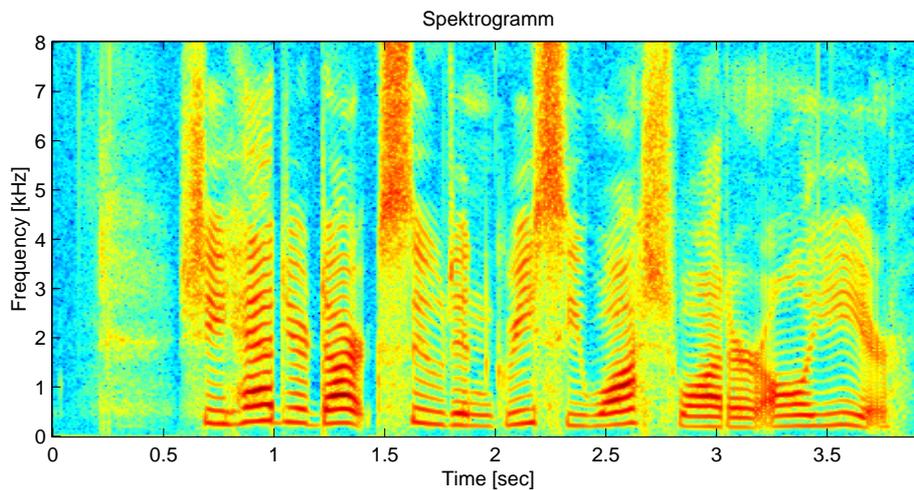


Übertragung von Sprache und Musik

-Unterrichtsmaterialien-



bearbeitet von

Dipl. Phys.
Stephan Wörmke

Technische Fakultät
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Lehrstuhl für Netzwerk- und Systemtheorie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Physik von Sprache und Musik	3
2.1	Was ist Schall?	3
2.2	Luftschall	4
2.3	Einteilung der Schallereignisse	5
2.4	Mechanische Schallquellen	5
2.4.1	Schwingende Saiten	6
2.4.2	Schwingende Luftsäulen	7
3	Klanganalyse von Musikinstrumenten	9
3.1	Das Zeitsignal	10
3.2	Die Lautstärke	11
3.3	Tonhöhe, Tonleitern	12
3.4	Klangfarbe	12
3.5	Die Biophysik des Gehörs	14
3.5.1	Die Cochlea - ein intelligentes Interface	14
3.5.2	Das Innenohr als Resonator	16
3.5.3	Das Innenohr als Wellenleiter	17
3.5.4	Passive Strukturbildung im Innenohr	17
3.6	Einteilung der Musikinstrumente	19
3.7	Klanganalyse an Beispielen	19
3.7.1	Die Flöte	20
3.7.2	Die Gitarre	22
3.7.3	Die Stimme	24
3.8	Das Programm overtone	24

4	Selbstbau eines Radios	27
4.1	Einleitung	27
4.2	Radiosender	28
4.2.1	Schaltplan des Senders	28
4.2.2	Funktion der Schaltung	28
4.2.3	Betriebsdaten der Schaltung	29
4.2.4	Aufbau der Schaltung	29
4.2.5	Tabelle der benötigten Bauteile	31
4.2.6	Zusätzliche Anmerkungen zur Schaltung	31
4.3	Radioempfänger	32
4.3.1	Empfang des Senders mit einem Weltempfänger	32
4.3.2	Empfang bei Amplitudenmodulation	32
4.3.3	Empfang bei Frequenzmodulation	34
4.4	Antenne	37
4.4.1	Antenne für Schallwellen	37
4.4.2	Antennen für elektromagnetische Wellen	38
5	Digitale Signalübertragung	41
5.1	Digitalisierung und Eigenschaften	41
5.1.1	Einleitung	41
5.1.2	Digitalisierung	42
5.1.3	Fragen/Aufgaben	44
5.1.4	Ergebnisse	45
5.2	Spektren und Filterung	47
5.2.1	Einleitung	47
5.2.2	„Digitaler“ Sinus	47
5.2.3	Kurzzeitspektren	48
5.2.4	Fragen/Aufgaben	49
5.2.5	Spektrogramme	49
5.2.6	Ergebnisse	50
5.3	Anwendungen	54
5.3.1	Einleitung	54
5.3.2	Modulation	54
5.3.3	Codierung	55
5.3.4	Geräuschreduktion	57
5.3.5	Psychoakustik	57

1. Einleitung

Die Verarbeitung und die Übertragung von Sprache und Musik spielen in vielen technischen Anwendungen eine große Rolle. Als herausragende Beispiele sind etwa die Compact Disc (CD) bzw. die Kompression von Musikdaten durch den MP3 Algorithmus oder die Übertragung von Sprache mit Mobilfunktelefonen bekannt. Alle diese technischen Innovationen sind das Ergebnis jahrelanger Forschung in den Grundlagen- und vor allen Dingen in den Ingenieurwissenschaften. Ein Ende dieser Entwicklung ist kaum abzusehen und die Forschung schreitet in einem rasanten Tempo weiter voran. Die Technische Fakultät (TF) an der Christian-Albrechts-Universität in Kiel hat regen Anteil daran. An ihren zahlreichen Lehrstühlen werden so unterschiedliche Themen wie die Erforschung neuer Materialien in der Materialwissenschaft oder die Entwicklung neuer Verfahren zur Sprachverarbeitung untersucht.

Es ist lange Tradition an der TF Wissenschaft nicht im oft zitierten Elfenbeinturm zu betreiben, sondern zu versuchen die eigene Arbeit in die Öffentlichkeit und dabei vor allen Dingen an die Schulen zu tragen. Aus diesem Grunde bietet die TF eine Vielzahl von Angeboten für Schülerinnen und Schüler aber auch für deren Lehrkräfte an.

Diese kleine Arbeit soll eine Anregung für die Gestaltung einer kurzen Unterrichtseinheit geben, die mit einem Besuch an der TF abschließt. Das Thema dieser Ausarbeitung ist die „*Übertragung von Sprache und Musik*“. Bei einem Besuch an der TF (z.B. im Rahmen eines Schulausflugs) besteht u.a. die Möglichkeit Schülerversuche mit den Schwerpunkten *Digitale Sprachverarbeitung* und *Bau eines Radios* durchzuführen. Im folgenden werden die Grundlagen zu diesen Versuchen gelegt und vorgeschlagen, wie diese in einer kurzen Unterrichtseinheit umgesetzt werden könnten. Ein möglicher Anknüpfungspunkt an den Schleswig-Holsteinischen Lehrplan des Faches Physik könnte die Behandlung von mechanischen Wellen in der Jahrgangsstufe 11 sein. In diesem Fall werden akustische Wellen als Spezialfall der Mechanik angesehen. Weitere Anknüpfungspunkte sind z.B. in der Jahrgangsstufe 12 während der Behandlung von elektromagnetischer Strahlung gegeben.

2. Physik von Sprache und Musik

In fast allen Bereichen der Physik begegnen wir dem Phänomen der Wellen. Licht kann als elektromagnetische Welle interpretiert werden, Erdbeben führen zu wellenhaften Bewegungen des Erdbodens und selbst die Quantenmechanik macht intensiv Gebrauch vom Begriff der Wellenfunktion. In allen diesen unterschiedlichen Bereichen finden wir charakteristische Eigenschaften der untersuchten Objekte wieder: Interferenz, Beugung, Brechung, Reflexion usw., die alle mit einem ähnlichen Formalismus beschrieben werden können.

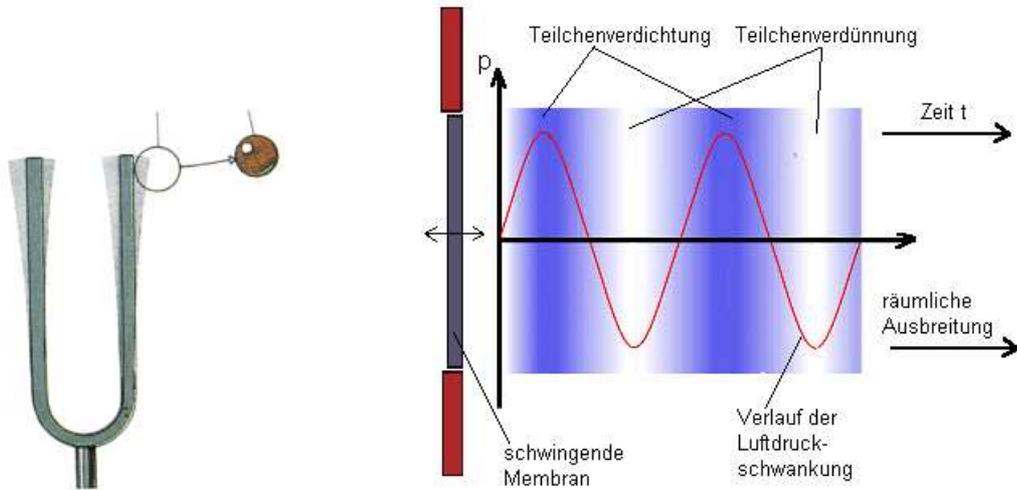
In diesem Kapitel soll am Beispiel von Schallwellen, die unserer Alltagserfahrung und damit dem Schulunterricht zugänglich sind, die so zentralen Eigenschaften von Wellen diskutiert werden, die auf so zahlreiche Gebiete der Physik und Technik zur Beschreibung der unterschiedlichsten Phänomene übertragen werden können.

2.1 Was ist Schall?

Physikalisch gesehen sind Schallwellen mechanische Schwingungen in einem elastischen Medium. Sie entstehen, wenn die kleinsten Materieeinheiten eines elastischen Stoffes, etwa dessen Moleküle, durch einen äußeren Einfluß aus ihren Gleichgewichtslagen gezwungen werden und sich dann ungestört weiter bewegen können. Aufgrund von inhärenten Elastitäts- und Trägheitskräften vollführen die Moleküle periodische Bewegungen um ihre ursprüngliche Ruhelage. Das Auftreten von Schall ist demnach an die Existenz von Materie gebunden und kann im Vakuum nicht auftreten. Es spielt dabei keine Rolle, ob das elastische Medium gasförmig, flüssig oder fest ist. Dementsprechend unterscheidet man den Luft-, Flüssigkeits- und Körperschall, wobei ersterer die der alltäglichen Erfahrung bekannteste Form des Schalls darstellt.

Die Lehre vom Schall wird Akustik genannt. Ihr Untersuchungsgegenstand sind die physikalischen Vorgänge, die z.B. im menschlichen Ohr einen Schall-

eindruck hervorrufen. Insbesondere beschäftigt sich die Akustik mit den Ursachen und der Ausbreitung von Schallwellen. Die in der Akustik untersuch-



(a) Anregung von Schallwellen.

(b) Fortlaufende Dichteschwankungen.

ten mechanischen Schwingungen sind auf einen relativ kleinen Frequenzbereich begrenzt, der im wesentlichen durch den Hörbereich des menschlichen Gehörs gegeben ist. Ein junger, normalhörender Mensch ist in der Lage Schallwellen zwischen 16 Hz bis 20 kHz wahrzunehmen, womit im wesentlichen der Frequenzbereich der Akustik definiert ist. Mit fortschreitendem Alter verschiebt sich die obere Hörschranke rasch zu kleineren Werten. Die den hörbaren akustischen Schallwellen sehr ähnlichen mechanischen Wellen unterhalb von 16 Hz bzw. oberhalb von 20 kHz werden ebenfalls zum Frequenzbereich der Akustik gezählt und Infraschall bzw. Ultraschall genannt.

2.2 Luftschall

Im folgenden soll dieser Spezialfall des Schalles zugrundegelegt sein. Luftschall entsteht durch Schwankungen der Luftdichte, die durch eine Schallquelle angeregt werden. In der Folge entstehen Über- und Unterdrücke, die sich sowohl örtlich wie auch zeitlich dem herrschenden Gleichgewichtsluftdruck anzupassen suchen.

Träger solcher Dichteschwankungen sind die Luftmoleküle. Durch eine Schallquelle werden Moleküle aus ihren Gleichgewichtspositionen gezwungen und stoßen mit ihren jeweiligen Nachbarn und schwingen dann um ihre jeweiligen Gleichgewichtspositionen. Die Nachbarmoleküle wiederum stoßen mit ihren Nachbarn usw. Auf diese Weise breitet sich durch das elastische Medium Luft eine Verdichtung bzw. Verdünnung von Molekülen aus, die wellenhaften Charakter hat: der Luftschall.

In charakteristischen Abständen entlang einer Schallwelle wiederholen sich in Ausbreitungsrichtung die einzelnen Erregungszustände. Bei konstanter

Anregungsfrequenz f der Schallquelle sind die Abstände durch die Wellenlänge λ gegeben:

$$c = f \cdot \lambda. \quad (2.1)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c ist von dem Medium abhängig in dem die Schallausbreitung stattfindet. Für Luft beträgt sie ca. 343m/s (bei $T=20^\circ\text{C}$). Diese Schallgeschwindigkeit bezieht sich ausschließlich auf die Fortbewegung der Schallwelle. Diese transportiert die Energie der Schwingung. Die einzelnen Luftmoleküle verbleiben an ihren Plätzen. Gemäß des Entstehungsmechanismus von Luftschallwellen breitet sich der Luftschall in Form von Longitudinalwellen aus.

2.3 Einteilung der Schallereignisse

Die vielfältigen Schallphänomene lassen sich in vier grundlegende sogenannte Schallereignisse einteilen: Töne, Klänge, Geräusche und Knalle.

- **Töne**
Ein Ton stellt das einfachste Schallereignis dar. Seine physikalische Ursache ist eine reine Sinusschwingung. Charakterisiert wird ein Ton durch die sogenannte Tonhöhe und Tonstärke, die weiter unten definiert werden.
- **Klang**
Als einen Klang bezeichnet man ein Gemisch aus verschiedenen Tönen deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Frequenz des tiefsten auftretenden Tons, des sogenannten Grundtons, sind. Die höherfrequenten Töne werden Obertöne genannt.
- **Geräusch**
Ein Gemisch zahlreicher Töne mit rasch wechselnden Frequenzen und Stärken bezeichnet man als Geräusch und ist die bei weitem häufigste akustische Erscheinung. Jedes Geräusch besitzt eine spezifische Charakteristik, an der es zu erkennen ist.
- **Knall**
Ein Knall wird durch eine kurzandauernde mechanische Schwingung großer Amplitude verursacht.

Die Quellen solcher Schallereignisse kann man primär in mechanische und elektrische Schallquellen einteilen, je nachdem ob vorwiegend mechanische oder elektrische Energie übertragen wird.

2.4 Mechanische Schallquellen

Mechanische Schallquellen werden je nach Art und Beschaffenheit der Gebilde, die zur Schallerzeugung führen, unterschieden. Man unterteilt sie typischerweise wie folgt:

- Saiten,
- Stäbe,
- Zungen,
- Membranen,
- Platten,
- Luftsäulen.

Insbesondere fallen unter diese Schallquellen Musikinstrumente und das menschliche Sprachorgan. Beide sind schwingende Systeme mit unendlich vielen Freiheitsgraden, d.h. sie können, zumindest theoretisch, in unendlich vielen Eigenschwingungen schwingen.

In Hinsicht auf die Untersuchung der Physik von Sprache und Musik sollen im folgenden nur die schwingenden Saiten und Luftsäulen untersucht werden.

2.4.1 Schwingende Saiten

Schwingende Saiten sind die Tongeber einer ganzen Reihe musikalischer Instrumente. Eine Einteilung dieser Instrumente kann z.B. durch die Art der Schwingungsanregung erfolgen. Streichinstrumente wie die Geige, das Cello oder der Kontrabaß werden durch Streichen mit einem Bogen zu Schwingungen angeregt. Bei Gitarre, Zither oder Harfe geschieht dies durch Zupfen oder Anreißen der Saiten, während bei Klavier und Flügel Hammer diese Aufgabe übernehmen.

In der Regel ist die Schallabstrahlung durch eine Saite selbst gering. Die durch die Schwingung verursachten Druckunterschiede zwischen den entgegengesetzten Seiten einer schwingenden Saite gleichen sich schnell aus. Einen brauchbaren Klang erhält man dann durch Kopplung mit einem geeigneten akustischen Resonator.

Eine Saite der Länge l kann zu transversalen Schwingungen verschiedener Frequenzen f angeregt werden. Dabei sind nur ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz f_0 möglich, der sogenannten Eigenfrequenz. Der entsprechende Schwingungsmodus wird Grundschwingung genannt. Die Eigenfrequenzen höherer Ordnung entsprechen den Oberschwingungen. Grund- und Oberschwingungen bezeichnet man häufig auch als Harmonische.

Die Eigenfrequenzen f_n einer Saite hängen neben der Länge l auch von der Dichte ρ des Saitenmaterials und von der Zugspannung ab mit der sie gespannt ist. Letztere ergibt sich als Quotient aus der Spannkraft F und dem Saitenquerschnitt S :

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho S}} = \frac{2}{nl} c_s, \quad (2.2)$$

wobei c_s der Schallgeschwindigkeit entspricht. Mit n ist die Ordnungszahl der Schwingung bezeichnet:

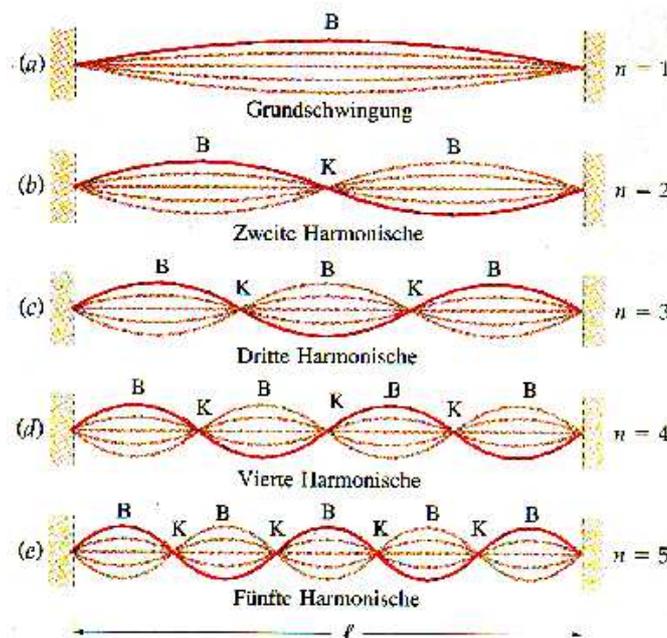


Abbildung 2.1: Grundschwingung und Oberschwingungen einer gespannten Saite.

- **Grundschwingung**
Frequenz $f_0 = 1$. Harmonische
- **1. Oberschwingung**
Frequenz $f_1 = 2$. Harmonische
- **2. Oberschwingung**
Frequenz $f_2 = 3$. Harmonische
usw.

