

TONERZEUGUNG IN MUSIKALISCHEN INSTRUMENTEN

Es gibt hauptsächlich zwei Arten, Schall zu erzeugen. Im ersten Fall wird der Schall durch eine einmalige Energieabgabe erzeugt, die sich in akustische Energie verwandelt. Es entstehen sogenannte Übergangsschwingungen. Solche werden etwa beim Niederdrücken einer Klaviertaste oder beim Anschlagen einer Glocke mit dem Klöppel erzeugt. Übergangsschwingungen haben eine begrenzte Dauer, da sich die beigetragene Energie allmählich in Wärmeenergie verwandelt. Die zweite Art der Tonerzeugung beruht auf der stetigen Zufuhr von Energie und erlaubt theoretisch, zeitlich unbegrenzte Töne zu erzeugen. Man spricht von unterhaltenen Schwingungen. Sobald die Energiezufuhr unterbrochen wird, befinden sich die Schwingungen in einer ähnlichen Lage, wie die Übergangsschwingungen und flauen ab. Wie schon Tyndall in seinem Buch "Lectures on Sound" bemerkte, äussert sich die Reibung immer in rhythmischer, nicht in kontinuierlicher Form, und dieser Rhythmus liegt dem erzeugten Ton zugrunde. So kann etwa das Pfeifen eines Geschosses in der Luft, aber auch das Anstreichen eines Bogens auf einer Violine als Beispiel angeführt werden.

Wie wir es bereits im Kapitel 'DIE SAITE ALS TONERZEUGER' sahen, kann eine gespannte Saite Schwingungen der beiden hier besprochenen Arten erzeugen. Im Fall der Geige werden die beiden Schwingungsarten in einem einzigen Instrument vereint, werden die Saiten der Geige doch zumeist mit dem Bogen angestrichen, zeitweise aber auch mit den Fingern angezupft, was mit dem italienischen Namen *Pizzicato* bezeichnet wird.

Ohne uns weiter mit den Saiteninstrumenten zu beschäftigen, gehen wir hier zu einer ganz anderen Schallquelle über, dem Rohr (oder Pfeife), in dem eine Luftsäule in Eigenresonanz schwingt. Die Luftsäule bildet die Grundlage der meisten Blasinstrumente. Ihr Typ entspricht fast ausschliesslich den unterhaltenen Schwingungen.

Wir erwähnten bereits ein schönes Beispiel einer schwingenden Luftsäule, nämlich die in der Kundtschen Röhre schwingende, um die Erscheinung der STEHENDEN WELLE zu erläutern. Die Kundtsche

Röhre ist beidseitig abgeschlossen. Eine an einem Ende der Röhre erzeugte Welle durchläuft die ganze Röhre, wird an der gegenüberliegenden Wand reflektiert, durchläuft die Röhre im entgegengesetzten Sinn und wird an der ersten Wand reflektiert. Stimmt die Periode T der erzeugten Schwingung mit der Zeit überein, welche die Welle braucht, um den erwähnten Weg zurückzulegen, befindet sich die Luft im Rohr in Resonanz und es entsteht eine stehende Welle mit einem Knoten an jedem Ende der Röhre. Da die beiden Formeln

$$2 \cdot L = v \cdot T \quad \text{und} \quad f = \frac{1}{T} \quad \text{gelten, ist die Grundfrequenz der Resonanz in einer Röhre } f = \frac{v}{2 \cdot L}.$$

Wird die Luft in der Röhre mit einer der Frequenzen $2 \cdot f$, $3 \cdot f$, $4 \cdot f$, ..., $n \cdot f$ gereizt, entsteht wieder Eigenresonanz, aber diesmal mit einer stehenden Welle mit $n+1$ Knoten.

Dank dieser Tatsache kann die Kundtsche Röhre zur indirekten Messung der Schallgeschwindigkeit in der Luft (oder einem anderen in der Röhre befindlichen Gas) dienen. Newton hatte eine Formel erarbeitet, um diese Geschwindigkeit zu berechnen. Leider ist die Übereinstimmung der experimentell ermittelten Resultate und der theoretischen Werte unbefriedigend. Die Formel wurde von Laplace verbessert und die neue Formel wurde 1829 durch Dulong erprobt, der die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen ermittelte, wobei er eine der Kundtschen Röhre ähnliche Einrichtung verwendete. Dulong versetzte die Röhre in Resonanz, indem er einen Luftstrahl einblies, der schnell genug war, um höhere Partialtöne zu erwecken. Dann wurde der Kolben vorgeschoben, bis der gleiche Ton wieder zu hören war. Nun hatte es einen Bauch und einen Knoten weniger und der Abstand zwischen den beiden Kolbenstellungen entsprach der halben Wellenlänge des Tons. Eine Laborsirene erlaubte es, die Höhe des Prüftons genau zu ermitteln. Dies sind ein paar der von Dulong gefundenen Resultate:

Gas	Schallgeschwindigkeit in m/s
Luft	333,00
Sauerstoff	317,17
Wasserstoff	1269,50
Kohlendioxid	261,60
Kohlenmonoxid	337,40

Die Bauweise der in Musikinstrumenten eingesetzten Rohre haben mit der Kundtschen Röhre im allgemeinen nicht viel gemein-

sam. Vielmehr kommen ein- oder beidseitig offene Röhren zur Anwendung.

Mit einem einseitig offenen Rohr kann ein ähnliches Experiment, wie mit der Kundtschen Röhre angestellt werden. Diese Anordnung entspricht dem weiter oben beschriebenen Resonator. Um uns die Lage besser vorstellen zu können, stellen wir uns vor, die Luftsäule sei in eine Folge von Scheiben mit veränderlichem Druck aufgeteilt. Die Welle besteht aus der Weitergabe eines gewissen Überdrucks von einer Scheibe zur nächstfolgenden. Stösst am Ende der Röhre die Welle gegen eine Wand, wird die Richtung der Übermittlung des Überdrucks umgekehrt, die Welle wird reflektiert. Was aber geschieht, wenn das Ende der Röhre offen ist? Die Kompressionswelle wird durch die Öffnung dringen und hinter sich eine Unterdruckzone mit umgekehrter Fortsetzungsrichtung hinterlassen. Hier findet eine Reflexion mit umgekehrtem Vorzeichen statt, die mit der Reflexion der letzten Kugel des Wellenmodells am Anfang dieses Buches vergleichbar ist, wenn die Kugel nicht an die Wand prallt. Also wurde die Überdruck-Zone (oder Scheibe) zur Unterdruck-Zone, die in gegenläufigen Sinn das Rohr durchlaufen wird, bis sie auf die Wand auftritt, wo sie (ohne Vorzeichenwechsel) reflektiert wird. Dann bewegt sie sich wieder in Richtung der Öffnung fort.

Wir sehen also, dass bei einem offenen Rohr die Welle das Rohr 4 mal durchlaufen muss, um einen Zyklus zu beenden. Ähnlich wie bei der Kundtschen Röhre können wir für die Grundfrequenz den folgenden Wert berechnen:

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

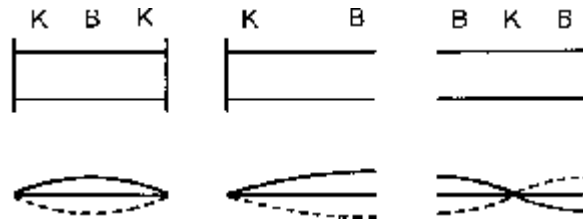
Diese Formel, sowie die nächste, die den Fall der beidseitig offenen Röhre beschreibt, wird dem Mathematiker Daniel Bernoulli zugeschrieben.

Schaffen wir schliesslich eine Überdruckzone in einem beidseitig offenen Rohr, wird der zu durchlaufende Weg folgendermassen aussehen: Reflektion mit verändertem Vorzeichen an einem Ende, Bildung einer Unterdruckwelle, welche das Rohr gegen die andere Öffnung hin durchheilt, wo sie unter Vorzeichenwechsel reflektiert wird, so dass eine neue Überdruckwelle entsteht. In diesem Fall muss die Welle nur zwei Rohrlängen durchlaufen, um einen Zyklus zu vollenden. Die Formel von Bernoulli kann abgeleitet werden:

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

Die stehende Welle in einer Kundtschen Röhre weist bei der Grundfrequenz einen Knoten an jedem Ende und einen bauch in der Mitte auf. Das Gegenteil ist bei der beidseitig offenen Röhre der Fall.

Wir symbolisieren diese Tatsache mit (kbk) im ersten und (bkb) im zweiten Fall. Verdoppeln wir die Frequenz, erhalten wir (kbbkb) im ersten und (bkbkb) im zweiten Fall.



Vergleich der Rohre mit den Saiten

Bei der einseitig geschlossenen Röhre finden wir die Konfiguration (kb). Betrachten wir die nächste mögliche Konfiguration, (kbbk) bemerken wir, dass das Rohr in drei Segmente aufgeteilt wurde. Die nächste mögliche Unterteilung (kbbkb) weist 5 Segmente auf. Daraus können wir den folgenden Schluss ziehen:

Eine beidseitig offene (oder beidseitig geschlossene) Röhre steht zu allen natürlichen Vielfachen der Grundfrequenz in Resonanz, während eine einseitig geschlossene Röhre nur mit den ungeraden Vielfachen der Grundfrequenz in Resonanz steht.

Auf den Gegenstand der Musik angewandt, kann diese Tatsache wie folgt ausgedrückt werden:

**BEIDSEITIG OFFENE (ODER GESCHLOSSENE) ROHRE KÖNNEN ALLE HARMONISCHEN PARTIALTÖNE DES GRUNDTONS WIEDERGEHEN;
EINSEITIG OFFENE (ODER GESCHLOSSENE) ROHRE KÖNNEN NUR DIE UNGERADEN PARTIALTÖNE ERZEUGEN.**

Es sei auf die Tatsache hingewiesen, dass sich in diesem Zusammenhang (wie auch bei den schwingenden Saiten) die Begriffe von Knoten und Bäuchen auf die Geschwindigkeit der Partikel (nicht Frequenz!) in der entsprechenden Zone beziehen. Betrachten wir an Stelle der Geschwindigkeiten den Druck in den entsprechenden Zonen, entsprechen den Druck-Bäuchen Geschwindigkeits-Knoten und umgekehrt.

Die Praxis hat gezeigt, dass die Formeln von Bernoulli nur eine gute Annäherung an die Wirklichkeit bieten. Die Abweichungen von den Formeln wurden mittels komplizierter mathematischer Modelle zu erklären versucht, die aber nie volle Befriedigung gebracht haben.

Das ist vor allem in der Tatsache begründet, dass die offenen Enden eines Rohrs nie genau einem Bauch entsprechen, wie dies die

Theorie verlangt. Die Instrumentenbauer haben diesen Mangel stets durch empirisch ermittelte Formeln auszugleichen versucht, wie etwa die vom berühmten Orgelbauer Aristide Cavallé-Coll entwickelten.

Wie bei jedem beliebigen Resonator, muss auch die Luftsäule in einem Rohr erst angeregt werden. Dazu werden in den verschiedenen Blasinstrumenten verschiedene Mundstücke eingesetzt. Diese können in zwei Gruppen unterteilt werden: die ausschliesslich auf Luftschwingungen begründeten und die anderen, bei denen ein Bestandteil durch die strömende Luft zum Schwingen angehalten werden.

Die erste Gruppe von Mundstücken, die Flötenmundstücke oder Lippenpfeifen, funktionieren aufgrund von Wirbeln, die die strömende Luft hinter einem Hindernis bilden. Die Frequenz mit der sich diese Wirbeln bilden, die man mit den Wirbeln vergleichen kann, die sich in einem Fluss hinter einem Stein bilden, bestimmt die Höhe des Tons, der meist geringe Intensität aufweist, die aber doch dazu ausreicht, die Luft im Rohr zur Resonanz anzuregen. Diese Art Mundstücke erzeugt Töne derselben Klasse, wie das Pfeifen, das starker Wind erzeugt, wenn er sich an ein Hindernis, wie etwa an eine Fernsehantenne, stösst.

Das Flötenmundstück kann mit einem Schnabel versehen sein, wie im Fall der Blockflöte. Bei der Querflöte haben wir es mit einem anderen Mundstück zu tun, bei dem die Resonanz im Rohr durch Blasen über ein Querloch erzeugt wird, was eine grössere Klangfarben-Variation zulässt, als das Schnabelmundstück. Es handelt sich um das gleiche Prinzip, wie bei der Panflöte. Je schärfer die Kante ist, über die geblasen wird, desto reicher ist der entstehende Ton an Partialtönen.

Die Blattmundstücke oder Zungenpfeifen können in drei Typen eingeteilt werden, die Mundstücke mit einfachem Rohrblatt, wie in der Klarinette oder dem Saxophon, die Mundstücke mit doppeltem Rohrblatt, wie bei der Oboe, und schliesslich die Mundstücke mit tönender Metallzunge, wie im Harmonium oder der Ziehharmonika.

Das Mundstück der Trompete und der meisten Metallblasinstrumente können als Spezialfall der Mundstücke mit doppeltem Rohrblatt angesehen werden, wobei die Lippen des Spielers die Funktion der beiden Blätter übernimmt. Die Form des Mundstücks und die Stellung der Lippen sind zwei Faktoren, welche die Klangfarbe dieser Instrumente wesentlich beeinflussen.

In einer Luftsäule können verschiedene harmonische Töne erzeugt werden. Harmonische Töne sind nicht mit Obertönen oder Partialtönen zu verwechseln, da ein Partialton (oder Oberton) einen reinen

Sinuston darstellt, während ein harmonischer Ton mit der gleichen Frequenz seine eigenen Partialtöne aufweist. Dies gilt natürlich für alle Tonquellen, insbesondere auch für Saiteninstrumente.

Um die Blasinstrumente von ihrer Beschränkung auf die harmonischen Töne zu befreien wurden verschiedene Systeme eingesetzt. Das erste ist die Anordnung von verschiedenen Rohren, jedes für eine bestimmte Note, wie bei der Orgel oder der Panflöte. Im Fall der Blechblasinstrumente bemerkten die Musiker schon seit dem XVIII Jahrhundert, dass sie durch Einführen der Hand in den Schalltrichter die wirksame Länge des Rohrs verändern konnten, was eine gewisse Veränderung der Tonhöhe bewirkte. Aber diese Manipulation zog auch eine meist unerwünschte Veränderung der Klangfarbe nach sich.

Später wurden die Ventile entwickelt, eine Art Hähne, die es erlaubten, ein zusätzliches Stück Rohr per Knopfdruck dazwischenschalten. Mit drei oder vier Ventilen wurden die meisten Blechblasinstrumente zu chromatischen Instrumenten.

Im Fall der Flöte, der Klarinette usw. ist das Rohr in verschiedenen Abständen mit Löchern versehen, und man könnte meinen, der Abstand vom Mundstück zum ersten offenen Loch bestimme die effektive Länge des Rohres. Aber die Dinge sind nicht so einfach, und eine Flöte benimmt sich auch ein wenig wie ein Resonator von Helmholtz, bei dem die Frequenz sich hauptsächlich in Funktion der inneren Oberfläche verändert. Die Anordnung der Löcher in einem Blasinstrument ist Frucht der Erfahrung von Generationen von Instrumentenbauern und kann nicht in eine einfache mathematische Formel gekleidet werden.

Hier sei auch ein weiterer Nachteil der Blasinstrumente erwähnt, der sich vor allem in den Epochen äusserte, als die Höhe des La Ors abhängig war: Das Problem der Stimmung. Eine Flöte kann durch Einstellen des Abstandes zwischen dem Mundstück und dem ersten Loch gestimmt werden. Aber nur in einem ganz bestimmten Abstand behalten die Frequenzen der verschiedenen Töne die optimalen Verhältnisse zueinander. Andererseits muss beachtet werden, dass bei kräftigem Blasen der Ton einer Flöte leicht anzusteigen pflegt, was dazu ausgenutzt werden könnte, kleine Stimmungsdifferenzen auszugleichen.

Ein durch seine spezielle Anfertigung auffallendes Musikinstrument verdient es, hier erwähnt zu werden, nämlich die OKARINA, ein ganz aus Terrakotta bestehendes Blasinstrument. Es handelt sich dabei im wesentlichen um einen Helmholtzschen Resonator mit einem Flötenmundstück und einer Anzahl Löcher, um die Resonanzfrequenz zu variieren. Normalerweise hat es zwei Lochgrößen, eine für

die Halbtöne, eine für die Ganztöne. Jedes mit einem Finger verstopfte Loch erniedrigt die Tonhöhe um den der Lochgrösse entsprechenden Betrag, wobei, zumindest theoretisch, die Lage des Lochs keinen Einfluss hat. Nur seine Oberfläche ist ausschlaggebend.

Obwohl die Saiteninstrumente und die Blasinstrumente die beiden wichtigsten Gruppen von Musikinstrumenten darstellen, können die Orchester auf eine weitere Gruppe von Instrumenten nicht verzichten, die besser geeignet ist, den Rhythmus zu markieren, als die Melodie und die Harmonie darzustellen. Wir beziehen uns auf die Schlaginstrumente³⁵. Diese sind meist auf die von STANGEN, PLATTEN und MEMBRANEN hervorgerufenen Schwingungen begründet.

Die Stangen in Form eines Parallelepipeds können im Wesentlichen auf vier Arten schwingen: Längsschwingungen, Querschwingungen in die eine oder andere Richtung und Drehschwingungen. Die Kombination der verschiedenen Schwingungen hängt im wesentlichen von der Anregung (also vom Ort, der Richtung, der Kraft des Anschlags oder der Reibung, von der Konsistenz des anregenden Objekts usw.), von der Befestigung der Stange (an einem Punkt oder einem anderen, an zwei Punkten) und schliesslich vom Material ab, aus dem der Stab besteht. So schwingt etwa ein elastischer und verhältnismässig homogener Stab aus Stahl nicht gleich wie ein Stab aus einem ausgeprägt anisotropischen Material, wie Holz.

Der von Stäben erzeugte Schall ist nicht harmonisch. Oft ist der Ton, den wir einem Stab zuordnen nicht scharf festgelegt und stellt nur ein Maximum in einer stetigen Verteilung von Frequenzen dar. Dies ist etwa bei den Holzstäben der Fall, die zu einem Xylophon gehören.

Ein anderes auf die Stange begründetes Instrument ist der Triangel, den man als ein in zwei Punkten gekrümmter zylindrischer Stab auffassen kann.

Auch vom Stab abgeleitet ist die Stimmgabel, in der Form, wie sie 1711 durch John Shore erfunden wurde. Wie jedermann weiss, bildet die Stimmgabel kein Musikinstrument im strengen Sinn, dient aber gewissermassen als speziell geeignetes Kaliber um Musikinstrumente zu stimmen, da sein Grundton seine nichtharmonischen Partialtöne deutlich übertönt. Zudem ist der zweite Partialton weit vom Grundton entfernt, so dass das Gehör praktisch einen Sinuston vernimmt. Die Stimmgabel kann als ein in einem Punkt gekrümmter Stab oder auch als Zusammenschluss von Zwei Teilstäben auf einem gemeinsamen Griff betrachtet werden.

³⁵ Wir sprechen hier nicht vom Klavier, das die Charakteristika des Schlaginstruments und des Saiteninstrumentes in sich vereinigt.

