durch den Schalldruck p ausdrücken.

$$I = p^2/\rho v$$

Bei einer Temperatur von 20 Grad Celsius hat Luft eine Dichte von $\varrho = 1{,}2174$ Kilogramm pro Kubikmeter, und die Schallgeschwindigkeit beträgt $v = 344$ Meter pro Sekunde, so daß sich für die Intensität

$$I = 0{,}002388\,p^2$$

ergibt. Der Schalldruck p entspricht der Schwankung oder Änderung des Luftdrucks, und mit ihm schwankt natürlich auch die Intensität. Man kann aber eine mittlere Intensität angeben, indem man den Mittelwert von p^2 durch ϱv teilt. Ändert sich der Luftdruck sinusförmig, dann ist dieser Mittelwert von p^2 gerade halb so groß wie das Quadrat des maximalen Schalldrucks, sprich. des Amplitudenquadrats für die Sinuswelle.

Als Referenzpegel für die Intensität haben wir den Wert 10^{-12} Watt pro Quadratmeter angegeben. Üblicherweise bezieht man sich auf einen Referenzdruck von 0,00002 Pascal (oder Newton pro Quadratmeter). Wenn wir diesen Wert in die letzte Gleichung für die Intensität einsetzen, erhalten wir:

$I = 0{,}955 \times 10^{-12}$ Watt pro Quadratmeter

Aufgerundet ergibt das gerade die 10^{-12} Watt pro Quadratmeter, mit einer Abweichung von nur 0,2 Dezibel.

Um zu demonstrieren, wie empfindlich unser Ohr auf Schallwellen anspricht, habe ich erwähnt, daß man einen Ton mit einer Frequenz von 3500 Hertz bei einer Schalleistung von einem Watt theoretisch noch in 564 Kilometern Entfernung von der Schallquelle hören könnte. Man geht davon aus, daß sich die Schalleistung W gleichmäßig nach allen Richtungen ausbreitet. Im Abstand L verteilt sie sich also über eine Kugelfläche von $4\pi l^2$ Die Schalleistung pro Flächeneinheit, also die Intensität, beträgt im Abstand L deshalb:

$$I = W/4\pi L^2$$

Setzen wir $W = 1$ und $L = 564\,000$ Meter, dann kommt etwa 10^{-12} Watt pro Quadratmeter heraus, was in der Tat ungefähr der Hörschwelle entspricht.

Zum Schluß wollen wir uns noch etwas mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit v einer Schallwelle beschäftigen. Sie hängt nicht vom Luftdruck, wohl aber von der Temperatur ab. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Luftmoleküle bewegen, ergibt sich direkt aus der Temperatur: Das Quadrat dieser Geschwindigkeit ist proportional zur absoluten Temperatur T_K, die in Kelvin gemessen wird, die Kelvin-Skala beginnt nicht wie die Celsius-Skala beim Gefrierpunkt von Wasser, sondern beim absoluten Temperatur-Nullpunkt (−273 Grad Celsius).

Da die Geschwindigkeit v einer Schallwelle und die Geschwindigkeit v_K, mit der sich die Luftmoleküle bei einer Temperatur T_K (in Kelvin) hin und her bewegen, ganz offensichtlich dieselbe Dimension haben, wird man vermuten, daß sie proportional sind. Tatsächlich gilt folgende Beziehung:

$$v = v_K \sqrt{T/T_K}$$

Für 293 Kelvin (oder 20 Grad Celsius) beträgt die Schallgeschwindigkeit 344 Meter in der Sekunde, und wir erhalten für kleine Änderungen der Temperatur T im Bereich um 20 Grad.

$$v = 344 \sqrt{T/293} = 20{,}1 \sqrt{T}$$

Die Schallgeschwindigkeit hängt darüber hinaus allerdings auch noch von der Luftfeuchtigkeit ab. Die Moleküle eines Gases werden nicht nur bei hohen Temperaturen schneller, sondern auch ihre Masse bestimmt die Geschwindigkeit. Wassermoleküle (gasförmiger „Wasserdampf") sind leichter als Luftmoleküle und deshalb schneller. Daher nimmt mit erhöhter Luftfeuchtigkeit auch die Schallgeschwindigkeit zu. Davon weiß jeder Musiker ein Lied zu singen, der ein Streich- oder Blasinstrument spielt: Die Stimmung schwankt mit Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Das kann man zwar durch Nachstimmen korrigieren, aber jeder bemüht sich doch darum, sein Instrument vor großen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen zu schützen. Auch Klavier und Pfeifenorgel werden durch beide Faktoren verstimmt – nur kann man das nicht so flexibel ausgleichen. Deshalb müssen sich alle Instrumente beim Zusammenspiel nach dem Klavier- oder Orgel-A richten.

E: Reflexion von Wellen

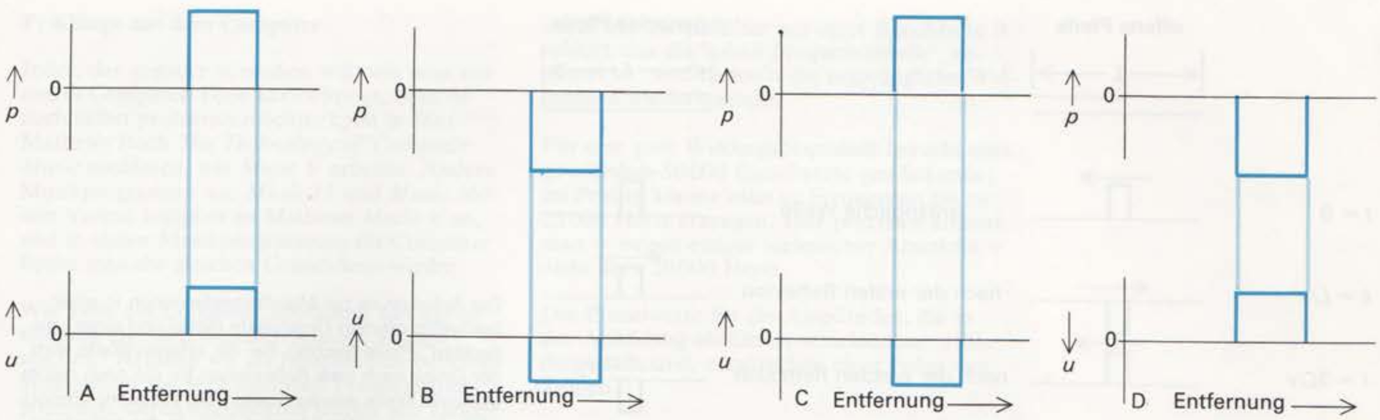
Wenn Schallwellen reflektiert werden, sind zwei Eigenschaften maßgebend. der Schalldruck p und die Schallschnelle u der hin und her schwingenden Luftmoleküle. Aus Anhang D wissen wir, wie beide Größen miteinander verknüpft sind.

$$p = Zu$$

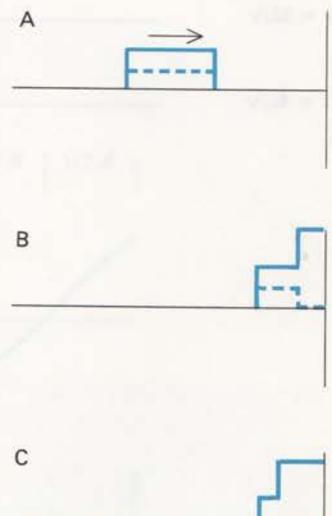
Der Wellenwiderstand Z ist dabei konstant, solange Luftdichte und Schallgeschwindigkeit unverändert bleiben.

In der Abbildung oben rechts sind Schalldruck p und Schallschnelle u für eine Rechteckwelle gezeichnet, die nach rechts läuft. Die Welle A mit positivem Schalldruck p hat auch eine positive Schallschnelle u; das heißt, die (momentane) Bewegung der Moleküle hat die gleiche Richtung (nach rechts) wie die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle. Im Abbildungsteil B ist der Schalldruck p negativ; er liegt unter der Nullage für den Mittelwert des Luftdrucks und deutet an, um wieviel der Druck unter diesen Mittelwert sinkt; entsprechend ist auch die Schallschnelle u unterhalb der waagerechten Achse gezeichnet, weil sich die Luftmoleküle entgegengesetzt zur Ausbreitungsrichtung der Welle (nach links) bewegen.

Unten auf der nächsten Seite sind p und u für eine Rechteckwelle abgebildet, die nach links läuft, also entgegengesetzt zur Koordinatenrichtung (Pfeil). Diese Abbildung sieht anders aus als bei der nach rechts laufenden Welle. Der



Schalldruck p und Schallschnelle u bei einer Welle. Liegt der Gesamtdruck über dem mittleren Luftdruck (als Nullage), so ist der Schalldruck p positiv (A). Die Schallschnelle u hat immer dann ein positives Vorzeichen, wenn sie nach rechts – zu wachsenden Abständen hin – gerichtet ist; eine negative (nach links gerichtete) Schallschnelle (B) entspricht einer Kurve, die unterhalb der Nullage verläuft. Bei einer Welle, die sich nach rechts ausbreitet (A und B), stimmen die Vorzeichen von Schalldruck p und Schallschnelle u stets überein. Wenn eine Schallwelle dagegen nach links läuft (C und D), haben Schalldruck p und Schallschnelle u entgegengesetzte Vorzeichen. Mit einem positiven Schalldruck p geht nun eine negative Schallschnelle u einher (C), und entsprechend umgekehrt (D). Das liegt einfach daran, daß wir das Vorzeichen für die Schallschnelle in Rechtsrichtung als positiv festgelegt haben: Nur wenn sie in dieselbe Richtung zeigt, in die auch die Welle läuft, hat sie ein positives Vorzeichen (A und B).

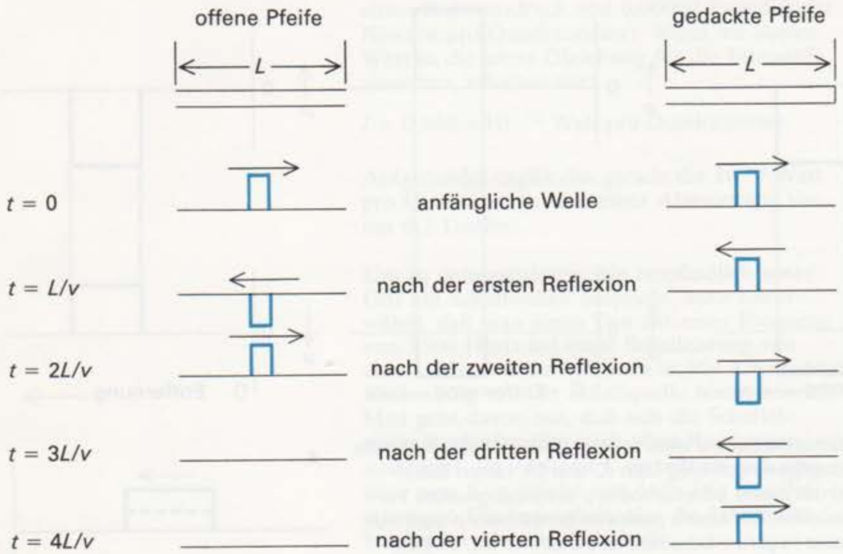


Die Reflexion einer Schallwelle an einer festen Wand ist hier in vier Momentaufnahmen dargestellt. Dabei ist der Schalldruck als durchgezogene, die Schallschnelle als gestrichelte Linie gezeichnet. Zunächst läuft die Welle nach rechts auf die Wand zu (A), um nach dem eigentlichen Reflexionsvorgang (B und C) in entgegengesetzter Richtung zurückzukehren (D). Während der Schalldruck zum Schluß wieder den Ausgangswert hat, wechselt die Schallschnelle ihr Vorzeichen. In den Reflexionsstadien B und C überlagern sich die Schalldrücke und Schallschnellen des einfallenden und bereits reflektierten Wellenanteils. Da sich die beiden Wellen in entgegengesetzten Richtungen ausbreiten, muß die Summe ihrer Schallschnellen an der Wand gerade verschwinden, denn unmittelbar dort können sich die Luftmoleküle nicht bewegen. Durch diese einfache Randbedingung steigt auch der Schalldruck direkt vor der reflektierten Welle dann zwangsläufig an.