2.4.2 Schwingende Luftsäulen

Auch Luftsäulen, die sich z.B. in einem Rohr befinden, lassen sich zu einer harmonischen Folge von Schwingungen anregen, wobei stehende Wellen entstehen. Neben der Rohrlänge l ist zudem von entscheidender Bedeutung, ob das entsprechende Rohr in dem sich die schwingende Luft befindet einseitig oder beidseitig offen bzw. ganz geschlossen ist. Einseitig offene Rohre bezeichnet man auch als gedackte Pfeifen, beidseitig offene als offene Pfeifen.

2.4.2.1 Einseitig offene Rohre

In einem einseitig geschlossenen Rohr kann sich eine unendliche Folge von Eigenschwingungen ausbilden. Ihre Frequenzen werden im wesentlichen durch die Rohrlänge l bestimmt, die gerade einer Viertelwellenlänge $\lambda/4$ entspricht. Die Oberschwingungen ergeben sich als ungeradzahlige Vielfache der Grundschwingung. Die Eigenfrequenzen ergeben sich also aus

$$f_n = \frac{2n - 1}{4l} c_s. \quad (2.3)$$

Bei genauerer Betrachtung muß die Rohrlänge l durch einen Faktor a ergänzt werden. Dies liegt daran, daß die Druckknoten nicht exakt in der Mündungsebene liegen, sondern etwas außerhalb des Rohres. Demnach gilt für die Grundschwingung:

$$\frac{\lambda_0}{4} = l + a \quad \text{bzw.} \quad a = \frac{\lambda_0}{4} - l. \quad (2.4)$$

Die Oberschwingungen ergeben sich wiederum aus den ungeradzahligem Vielfachen der Wellenlänge bzw. Frequenz der Grundschwingung.

2.4.2.2 Beidseitig offene und geschlossene Rohre

Wie im Fall einseitig geschlossener Rohre können sich auch in diesem Fall unendlich viele Eigenschwingungen ausbilden. Jetzt entspricht jedoch der Rohrlänge eine halbe Wellenlänge der Grundschwingung. Die Wellenlängen der Schwingungen höherer Ordnung ergeben sich als ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung. Es gilt also

$$f_n = \frac{n}{2l} c_s. \quad (2.5)$$

Beim beidseitig offenen Rohr ist wieder eine Korrektur der Druckknoten zu berücksichtigen. Mit Hilfe der doppelten Mündungsstrecke a ergibt sich somit

$$\frac{\lambda_0}{2} = l + 2a \quad \text{bzw.} \quad a = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_0}{2} - l \right). \quad (2.6)$$

Schwingende Luftsäulen spielen in der Musik eine ebenso große Rolle wie die schwingenden Saiten. Man findet sie in verschiedenen Ausführungen in einer Vielzahl von Musikinstrumenten wieder. Die Schwingungsanregung erfolgt z.B. durch schwingende Zungen (Orgel mit Zungenpfeifen, Klarinette, Oboe) oder durch periodische Wirbelablösung in einem Luftstrom, der gegen eine Scheide geblasen wird (Orgel mit Lippenpfeifen, Flöte). Bei den Blechblasinstrumenten wie der Trompete und Posaune entsteht der Ton zunächst durch schwingende Lippen und wird durch ein Mundstück verstärkt, das im wesentlichen wie ein Helmholtzresonator wirkt. Die so entstandene tönende Luftsäule wird dann durch den Instrumentenkörper (das Horn) weiter verstärkt.

3. Klanganalyse von Musikinstrumenten

Sprache und Musik stellen ein höchst komplexes Schallphänomen dar und es stellt sich die Frage, wie z.B. das Zusammenspiel eines Orchesters sinnvoll mit physikalischen Methoden erfaßt werden kann. Neben der rein physikalischen Komplexität kommt erschwerend hinzu, daß in hohem Maße auch menschliche Eindrücke und Gefühle unsere Empfindung von Sprache und Musik beeinflussen. Für eine umfassende Untersuchung sind daher auch die folgenden Faktoren von Bedeutung:

- die Partitur und der Komponist,
- die Musikinstrumente und die Musiker,
- die Architektur und die Besetzung des Raumes,
- der Hörvorgang und die Psychologie des Zuhörers.

Obwohl viele nicht-physikalische Faktoren eine wesentliche Rolle spielen, hat die physikalische und technische Forschung auf dem Gebiet der Akustik zu einer Reihe von Erkenntnissen geführt, die in zahlreichen Anwendungen umgesetzt werden konnten:

- Speicherung, Übermittlung und Wiedergabe von Musik und Sprache,
- automatische Spracherkennung und Sprachsynthese,
- elektronische Musikinstrumente,
- Therapie des menschlichen Gehörs (z.B. Entwicklung von Hörgeräten),
- Bauphysik, insbesondere Bau von Konzertsälen etc.

Diese Liste könnte man problemlos fortführen und viele der darin enthaltenen Punkte sind auch heute noch Gegenstand wissenschaftlicher Forschung.

Eine besondere Stärke naturwissenschaftlicher Forschung ist es, den Gegenstand des Interesses soweit zu vereinfachen und zu idealisieren, daß die Grundprinzipien herausgearbeitet werden und ein Modell entwickelt werden kann, das wiederum in der Lage ist Vorhersagen über eine Vielzahl von Aspekten zu treffen. Was also sind die grundlegenden Größen und Vorgänge, die dem so komplizierten Phänomen von Sprache und Musik zugrundeliegen und für deren Charakterisierung hilfreich sein können?

3.1 Das Zeitsignal

Im vorigen Kapitel wurde festgestellt, daß sich Schall wellenartig als fortlaufende Störung der lokalen Dichte von Luft ausbreitet. Für solche Phänomene bietet es sich an, ihren zeitlichen Ablauf zu beschreiben. Musik etwa wird in Form eines Klangs von einem Klangerzeuger, dem Musikinstrument, produziert. Die Luft dient als Transportmedium zum menschlichen Ohr, wo es im wesentlichen empfangen und vom Gehirn empfunden wird. Das Ohr stellt eine wichtige Schnittstelle dar und wird für die weitere Argumentation weiter unten noch eine Rolle spielen. An dieser Stelle sei nur auf die Rolle des Trommelfells verwiesen, das durch die Schallwellen zu einer Bewegung angeregt wird. Das Schlagen des Hammers läßt sich wiederum als zeitlicher Prozeß verfolgen. Ersetzt man in Gedanken die Membran des Trommelfells durch ein Mikrophon, so läßt sich die Bewegung des Hammers direkt in eine Spannung $U = U(t)$ umwandeln, die sich leicht weiter verarbeiten läßt. Dieses Zeitsignal ist eine äquivalente Beschreibung des Schallphänomens: sorgt man dafür, daß z.B. mit technischen Hilfsmitteln wie etwa einem Kopfhörer das Trommelfell dasselbe zeitliche Verhalten erzeugt, so ist unsere Empfindung des Schallereignisses weitestgehend identisch.

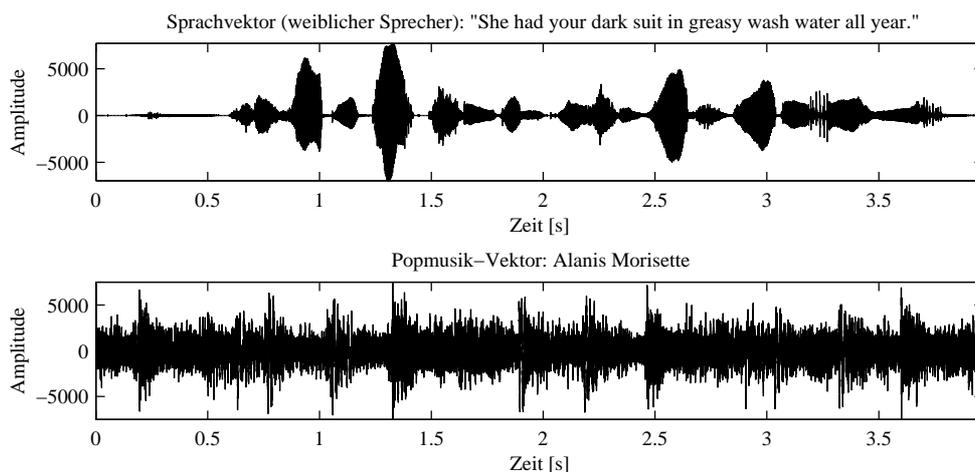


Abbildung 3.1: Beispiele für je einen digitalen Sprach- und Musikvektor.

Das Zeitsignal $U(t)$ kann, wie schon angedeutet, auf komplizierte Weise von der Zeit abhängen (vgl. Abb. 3.1). Im Falle eines Tons ist die Situation einfach,

denn das Signal läßt sich einfach durch eine Sinusfunktion beschreiben. Doch Einzeltöne treten in der Musik wie auch in der Sprache so gut wie nie auf, so daß die üblichen Zeitsignale Klänge oder Geräusche sind. Eine geeignete graphische Darstellung ist in Abb. 3.1 gezeigt. Man nennt diese Ausschnitte Sprach- und Musikvektoren. Zeitsignale sind Funktionen einer Variablen und aufgrund ihrer vielseitigen Anwendbarkeit (Erzeugung, Speicherung, Übertragung, Digitalisierung von Signalen) hat sich eine ganze Teildisziplin der physikalischen Mathematik gebildet: die Signaltheorie.

Im weiteren wird sich zeigen, daß man mit Hilfe des Fourierformalismus komplizierte akustische Zeitsignale aus einfachen Spezialfällen synthetisieren kann. Eine wichtige Rolle spielen dabei die periodischen Signale f , also Signale, die sich jeweils nach einer Periodendauer T wiederholen:

$$f(t) = f(t + T). \quad (3.1)$$

Zwei besonders einfache Beispiele sind die Sinus- und Sägezahnfunktion (Abb. 3.2). Ein sinusförmiges Zeitsignal ist durch die Größen Amplitude A , Fre-

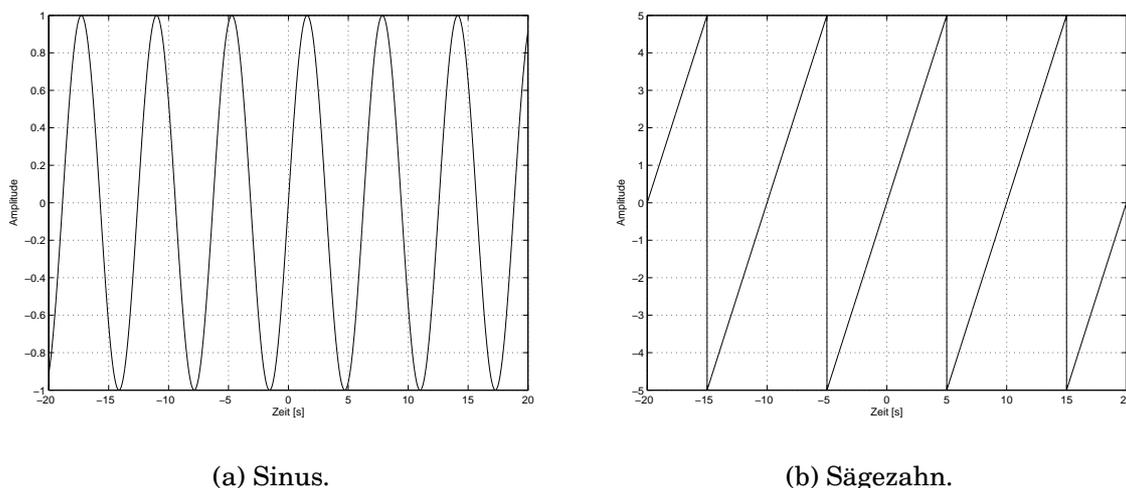


Abbildung 3.2: Einfache periodische Funktionen.
the whole figure

quenz f ($=1/T$ bzw. Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$) und die Phase ϕ definiert:

$$U(t) = A \cdot \sin(\omega t - \phi). \quad (3.2)$$

In Bezug auf die Akustik zeigt sich, daß die Amplitude die Lautstärke, die Frequenz die Tonhöhe und die Signalform die sogenannte Klangfarbe beeinflussen. So klingt ein reiner Sinuston einer bestimmten Frequenz und Amplitude genauso wie ein Sägezahn derselben Parameter.

3.2 Die Lautstärke

Ein akustisches Zeitsignal kann als Luftdruckschwankung $p(t)$ aufgefaßt werden. Bekanntlich ist Druck definiert als Kraft pro Fläche. Betrachtet man

die Energie pro Fläche, die Schallintensität J , so findet man, daß sie proportional zum Quadrat des Effektivwertes p_{eff} des Schalldruckes, i.e. der über $0.1, \dots, 1$ s gemittelte Druck. Das menschliche Hörvermögen ist sehr empfindlich. Im Durchschnitt sind wir in der Lage Schallintensitäten von $J_0=10^{-12}$ W/m² noch wahrzunehmen. Gemäß des Weber-Fechnerschen Gesetzes ist das menschliche Hörempfinden logarithmisch. Man definiert daher eine weitere Größe, die diesem Umstand Rechnung trägt. Der Schallpegel L wird in der Einheit Dezibel (dB) gemessen und ist definiert durch

$$L = 10 \log \left(\frac{J}{J_0} \right). \quad (3.3)$$

0 dB definiert die Hörschwelle, während 120 dB die Schmerzgrenze des menschlichen Gehörs darstellt. Zwischen diesen beiden Marken liegen 12 „hörbare“ Größenordnungen! Das menschliche Hörvermögen ändert sich mit dem Alter. Reine Sinustöne können je nach Zustand und Alter des Gehörs zwischen 16 Hz und 20 kHz wahrgenommen werden.

Das menschliche Hörvermögen ist zudem von der spektralen Zusammensetzung des Schalls abhängig. Aufgrund dieses subjektiven Hörempfindens definiert man eine weitere Größe, die diesem Umstand Rechnung trägt - die Lautstärke. Sie wird auf einen subjektiven Vergleich mit einem kalibrierten Bezugs- oder Normschall zurückgeführt. Die Einheit der Lautstärke ist das Phon. Unter der Angabe 80 Phon versteht man beispielsweise einen Schall beliebiger Frequenz, der genau so laut empfunden wird wie ein 1kHz-Sinuston mit einem Schalldruckpegel von 80 dB.

3.3 Tonhöhe, Tonleitern

Für den Klang eines Musikinstrumentes ist die Tonhöhe von Bedeutung. In der Regel ist das Zeitsignal periodisch, zumindest innerhalb einer gewissen Zeit, so daß man aus dem Inversen der Periodendauer T eine Grundfrequenz f_0 ableiten kann, die wiederum der empfundenen Tonhöhe proportional ist.

Eine Verdoppelung der Grundfrequenz führt zu einem ähnlichen Klangmuster. Einen solchen „Zweiton“ nennt man in der Musik ein Intervall, in diesem Spezialfall eine Oktave. Diese spielt in der Beschreibung des musikalischen Empfindens eine besondere Rolle. Für einen Höreindruck sind weder die absoluten Frequenzen, noch Frequenzdifferenzen ausschlaggebend, sondern Verhältnisse von Frequenzen. Die Tonhöhe wird in der Regel auf die Oktave bezogen und definiert die verschiedenen Tonleitern bzw. die Stimmungen. An dieser Stelle ergibt sich ein interessantes Feld für den Mathematikunterricht, soll hier aber nicht näher diskutiert werden.

3.4 Klangfarbe

Es wurde mittlerweile mehrfach darauf hingewiesen, daß es sich bei Sprache und Musik um Schallphänomene handelt, die nicht aus jeweils einem einzigen Ton bestehen, sondern vielmehr aus vielen verschiedenen periodischen oder auch nicht-periodischen Schallwellen. Man kann sich Schall als

Superposition einer Zahl von Schwingungen vorstellen, die gewissermaßen den Schall aufbauen. Man spricht auch von Klangsynthese. Zerlegt man umgekehrt einen Schall in eben diese Einzelkomponenten, so spricht man von Klanganalyse.

Es gibt zahlreiche mathematische Verfahren, die man benutzen kann, um eine gegebene Signalfunktion aus Teilfunktionen aufzubauen. Die bekannteste ist sicherlich die Fouriertheorie. Grob gesprochen behauptet das Fouriertheorem, daß jede periodische nicht-sinusförmige Schwingung $U(t)$ als Überlagerung oder Superposition einer im allgemeinen unendlichen Zahl sinusförmiger Teilschwingungen geschrieben werden kann:

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t). \quad (3.4)$$

Dabei entsprechen U_0 der Amplitude der Schwingung; die sogenannten Fourierkoeffizienten a_n und b_n werden weiter unten über die Fourierintegrale definiert. Zu beachten ist, daß in der Fourierreihe nur ganzzahlige Vielfache der Kreisfrequenz ω_0 vorkommen: $n = 1, 2, 3, \dots$. Man spricht auch von einer Zerlegung in Grundton ($n=1$) und Obertöne ($n=2, 3, \dots$).

Eine periodische Funktion $U(t)$ wie etwa ein akustisches Zeitsignal läßt sich also gemäß des Fouriertheorems als Summe von Sinus- und Kosinusfunktionen darstellen. Der umgekehrte Fall ist jedoch bei dem Versuch einer Charakterisierung von Sprache und Musik der Fall. Es liegt ein Zeitsignal $U(t)$ vor und man interessiert sich dafür wie man die Amplituden und Fourierkoeffizienten wählen muß, um das Signal in guter Näherung wiedergeben zu können. Genau dies wird durch die Fourieranalyse ermöglicht. Mit Hilfe der Transformationen

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \quad (3.5)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (3.6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (3.7)$$

erhält man die gesuchten Größen und kann $U(t)$ in seiner Reihendarstellung angeben. Für eine Untersuchung der akustischen Eigenschaften z.B. von Musikinstrumenten ist dies ein geeignetes Verfahren. Trägt man die Amplituden etwa gegen die Frequenz auf (das sogenannte Spektrum), so ist sofort ersichtlich, welche Obertöne für den Klang des Instrumentes eine Rolle spielen (vg. Abb. 3.3). Die Fourieranalyse im Physik- oder Mathematikunterricht einzuführen, stellt sicherlich eine große Herausforderung dar. Das menschliche Gehör bietet jedoch eine interessante Möglichkeit, den Formalismus geeignet mit der Erfahrung zu motivieren. Das Gehör ist aufgrund seines physiologischen Aufbaus im Bereich des Innenohrs in der Lage eine Art von Fouriertransformation von akustischen Zeitsignalen durchzuführen.