Wie im Fall der Saiten, muss auch der Ton der Stimmgabel mit einem Resonanzboden verstärkt werden, etwa mit einem beliebigen Brett oder Tisch. Wie stark die Intensitätsverteilung der verschiedenen Partialtöne vom Anschlagspunkt und von der Beschaffenheit des anschlagenden Objekts abhängt, kann auf einfache Weise gezeigt werden, indem man eine Stimmgabel einmal mit einem weichen Schlägel (etwa einem Gummihammer) und ein anderes Mal mit einem harten Gegenstand, wie etwa einer Stahlstange, anschlägt.

Im ersten Fall erhalten wir einen fast ausschliesslich aus dem Grundton bestehenden Schall, während wir im zweiten Fall hohe Partialtöne vernehmen, die den Eindruck eines schrillen, unangenehmen Tons erwecken.

Im Laufe der Geschichte wurden verschiedene auf der Stimmgabel begründete Tasteninstrumente erbaut. So sind etwa das *Dulcitone*, das *Typophone* und das *Adiaphon* zu erwähnen, die nur kurzzeitigen Erfolg aufwiesen.

Unter den heute noch gebräuchlichen Instrumenten, ist dasjenige, das diesen historischen Instrumenten am nächsten kommt, die von Mustel erfundene *Celesta*.

In der Akustik versteht man unter einer PLATTE eine Tafel aus konsistentem Material, die zum Schwingen befähigt ist. Vor allem runde und quadratische Platten sind wichtig. Je nach der Befestigung und der Anregung können Platten auf recht komplizierte Arten schwingen, wie Chladni bereits um 1787 beobachtete.

Chladni befestigte eine quadratische Metallplatte mit einer Schraube durch den Schnittpunkt der beiden Diagonalen auf einem



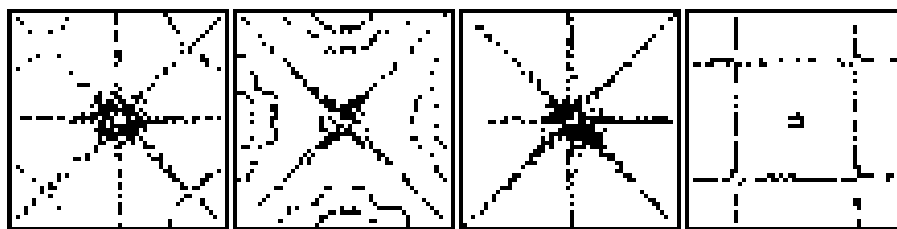
Eine Platte zum Schwingen bringen

senkrechten Stab. Auf die Plattenoberfläche streute er feinen Sand oder Korkpulver und brachte die Platte durch Anstreichen mit einem Geigenbogen gegen die Kante zum Schwingen. Auf der Plattenoberfläche formten sich mehr oder weniger komplizierte Figuren von Knoten und Bäuchen. Die Zonen mit der stärksten Schwingung, die Bäuche, durchrüttelten das feine Pulver, das sich in den ruhigen Zonen, den

Knoten anhäufte. Berührt man zudem gewisse Punkte des Plattenrandes oder der unteren Plattenseite, werden diese Punkte zu Knoten, wodurch die Zeichnung auf der Platte vollständig verändert wird³⁶. Chladni erzeugte bereits mehr als 200 verschiedene Figuren auf diese Weise. Die Abbildung stellt schematisch eine Auswahl der

³⁶ Die Abbildungen "Eine Platte zum Schwingen bringen" und "Chladnische Figuren" wurden einem Physikbuch des XIX Jh. entnommen.

möglichen Chladnischen Figuren auf quadratischer Platte dar. Diese Figuren stellen nicht nur ein brillantes Experiment dar, sie boten später auch den Geigenbauern ein nützliches Werkzeug um die Instrumentenböden vor dem Zusammenbau der Instrumente zu vollenden. Die Erfahrung von Generationen von Geigenbauern hat nämlich gezeigt, dass die Instrumentenböden (die sich wie komplizierte akustische Platten verhalten) ganz bestimmte Chladnische Figuren erzeugen müssen, wenn sie auf bestimmte Weise fixiert und in den vorbestimmten Punkten angestrichen oder angeklopft werden.



Figuren von Chladni

Auch die GLOCKEN können als gekrümmte schwingende Platten aufgefasst werden. Wegen der grossen mathematischen Komplexität der Glockenschwingungen, ist der Glockenguss ein Handwerk, das auf Jahrhundertealte Erfahrung beruht, und heute gibt es nur noch ein paar wenige Werkstätten, die qualitativ zufriedenstellende Glocken erzeugen.

Die in diesem Zusammenhang fälschlicherweise als Membranen bezeichneten Platten finden in verschiedenen akustischen oder elektroakustischen Transduktoren ihre Anwendung, wie etwa in der phonographischen Kapsel von Koenig, im Telephon, usw.

Auch die Kelchgläser der Glasharmonika oder Glasharfe können als gekrümmte Platten bezeichnet werden. Die Glasharmonika, die durch Anstreichen der Glasränder mit fettfreien Fingern gespielt wird, wobei die Stimmung jedes Kelches durch Einfüllen einiger Tropfen Wasser vorgenommen wird, genoss in der klassizistischen Epoche eine gewisse Beliebtheit, und die meisten damaligen Komponisten schrieben die eine oder andere Komposition für dieses kuriose Instrument. Aber der schrille, an unharmonischen Partialtönen reiche Klang mit den entsprechenden Schwebungen, und vielleicht nicht zuletzt auch der Glaube, dass die Klänge der Glasharmonika Nervenkrankheiten hervorrufen könnte, trugen zum allmählichen Verschwinden des Instrumentes bei. Und heute können wir den Klang der Glasharmonika fast ausschliesslich dank der Tonauf-

zeichnungen eines der letzten grossen Virtuosen dieses Instruments vernehmen, Bruno Hoffmann.

Während die Schwingungen der Platten auf deren Elastizität begründet ist, schwingen die Membranen, weil sie gespannt sind, wie dies bei den Trommeln der Fall ist. Man könnte eine Membrane als eine zweidimensionale Saite interpretieren: Die Spannkraft und die Ausbreitung liegen im Fall der Saite auf einer Geraden, im Fall der Membrane in einer Ebene. Die Membrane hat viele akustische Eigenschaften mit der Platte gemeinsam.

Schliesslich sei ein mechanischer Tonerzeuger beschrieben, der strikt periodische Töne erzeugt, keine musikalische Anwendung findet, aber für die Forscher des XIX Jh. ein wichtiges Werkzeug darstellte. Wir beziehen uns auf die 1819 durch den französischen Ingenieur Cagniard de la Tour erfundene LOCHSIRENE. Der Name Sirene soll von der Tatsache herkommen, dass diese auch unter Wasser Töne erzeugen kann. Das einfachste Modell einer Sirene besteht aus einer konzentrisch in regelmässigen Abständen gelochten Drehscheibe, deren Löcher nacheinander bei ihrem Vorbeiflitzen vor der entsprechenden Düse einen Luftstrom passieren lassen. Die Frequenz des erzeugten Tons entspricht genau der Anzahl Löcher, die pro Sekunde vor der Luftdüse vorbeijagen.

Die hier beschriebene Sirene ist nur ein Vorführmodell, aber die in der Praxis eingesetzten Sirenen sind auf dem selben Prinzip begründet. Es soll hier nicht von den verbesserten Modellen der Sirene die Rede sein, aber es sei erwähnt, dass verschiedene Labormodelle gebaut wurden, welche die Erzeugung eines Tons mit genau festgelegter Frequenz erlaubten. Dank ihrem schrillen Klang und der Möglichkeit, sehr laute Töne zu erzeugen, wird die Sirene auch heute noch als akustisches Alarmgerät eingesetzt. Solche Sirenen pflegen variable Drehgeschwindigkeit aufzuweisen, so dass sich die Tonfrequenz ständig verändert.

DIE KLANGFARBE

Im ersten Kapitel seines Buches "Die Lehre von den Tonempfindungen", unterscheidet Helmholtz zwischen MUSIKALISCHEN TÖNEN, die periodisch sind und den aperiodischen GERÄUSCHEN oder LÄRM. Die meisten Musikinstrumente können (zumindest annähernd) periodische Töne, also Töne mit harmonischen Partialtönen, erzeugen. Es gibt Ausnahmen, vor allem im Bereich der Schlaginstrumente. Helmholtz wies den musikalischen Tönen drei grundlegende Eigenschaften zu: ihre Intensität, ihre Tonhöhe (Frequenz) und schliesslich ihre Klangfarbe. Bisher haben wir von den ersten beiden Charakteristika gesprochen und die dritte und komplexeste Eigenschaft, die Klangfarbe, nur andeutungsweise erwähnt. Die Klangfarbe ist aus dem Gesichtspunkt der Wahrnehmung das Kennzeichen, das es erlaubt, Töne gleicher Lautstärke und Frequenz voneinander zu unterscheiden. So ist es jedem Menschen mit einem durchschnittlichen Gehör möglich, das von einer Klarinette erzeugte La mit 440 Hz, vom gleichen Ton zu unterscheiden, der von einem Klavier oder einer Geige erzeugt wird.

Einer der wichtigsten Faktoren, der zum Aufbau einer Klangfarbe eines bestimmten Tons beiträgt, ist sein Partialtonspektrum. Reine Sinustöne unterscheiden sich voneinander ausschliesslich durch zwei der drei Charakteristika der periodischen Töne, nämlich durch Frequenz und Lautstärke. Zwei Töne hingegen, die je aus dem selben Grundton und dem zweiten harmonischen Partialton (also einem Oberton, der die doppelte Grundfrequenz aufweist) bestehen, unterscheiden sich voneinander durch ihre Klangfarbe, die dem Intensitätsverhältnis zwischen dem Grundton und dem einzigen Oberton entspricht. Das selbe ist der Fall für periodische Töne, welche einen gemeinsamen Grundton und 3, 4, ..., n harmonische Partialtöne aufweisen. Ist die Intensität der ersten Partialtöne verhältnismässig hoch, vernehmen wir einen süssen, weichen Ton. Weisen im Gegenteil die hohen Partialtöne hohe Intensitäten auf, haben wir es mit einem schrillen Ton zu tun. Zwischen den beiden Extremfällen sind alle Kombinationen möglich. Einen bemerkenswerten Spezialfall finden wir bei den einseitig gedeckten Orgelpfeifen, die ausschliess-

lich Partialtöne mit ungeradem Index erzeugen. Die Sirene jedoch erzeugt eine beinahe dreieckige Welle (Sägekurve), in der wir praktisch harmonische Partialtöne mit beliebigem Index finden können, wenn wir uns des Satzes von Fourier erinnern. Das erklärt den schrillen Ton der Sirene.

Je nach der Tonerzeugung werden verschiedene Partialtonstrukturen erzielt, die von der Erregung jedes einzelnen Partialtons abhängen. Das erklärt etwa den Unterschied in der Klangfarbe eines gleichen Klaviers, je nach der Härte und Beschaffenheit der Hämmer und dem Anschlagpunkt auf der Saite.

Bisher haben wir den Einfluss der Phasendifferenzen auf die Klangfarbe eines konstanten Tons nicht berücksichtigt. Dazu sei das sogenannte HELMHOLTZSCHE GESETZ ÜBER DIE PHASEN der Partialtöne zitiert:

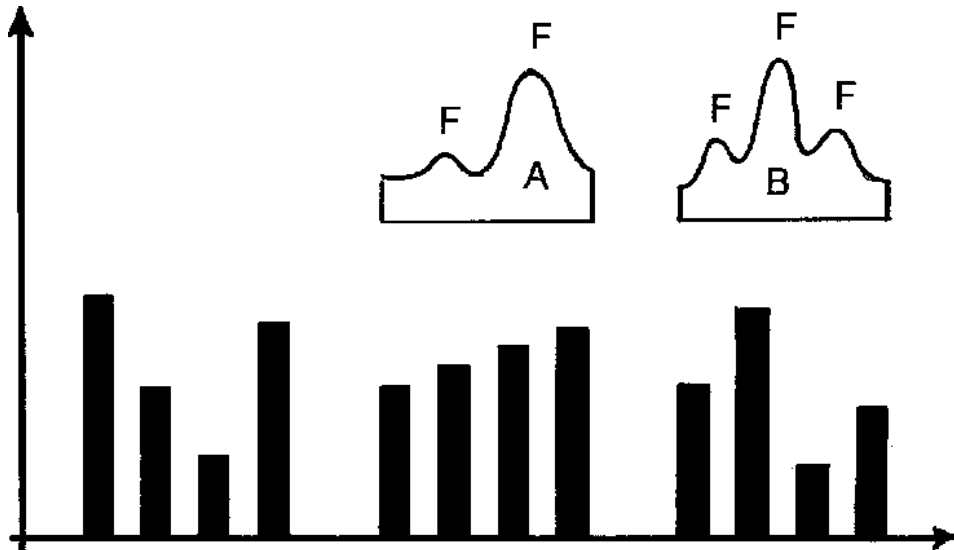
DIE KLANGFARBEN DER MUSIKALISCHEN TÖNE SIND DURCH DIE ANWESENHEIT (ODER ABWESENHEIT) DER EINZELNEN HARMONISCHEN PARTIALTÖNE BESTIMMT, UND SIND VON DEN PHASENDIFFERENZEN UNABHÄNGIG.

Obwohl es möglich ist, künstlich Beispiele zu konstruieren, bei denen die Klangfarbe eines Tons unter der Veränderung der Phasen der Partialtöne leicht variiert, beschreibt das Helmholtzsche Gesetz die Lage recht gut. Daher beschreibt die sonographische Darstellung eines Tons (welche die Phasendifferenzen nicht berücksichtigt) die betrachteten Schallstrukturen recht zuverlässig.

Ohne die (relative) Gültigkeit des Helmholtzschen Gesetzes wäre ein Telefongespräch kaum verständlich, da in diesem Fall die Phasen der Töne in Funktion ihrer Frequenz verschoben werden. Fletcher zitiert ein Beispiel einer Phasenverschiebung, die zur Quadratwurzel der Frequenz proportional ist. Trotzdem verursacht diese Verschiebung keine Klangfarbenverwechslung, und das ist ein Glück, denn die Klangfarbe ist die einzige Charakteristik, die es uns erlaubt, die Vokale voneinander akustisch zu unterscheiden, wie wir später sehen werden.

Dank den verschiedenen Stellungen, die zwei oder mehr Sinuskurven zueinander haben können, ist es praktisch unmöglich, die Zerlegung einer periodischen Phonographischen Kurve in Sinuskurven visuell vorzunehmen. Indem wir zwischen den verschiedenen harmonischen Partialtönen eines musikalischen Tons Phasenverschiebungen vornehmen, können wir Kurven erzeugen, deren Visueller Aspekt vollständig voneinander abweicht. Diese Tatsache wird in den Teilbildern 3 und 4 der Abbildung des Kapitels 'GRAPHISCHE

DARSTELLUNG DES TONS UND MASSEINHEITEN' mit dem Titel "4 periodische Kurven" gezeigt. Es ist auch möglich, wenn auch etwas schwieriger, anhand von total verschiedenen Partialtonstrukturen zwei phonographische Kurven zu konstruieren, die sehr ähnlich aussehen.



Wirkung der Formanten

Spannen wir eine gleiche Violine auf zwei verschiedenen Violinen auf, pflegen die resultierenden Klangfarben meist stark voneinander ab. Die Resonanzböden der beiden Instrumente sprechen auf die verschiedenen Frequenzen nicht gleich gut an. Ein Ton oder eine Region von Frequenzen, die von der Resonanztafel eines Instruments besonders wirkungsvoll verstärkt wird, heisst ein FORMANT. Da die Formanten bei zwei Violinen ungleich verteilt sind, variieren die Frequenzspektren der verschiedenen Töne von einem Instrument zum anderen in einer für jedes Instrument charakteristischen Weise. Um diese Erscheinung graphisch darzustellen, zeigt uns die Figur "Die Formanten" die Verwandlung eines gleichen Frequenzspektrums aus zueinander harmonischen Frequenzen durch zwei verschiedene Verstärkungskurven A und B. Die mit F bezeichneten Punkte entsprechen den Formanten des Beispiels der Figur.

Die Geigenbauer oder Erbauer beliebiger mit Resonanzböden versehener Instrumente versuchen eine Verstärkungskurve mit ganz bestimmten Eigenschaften zu erreichen. Unter anderem müssen stark betonte Formanten im Bereich des Tonumfangs vermieden werden, da sonst einzelne Töne unerwünscht stark hervortreten würden. Die

Erfahrung hat gezeigt, dass erstklassige Violinen in der Region um 1500 Hz eine Mulde, und eine starke Erhebung zwischen 2000 und 3000 Hz aufweisen.

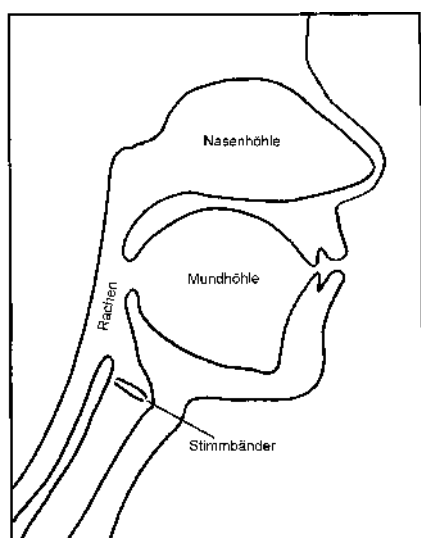
Mit Saiteninstrumenten können besonders weiche Töne erzeugt werden, wenn die Saite in einem seiner Knoten mit einem Finger leicht berührt wird, während die Saite auf die übliche Art angestrichen wird. Diese Töne werden harmonische Töne oder INSTRUMENTALE HARMONISCHE TÖNE genannt und es soll wieder daran erinnert werden, dass diese von den harmonischen Partialtönen zu unterscheiden sind, da die harmonischen Töne aus einem Grundton und einer Reihe von Partialtönen bestehen, während ein Partialton ein reiner Ton ist, also ein Sinuston ohne eigene Partialtöne. Instrumentale harmonische Töne stellen ein typisches Hilfsmittel der gestrichenen Saiteninstrumente dar, insbesondere der Violine.

Die Formanten spielen nicht nur für die Klangfarbe der Musikinstrumente eine hervorragende Rolle, sie sind auch für die phonetische Unterscheidung der gesprochenen Vokale ausschlaggebend. Die verschiedenen Vokale, die die menschliche Stimme erzeugen kann unterscheiden sich tatsächlich nur durch ihre Klangfarbe, denn wir können ein 'o' und ein 'u' nacheinander auf der gleichen Tonhöhe und während derselben Dauer singen, ohne sie zu verwechseln. Offenbar erahnte der englische Physiker Wheatstone um 1837 als einer der ersten diese Tatsache. Unsere Stimmbänder erzeugen einen annähernd periodischen Ton, mit einem einigermaßen ausgeglichenen Partialtonspektrum. Die Frequenz dieses Tons ist individuell verschieden und hängt vor allem von Alter und Geschlecht ab. Der von den Stimmbändern abgegebener Ton wird in drei Körperhöhlen verstärkt, die wie Resonatoren wirken: Der Rachen, die Mundhöhle und die Nasenhöhle. Der Gaumensegel übernimmt die Aufgabe, die Luft auf die beiden letztgenannten Körperhöhlen zu verteilen. Die Eigenresonanzfrequenz der Mundhöhle kann durch die verschiedenen Stellungen der Zunge, der Lippen und der Kieferknochen zueinander variiert werden. In beschränktem Mass gilt dasselbe auch für den Rachen und die Nasenhöhle. Alle drei Körperhöhlen verhalten sich also wie abstimmbare Resonatoren, welche die drei Hauptformanten jedes Vokals darstellen, den wir von uns geben. Es ist interessant festzustellen, dass sich zwar der Grundton der Stimme dem Alter und Geschlecht anpasst, nicht aber die Formanten der Vokale. So entsprechen etwa dem 'a' Formanten im Bereich der Noten Fa # (4), Do # (5) und Re # (6), ganz egal, ob das 'a' von einem zehnjährigen Mädchen oder einem erwachsenen Mann ausgesprochen wird. Natürlich variieren die Formanten je nach der gesprochenen Sprache

oder Dialekt. Die Figur stellt auf stark schematisierte Art die Lage der drei Körperhöhlen und der Stimmbänder zueinander.