Unterschied beruht einzig und allein darauf, daß wir Geschwindigkeiten immer positiv auffassen, wenn sie nach rechts gerichtet sind, egal, in welche Richtung sich die Welle tatsächlich bewegt. Dadurch erscheint die Schallschnelle u positiv, wenn sich die Moleküle nach rechts bewegen. Andererseits bezeichnet man den Schalldruck nur dann als positiv, wenn die Schallschnelle in Ausbreitungsrichtung orientiert ist. Bei einer positiven Schallschnelle u, die nach rechts gerichtet ist, wird der Schalldruck einer nach links laufenden Welle mithin automatisch negativ.

Mit solchen Darstellungen kann man verdeutlichen, was bei der Reflexion von Wellen vor sich geht. So zeigt hier die Abbildung rechts unten Momentaufnahmen für eine Reflexion an einer ebenen Wand. Der Schalldruck p ist als durchgezogene Linie, die Schallschnelle u gestrichelt dargestellt. Im Stadium A bewegt sich die einfallende Welle von links nach rechts auf die Wand zu, Schalldruck und Schallschnelle sind also beide positiv. Nach der Reflexion läuft die Welle nach links (D), so daß bei nach wie vor positivem Schalldruck die Schallschnelle jetzt negativ ist.

Aber wie verhalten sich Schalldruck und Schallschnelle während des eigentlichen Reflexionsvorgangs? Unmittelbar vor der Wand wird der Schalldruck doppelt so hoch wie bei der einfallenden Welle (B), während die Schallschnelle auf 0 sinkt. Das ist gar nicht so schwer zu erklären. Im Augenblick der Reflexion überlappt sich nämlich kurzzeitig der nach rechts einlaufende Teil der einfallenden Welle mit dem schon zurücklaufenden reflektierten Anteil. Schalldruck und Schallschnelle in Phase B und



Der Schalldruck bei Mehrfachreflexionen in einer beidseitig offenen Orgelpfeife (links) und einer „gedackten" Pfeife (rechts). Bei der offenen Pfeife wird der Druck nach zwei Reflexionen für die nach rechts laufende Welle wieder positiv: die Frequenz (Periodizität) des Grundtons beträgt $v/2L$. In der gedackten Pfeife sind vier Reflexionen nötig, um zur Anfangskonstellation zurückzukehren. Die Grundfrequenz sinkt deshalb auf $v/4L$. Damit offene Orgelpfeifen dieselbe Tonhöhe haben wie gedackte, müssen sie also etwa doppelt so lang sein.

C entsprechen einfach den jeweiligen Summen für beide Wellen. Die Schalldrücke addieren sich, während sich die entgegengerichteten Schallschnellen gegenseitig aufheben – sie haben umgekehrte Vorzeichen.

Bei der Reflexion an einem festen Hindernis bleibt der Schalldruck erhalten, während sich die Richtung der Schallschnelle umkehrt. Schallwellen können aber auch auf andere Weise reflektiert werden, etwa am offenen Ende einer Orgelpfeife oder einer anderen Röhre. Dort kann der Druck ja nicht mehr über die normalen Schwankungen hinaus steigen, und die Schallschnelle *u* wird auch nicht auf 0 abgebremst.

Auch am offenen Ende werden Schallwellen fast vollständig reflektiert. Die Schallschnelle *u* bleibt jetzt allerdings unverändert, während sich das Vorzeichen des Schalldrucks umkehrt.

Bei einer Schallwelle in einer Orgelpfeife hängt die Beziehung zwischen Pfeifenlänge und Tonhöhe davon ab, welche Reflexionen an beiden Enden stattfinden. Die Abbildung oben zeigt das für eine Orgelpfeife mit zwei offenen Enden und eine einseitig geschlossene (gedackte) Pfeife. Nach der Reflexion am offenen Ende hat der Schalldruck sein Vorzeichen gewechselt, während er es am festen Ende unverändert beibehält. Bei einer beidseitig offenen Pfeife wird bereits nach zwei Reflexionen und einer Laufzeit von

$$2L/v$$

wieder der Anfangszustand erreicht. In einer gedackten Pfeife sind dazu vier Reflexionen erforderlich, die eine Laufzeit von

$$4L/v$$

beanspruchen. Die Frequenz des Grundtons einer (beidseitig) offenen Orgelpfeife der Länge *L* ist demnach

$$f = v/2L$$

während sie bei einer gedackten Pfeife

$$f = v/4L$$

beträgt; *v* bezeichnet wieder die Schallgeschwindigkeit.

Die Saiten von Musikinstrumenten sind an beiden Enden fest eingespannt, so daß sie dort immer in Ruhe sind – die Geschwindigkeit, mit der eine Saite sich hin und her bewegt, sinkt auf 0. Alle Reflexionen sind von gleicher Art, und die Frequenz des Grundtons beträgt bei einer Saitenlänge *L*

$$f = v/2L$$

In diesem Fall bezeichnet *v* die Geschwindigkeit, mit der eine Transversalwelle über die Saite läuft. Aus Anhang D wissen wir, daß sich *v* mit zunehmender Spannung erhöht, aber mit wachsender Masse der Saite kleiner wird.

F: Klänge aus dem Computer

Jeder, der genauer verstehen will, wie man mit einem Computer Töne hervorbringt, oder es auch selbst probieren möchte, kann in Max Mathews Buch *The Technology of Computer Music* nachlesen, wie *Music V* arbeitet. Andere Musikprogramme wie *Music 11* und *Music 360* von Vercoe knüpfen an Mathews *Music V* an, und in vielen Musikprogrammen für Computer findet man die gleichen Grundideen wieder.

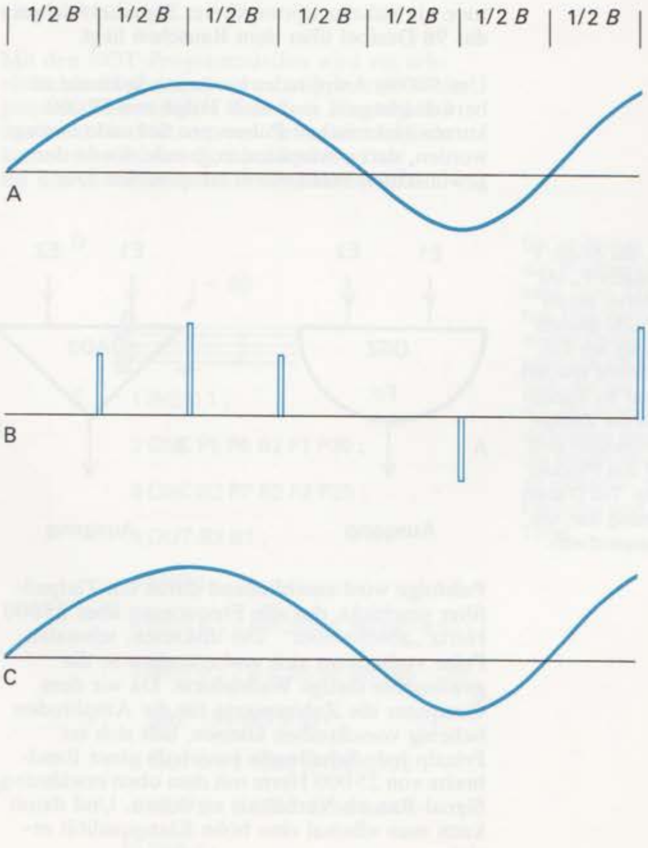
Wie kann ein Computer überhaupt aus irgendwelchen digitalen Signalen analoge Klänge machen? Nehmen wir als Beispiel eine beliebige Wellenform aus verschiedenen Frequenzkomponenten, deren Frequenzen jedoch alle kleiner sind als ein Maximalwert B. Mit anderen Worten. Alle Frequenzkomponenten liegen innerhalb einer Frequenzbandbreite zwischen 0 und B. Nach dem sogenannten *Abtasttheorem* kann man jede beliebige Wellenform innerhalb der Bandbreite B mit $2B$ Einzelwerten pro Sekunde genau darstellen. Man kann sie als eine Art Stichprobe von Amplitudenwerten betrachten, die man im Zeitabstand $1/2B$ bei einer Welle messen würde. Das verdeutlicht die Abbildung auf dieser Seite.

Eine analoge Wellenform (A) kann aus den Amplitudenwerten für die Abtastzeitpunkte (B) rekonstruiert werden (C). Die Amplituden werden im Zeitabstand von $1/2B$ abgetastet, so daß in jeder Sekunde eine Stichprobe von $2B$ Zahlen entsteht. Sie bilden das Material, aus dem man die ursprüngliche Wellenform wiedergewinnen kann. Elektronisch läßt sich das bewerkstelligen, indem man kurze elektrische Pulse, deren Spannungen den Amplituden der Stichprobe (Balkenhöhe in B) entsprechen, durch ein Tiefpaßfilter mit einer Bandbreite B schickt, das die hohen Frequenzanteile „abschneidet" und dadurch die ursprüngliche Wellenform wiederherstellt.

Für eine gute Wiedergabequalität braucht man gewöhnlich 50 000 Einzelwerte pro Sekunde, im Prinzip könnte man so Frequenzen bis zu 25 000 Hertz erzeugen, aber praktisch kommt man – wegen einiger technischer Abstriche – nicht über 20 000 Hertz.

Die Einzelwerte für die Amplituden, die in der Abbildung als Linien verschiedener Höhe dargestellt sind, entsprechen einer Folge von Zahlen.

Ein Computer kann allerdings intern keine Dezimalzahlen verarbeiten, sondern nur *Binärzahlen*, deren Ziffern 0 oder 1 lauten. Dezimalzahlen lassen sich nicht nur als Zehnerpotenzen, sondern auch binär, das heißt als Potenzen von 2 darstellen.



Eine Wellenform (A) mit einer Bandbreite B kann genau mit $2B$ Einzelwerten pro Sekunde exakt wiedergegeben werden. Diese Werte müssen bei der Aufnahme mit dem Computer im Zeitintervall $1/2B$ abgetastet werden. Man kann sie sich als eine Folge aus senkrechten Linien vorstellen (B), die den Amplituden der Welle für bestimmte Zeitpunkte entsprechen; diese Einzelamplituden lassen sich ebensogut als Zahlen schreiben. Wenn man die Amplitudenwerte in sehr kurze elektrische Pulse übersetzt, deren Spannungen die momentanen Amplituden wiedergeben, läßt sich die ursprüngliche Wellenform erreichen, indem man die Pulsfolge durch ein Tiefpaßfilter schickt (C). Dort werden die schmalen Pulse verbreitert, so daß sie ineinanderfließen, weil die hohen Frequenzkomponenten (die den Puls schmal machen) „abgeschnitten" werden.

Betrachten wir zum Beispiel die Zahl 257, die man in ihrer Dezimaldarstellung wie folgt in Zehnerpotenzen zerlegt.

$$7 \times 10^0 + 5 \times 10^1 + 2 \times 10^2$$
$$= 7 \times 1 + 5 \times 10 + 2 \times 100.$$

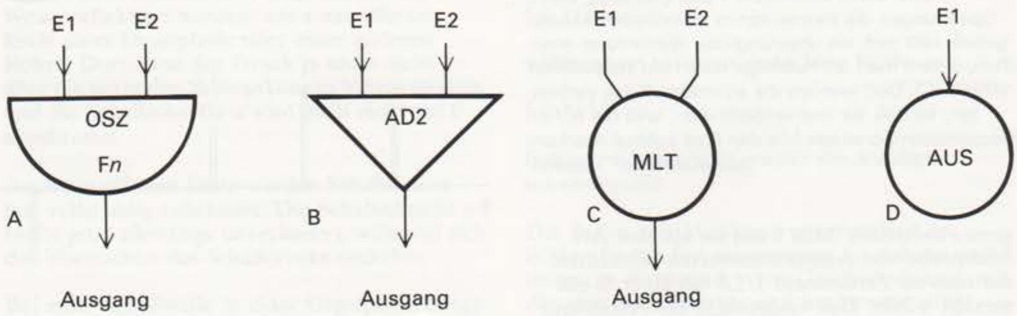
Ganz analog leitet sich die Binärzahl 1001 aus Zweierpotenzen ab:

$$1 \times 2^0 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^3$$
$$= 1 \times 1 + 0 \times 2 + 0 \times 4 + 1 \times 8.$$

Das entspricht der Dezimalzahl 9.