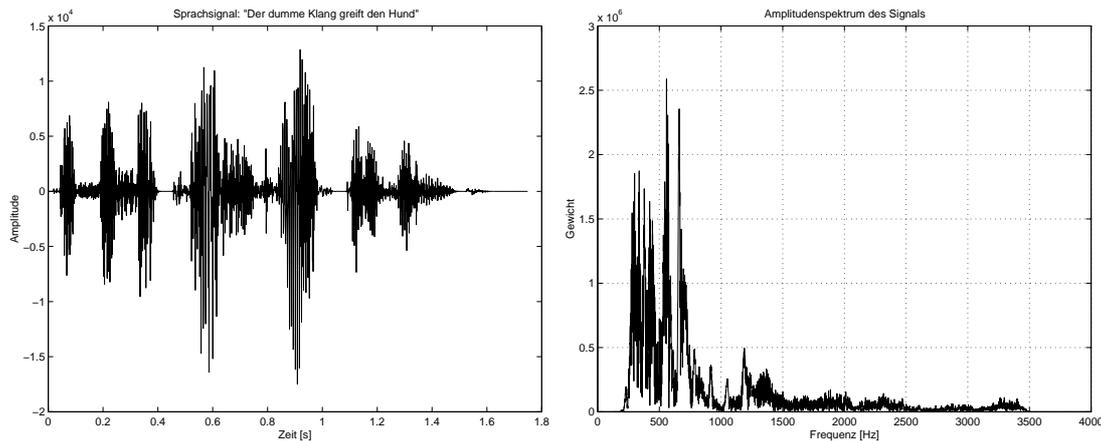


Abbildung 3.3: Sprachsignal im Zeitbereich (links) und Darstellung der in ihm enthaltenen Frequenzanteile im Spektrum (rechts).

3.5 Die Biophysik des Gehörs

Die Biophysik des Gehörs ist ein komplexes Gebiet der Physik und eine umfassende Darstellung ist im Rahmen dieser kleinen Arbeit nicht möglich. Dennoch bietet dieses Thema auch im „Kleinen“ eine interessante Möglichkeit einen Formalismus wie den der Fouriertheorie zu motivieren. Eine detaillierte Zusammenfassung der biophysikalischen Prozesse während des Hörvorganges gibt M. Euler in einer Reihe von Artikel, die in Auszügen im folgenden zitiert werden (M. Euler: Biophysik des Gehörs, Teil I und II, *Biologie in unserer Zeit*, 27 (1996), 163-172 und 304-312; M. Euler: Hörexperimente: Nichtlineare Dynamik auf materieller und mentaler Ebene, *Biologie in unserer Zeit*, 27 (1996), 313-322).

3.5.1 Die Cochlea - ein intelligentes Interface

„Die Schnittstelle zwischen außen und innen, zwischen den akustischen Signalen und dem neuronalen System, liegt in der Cochlea, dem schneckenartigen Hörorgan des Innenohrs. Dort findet die Umsetzung von Schall in Nervenimpulse statt. Dies ist jedoch nicht die einzige Funktion der Cochlea: Der Wandlung geht bereits eine schnelle mechanische Vorverarbeitung voraus. Der sequentielle Strom der akustischen Signale wird in vielen parallelen, langsameren Kanälen neuronal weiterverarbeitet. Im Innenohr befindet sich eine schwingungsfähige Struktur, die Basilarmembran. Deren Schwingungsmuster wird von mechanisch empfindlichen Sinneszellen abgetastet. Die Membran ist mechanisch so gestaltet, daß eine Zerlegung von Schallsignalen in ihre Frequenzbestandteile stattfindet (Frequenzanalyse). Abbildung 3.4 stellt ein stark vereinfachtes Schema dar, das die schneckenartige Cochlea aus Gründen der Übersicht entrollt zeigt. Die Parallelisierung ist vor allem deswegen notwendig, da sich die höherfrequenten Signale ($>1\text{kHz}$) viel zu schnell ändern, um noch vom Nervensystem direkt übertragen und verarbeitet werden zu können.

Die Cochlea besteht aus drei mit Flüssigkeit gefüllten Kanälen. Abbildung 3.5 zeigt einen Querschnitt. Der mittlere Kanal (Scala media) enthält Endo-

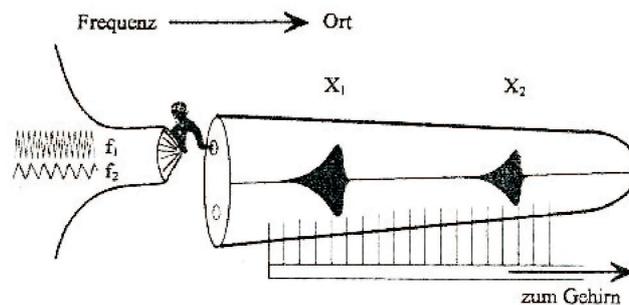


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der Basilarmembran in der ausgerollten Innenohrschnecke sowie der Signalanalyse via Frequenz-Orts-Transformation. Der Energiestrom des Schallsignals wird über Wanderwellen zum Ort maximaler Auslenkung transportiert. Besteht das ankommende Signal aus der Überlagerung zweier Töne verschiedener Frequenz, so entstehen an verschiedenen Orten Schwingungsmaxima, die von mechanisch empfindlichen Sinneszellen abgetastet werden.

lymphe, die reich an Kaliumionen ist, während die beiden anderen (Scala vestibuli oder S. tympani) mit Perilymphe gefüllt sind, eine an Natriumionen reiche Flüssigkeit. Die für die Schallverarbeitung in der Cochlea maßgebende Basilarmembran trennt die Scala media von der Scala tympani. Schallwellen der Luft werden über Außenohr, Trommelfell und Gehörknöchelchenkette in die Cochlea eingekoppelt. Die Steigbügelbewegung ruft Kompressionswellen der Lymphe hervor, die ihrerseits die Basilarmembran zum Mitschwingen anregen.

Das Schwingungsmuster der Basilarmembran wird über die gesamte Länge von mechanischen Rezeptorzellen (Haarzellen) abgetastet. Sie befinden sich im Cortischen Organ (Abbildung 3.5), das sich auf der Basilarmembran befindet. Der Transduktionsprozeß, die Übertragung von mechanischen in elektrochemische Signale, findet in den Spitzen der feinen härchenartigen Fortsätze (Stereocilien) der Haarzellen statt. Jede Haarzelle enthält ein Bündel solcher Härchenfortsätze. Über dem Corti-Organ befindet sich die Deckmembran. Sie ist an der inneren Spirale der Schnecke befestigt und hat festen mechanischen Kontakt mit den Härchenbündeln der äußeren Haarzellen. Anders als es die schematische Abbildung 3.4 suggerieren könnte, erfolgt von außen keine mechanische Abtastung, sondern die Bewegung der Basilarmembran werden über die Mikromechanik des daran angekoppelten Systems aus Corti-Organ, Härchenbündel und Deckmembran detektiert. Eine Aufwärtsbewegung der Basilarmembran löst eine Scherbewegung zwischen Corti-Organ und Deckmembran aus, welche die dazwischenliegenden Härchenbündel verbiegt.

Die Verbiegung ist das eigentliche mechanische Eingangssignal zum neuronalen System. Es ruft Ionenströme in den Härchen und eine Depolarisierung des Membranpotentials der Haarzelle hervor. Dieses elektrochemische Signal wird dann über Transmitterstoffe an den Hörnerv weitergegeben, der die Information in Form von Aktionspotentialen codiert und schließlich über die Hörbahn zur Großhirnrinde weiterleitet.

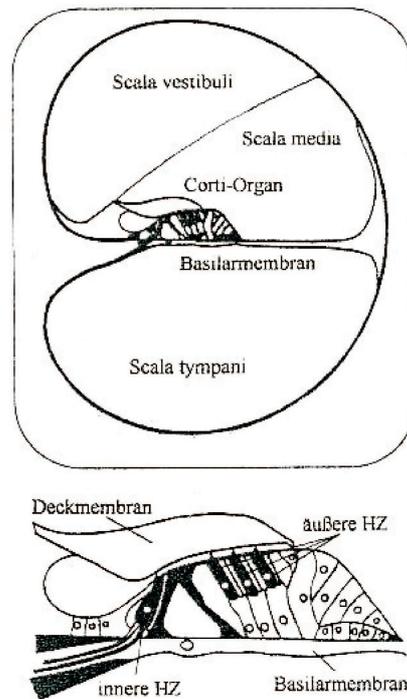


Abbildung 3.5: Querschnitt durch eine Windung der Innenohrschnecke, Cochlea (oben), sowie des Corti-Organ (unten). Hz-Haarzellen

Es gibt zwei Gruppen von Haarzellen:

- eine Reihe von inneren Haarzellen sowie
- drei Reihen äußerer Haarzellen.

Die eigentliche Umsetzung in Nervenimpulse findet in den inneren Haarzellen statt. Sie sind afferent innerviert und übertragen Nervenimpulse zum Gehirn. Die äußeren Haarzellen sind dagegen efferent innerviert und tragen nicht unmittelbar zur Wandlung in neuronale Impulse bei. Sie besitzen neben ihrer passiven sensorischen auch eine aktive mechanische Funktion, die ganz wesentlich die Arbeitsweise des Innenohrs bei niedrigen Schallpegeln beeinflusst. Soviel in aller Knappheit zum komplexen Aufbau des peripheren Hörorgans. Welche biophysikalischen Prinzipien führen nun im Zusammenwirken dieser Teile zu der herausragenden Empfindlichkeit des Gehörs?

3.5.2 Das Innenohr als Resonator

Modelle zur Innenohrfunktion sollten in der Lage sein, die erwähnten Leistungen des Gehörs zu deuten. Historisch lassen sich grob drei Abschnitte der Modellbildung unterscheiden. Ära 1 ist mit dem Namen Helmholtz verknüpft, der als erster eine umfassende Hörtheorie vorschlug, die auf dem Resonanzkonzept basiert. Danach wird die Basilarmembran als ein schwingungsfähiges Gebilde aufgefaßt, dessen einzelne Abschnitte auf unterschiedliche Schwingungsfrequenzen abgestimmt sind. Stimmt die Antriebsfrequenz

am Steigbügel mit der jeweiligen Eigenfrequenz überein, so schwingt ein begrenzter Abschnitt mit. Auf einem solchen Resonanzeffekt beruht beispielsweise das Mitschwingen der a-Saite eines Klaviers, wenn man genau den Ton „a“ hineinsingt und die Dämpfung der Saiten weggenommen hat.

Die Grundidee dieser frühen Resonanztheorie ist in den folgenden Modellen erhalten geblieben: Eine bestimmte akustische Anregungsfrequenz ist mit einem Ort maximaler Schwingungsamplitude auf der Basilarmembran gekoppelt. Man spricht von einer Frequenz-Orts-Abbildung. Sie ist allerdings nur einer der beiden Kanäle, aus denen das akustische System seine Tonhöheninformation bezieht. Der zweite Zugang besteht bei Frequenzen etwa unterhalb einem Kilohertz in einer zeitlichen Analyse der Basilarmembran-Muster durch das Nervensystem (Periodizitätsanalyse).

3.5.3 Das Innenohr als Wellenleiter

Gegen die einfache Resonanztheorie spricht, daß die Basilarmembran nicht aus isoliert schwingenden diskreten Abschnitten besteht, sondern daß auch in Längsrichtung Kopplungskräfte wirken. Ihr Schwingungsverhalten entspricht dem einer schmalen elastischen Platte. Im Zusammenspiel der elastischen Rückstellkräfte der Membran mit der Trägheit der umgebenden mitbewegten Flüssigkeit kommt es zur Wellenausbreitung entlang der Membran. Hier setzt die zweite Ära der Modellbildung an, die mit dem Namen Békésy verknüpft ist. Seine Wanderwellentheorie hat die alte Resonanztheorie abgelöst.

Überträgt der Steigbügel einen Druckpuls auf die Innenohrflüssigkeit, dann löst die Druckdifferenz zwischen Scala tympani und Scala media eine wellenförmige Erregung der Basilarmembran aus, die von der Schneckenbasis zur Schnecken Spitze läuft. Es handelt sich dabei um Grenzflächenwellen zwischen der Innenohrflüssigkeit und der elastischen Basilarmembran. Sie zeigen ähnliche Eigenschaften wie Oberflächenwellen, die ein ins Wasser geworfener Stein auslöst. Gegenüber Kompressionswellen im Flüssigkeitsvolumen besitzen Grenzflächenwellen eine stark verminderte Geschwindigkeit. Die Wanderwellengeschwindigkeit wird bis auf einige 10m/s herabgesetzt und liegt damit in der gleichen Größenordnung wie die Nervenleitungsgeschwindigkeit. Der Wanderwellenprozeß ist sowohl unter Aspekten des Energiestroms wie auch des Informationsstroms optimal. Er ermöglicht nicht nur einen weitgehend verlustfreien Transport von Schwingungsenergie zu den Sinneszellen, sondern auch eine Anpassung der Geschwindigkeit der mechanischen Musterbildung im Innenohr an die Musterverarbeitung des neuronalen Systems, was beispielsweise für die Verarbeitung von Signalen durch beide Ohren (binaurale Verarbeitung) und die Lokalisation von Schallquellen unbedingt notwendig ist.

3.5.4 Passive Strukturbildung im Innenohr

Die Wanderwellenausbreitung bewirkt ebenfalls eine Frequenz-Orts-Abbildung. Dafür sorgen die speziellen mechanischen Eigenschaften der Basilarmembran. Ihre Breite nimmt von der Schneckenbasis zur Spitze hin zu, wodurch mehr Flüssigkeit bewegt wird. Die effektive Trägheit des Ausbreitungsmediums wird so mit wachsendem Abstand von der Basis größer, während

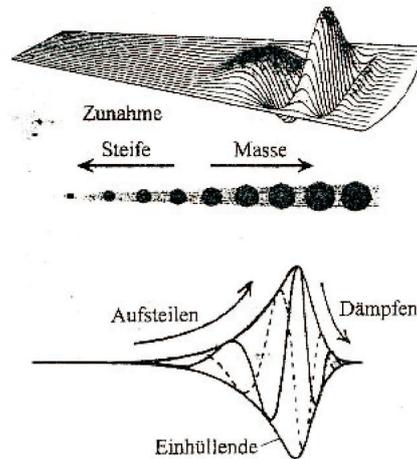


Abbildung 3.6: Entstehung von Wanderwellen auf der Basilarmembran. Die zur Schneckenspitze hin breiter und schlaffer werdende Basilarmembran verhält sich wie eine elastische Feder, deren Steifigkeit bei zunehmender Masse abnimmt. Infolgedessen vermindert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit ortsabhängig. Es kommt zu einer Verkürzung der Wellenlänge und zu einem Amplitudenanstieg. Das Zusammenwirken von Aufsteilung und Dämpfung der laufenden Welle führt zur Ausbildung eines Maximums in der Einhüllenden des Wellenmusters.

in gegenläufiger Tendenz die Steifigkeit und damit die elastischen Rückstellkräfte kleiner werden (Abbildung 3.6). Die Basilarmembran verhält sich wie eine Schraubenfeder, deren Masse ortsabhängig zunimmt bei schlaffer werdenden Federkräften. Infolgedessen laufen Wellen im basalen Teil schnell und verlangsamen sich stetig zur Schneckenspitze hin, wo die Membran nachgiebiger wird. Durch die Verlangsamung der Wellenausbreitung kommt es zu einer Verkürzung der Wellenlänge, verbunden mit einem Anstieg der Amplitude. Dieses Aufsteilen der Welle hat energetische Ursachen. Der Energiegehalt eines Wellenbergs wird wegen der abnehmenden Wellenlänge auf einem immer kleineren Raum konzentriert. Wenn die Energie erhalten bleibt, muß es zu einem Anstieg der Amplitude kommen. Ein vergleichbares Aufsteigungsphänomen zeigen Brandungswellen, die gegen den Strand anlaufen und dabei ebenfalls langsamer werden. Dem Amplitudenanstieg wirkt die Schwingungsdämpfung durch die allgegenwärtige Reibung entgegen. Beide Effekte, Aufsteilen und Abklingen der Welle, bewirken, daß die Einhüllende des von einer bestimmten Frequenz erregten Wanderwellenmusters ein Maximum ausbildet, dessen Lage bei abnehmender Frequenz sich in die Schnecke hinein verschiebt. Hohe Frequenzen werden so auf den basalen Teil der Schnecke abgebildet, tiefe Frequenzen erregen den Bereich der Schneckenspitze am stärksten. Die Basilarmembran wirkt wie ein Wellenleiter, der Signale je nach ihrer Frequenz „auseinanderzieht“ (Dispersionseffekt) und die Schallenergie zu einem Ort maximaler Erregung transportiert. In ihrer physikalischen Essenz beschreibt die Wanderwellentheorie eine passive Musterbildung abhängig vom Frequenzspektrum der akustischen Signale, beruhend auf dem Zusammenspiel von Dispersion (ortsabhängige Geschwindig-

keit) und Dissipation (Energieabgabe durch Reibung). Grob vereinfacht wirkt im Resonanz- wie im Wanderwellenmodell die Basilarmembran ebenso passiv wie die schwingungsempfindliche Membran eines Mikrophons: Sie wird durch den Schall angetrieben und so ins Mitschwingen gebracht. Als Modell des Hörvorgangs hat das passive Mitschwingbild einen Schönheitsfehler: Wir hören sozusagen besser als die passive Theorie erlaubt. Durch ihre Einbettung in die umgebende Flüssigkeit ist die Basilarmembran gedämpft. Man weiß aus der Schwingungsphysik, daß ein schwingungsfähiges System um so selektiver auf eine Frequenz anspricht, je weniger gedämpft es ist. Nur wenn man wie im obigen Beispiel das Klavier entdämpft, kann man selektiv auch nur eine Saite durch einen Ton gezielt anregen. Das trifft gleichermaßen auf die Resonanz- wie auf die Wanderwellentheorie zu. Infolge starker Dämpfung spricht sie dagegen nicht auf eine einzelne Frequenz an, sondern auf ein breites Frequenzband. Bei einem Modell, das auf passivem Mitschwingen beruht, ist es daher rätselhaft, wie das Gehör die beobachtete Trennschärfe für aufeinanderfolgende Töne bis hinab zu etwa einem Hertz zustandebringt. Gerade unterscheidbare Töne hätten innerhalb der Zeichengenauigkeit von Abbildung 3.6 praktisch das gleiche Anregungsmuster.“

3.6 Einteilung der Musikinstrumente

Die folgenden Abschnitte über die Einteilung der Musikinstrumente und deren Klanganalysen sind dem Artikel *Physik und Musik - Altes Thema und moderne Computer* entnommen (Litschke, H.: Physik und Musik - Altes Thema und moderne Computer Praxis der Naturwissenschaften - Physik 3/49 (2000) 22-24 und <http://www.didakustik.de/Aufsatz1/>).

„Vor einer experimentellen Untersuchung der Schwingungseigenschaften ausgesuchter Musikinstrumente ist eine systematische Einteilung gängiger Instrumente hinsichtlich ihrer Tonerzeugung angebracht. Betrachtet man zwei unterschiedliche Methoden der Einteilung, so erhält man die in Abb. 3.7 mit einigen Beispielen angegebenen Kategorien. Einerseits wird unterschieden hinsichtlich der Frage, wieviele Töne einem Teilinstrument oder Resonator abgewonnen werden können, andererseits nach der Bauart bzw. der Dimension des tonerzeugenden Bauteils.