Wir verstehen jetzt auch, wieso es so schwierig ist, auf einer mit doppelter Geschwindigkeit wiedergegebenen Tonaufzeichnung das gesprochene Wort zu verstehen, selbst dann, wenn der Sprecher auf der Originalaufzeichnung mit tiefer Stimme, speziell langsam und deutlich spricht.

Dank den für jeden Vokal charakteristischen Formanten, hängt die Klangfarbe einer gesungenen Komposition von den in jeder Tonhöhe gesungenen Vokalen ab. Andererseits wird durch die Verteilung der Formanten das Singen einzelner Vokale in einzelnen Stimmlagen geradezu verunmöglicht; so kann etwa der Vokal 'o' auf einem sehr hohen Ton nicht wiedergegeben werden. Diese beiden Tatsachen bieten den Gegnern der Übersetzung von Vokalmusik eine gut begründete Argumentation.



Entstehung der Vokale

Um 1855 baute Helmholtz ein Gerät, das man als den ersten Tonsynthesizer betrachten kann. Das Gerät bestand aus einer Reihe von Stimmgabeln, die mittels Elektromagneten zum Schwingen angeregt wurden. Mit diesem Gerät konnte jeder beliebige Vokal aufgrund seiner Formanten erzeugt werden.

Dank dem elementaren Prinzip der Vokalerzeugung konnte um 1870 der Amerikaner Faber seine Zeitgenossen mit einer selbstgebauten sprechenden Maschine in Erstaunen versetzen. Das Gerät war auf akustische Resonatoren mit verstellbaren Wänden begründet, die mit einer Tastatur gekoppelt waren. Gewisse Quellen berichten uns von einem sprechenden Kopf, den schon der Philosoph Albert der Grosse im XIII Jh. besessen haben soll, und der für seine Zeitgenossen als teuflische Erfindung gegolten hätte. Es heisst, Sankt Thomas von Aquino hätte schliesslich den Apparat zerstört. Dies spräche für dessen Funktionstüchtigkeit.

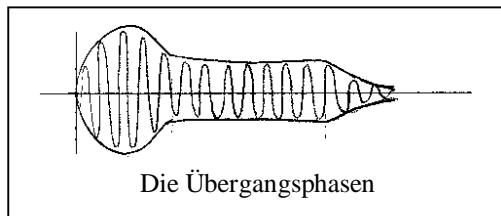
Neben den Vokalen gibt es im Zusammenhang mit der Sprache noch andere wichtige Erscheinungen, wie etwa die kurzen, nicht periodischen Konsonanten. Bei den Konsonanten spielen die Übergangserscheinungen von einer Schwingungsart zur anderen, eine wichtige Rolle, die auch entscheidend zur Klangfarbe verschiedener

Neben den Vokalen gibt es im Zusammenhang mit der Sprache noch andere wichtige Erscheinungen, wie etwa die kurzen, nicht periodischen Konsonanten. Bei den Konsonanten spielen die Übergangserscheinungen von einer Schwingungsart zur anderen, eine wichtige Rolle, die auch entscheidend zur Klangfarbe verschiedener

Neben den Vokalen gibt es im Zusammenhang mit der Sprache noch andere wichtige Erscheinungen, wie etwa die kurzen, nicht periodischen Konsonanten. Bei den Konsonanten spielen die Übergangserscheinungen von einer Schwingungsart zur anderen, eine wichtige Rolle, die auch entscheidend zur Klangfarbe verschiedener

Instrumente beitragen. Die periodischen Schwingungen werden dabei durch eine sogenannte Lautstärkehüllkurve moduliert.

Nimmt man den Ton eines Klaviers oder einer Gitarre auf Band auf und klebt dann einen Abschnitt dieses Bandes zu einer Schleife zusammen, so dass sich beim Abspielen ein kleiner Abschnitt der Aufnahme ständig wiederholt, werden wir mit Verblüffung feststellen, dass wir den charakteristischen Klang eines Klaviers oder einer Gitarre plötzlich nicht mehr erkennen können. Das kommt von der Ausschaltung der Übergangserscheinungen, also vor allem von der Lautstärkenkurve, die unseren Ton durchläuft. Ein normaler musikalischer Ton weist in der Tat während seiner Existenz nicht eine konstante Lautstärke auf, so dass er streng genommen nicht während seiner ganzen Dauer periodisch ist. Die Dauer eines Tons wird üblicherweise in drei Phasen unterteilt: Den Anklang, die periodische Phase und das Abklingen.



Diese drei Phasen sind nicht mit mathematischer Genauigkeit aufzufassen.

Soll der Klang eines Instruments mit elektronischen Hilfsmitteln nachempfunden werden,

müssen selbstverständlich die Übergangserscheinungen berücksichtigt werden, und eine periodische Kurve muss entsprechend moduliert werden, wie in der Figur schematisiert.

Aber die Dinge sind komplizierter, als es scheint: kürzlich unternommene Untersuchungen haben ergeben, dass in den meisten Fällen jeder Partialton seine eigene Übergangskurve aufzuweisen pflegt, und dass vor allem in der Phase des Anschlags (die bei einzelnen Orgelpfeifen eine halbe Sekunde überschreiten kann) stetig oder zufällig verteilte Frequenzen auftreten können. Das alles vermag die grossen Schwierigkeiten zu erklären, die mit der vom ästhetischen Standpunkt befriedigenden elektronischen Reproduktion (mit Synthesizern oder dem Computer) der Klänge der herkömmlichen Musikinstrumente verbunden ist.

Obwohl sich dieses Werk speziell der Untersuchung musikalischer Töne widmet, also der periodischen oder annähernd periodischen Schwingungen, darf nicht vergessen werden, dass die meisten Töne nicht musikalisch sind, sondern dem Bereich der Geräusche angehören.

Es kann seltsam anmuten, dass unter gewissen Bedingungen unser Gehör die Tendenz hat, sogar den Geräuschen eine gewisse Tonhöhe zuzuordnen, auch wenn diese nicht so klar festgelegt ist, wie im Falle eines Sinustons. In der Tat kann unser Gehörorgan aus einem

Geräusch eine mittlere Frequenz oder eine durch überdurchschnittliche Lautstärke ausgezeichnete Frequenz heraushören, also einem Geräusch etwas wie eine statistische Tonhöhe zuordnen. Dieser Effekt kann etwa dadurch gezeigt werden, dass wir mit einem Hammer verschiedene Bretter anklopfen. Wenn wir auf das erste Brett schlagen, wird es uns vermutlich schwierig sein, mit dem Geräusch eine gewisse Tonhöhe in Verbindung zu bringen. Aber sobald wir das zweite Brett anklopfen, werden wir imstande sein, zu entscheiden, ob das entstandene Geräusch als höher oder tiefer eingestuft werden kann als das erste. Mit speziell auserwählten Brettern kann auf diese Weise eine richtige Geräushtonleiter zusammengesucht werden.

Ist ein Geräusch aus einer homogenen Verteilung aller hörbaren Frequenzen zusammengesetzt, spricht man von einem weissen oder Gausschen³⁷ Geräusch.

In früheren Kapiteln haben wir gesehen, dass zwei Töne untereinander Schwebungen, Differenztöne und sogar Summentöne erzeugen können. Diese Erscheinungen werden objektiv genannt, wenn sie ausserhalb des Gehörs zustandekommen. In diesem Fall bilden sie eine physikalische Realität, die auch gemessen werden kann, zum Beispiel unter Zuhilfenahme von Resonatoren. Kombinationstöne werden oft im Gehör selber erzeugt und sind in diesem Fall als subjektiv einzustufen. In derselben Weise wie zwei Sinustöne zusammenwirken und objektive oder subjektive Schwebungen oder Kombinationstöne erzeugen oder einander maskieren können, können auch Partialtöne zweier zusammengesetzter Töne oder sogar Partialtöne eines einzelnen zusammengesetzten Tons zusammenwirken.

So würde die Quinte (Do (3), Sol (3)) eines gleichmässig temperiert gestimmten Klaviers keine hörbaren Schwebungen erzeugen, wenn die beiden Töne keine Partialtöne hätten. Der dritte harmonische Partialton von Do (3) und der zweite von Sol (3) fallen beinahe zusammen (sie würden sogar genau zusammentreffen, wenn die Quinte natürlich wäre, wenn also das Schwingungsverhältnis der beiden Töne 3 : 2 wäre). Wie wir leicht berechnen können, entspricht der dritte Partialton von Do (mit 261,625 Hz) einer Frequenz von 784,876 Hz, während der zweite Partialton (die Oktave) von Sol (mit 391,995 Hz) die Frequenz von 783,990 Hz aufweist. Wir erhalten ganz langsame Schwebungen von 0,88 Hz. Diese Schwebungen verleihen dem Klavierton eine Spannung, die er nicht hätte, würde das Instrument nach der natürlichen Tonleiter (auch Tonleiter von Zarlino genannt) gestimmt. Wir sehen also, dass sogar die Ton-

³⁷ Nach dem grossen deutschen Mathematiker Carl Friedrich Gauss (1777-1855).

leiter, nach der das Instrument gestimmt wird, dessen Klangfarbe beeinflussen kann.

Ein ähnlicher Klangfarbeneffekt kommt zustande, wenn in einem Orchester mehrere Instrumente dieselbe Melodie spielen. Da die verschiedenen Instrumente nicht mit mathematischer Präzision spielen, kommen zwischen den leicht voneinander abweichenden Tonhöhen Schwebungen zustande, die zumeist zu langsam sind, um als solche wahrgenommen zu werden. Aber die Schwebungen der zweiten Partialtöne (welche die doppelten Frequenzen aufweisen) weisen ihrerseits auch die doppelten Frequenzen auf. Das Zusammenspiel der Schwebungen zwischen allen Partialtönen beeinflusst die Klangfarbe, und das erklärt, wieso eine Violine aus 3 m Abstand nicht gleich tönt, wie vier Violinen aus 6 m Abstand³⁸.

Hier sei bemerkt, dass in einem periodischen Ton alle zwischen den Partialtönen auftretenden Differenztöne oder Summentöne ein ganzzahliges Vielfaches des Grundtons darstellen. Andererseits darf nicht vergessen werden, dass viele der in der Musik verwandten Töne nur annähernd periodisch sind.

Experimentell konnte festgestellt werden, dass das Gehör sogar Differenztöne zwischen zwei bereits dem Ultraschall angehörenden Frequenzen zu erzeugen vermag. Das bedeutet, dass zwei an sich dank ihrer hohen Frequenz unhörbare Obertöne einen Differenzton zu erzeugen vermögen, der die Partialtonstruktur und somit die Klangfarbe beeinflussen kann. Diese Tatsache wirft die Frage auf, ob der Tonumfang elektroakustischer Geräte auf den Bereich der hörbaren Töne beschränkt sein darf, oder ob sich eine echte Qualitätssteigerung durch die Erweiterung bis in den Ultraschallbereich erreichen lässt.

Die Begriffe der KONSONANZ und der DISSONANZ sind stark mit dem Klangfarbenbegriff verbunden. Im Laufe der Geschichte wurde der Begriff der Konsonanz unterschiedlich erklärt. Schon Pythagoras stellte fest, dass sich alle konsonanten Intervalle durch ein kleines ganzzahliges Verhältnis zwischen den Tonfrequenzen auszeichneten. Das absolut konsonante Intervall, die Oktave, entspricht dem Verhältnis 2 :1, die natürliche Quinte dem Verhältnis 3 :2, usw. In der ersten Hälfte des XVIII Jh. schlug Euler vor, den grössten gemeinsamen Teiler des Verhältnisses (in seiner vollständig gekürzten Form) der in einem Akkord vorkommenden Töne als Mass für die Dissonanz einzusetzen. So entspräche etwa dem Akkord (Do (1),

³⁸ Auch nicht, was die Lautstärke anbelangt; denn die Lautstärken zweier Violinen werden nicht addiert, da ein Teil der abgestrahlten Schallwellen sich gegenseitig kompensieren. Glücklicherweise tritt dieser Effekt auch im Strassenlärm auf, der sonst unerträgliche Masse annehmen würde.

Mi ($5/4$), Sol ($3/2$)) mit der Proportion $4 : 5 : 6$ ein Dissonanzgrad von 60. Diese Definition führt schnell einmal zu allen möglichen Widersprüchen und muss daher verworfen werden. So entspräche etwa der "natürlichen" Quinte mit der Proportion $3 : 2$ ein Dissonanzgrad von 6. Würde unsere Quinte ganz leicht auf die Proportion $2213 : 1477 = 1,49830$ verstimmt, wüchse der Dissonanzgrad auf 3268601. Diese Quinte liegt zwischen der "natürlichen" und der temperierten Quinte. Verstimmen wir nun unsere Quinte wesentlich stärker, bis zur Proportion $31 : 21 = 1,47619$, vermindert sich der Dissonanzgrad auf 651, was offensichtlich absurd ist. Hier irte sich

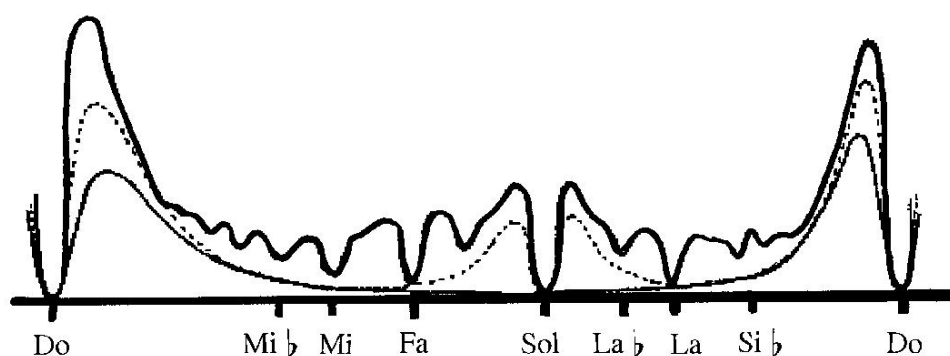


Diagramm von Helmholtz

der grosse Euler.

Helmholtz erklärte den Konsonanzeffekt anhand der Schwebungen zwischen den Partialtönen der Töne eines bestimmten Intervalls. Nach dieser Theorie von Helmholtz hängt der Grad der Konsonanz von den Klangfarben der zusammenklingenden Töne ab, was die Praxis bestätigt. Helmholtz stellte fest, dass die Härte eines aus Sinustönen bestehenden Intervalls dann am ausgeprägtesten ist, wenn eine Schwebung von 33 Hz auftritt, und dass dann das Intervall sowohl bei Annäherung, wie bei Entfernung der beiden Töne weicher wurde. Helmholtz berechnete den Dissonanzgrad eines Intervalls, indem er alle auf Schwebungen zwischen den Partialtönen zurückzuführenden "Härten" addierte.

Die folgenden Bedingungen lieferten das sogenannte Helmholtzdiagramm: Es wurde der Zusammenklang zweier Violintöne betrachtet, wobei der erste konstant dem Do (3) entsprach. Der zweite bewegte sich im dem durch Do (3) und Do (4) begrenzten Intervall. Das Diagramm weist mehrere Kurven auf: Die erste berücksichtigt nur die Grundtöne. Die zweite Kurve berücksichtigt die ersten beiden Partialtöne, usw. In unserer Abbildung werden nur die dem Grundton alleine und die den ersten 5 Partialtönen entsprechenden

Kurven dargestellt (punktierte Linie). Offensichtlich ist der Dissonanzgrad minimal, wenn eine Höchstzahl an Partialtönen zusammentreffen. Diese Theorie von Helmholtz liefert ein gewichtiges Argument zugunsten der natürlichen Tonleiter, befriedigt aber auch nicht ganz. Wird etwa das Diagramm für die nächste Oktave erstellt, erhält man bereits abweichende Resultate, da alle Partialtöne doppelte Frequenzen gegenüber den entsprechenden Tönen in der unteren Oktave aufweisen. So werden gegenüber dieser Oktave einzelne "Härten" gemildert, während andere verschärft werden. Untersuchen wir die niedrigen Tasten des Klaviers im Lichte der Helmholtzschen Theorie, müsste die Quinte (Do (1), Sol (1)) vollständig dissonant sein, erzeugen doch die Grundtöne untereinander Schwebungen von 32,6 Hz. Andererseits können laut der Helmholtzschen Theorie zwei reine Sinustöne keine Dissonanz erzeugen, wenn sie nur weit genug auseinanderliegen. In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass sogar bei Sinustönen, die zu weit auseinander liegen, um hörbare Schwebungen zu erzeugen, subjektive harmonische Obertöne vernommen werden können, wenn die beiden Sinusschwingungen im Gehörapparat verzerrt wurden. Diese Obertöne sind in der Fourierzerlegung der verzerrten Sinuskurven begründet. Dank der Schwebungen zwischen diesen Obertönen der beiden verzerrten Sinustöne können wir einen gewissen Grad von Dissonanz zwischen den beiden reinen Sinustönen empfinden.

Die Physiologen des XX Jh. stellten fest, dass zwei mit demselben Ohr gehörte Töne ein unangenehmes Gefühl erzeugen, wenn sie zu nahe beieinander liegen. Dieser Eindruck verschwindet, sobald die beiden Töne aus einer gewissen kritischen Bandbreite gerückt werden, die jeden Ton umgibt, oder aber, wenn die beiden Töne je von einem einzelnen Ohr vernommen werden. Diese Theorie führt zu ganz ähnlichen Resultaten, wie die Theorie von Helmholtz, erlaubt es aber, gewisse Erscheinungen zu interpretieren, die mit dem Helmholtzschen Dissonanzbegriff nicht auf befriedigende Weise erklärt werden können.

So konnte etwa die Härte eines periodischen Tons mit hohen Partialtönen nicht mit der Helmholtzschen Theorie erklärt werden, da in diesem Fall jede Differenz zwischen den Frequenzen von zwei Partialtönen ein ganzzahliges Vielfaches der Grundtonfrequenz darstellt. Ist die Frequenz des Grundtons höher als 100 Hz, schwingen sämtliche Schwebungen oder Differenztöne mit Frequenzen von mindestens 100 Hz.

Mit der Bandbreitentheorie jedoch, kann die Härte erklärt werden: Ab einem bestimmten Partialtonindex finden wir Schwingungen, die in die kritische Bandbreite eines ihrer Nachbarn fallen. Das heisst,

dass ein einzelner periodischer Ton eine Art innere Dissonanz aufweisen kann!