Die Einzelamplituden der Stichprobe müssen durch Binärzahlen mit 16 Stellen dargestellt werden, um die Werte hinreichend genau wiederzugeben und eine gute Klangqualität zu erreichen. Damit lassen sich 65 536 verschiedene Amplitudenhöhen erfassen, jeweils die Hälfte davon wird für positive beziehungsweise negative Amplituden benutzt. Mit 16 Binärstellen läßt sich für eine Sinuswelle mit maximaler Amplitude ein nahezu störungsfreies Signal erreichen, das 98 Dezibel über dem Rauschen liegt.

Um 50 000 Amplitudenwerte pro Sekunde zu berücksichtigen, muß eine Folge von 50 000 kurzen elektrischen Pulsen pro Sekunde erzeugt werden, deren Amplituden gerade denen der gewünschten Wellenform entsprechen. Die Pulsfolge wird anschließend durch ein Tiefpaßfilter geschickt, das alle Frequenzen über 25 000 Hertz „abschneidet" Die diskreten, schmalen Pulse verbreitern sich und erzeugen so die gewünschte stetige Wellenform. Da wir dem Computer die Zahlenwerte für die Amplituden beliebig vorschreiben können, läßt sich im Prinzip jede Schallwelle innerhalb einer Bandbreite von 25 000 Hertz mit dem oben erwähnten Signal-Rausch-Verhältnis erreichen. Und damit kann man allemal eine hohe Klangqualität erzielen.



Vier Schaltelemente, die *Music V* „simuliert" Der Oszillator F_n (A) erzeugt eine Wellenform, deren Frequenz und Amplitude jeweils durch einen Zahlenwert am Eingang E2 und E1 bestimmt werden. Der Addierer (B) liefert an seinem Ausgang die Summe der Zahlen an seinen beiden Eingängen und der Multiplizierer (C) das Produkt seiner Eingangswerte. Teil D stellt eine Ausgangsschaltung dar, um die Zahlenfolge abzuspeichern.

Diese Wahlfreiheit brauchen wir eigentlich gar nicht. Mathews hat mit seinem Programm *Music V* mit Erfolg einen anderen Weg beschritten. Wie sich herausgestellt hat, kann man auch so die Klänge, Singstimmen und sogar Sprachlaute beliebig gut simulieren.

Um zu verstehen, wie Programme von einem Computer ausgeführt werden, müssen wir einige wichtige Schaltungen anschauen. Denn in gewissem Sinne *simuliert* das Programm *Music V* diese Schaltungen, indem es ihre Funktionen und Verknüpfungen per Computer ausführen läßt.

Ein besonders wichtiger Schaltkreis ist der *Oszillator* (OSZ im Abbildungsteil A), er besitzt einen Ausgang und zwei Eingänge. Die Zahl am Eingang E1 bestimmt, welche Amplitude die Welle am Ausgang hat, entsprechend legt die Zahl am Eingang E2 die Frequenz fest. Jeder Oszillator ist so programmiert, daß er eine bestimmte Wellenform F*n* erzeugt. Das kann eine Sinus- oder Rechteckwelle oder auch irgendeine andere Form sein.

Ein *Addierer* (B) bildet aus den Zahlen der beiden Eingänge E1 und E2 die Summe als Ausgangssignal. Zum Beispiel kann er die Ausgangssignale zweier Sinusoszillatoren zu einem Gesamtklang mit zwei Partialtönen zusammenfügen oder auch einer Zahl, die einer mittleren Oszillatorfrequenz entspricht, ein Vibrato überlagern.

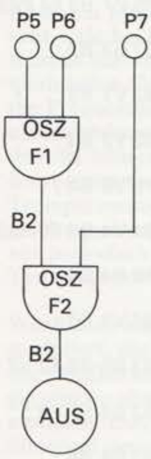
Am Ausgang eines *Multiplizierers* (C) erhält man das Produkt zweier Zahlen an den Eingängen E1 und E2. Auf diese Weise lassen sich die Amplitudenzahlen von Oszillatoren multiplizieren und als Lautstärkeregler einsetzen. Oder man kann die Tonhöhe ändern, indem man den Frequenzwert von seinem Oszillatoreingang mit einer konstanten Zahl beim anderen Eingang multiplizieren läßt.

Der letzte Schaltkreis (D) ist eine Ausgangsschaltung, mit der wir die Zahlenfolge für die Einzelwerte, die den Verlauf der simulierten Welle festlegen, in einem Speicher ablegen können – seien es nun der Arbeitsspeicher des Computers selbst oder periphere Magnetplatten und -bänder.

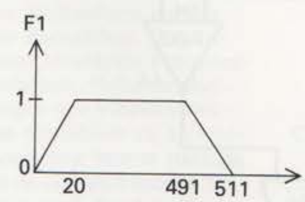
Wie Mathews 1969 ein einfaches Instrument simulierte, das zwei Töne spielte, zeigt die Abbildung unten auf dieser Seite. Wir brauchen dabei zwei Oszillatoren, F1 und F2, der eine erzeugt eine trapezförmige Welle, der andere einen Ausgangsimpuls. Wie sich die Amplitude des F2-Signals ändert, wird über das Ausgangssignal von F1 gesteuert, die Einhüllende für die gewünschte Wellenform. Über die Zahlen an den Oszillatoreingängen P5 und P6 werden also Amplitude und Dauer des Tons vorgegeben, der vom zweiten Oszillator F2 erzeugt wird, der Eingang P7 bestimmt die Frequenz. Mit dem Programm wird ein Instrument „kreiert", das zwei Töne spielt (D), das Mathewsche Programm (E) definiert in den Zeilen 1 bis 5 erst einmal das Instrument, dann in Zeile 6 die zeitliche Funktion des Oszillators F1 und in Zeile 7 die Wellenform des Oszillators F2, und schließlich geben die Zeilen 8 und 9 die beiden gewünschten Töne vor. Die Zahl 0 nach dem Befehl NOT in Zeile 8 besagt, daß diese Note vom Zeitpunkt 0 an gespielt werden soll, die nachfolgende 1 bezieht sich auf das Instrument 1 (das in den Zeilen 1 bis 5 definiert wurde), die Zahl 1000 legt die Ausgangsamplitude fest, und 0,0128 ist der Wert am Eingang P6. Wenn das Produkt dieser Zahl mit der Anzahl aufeinanderfolgender Einzelwerte gleich 511 geworden ist, dann ist der Ausgang von Oszillator F1 gerade von 0 angestiegen und wieder zu 0 abgefallen, wie es im Teil B zu sehen und in Zeile 6 definiert ist. Wir gehen in diesem Beispiel davon aus, daß wir mit 20000 Musterwerten pro Sekunde arbeiten und daß der erste Ton zwei Sekunden lang sein soll. Der Eingang von P6, entsprechend Zeile 8, beträgt 0,0128. Wenn wir das mit 2 und noch mit 20000 multiplizieren, ergibt sich 512 – und das ist für unsere Zwecke genügend genau. Die letzte Zahl in Zeile 8 ist der Eingangswert von P7 und bestimmt die Frequenz. Wie im Teil C zu sehen und in Zeile 7 definiert, ist ein Zyklus gerade dann abgeschlossen, wenn die Zahl an P7 mal der Anzahl der Einzelwerte gerade 511 ergibt. Die Zahl der Zyklen ist dann der Wert an P7 mal 20000, und die Frequenz beträgt $6{,}70 \times 20000/511 = 262$ Hertz. Sie entspricht der Tonhöhe des eingestrichenen C.

Mit den NOT-Programmzeilen wird ein sehr einfaches Instrument auf recht primitive Weise gespielt. Die vorletzte Zahl (am Eingang P6) bestimmt die Notendauer. Selbstverständlich kann und wird der Computer diese Zahl für uns berechnen. Auch die Zahl für den

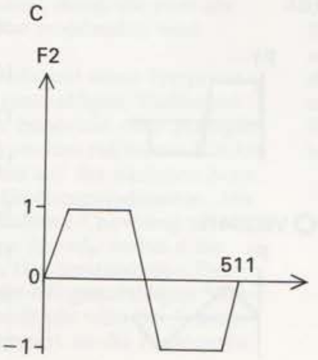
A



B



C



D

E

```
1 INS 0 1
2 OSC P5 P6 B2 F1 P30
3 OSC B2 P7 B2 F2 P29
4 OUT B2 B1
5 END
6 GEN 0 1 1 0 0 .99 20 .99 491 0 511
7 GEN 0 1 2 0 0 .99 50 .99 205 –.99
  306 –.99 461 0 511
8 NOT 0 1 2 1000 .0128 6.70
9 NOT 2 1 1 1000 .0256 8.44
10 TER 3
```

Ein einfaches „Instrument" und das Programm, mit dem Mathews zwei Töne (D) darauf „gespielt" hat. Das Instrument besteht aus einem Oszillator F1, der die Einhüllende (B) für die Welle generiert, die der Oszillator F2 erzeugt (C). Die Programmzeilen 1 bis 5 definieren das Instrument, 6 und 7 die Wellenform. Die Zeilen 8 bis 10 enthalten die Befehle für die Frequenz und die Dauer der beiden Töne.

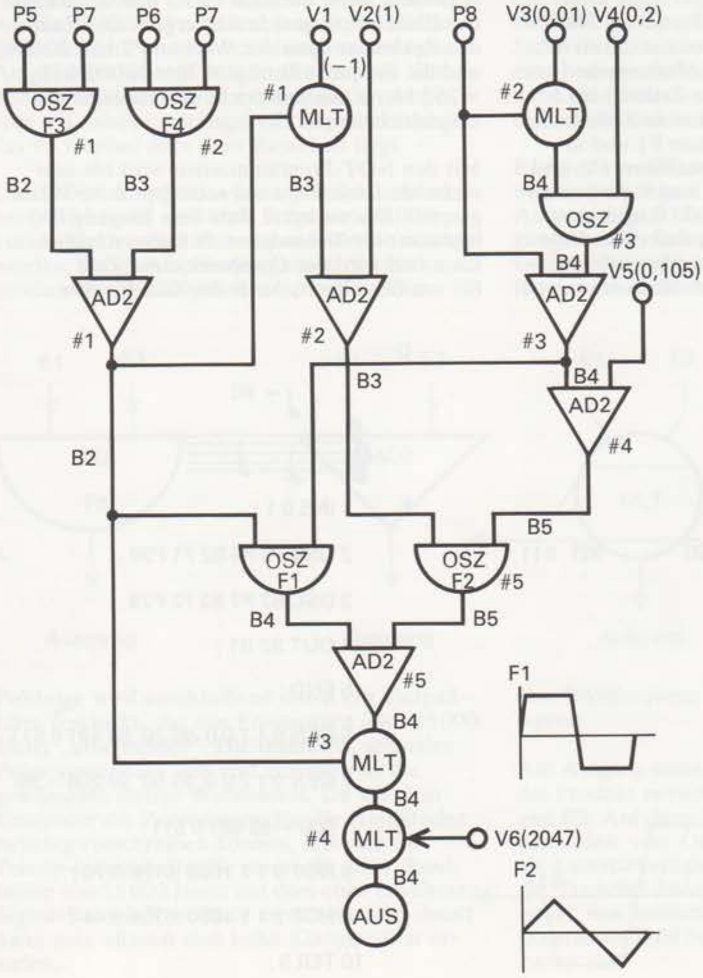
Eingang P7 müssen wir nicht selbst eingeben, wenn wir die Frequenz festgelegt haben, ermittelt der Computer diese Zahl für P7 von allein. Im Endeffekt arbeitet Mathews System so, daß wir nur Notensymbole und die gewünschte Oktavlage festlegen müssen. Der Computer ist so benutzerfreundlich programmiert, daß man viel kompliziertere Instrumente oder auch Vibrato, allmähliche Frequenzänderungen und vieles mehr „erzeugen" kann. Wir wollen einfach einmal als gegeben annehmen, daß man mit Programmen wie *Music V* alles machen kann, aber was wollen wir überhaupt machen?