3.7 Klanganalyse an Beispielen

Der aktuelle Computermarkt stellt inzwischen sehr preiswerte Möglichkeiten zur Verfügung, Tonaufnahmen und Berechnungen von Frequenzspektren schnell per Mausklick durchführen zu lassen, damit das hauptsächliche Augenmerk auf die Interpretation gerichtet werden kann. Die bekannten Hersteller von Physikunterrichtsgeräten bieten ausgereifte Systeme zur Meßwertaufnahme. Für akustische Schülerexperimente leistet bereits ein PC mit Soundkarte, Mikrofon und einer Soundbearbeitungssoftware gute Dienste.

Mit Hilfe dieser für den Unterricht leicht verfügbaren technischen Hilfsmittel sollen verschiedene Klangquellen untersucht werden, um Musik- und Physik-

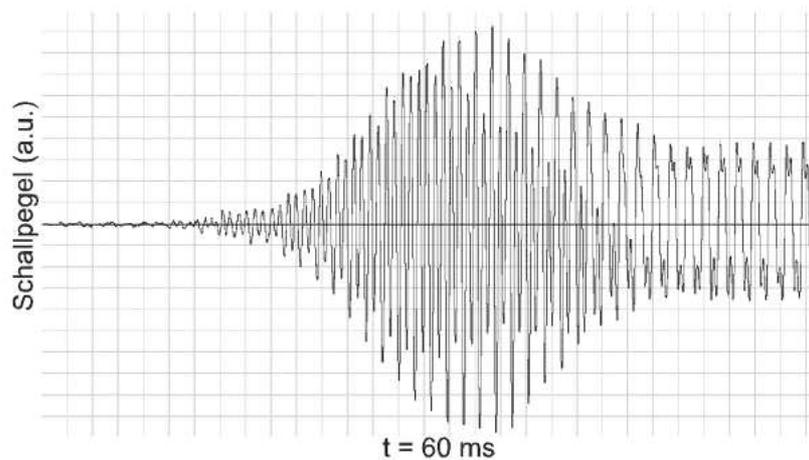
Tonerzeuger-Dimension Instrumentenfamilie	1. Familie	2. Familie	3. Familie
	Ein Tonerzeuger pro Ton	Insgesamt ein / wenige schwingende Teile	Verwendung harmonischer Oberschwingungen
3 Idiophone (Selbstklinger)	Klanghölzer, Xylophon, Daumenklavier, Triangel, Glocken(spiel), "Wasserglasorgel"	Steel-Drum	
2 Membranophone	Pauke Zimbel Tabla	Kesselpauke mit Pedal	
1 Chordophone (Saiteninstrumente)	Harfe Klavier Cembalo	Monochord Gitarre Geige	Sita
(-) Aerophone (Schwingende Luftsäule)	Parflöte Orgel	Holzblasinstrumente (Oboe, Flöte, Didgeridoo) Die Stimme	Horn, Trompete, Tabourflöte, Cornett, Serpent Die Stimme (Vokalförmung)
Ektrophone		E-Organ, Synthesizer Thereminvox	

Abbildung 3.7: Einteilung der Musikinstrumente

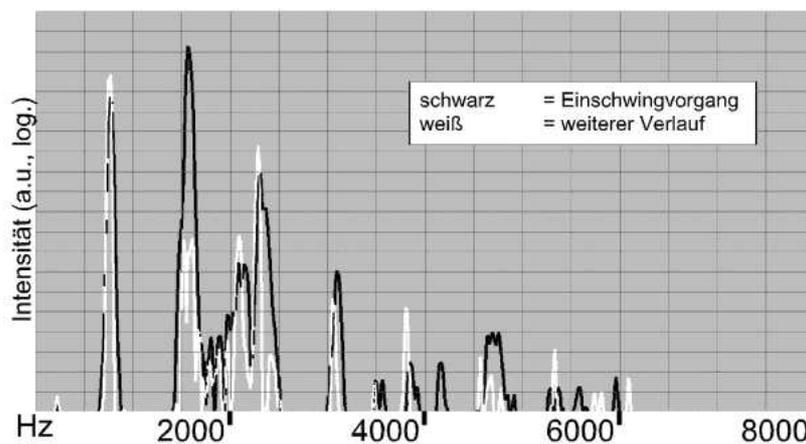
schülern zu vermitteln, wie der charakteristische Klang eines Musikinstruments zustandekommt. Es soll auch anhand eines gesanglichen Beispiels verdeutlicht werden, daß - anders als bei einem Meßinstrument- die biologischen Vorgänge des Hörens eine große Rolle bei der Musikwahrnehmung spielen. So ist bereits seit langem bekannt, daß nicht nur das Frequenzspektrum eines Tons ausschlaggebend für die Wahrnehmung ist, sondern dass sogenannte Kombinationsfrequenzen (Differenzfrequenzen) und erst im Ohr entstandene Oberschwingungen ebenfalls wahrgenommen werden.

3.7.1 Die Flöte

Anhand der Blockflöte, die bei einem Großteil der Schülerinnen und Schüler als vorhanden vorausgesetzt werden darf, läßt sich mit den technischen Möglichkeiten eines PC mit Soundkarte und Mikrofon leicht veranschaulichen, was den typischen Klang eines Instruments ausmacht. Zum einen ist dies die Form des zeitlichen Verlaufs der erzeugten Schallschwingung, zum anderen aber auch ganz wesentlich der Einschwingvorgang. Abbildung 3.8(a) zeigt die ersten 60 ms des Tons g'' , also des „normalen“ g auf einer Sopranblockflöte (Griffweise entspricht g' -die Sopranblockflöte erklingt eine Oktave höher als ihre Notation). Zur Verdeutlichung wurde der Ton mit etwas überhöhtem Druck angeblasen, woraus die große Amplitude in der Mitte des Bildes resultiert. Man erkennt deutlich, daß während des gezeigten Zeitintervalls eine Schwingung dominiert, die die doppelte Frequenz des Tons besitzt, der sich nach diesem Einschwingvorgang stabilisiert. Die Bedeutung des Einschwingens, das in dieser Weise auch bei anderen Blasinstrumenten bis hin zur Pfeifenorgel auftritt, zeigt sich auch in einer frequenz aufgelösten Darstellung (Abbildung 3.8(b)). Während der ersten Millisekunden (schwarze



(a) Zeitbereich.



(b) Frequenzbereich.

Abbildung 3.8: Klangspektrum einer Flöte.

Kurve) dominiert der Anteil mit der doppelten Frequenz des Grundtons (ca. 1500Hz), während im weiteren Verlauf der Grundton mit etwa 750Hz dominiert und der doppelte Frequenzanteil als erste Oberschwingung zur Klanggebung des Instruments beiträgt. Die Blockflöte ist des weiteren auch ein gutes, leicht verfügbares Beispiel für folgendes Phänomen aus der Wellenlehre des Schulunterrichts: Oft wird der Unterschied zwischen offener und gedackter Orgelpfeife behandelt. Aufgrund der symmetrischen Randbedingungen stellen sich in der offenen Pfeife solche stehenden Wellen ein, die ebenfalls symmetrischen Druckverlauf haben, d.h. die Grundschwingung ist diejenige mit der Wellenlänge $\lambda = 2L$ ($L =$ Pfeifenlänge). Dagegen ertönt die geschlossene Pfeife in einer Grundschwingung mit $l = 4L$, der Ton ist also um eine Oktave niedriger. Auch dies lässt sich gut mit der Blockflöte verdeutlichen: Wir benutzen lediglich den abgenommenen Flötenkopf und blasen ihn einmal offen an und einmal geschlossen, indem wir die Unterseite mit der Handfläche bedecken. Oft vernachlässigt wird allerdings der klangliche Unterschied zwi-

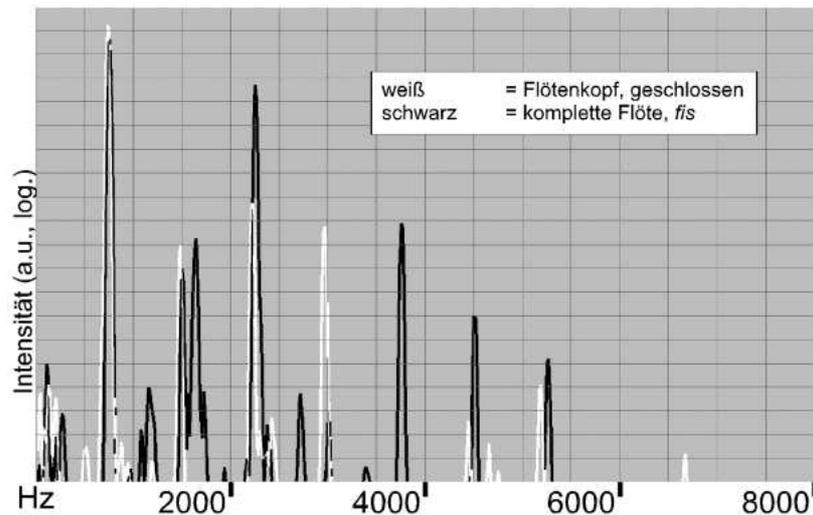


Abbildung 3.9: Einseitig offene und beidseitig offene Flöte.

schen offenen und gedackten Pfeifen, der daraus resultiert, dass aufgrund der Randbedingungen nur solche Wellen in die Pfeife passen, für die gilt:

$$L = \lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4, \dots$$

D.h. im Obertonspektrum treten ausschließlich ungradzahlige Vielfache des Grundtons auf, jede zweite Oberschwingung fehlt. Läßt sich dieses auch anhand der Blockflöte verdeutlichen?

Wir führen folgendes Experiment durch: Wir erzeugen zum einen einen Ton mit dem zugehaltenen Flötenkopf und zum anderen greifen wir auf einer kompletten Flöte einen Ton, der - je nach Modell - im Bereich f-fis-g liegen sollte. Es läßt sich so erreichen, daß beide Töne die gleiche Höhe haben, doch der klangliche Unterschied ist deutlich. Die entsprechenden Fourier-Spektren sind in Abbildung 3.9 dargestellt. Darin fällt auf, daß in der Frequenzanalyse für den geschlossenen Flötenkopf (weiß) bei einer Frequenz von 3750 Hz der Anteil fehlt, der der fünffachen Frequenz der Grundschwingung entspricht, also ein ungerader Anteil und nicht etwa sämtliche geraden Vielfachen. Anhand dieses Experiments läßt sich also zweierlei festhalten

- Unterschiede im Obertonspektrum lassen sich in der Tat deutlich hören
- Durch die Optimierung hinsichtlich des Klanges als Blockflöte ist der geschlossene Instrumentenkopf überraschenderweise nur bedingt als Modell für die gedackte Orgelpfeife zu gebrauchen.

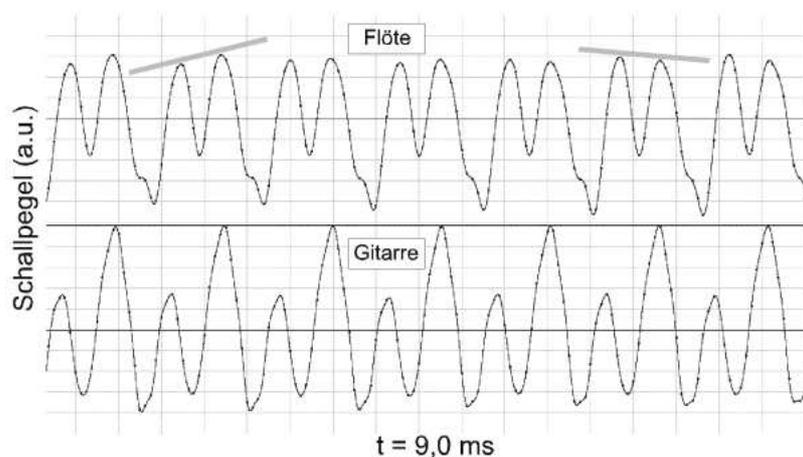
Nebenbei bemerkt ist speziell der Griff für das fis (mittleres Loch offen) auch nur eine mäßige Näherung für eine ausschließlich am Ende offene Pfeife, zumal gerade offene Mittellöcher ein weiteres komplexes Problem darstellen.

3.7.2 Die Gitarre

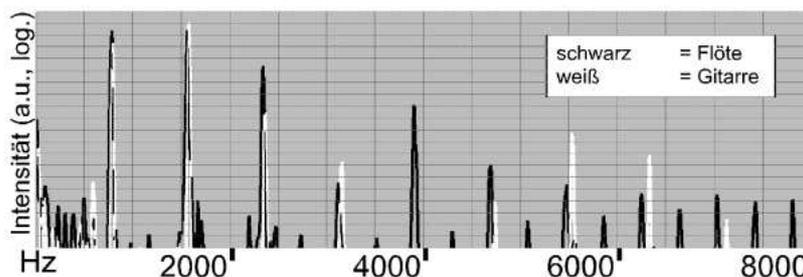
Wie äußert sich aus dem Blickwinkel der Meßtechnik eigentlich der klangliche Unterschied zwischen einem Blasinstrument wie der Flöte und einem Saiteninstrument wie der Gitarre? Speziell Saiteninstrumente - angefangen mit

dem Monochord - waren schon seit Pythagoras Untersuchungsobjekte und Definitionsgrundlage von Tonhöhe und -intervall aufgrund von Saitenteilungen. Wir können hier anhand einer Vergleichsmessung veranschaulichen, warum diese Instrumente für diese Definitionsfragen so geeignet sind.

Bei der Frequenzmessung beider Instrumente überrascht zunächst folgendes: Die Gitarre erklingt als Instrument in Tenorlage eine Oktave tiefer als ihre Notation. Zwischen ihr und der Sopranblockflöte liegt also effektiv ein Intervall von zwei Oktaven. Soll die gleiche Frequenz erreicht werden wie beispielsweise beim g'' der Flöte (gegriffen g'), so muss der Gitarrist ein g''' greifen (e-Saite 15(!)ter Bund). Abbildung 3.10(a) zeigt einen 9 Millisekunden kurzen Ausschnitt aus den Schwingungsverläufen beider Instrumente bei dem beschriebenen Ton g'' . Die Fourierspektren sind in Abbildung 3.10(b) gezeigt. Hieraus lernen wir folgendes: Das Klangspektrum der Gitarre ist deut-



(a) Zeitbereich.



(b) Frequenzbereich.

Abbildung 3.10: Klangspektrum einer Gitarre im Vergleich mit dem einer Flöte.

lich klarer beschränkt auf Oberschwingungen, also ganzzahlige Vielfache der Frequenz des Grundtons. Der Klang der Flöte weist darüber hinaus noch - insbesondere im höheren Frequenzbereich - Vielfache der halben Frequenz des Grundtons auf. Darüber hinaus erkennt man noch anharmonische und niederfrequente Anteile, die z.B. aus Turbulenzen oder Druckschwankungen beim Anblasen herrühren können und die dazu führen, daß sich die Schwin-

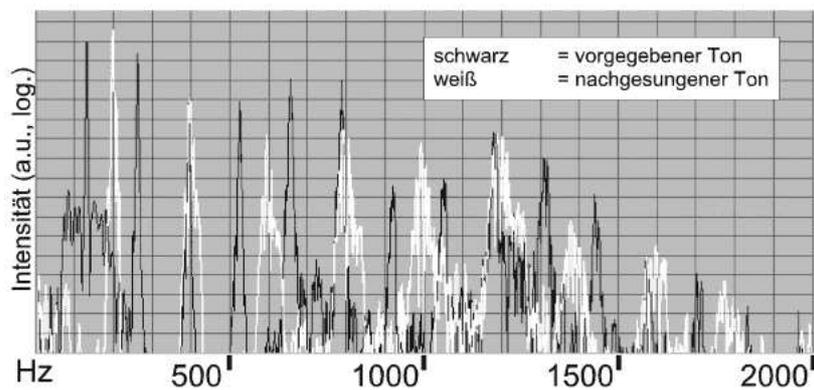


Abbildung 3.11: Einseitig offene und beidseitig offene Flöte.

gungsform bereits innerhalb weniger Zyklen ändert (s. Markierungen in Abbildung 3.10(a) oben).

3.7.3 Die Stimme

Abschließend soll noch ein kurzer Beitrag über die menschliche Stimme folgen. Die Stimme ist das wohl komplizierteste und vielseitigste Musikinstrument, das wir benutzen, zumal über ständige Regelmechanismen nicht nur die Tonhöhe variiert wird sondern auch die Klangfärbung (Bsp.: verschiedene Vokale) blitzschnell exakt eingestellt werden kann. Auf die vielfältigen Möglichkeiten zur Klanggestaltung mit der menschlichen Stimme soll hier nicht eingegangen werden, sondern es soll ein Beispiel gezeigt werden, wie mit Hilfe der verwendeten Technik einigen derjenigen Mut gemacht werden kann, von denen gesagt wird oder die von sich selbst sagen, sie könnten nicht singen. Dieses wäre ein interessantes Beispiel für fächerübergreifenden Einsatz von Unterrichtsstoff und Lehrmitteln. Eine freiwillige Probandin, die von sich selbst sagt, sie könne singen wie Goethes Vater, der sang wie jemand, der in der Kunst unterrichtet worden war, haarscharf an den Tönen vorbeizusingen, war mutig genug, ein paar vorgegebene Töne nachzusingen. Das Beispiel eines einzelnen vorgesungenen Tons samt Ergebnis ist in Abbildung 3.11 dargestellt (fairerweise sei hier angemerkt, dass der vom Autor vorgegebene Ton für eine weibliche Stimme zu tief war). Hier wird folgendes deutlich: Der mit einer Frequenz von 130 Hz vorgegebene Ton (schwarz) wurde deutlich verfehlt, aber mit der nachgesungenen Frequenz von 195 Hz wurde exakt das Frequenzverhältnis von $3/2$ zum Originalton getroffen. So fällt die Frequenz jeder dritten Eigenschwingung des vorgegebenen Tons mit jeder zweiten des nachgesungenen Tons zusammen. Das Frequenzverhältnis von $3/2$ entspricht exakt der Quinte, die bei Pythagoras gefunden wurde durch die Teilung einer Saite im Verhältnis $2/3$ und die als der harmonischste Zusammenklang überhaupt empfunden wird (abgesehen von der Oktave). Dieses Beispiel kann motivationsfördernd wirken, weil es zeigt, dass in diesem Fall durchaus Grundzüge eines musikalischen Hörens vorhanden sind.“

3.8 Das Programm overtone

Die in diesem Kapitel beschriebenen Experimente können sehr einfach mit Schulmittel selbst durchgeführt werden. Mittlerweile befindet sich in jedem

modernen PC eine Soundkarte, die sich hervorragend für akustische Experimente eignet. Als weitere Ausstattung benötigt man dann nur noch ein Mikrofon, das an den Eingang der Karte angeschlossen werden kann. Mit dem dieser Arbeit beigelegten Programm *overtone* lassen sich dann Klänge z.B. von Musikinstrumenten sehr einfach aufnehmen. Das Programm selbst ist Shareware und ist über das Internet zu beziehen: <http://www.clab.unibe.ch/overtone/>.