Es muss unterstrichen werden, dass die beiden Dissonanztheorien, die Schwebungstheorie von Helmholtz und die Bandbreitentheorie auch auf Töne Anwendung finden, die unharmonische Partialtöne aufweisen, also streng genommen unperiodische Töne, wie etwa die von Glocken erzeugten.

Die musikalische Wirklichkeit bildet eine gewisse Annäherung an den Fall der periodischen Töne. So haben etwa Saiteninstrumente fast-harmonische Partialtöne, da keine Saite den Idealfall erfüllt. Wie wir später sehen werden, bewirkt diese Tatsache im Falle des Klaviers eine gewisse Abweichung von der errechneten temperierten Tonleiter. Ferner erschwert auch dieser Effekt die elektronische Synthese der den akustischen Instrumenten eigenen Klangfarben.

Bis hierher haben wir die Begriffe Konsonanz und Dissonanz wie Antagonisten behandelt: Je grösser die Konsonanz, desto kleiner die Dissonanz, und umgekehrt. In den Fünfzigerjahren des XX Jh. durchgeführte Experimente weisen jedoch daraufhin dass die Konsonanz eine zentral im Gehirn erzeugte Sinnesempfindung darstellt, während die Dissonanz bereits im Ohr entsteht. Mit Kopfhörern wurde jedem einzelnen Ohr je ein verschiedener Sinuston zugeleitet. Man hört den unangenehmen Effekt von nicht klar festgelegten Intervallen und manchmal, je nach den Frequenzen empfindet man so etwas wie eine Konsonanz. Werden die beiden Sinustöne durch zusammengesetzte Töne (mit harmonischen Partialtönen) ersetzt, hörte man Konsonanz, aber nie Dissonanz. Um zu zeigen, dass die binauralen Töne auf ähnliche Weise schmolzen, wie es die monauralen zu tun pflegen, wurde das folgende Experiment vorgenommen: Eine Teilmenge der harmonischen Obertöne eines synthetisierten Tons wurde einem einzelnen Ohr zugeführt, der Rest dem anderen. Dabei empfand der Hörer ungefähr dasselbe, wie beim Anhören des gesamten Tons auf die gewohnte Weise, also mit beiden Ohren. Der unbedeutende Unterschied in der Klangfarbe ist der Abwesenheit gewisser Differenztöne zuzuschreiben.

Schliesslich stossen wir auf eine verblüffende Tatsache: Die Klangfarbe verändert sich je nach der Lautstärke, mit der ein Musikstück angehört wird. Möchten wir etwa mit unserer Stereoanlage eine bestmögliche Klangfarbentreue erreichen, müssten wir theoretisch den Verstärker so einstellen, dass wir die Musik in Originallautstärke vernehmen. Wie ist diese Tatsache zu erklären? Den Iso-sonie-Kurven im Diagramm von Fletcher können wir folgendes entnehmen: Vermindern wir die Lautstärke von zwei verschiedenen Tönen um die gleiche Anzahl dB (physikalische Einheit), werden die

entsprechenden Werte in Phon (psychologische Einheit) nicht unbedingt um den gleichen Betrag vermindert. Wird die Lautstärke generell abgeschwächt, verändert sich etwa die Wahrnehmung der Töne mit niedriger Frequenz und schwacher Intensität stärker als die Wahrnehmung der Töne mittlerer Frequenzen. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, werden moderne Stereoanlagen vielfach mit einem EQUALIZER ausgerüstet, mit dem die Intensitäten verschiedener Frequenzbereiche individuell geregelt werden können.

DIE REPRODUKTION DES SCHALLS

Unter diesem Titel wollen wir nicht die verschiedenen Aspekte der Wiedergabe einer musikalischen Komposition anhand seiner Partitur besprechen, eventuell mit Hilfe von schriftlichen Zeugnissen aus der Zeit des Komponisten, vielleicht sogar unter Einsatz von Originalinstrumenten, um die akustische Atmosphäre des Zeitalters des Komponisten möglichst treu wiederzugeben. Nebenbei sei erwähnt, dass eine derartig treue Wiedergabe aus dem Künstlerischen Standpunkt nicht unbedingt wertvoller ist, als eine Wiedergabe mit geeigneten modernen Instrumenten. Ich glaube zum Beispiel, dass Bach seine meisten Werke für Cembalo dem Klavier gewidmet hätte, wären damals so perfekte Instrumente zu seiner Verfügung gestanden, wie die modernen Flügel von *Steinway & Sons*, *Bösendorfer* oder *Bechstein*. Ich glaube ferner, dass man zwischen der Musik unterscheiden muss, die speziell der Technik eines bestimmten Instruments gewidmet ist und der universellen Musik, die praktisch jeder beliebigen Instrumentierung angepasst werden kann, ohne an Essenz einzubüßen, sofern die gewählten Instrumente dies erlauben. So kann eine Fuge von Bach auf dem Cembalo, dem Klavier oder durch mehrere Instrumente gespielt werden. Aber die Nocturnes von Chopin dürfen nicht auf einem Cembalo wiedergegeben werden. Dies aber sind rein persönliche Ansichten.

Dieses Kapitel behandelt ein anderes Thema, nämlich die automatische Reproduktion der Musik, der menschlichen Stimme und sogar beliebigen Schalls. Das Kapitel ist in zwei Hauptabschnitte unterteilt: Die **INDIREKTE REPRODUKTION**, bei der ein automatisiertes Musikinstrument eingesetzt wird, und die **DIREKTE REPRODUKTION**, bei der es sich um Vorrichtungen handelt, die den Schall direkt reproduzieren, ohne sich um dessen Herkunft zu kümmern.

Die Entwicklung der Musikautomaten im Laufe der Geschichte läuft mit dem Fortschritt der Mechanik, insbesondere der Uhrmacherkunst einher. Wir können die Glockenspiele³⁹ als die frühesten musikalischen Offenbarungen im Bereich der Uhrmacherkunst be-

³⁹ Das französische Wort "Carillon" stammt ethymologisch vom lateinischen *quaternio*, Vierergruppe (von Glocken) ab.

trachten. Im Laufe der Zeit entstanden dank der zunehmenden mechanischen Perfektion regelrechte Wunderwerke, wie etwa das um 1802 von Maelzel erbaute *Panharmonicon* mit einer Gruppe von 42 Musikautomaten, die ein Orchester formten, das imstande war, mit mechanischer Vollkommenheit verschiedene Kompositionen des klassischen Repertoires wiederzugeben. Es ist bemerkenswert, dass Beethoven seine Ouvertüre op. 91 (*Der Sieg von Wellington*) für diesen Automaten und nicht für ein richtiges Orchester schrieb.

45 Jahre später konstruierte der Patriarch der Firma Welte, Michael Welte, ein *Orcestrion* mit 590 Instrumenten.

Zweifelsohne schufen die herrlichen Automaten jener Zeit die Eingebung für die märchenhafte Olympia aus einer der berühmten Hoffmannschen Erzählungen. Die schöne, aber etwas kühle Olympia aus der Dichtung spielt mit grosser Virtuosität Klavier und tanzt im Rhythmus der Musik. Welch schreckliche Enttäuschung musste der verliebte Anbeter erleiden, als er erfuhr, dass seine Geliebte nichts anderes als ein mechanisch perfekter Automat war.

In der ersten Zeit war die Grenze zwischen Uhr und Musikautomaten unscharf, wie der Ausdruck 'Flötenuhr' bezeugt, der im XVIII Jh. auf einen von Johann Gottfried Kauffmann erbauten Musikautomaten angewandt wurde, der keine Zeitangabe bot. Eines der ersten mechanischen Geräte zur automatischen Wiedergabe von Musik ist im Buch von 1615 "Les raisons des forces mouvantes" des französischen Ingenieurs De Caus beschrieben. Diese Maschine arbeitete bereits mit einer Stiftwalze, welche die chronologische Abfolge der einzelnen Töne koordinierte.

Die Tatsache, dass anerkannte Künstler wie Friedemann Bach, Haydn und Mozart Werke für Musikautomaten schrieben, beweist, dass diese damals nicht ausschliesslich als mechanische Kuriositäten oder als Jahrmarktsattraktionen betrachtet wurden.

Um 1800 wurde eine Walzenorgel unter den ambulanten Musikanten unter dem Namen "Orgue de Barbarie" populär, ein Ausdruck, der etymologisch auf den Namen des vermutlichen italienischen Erbauers hinzuweisen scheint, Barberi oder Barbieri.

Auch die beiden Automaten die Vaucanson 1738 in Paris vorstellte wurden mit einem Zylinder koordiniert.

Engramelle stellte auf methodische Art und Weise die Technik der musikalischen Programmierung von Zylindern in seinem 1775 erschienenen Buch "La Tonotechnie..." dar

Im Laufe des XIX Jh. wuchs die Automatenkonstruktion zu einem wichtigen Industriezweig heran, und gegen 1900 widmeten sich alleine in Deutschland über 50 Fabriken dieser Tätigkeit. Heutzutage hat die elektroakustische Reproduktion von Musik die Musikauto-

maten abgelöst, wenn wir von einigen nostalgischen Ausnahmen, wie der Fabrikation von Musikdosen absehen.

Die von Jacquard erfundene Lochkarte, welche für die Automatisierung von Webstühlen gedacht war, trug entscheidend zur Entwicklung der automatischen Musikinstrumente bei, indem sie die Zylinder weitgehend ablöste, in einzelnen Fällen auch in Form von Lochbändern oder Lochscheiben.

Unter allen automatischen Musikinstrumenten, die im Laufe der Geschichte erbaut wurden und denjenigen, die uns nur durch die Legende bekannt sind, werden wir uns hier auf einen der nobelsten Vertreter beschränken, auf das mechanische Klavier oder Pianola⁴⁰.

Der Automat kann fest in ein Klavier eingebaut werden oder aber als individuelles Gerät vor die Tastatur eines beliebigen Klaviers geschoben werden, wobei jedes seiner mit Filz bezogenen "Finger" über die entsprechende Taste zu liegen kommen muss, so dass der Automat gewissermassen die Funktion des Pianisten übernimmt. Ein solches Gerät wird üblicherweise mit dem deutschen Namen *Vorsetzer* bezeichnet. Der *Vorsetzer* hat den Vorteil, dass er vor einen grossen Konzertflügel gestellt werden kann, ohne diesen zu verderben, will man etwa anhand Schallplattenaufnahmen anhand von Klavierrollen herstellen, die von einem berühmten Pianisten bespielt wurden.

Im Laufe des XIX Jahrhunderts erfuhr das mechanische Klavier eine intensive technische Entwicklung, die in den Produkten der Firmen Welte, Hupfeld und Aeolian gipfelte, um nur die wichtigsten zu nennen. Eines der ersten funktionstüchtigen Modelle wurde durch Debain erbaut, der auch das *Harmonium* erfand.

Während die Musikautomaten damals zumeist durch Stiftwalzen gesteuert wurden, gingen die fortschrittlichsten Erbauer zu den Lochstreifen über, die wesentlich längere Kompositionen enthalten konnten und sich aufrollen liessen. Ab 1883 baute die Firma Welte solche Rollen in ihre Musikautomaten ein, wobei vorerst ein pneumatisches Überdrucksystem eingesetzt wurde, das ab 1890 durch ein Vakuumsystem abgelöst wurde, das gegenüber dem Überdrucksystem gewisse Vorteile bot.

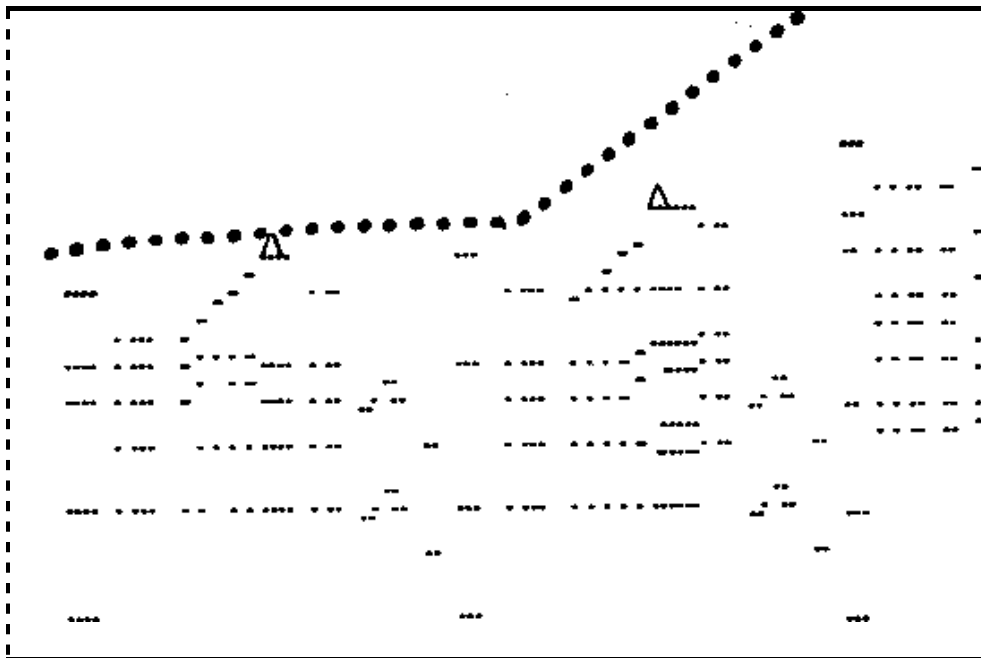
Um 1880 hatten die ersten Musikrollen eine Breite von ca. 15 bis 20 cm und erlaubten die Wiedergabe in einem Tonumfang von etwa 15 oder 20 Noten. Allmählich wuchs die Breite der Bänder, während zugleich der Abstand zwischen den Pisten abnahm, bis die klassischen 28,5 cm breiten Rollen entstanden, die anlässlich des Kon-

⁴⁰ "Pianola" war eigentlich der Markenname des 1900 von Votey erschaffenen mechanischen Klaviers, aber heute wird der Begriff allgemein auf beliebige mechanische Klaviere angewandt.

gresses der wichtigsten Nordamerikanischen Klavierfabrikanten in Buffalo im Jahr 1908 zur Norm erwählt wurden. Diese Rolle war dazu vorgesehen, die Lochspuren der 88 Klaviertasten aufzunehmen, nebst einer Spur, die das Pedal steuerte, und ein paar Zusatzspuren.

Die mechanischen Klaviere können in drei Hauptgruppen unterteilt werden, nämlich die ELEKTROMECHANISCHEN KLAVIERE, auch elektrische Klaviere genannt, die normalen PIANOLAS und die REPRODUKTIONSKLAVIERE.

Die elektromechanischen Klaviere zeichnen sich durch einen vollständigen Automatismus aus, bei dem kein menschlicher Eingriff zur Regulierung der Geschwindigkeit oder der Lautstärke vorgesehen ist. Diese Klaviere pflegten mit einem von einem Elektromotor angetriebenen pneumatischen System ausgerüstet zu sein. Es han-



Ausschnitt aus einer Klavierrolle

delte sich hier um das typische Rollenklavier, wie es gegen Ende des XIX Jh. in gewissen öffentlichen Lokalen anzutreffen war, meist mit endlosen Lochstreifen versehen, um den Rollenwechsel vermeiden zu können. Elektromechanische Klaviere schliessen manchmal dem Klavier fremde Klangerzeuger mit ein, wie etwa Orgelpfeifen oder Glocken. Die Bedienung erfolgte in vielen Fällen über einen Münzautomaten.

Während das elektromechanische Klavier vornehmlich den lärmigen Effekten gewidmet war, erlaubt das klassische Pianola, das meist mittels Pedalen mit Energie versorgt wird (wie im Falle des

Harmoniums), die manuelle Regulierung der Dynamik und des Tempos mit den dafür vorgesehenen Hebeln. Die klassischen Klavierrollen sind meist mit aneinandergereihten aufgedruckten Farbleckschen versehen, welche die DYNAMISCHE MODULATIONSLINIE darstellen⁴¹. Der entsprechende Hebel ist so angeordnet, dass der vom Hersteller empfohlenen Modulationslinie mühelos gefolgt werden kann, ohne aber dazu gezwungen zu sein. So kann eine gewisse Interpretationsfreiheit anhand von serienmässig metronomisch gelochten Streifen gewährt werden. Später fingen einige Hersteller an, eine weitere Linie einzufügen, die METROSTYLISCHE LINIE, welche die in jedem Moment optimale Geschwindigkeit vermittelte.

In den früheren Pianolas mussten alle gleichzeitig gespielten Noten mit derselben Lautstärke wiedergegeben werden, so dass es unmöglich war, die Melodie vor der Begleitung hervorzuheben. Um dieser Beschränkung auszuweichen, führte ab 1900 die amerikanische Firma Aeolian unter dem Namen THEMODIST Rollen mit zusätzlichen Lochungen ein, welche die so markierten Noten akzentuierte. Ein ähnliches System wurde 1908 von der Firma Hupfeld unter dem Namen SOLODANT vertrieben. Wie aber wurde erreicht, dass aus einem Akkord eine einzelne Note (oder zwei, drei Noten) akzentuiert werden konnten? Dazu wurden die entsprechenden Töne den anderen zeitlich leicht vorangesetzt (oder nachgesetzt), was damals übrigens auch namhafte Pianisten zu tun pflegten.

Um die Papierrollen herzustellen, mussten vorerst die den einzelnen Tönen entsprechenden Löcher aufs Papier gezeichnet werden, metronomisch genau nach Partitur und unter Zuhilfenahme von Schablonen. Dann wurden die einzelnen Noten mit Lochgeräten, die sich in den entsprechenden Pisten bewegen konnten, perforiert. Die so bearbeitete Rolle konnte auf einem Pianola geprüft werden. Jede Art von Korrektur war noch möglich: es konnten neue Lochungen angebracht werden, oder durch Überkleben mit Papier konnten bestehende Lochungen beseitigt werden. Die so entstandene Originalrolle wurde in eine spezielle Kopiermaschine gegeben, mit der eine beliebige Anzahl von Kopien hergestellt werden konnten. Zuletzt wurden die Hinweise auf Dynamik und Agogik so aufgedruckt, dass sie von dem vor dem Pianola sitzenden Menschen verfolgt werden können. Zuletzt musste der Streifen nur noch aufgespult werden. In den ersten Jahrzehnten des XX Jh. beschäftigte die Herstellung von Klavierrollen einen beachtlichen Industriezweig. In Katalonien wurde etwa die erste Fabrik 1912 in *la Garriga* gegründet.

⁴¹ Unsere Abbildung "Teilansicht einer Pianola-Rolle" zeigt diese Linie im Falle der Rolle Nummer 2089 der Serie '*Rollos Victoria*', welche die sogenannte Militär-Polonaise Op. 40, Nummer 1 von Chopin wiedergibt.

Ab 1905 begannen verschiedene Klavierrollenhersteller die metrostylische Linie durch rhythmisch flexible Lochungen abzulösen, welche der reellen Geschwindigkeit angepasst wurde, anstelle der herkömmlichen metronomischen Lochung. Das setzte die Herstellung unter der Aufsicht eines kompetenten Musikers voraus, der dem Produkt selbstverständlich einen gewissen Grad an Subjektivität aufprägte, welche allerdings im Moment des Abspielens wieder weitgehend mit dem Geschwindigkeitshebel des Pianolas kompensiert werden konnte. Diese Rollen, die nicht uneingeschränkt akzeptiert wurden, trugen die Bezeichnung "Künstlerrolle". Auch bei den Künstlerrollen musste die Dynamik noch manuell eingestellt werden, indem man mit dem entsprechenden Hebelchen der gedruckten Modulationslinie oder der eigenen Inspiration folgte.