Hier gibt es verschiedene Arten der Klangsynthese. Die *additive Synthese* fügt einfach mehrere sinusförmige Partialtöne zusammen, deren Amplituden während der Dauer des Tons unterschiedlich abfallen. Das ist eine sehr leistungsfähige Methode, aber sie ist aufwendig und langsam, weil jeder Partialton einzeln berechnet werden muß.

Als man anfing, mit dem Computer Töne zu erzeugen, waren die Oszillatoren auf geometrisch einfache Wellenformen programmiert. Das schien zwar ökonomisch, aber der Klang war nicht besonders gut und kaum variierbar.

Mathews programmierte aber auch ein Instrument, dessen Wellenform sich mit der Amplitude ändert. Es verhielt sich ähnlich wie die üblichen akustischen Musikinstrumente. Die Klangfarbe variiert dann mit der Intensität des Tons, weil lautere Klänge mehr Partialtöne enthalten als leisere. Schaltungsaufbau. Das Programm dieses

Ein komplizierteres Instrument, bei dem die Wellenform bei unterschiedlichen Amplituden variiert. Mathews definierte es mit dem gezeigten Programm.



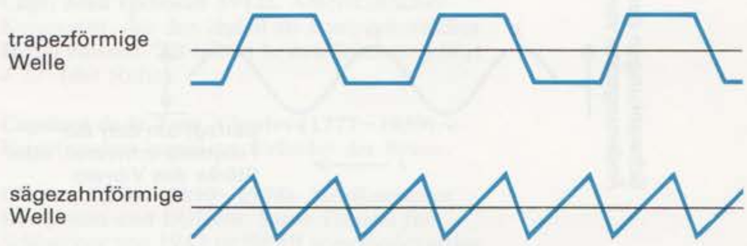

```
1 INS 0 4;
2 OSC P5 P7 B2 F3 P30
3 OSC P6 P7 B3 F4 P29
4 AD2 B2 B3 B2
5 MLT B2 V1 B3
6 AD2 B2 V2 B3
7 MLT P8 V3 B4
8 OSC B4 V4 B4 F5 P28
9 AD2 P8 B4 B4
10 AD2 B4 V5 B5
11 OSC B3 B5 B5 F2 V7
12 OSC B2 B4 F1 V8
13 MLT B2 B4 B4
14 MLT B4 V6 B4
15 OUT B4 B1
16 END
```

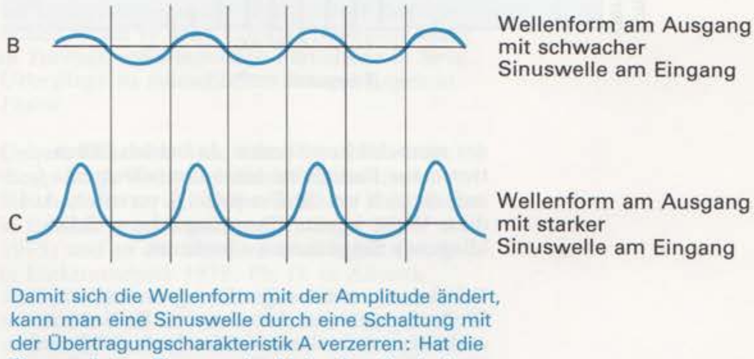
Instruments ist auf der linken Seite abgebildet. Die Wellenform und die nicht-lineare Beziehung zwischen Ausgangs- und Eingangsamplitude, mit der die Klangfarbenänderung erreicht wird, sind rechts auf dieser Seite gezeigt. Gibt man eine schwache Sinuswelle auf den Eingang, dann erhält man am Ausgang eine fast sinusförmige Wellenform, die im wesentlichen nur aus einem Partialton besteht. Bei stärkeren Eingangssignalen werden die Spitzen wesentlich höher als die Täler, und die Welle enthält viele harmonische Partialtöne; je stärker das Eingangssignal ist, um so mehr fallen die höheren Partialtöne ins Gewicht. Das sichert einen guten und abwechslungsreichen Klang.

Eine weitere Methode hat John Chowning entwickelt, um den Klang von Blechblasinstrumenten auf einfache Weise zu simulieren. die FM-Synthese. FM steht dabei für Frequenzmodulation. Hier wird ein sinusförmiges Vibrato auf einen Sinusoszillator gegeben, wobei die Frequenzen übereinstimmen. In der oberen Abbildung auf der nächsten Seite ist die Ausgangsamplitude in Teil A über einer Art Pseudozeit t' aufgetragen, die bestimmt, wie schnell die Amplitudenwerte der Stichprobe erzeugt werden. Die Kurve B zeigt, wie das Vibrato die Pseudozeit t' in Abhängigkeit von der tatsächlichen Zeit t beeinflußt. An den Maxima (p) ändert sich t' schnell mit t, an den Minima (v) nur langsam. Die Wellenform, die schließlich herauskommt, ist im Abbildungsteil C wiedergegeben. Die Amplitude steigt und fällt im Bereich der Spitzenwerte schneller als bei den flacheren Minima. Diese Wellenform enthält sehr viele hochfrequente Partialtöne. Ihre Intensität läßt sich über eine verstärkte Frequenzmodulation (Vibrato) erhöhen. Nehmen also die Frequenzschwankungen des Vibratos bei einem andauernden Ton allmählich zu, so werden die höheren Harmonischen immer stärker hervortreten – und das ist charakteristisch für Trompetentöne. Natürlich muß die Amplitude der frequenzmodulierten Sinuswelle nach wie vor periodisch schwanken, damit sie stets als Ton vorgegebener Höhe empfunden wird.

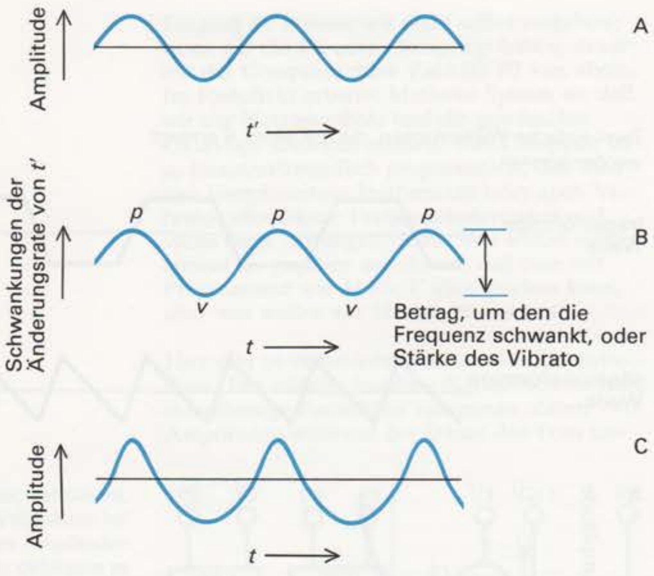
Wenn man die Sinuswelle mit einer Frequenz moduliert, die einem ganzzahligen Vielfachen der Oszillatorfrequenz entspricht oder geringfügig von ihr abweicht, kommen raffinierte Effekte zustande. Das Spektrum auf der nächsten Seite illustriert eine solche Frequenzmodulation. Mit einer Frequenz f_p modulierte Chowning einen Oszillator der Frequenz $f_0 = nf_p$, wobei n für eine ganze Zahl steht. Die entstehenden Partialtöne liegen dann alle bei ganzzahligen Vielfachen von f_p, die Amplitude wird bei f_0 maximal. Das Spektrum erinnert an die Formanten

Zwei einfache Wellenformen, die mit *Music V* erzeugt werden können.

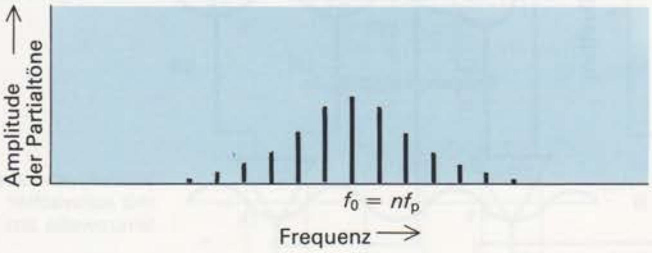




Damit sich die Wellenform mit der Amplitude ändert, kann man eine Sinuswelle durch eine Schaltung mit der Übertragungscharakteristik A verzerren: Hat die Sinuswelle am Eingang eine kleine Amplitude, ist auch das Ausgangssignal fast sinusförmig (B). Wird die Amplitude des Eingangssignals vergrößert, erscheinen am Ausgang überhöhte Wellenberge und flachere Täler (C); diese Wellenform enthält viele harmonische Partialtöne.



Chownings Synthese durch Frequenzmodulation. Man geht von einer Sinuswelle aus, die als Funktion einer veränderlichen „Pseudozeit" t' aufgefaßt wird (A). Dann betrachtet man, wie sich t' als Funktion der tatsächlichen Zeit t ändert (B), diese sinusförmige Schwankung ist eine Art Vibrato. In C ist die Wellenform von A über der tatsächlichen Zeit t aufgetragen; jetzt ist die Kurve nicht symmetrisch, und die Welle enthält viele harmonische Partialtöne. Verstärkt man allmählich das Vibrato (als Funktion von t'), dann treten die höheren Partialtöne immer mehr in den Vordergrund.



Wenn man mit einer Sinuswelle der Frequenz f_p eine andere Sinuswelle der Frequenz $f_0 = nf_p$ moduliert (wobei n eine ganze Zahl ist), ergibt sich das gezeigte Spektrum: Alle Partialtöne sind Harmonische der Frequenz f_p, und die größte Amplitude wird bei f_0 erreicht. Diese Situation erinnert an die Formanten von Vokalen.

der menschlichen Stimme. In beiden Fällen treten nur Partialtöne einer Grundfrequenz f_p auf, die sich um die Frequenz f_0 verteilen. Auf diese Weise konnte Chowning sehr natürlich klingende Singstimmen simulieren.

Bei der *subtraktiven Synthese* geht man von Wellenformen aus, die sehr viele Partialtöne enthalten, und schickt sie durch ein (digitales) Filter. Damit wird die Tonerzeugung der Stimme oder auch mancher Instrumente nachgeahmt. Allerdings erfordert die subtraktive Synthese viel Rechenzeit, ohne dafür bessere Ergebnisse zu liefern als die weniger aufwendigen Methoden. Erfahrungsgemäß ist es günstiger, die gewünschten Wellenformen oder Spektren direkt zu erzeugen – und nicht zu versuchen, die physikalischen Vorgänge der Tonentstehung in mechanischen Instrumenten zu simulieren.

Ganz wichtig für die Synthese von Klängen ist ein statistisches oder fast statistisches Rauschen, mit dem man einem künstlichen Vibrato oder Tremolo seine unnatürliche Gleichmäßigkeit nehmen kann. Bei manchen Kompositionen wird Rauschen in verschiedenen Bandbreiten eingesetzt, was in gewisser Hinsicht ähnlich wie Flüstern wirkt. Man hat hier mit vielen anderen Tricks gearbeitet, von denen ich nur noch den *Ringmodulator* nennen möchte. Mit ihm lassen sich alle Partialtöne um einen konstanten Frequenzbetrag verschieben.

Der Computer ist zwar das wohl vielseitigste Instrument, um neue Klänge hervorzubringen, aber bislang wird er in der Musik häufiger eingesetzt, um Klänge für die Wiedergabe aufzubereiten. Er kann schlicht als Aufnahmegerät dienen, das Klänge kombiniert oder zerlegt, langsamer oder schneller oder auch rückwärts spielt und das Klangspektrum auf vielfältige Weise variiert. All das gab es bereits in der *Musique concrète:* Da wurden Tonbänder zertrennt, mit anderen Geschwindigkeiten wiedergegeben als aufgenommen oder rückwärts abgespielt, mit Filtern veränderte man auch schon das Spektrum der aufgenommenen Klänge. Natürlich war das ziemlich mühselig, und beim mehrmaligen Überspielen wurde das Rauschen immer stärker. Statt Bänder mechanisch zu zerschneiden, kann man den Computer die gewünschten Passagen zusammenstellen lassen.