Auf der beigelegten Diskette befindet sich eine Datei mit der Bezeichnung *overtone.zip*. Diese ist aus Platzgründen komprimiert und kann z.B. mit dem Programm WinZip dekomprimiert werden (Bezug: <http://www.winzip.de>). Sind die entsprechenden Dateien in ein Zielverzeichnis entpackt worden, dann kann man durch einen Doppelklick auf das Symbol *overtone.exe* das Programm starten. Es erscheint zunächst der Bildschirm wie in Abbildung 3.12.

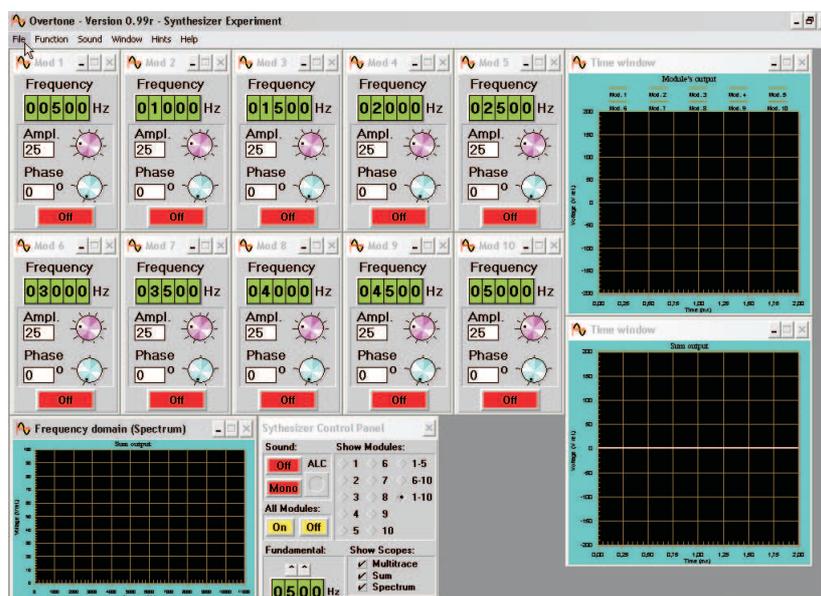


Abbildung 3.12: Der Startbildschirm von overtone.

Mit dem Programm ist eine Vielzahl von akustischen Experimenten möglich und es lohnt sich die verschiedenen Möglichkeiten einmal auszuprobieren. Für eine Klanganalyse ist jedoch das Untermenü *Analyser* von Bedeutung. Man gelangt in dieses Menü über die Befehlsleiste *File* → *Analyser*. Der Bildschirm sollte dann das Bild wie in Abbildung 3.13 anzeigen. In dem Fenster auf der rechten Seite mit der Aufschrift *Analyser Control Panel* lassen sich eine Vielzahl von Parametern einstellen. Über das Button *Run* läßt sich eine Aufnahme einer externen Schallquelle mit einem Mikrofon starten. Die weiteren Einstellmöglichkeiten werden dann am besten durch Ausprobieren an die gegebene Situation angepaßt.

Auf den Programmdisketten befinden sich die Dateien zu den oben vorgestellten Experimenten zu Flöte und Gitarre sowie weitere Beispielklänge. Diese Dateien haben das .wav Format und können ebenfalls von *overtone* verarbeitet und abgespielt werden. Im *Analyser Control Panel* gibt es eine Rubrik *Import/Export*. Durch einen Mausklick auf das Button *In* kann man beliebige .wav Dateien laden (vgl. Abbildung 3.14). Abgespielt werden die Dateien dann über die Rubrik *Play*.

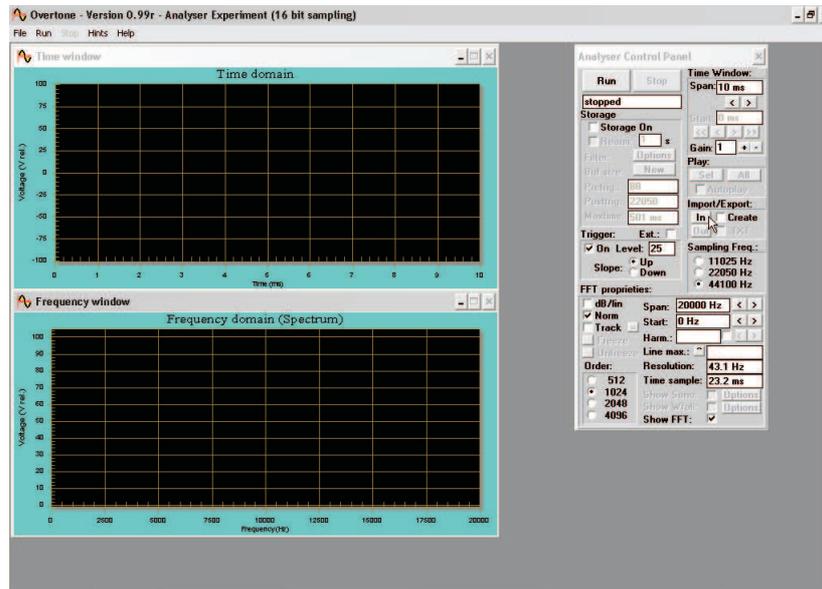


Abbildung 3.13: Das Analyser-Menü.

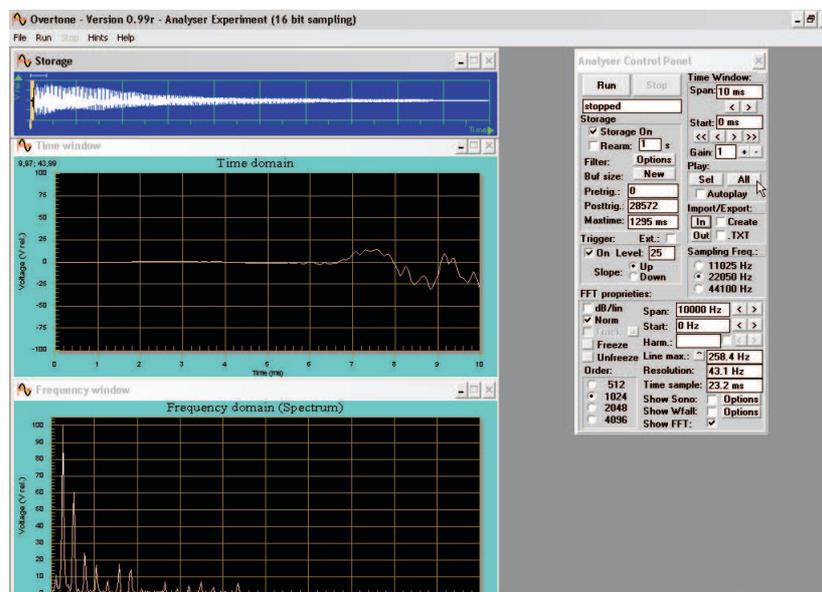


Abbildung 3.14: Klanganalyse einer externen .wav-Datei.

4. Selbstbau eines Radios

In diesem Kapitel wird eine Bauanleitung für einen Radioempfänger und -sender vorgestellt, die mit der Ausstattung einer Physiksammlung, wie sie an vielen Schulen zu finden ist, realisiert werden kann. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit auf Wunsch einen äquivalenten Aufbau bei einem Besuch an der Technischen Fakultät (Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik) aufzubauen.

Der folgende Text *Radiosender Radioempfänger* wurde von A. Reichert verfaßt (<http://home.t-online.de/home/Alfons.Reichert/radiost.htm>).

4.1 Einleitung

„Radio und Fernsehen sind Unterrichtsthemen, bei denen selbst der letzte Physikmuffel unter den Schülern aus seinem notorischen Dämmerenschlaf erwacht. Alleine der Anblick einer solchen Kiste im Unterricht erweckt bei so manchem Schüler neue Lerngeister. Erschlägt der Lehrer ihn dann nicht sofort mit vielen elektronischen, technischen Raffinessen moderner Radios, so verfällt er auch nicht so rasch wieder in jene eigentümliche Nullbocktrance, die die Schüler so häufig befällt und auch dem engagiertesten Lehrer den letzten Nerv raubt. Daher will ich in diesem kleinen Script einen Weg zu den physikalischen Grundlagen von Radiosender und Radioempfänger weisen, der nicht allzu sehr mit Elektronik überfrachtet ist und dennoch die wesentlichen Aspekte verdeutlicht. Das man dabei nicht ganz auf Elektronik verzichten kann, liegt in der Natur der Sache.

Zunächst stelle ich als Radiosender einen einfachen KW-Oszillator vor, der aufgrund seines Aufbaues frequenz- und amplitudenmoduliert werden kann. Beide Modulationsarten sind in der Rundfunk- und Fernsehtechnik sehr verbreitet. So wird beim Fernsehen das Bild durch Amplitudenmodulation AM, der Ton durch Frequenzmodulation FM übertragen. Beim Radio hängt die verwendete Modulationsart vom Frequenzbereich ab. LW und MW sind amplitudenmoduliert, KW und UKW frequenzmoduliert. Sender mit AM sind stör anfälliger, beanspruchen dafür aber einen kleineren Frequenzbereich für die übertragenen Signale.

Im zweiten Teil werden die Vorgänge untersucht, die sich beim Empfang der Signale im Radio abspielen. Dabei wird zunächst gezeigt, dass der selbstgebaute Sender in einem käuflichen Radio empfangen werden kann. Danach wird anhand mehrerer Versuche erklärt, wie im Empfangskreis bei AM bzw. FM das NF-Signal zurückgewonnen, also demoduliert wird.

Im letzten Kapitel kommen ein paar Aspekte zum Thema Antenne zur Sprache. Sie stellt ein wichtiges Bindeglied zwischen Sender und Empfänger dar.

Ich wünsche allen Kolleginnen und Kollegen viel Erfolg bei ihrem oft schwierigen Unterfangen, die Schüler für das als schwer geltende Fach Physik zu motivieren.

Stolberg, im Januar 2000.

4.2 Radiosender

4.2.1 Schaltplan des Senders

Die in Abb. 4.1 dargestellte Schaltung stellt einen ungedämpften Oszillator dar, der als Radiosender im KW-Bereich eingesetzt werden kann. Er lässt sich frequenz- und amplitudenmodulieren. Beide Vorgänge lassen sich außerdem auf einem Oszillographen sichtbar machen. Dadurch werden sie für die Schüler wesentlich einsichtiger. Da die Schaltung außerdem recht übersichtlich aufgebaut ist, können die Schüler auch seine Funktionsweise nachvollziehen. Verwendet man zusätzlich noch einen einfachen Empfangskreis, so lassen sich mit dem Oszillator auch eine ganze Reihe interessanter Untersuchungen über Radioempfänger anstellen (s. Kapitel 4.3).

4.2.2 Funktion der Schaltung

Das Herzstück der Schaltung ist der bekannte Dreipunktoszillator mit induktiver Rückkopplung (vgl. Dorn-Bader: Physik, Oberstufe). Zur Frequenzmodulation besteht die Kapazität des Schwingkreises aus einem Kondensator (47 pF) und einer Kapazitätsdiode (BB 204), die in Reihe geschaltet sind. Die an der Kapazitätsdiode anliegende Spannung wird über die beiden Widerstände ($22\text{ k}\Omega$) variiert. Sie ändert dabei ihre Kapazität, so dass die Frequenz des Schwingkreises zu- bzw. abnimmt. Die Niederfrequenz NF wird über einen Kondensator in die Mitte zwischen beide Widerstände eingespeist. Dadurch ist eine symmetrische Modulation möglich. Der Oszillator wird frequenzmoduliert, wenn der Umschalter in Stellung 1 steht. Dann sieht man auf dem Oszillographen eine Sinuslinie, die im Takt der NF gestaucht bzw. gedehnt wird. Die Amplitude der NF bestimmt die Weite der Stauchung bzw. Dehnung. In Stellung 2 wird der Schwingkreis amplitudenmoduliert, indem durch die NF das Potential des Emitters angehoben bzw. gesenkt wird. Der Oszillograph zeigt in dieser Stellung des Schalters eine Sinuslinie, deren Amplitude im Takt der NF ansteigt und abfällt. Die Größe der Amplitudenschwankungen hängt ab von der Amplitude der NF. Dehnt man die Zeitachse bis in den Periodendauerbereich der NF, so erkennt man auf dem Oszillographen das typische Bild einer amplitudenmodulierten Trägerschwingung. Bei genauer Betrachtung der Oszillographenbilder stellt man fest, dass die frequenzmodulierte Schwingung auch geringfügig amplitudenmoduliert wird und umgekehrt. Das stört jedoch nicht.

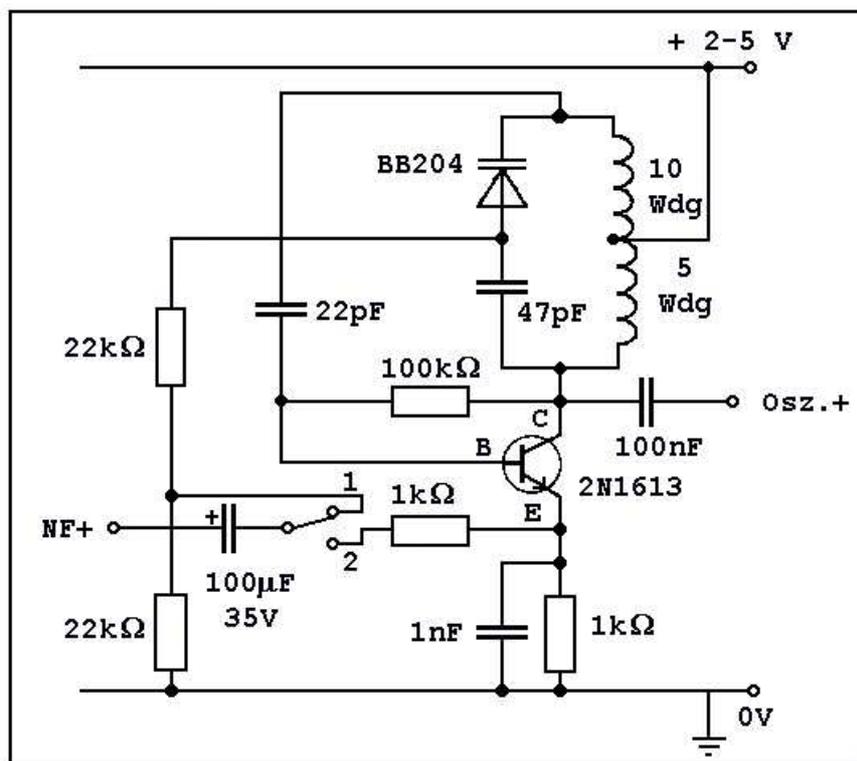


Abbildung 4.1: Schaltplan.

4.2.3 Betriebsdaten der Schaltung

Die Betriebsspannung der Schaltung kann zwischen 2 und 5 V liegen, optimal sind 3 V. Sie muss stabilisiert sein. Die Niederfrequenzquelle kann ein Tonfrequenzgenerator oder ein Dreieckgenerator sein. Sie müssen jedoch Frequenzen im Bereich von 1-20 Hz mit einer Spannung bis 10 V erzeugen können. Nur dann lassen sich die Vorgänge bei beiden Modulationsarten deutlich sichtbar machen. Der Oszillator schwingt bei den angegebenen Werten mit ca. 12 MHz. Daher wählt man am Oszillographen für die Zeitachse 0,5 ms/cm x 3 oder falls möglich 0,1 ms/cm und für die Spannungsachse je nach Betriebsspannung 2 V/cm oder 5 V/cm.

4.2.4 Aufbau der Schaltung

Die Schaltung kann man sich aus Einzelbauteilen eines Elektronik Kastens zusammenstecken. Als Spule eignet sich dann die wohl in jeder Sammlung vorhandene KW-Spule von Phywe mit 10 Windungen, die man zusätzlich an der 3. Windung abgreift. Für den Einsatz im Unterricht besser geeignet ist auf jeden Fall eine verlötete Version, da sie sich im fertigen Zustand mit ein paar Handgriffen in Betrieb nehmen lässt. Man muss sich dann nur einmal die Mühe machen, die Schaltung zusammenzubauen. Da nicht jeder die Möglichkeit hat, eine passende Platine herzustellen, benutzt man am einfachsten eine fertige Lochrasterplatine mit Lötstreifen der Größe 5x9 cm. Die Abbildung 4.2 zeigt die Verdrahtung auf einer solchen Platine. Dann muss man sich jedoch die benötigte Spule selbst wickeln. Dazu klebt man sich zunächst ein Papierrollchen von 3 cm Durchmesser und 5 cm Länge. Eine leere Filmdose leistet

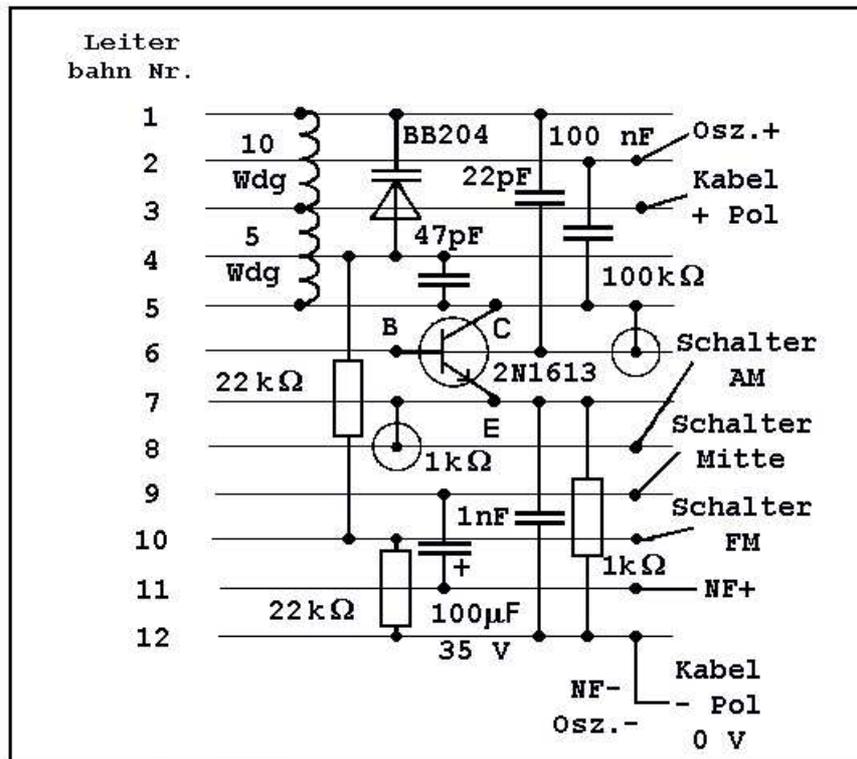


Abbildung 4.2: Platinenlayout.

dabei hervorragende Dienste. Um das Papierröllchen legt man auf einer Länge von 4 cm 15 Windungen aus 0,5 mm dickem, lackiertem Kupferdraht mit einer Abzweigung an der 5. Windung. Die Lage der Windungen lässt sich mit etwas Klebstoff und Klebeband stabilisieren. Als billiges Gehäuse für die fertige Schaltung bietet sich eine leere Ferrero-Rocher-Dose an, da sie aus recht stabilem Plastik besteht und außerdem durchsichtig ist, wodurch die Schüler die innen liegende Schaltung sehen können. Ferner kann man in ihren Deckel mit einer Bohrmaschine mit Holzbohrer Löcher für die Anschlussbuchsen und den Umschalter bohren, ohne dass der Kunststoff reißt. Es werden vier Buchsen und ein Umschalter benötigt: eine rote Buchse für den Pluspol der Betriebsspannung, eine grüne für den Pluspol des Oszillographen, eine gelbe für den Pluspol der NF und eine schwarze für den gemeinsamen Minuspol der Betriebsspannung, der NF-Quelle und des Oszillographen. Die fertige Platine befestigt man mit vier Holzschraubchen auf zwei Holzleisten mit einem Querschnitt von 2 x 2 cm und einer Länge von 7 cm. Die beiden Holzleisten klebt man mit etwas Patex auf den Boden des Gehäuses. Dann verbindet man die entsprechenden Bahnen der Platine über etwas Schaltlitze mit den Buchsen bzw. mit den Anschlüssen des Umschalters. Den Deckel der Dose kann man zum Schluss mit etwas Klebeband verschließen.