Schliesslich entstanden die sogenannten Reproduktionsklaviere, welche die anhand der Interpretation eines Künstlers hergestellten Klavierrollen abspielen, wobei auf erstaunliche Weise die Agogik und die dynamische Modulierung des Pianisten wiedergegeben wird. Einzelne Fachleute meinen, eine derartige mechanische Reproduktion könne nie den gleichen klanglichen und gefühlsmässigen Reichtum wiedergeben, wie die direkte Interpretation eines sensiblen Pianisten. Dieser Ansicht können allerdings verschiedene Argumente entgegengehalten werden. Erstens müssen wir feststellen, dass beim Niederdrücken einer Taste die Klangfarbe nur von der Geschwindigkeit des Impulses (die durch die auf die Taste angewandte Kraft bestimmt ist) abhängt, da sich die Bewegung des Hammers nachträglich nicht mehr beeinflussen lässt. Die phonographischen Kurven und die auf elektronischem Weg aufgezeichneten Sonogramme haben bestätigt, dass sich ein Klavierton, der durch Niederfallen eines Gewichts auf die Taste erzeugt wurde nicht von einem Ton unterscheiden lässt, den ein sensibler Künstler durch Niederdrücken derselben Taste erzeugte. Dieses und andere Experimente widerrufen aus dem wissenschaftlichen Standpunkt manche der romantischen Ansichten über den Einfluss des Anschlags auf die Klangfarbe.

Ein einzelner Klavierton ist also durch die Kraft des Anschlags und die Dauer des Tones sonographisch vollständig festgelegt. Diese beiden Faktoren können, zumindest theoretisch, auf mechanischem Weg aufgezeichnet und wiedergegeben werden, so dass sich die Reproduktion durch nichts von der Originalinterpretation unterscheidet.

Wir haben gesagt 'theoretisch', da die Reproduktionsklaviere des beginnenden XX Jh. (die Firma Welte baute das erste Reproduktionsklavier im Jahr 1904) die beiden Faktoren (Kraft und Dauer) nicht für jede einzelne Note individuell notierte.

Aber die Annäherung gelang so gut, dass die meisten Klavierwerke mit erstaunenswerter Treue wiedergegeben wurden.

Die Idee, ein Tasteninstrument zu bauen, das jedes darauf gespielte Stück aufzeichnen könnte, war nicht neu, als die Firma Welte ihr Modell "*Welte Mignon*" schuf. Man denke etwa an die Legende, die bereits Engramelle eine Maschine zuschrieb, die auf einem Tasteninstrument gespielte Improvisationen notieren konnte. Ein solcher Apparat, der *Mélographe*, wurde gegen Ende des XIX Jh. durch den französischen Ingenieur Carpentier erbaut. Carpentier schuf auch den Wiedergabeapparat zu seinem *Mélographe*, den er *Mélotrope* benannte. Die beiden Geräte von Carpentier kannten noch keine dynamische Differenzierung.

Auch bei den Reproduktionsklavieren war die Dynamische Differenzierung eingeschränkt. Einzelne Modelle wiesen eine bestimmte Anzahl Lautstärkenstufen auf. Die Psychologen haben festgestellt, dass die meisten Leute, darunter auch Berufsmusiker, nicht imstande sind, mehr als 6 oder 8 Lautstärkestufen voneinander zu unterscheiden. Es sollte daher ausreichen, wenn ein Reproduktionsklavier 8 Lautstärkestufen besitzt. Aber selbst wenn wir bei Einzeltönen nur 8 Intensitätsbereiche unterscheiden können, sind wir befähigt, in einer Reihe von aufeinanderfolgenden Tönen feinere Abstufungen wahrzunehmen, als diejenigen zwischen den 8 Lautstärkepegeln. Diese Erscheinung tritt auch im visuellen Bereich auf: Unser Gedächtnis vermag 6 oder 8 Graustufen zu unterscheiden, aber wenn wir eine Graustufenskala vor uns haben, vermögen wir viel mehr Grauwerte voneinander zu unterscheiden.

Wir sehen also, dass 8 Lautstärkestufen genügen, um die generellen dynamischen Eigenschaften eines Werks wiederzugeben; aber für die treue Wiedergabe aller *Crescendi* und *Diminuendi* reichen diese Abstufungen nicht aus, wodurch die Reproduktion gegenüber der Originalinterpretation etwas verfälscht wird. Die Firma Welte versuchte diesen Mangel folgendermassen auszugleichen: ihre Reproduktionsklaviere wiesen 3 starre Lautstärkestufen auf, die wir als *pp*, *mf* und *ff* bezeichnen könnten. Um von einer Stufe zur anderen zu wechseln, verfügten die Instrumente über zwei pneumatische Systeme, die ein stufenloses *Crescendo*, respektive ein stufenloses *Diminuendo* bewirkten. Der Hauptnachteil bestand darin, dass es praktisch unmöglich war eine zwischen zwei Stufen gelegene Lautstärke konstant einzuhalten.

Die zweite Beschränkung in der dynamischen Differenzierung bestand in der mangelnden Unabhängigkeit der 88 Töne des Tonumfangs. So arbeiteten die Reproduktionsklaviere mit einer Aufteilung der Tastatur in 2 oder mehr Regionen. Im Fall der Reproduktions-

klaviere der Firma Welte wurde die Tastatur zwischen Fa # (3) und Sol (3) in zwei Zonen aufgeteilt. Für viele Kompositionen ist diese Unterteilung ungenügend, was in der Praxis durch manuelles Bearbeiten der Lochstreifen geschah, wobei künstliche Arpeggien geschaffen wurden, ähnlich wie beim *Themodist* des berühmten Pianolas der Firma Aeolian.

Der schwedische Ingenieur Nyström erfand ein Reproduktionsklavier mit Aufnahme und Wiedergabe, bei dem die Eigenart jeder einzelnen Note erfasst wurde. Leider wurden die mit der serienmäßigen Herstellung des Instruments verbundenen Probleme nie gelöst, so dass nur ein paar wenige Exemplare gebaut wurden. Ein ähnliches Schicksal erfuhr ein Reproduktionsklavier der amerikanischen Firma "American Piano Company", bekannt unter dem Namen "Ampico".

Heutzutage sind alle Einzelheiten der Funktionsweise der verschiedenen Reproduktionsklaviere bekannt, da die vielen noch erhaltenen Instrumente, zusammen mit den bespielten Rollen, wie sie zum Teil heute noch für die Einspielung auf Schallplatten der Interpretationen der grossen Pianisten von damals eingesetzt werden, uns keine technischen Geheimnisse vorbehalten können. Das Geheimnis hingegen, mit dem die Aufnahmetechnik in den Tonstudios der grossen Firmen umhüllt wurde, konnte bis heute nicht restlos geklärt werden, und es leben heute nur noch ganz wenige Zeugen, die damals bei den Aufnahmearbeiten mitwirkten. Der Aufnahmemechanismus wurde damals sogar vor den Betriebstechnikern, wie etwa den Klavierstimmern, geheimgehalten. Heute kann man nur Vermutungen darüber anstellen, wie die Töne, ihre Dauer und ihre Lautstärke in den verschiedenen Klavierrollen-Aufnahmestudios aufgezeichnet wurden. Verschiedene spezialisierte Autoren behaupten, dass unter jeder Taste ein senkrechtes Stäbchen angebracht war, das beim Niederdrücken in ein Quecksilberbad getaucht wurde, wodurch ein elektrischer Stromkreis solange geschlossen wurde, wie die Taste niedergehalten wurde. Diese Autoren meinen ferner, die Eintauchtiefe, die mit der Anschlagskraft variierte, sei anhand des elektrischen Widerstandes gemessen worden und hätte die Lautstärke des betreffenden Tons bestimmt. Es ist auch möglich, dass beim Niederdrücken der Taste zuerst ein Stromkreis unterbrochen wurde, der dann beim Eintauchen des Stiftes ins Quecksilberbad wieder geschlossen wurde. Aus der Länge des Unterbruchs wäre dann die Lautstärke ablesbar gewesen. In jedem Fall musste das künstliche Arpeggio zur Differenzierung der Dynamik zweier in derselben Unterteilung der Tastatur gelegener Töne von Hand vorgenommen werden. Und wir vermuten, dass dies nicht die einzige Retusche war,

die nach der Einspielung vorgenommen wurde. Es konnten relativ problemlos falsche Noten, unsaubere Rhythmen oder fehlende Noten korrigiert werden. Pedaleffekte wurden mitunter durch Aushalten gewisser Noten (Fingerpedal) ersetzt, was die Anatomie der Hand vielfach nicht ermöglicht. Andererseits wurde der Einsatz des linken Pedals nicht aufgezeichnet. Halbpedaleffekte gingen ebenfalls verloren.

Trotz allem können Klavierrollenaufnahmen für das Studium des Stils und der Technik von historischen Pianisten äusserst nützlich sein. Man bedenke, dass die Pianisten selber die durchzuführenden Retuschen zu überwachen pflegten. Schon seit Jahren werden die interessantesten Aufnahmen auf Schallplatten und neuerdings auf CD übertragen und so dem grossen Publikum zur Verfügung gestellt. Heute bieten viele Rollenaufnahmen den einzigen Weg, um auf annehmbar objektive Art die Interpretation vieler Pianisten des frühen XX Jh. zu bewerten.

Neben grossen Virtuosen wie Eugène d'Albert, Joseph Hofmann, Frédéric Lamond oder Paderewsky, unter vielen anderen, haben auch mehrere grosse Komponisten Aufnahmen ihrer Werke auf Klavierrollen hinterlassen. Hier seien die Aufnahmen von Claude Debussy, Maurice Ravel, Enric Granados, Alexandre Scriabin und Sergej Rachmaninof erwähnt.

Das Pianola hat neben seinem reproduktiven Aspekt auch eine kreative Seite: verschiedene Künstler des XX Jh. haben Werke für Pianola geschrieben, die für einen Pianisten unspielbar wären, schon wegen der anatomischen Eigenschaften der Hand oder wegen anderen unbesiegbaren technischen Schwierigkeiten. Diese Komponisten haben die Möglichkeit, die Papierrolle manuell zu perforieren. Einer der ersten grossen Komponisten, der diese Möglichkeiten ausschöpfte war Strawinsky mit seiner "*Étude pour Pianola*" (op. 7, N° 1). Andere Komponisten, die Werke für Pianola geschrieben haben, sind Eugene Goossens, Herbert Howells, Hindemith (*Toccata für Mechanisches Klavier*, 1926) und Malipiero.

In der Mitte des XX Jh. schien das Zeitalter des mechanischen Klaviers definitiv beendet zu sein. Aber gegen Ende des Jh. gesellte sich die mikroelektronische Technologie zur Idee des Reproduktionsklaviers und die Firma Yamaha stellte ihr Disklavier vor. Dieses System erlaubt es, die auf dem mit der entsprechenden Apparatur eingerichteten Klavier gespielte Musik auf einer Diskette festzuhalten, die mit dem PC-Format kompatibel ist. Das heikle Medium der gelochten Klavierrolle mit 88 Pisten wurde durch ein elektronisches Medium ersetzt, mit dem die pianistischen Interpretationen mit ei-

nem Computerprogramm elektronisch bearbeitet, kopiert und sogar per E-Mail versandt werden können.

Die wichtigsten direkten Schallwiedergabeapparate, die anschliessend kurz beschrieben werden, sind die folgenden: Das Telephon, der Phonograph und das Tonbandgerät (Magnetophon). Das Telephon, wie die meisten komplexen Erfindungen, wurde nicht von einem einzelnen Menschen entwickelt, obwohl zweifelsohne der wichtigste Name im Zusammenhang mit der Telephonie A.G. Bell lautet. Bevor hier das elektrische Telephon vorgestellt wird, sollen zwei Systeme akustischer Telephonie kurz erwähnt werden. Das erste System, das Schnurtelephon, hat sein Stadium als Physikexperiment und Kinderspielzeug nie überschritten. Dieses Tonübertragungssystem besteht aus zwei Bechern aus Blech oder Pappe, dessen Boden in der Mitte gelocht wurde, um den Knoten einer Schnur aufzunehmen. Wird die Schnur zwischen den beiden Bechern gespannt, kann der Schall von einem Becher zum anderen übertragen werden: an einem Ende der Leitung hält eine Versuchsperson ihr Ohr an den Becher, während auf der anderen Seite die andere Versuchsperson leise in den Becher spricht.

Ein anderes akustisches Telefonsystem ist in der Eigenschaft der Röhren begründet, den Schall ohne wesentliche Abschwächung über grössere Distanzen weiterzuleiten. Eine Person, die ihr Ohr an ein Ende der Röhre hält, vermag die Worte der Person zu verstehen, die am anderen Ende leise in die Röhre spricht, wenn auch mit der entsprechenden Verzögerung. Dieses System kann etwa zwischen dem Speisesaal und der Küche eines Hotels eingesetzt werden oder an Bord eines Schiffs, obwohl heutzutage in den meisten Fällen elektroakustische Systeme das Rohrtelephon abgelöst haben.

Die Beschreibung aller Versuche, die schliesslich zum heutigen Telephon geführt haben könnten den Inhalt eines ganzen Buchs bilden. Hier werden wir uns auf ein paar der wichtigsten Daten beschränken müssen. Eine notwendige Bedingung für die Entwicklung aller elektrischen Telefonsysteme bildete die Entdeckung des Elektromagnetismus durch Ørsted im Jahre 1819. Ørsted bemerkte, dass ein elektrischer Strom ein elektromagnetisches Feld induziert und umgekehrt.

Eine andere Entdeckung führte direkt zum Telephon von Reis, dem Gerät, das wir als erstes elektrisches Telephon betrachten können, nämlich die Entdeckung des Page-Effekts. Page war ein amerikanischer Professor, der 1837 bewies, dass eine rasche Folge von Magnetisierung und Entmagnetisierung eines Eisenstabs durch hochfrequenten elektrischen Wechselstrom von einer akustischen Er-

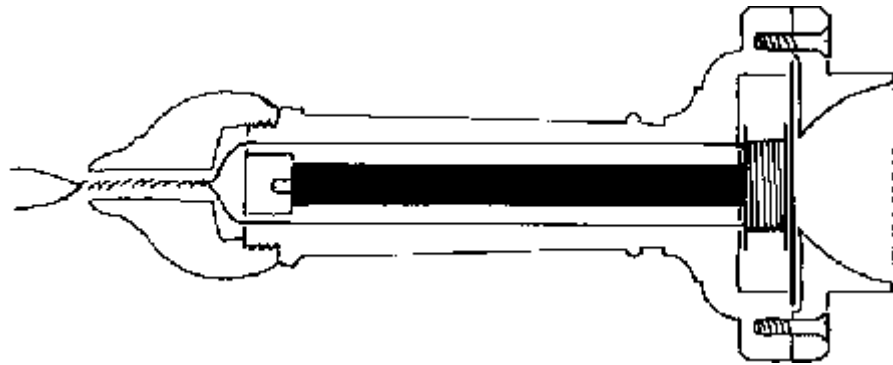
scheinung begleitet werden: Es wird ein Ton mit der Frequenz des elektrischen Wechselstromes abgegeben. Heute wissen wir, dass die Magnetisierung eines Eisenstabs durch elektrischen Strom mit einer extrem kleinen Längenveränderung des Stabs einhergeht, die mit der Orientierung seiner Atome zusammenhängt. Durchläuft etwa ein Wechselstrom von 50 Hz die Windungen eines Elektromagnets, wird der Eisenkern 100 Längenveränderungen pro Sekunde ausgesetzt werden, was bewirkt, dass er einen extrem schwachen Ton von 50 Hz von sich gibt, welcher nicht zu verwechseln ist mit dem Ton, den ein VOR DEM STAB angeordnetes magnetisiertes Stück Stahlblech von sich gibt, weil es alternierend angezogen und abgestossen wird. Dieser Ton ist auch von demjenigen verschieden, den ein VOR DEM STAB angeordnetes NICHT MAGNETISIERTES Stück Stahlblech von sich gibt, das unabhängig von der Polarität des Eisenstabs 100 Mal pro Sekunde angezogen wird, und damit einen um eine Oktave höheren Ton von sich gibt.

Der Page-Effekt bildet auch die Grundlage einer verhältnismässig neueren industriellen Anwendung: die Bearbeitung von Materialien unter Anwendung von Ultraschall. In der üblichen Anordnung wird ein Stahlstab mittels einer von Hochfrequenzstrom durchströmten Spule in Schwingung gebracht. Unter Mitwirkung eines Schleifmittels dringt der Stab in das zu bearbeitende Werkstück ein. Dank dieser Technik können prismatische Löcher beliebigen Querschnitts erzeugt werden, während ein herkömmlicher Bohrer nur zylindrische Löcher liefert. Es kommen meist Frequenzen von über 20000 Hz zur Anwendung. Die Anwendung des Ultraschalls dehnt sich auch auf das Schweißen von Kunststoffen und auf die Präzisionsmessungen aus.

Einer der Vorgänger des heutigen Telephons war das 1861 vom Deutschen Reis vorgestellte Gerät. Reis scheint auch der Schöpfer des Ausdrucks "*Telephon*" gewesen zu sein. Durch seine Bauart eignete sich das Telephon von Reis besonders für die Übertragung von Tönen (nicht von Schall im allgemeinen Sinn) und war daher für die Übertragung der Sprache weniger geeignet, was auch erklärt, warum das Gerät von Zeitgenossen als "musikalisches Telephon" bezeichnet wurde.

Der Überträger oder Sender des Reisschen Telephons besteht aus einem Kasten, der in einen Trichter mündet. Eine Wand des Kastens wird durch eine Membrane aus Pergament ersetzt, in dessen Mitte sich eine mit einem Pol einer Batterie verbundene Platinscheibe befindet, während der andere Pol der Batterie mit der Linie verbunden ist, welche den Sender mit dem Empfänger verbindet. Eine in kurzem Abstand von der Scheibe angebrachter Stift ist mit der zweiten

Phase der Linie verbunden. Der Empfänger besteht aus einem geraden Elektromagneten mit einem dünnen Eisenkern, der über zwei Stege mit einer Resonanzplatte verbunden ist. Wird die Membran mit einer Frequenz n in Schwingung versetzt, findet zwischen der Platinscheibe und der entsprechend eingestellten Platinspitze eine Reihe von Verbindungen und Unterbrechungen des Batteriestromes statt, in einer Anzahl von n pro Sekunde. In der Empfängerstation wird der Elektromagnet n mal pro Sekunde magnetisiert und wieder entmagnetisiert; durch den Page-Effekt wird der Kern in diesem Rhythmus verlängert und verkürzt. Diese Schwingung wird auf den Resonanzboden übertragen und unter idealen Bedingungen an die umgebende Luft in Form einer hörbaren Schallwelle abgestrahlt.