Die Stärke des Computers liegt natürlich darin, für Klänge mit vorgegebener Höhe alle möglichen Klangfarben zu erzeugen – oder auch zu analysieren. So können wir die Frequenzen und Einhüllenden gezielt einsetzen, um Klangeffekte zu erreichen. Beispielsweise hat Andy Moorer aus zwei Aufnahmen, bei denen Richard Brautigans Gedicht *Lions are Growing* rezitiert wurde, per Computer Musik gemacht: ein Lied, das in Akkorden gesungen wurde und an passender Stelle sogar in Löwengebrüll überging.

G: Kurzbiographien

Ich wollte den laufenden Text nicht immer wieder dadurch unterbrechen, daß ich genauere Angaben über die erwähnten Personen machte. Bei einigen davon ergab es sich im weiteren Verlauf von selbst, bei anderen (Bach, Beethoven) erübrigt es sich von vornherein. Einige historische und lebende Persönlichkeiten möchte ich aber doch noch kurz vorstellen.

Babbitt, Milton (geboren 1916). Komponist, Theoretiker und Verfechter einer total seriellen Musik. Professor für Musik an der Universität Princeton und zeitweise Leiter des Columbia-Princeton-Zentrums für elektronische Musik, wo er eng mit Otto Luening und Vladimir Ussachevsky zusammenarbeitete. Er komponierte unter anderem *All Set* (ein mathematisches Wortspiel) und *Philomel* für Synthesizer und Sopran.

Batteau, Wayne (1916–1967). Ein unabhängiger Forscher, der auf den enormen Einfluß der Ohrmuschel beim Richtungshören hinwies.

Békésy, Georg von (1899–1972). Er erhielt 1961 den Nobelpreis für Medizin (Physiologie) für seine Arbeiten zur Funktion von Schnecke und Basilarmembran. Seine Experimente zum Hören hat er in seinem Buch *Experiments in Hearing* zusammengefaßt.

Boulez, Pierre (geboren 1925). Komponist, Pianist und Dirigent des *Orchestre français*, Gründer und Leiter des Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (IRCAM) am Centre Pompidou in Paris. Umfang und Vielseitigkeit seiner Beiträge zur Musik sind stark beeindruckend.

Broadbent, D. E. (geboren 1926). Psychologe und Autor von *Perception and Communication*. Er war viele Jahre lang Leiter der Applied Psychology Unit am Medical Research Council im englischen Cambridge. Heute ist er Professor für experimentelle Psychologie in Oxford.

Cage, John (geboren 1912). Amerikanischer Komponist, der den Zufall als kompositorisches Mittel einsetzt. Zu seinen besten Stücken gehört *4'33"* (der Ruhe).

Cagniard de la Tour, Charles (1777–1859). Französischer Ingenieur, Erfinder der Sirene.

Chavez, Carlos (1899–1978). Mexikanischer Komponist und Dirigent. Seine *Toccata für Schlagzeug* von 1942 ist für elf verschiedenartige Schlaginstrumente geschrieben, darunter einige recht urtümliche. Teilweise wollte Chavez damit an Klänge anknüpfen, wie sie die Musik der alten mexikanischen Indianerkulturen geprägt haben.

Chowning, John M. (geboren 1934). Er studierte Komposition an der Universität Wittenberg (bis zum Abschluß der B-Prüfung im Jahre 1959) und promovierte 1966 in Komposition an der Stanford-Universität. Unterstützt von Max Mathews entwickelte er dort ein Musikprogramm für Computer und baute ein Zentrum für Computermusik aus. Bei seinen Kompositionen nutzte er neue Effekte: bewegten Klang in *Turenas*, anharmonische Partialtöne in *Stria*, Übergänge zu menschlichen Stimmklängen in *Phōnē*.

Cohen, Elizabeth Ann. Ohne ihre Hilfe wäre dieses Buch wahrscheinlich nicht entstanden. Sie studierte an der Universität von Kalifornien in Berkeley, am Bensingten College (B. A. 1975) und an der Stanford-Universität (M. S. in Elektrotechnik 1978, Ph. D. in Akustik 1980). Während der siebziger Jahre arbeitete sie an den Bell-Laboratorien. Mit Computern und im Bibliothekswesen kennt sie sich gleich gut aus.

Cowell, Henry (Dixon) (1897–1965). Ein profilierter amerikanischer Komponist, der sich stilistisch nicht festlegte. In seiner frühen Klavier- und Orchestermusik arbeitete er mit Cluster-Klängen, die er als Akkorde betrachtete, abweichend vom Standpunkt, der in diesem Buch vertreten wird. Später wandte sich Cowell zunehmend tonaler Musik zu.

d'Alembert, Jean Le Rond (1717–1783). Mathematiker, Naturwissenschaftler und Philosoph, Sekretär der Französischen Akademie der

Wissenschaften. In seinem Buch *Eléments de musique* beschrieb und verfocht er 1752 die Ideen Rameaus.

Fletcher, Harvey (1884–1981). Ein hervorragender Physiker, der an den Bell-Laboratorien weitreichende und wichtige Arbeiten auf den Gebieten Sprache, Hören, Schallaufzeichnungen und Schallwiedergabe leitete. In seinen Büchern *Speech and Hearing* (1929) und *Speech and Hearing in Communication* (1953) sind die Ergebnisse seiner Arbeiten zusammengefaßt, die er noch mit Röhrenelektronik durchführte.

Fux, Johann Joseph (1660–1741). Österreichischer Komponist und Musiktheoretiker. Sein *Gradus ad Parnassum* (1725) war Lehrbuch und Anleitung zur Komposition – insbesondere auch für Mozart, Haydn und Beethoven. Die Regeln des Kontrapunkts leitete Fux aus den Werken einer noch älteren Komponistengeneration ab, darunter Palestrina (1525–1594).

Gilbert, Edgar N. (geboren 1923). Ein vielseitiger Mathematiker an den Bell-Laboratorien. Seine faszinierenden Arbeiten zum *verlorenen Akkord* hat er nie veröffentlicht. Mit kombinatorischen Methoden versuchte er, die Zahl der möglichen Akkorde so weit zu reduzieren, daß man sie alle in vertretbarer Zeit abspielen kann. Nachdem er sie gehört hatte, war er der Meinung, daß der verlorene Akkord die Stille sein müsse.

Grainger, Percy (1882–1961). Australischer Pianist und Komponist. Als einer der ersten führte er Cluster-Klänge als musikalisches Ausdrucksmittel ein (und nicht nur zur Imitation etwa von Kanonenschüssen).

Green, David M. (geboren 1932). Ein Fachmann für alle Bereiche des Hörens, der in Harvard und San Diego gearbeitet hat und jetzt am Massachusetts Institute of Technology (MIT) ist. Eine verläßliche Quelle zum Thema Hören ist sein Buch *An Introduction to Hearing* (von 1976).

Grey, John M. (geboren 1947). An der Stanford-Universität hat er die musikalischen Klangfarben eingehend untersucht, indem er sie mit dem Computer analysierte, synthetisierte und miteinander verglich.

Harris, Cyril (geboren 1917). Professor für Elektrotechnik und Architektur an der Columbia-Universität und in Amerika bei der Planung guter Konzertsäle führend. Seine Bücher *Acoustical Designing in Architecture* von 1958 (zusammen mit Vern O. Knudsen) und *Handbook of Noise Control* (1979) sind Informationsquellen von unschätzbarem Wert.

Helmholtz, Hermann Ludwig Ferdinand von (1821–1894). Arzt, Anatom, Physiologe und Physiker des 19. Jahrhunderts, der sich auch ausgezeichnet in der Musik ausgekannt hat. Sein Buch *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik* faßt erstmals Forschungen über Natur und Wahrnehmung musikalischer Klänge in einem umfassenden Überblick zusammen.

Hiller, Lejaren A., jr. (geboren 1924). Komponist und Lehrer am Department of Music an der State University of New York in Buffalo. Veröffentlichte 1957 zusammen mit L. M. Isaacson, einem Chemiker mit Computerkenntnissen, die *Illiac Suite* für Streichquartett. Das Stück war vom Illiac-Computer der Universität von Illinois in Urbana nach den kontrapunktischen Regeln von Fux komponiert worden.

Ligeti, György (geboren 1923). Seinen Kompositionen merkt man an, daß er bereits 1958 am Studio für elektronische Musik in Köln Erfahrungen gesammelt hat, wo Stockhausen 1953 seine Arbeit begann. Aus dieser Zeit ist nur das Stück *Articulation* erhalten. Mit den damals möglichen elektronischen Tönen war Ligeti noch nicht zufrieden, aber er experimentierte bereits mit orchestralen Klängen, wie sie für seine späteren Arbeiten typisch sind. 1972 hielt Ligeti Gastvorlesungen in Stanford.

Luening, Otto (geboren 1900). Komponist, Dirigent und Flötist, zeitweise Leiter des Columbia-Princeton Electronic Music Center.

Mathews, Max V (geboren 1926). Ihm ist dieses Buch gewidmet. Seine Computerprogramme, besonders *Music V*, machten den Computer zum veritablen Musikinstrument. Viele Musiker wie Jean-Claude Risset, John Chowning, Barry Vercoe, Gerald Strang, Andrew Moorer und Richard Moore arbeiteten mit Mathews zusammen, der auch am IRCAM in den ersten Jahren als wissenschaftlicher Berater tätig war. Besonders mit seinen elektronischen Streichinstrumenten hat er interessante Beiträge zur Akustik geliefert. Heute leitet er eine Forschungsabteilung der Bell-Laboratorien.

Mayer, Alfred M. (1836–1897). In seinen *Researches in Acoustics* im *Philosophical Magazine* beschrieb Mayer schon 1876 das Phänomen Maskierung und stellte fest, daß tiefe Töne von hohen nicht maskiert werden können. Er hatte beobachtet, daß bei großen Orchestern der

Geigenklang bisweilen von den tieferen und stärkeren Tönen der Blasinstrumente völlig verdeckt wird.

Mersenne, Marin (1588–1648). Französischer Mathematiker, Naturphilosoph und Theologe. In seiner *Harmonie universelle* (1636–1637) stellte er zur selben Zeit wie Galileo Galilei eine Beziehung zwischen Tonhöhe und Periodizität her. Als erster hat er – noch etwas ungenau – die Schallgeschwindigkeit gemessen.

Moore, F. Richard (geboren 1944). Studierte Musik und promovierte in den Ingenieurwissenschaften. In Stanford und an den Bell-Laboratorien experimentierte er mit Computermusik, bevor er die Leitung einer Arbeitsgruppe an der Staatsuniversität von Kalifornien in San Diego übernahm. Dort hat er ein Programm CMUSIC entwickelt, das auf dem UNIX-Betriebssystem läuft. Moore interessiert sich speziell für die Echtzeitverarbeitung bei der Klangsynthese per Computer.

Moorer, James A. (geboren 1945). Erfahren in Musik, Elektrotechnik, angewandter Mathematik und Computertechnik, hat er wichtige Beiträge zur Computeranalyse von Klängen, zum künstlichen Nachhall und zur Umformung und Verarbeitung natürlicher Klänge von Instrumenten und Gesangsstimme geleistet.

Penderecki, Krzysztof (geboren 1933). Komponist, der durch Monumentalwerke wie die *Lukas-Passion* und das *Verlorene Paradies* bekannt wurde. Seine Orchestermusik enthält neben konventionellen Elementen auch einige ungewöhnliche Effekte, die der frühen elektronischen Musik abgelauscht sein könnten.

Ramo, Simon (geboren 1913). Zweiter Vorstandsvorsitzender im Aufsichtsrat der TRW (ehemals Thompson Ramo Wooldridge) mit einem Faible für Wissenschaft und Technik. Er war einer meiner Kollegen am California Institute of Technology (Caltech) und kam 1963 kurz mit Computermusik in Berührung. Er ist ein guter Geiger und engagiert sich aktiv am Musikleben von Los Angeles.