4.2.5 Tabelle der benötigten Bauteile

- 1 Lochrasterplatine 5x9 cm, mit Lötstreifen, RM 2,54 mm
- 2 Holzleisten 2x2 cm. Länge je 7 cm
- 1 Ferrero Rocher-Dose
- 1 gelbe Buchse, vollisoliert, 4 mm
- 1 grüne Buchse, vollisoliert, 4 mm
- 1 rote Buchse, vollisoliert, 4 mm
- 1 schwarze Buchse, vollisoliert, 4 mm
- 1 Miniatur-Kippschalter 1 x UM
- 1 Kapazitätsdiode BB 204 grün/blau oder BB 203 grün/blau
- 1 Kondensator 47 pF
- 1 Kondensator 22 pF
- 1 Kondensator 1 nF
- 1 Kondensator 100 nF
- 1 Kondensator 100 mF/35 V
- 2 Widerstände 1 k Ω , 0,25 W
- 2 Widerstände 22 k Ω , 0,25 W
- 1 Widerstand 100 k Ω , 0,25 W
- 1 Transistor 2N1613
- 4 Holzschrauben, \varnothing 2 mm, Länge: 11 mm
- 2,5 m Kupferlackdraht, \varnothing 0,5 mm
- etwas Schalllitze
- etwas Patex, Klebeband und festes Papier

4.2.6 Zusätzliche Anmerkungen zur Schaltung

1. Bei der Kapazitätsdiode BB 204 handelt es sich um eine Doppeldiode in einem TO-92 Gehäuse, wobei der mittlere Anschluss die gemeinsame Kathode bildet. Für die Schaltung benötigt man nur eine der beiden Dioden. Die zweite Anode kann man daher mit einem Seitenschneider abkneifen.

2. Kapazitätsdioden werden normalerweise nicht mit 3V, sondern mit mehr als 6V betrieben. So ist gewährleistet, dass sie im linearen Bereich ihrer Kennlinie arbeiten. Außerdem ist im Normalfall die verwendete Modulationsspannung wesentlich geringer. Dann erzielt man jedoch nur einen geringen Frequenzhub. Meine Absicht aber war es, einen möglichst großen Frequenzhub zu erzeugen, damit die Sinuslinie der Schwingung auf dem Oszillographen deutlich sichtbar gedehnt bzw. gestaucht wird. Dazu muss die Diode im nichtlinearen Bereich ihrer Kennlinie betrieben werden. Die größte Krümmung weist die Kennlinie im Bereich von 3V auf. Daher ist in diesem Falle 3V die optimale Betriebsspannung der Schaltung. Außerdem muss aus demselben Grunde die NF-Spannung recht hohe Werte annehmen, da die Frequenz bekanntlich in einer reziproken Wurzelfunktion von der Kapazität abhängt. Wenn man die Schwingungen der Schaltung im KW-Bereich eines Radios abhören möchte, so kann man die Betriebsspannung auf ca. 6V erhöhen. Ferner muss dann die NF erheblich reduziert werden, um eine verzerrungsfreie Wiedergabe zu erreichen.
3. Zum Schluss noch eine Bemerkung zum Aufbau der Schaltung. Der Oszillator schwingt nur, wenn er, wie bei HF-Schaltungen eigentlich selbstverständlich, sauber verlötet wurde. Quasi mal eben so zusammenlöten funktioniert im HF-Bereich in 99% der Fälle nicht. Eine einzige fehlerhafte Lötstelle kann die ganze Mühe scheitern lassen. Außerdem müssen die Zuleitungen möglichst kurz sein. Alles andere schafft nur Ärger und Enttäuschung.

4.3 Radioempfänger

4.3.1 Empfang des Senders mit einem Weltempfänger

Versuch: Stellt man ca. 5m vom KW-Sender entfernt einen Weltempfänger auf, so kann man im KW-Bereich den eigenen Sender empfangen. Als NF-Quelle kann man dazu am NF-Eingang des Senders den Ohrhörerausgang eines Kassettenrekorders oder Walkmans, ein Mikrofon mit Verstärker oder aber den Sinusausgang eines Tonfrequenzgenerators anschließen. Dabei muss man die Spannung der NF-Quelle auf ca. 1V begrenzen, da sonst erhebliche Verzerrungen auftreten. Der Sender kann sowohl mit Amplituden- als auch mit Frequenzmodulation betrieben werden. Bei Frequenzmodulation muss man den Empfänger nur etwas gegen den Sender verstimmen (s. Kapitel 4.3.3). Der Empfang lässt sich noch etwas verbessern, wenn man in den Oszillographenausgang des Senders ein ca. 9m langes Kabel als Antenne steckt (vgl. Kapitel 4.4.2).

4.3.2 Empfang bei Amplitudenmodulation

Versuch 1: Zur genauen Untersuchung der Vorgänge bei Frequenz- und Amplitudenmodulation benutzt man den Empfangskreis aus Abb.4.3. Er lässt sich am einfachsten aus Bauteilen eines Elektronikkastens zusammenstecken. Als Induktivität dient dabei die KW-Spule der Fa. Phywe (Windungszahl $n = 3$; Länge $l = 4$ cm; Durchmesser $d = 10$ cm). Der Drehkondensator ist

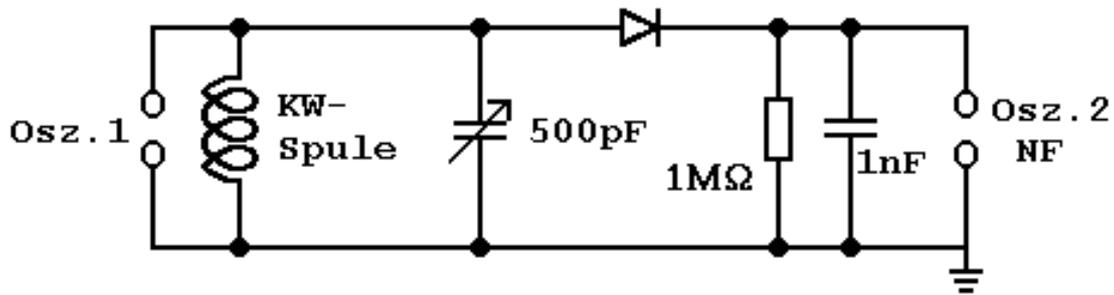
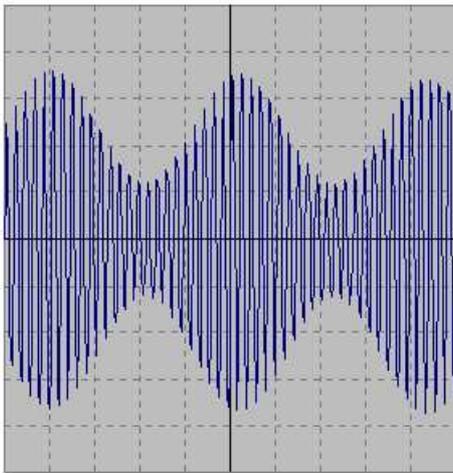
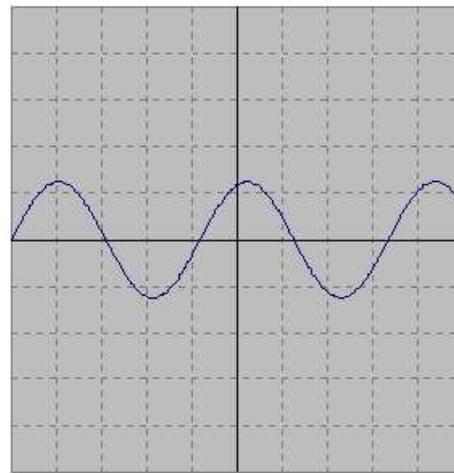


Abbildung 4.3: Empfangskreis.



(a) HF-Signal



(b) NF-Signal

Abbildung 4.4: Anzeige eines Zweikanaloszilloskops.

auch bei der Fa. Phywe erhältlich. Er ist auf einer besonderen Halteplatte befestigt. Aber auch im Elektronikhandel kann man solche Drehkondensatoren, wenn auch im Kleinformat, käuflich erwerben.

Diesen Empfangskreis stellt man in einer Entfernung von 20-30 cm neben dem Sender auf. Der Sender steht dabei auf Amplitudenmodulation und der Empfangskreis auf optimalem Empfang.

Der Zweikanaloszillograph zeigt dann Bilder wie in Abb. 4.4(a) und 4.4(b), wenn man in den Sender einen Sinuston einspeist. An Kanal 1 liegt offensichtlich das gesendete amplitudenmodulierte Signal an, aus dem mit Hilfe der restlichen Bauteile das NF-Signal an Kanal 2 zurückgewonnen wird. Wie das vor sich geht, zeigt der nächste Versuch.

Versuch 2: Man entfernt aus dem Empfangskreis nach Abb. 4.4(a) den Kondensator $C = 1 \text{ nF}$. Dann erhält man am 2. Kanal des Oszillographen die folgende Abb. 4.5. Diese Kurve lässt sich wie folgt erklären. Die Diode schneidet den unteren Teil der HF ab. Das ist notwendig, damit die positiven und negativen Anteile der HF sich nicht gegenseitig aufheben und somit die empfangene mittlere Leistung Null ist. Da der Kondensator fehlt, kann der Rest der HF nicht mehr zur Erde abgeleitet werden. Um diese Aussage zu verdeutlichen,

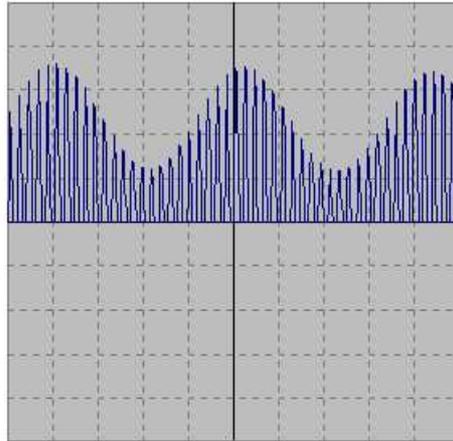


Abbildung 4.5: gleichgerichtetes HF-Signal.

kann man eine kleine Rechnung anstellen. Für eine Frequenz $f = 12 \text{ MHz}$ hat das RC-Glied einen Widerstand von

$$Z = \frac{1}{\sqrt{1/R_2 + 1/RC_2}} = 13,3 \Omega. \quad (4.1)$$

Für $f = 1 \text{ kHz}$ findet man: $Z = 157,3 \text{ k}\Omega$.

Die Hochfrequenz wird durch das RC-Glied praktisch kurzgeschlossen, während sich die Niederfrequenz als Spannung am RC-Glied aufbaut. Sie kann direkt einem NF-Verstärker zugeführt werden.

Versuch 3: Man entfernt in Abb. 4.3 den Oszillographen und schließt am RC-Glied einen NF-Verstärker an, der mit einem Lautsprecher verbunden ist. Im Lautsprecher hört man bei genauer Abstimmung des Empfangskreises den im Sender eingespeisten Sinuston. Alternativ kann man an den NF-Eingang des Senders auch einen Walkman oder einen Kassettenrekorder anschließen. Dann ertönt im Lautsprecher Musik. Schiebt man zwischen Sender und Empfänger eine Metallplatte, so verstummt der Lautsprecher.

4.3.3 Empfang bei Frequenzmodulation

Versuch 1: Man schließt den NF-Eingang des Senders an den Tonfrequenzgenerator mit sinusförmiger Wechselspannung an. Den Empfangskreis vereinfacht man gemäß Abb. 4.6 und stellt ihn auf optimalen Empfang ein. Dann

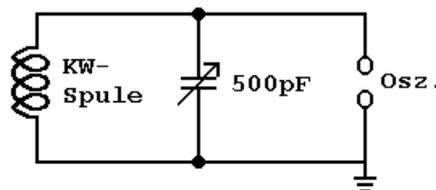


Abbildung 4.6: Einfacher Empfangskreis.

schaltet man den Sender auf Frequenzmodulation FM um. Auf dem Oszillographen erscheint nach kurzer Zeit das Bild in Abb. 4.7.

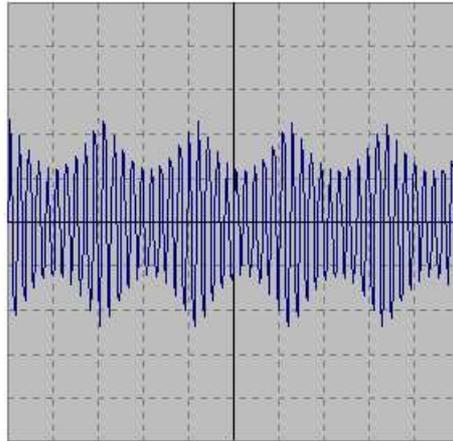


Abbildung 4.7: Verzerres FM-Sinussignal.

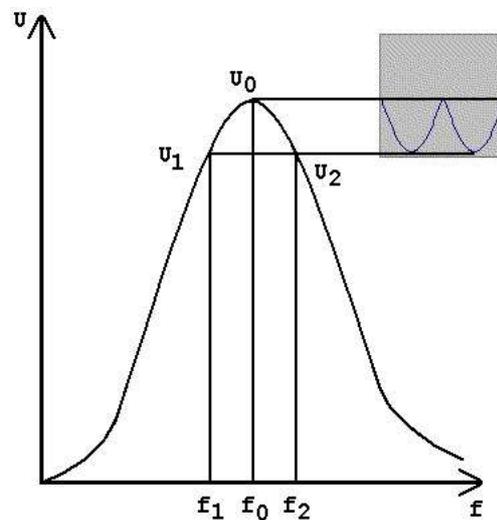


Abbildung 4.8: Erklärung für Abb. 4.7.

Auf den ersten Blick scheint es so, als hätte sich die Frequenz der NF gegenüber Abb. 4.4(a) verdoppelt. Aber der wirkliche Grund geht aus Abb.4.8 hervor. Da der Empfänger auf optimalen Empfang eingestellt ist, stimmen die Grundfrequenz f_0 des Senders und des Empfängers vollkommen überein. Daher schwankt die Hochfrequenz im Takte der Niederfrequenz um die Resonanzfrequenz f_0 des Empfangsschwingkreises. Ist die Spannung der Niederfrequenz negativ, so liegt die Frequenz f_1 der gesendeten Hochfrequenz etwas unterhalb von f_0 . Im Empfangskreis ist daher die empfangene Spannung U_1 etwas tiefer als die Spannung U_0 im Resonanzmaximum.

Ähnliches gilt, wenn die Spannung der Niederfrequenz positiv ist. Dann ist zwar die Frequenz f_2 der Hochfrequenz etwas höher als die Resonanzfrequenz f_0 . Da aber die empfangene Frequenz f_2 auf dem absteigenden Ast der Resonanzkurve liegt, ist die empfangene Spannung U_2 tiefer als im Resonanzmaximum. Das frequenzmodulierte Signal des Senders wird im Empfänger in ein amplitudenmoduliertes Signal umgewandelt, wobei allerdings die Form verzerrt wird. Speist man in den Sender ein Rechtecksignal ein, so scheint die

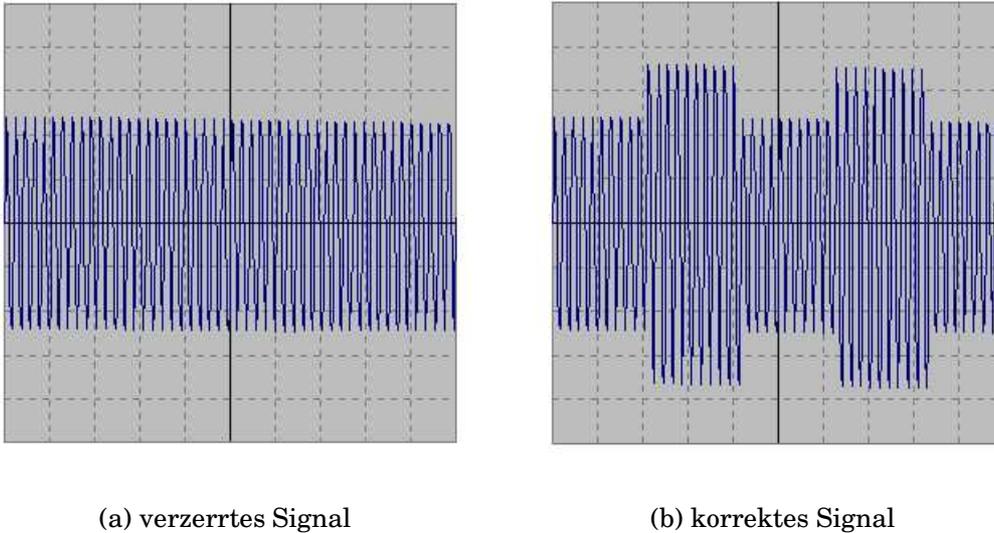


Abbildung 4.9: FM-Rechtecksignale.

Niederfrequenz gemäß Abb. 4.9(a) sogar völlig verschwunden zu sein. Denn nun entsteht für beide Hälften des Rechtecksignals im Empfangskreis für alle Zeiten die gleiche Spannung U_1 bzw. U_2 . Die Form des gesendeten Signals geht dabei völlig unter. Wie kann man dann aber bei Frequenzmodulation das exakte NF-Signal im Empfangskreis wiedergewinnen? Das zeigt der folgende Versuch.

Versuch 2: Man verstimmt den Empfangskreis aus dem vorigen Versuch etwas, indem man am Drehkondensator einen leicht veränderten Wert einstellt. Für ein NF-Sinussignal ergibt sich dann das Bild einer amplitudenmodulierten sinusförmigen HF gemäß Abb. 4.4(a). Wurde der Sender mit einer Rechteckspannung frequenzmoduliert, so findet man die Kurve in Abb. 4.9(b). Hier baut sich im Empfangskreis ein amplitudenmoduliertes rechteckförmiges HF-Signal auf.