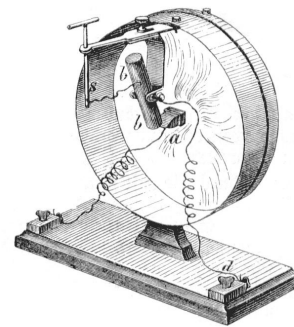
Das Telephon von Bell

Was geschieht, wenn die Lautstärke des Tons von n Hz, der die Membrane zum Schwingen bringt, plötzlich zunimmt? Die Membrane des Überträgers schwingt mit einer grösseren Amplitude mit, aber der Takt der Unterbrechungen zwischen der Platinscheibe und der Spitze bleibt unverändert; an der Empfangsstation wird keine Lautstärkesteigerung hörbar. Darum beschränkt sich das "musikalische Telephon" von Reis im wesentlichen auf die Übertragung der Grundfrequenzen der Töne, ohne Intensitäten und Klangfarben zu unterscheiden.

Das Telephon von Bell aus dem Jahr 1876 liefert uns ein schönes Beispiel für die Verwandlung der Energie von einer Form in die andere. Ein Gerät, das Energie von einer Form in eine andere verwandelt, heisst ein TRANSDUKTOR. Das Bellsche Telephon ist im wesentlichen ein mit einer Wicklung aus dünnem Kabel umgebener zylindrischer Permanentmagnet, vor dem senkrecht eine dünne runde Eisenblechplatte an der Umgrenzung festgehalten wird, die (fälschlicherweise) als Membrane bezeichnet wird, obwohl es sich

streng genommen um eine schwingende Platte handelt. Fängt nun diese Membran unter dem Einfluss der Schallwellen der menschlichen Stimme zu schwingen an, werden in den Windungen des Magnets elektrische Spannungen im Takt der Schallschwingungen induziert. Der so erzeugte Wechselstrom wird durch die Leitung dem in einiger Entfernung gelegenen anderen Gerät zugeführt, das in seinem Aufbau identisch ist. Hier erzeugen die elektrischen Schwingungen entsprechende Veränderungen in der Stärke des Elektromagnets, so dass in diesem zweiten Apparat die Membrane zum Schwingen angeregt wird. Dasselbe Gerät dient also als Sender und Empfänger und benötigt dazu nicht einmal eine Energiequelle, wie etwa eine Batterie, da die akustische Energie alleine ausreicht, um es zu betreiben.

Im Gegensatz zum Reisschen Telephon reproduziert das Bellsche Telephon die Frequenz, die Lautstärke und die Klangfarbe, da der im Sender induzierte Strom wie eine phonographische Kurve verläuft, wenn wir die Distorsionen vernachlässigen. Die Symmetrie des Bellschen Telephons ist so perfekt, wie die des Schnurtelephons oder des Rohrtelephons, da der Überträger gleichzeitig als Sender dient. Aber der Widerstandsverlust und die von unabhängiger Seite induzierten Parasitenströme begrenzen den Einsatz dieses Telephons auf sehr kurze Strecken. Wie bei allen elektroakustischen Transduktoren ist es wichtig, dass die Eigenfrequenzen der Membrane ausserhalb des Tonumfanges des zu vermittelnden Schalls fallen.



Das Mikrophon von Hughes

Die nächste entscheidende Erfindung im Bereich der Telephonie war das Mikrophon von im Jahr 1877. Ein Mikrophon ist ein Transduktor, der Schallwellen in elektrische Schwingungen verwandelt. Im weiteren Sinn bildet das Bellsche Telephon bereits ein Mikrophon. Das Mikrophon von Hughes ist ein im Takt der Schwingungen veränderlicher elektrischer Widerstand. Es ist auf der Tatsache begründet, dass sich der elektrische Widerstand zwischen zwei Kohlen oder anderen elektrischen Leitern mit dem Druck zwischen den Kontaktpunkten verändert.

Ein einfaches Modell eines Hugheschen Mikrophons kann mit drei Eisennägeln gebaut werden. Zwei davon werden parallel auf eine isolierte Platte befestigt und folgendermassen angeschlossen: der erste Nagel entspricht einem Pol einer Batterie, der andere wird mit

einem Pol eines Lautsprechers oder eines Bellschen Telephons verbunden, während der verbleibende Pol des Lautsprechers mit dem noch freien Pol der Batterie verbunden wird. Der Stromkreis wird geschlossen, indem der dritte Nagel quer auf die beiden Nägel gelegt wird. Wird das Experiment unter günstigen Bedingungen durchgeführt, erzeugen kleine Erschütterungen und lauter Schall entsprechende Geräusche im Lautsprechers. Das gängigste Modell eines Hugheschen Mikrophons bestand aus einem an beiden Enden zugespitzten Kohlenzylinder, der senkrecht zwischen zwei Griffen aus demselben Material angebracht wurde. Diese Anordnung wird von einem senkrechten Holzbrettchen getragen, das als Resonanzboden wirkt. Jede Schwingung, die das Brettchen in Bewegung versetzt, verändert rhythmisch den Druck, den die beiden Zylinderspitzen auf die beiden Träger ausübt, und mit ihm den elektrischen Widerstand zwischen den beiden Trägern. Ein mit diesem Mikrophon und einer Batterie in Serie geschaltetes Telephon oder Lautsprecher reproduziert mit einer gewissen Treue die Töne, die den Resonanzboden zum Schwingen gebracht haben. Es wurden schon bald verbesserte Versionen des Hugheschen Mikrophons gebaut, wie etwa das in der Figur anhand eines zeitgenössischen Holzstichs abgebildete Modell. Verschiedene Erfinder änderten die Erfindung von Hughes in mannigfaltiger Art und Weise ab. Hier sei nur eine der ausgereiftesten Versionen des Kohlenmikrophons erwähnt, das Modell von Edison, bei dem der senkrechte Kohlenstab durch eine Füllung aus Kohlenkügelchen ersetzt wurde. Unsere Figur, welche anhand eines Holzstichs aus dem frühen XX Jh. reproduziert wurde, stellt einen Querschnitt durch eine perfektionierte Ausführung eines solchen Mikrophons dar. Im Zentrum der Membran, gleich gegenüber dem Sprechtrichter befindet sich eine Schraube, die auf die Metallplatte, die das mit Kohlekügelchen gefüllte Gefäß abschliesst, Druck ausübt. Die Wände des Behälters bestehen aus isolierendem Material, heute meist Kunststoff, während die beiden Membranen, die die Kohlenkügelchen einschliessen aus Metall bestehen und den beiden Anschlusspolen des Mikrophons entsprechen. Je nach der momentanen Stellung des Bodens und der schwingenden Membrane zueinander sind die Körnchen mehr oder weniger Druck ausgesetzt, der einen indirekt proportionalen elektrischen Widerstand und damit einen direkt proportionalen elektrischen Stromfluss zur Folge hat. Da die Körnchen zur Zusammenballung neigen, sollten solche Mikrophone ab und zu etwas geschüttelt werden. Um den Wirkungsgrad zu erhöhen wurde schon bald die Induktionsspule eingesetzt, welche wie ein Transformator wirkt und auf ähnliche Art geschaltet wird, wie dies

beim weiter unten erwähnten sprechenden Lichtbogens von Duddell der Fall ist.

Aber erst dank der Verstärkerröhre wurde es später möglich, Telephongespräche ohne Lautstärkenverluste über grössere Strecken zu führen. Heute wurde die auf der Verstärkerröhre begründete Technologie weitgehend durch die Halbleitertechnik (Transistor) ersetzt.

Der Fall des Mikrophons bietet eine glänzende Gelegenheit, um die verschiedenen Sorten von Transduktoren vorzustellen, die im Laufe der Geschichte eingesetzt wurden.

Das KOHLENMIKROPHON ist zweifelsohne eines der ältesten Systeme, da das Telephon von Reis schon einen Spezialfall derselben Anordnung darstellt. Und in seiner modernsten Form, als Kohlenkörnchenmikrophon können wir es auch heute noch antreffen.

Das ELEKTROMAGNETISCHE MIKROPHON ist ein direkter Nachfolger des Bellschen Telephons. Während bei der Fassung von Bell der Transduktor selber als Stromversorger wirkte, wird beim elektromagnetischen Mikrophon ein Elektromagnet von einem Gleichstrom durchflossen, dessen Intensität durch die Schwingungen der eisernen Membran, die vor dem Eisenkern angebracht ist, moduliert wird.

Das ELEKTRODYNAMISCHE MIKROPHON oder TAUCHSPULENMIKROPHON ist eine verbesserte Bauart davon, bei der die Spule auf dem Eisenkern hin- und herschwingt. Da die Spule leichter ins Schwingen gebracht werden kann, als die eiserne Membrane, ist diese Anordnung empfindlicher.

Das PIEZOELEKTRISCHE MIKROPHON oder STATISCHE MIKROPHON ist auf der Eigenschaft gewisser Kristalle, wie etwa dem Quarz, begründet, elektrische Spannungen zu erzeugen, wenn sie zusammengepresst oder wieder gedehnt werden. In einem piezoelektrischen Mikrophon bewirken die akustischen Schwingungen Druckänderungen in den Kristallen, die sich als veränderliche elektrische Potentiale bemerkbar machen, die mittels Elektroden von den Kristalloberflächen abgelesen werden können.

Im KONDENSATORMIKROPHON wird eine der beiden Platten eines elektrischen Kondensators durch die akustischen Schwingungen bewegt, wodurch die elektrische Kapazität entsprechenden rhythmischen Veränderungen unterworfen wird.

Das MAGNET-KONSTRIKTIONS-MIKROPHON beruht auf der Eigenschaft von Magneten aus geeignetem Material, ihre Anziehungskraft je nach dem Druck, dem sie ausgesetzt werden, zu verändern.

Das GLÜHFADEN-MIKROPHON weist extrem dünne Platin-drähtchen auf, die mit Gleichstrom geheizt werden und unter dem Einfluss des allerkleinsten Luftzugs, wie ihn die akustischen Schwingungen zu erzeugen vermögen, ihren elektrischen Widerstand (fast) augenblicklich verändern.

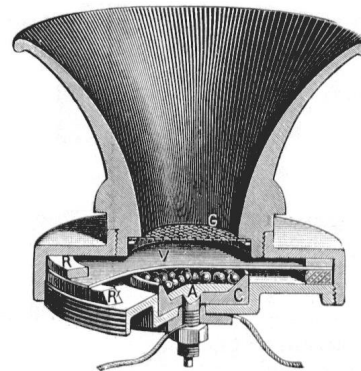
Die meisten dieser Prinzipien sind auch auf den Tonabnehmer (Pick-up) anwendbar. Die inversen Anordnungen sind weitgehend auf den entgegengesetzten Transduktor anwendbar, nämlich auf den Lautsprecher.

Ein guter Transduktor sollte möglichst lineare Resultate liefern. Man spricht von linearem Verhalten eines Transduktor, wenn die Ausgabe eine lineare Funktion (im algebraischen Sinn des Ausdrucks) der Eingabe ist:

$$\text{Ausgabe} = a \cdot \text{Eingabe} + b$$

Ist dies nicht der Fall, spricht man von NICHTLINEAREN DISTORSIONEN.

Bei der normalen Schaltung zwischen der telephonischen Sendestation und der Empfängerstation mittels zwei Phasen kann einer der beiden Drähte weggelassen werden, indem man die Erde als zweiten Leiter benutzt. Wie jedermann weiss, kann beim Senden von Schallwellen mittels RUNDFUNK⁴² ganz auf Leitungslinien verzichtet werden. Die Grundlagen zu dieser grossartigen Erfindung wurden gegen 1900 von Marconi und Popov entwickelt. Der Rundfunk beruht auf der Modulation der von einem Sendergerät ausgestrahlten Hertzchen Wellen⁴³ durch die phonographische Kurve des Schalls. Bei der AMPLITUDENMODULATION, AM, besteht die Modulation aus einer Kombination der von einem elektronischen Schwingkreis erzeugten sinusförmigen Trägerwelle und der phonographischen Kurve des Schalls. Da letztere streng genommen fortlaufend die Fre-



Das Kohlenmikrophon

⁴² Man spricht auch von Radiotelephonie, Radiophonie oder kurz Radio.

⁴³ Die elektromagnetischen Wellen werden zu Ehren ihres Entdeckers Heinrich Hertz (1857-94) auch als Hertzche Wellen bezeichnet.

quenz der Trägerwelle modifiziert, darf sich der Empfänger nicht auf die Erfassung einer einzigen Wellenlänge beschränken; vielmehr wird der Empfänger so eingestellt, dass eine kleine Bandbreite aufgenommen wird, in dessen Zentrum sich die Frequenz der Trägerwelle befindet. Daher kommt der Effekt, dass mit einer allzu grossen Trennschärfe eines Empfängers eine Einbusse der Tonqualität einhergeht. Der Rundfunkempfänger trennt die Trägerwelle wieder von der phonographischen Kurve, die schliesslich auf elektronischem Weg verstärkt wird. Die technischen Einzelheiten, die in vielen spezialisierten Büchern nachzulesen sind können hier nicht beschrieben werden.

Ein anderes wichtiges Rundfunksystem besteht in der Modulation der Frequenz der Trägerwelle, anstatt der Amplitude. Es handelt sich um das unter dem Namen FREQUENZMODULATION, FM, bekannte Verfahren.

Zur Zeit wird mit einem neuen Verfahren experimentiert, dem digitalen Rundfunk, bei dem der zu sendende Schall vor der Ausstrahlung in digitale Form gebracht wird. Digital dargestellte Daten haben den Vorteil, dass sie ohne jeglichen Qualitätsverlust mit entsprechenden Vorrichtungen beliebig oft hintereinander kopiert werden können.

Aber bereits schon vor der Erfindung des Rundfunks konnte der Schall drahtlos übertragen werden. Unter den verschiedenen Systemen sei hier das Verfahren erwähnt, das Ruhmer gegen Ende des XIX Jh. entwickelte. Dieses Gerät arbeitete mit einer manometrischen Kapsel von Koenig. Das von der Flamme abgestrahlte Licht wurde über einen Parabolspiegel zur Empfangsstation weitergeleitet, wo das im Rhythmus des Schalls schwankende Licht auf eine photoelektrische Zelle einwirkte (einen Seleniumhalbleiter, dessen elektrischer Widerstand sich mit der Lichtintensität verändert), die als Transduktor wirkte, wie eine Art Mikrophon. Abgesehen von der mangelhaften Qualität, die heutzutage durch Einsatz einer weniger trägen Lichtquelle, etwa eines Laserstrahls, wesentlich verbessert werden könnte, hat das System den Nachteil, dass sich das Licht auf einer geraden Linie verbreiten muss, die leicht durch irgendwelche Hindernisse, wie etwa eine Wolke oder einen Vogel unterbrochen werden kann.

Wie alte Legenden beweisen, war es schon immer ein Traum der Menschheit gewesen, einen Apparat zu besitzen, mit dem jederzeit der Schall, vor allem die menschliche Stimme, aufgenommen und später wieder abgespielt werden könnte. Es sei etwa der utopische Roman von Cyrano de Bergerac "Histoire comique des États et Empires de la Lune" aus dem Jahr 1656 erwähnt, in welchem ein phan-

tastisches Buch beschrieben wird, das spricht, wenn eine Nadel auf das entsprechende Kapitel gelegt wird. Wir denken auch an das phantastische Abenteuer des Freiherrn von Münchhausen, in dem bei bitterer Kälte die Töne eines Jagdhorns einfroren. Später, beim Auftauen spielte das Horn selbständig seine Melodien...

Vermutlich bestand der erste Schritt zur technischen Verwirklichung der Schallaufzeichnung aus dem Apparat von Young, der um 1807 die phonographische Kurve des Tons einer Stimmgabel auf einen mit Russ bedeckten Stahlzylinder aufzeichnete.

Eine Verallgemeinerung dieses Verfahrens wurde im Jahre 1857 von Scott entwickelt, der sein Gerät als *Phonautographe* bezeichnete. Jetzt fehlte "nur" noch das System, das es erlaubte, die vom *Phonautographe* aufgezeichneten Kurven wieder in Form von Schall wiederzugeben. Schliesslich wurden sich 1877 zwei Erfinder, Edison und Charles Cros, offenbar unabhängig voneinander, bewusst, dass die Maschine von Scott umkehrbar war und es entstand die Urform des Phonographen. Jetzt wo wir die Lösung des Problems kennen, scheint uns der 1877 vollführte Schritt trivial und wir staunen, dass es so lange gebraucht hatte, um zu diesem Schluss zu kommen. Genau wie beim berühmten Ei des Columbus. Aber es ist doch interessant festzustellen, dass weder Scott, noch die berühmten zeitgenössischen Physiker, wie Helmholtz oder Koenig, die mit der Maschine von Scott gearbeitet hatten, den entscheidenden Schritt vollbrachten.

Der erste Phonograph von Edison (der Apparat von Cros wurde nie gebaut) bestand aus einem Zylinder auf einer gewundenen Achse, der sich bei jeder Umdrehung einer Kurbel um eine der Windung entsprechende Distanz seitlich fortbewegt und einer Membran, unter der eine Gravurnadel angebracht ist. Wird die Membran in Aufnahmestellung gebracht, wird die Nadel auf den Zylinder gedrückt, der von einem hauchdünnen Zinnblech überdeckt wurde, in das der Weg der Nadel leicht eingegraben wurde. Wird der Zylinder gleichmässig gedreht, während in den über der Membrane angebrachten Schalltrichter gesprochen wird, gräbt sich die Nadel im Rhythmus der Schwingungen mehr oder weniger tief in die Zinnschicht ein, so dass von der Seite her betrachtet eine phonographische Kurve entsteht. Man spricht von Tiefengravur. Nach der Aufnahme wird die Membrane zusammen mit der Nadel wieder in die Ausgangsstellung gerückt. Versetzen wir nun den Zylinder wieder in gleichmässige Rotation, folgt die Nadel wieder der Rille und wird in dieselben Schwingungen versetzt, die bei der Aufnahme in das weiche Metall gedrückt wurden, womit der Schall einigermaßen treu wiedergegeben wird, wenn wir die Distorsionen vernachlässigen. Leider kann

der auf diese Art aufgenommene Schall nur wenige Male angehört werden, bis die Rille endgültig von der Nadel zerstört wird.

Eine wesentliche Verbesserung in der Wiedergabequalität des Phonographen wurde 1888 von G. Bell, Chichester Bell und Tainter mit dem Einsatz von mit Wachs beschichteten Zylindern erzielt. Der angepasste Apparat wurde von seinen Erfindern als *Graphophone* bezeichnet. Bei der Phonographie auf Wachszyylinder wurden zwei verschiedene Nadeln eingesetzt, eine Stichelförmige für die Aufnahme, die andere mit einer abgerundeten Spitze für die Wiedergabe. Durch die geeignete Auswahl der meist aus Parafin, Bienenwachs und Carnaubawachs zusammengesetzten Schicht konnte eine fast unbegrenzte Anzahl Wiederholungen erreicht werden. Gegen Ende des Jh. wurden Phonographen in grossen Serien für den Haushalt hergestellt und die Herstellung bespielter Zylinder wurde zu einem wichtigen Industriezweig. In dieser ersten Epoche der Phonographie wurden die Aufnahmen mit rein akustischen Mitteln produziert, ohne elektroakustische Transduktoren. Vor den Orchestern und den Solisten mussten grosse Schalltrichter aufgestellt werden und der so eingefangene Schall wurde über Schläuche den Aufnahmegegeräten zugeführt. Gegen Ende des Jh. erfand der Deutsche A. Stroh eine extravagant aufgebaute Violine, die keinen Resonanzboden hatte; vielmehr wurden bei der Strohgeige die Schwingungen des Steges einer Membrane mit einem Schalltrichter weitergeleitet, wie bei einem Phonographen. Dieses Instrument, das heute nur noch ein kurioses Museumsstück darstellt, verrichtete für die damalige phonographische Industrie wertvolle Dienste, da der Schalltrichter gegen einen akustischen Schlauch ausgetauscht werden konnte, der den Schall direkt einem Aufnahmegerät zuführte. Vermutlich haben wir die meisten qualitativ akzeptablen Aufnahmen berühmter Violinisten jener Zeit, wie etwa von Joseph Joachim, der Strohgeige zu verdanken.