Risset, Jean-Claude (geboren 1938). Er genoß eine ausgezeichnete musikalische Ausbildung – Klavierstudium bei Trimaille und Goullon, Komposition bei Demarquez und Jolivet. Später arbeitete er drei Jahre bei Max Mathews an den Bell-Laboratorien, wo er die Grundlagen der Klangsynthese mit Computern entwickelte. 1967 promovierte er in Physik an der Ecole Normale Supérieure. Zwei Jahre später schrieb er einen Katalog mit Computerklängen. In Orsay und Marseille-Luminy baute er 1971 beziehungsweise 1974 musikalische Computersysteme auf. Von 1975 bis 1979 leitete er die Computerabteilung des IRCAM. Heute ist er Professor an der Universität Aix-Marseille und arbeitet über Computermusik in Luminy und am CNRS. Seine Komposition *Songes* wurde auf dem Achten Internationalen Elektronischen Musikwettbewerb in Bourges (1980) mit dem ersten Preis für digitale Musik ausgezeichnet; 1981 bekam er den Grand Prix de la promotion de la symphonique von der französischen Urheberrechtsgesellschaft SACEM.

Sabine, Wallace Clement (1868–1919). Professor für Mathematik und Naturphilosophie in Harvard und Begründer der Raumakustik. Seine *Collected Papers on Acoustics* wurden erst nach seinem Tod (1922) zum ersten Mal veröffentlicht.

Schouten, Jan (1910–1980). Holländischer Physiker und erster Leiter des Instituts für Wahrnehmungsforschung in Eindhoven, wo er viele Jahre gearbeitet hat. Schouten entdeckte das Phänomen der Residual-Tonhöhe.

Schroeder, Manfred (geboren 1926). Leiter des dritten Physikalischen Instituts der Universität Göttingen. Von ihm stammen viele bedeutende Untersuchungen zur Raumakustik. An den Bell-Laboratorien leitete Schroeder Arbeiten über Sprachsynthese und Verschlüsselung sowie verschiedene psychoakustische Fragen.

Shepard, Roger (geboren 1929). Er arbeitete als Psychologe an den Bell-Laboratorien, bevor er nach Harvard und schließlich Stanford ging. Er entwickelte das sogenannte *multidimensional scaling*, das eine computerorientierte, nicht-lineare Verbesserung der Faktorenanalyse darstellt. Er hat – wie auch seine Schüler – großes Interesse an der Musik. Nach ihm ist der ewig ansteigende „Shepard-Ton" benannt.

Sperry, Roger (geboren 1913). Physiologe und Psychologe, der den Nobelpreis für Medizin erhielt. Er wurde durch Untersuchungen bei Tieren und Patienten bekannt, deren Gehirnhemisphären chirurgisch voneinander getrennt waren. (Bei Menschen wird ein solcher Eingriff nur in Fällen von schwerer Epilepsie vorgenommen.) Diese Forschung brachte die ersten gesicherten Hinweise darauf, in welchen Hemisphären des Gehirns unterschiedliche Fähigkeiten angesiedelt sind.

Stevens, S. S. (1903–1973). Er war jahrelang als Psychologe in Harvard und setzte sich – mit Erfolg – dafür ein, daß die gesetzmäßige

Beziehung zwischen (empfundener) Lautstärke und Schallintensität zum internationalen Standard wurde.

Stockhausen, Karlheinz (geboren 1928). Komponist und Dirigent. Bekannt wurde er durch seine elektronische Musik. Er gehörte zu den Mitbegründern des Studios für elektronische Musik des Westdeutschen Rundfunks in Köln und wurde 1963 sein Leiter. Er hat jedoch überwiegend für konventionelle Instrumente komponiert, wobei er besonderen Wert auf Klangstrukturen legte. Einige seiner Partituren sehen sehr ungewöhnlich aus; manchmal gibt er nur ganz allgemeine Richtlinien, was gespielt werden soll, anderes schreibt er peinlich genau in einer ungewöhnlichen Notation vor.

Strang, Gerald (geboren 1908). Assistent von Arnold Schönberg, Schüler von Ernst Toch, Herausgeber von *New Music* und Leiter der Musikabteilung an den kalifornischen Staatsuniversitäten in Long Beach und Northridge. Er komponierte gleichermaßen für konventionelle Instrumente und Computer.

Sundberg, Johann (geboren 1936). Professor für Musikalische Akustik am Königlichen Institut für Technologie in Stockholm. Viele Musiker kennen ihn als Entdecker der Gesangsformanten, aber er hat ein weites Gebiet in der Musik erforscht. So stellte er eine „Grammatik" der schwedischen Volksmusik auf und ließ einen Computer Melodien gleichen Charakters komponieren, er untersuchte Abweichungen vom üblichen Frequenzverhältnis 2.1 bei der Beurteilung von Oktaven und Intervallen bei gesungener oder gespielter Musik. Außerdem beschäftigte er sich mit Raumakustik und vielen anderen musikalischen Dingen.

Tenney, James (geboren 1934). Komponist und Musiktheoretiker, der während der Anfangszeit der Computermusik einige Jahre an den Bell-Laboratorien verbrachte. Später ging er an das California Institute of Arts nach Harvard und ist jetzt an der York-Universität in Kanada.

Terhardt, Ernst (geboren 1934). Ein Fachmann der musikalischen Akustik. Im Jahre 1977 demonstrierte er am IRCAM Rameaus *basse fondamentale*, indem er damit eine klar erkennbare Melodie vorspielte. Terhardt ist bekannt für seine Arbeiten über die Wahrnehmung von Tonhöhen.

Ussachevsky, Vladimir (geboren 1911). Neben Milton Babbitt und Otto Luening war er einer der Leiter des Columbia-Princeton Electronic Music Center. Aber als einziger machte er sich den Computer zum Werkzeug. Später ging er an die Universität von Utah, die als Hochburg der Computertechnik bekannt ist.

Varèse, Edgard (1883–1965). Komponist. Er hat viele seiner frühen Werke vernichtet, aber was übrig blieb, spricht für sich. Er kannte keine Vorurteile und ließ sich nicht durch Theorien einengen. Er war liebenswürdig und überzeugend und bleibt unvergeßlich. Seine Frau Louise Varèse hat 1971 eine Biographie über ihn geschrieben (*A Looking Glass Diary*).

Vercoe, Barry Lloyd (geboren 1939). Dieser Meister des Keyboards leitet die Arbeitsgruppe Computermusik im Fachbereich Geisteswissenschaften des MIT Sein Studium an der Universität von Auckland schloß er mit der B-Musikprüfung und dem B. A. in Mathematik ab. In Fach Komposition promovierte er später an der Universität von Michigan.

Wessel, David L. (geboren 1942). Als Psychologe hat er an der Michigan State University experimentell gearbeitet; ist jetzt am IRCAM, wo er umfangreiche Studien zur Klangfarbe in der Musik angestellt hat.

Xenakis, Yannis (geboren 1922). Er studierte am Institut für Technologie in Athen und arbeitete zwölf Jahre bei Le Corbusier, mit dem er den Philips-Pavillon für die Weltausstellung 1958 in Brüssel entwarf. (Übrigens war damals im Pavillon elektronische Musik von Varèse zu hören.) 1952 wandte sich Xenakis der Musik zu. Er kritisierte die serielle (Zwölfton-)Musik, weil ihr linearer Aufbau innerhalb einer komplexen Polyphonie nicht gehört wird, das Ohr spricht nämlich hauptsächlich auf die Intensitätsdichte der Klänge an, die von der Zwölfton-Organisation nicht beeinflußt werden. Xenakis will statt dessen den Gesamtablauf steuern und weniger die kleinen Details. Zusammenhänge werden dann über statistische Mittelwerte hergestellt. Diese *formalistische Musik* beruht vielleicht auf einer Mathematik, die aus der Perspektive des Ingenieurs etwas zusammenhanglos und manchmal auch irrelevant erscheint; und ein unmathematischer Musiker würde sich wohl kaum damit abgeben. Aber Xenakis gelingt mit seiner Mathematik eine sehr klanggewaltige Musik.

Literatur

Apel, W *Harvard Dictionary of Music.* Harvard University Press 1958.
Ein umfassendes Nachschlagewerk.

Békésy, G. v. *Experiments in Hearing.* McGraw-Hill 1960.

Bliven, B. *Annals of Architecture.* In: *New Yorker* Bd. 8, November 1976.

Broadbent, D. E. *Perception and Communication.* Pergamon Press 1958.

Computer Music Journal. Herausgegeben von MIT Press.
Besonders empfehlenswert für Leser dieses Buches, aber teuer.

Damaske, P *Head-Related Two-Channel Stereophony with Loudspeaker Reproduction.* In: *J. Acoust. Soc. Am.* Bd. 50 (1971) S. 1109–1115.

dB: The Sound Engineering Magazine.
Für jene, die immer das Neueste auf dem Gebiet von Schallaufzeichnung und Wiedergabe wissen wollen. Erhältlich bei Sagamore Publishing, 1120 Old Country Rd., Plainview, Long Island, New York 11803.

Deutsch, D. (Hrsg.). *The Psychology of Music.* Academic Press 1982.
Viele musikalische Themen sind ausgezeichnet beschrieben, und das Buch enthält eine umfangreiche Bibliographie.

Encyclopaedia Britannica.
Die allgemeinen Artikel über Musik sind in allen Ausgaben nützlich und genau.

Fletcher, H. *Speech and Hearing.* Van Nostrand 1929.

Fletcher, H. *Speech and Hearing in Communication.* Van Nostrand 1953.

Gilbert, E. N. *An Iterative Calculation of Reverberation.* In. *J. Acoust. Soc. Am.* Bd. 69 (1981) S. 178–184.

Green, D. M. *An Introduction to Hearing.* Erlbaum 1976.
Ein ausgewogener und klar geschriebener Leitfaden über Klang und Hören. Man findet dort alle die Theorien und Feinheiten, die ich in diesem Buch bewußt nicht aufgenommen habe, und ein sehr gutes Verzeichnis der technischen Literatur.

Grey, J. M. *Multidimensional Perceptual Scaling of Musical Timbre.* In. *J. Acoust. Sc. Am.* Bd. 61 (1977) S. 1270–1277

Hall, D. E. *Musical Acoustics.* Wadsworth 1980.
Vielleicht das beste erhältliche Lehrbuch in englischer Sprache.

Harris, C. M. *Handbook of Noise Control.* McGraw-Hill 1979.

Helmholtz, H. v. *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik.* Vieweg, 1. Aufl. 1863, Nachdruck der 6. Aufl. Hildesheim (Olms) 1968.
Das grundlegende Buch der Akustik, man muß sich schon durchbeißen.

Hutchins, C. M. *The Physics of Music.* Freeman 1978.
Hier wird die Funktion von Musikinstrumenten und der menschlichen Stimme in allen Einzelheiten beschrieben – ein Thema, auf das ich nicht eingegangen bin.

Journal of the Acoustical Society of America (zitiert als *J. Acoust. Soc. Am.*)
Hauptinformationsquelle über die Forschungsergebnisse der Akustik.

Knudsen, V D., C. M. Harris. *Acoustical Designing in Architecture.* Nachdruck des American Institute of Physics 1978.
Gut und preiswert.

Mathews, M. V *The Technology of Computer Music.* MIT Press 1969.
Wichtig für alle, die genauer wissen wollen, wie man mit dem Computer Musik macht.

Mathews, M. V , J. R. Pierce. *Harmony and Nonharmonic Partials.* In. *J. Acoust. Soc. Am.* Bd. 68 (1980) S. 1252–1257

Mayer, A. M. *Researches in Acoustics.* In. *Philosophical Magazine,* 1876. Nachdruck in E. D. Schubert (Hrsg.). *Psychological Acoustics.* Dowden Hutchinson and Ross 1979.

Mellert, V *Construction of a Dummy Head after New Measurements of the Threshold of Hearing.* In. *J. Acoust. Soc. Am.* Bd. 51 (1972) S. 1359–1361.

Olson, H. F. *Modern Sound Reproduction.* Nachdruck 1978 bei R. D. Krieger.
Das klassische Buch über Schallaufzeichnung und Wiedergabe. Technisch ist es zwar überholt, enthält aber viele nützliche Hinweise.

Pierce, J. R. *Attaining Consonance in Arbitrary Scales.* In: *J. Acoust. Soc. Am.* Bd. 40 (1966) S. 249.

Plomp, R. *Aspects of Tone Sensation.* Academic Press 1976.
Ein wichtiges Buch von einem bedeutenden Forscher.