Erklärung: (s. Abb. 4.10) Da die Sendefrequenz f_0 und die Resonanzfrequenz des Empfangskreises nicht mehr übereinstimmen, liefert die Trägerfrequenz f_0 am Empfangskreis eine Spannung U_0 , die kleiner als die Resonanzspannung ist. Je nach Verstimmung des Empfangskreises liegt sie auf dem ab- oder aufsteigenden Ast der Resonanzkurve. Frequenzen f_2 , die höher als f_0 sind und daher einer positiven NF-Spannung entsprechen, liefern im Empfangskreis somit auch eine höhere Spannung U_2 als die Frequenz f_0 . Frequenzen f_1 , die kleiner als f_0 sind und daher von einer negativen NF-Spannung herrühren, ergeben nun in der Tat kleinere Spannungen U_1 im Empfangskreis als die Trägerfrequenz f_0 . Die Form der NF-Spannung wird also im Schwingkreis des Empfängers korrekt in einem amplitudenmodulierten Trägersignal wiedergewonnen. Es muss anschließend nur noch wie bei der Amplitudenmodulation demoduliert und verstärkt werden.

Von der Methode, frequenzmodulierte Signale durch Verstimmung des Empfangskreises zu demodulieren, wird in modernen Radios nicht mehr Gebrauch gemacht, da sie sehr störanfällig ist. Vielmehr enthalten sie im Empfangs-

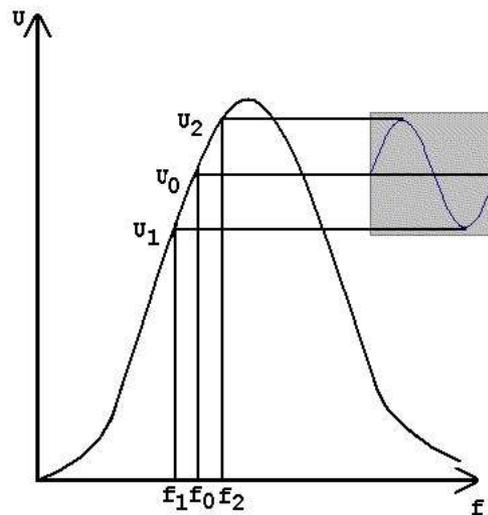


Abbildung 4.10: Erklärung des Empfangs bei FM.

kreis ebenfalls eine Kapazitätsdiode, die das frequenzmodulierte Signal direkt in ein amplitudenmoduliertes umwandelt. Somit kehren sich im Empfänger die Vorgänge im frequenzmodulierten Sender einfach um. Die Kapazitätsdiode ermöglicht ferner eine elegante Senderabstimmung mit Hilfe einer regelbaren Steuerspannung. Diese Spannung kann über ein Potentiometer oder über Sensortasten eingestellt werden.

4.4 Antenne

4.4.1 Antenne für Schallwellen

Versuch 1: Man schließt an einen Tonfrequenzgenerator einen Lautsprecher an. Den Generator stellt man auf eine Frequenz $f = 378$ Hz und eine geringe Lautstärke ein. Dann hält man vor den Lautsprecher eine beidseitig offene Glasröhre der Länge $l = 0,45$ m.

Beobachtung: Mit Glasröhre klingt der Ton wesentlich lauter als ohne Glasröhre.

Erklärung: In der Glasröhre baut sich durch wiederholte Reflexion der Schallwelle an den Enden der Glasröhre eine stehende Welle auf, die den abgestrahlten Ton durch Resonanz verstärkt.

Versuch 2: Man verstellt den Tonfrequenzgenerator aus Versuch 1 etwas, etwa auf die Frequenz $f = 450$ Hz.

Beobachtung: Die verstärkende Wirkung der Glasröhre ist verschwunden.

Erklärung: In der Glasröhre kann sich keine stehende Welle mehr ausbilden, da die Grundbedingung $l = \lambda/2$ nicht mehr erfüllt ist, wobei für λ gilt:

$$\lambda = c/f \quad (4.2)$$

mit c als Ausbreitungsgeschwindigkeit und f als Frequenz. Setzt man $c = 340$ m/s und $f = 450$ Hz ein, so erhält man letztendlich für die erforderliche Länge

$l = 37,8$ cm. Die verwendete Röhre ist also zu lang. Für $f = 378$ Hz errechnet man $l = 45$ cm. Das entspricht genau der Länge der Röhre in Versuch 1.

Versuch 3: Man ersetzt die Glasröhre in Versuch 1 durch eine halb so lange einseitig geschlossene Röhre. Alternativ kann man die Röhre aus Versuch 1 auch mit einer Glasplatte an einer Seite verschließen. Dann muss man jedoch die Frequenz des Generators auf $f = 189$ Hz reduzieren.

Beobachtung: Auch in diesem Falle erhöht die Glasröhre die Lautstärke des abgestrahlten Tones.

Erklärung: In der Glasröhre kann sich auch diesmal eine stehende Welle ausbilden, wobei jetzt die Resonanzbedingung $l = \lambda/4$ lautet. Am geschlossenen Enden haben sich nämlich die Reflexionsbedingungen für die Schallwellen geändert.

Versuch 4: Man hält nach Versuch 1 die Glasröhre nicht an den Lautsprecher, sondern in die Nähe eines Ohres.

Beobachtung: Die Glasröhre lässt den Ton auch dieses Mal lauter erklingen.

Erklärung: Die in das Glasrohr eindringenden Schallwellen erzeugen in der Luft der Röhre eine stehende Welle, die den Ton durch Resonanz verstärkt. Der Abstand zur Schallquelle spielt dabei keine Rolle.

4.4.2 Antennen für elektromagnetische Wellen

Aus den Versuchen in Kapitel 4.4.1 kann man folgern, dass eine Antenne für Wellen aus einem Stück Wellenleiter passender Länge besteht. Damit sich eine stehende Welle ausbilden und damit die Welle durch Resonanz verstärkt werden kann, muss für die benötigte Länge l gelten: $l = \lambda/2$ bzw. $l = \lambda/4$, je nachdem, wie das eine Ende des Leiters beschaffen ist. Ferner können Antennen offenbar am Sender und oder am Empfänger eingesetzt werden. Leiter für EM-Wellen sind Metallstäbe. Damit besteht die einfachste Antenne für EM-Wellen aus einem Stück Metalldraht der oben angegebenen Länge. Da für EM-Wellen $c = 3 \cdot 10^8$ m/s ist, errechnet sich die erforderliche Länge l für die verschiedenen Frequenzbereiche der Radiosender unter Beachtung der Gleichung 4.2 wie folgt:

LW-Bereich:	$l = \lambda/2 = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} / (2 \cdot 250 \text{ kHz})$	= 600 m bzw.	$l = \lambda/4 = 300 \text{ m}$
MW-Bereich:	$l = \lambda/2 = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} / (2 \cdot 1 \text{ MHz})$	= 150 m bzw.	$l = \lambda/4 = 75 \text{ m}$.
KW-Bereich:	$l = \lambda/2 = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} / (2 \cdot 10 \text{ MHz})$	= 15 m bzw.	$l = \lambda/4 = 7,5 \text{ m}$.
UKW-Bereich:	$l = \lambda/2 = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} / (2 \cdot 100 \text{ MHz})$	= 1,5 m bzw.	$l = \lambda/4 = 0,75 \text{ m}$.

Darin wurden für die Frequenzen in etwa die mittleren Werte der einzelnen Sendebereiche eingesetzt. Soll die Antenne als $\lambda/4$ -Dipol ausgeführt werden, so muss das eine Ende mit einem festen Bezugspotential, etwa der Erde verbunden werden.

Offensichtlich sind solche einfachen Drahtantennen nur für den UKW-Bereich praktikabel. In allen anderen Fällen sind die benötigten Drahtlängen viel zu groß. Im UKW-Bereich werden in Transistorradios in der Tat Teleskopantennen, also ausziehbare Metallstäbe der berechneten Länge $l \approx 0,75$ m als Antennen verwendet. Bei feststehenden UKW-Empfängern setzt man häufig Metallbänder der Länge $l = 1,5$ m ein, die in der Mitte abgegriffen werden. Für

die anderen Bereiche werden statt der einfachen Drahtantennen sogenannte Ferritantennen in die Radios eingebaut. In ihnen ist wegen $\mu_r \gg 1$ λ sehr viel kleiner und damit auch die benötigte Stablänge. Für λ gilt dann nämlich

$$\lambda = \frac{c'}{f} = \frac{c}{\mu_r f}, \quad (4.3)$$

da nach Maxwell in diesem Falle

$$c' = \frac{c}{\mu_r} \quad (4.4)$$

ist.“

5. Digitale Signalübertragung

5.1 Digitalisierung und Eigenschaften von Sprache und Musik

5.1.1 Einleitung

Digitale Systeme gewinnen nicht nur wegen leistungsfähigerer Digitalrechner und Hardwarekomponenten bei gleichzeitig sinkenden Preisen immer stärker an Bedeutung, sie weisen auch eine ganze Reihe an Vorteilen gegenüber *analogen* Systems auf. So lassen sich Funktionen und Effekte realisieren, die analog gar nicht oder nur mit hohem Aufwand möglich wären. Beispielsweise ermöglicht die Digitaltechnik hohe Variabilität und schnelle Anpassung

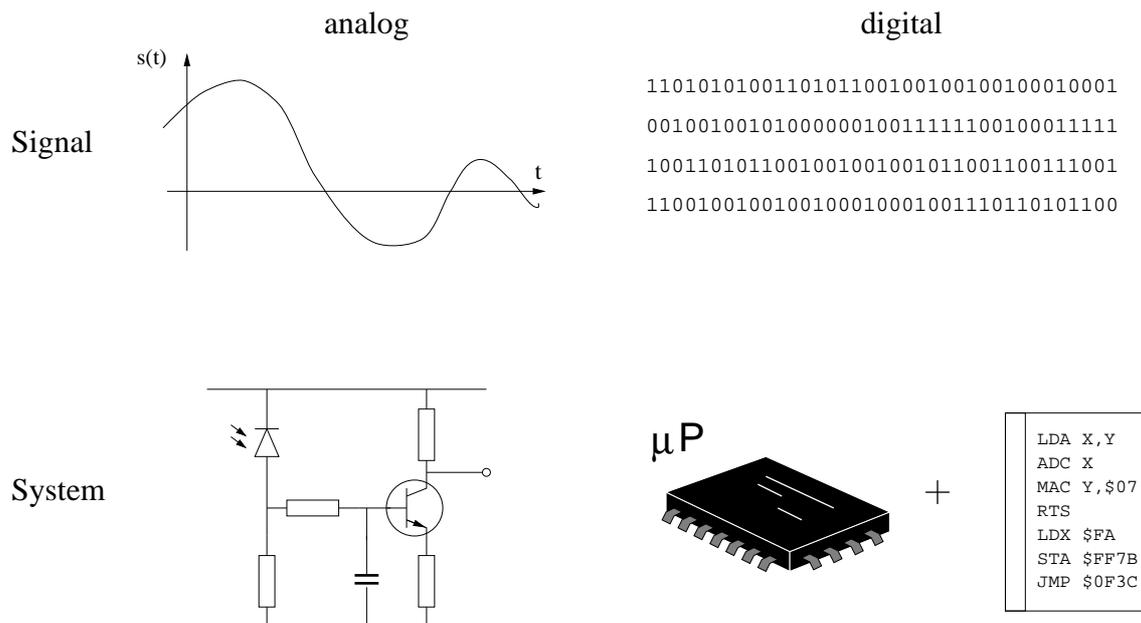


Abbildung 5.1: Beispiele analoger und digitaler Signale und Systeme.

an Problemstellungen und ist unempfindlich gegenüber Fertigungstoleranzen, Temperaturschwankungen und Alterung von Bauteilen. Im Gegensatz zu analogen Systemen ist mit digitalen Daten eine verlustfreie Übertragung auch über lange Distanzen hinweg möglich. Aus diesem Grunde arbeiten heutige Geräte und Anlagen wie CD-Abspielgeräte oder Mobiltelefone bis hin zu ganzen Radiosendern mit digitalen Daten.

Wann wird nun ein Signal oder System als „analog“ und wann als „digital“ bezeichnet?

Analoge Signale zeichnen sich dadurch aus, daß sie sich *kontinuierlich* verändern, beispielsweise mit der Zeit und/oder dem Ort. Eine Schallwelle, die von einem Lautsprecher abgestrahlt wird, breitet sich kontinuierlich durch den Raum aus und verändert sich kontinuierlich mit der Zeit. Diese Schallwelle stellt also ein analoges Signal dar. Ein *analoges System* verarbeitet analoge Signale unter Beibehaltung des kontinuierlichen Charakters des Signals. Im Beispiel der Schallwelle aus einem Lautsprecher könnte dies eine Lichtorgel sein, die die Schallwellen entsprechend ihres Schalldruckes in Lichtstärke umsetzt.

Digitale Signale hingegen bestehen aus Ziffernfolgen, die analoge Signale repräsentieren können. Oder anders ausgedrückt, es läßt sich aus jedem analogen Signal eine Ziffernfolge und damit ein digitales Signal erzeugen, das in der Lage ist, das analoge Signal (zumindest in bestimmten Grenzen) zu beschreiben. Diese Ziffern werden üblicherweise im binären Zahlenformat, d.h. als *Bits* oder Nullen und Einsen dargestellt. Ein *digitales System* verarbeitet diese digitalen Signale unter Verwendung von beispielsweise Mikroprozessoren, Speichern und Software.

Da unsere Umwelt zunächst als „analog“ zu bezeichnen wäre, muss vor einer digitalen Verarbeitung von Signalen zunächst eine Analog-Digital-Umsetzung oder *Digitalisierung* erfolgen, wie sie im folgenden Kapitel beschrieben wird.

5.1.2 Digitalisierung

Bevor eine Digitalisierung von analogen Signalen, wie z.B. Schallwellen angeregt durch Sprache oder Musik, erfolgen kann, müssen diese Signale dem verarbeitenden digitalen System, also z.B. dem Computer, zugänglich gemacht werden: Schallwellen werden dazu in einem Mikrofon in elektrische – aber immer noch analoge – Schwingungen umgewandelt. Diese elektrischen Schwingungen, die der Schalldruckwelle proportional sind, werden einem Baustein des Computers zugeführt, der als *Analog-Digital-Wandler* bezeichnet wird und die Digitalisierung der (nun elektrischen) Schwingung durchführt, d.h. die elektrischen Schwingungen werden in eine dem Computer verständliche Darstellungsform aus Binärzahlen umgewandelt. Die meisten handelsüblichen Soundkarten beispielsweise haben einen solchen AD-Wandler.

Der Vorgang der Digitalisierung ist in Abb.5.3 schematisch dargestellt. Aus dem analogen Signal (kontinuierliche Schwingung) werden in gleichen Abständen (dargestellt durch *senkrechte* Linien) Proben entnommen, die als schwarze Punkte gekennzeichnet sind. Jeder dieser sogenannten *Abtastwerte* wird nun dem Intervall, gebildet durch die *waagerechten* Linien, zugeordnet, in das der Abtastwert hineinfällt. Der AD-Wandler übermittelt dem Computer die Nummer des Intervalls, in dem der aktuelle Abtastwert des analogen

Signals liegt, und zwar in binärer Form, d.h. durch Bits, die die Werte Null oder Eins annehmen können. Ein Beispiel: der dritte Abtastwert von links fällt in das Intervall 89 (abzulesen an der rechten Seite des Diagramms). Diese Intervallnummer wird in die Binärzahl 01011001 umgewandelt, da

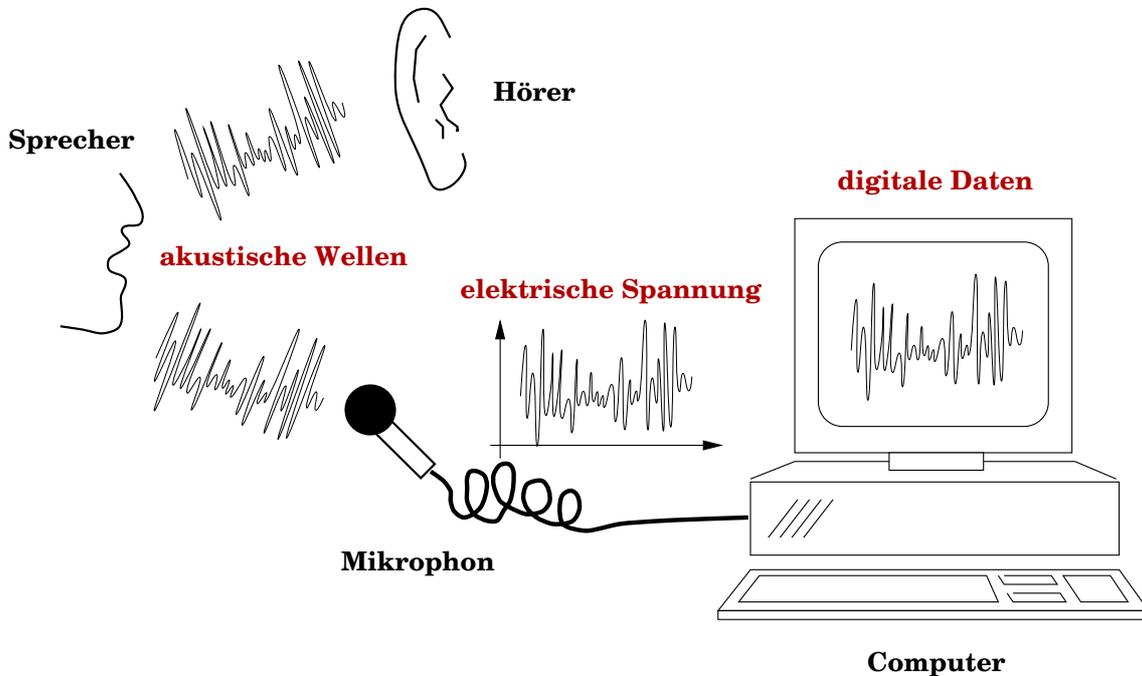


Abbildung 5.2: Der Weg von Sprache und Musik in den Computer.