Ab 1925 oder 1930 gingen die Aufnahmestudios zur elektroakustischen Tonaufnahme über. Der Schall wurde dabei mit einem Mikrofon aufgenommen und elektronisch verstärkt. Der Grabstichel arbeitete auf ähnliche Weise wie beim reinen akustischen Verfahren, wurden aber mit einem Transduktor gesteuert, der die vom Verstärker gelieferten Schwingungen in entsprechende mechanische Schwingungen verwandelte, ähnlich wie dies bei einem Lautsprecher geschieht. Später wurde auch das der Wiedergabe entsprechende Gegenstück dazu entwickelt, der Tonabnehmer oder Pick-up, der die Membrane und den Schalltrichter ablöste und die phonographische Kurve der Rille direkt in elektrische Schwingungen verwand-

delte. Heutzutage arbeiten die meisten der noch eingesetzten Pick-ups elektrodynamisch, aber es gibt auch piezoelektrische Pick-ups.

Ungefähr ab 1895 begann ein neuer phonographischer Tonträger den Zylinder abzulösen, die 1887 von Berliner erfundene Grammo-phonplatte. Die Rillen dieses neuen Mediums wurden quer geschnitten (seitliche Aufzeichnung), im Gegensatz zu dem bei den Zylindern üblichen Tiefschnitt (oder senkrechte Aufzeichnung). Betrachten wir also eine Platte von Berliner unter einem Mikroskop, können wir eine schlängelnde Linie beobachten, während die entsprechende Linie bei den Zylindern senkrecht verläuft und punktweise veränderliche Tiefen aufweist.

In den ersten von Berliner hergestellten Platten verlief die eingegrabene spiralförmige Rille von einer Zone in der Nähe des Zentrums gegen aussen. Auch Edison schuf ein auf Platten gegründetes phonographisches System, allerdings mit vertikaler Gravur, wie bei den Zylindern. Später wurde universell die Quergravur auf Platten mit einem Durchmesser von 30 cm mit der Spirale von aussen nach innen und 78 Umdrehungen pro Minute als Standard eingeführt.

Um den Vertrieb in grossen Auflagen zu erlauben, war die Industrie auf Verfahren angewiesen, die es erlaubten, die Platten serienmässig herzustellen. Schon früh entwickelte Berliner ein System, mit dem er seine quer geschnittenen Platten vervielfältigen konnte: Die Originalaufnahme wurde auf eine mit einer Wachsschicht belegten Zinkplatte vorgenommen. Der Grabstichel aus Platiniridium war über eine Membrane mit einem Schallrohr verbunden. Um die bei der Aufnahme entstehenden Wachsspäne vom Grabstichel zu entfernen, wurde der Rotationsteller vollständig in ein Wasserbecken untergetaucht, so dass die Späne an die Oberfläche auftauchen. Nach der abgeschlossenen Tonaufnahme wurde die Platte in ein Säurebad getaucht und geätzt, wie eine Radierung, bei der die Wachsschicht als Ätzreserve diente. Anhand dieser Aufnahme wurden auf galvanischem Wege Matrizen gemacht, die ihrerseits der Prägung der endgültigen Schallplatten auf thermoplastischem Material dienten.

Dieses Verfahren hatte einen Nachteil, der in der ersten Zeit wohl nicht richtig beurteilt wurde und der möglicherweise die Hauptursache für den geringen wirtschaftlichen Erfolg darstellte, den diese Platten im Vergleich zu den Zylindern hatten. Die Säuren haben die Eigenschaft, die kristalline Struktur des Metalls an der angeätzten Oberfläche hervorzuheben. Im Fall der Platten von Berliner verursachte dieser Effekt ein Grundrauschen bei der Wiedergabe, das die Qualität der Wiedergabe wesentlich beeinträchtigte. Ab 1897 wurden die galvanischen Matrizen direkt ab der Originalwachsschicht hergestellt, und das wird auch heute noch so gemacht.

Heutzutage⁴⁴ wird die Originalplatte aus Wachs anhand einer Tonbandaufnahme hergestellt. Das Wachsrelief wird auf elektrolytischem Wege mit einer Metallschicht bedeckt, wonach der Wachs weggeschmolzen wird. Wegen der Feinheit seines Kornes wird zuerst eine dünne Goldschicht aufgetragen. Daher der Ausdruck "Goldene Schallplatte". Nachher folgt meist eine Kupferschicht. Die so entstehende Matrize könnte bereits zum Pressen der Auflageplatten dienen. Meist werden aber von dieser ersten Matrize eine Anzahl Gegenreliefs gebildet, die als Patrize bezeichnet werden. Erst von diesen Patrizen werden die definitiven Matrizen gewonnen. Schliesslich werden die Matrizen für die Prägung in einer vorgeheizten Presse gegen ein Stück thermoplastisches Material (heute meist Vinyl) gepresst. Zuletzt wird die Matrize⁴⁵ der Presse entnommen, gekühlt und von der Platte getrennt, welche nur noch in einer Art Drehbank abgerundet werden muss.

Die Hersteller von Phonographenzylindern mussten ein wesentlich schwierigeres Problem lösen, denn es scheint auf den ersten Blick unmöglich, einen bespielten Zylinder durch eine Pressung oder Injektion von Material zu duplizieren, da danach das Original nicht mehr von der Kopie getrennt werden könnte. Es boten sich damals folgende Auswege an:

- Das Musikstück so oft mal spielen lassen, wie Zylinder hergestellt werden mussten.
- Die Schallwellen mittels akustischer Rohre auf mehrere Aufnahmegeräte verteilen.
- Einen bespielten Zylinder mit einem speziellen Kopiergerät auf einen oder mehrere Rohzylinder überspielen.

Wenn man bedenkt, dass die bespielte Wachsschicht nicht dauerhaft genug war, um beliebig viele Kopien davon herstellen zu können, waren die Aussichten der Fabrikanten eher düster. Edison und seinen Mitarbeitern gelang 1903 nach vielem Experimentieren der entscheidende Durchbruch dank einer genialen Idee, die es ihnen erlaubte, praktisch beliebig viele Kopien von einer Wachswalze herzustellen. Das Verfahren war folgendes:

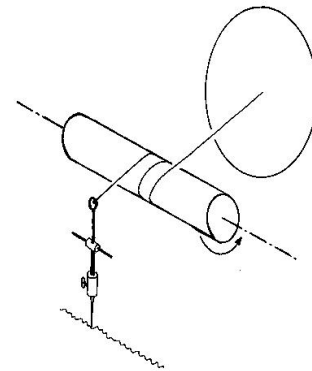
Das erste Problem war die Behandlung der bespielten Wachsschicht, so dass diese die Elektrizität leitete. Zuerst versuchten sie, den zu bespielenden Zylinder mit einer Mischung aus Wachs und Graphit zu beschichten, wie sie bei der Anfertigung von Galvanos für das Druckereigewerbe eingesetzt wurde. Aber das Resultat war für die Zwecke der Tonaufnahme zu grob, vielleicht weil es nicht

⁴⁴ Die meisten Tonaufnahmen werden inzwischen ausschliesslich auf CD vertrieben; die Tage der herkömmlichen Schallplatte sind gezählt.

⁴⁵ Normalerweise handelt es sich um zwei Matrizen, eine für jede Seite der Platte.

möglich war, einen genügend reinen und feinen Graphit zu gewinnen. Schliesslich gelang es, die bespielten Zylinder mit einer hauchdünnen Goldschicht zu bedecken, und zwar in einer Vakuumkammer, in der der Zylinder gleichmässig zwischen zwei Goldplatten rotierte, zwischen denen ein elektrischer Bogen unterhalten wurde. Die Elektronen, die von der Kathode zur Anode sprangen, entrissen der Goldplatte ein paar Goldatome, die auf der Wachsschicht der Zylinder haften blieben.

Diese hauchdünne Goldschicht erlaubte es, den Zylinder auf galvanoplastischem Weg mit einer Kupferschicht zu überziehen. Die Wachsschicht des Originalzylinders wurde anschliessend mit entsprechenden Lösungsmitteln abgelöst und die Kupfermatrize wurde in ein Messingrohr mit etwa 5 mm Wandstärke eingebaut. Um einen Abdruck dieses Zylinders zu erhalten, wurde



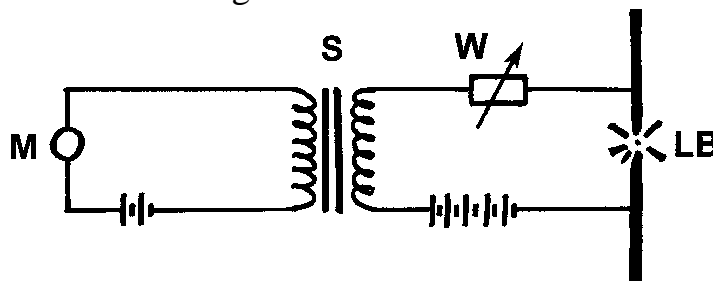
Anordnung von Wawrina

das Rohr senkrecht in ein Bad aus einer Art flüssigem Wachs mit einer bestimmten Temperatur getaucht und diesem sofort wieder entnommen. Nach dem Abkühlen haftete eine dünne und harte Wachsschicht im Inneren des Rohrs. Da sich beim Abkühlen der Wachs stärker zusammenzog als das kalte Metallrohr und andererseits die Tiefe der Rillen minimal war (etwa in der Grössenordnung eines Zehntelmillimeters) erlaubte es dieser Grössenunterschied, die Kopie aus dem Rohr zu schieben. Der Prozess wurde mit einem mechanischen Vorgang abgeschlossen, der dem Zylinder die definitive Form gab.

Ein anderes Problem, das mit der Phonographie der ersten Epoche verbunden war, war die Schallverstärkung. Wie jedermann weiss, wird der Schall heute auf elektronischem Wege verstärkt. Die elektronische Verstärkung wurde durch die TRIODE möglich, die um 1907 von Lee De Forest erfunden wurde. Ab 1950 wurde die auf Vakuumröhren basierte Technologie durch die auf den Halbleitern begründete Elektronik abgelöst. Der TRANSISTOR war der Ersatz für die Verstärkerröhre. Aber war die Schallverstärkung vor dem Zeitalter der Elektronik überhaupt möglich? Wie konnte etwa eine Schallplatte einem ganzen Saal voller Publikum hörbar gemacht werden?

Anschliessend seien drei verschiedene Verfahren beschrieben, die etwa ab 1900 zu diesem Zweck eingesetzt wurden. Das erste Verfahren, um den Schall des Phonographen zu verstärken, der SPRECHEN-

DE LICHTBOGEN, ist auf einer verblüffenden Erscheinung begründet: Werden die beiden Pole einer starken Gleichstromquelle mit je einer Kohlenelektrode verbunden, können wir einen Lichtbogen erzeugen, indem wir die beiden Elektroden kurz berühren und dann sofort bis auf eine kleine Distanz voneinander zurückziehen. Ganz ähnlich wie beim elektrischen Schweißen. Auf diese Weise erhalten wir einen extrem grellen Lichtbogen, dessen Temperatur bei über 3'500 °C liegen kann. Um 1900 wurde der von Davy erfundene Lichtbogen bei der Strassenbeleuchtung eingesetzt. Heute wird der Lichtbogen fast ausschliesslich zum Schweißen von Metallen verwendet. Der englische Ingenieur Duddell hatte beobachtet, dass der Bogen dazu neigte, bei kleinsten Spannungsschwankungen Geräusche zu erzeugen. Er hatte den Einfall, diese Spannungsschwankungen mit einem Mikrophon bewusst zu erzeugen.



Schema des sprechenden Lichtbogens

In dieser Anwendung des Lichtbogens ist es wichtig, über eine möglichst gleichmässige Stromquelle zu verfügen, und aus diesem Grunde ist eine Batterie oder ein Akkumulator als Stromquelle einem dynamo-elektrischen Generator vorzuziehen. Das Mikrophon darf nicht in den Haupt-Stromkreis eingeschlossen werden, da Lichtbogen nur unter Stromintensitäten zustandekommen, die jedes Mikrophon sofort zerstören würden. In der einfachsten Anordnung des sprechenden Lichtbogens von Duddell, wirkt das Mikrophon über eine Induktionsspule, eine Art Transformator, auf den Stromfluss des Hauptstromkreises. Die Buchstaben in der Figur bedeuten: M Mikrophon, S Induktionsspule, W Wechselwiderstand, LB sprechender Lichtbogen. Das Mikrophon bewirkt unter dem Einfluss der Schallwellen im Nebenstromkreis kleine Spannungsschwankungen, welche dank dem Transformator im Hauptstromkreis entsprechende Schwankungen erzeugen. Letztere schwingen im Einklang mit dem Schall, der sie erzeugte und bringen ihrerseits den Lichtbogen dazu, den ursprünglichen Schall verstärkt wiederzugeben.

Wird der von der Membran eines Phonographen abgegebene Schall über einen Schlauch dem Mikrophon zugeleitet, können phonographische Aufnahmen vor einem zahlreichen Publikum abgespielt werden, wie bei einer elektronischen Verstärkeranlage. Aber

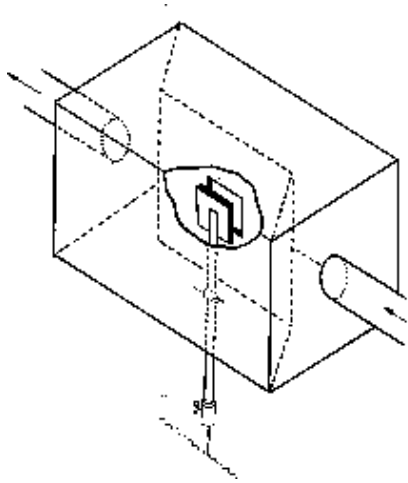
trotz den experimentellen Erfolgen hat dieses System nie kommerziellen Erfolg erzielen können, vermutlich nicht zuletzt wegen des beträchtlichen Energiebedarfs. Man bedenke, dass elektrische Lichtbögen ab 100 V Spannung und über 20 A Stromstärke funktionieren. Beim elektrischen Schweißen werden Stromstärken eingesetzt, die manchmal 200 A übertreffen können.

Der FADENVERSTÄRKER, ein auf Reibung begründetes Verstärkersystem wird dem Erfinder Wawrina zugeschrieben. Ein Faden, der zwei- oder dreimal um einen drehenden Stahlzylinder gewickelt ist verbindet die Nadel eines Phonographen mit einer grossen Membrane, die einen wesentlich grösseren Durchmesser aufweist, als dies bei Phonographen üblich ist. Wird der Faden leicht in Richtung der Nadel gezogen, zieht sich dieser über den Drehzylinder zusammen, wodurch der Widerstand anwächst, so sich der Faden zwischen dem Zylinder und der Membran spannt und letztere gegen den Zylinder hin angezogen wird. Sobald der Zug seitens der Nadel gelockert wird, nimmt die Reibungskraft ab und die Membrane wird freigegeben. Diese Erscheinung kann dazu eingesetzt werden, um die schwachen Schwingungen, welche die Schallplattenrille der Phonographennadel mitteilt, mechanisch zu verstärken.

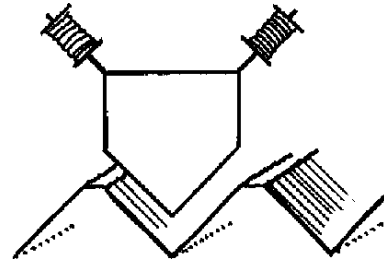
Ein mechanische Verfahren zur Schallverstärkung, das bis zu einem gewissen Masse Erfolg aufwies, war das AKUSTISCHE VENTIL. Bei diesem System wird ein starker Luftstrahl mit einem Ventil reguliert, das sich durch die von der Rille einer Grammophonplatte gelieferten Schallwellen steuern lässt. Das Resultat war eine kräftige Verstärkung des Schalls. Die Luft pflegte aus einer Gasflasche zugeführt zu werden. Die ersten Modelle von akustischen Ventilen arbeiteten nach dem in unseren Figur dargestellten Schema. Später wurden dazu Kämme eingesetzt, welche im Rhythmus der Schallwellen quer zueinander hin und her glitten, was weitgehend die Rückkopplungseffekte der Pressluft auf den Schwingungserzeuger unterband. Die Ähnlichkeit der Schemata des akustischen Ventils, der Verstärkerröhre und des Transistors ist beachtenswert.

Die Platte mit 78 Umdrehungen war pro Seite auf ungefähr 5 Minuten Musik beschränkt. So mussten unter anderem die meisten Symphonischen Sätze in Abschnitte aufgeteilt werden. Um längere Musikstücke auf eine Plattenseite unterbringen zu können, mussten vor allem zwei Probleme gelöst werden: Die Drehgeschwindigkeit musste reduziert werden und die Rille musste verschmälert werden, beides ohne Qualitätseinbusse. Schon ab 1931 führte Leopold Stokowski eine Anzahl Experimente durch, die auf die Lösung der beiden Probleme und die Einführung von Platten mit $33 \frac{1}{3}$ Umdre-

hungen pro Minute abzielten. Das System kam um 1950 auf den Markt und konnte sich gute 50 Jahre lang bewähren.



Das akustische Ventil



Tonabnahme an den Rillennflanken

Bei diesen als LP (Long Play) bezeichneten Platten wurde der Schellack, der lange zur Erzeugung der Platten gedient hatte, durch Vinyl und manchmal durch PVC ersetzt, was den grossen Vorteil hatte, dass die neuen Platten unzerbrechlich waren. Eine neue Technik erlaubte den Tonschnitt der Originalplatte mit einem heissen Grabstichel. Anfangs war ein grosses Problem zu lösen: die Rille musste breit genug sein, um auch die breitesten Amplituden aufzunehmen. Das folgende Verfahren wurde eingesetzt, um eine Rille mit variabler Breite zu erhalten: Während der Aufnahme anhand eines Tonbands, wurde dieses nacheinander vor zwei Tonabnehmern durchgezogen, mit einem Abstand, der ungefähr der Zeit entsprach, welche die Platte brauchte, um eine Umdrehung durchzuführen, also ungefähr 1,8 Sekunden. Die vom ersten Tonabnehmer ermittelten Daten dienen im wesentlichen dazu, den Betrag zu bestimmen, um den sich die Nadel im Laufe der nächsten Umdrehung dem Zentrum der Platte nähern muss. So wird erreicht, dass die Rille immer gerade breit genug ist, um sich der Lautstärke des aufzuzeichnenden Tonmaterials anzupassen, was in den meisten Fällen das Fassungsvermögen der Platte steigert. Da bei musikalischen Aufnahmen die Schwingungen der Töne unterhalb von 440 Hz die grössten Amplituden einnehmen, wurde ein weiterer Trick eingesetzt: die Töne werden einer elektronischen Bearbeitung unterworfen, bei welcher ihnen für jede Oktave, die sie unter 400 Hz liegen, eine gewisse Anzahl dB abgezogen wird. Die Grenze von 400 Hz wurde willkürlich festgelegt. Der Reproduktionsapparat muss mit einem elektronischen System ausgerüstet werden, das diese Manipulation wieder kompensiert.

siert. Auf diese Weise kann die Breite der Rille besonders in tiefen und lauten Passagen wesentlich vermindert werden.