Plomp, R., W J. M. Levelt. *Tonal Consonance and Critical Bandwidth.* In. *J. Acoust. Soc. Am.* Bd. 38 (1965) S. 548–560.

Rameau, J.-P *Treatise on Harmony.* Dover Reprint 1971.
Ein bedeutendes Werk, aber schwer zu lesen. Das Wichtigste daraus ist in diesem Buch beschrieben.

Recording Engineer Producer
Die Zeitschrift über professionelle Schallaufzeichnung und Wiedergabe. Erhältlich bei Callay Communications, 1850 North Whitley Ave., Hollywood CA 90028.

Risset, J.-C., M. V Mathews. *Analysis of Musical Instrument Tones.* In. *Physics Today.* Bd. 22 (1960) S. 23–30.

Roads, C., J. Snell, J. Strawn (Hrsg.). *Computer Music.* MIT Press 1982.
Enthält eine Fülle von wichtigen Informationen über Akustik.

Rossing, T D. *Acoustics of Percussion Instruments.* in. *The Physics Teacher* Bd. 14 (1976) S. 546–556., Bd. 15 (1977) S. 278–288.

Rossing, T D. *Physics and Psychophysics of High-Fidelity Sound.* In. *The Physics Teacher* Bd. 17 (1979) S. 563, Bd. 18 (1980) S. 278–426; Bd. 19 (1981) S. 293–304.

Rossing, T D., H. J. Sathoff. *Modes of Vibration and Sound Radiation of Handbells.* In. *J. Acoust. Soc. Am.* Bd. 68 (1980) S. 1600–1607

Sabine, W C. *Collected Papers on Acoustics.* Harvard University Press 1922. Dover Reprint 1964.

Schouten J. F. *The Residue, a New Component in Subjective Sound Analysis.* In. *K. Ned. Akad. Wet. Proc.* Bd. 43 (1940) S. 356–365.

Schroeder, M. R. *Computer Models for Concert Hall Acoustics.* In. *Amer J. Physics.* Bd. 41 (1973) S. 461–471.

Schroeder, M. R. *Toward Better Acoustics for Concert Halls.* In. *Physics Today.* Bd. 33 (1980) S. 24–30.

Schroeder, M. R., B. S. Atal, G. M. Sessler; J. E. West. *Acoustical Measurements in Philharmonic Hall (New York)* In. *J. Acoust. Soc. Am.* Bd. 40 (1966) S. 434–448.

Schroeder, M. R., D. Hackman. *Iterative Calculation of Reverberation Time.* In. *Acoustics.* Bd. 45 (1981) S. 269–273.

Schubert, E. D. (Hrsg.). *Psychological Acoustics.* Dowden, Hutchinson and Ross 1979.
Die Originalveröffentlichungen, die hier nachgedruckt sind, stammen aus der Zeit zwischen 1876 bis 1970. Sie vermitteln einen ausgezeichneten Einblick darüber, wie Entdeckungen in der Akustik wirklich stattfinden. Jeder der sechs Teile der Sammlung enthält eine Einführung und ein Literaturverzeichnis bis 1977

Shankland, R. S. *Acoustical Designing for Performers.* In. *J. Acoust. Soc. Am.* Bd. 65 (1979) S. 140–142.

Shepard, R. *The Analysis of Proximities. Multidimensional Scaling with an Unknown Distance Function.* In. *Psychometrics.* Bd. 27 (1962) S. 125–140, S. 219–246.

Slaymaker, F. H. *Chords from Tones Having Stretched Partials.* In. *J. Acoust. Soc. Am.* Bd. 47 (1970) S. 1569–1571.

Sundberg, J. *The Acoustics of the Singing Voice.* In: *Scientific American.* Bd. 236 (1977) S. 82–91.

Terhardt, E. *Pitch, Consonance, and Harmony.* In. *J. Acoust. Soc. Am.* Bd. 55 (1974) S. 1061–1069.

Terhardt, E., G. Stoll, M. Seewann. *Pitch of Complex Signals According to Virtual Pitch Theory.* In. *J. Acoust. Soc. Am.* Bd. 71 (1982) S. 671–678.

Van Bergjeick, W A., J. R. Pierce; E. E. David, Jr. *Waves and the Ear* Doubleday 1960.
Ist nicht mehr ganz auf dem neuesten Stand, geht aber weit genauer auf Neuroanatomie und Neurophysiologie des Hörens ein, als ich es in diesem Buch konnte.

Wegel, R. L, C. E. Lane. *The Auditory Casking of One Pure Tone by Another and Its Probable Relation to the Dynamics of the Inner Ear* In. *Physical Review.* Bd. 23 (1924) S. 266–285.

Woram, J. *The Recording Studio Handbook.* Sagamore 1977
Nützliche Hinweise zur Schallaufzeichnung und Wiedergabe.

Xenakis, Y *Formalized Music.* Indiana University Press 1971.

Zwicker, E., R. Feldtkeller. *Das Ohr als Nachrichtenempfänger.* Stuttgart (Hirzel) 1967

Ergänzende deutschsprachige Literatur

Blume, F. (Hrsg.). *Die Musik in Geschichte und Gegenwart.* Kassel und Basel 1949.

Hesse, H.-P *Die Wahrnehmung von Tonhöhe und Klangfarbe als Problem der Hörtheorie.* Köln (Volk) 1972.

Laws, P *Entfernungshören und das Problem der Im-Kopf-Lokalisierbarkeit von Hörereignissen.* In. *Acustica.* Bd. 29 (1973) S. 243.

Lipps, T *Psychologische Studien.* Leipzig (Durrsche Buchhandlung) 1905.

Meyer, E., E. G. Neumann. *Physikalische und technische Akustik.* Braunschweig (Vieweg) 1967

Meyer, J. *Akustik und musikalische Aufführungspraxis.* Frankfurt/M. Das Musikinstrument 1972.

Musiklexikon. Mainz (Schott) 1967

Roederer, J. G. *Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik.* Berlin (Springer) 1977

Sibringer, H., A. Zehelein. *Handbuch der musikalischen Akustik.* Regensburg (Habbel) 1951.

Terhardt, E. *Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen, I, II.* In. *Acustica.* Bd. 26 (1972) S. 173, S. 187

Terhardt, E., H. Fastl. *Zum Einfluß von Störtönen und Störgeräuschen auf die Tonhöhe von Sinustönen.* In. *Acustica.* Bd. 25 (1971) S. 53.

Walliser, K. *Über die Abhängigkeit der Tonhöhenempfindung von Sinustönen, von Schallpegel, von überlagertem drosselndem Störschall und von der Darbietungsdauer* In. *Acustica.* Bd. 21 (1969) S. 211.

Wellek, A. *Musikpsychologie und Musikästhetik.* Frankfurt/M. (Akad. Verlagsgesellschaft) 1963.

Bildnachweise

Eröffnungsphoto (Béla Bartók hört Volkslieder in einem heute tschechischen Dorf)
Aus dem Nachlaß von Béla Bartók.

Seite 1 (links)
Mit Erlaubnis des Conservatoire Royal de Musique, Brüssel.

Seite 1 (Krummhörner)
Photo: William Gordon Davis/Black Star.

Seite 1 (Horn)
Mit Erlaubnis der King Musical Instruments, Inc., Eastlake, Ohio.

Seite 2
Mit Erlaubnis von Lawrence Schoenberg und des Arnold Schoenberg Institute.

Seite 3
Mit Erlaubnis von Gerald Strang.

Seite 4 (links)
Stadtbibliothek im Lincoln Center, New York; Astor-, Lenox- und Tilden Foundation.

Seite 4 (rechts)
Photo: Peter Moore.

Seite 5 (links)
Mit Erlaubnis von Max V Mathews.

Seite 5 (rechts)
Stadtbibliothek im Lincoln Center, New York; Astor-, Lenox- und Tilden Foundation.

Seite 6 (oben)
Stadtbibliothek im Lincoln Center, New York; Astor-, Lenox- und Tilden Foundation.

Seite 6 (links unten)
Mit Erlaubnis von Otto C. Luening.

Seite 6 (Mitte unten)
Photo: Ann Holloway.

Seite 6 (rechts unten)
Mit Erlaubnis der Stanford-Universität.

Seite 7 (oben)
Photo: Ralph Fassey.

Seite 7 (unten)
Photo: Jean-Pierre Armand. Mit Erlaubnis des Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (IRCAM), Paris.

Seite 8
Mit Erlaubnis von Lejaren Hiller.

Seite 9 (links)
Mit Erlaubnis von Moog Music, Buffalo, New York.

Seite 9 (rechts)
Mit Erlaubnis der New England Digital Company.

Seite 10
Mit Erlaubnis von James A. Moorer.

Seite 11
Copyright © 1963 bei Hermann Moeck-Verlag, Celle. Mit Erlaubnis des amerikanischen Vertriebspartners des Hermann Moeck-Verlags.

Seiten 14/15 (Orgelregister)
M. P Möller Inc., Hagerstown, Maryland.

Seite 17 (oben)
Museum der Universität von Pennsylvania.

Seite 17 (unten)
Photo: Zygmunt Haar/Black Star.

Seite 18 (links)
Aus: *The Science of Sound.* Von John Tyndall. Philosophical Library, New York 1964.

Seite 19
Nach einer Zeichnung in. *Musical Acoustics. An Introduction.* Von Donald E. Hall. Wadsworth 1980.

Seite 20 (links)
Aus. *Harmonie universelle.* Von Marin Mersenne. Mit Erlaubnis von Martinus Nijhoff Publishers.

Seite 20 (oben)
Aus: *Anecdotal History of the Science of Sound.* Von Dayton C. Miller. Copyright © 1935 bei Macmillan Publishers; seit 1963 bei The Cleveland Trust Company.

Seite 20 (unten)
Mit Erlaubnis des Metropolitan Museum of Art, Fletcher-Fonds, 1956.

Seite 22
Photo: Peter Simon/Black Star.

Seite 26
Photo: Saxon Donnelly. Mit Erlaubnis der Universität von Kalifornien in Berkeley.

Seite 27
Photo: Philip L. Molton.

Seite 28
Mit Erlaubnis von Julio Prol.

Seite 29
Mit Erlaubnis von Steinway & Sons.

Seiten 32/33 (Wellen)
Michael Plass und Scott Kim, Copyright © 1983 bei Scott Kim

Seite 37 (unten)
Mit Erlaubnis von Elizabeth A. Cohen, Andrew Schloss und Eric Schoen.

Seite 39 (links oben)
Mit Erlaubnis des American Institute of Physics, Niels Bohr Library.

Seite 39 (links unten)
Aus: *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik.* Von Hermann von Helmholtz.

Seite 40 (links oben)
Photo: Carl Frank/Photo Researchers.

Seite 40 (rechts oben)
Photo: Bob Shamis.

Seite 40 (links unten)
Mit Erlaubnis von Cliché Publimages, Musée Instrumental du Conservatoire National Supérieur de Musique, Paris.

Seite 40 (rechts unten)
Photo: Constantine Manos/Magnum.

Seite 41 (links oben)
Photo: William P Gottlieb.

Seite 41 (rechts oben)
Photo: Bob Shamis.

Seite 41 (rechts)
Mit Erlaubnis von King Musical Instruments, Eastlake, Ohio.

Seite 42 (oben)
Aus. *Klang und Akustik der Geige.* Von Carleen Maley Hutchins. In. Spektrum der Wissenschaft, 12/1981. Copyright © 1981 bei Scientific American.

Seite 42 (unten)
Mit Erlaubnis vom King Musical Instruments, Eastlake, Ohio.

Seite 43 (unten)
Nicolet Scientific Corporation. Mit Erlaubnis von Max V Mathews.

Seite 44 (oben)
Mit Erlaubnis von Elizabeth A. Cohen, Scott Forster, Mikkey Hart und des Center for Computer Research in Music and Acoustics der Stanford-Universität.

Seite 45
Sonagramme von A. M. S. Quinn. Mit Erlaubnis von Max V Mathews.

Seite 46 (oben)
Mit Erlaubnis von Elizabeth A. Cohen.

Seite 47 (unten)
Mit Erlaubnis von Elizabeth A. Cohen, des Center for Computer Research in Music and Acoustics der Stanford-Universität und The Grateful Dead.

Seiten 52/53 (Cellisten)
Photo: Constantine Manos/Magnum.

Seite 55
Mit Erlaubnis von Elizabeth A. Cohen.

Seiten 62/63
(Auszug aus Krzysztof Pendereckis *Polymorphia*)
Mit Erlaubnis der amerikanischen Vertretung des Hermann Moeck Verlags. Copyright © 1963 bei Hermann Moeck Verlag, Celle.

Seite 66
Copyright © 1947 bei Associated Music Publishers.

Seite 67 (unten)
Aus: *Experiments in Tone Perception.* Von R. Plomp. Institute for Perception RVO-TNO. National Defense Research Organization TNO, Soesterberg 1966.

Seite 68 (oben)
Aus: *Critical Band Width in Loudness Summation.* Von E. Zwicker, E. G. Flottorp und S. S. Stevens. In. *The Journal of the Acoustical Society of America.* Bd. 29 (1957) S. 548.

Seite 68 (unten)
Aus: *Experiments in Tone Perception.* Von R. Plomp. Institute for Perception RVO-TNO, National Defense Research Organization TNO. Soesterberg 1966.

Seiten 72/73
(Igor Strawinski beim Dirigieren während einer Probe)
Photo: Martin Dain/Magnum.

Seite 78
Mit Erlaubnis des Institut voor Perceptie Onderzoek, Eindhoven.

Seite 81
Aus: *Harmonie universelle.* Von Marin Mersenne. Mit Erlaubnis von Martinus Nijhoff Publishers.

Seiten 84/85
(Freiluftkonzert) Photo: Al Stephenson, Copyright © Al Stephenson/Woodfilm Camp & Associates.

Seite 87
Aus: *Man's World of Sound.* Von John R. Pierce und Edward E. David, Jr. Copyright © 1958 bei John R. Pierce und Edward E. David, Jr. Mit Erlaubnis von Doubleday & Company.

Seite 88 (oben)
Aus: *Neuroanatomy of the Auditory System.* Von R. R. Gacek. In. J. V Tobias (Hrsg.). *Foundations of Modern Auditory Theory*, Bd. 2. Academic Press 1972.

Seite 89
Aus: *Man's World of Sound.* Von John R. Pierce und Edward E. David, Jr. Copyright © 1958 bei John R. Pierce und Edward E. David, Jr. Mit Erlaubnis von Doubleday & Company.

Seite 90
Aus: *Man's World of Sound.* Von John R. Pierce und Edward E. David, Jr. Copyright © 1958 bei John R. Pierce und Edward E. David, Jr. Mit Erlaubnis von Doubleday & Company.

Seite 91 (oben)
Aus: *The Wonders of Acoustics.* Von Rodolphe Radau, Scribner's 1886.

Seiten 94/95 (Fanfarenzug)
Photo: Nobu Arakawa/Image Bank.

Seite 98
Aus: *Modern Sound Reproduction.* Von Harry F. Olson, Robert E. Krieger, 1978.

Seite 100
Aus: *Speech and Hearing in Communication.* Von Harvey Fletcher. Copyright © 1953 bei D. van Nostrand.

Seite 101
Aus: *Speech and Hearing in Communication.* Von Harvey Fletcher. Copyright © 1953 bei D. van Nostrand.

Seite 102
Aus: *The Acoustical Foundations of Music.* Von John Backus. Mit Erlaubnis von W W Norton & Company. Copyright © 1969 bei W W Norton & Company und John Murray, London.

Seite 103
Aus: *Musical Dynamics.* Von Blake R. Patterson. Copyright © 1974 bei Scientific American.

Seiten 106/107
(Pinchas Zuckerman dirigiert das St. Paul Chamber Orchestra)
Photo: Jeff Lowenthal, Copyright © Jeff Lowenthal/Woodfin Camp & Associates.

Seite 108
Aus: *Speech and Hearing in Communication.* Von Harvey Fletcher.Copyright © 1953 bei D. van Nostrand.

Seite 111
Aus: *On the Masking of a Simple Auditory Stimulus.* Von James P Egan und Harold W Hake. In. *The Journal of the Acoustical Society of America.* Bd. 22 (1950) S. 622–630.

Seite 113
Aus: *The Acoustics of Singing.* Von Johann Sundberg. Copyright © 1977 bei Scientific American.

Seiten 114/115
(Manfred Schroeder im schalltoten Raum der Bell-Laboratorien)
Mit Erlaubnis von Manfred Schroeder.

Seite 122
Aus: *Music, Acoustics, and Architecture.* Von Leo Beranek. Copyright © bei John Wiley & Sons.

Seiten 124/125
(Die abstimmbare Louise M. Davis Symphony Hall in San Francisco)
Mit Erlaubnis von Elizabeth Cohen und des San Francisco War Memorial and Performing Arts Center.

Seite 127 (links)
Aus: *The Collected Papers on Acoustics.* Von Wallace Clement Sabine. Harvard University Press 1922.

Seite 127 (rechts)
Aus: *Architectural Acoustics.* Von K. D. Ginn. Brüel & Kjœr 1967

Seite 128
Photo: James R. Holland/Black Star.

Seite 129
Photo: Eszra Stoller, Copyright © ESTO.

Seite 130
Aus: *Acoustical Measurements in Philharmonic Hall (New York).* Von M. R. Schroeder, B. S. Atal, G. M. Sessler und J. E. West. In. *The Journal of the Acoustical Society of America.* Bd. 40 (1966) S. 434–440.

Seite 131
Aus: *Acoustical Measurements in Philharmonic Hall (New York).* Von M. R. Schroeder,

B. S. Atal, G. M. Sessler und J. E. West. In. *The Journal of the Acoustical Society of America.* Bd. 40 (1966) s. 434–440.

Seite 133 (oben)
Photos. Susanne Faulkner Stevens.

Seite 133 (unten)
Aus: *Acoustical Measurements in Philharmonic Hall (New York).* Von M. R. Schroeder, B. S. Atal, G. M. Sessler und J. E. West. In. *The Journal of the Acoustical Society of America.* Bd. 40 (1966) S. 434–440.

Seite 134
Aus: *Acoustical Measurements in Philharmonic Hall (New York).* Von M. R. Schroeder, B. S. Atal, G. M. Sessler und J. E. West. In. *The Journal of the Acoustical Society of America.* Bd. 40 (1966) S. 434–440.

Seite 135
Aus: *Construction of a Dummy Head after New Measurements of the Threshold of Hearing.* Von V Mellert. In. *The Journal of the Acoustical Society of America.* Bd. 51 (1960) S. 1359–1361.

Seite 136 (unten)
Mit Erlaubnis von Manfred R. Schroeder.

Seite 137
Photo: Gérard Lobal. Mit Erlaubnis des IRCAM, Paris.

Seite 138
Aus. *Binaural Dissimilarity and Optimum Ceilings for Concert Halls. More Lateral Sound Diffusion.* Von M. R. Schroeder. In. *The Journal of the Acoustical Society of America.* Bd. 65 (1979) S. 958–963.

Seiten 140/141
(Rosario Bourdon 1920 während einer Aufnahme mit dem Victor Solon Orchestra)
Mit Erlaubnis der RCA Corporation.

Seite 143
Aus: *Symposium on Wire Transmission of Symphonic Music and Its Reproduction in Auditory Perspective. System Adaptation.* Von E. H. Bedell und Iden Kemey. In. *Bell System Technical Journal.* Bd. 13 (1934) S. 301–308. Copyright © 1934 bei AT & T

Seite 144 (links)
Mit Erlaubnis von Max V Mathews.

Seite 144 (rechts)
Mit Erlaubnis von DAR Magazine.

Seite 148
Photo: Fenno Jacobs/Black Star.

Seite 149 (oben)
Mit Erlaubnis von United Press International.

Seite 150 (oben)
Mit Erlaubnis der RCA Corporation.

Seite 150 (unten)
Mit Erlaubnis des American Institute of Physics, Niels Bohr Library.

Seiten 152/153 (Paukenschlag)
Photo: Sylvia Johnson, Copyright © Sylvia Johnson/Woodfin Camp & Associates.

Seite 155
Mit Erlaubnis von Ludwig Industries, Chicago, Illinois.

Seite 159 (oben)
Aus. *Electronic Simulation of Violin Resonances.* Von M. V Mathews und J. Kohut. In. *The Journal of the Acoustical Society of America.* Bd. 53 (1973) S. 1620–1626.

Seite 159 (unten)
Photo: Max V Mathews.

Seite 160
Mit Erlaubnis von Elizabeth A. Cohen.

Seite 161 (oben)
Aus: *Phonetics.* In. *Encyclopaedia Britannica.* Copyright © bei Encyclopaedia Britannica.

Seite 161 (unten)
Photo: Rozenn Risset.

Seite 162
Aus: *Scaling the Musical Timbre.* Von J. M. Gray. In. *The Journal of the Acoustical Society of America.* Bd. 61 (1977) S. 1270–1277

Seite 163 (links oben)
Mit Erlaubnis von Ludwig Industries, Chicago, Illinois.

Seite 163 (rechts)
Mit Erlaubnis von King Musical Instruments, Eastlake, Ohio.

Seite 165
Mit Erlaubnis von Ludwig Industries, Chicago, Illinois.

Seite 166
Photo: Michael Samson. Mit Erlaubnis von Amy Malina.

Seite 167
Metropolitan Museum of Art, Schenkung von Alice Lewisohn Crowley, 1946.

Seiten 168/169
Scott Kim. Copyright © bei Scott Kim.

Seite 176
Copyright © bei BEELDRECHT, Amsterdam/ V.A.G.A., New York. Collection Haags Gemeentemuseum, Den Haag 1981.

Seite 192 bis 194
Aus: *The Technology of Computer Music.* Von Max V Mathews, MIT Press 1969.

Index

KLANG
Musik mit den Ohren der Physik
von John R. Pierce

ist der siebente Band der
Spektrum-Bibliothek.

Bereits erschienen.

ZEHN^{HOCH}
Dimensionen zwischen Quarks und Galaxien
von Philip und Phylis Morrison
in Zusammenarbeit mit dem Studio von
Charles und Ray Eames

TEILE DES UNTEILBAREN
Entdeckungen im Atom
von Steven Weinberg

FOSSILIEN
Mosaiksteine zur Geschichte des Lebens
von George Gaylord Simpson

DAS SONNENSYSTEM
Ein G2V-Stern und neun Planeten
von Roman Smoluchowski

FORM UND LEBEN
Konstruktionen vom Reißbrett der Natur
von Thomas A. McMahon
und John Tyler Bonner

WAHRNEHMUNG
Vom visuellen Reiz zum Sehen
und Erkennen
von Irvin Rock

In Vorbereitung:

WÄRME UND BEWEGUNG
Die Welt zwischen Ordnung und Chaos
von Peter William Atkins

DIE ZELLE
Expedition in die Grundstruktur des Lebens
von Christian de Duve

MENSCHEN
Genetische, kulturelle und soziale
Gemeinsamkeiten
von Richard Lewontin

DAS UNIVERSUM
Aufbau, Entdeckungen, Theorien
von David Layzer

PANOPTIMUM
Mathematische Grundmuster
des Vollkommenen
von Stefan Hildebrandt und Anthony Tromba

Die Buchreihe
ist als Subskription oder in
Einzelexemplaren zu beziehen
im Buchhandel oder bei
Spektrum der Wissenschaft,
Mönchhofstraße 15,
D-6900 Heidelberg.

Originaltitel:
The science of musical sound
Aus dem Amerikanischen übersetzt von Klaus Winkler

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Pierce, John R.:
Klang Musik mit d. Ohren d. Physik / John R. Pierce.
[Aus d. Amerikan. übers. von Klaus Winkler.] –
Heidelberg : Spektrum der Wiss., 1985.
(Spektrum-Bibliothek ; Bd. 7)
Einheitssacht.: The science of musical sound [dt.]
ISBN 3-922508-72-3
3-922508-77-4 (Stud.-Ausg.)
NE: GT

Amerikanische Erstausgabe bei
Scientific American Books, Inc., New York

Lektorat: Katharina Neuser-von Oettingen

Produktion: Karin Kern

Buchgestaltung: Henri Wirthner

Gesamtherstellung: Klambt-Druck GmbH, Speyer