Um den kleinen Störungen entgegenzuwirken, die sich besonders im Bereich der höheren Frequenzen dank Materialfehlern störend bemerkbar machen, wurde das komplementäre System eingesetzt: Die Amplitude der Frequenzen über 2500 Hz wurden proportional zur Anzahl Oktaven, die sie über dieser Grenze lagen, gestaucht.

Gegen Ende der Fünfzigerjahre erschienen stereophonische Schallplatten auf dem Handel. Diese funktionieren folgendermassen: Jede Flanke der Rille entsprach je einem der beiden Aufnahmekanäle. Der phonographische Tonabnehmer oder Pick-up, mit einer einzigen Nadel ausgerüstet, enthält zwei Spulen (im Falle eines elektrodynamischen Tonabnehmers), die räumlich so ausgerichtet sind, dass jeder die Schwingungen der senkrecht zu seiner Achse stehenden Rillenflanke aufnimmt. Die Figur stellt dieses System in stark schematisierter Form dar.

Die Möglichkeit stereophonischer Übertragung von Musik wurde zum ersten Mal 1881 anlässlich der elektrischen Ausstellung in Paris durch Clément Ader organisiert. Dabei wurde die Musik direkt aus der Pariser Oper über Telephonleitungen den Kopfhörern der Zuhörer zugeführt.

Ab 1958 wurde es möglich, stereophonische Schallplatten herzustellen. Damals erschienen auch die ersten stereophonischen Tonbandgeräte auf dem Markt. In den Sechzigerjahren wurde der stereophonische Rundfunk eingeführt.

Die als binaurales Aufnahmeverfahren bekannte Technik arbeitet mit einem Kunstkopf aus Kunststoff, in dem die Mikrophone der beiden Kanäle in der unserem Gehörorgan entsprechenden Stellung untergebracht werden. Damit wird ein besonders wirklichkeitstreu Resultat erreicht.

In den Siebzigerjahren erschienen auf dem Markt verschiedene 4-Kanalsysteme. Das bekannteste Beispiel ist die Quadrophonie, die eine gewisse Erfolgsquote erreichen konnte.

Während sich im Bereich der HiFi-Elektronik die Mehrkanalverfahren kaum durchsetzen konnten, gehören diese im Bereich des Tonfilms zur Standardausrüstung und werden etwa mit dem Begriff *Surround* bezeichnet.

Seit bald 20 Jahren werden die Vinylplatten mit 33 1/3 Umdrehungen immer mehr durch die digitalen CDs⁴⁶ abgelöst, die mittels eines Laserstrahls eingelesen werden und daher keinem mechani-

⁴⁶ Compact Disc.

schen Verschleiss mehr unterworfen sind. Was bedeutet hier das Wort '*digital*'? Beim herkömmlichen Verfahren wird die Schallinformation durch eine stetige Kurve dargestellt. Man spricht von *analogem* Verfahren. Jede kleinste Verformung dieser Kurve zieht eine Verfälschung des Schalls nach sich. Eine solche analogische Kurve kann durch numerische Daten beliebig genau angenähert werden. Dadurch erhält man eine DIGITALE DARSTELLUNG des Schalls. Ist das "Gitter", anhand dessen die phonographische Kurve digitalisiert wird, nur fein genug, so unterscheidet sich die digitalisierte Kurve nicht merklich von der Originalkurve. Diese Technik ist mit der autotypischen Rasterung vergleichbar, die etwa im Offsetdruck eingesetzt wird, um Halbtonoriginale reproduzieren zu können. Ist der Raster fein genug, wird er vom Laien nicht mehr wahrgenommen. Bei der phonographischen Tonaufnahme bestimmt unser Gehör die nötige Feinheit des Gitters. Welchen Vorteil hat diese Art der Darstellung? Vor allem die absolute Unveränderlichkeit der Daten im Laufe der Zeit: Verändert sich nämlich aus irgend einem Grund der Wert einer Zahl, die etwa auf einem magnetischen Träger gespeichert ist, rundet ihn der Wiedergabeapparat wieder auf den Originalwert, sofern die Abweichung nicht allzu gross geworden ist und sich die Zahl dadurch näher bei einem Nachbarwert befindet, als beim Ursprünglichen. Liest also etwa das Wiedergabegerät die Zahlenfolge 3,02 5,998 4,1 7,02 ein, rundet er sie automatisch auf 3 6 4 7. Diese Eigenschaft der digitalisierten Daten erlaubt es, ein digitalisiertes Musikstück hintereinander auf verschiedene Träger zu kopieren, ohne den geringsten Datenverlust zu erleiden⁴⁷. Bei einer analogen Aufnahme hingegen müssen wir bei jedem Kopiervorgang einen Qualitätsverlust hinnehmen, der sich bis zur Unkenntlichkeit steigern kann. Dasselbe passiert beim Kopieren der sogenannten Sicherheitsschlüssel: die Kopie der dritten oder vierten Generation⁴⁸ schliesst meist die Tür nicht mehr auf.

Ein anderer Vorteil des digitalen Formats besteht auch darin, dass die Daten mit einem PC weiterverarbeitet werden können.

Auf der CD werden die digitalen Werte in Form von mikroskopischen Vertiefungen gespeichert, die ein optisches System mit Laserlicht durch eine durchsichtige Kunststoffschicht ablesen kann. Letztere ist dick genug, um zu verhindern, dass kleinste Staubpartikel auf der Oberfläche die Ablesung beeinträchtigen können, da diese nicht mehr in den Schärfbereich der Optik fallen. Kontrollspuren, welche die Hauptspur in einigem Abstand begleiten sorgen dafür, dass

⁴⁷ Dies gilt übrigens auch für die Daten, mit denen unser PC arbeitet.

⁴⁸ Dasselbe kennen wir bei der Photokopie: kopiert man Kopien, erhält man zuletzt ein unleserliches Dokument.

kleine Fabrikationsfehler und die unvermeidlichen Kratzer die Platte unlesbar machen. Diese sind in gewissen Systemen so wirkungsvoll, dass kleine Löcher durch die ganze Platte von einem halben Millimeter Durchmesser auf einem guten Abspielgerät kompensiert werden können. Es ist sogar so, dass eine Kopie einer solchen Platte wieder mit der unbeschädigten Originalplatte übereinstimmt⁴⁹.

Im Bellschen Telephon erzeugen die Bewegungen im Takt der Schallwellen der Membran vor dem mit einer Spule versehenen Permanentmagneten einen Wechselstrom, der es erlaubt, in der Empfangsstation den Schall zu reproduzieren. Könnten wir statt der Distanz zwischen dem Magneten und der Membrane die Magnetisierung der Membrane im Takt der Schallwellen verändern, würden wir ein ähnliches Resultat erhalten. Der nächste Schritt in diesem Gedankenexperiment besteht darin, die Membrane durch eine Abfolge von Membranen mit vorbestimmten Magnetisierungen zu ersetzen, etwa wie bei einem Film die Einzelbilder. Stellen wir uns vor, diese Einzelmembranen laufen auf einem Fließband vor dem Elektromagneten des Bellschen Telephons durch, haben wir hier bereits eine Anordnung, die vage an das MAGNETOPHON oder Tonbandgerät erinnert, welches mit einem stetigen magnetisierbaren Band arbeitet. So etwa dürfte der Gedankengang sein, der den Dänen Poulsen gegen 1900 zur Erfindung seines *Telegraphone* führte, das heute als der Hauptvorläufer des Tonbandgeräts gilt.

Vor allem zwei technische Schwierigkeiten standen dem strahlenden Erfolg der Erfindung von Poulsen im Weg. Einerseits verfügte Poulsen noch über keine ausreichende Möglichkeit der elektronischen Tonverstärkung. Andererseits war das von Poulsen eingesetzte magnetische Material nicht für Montagen geeignet, wie die heute verwendeten Tonbänder. Anstelle von Band verwendete Poulsen nämlich einen dünnen Stahldraht, der auf einen Zylinder fest aufgewickelt war. Später wurden Stahlbänder eingesetzt. Erst ungefähr ab 1935 wurden diese Materialien durch ein vollständig neues Medium abgelöst: Das einseitig mit einer Emulsion von feinstem Eisenpulver beschichtete Kunststoffband. Diese Kombination bildet auch heute noch den hauptsächlichsten Tonträger des Tonbandgeräts, sowie des Magnetoskops (Video).

Das Fundament der Magnetophonie ist die Möglichkeit ein Stück Eisen mit einem Magnet zu magnetisieren. Je nach Material ist die Magnetisierung nur vorübergehend (remanent), wie im Fall des Roheisens, oder aber dauerhaft (permanent), wie bei den meisten

⁴⁹ Siehe den Artikel "*Reproducción digital del sonido*" in der Zeitschrift "*Investigación y Ciencia*", Februar 1985. (*Investigación y Ciencia* ist die spanische Ausgabe von *Scientific American*.)

Stahlsorten. Wir können uns die Magnetisierung wie eine Ausrichtung der Elementarteilchen vorstellen, die in ihrem natürlichen Zustand ungeordnet in alle Richtungen schauen.

Wird das Tonbandgerät zum Aufnehmen eingesetzt, fließt das Band zuerst vor einem Magnetkopf durch, der mit Hochfrequenz arbeitet und das Band löscht, indem er die Partikeln ausrichtet, was die Empfindlichkeit des Bandes erhöht. Das *Telegraphone* von Poulsen sah noch keinen Löschkopf vor. Die Polarisierung mit Gleichstrom wurde 1903 durch Poulsen eingeführt. Die Polarisierung mit hochfrequentem Wechselstrom kam etwa um 1927 auf.

Nach dieser Phase fließt das Band vor dem Schreibkopf durch (der etwa wie ein Bellsches Telephon in Empfangsfunktion arbeitet) und schafft auf dem Band nicht polarisierte Zonen, dessen Dichte in jedem Moment direkt proportional zur Amplitude der phonographischen Kurve des Schalls ist, der dem Schreibkopf in Form von elektrischen Schwingungen zugeleitet wurde.

Wird das Gerät zur Wiedergabe eingesetzt, werden die beiden genannten Köpfe ausgeschaltet, während der dritte Kopf, der Lesekopf, eine dem Mikrophon ähnliche Funktion übernimmt. Die Polarisationsdifferenzen des vor dem Kopf vorbei fließenden Tonbands wird in elektrische Schwingungen übersetzt, die dem aufgenommenen Schall entsprechen.

Im Laufe der technischen Entwicklung des Tonbandgeräts wurden die Bänder immer schmaler und die Geschwindigkeiten immer niedriger, so dass jedesmal mit weniger Bandmaterial ausgekommen werden konnte. Als in den Sechzigerjahren Philips die Audio-Kassette entwickelte, wurde das Grundrauschen bei den schmalen Bändern zum Problem. Der Amerikaner Ray Dolby entwickelte ein System, mit dem das Rauschen effektiv unterdrückt werden konnte. Das Dolby-System arbeitet folgendermassen: Bei der Aufnahme werden ausschliesslich die leisen Stellen des Schalls speziell verstärkt, während die lauten Stellen normal verstärkt werden. Beim Abspielen erkennt der Dolby-Decoder die bei der Aufnahme künstlich verstärkten Stellen und schwächt diese wieder auf die richtige Lautstärke ab. Da das Bandrauschen vor allem in den leisen Passagen störend vernommen werden, wird mit diesem System das Problem weitgehend behoben.

Bis vor kurzem war das Magnetband noch das von den Profis am meisten eingesetzte Medium, vor allem wegen der Möglichkeit, mit Schere und Klebeband Montagen auszuführen. Diese Möglichkeit bildet auch den Grundstein der ELEKTROAKUSTISCHEN MUSIK, die um 1945 aufkam. Andererseits können die Tonbänder auf verschie-

denen Spuren bespielt werden, deren Anzahl nur durch die Breite des Bandes und den verwendeten Aufnahmeapparat beschränkt ist.

Seit es Tonbandgeräte mit einer guten Wiedergabequalität gibt, werden die Platten nicht mehr direkt aufgenommen, sondern anhand einer Tonbandaufnahme, die oft aus einzelnen Abschnitten zusammengesetzt wird, wobei jedem Mikrofon eine einzelne Spur zugewiesen wird, was bei der Anfertigung der Wachsmatrize ermöglicht, jede Spur hinsichtlich Lautstärke und anderen Faktoren individuell zu korrigieren.

Schliesslich sei ein System erwähnt, das es ermöglicht, Tonaufnahmen auf photographischen Film vorzunehmen, das Lichttonverfahren. Das LICHTTONVERFAHREN erlaubt es, auf einer speziell dafür vorgesehenen Spur auf dem in der Filmindustrie üblichen 35 mm-Film Tonaufnahmen auf photographischem Wege festzuhalten. Dadurch wird eine perfekte Synchronisierung⁵⁰ des Tons und des Bilds erreicht.

Die verschiedenen Lichttonverfahren können in zwei Hauptgruppen unterteilt werden, je nach dem angewandten Aufnahmeverfahren: Die flächenvariablen und die dichtenvariablen Systeme. Bei der Wiedergabe sind die beiden Systeme weitgehend kompatibel.

Bei den flächenvariablen Verfahren werden die elektrischen Schwingungen, die den Schallwellen entsprechen einem optischen System zugeleitet, das den Film so belichtet, dass nach der Entwicklung ein (meist symmetrisches) schwarz-weisses Band mit variabler Breite entsteht. Die Grenzen zwischen der schwarzen und der weissen Zone entsprechen genau der phonographischen Kurve des aufgenommenen Schalls.

Bei den dichtenvariablen Verfahren wird eine Lichtquelle eingesetzt, die praktisch jeglicher Trägheit entbehrt und deren Helligkeit in jedem Augenblick der Amplitude der phonographischen Kurve des Schalls entspricht. Das Licht dieser Lichtquelle wird durch einen dünnen Spalt (quer zur Fortbewegungsrichtung des Films) auf das empfindliche Material geworfen. Der Film wird auf der ganzen Breite der Tonspur gleichmässig beleuchtet. Nach der Entwicklung entspricht die Dichte jedes Querstreifens dem entsprechenden Abschnitt der phonographischen Kurve, aber auch der Breite des Bandes einer entsprechenden flächenvariablen Lichttonspur.

⁵⁰ Die Verschiebung zwischen dem belichteten Bild und dem belichteten Lichttonstreifen in der Filmkamera, die gewöhnlich etwa 21 Bilder beträgt, muss bei der Projektion wieder kompensiert werden.

In Wirklichkeit existieren viele verschiedene Lichttonverfahren, die alle von den beiden hier beschriebenen Grundschemata abgeleitet sind. Es wurden sogar Systeme erprobt, welche die beiden Grundverfahren kombinieren. Für die Kenner der graphischen Techniken, erlaube ich mir hier, das flächenvariable Lichttonverfahren



Die hauptsächlichsten Lichttonsysteme

mit dem autotypischen Rotationstiefdruck und das dichtenvARIABLE Verfahren mit dem herkömmlichen Rotationstiefdruck zu vergleichen.

Das Wiedergabegerät projiziert die Tonspur durch einen schmalen Spalt auf eine photoelektrische Zelle mit möglichst

wenig Trägheit. Die Zelle lässt den elektrischen Strom im Takte des eintreffenden Lichts durch. Dieser Strom wird in einem elektronischen Verstärker bearbeitet und einem Lautsprecher zugeführt, der den aufgezeichneten Schall wiedergibt.

Es ist nur noch das Problem der ruckartigen Fortbewegung des Kinofilms vor dem Objektiv (sowohl bei der Aufnahme, wie bei der Wiedergabe) zu lösen. Um dieses Problem ein für allemal aus der Welt zu schaffen, hat die Filmindustrie eine Distanz von 21 Photogrammen zwischen dem Tonsystem und dem zu projizierenden Bild als Norm festgelegt.

Die frühen Versuche, Schallplatten mit Kinofilmen zu synchronisieren wurden durch die Entwicklung des Lichttonfilms obsolet.

Der berühmte Film von Disney aus dem Jahr 1940 "Fantasia" war der erste kommerzielle Film mit Stereoton. Zur Projektion mussten zwei synchron laufende Projektoren eingesetzt werden: Einer projizierte die Bilder, während der andere vom zweiten Filmstreifen die drei Lichttonspuren und eine Kontrollspur einlas. Der Film wurde übrigens im *Technicolor*-Verfahren hergestellt.

In den Fünfzigerjahren wurde der Lichtton in vielen Filmen durch Magnetton abgelöst, wobei ein schmales Tonband auf dem Filmmaterial angebracht wurde.

Schon bald einmal wurde der Filmtton digitalisiert. Eines der ersten Systeme war das 1990 von Eastman Kodak eingeführte CDS, bei dem der herkömmliche Lichttonstreifen durch Digitalcode ersetzt wurde. Das System arbeitete mit komprimierter 6-Kanal Dolby Rauschunterdrückung und lieferte eine hervorragende Tonqualität. Das System konnte sowohl auf 35- wie auf 70-mm-Film eingesetzt werden. Dass der kommerzielle Erfolg ausblieb ist vor allem zwei

Faktoren zu verdanken: Die Filme konnten nur in speziell eingerichteten Kinos projiziert werden, und für den Fall einer Panne war keine herkömmliche Tonspur vorgesehen.

1993 kam das DTS-System auf, bei dem zwischen der Lichttonspur und den Bildern eine schmale Spur (Time-Code-Spur) eingesetzt wird, mit der die Synchronisierung der Projektion mit dem Ton kontrolliert wird, wobei sich das Schallmaterial separat auf einer Audio-CD befindet. Die Time-Code-Spur sieht aus, wie ein Morse-Code. Auf die konventionelle Lichttonspur wird trotzdem nicht verzichtet, einerseits für den Fall einer Panne, andererseits für Kinos, die nicht auf DTS eingerichtet sind. Ein Vorteil des Systems besteht in der Leichtigkeit, mit der Versionen in verschiedenen Sprachen ausgetauscht werden können.

In Frankreich erschien bereits um 1991 das L.C. Concept von Pascal Chedeville, das ähnlich wie das CDS-System arbeitete. Der Misserfolg des Systems ist wohl darin zu suchen, dass es von den grossen multinationalen Firmen nicht unterstützt wurde.

1994 führte die Firma Dolby ihr Lichttonsystem ein, bei welchem der digitalisierte Schal in Form von Punktmustern zwischen der Perforation des Films angebracht wird. Die traditionelle Lichttonspur wird beibehalten.

In den Siebzigerjahren war eine spezielle Mehrkanaltechnik Mode geworden, bei der ein Kanal dem Infraschall unter 20 Hz vorbehalten war, das Sensurround. Dieser Infraschall wurde dann mit speziellen Lautsprechern verstärkt, so dass man die Vibrationen körperlich fühlen konnte, was besonders bei Erdbebenfilmen ein unheimliches Gefühl aufkommen lässt. Einzelne Gebäude sollen dabei beschädigt worden sein, was uns an die Trompeter von Jericho denken lässt.