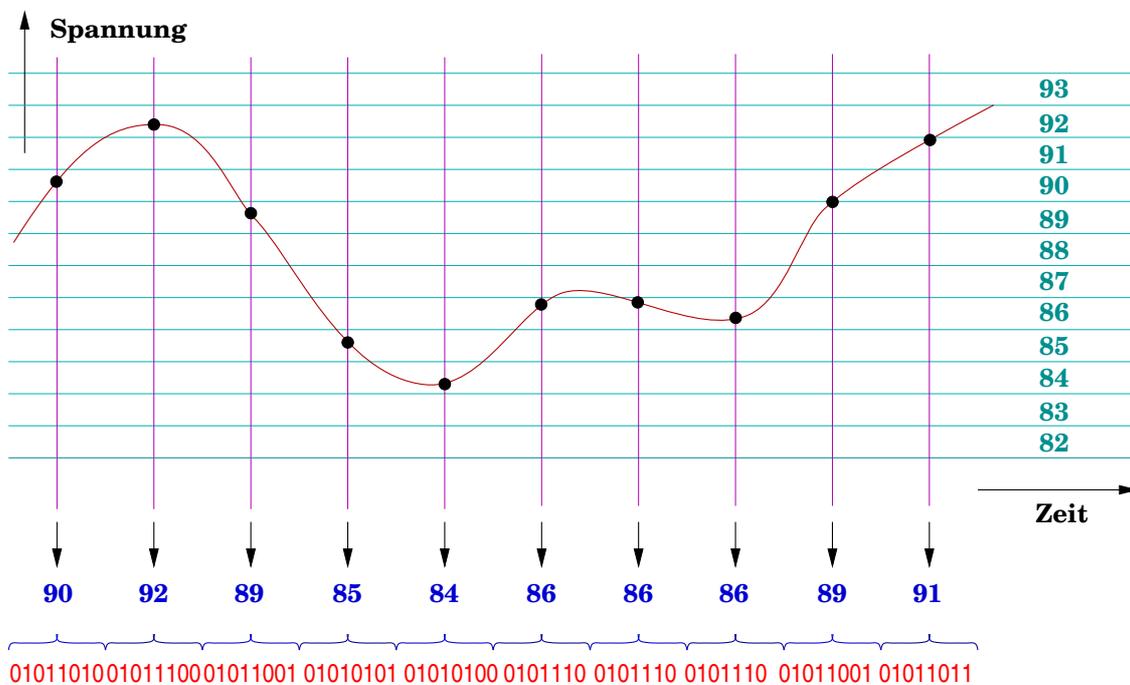


Abbildung 5.3: Digitalisierung. Umwandlung eines analogen, kontinuierlichen Signals in eine Folge von Binärzahlen.

$$0 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 89.$$

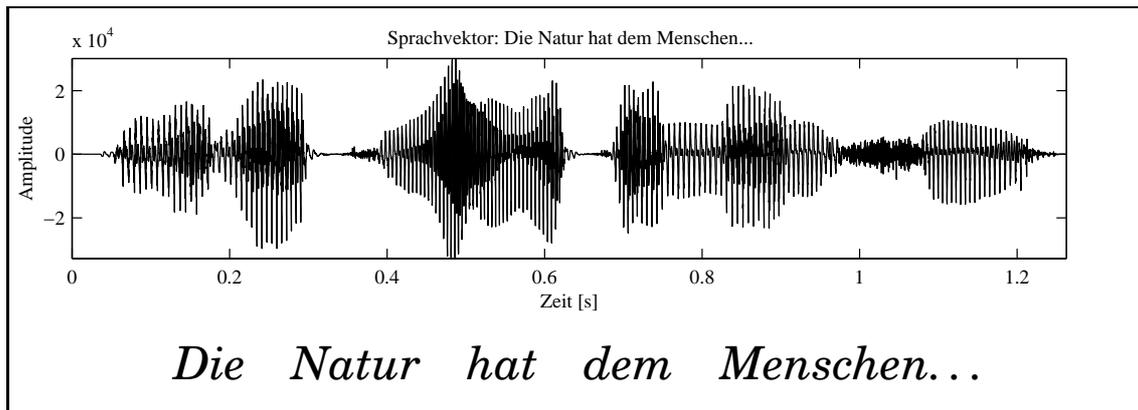
Es wird deutlich, dass durch diese Digitalisierung Informationen verloren gehen. Beispielsweise wird für die Abtastwerte 6 bis 8 (von links gezählt) die gleiche Intervallnummer 86 übermittelt wird, obgleich die analogen Werte zwar in dieses Intervall fallen, aber nicht gleich sind. Darüberhinaus geht natürlich auch die Information zwischen zwei Abtastpunkten (in Zeitrichtung betrachtet) verloren, d.h. aus zwei Signalproben kann nicht eindeutig geschlossen werden, ob das Signal dazwischen „relativ gerade verläuft“ oder aber große Schwingungen ausführt. Folglich kann das analoge Signal umso besser wiedergegeben werden, je feiner das Raster aus waagerechten und senkrechten Linien gewählt wird. Die Häufigkeit mit der regelmäßig Proben aus dem Signal entnommen werden, wird als *Abtastfrequenz* bezeichnet. Die Anzahl der Intervalle wird als *Quantisierung mit x Bit pro Abtastwert* bezeichnet. Eine 16 Bit-Soundkarte quantisiert also mit 16 Bit pro Abtastwert, einer Einteilung in $2^{16} = 65536$ verschiedenen Intervallen entsprechend. Der Einfluss der Abtastfrequenz und der Bits pro Abtastwert (also der Feinheit des Digitalisierungsrasters) auf die digitale Sprach- und Musikqualität wird uns später beschäftigen.

5.1.3 Fragen/Aufgaben

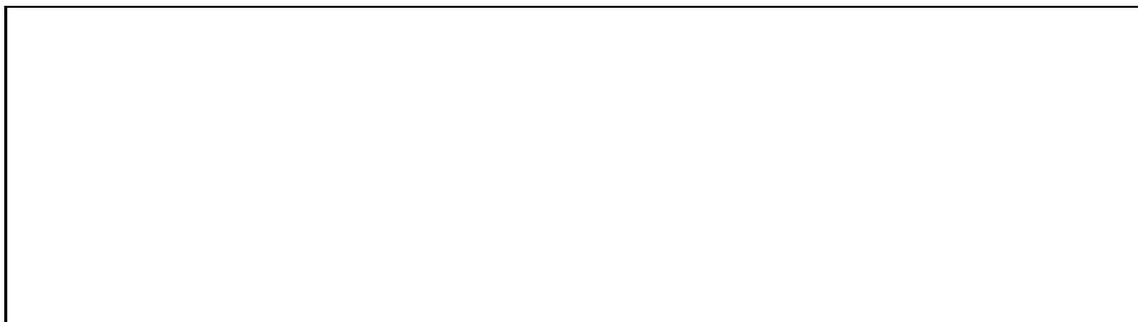
5.1.3.1 Warum können Computer nicht mit analogen Signalen arbeiten?



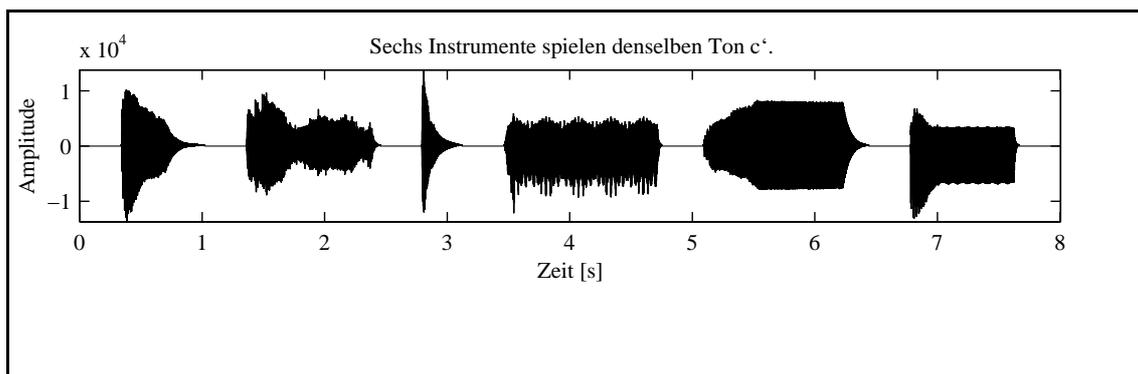
5.1.3.2 Ordnet den einzelnen Worten des Satzes unten die entsprechenden Abschnitte im Sprachsignal zu.



5.1.3.3 Schaut Euch das obige Sprachsignal an und überlegt Euch, warum es für den Computer schwierig sein könnte, menschliche Sprache zu verstehen!



5.1.3.4 In dem unteren Signal sind sechs Instrumente nacheinander zu sehen. Hört Euch die Instrumente an und schreibt ihre Namen unter die zugehörigen Signalabschnitte!



5.1.4 Ergebnisse

- Sprache und Musik zeigen deutliche Unterschiede in ihrer zeitlichen Struktur: Im Gegensatz zur Musik, die eine über den dargestellten Zeitabschnitt vergleichsweise konstante und regelmäßige Struktur aufweist, ist der Sprachabschnitt gleicher Dauer durch sich abwechselnde Abschnitte mit hoher Energie (großer Amplituden) und niedriger Energie (sowie Pausen) gekennzeichnet. Dadurch lässt sich eine Zuordnung zwischen den Signalabschnitten einseits und den entsprechenden Lauten der sprachlichen Äußerung anderseits finden.

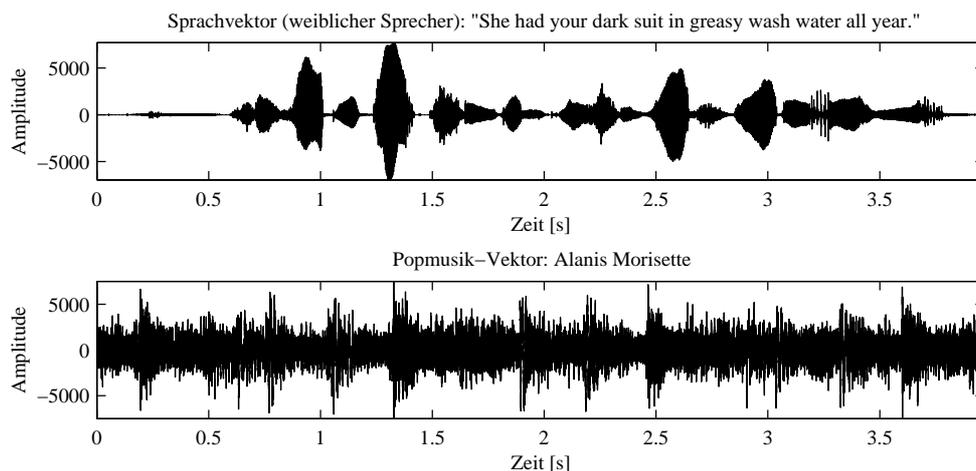


Abbildung 5.4: Beispiele für je einen digitalen Sprach- und Musikvektor.

- Sprache lässt sich in zwei Kategorien unterteilen:
 - in *stimmhafte Abschnitte*, die sich durch hohe Energie und eine regelmäßige, periodische Schwingung tiefer Frequenzen auszeichnen und
 - in *stimmlose Abschnitte*, die durch niedrigere Energie und eine hochfrequente und unregelmäßige („rauschartige“) Struktur gekennzeichnet sind.

Stimmhafte Laute werden durch Schwingungen der Stimmbänder erzeugt, stimmlose Laute durch kurzzeitige Verschlüsse oder Luftverwirbelungen im Mund- und Rachenraum. Vokale (wie „a“, „o“, „u“) sind rein stimmhaft, Konsonanten dagegen stimmlos („sch“, „t“, „k“) oder gemischt stimmhaft/stimmlos („m“, „d“, „g“).

- Die Signalverläufe von Instrumententönen weisen Ähnlichkeiten zur menschlichen Sprache auf. Offensichtlich haben (bei geübter Handhabung:) „wohlklingende“ Instrumente wie Steich- oder Blasinstrumente stimmhaften Charakter. Rhythmische Instrumente wie das Schlagzeug sind dagegen von stimmlosen Charakter. (Diese Analogie lässt sich leicht durch Imitation von Instrumente mit den Sprechorganen überprüfen.)

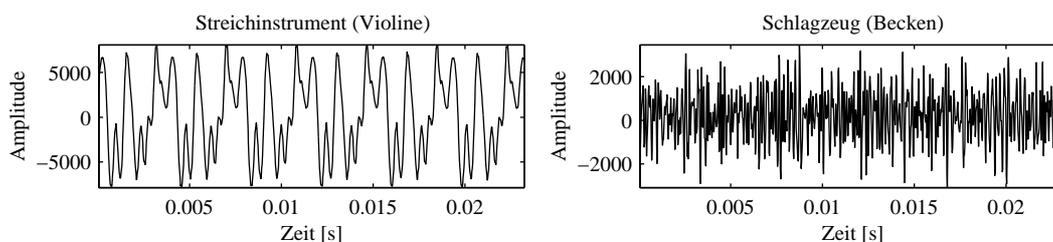


Abbildung 5.5: Ausschnitte aus dem Musiksignal einer Geige und eines Beckens.

5.2 Spektren von Sprache und Musik

5.2.1 Einleitung

In der Informationstechnik wird häufig davon Gebrauch gemacht, dass sich Signale in ihre einzelnen Frequenzanteile zerlegen lassen. Eine *Spektralanalyse* liefert die in einem Signalabschnitt enthaltenen Frequenzen und ihr jeweiliges *Gewicht*, d.h. die Amplitude und Phase, mit der die Frequenzkomponente im Signal vertreten ist. Die Auftragung der Gewichte über der *Frequenz* (also nicht mehr wie gewohnt über der *Zeit*) führt zu einer neuen, dem Zeitsignal gleichwertigen Darstellung: dem *Spektrum* des Signals. Ein solches (Amplituden-)Spektrum ist in der Abb.5.6 für den Beispielsatz *Der dumme Klang greift den Hund* angegeben. Diesem Spektrum lässt sich z.B. entnehmen, dass der gesprochene Satz sehr starke Anteile bei Frequenzen von 300 Hz bis 800 Hz hat (hohe Amplitudengewichte in diesem Frequenzbereich).

Die Spektralanalyse kann für beliebige digitale Daten mit dem Algorithmus der *Fast-Fourier-Transform* (FFT) durchgeführt werden, auf dem auch die MATLAB-Funktionen zur spektralen Untersuchung von Sprache und Musik in den folgenden Versuchen basieren.

Zum besseren Verständnis der Spektralanalyse soll durch ihre Umkehrung, die sog. *Signalsynthese*, gezeigt werden, dass die Beschreibung eines Signals durch sein Spektrum gleichwertig ist zu der (gewohnten) Beschreibung im Zeitbereich. Dazu wird zunächst ein Summensignal durch *Addieren* von Sinussignalen verschiedener Amplituden, Frequenzen und Phasen erzeugt und anschließend wieder durch Spektralanalyse in seine (nun wohlbekannten) Frequenzkomponenten zerlegt.

5.2.2 „Digitaler“ Sinus

Ein Sinussignal lässt sich ganz allgemein nach Abbildung 5.7 durch die Größen *Amplitude* A , *Frequenz* $f = 1/T$ und *Phase* φ beschreiben:

$$y_0(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi) \quad (5.1)$$

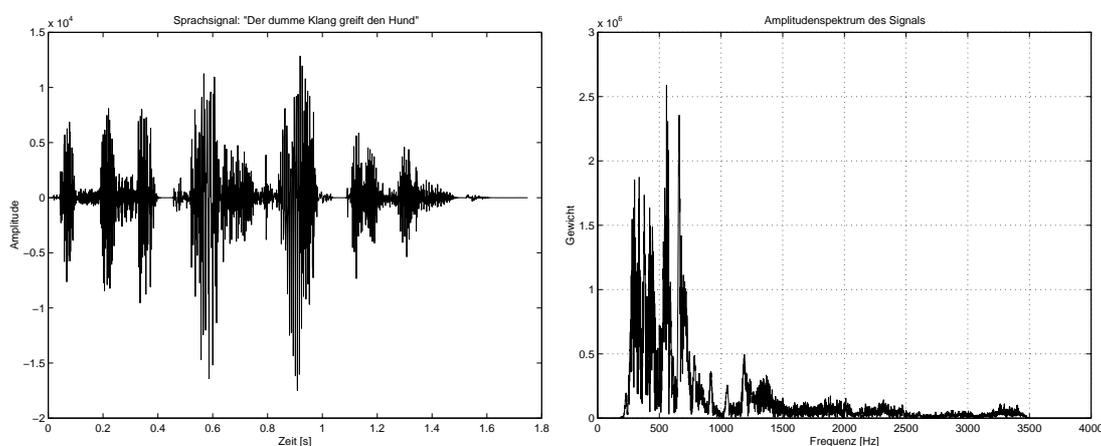


Abbildung 5.6: Sprachsignal im Zeitbereich (links) und Darstellung der in ihm enthaltenen Frequenzanteile im Spektrum (rechts).

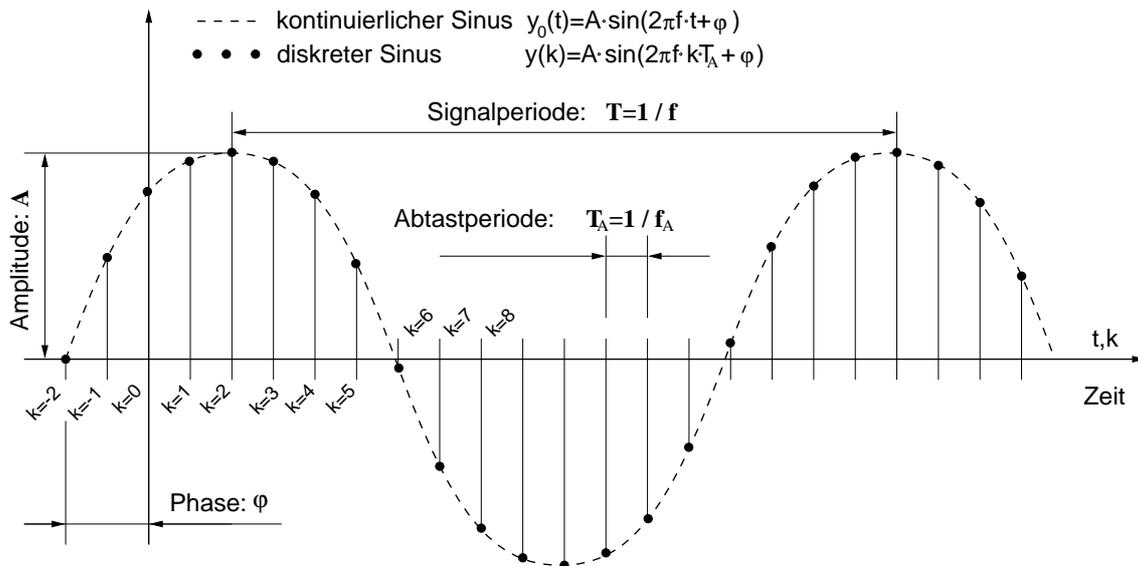


Abbildung 5.7: Kontinuierliches und abgetastetes (diskretes) Sinussignal. Amplitude A , Frequenz f und Phasenwinkel φ sind die drei kennzeichnenden Größen der Sinusfunktion.

Bei der Abtastung werden dem Signal zu den Zeiten $t = k \cdot T_A = k / f_A$ Proben entnommen, wobei T_A die Abtastperiode, f_A die Abtastfrequenz und k den Zeitindex der digitalen Daten, also den Index im Signalvektor angibt. Damit ergibt sich für einen „digitalen“ Sinus folgende Darstellung:

$$y(k) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f / f_A \cdot k + \varphi). \quad (5.2)$$

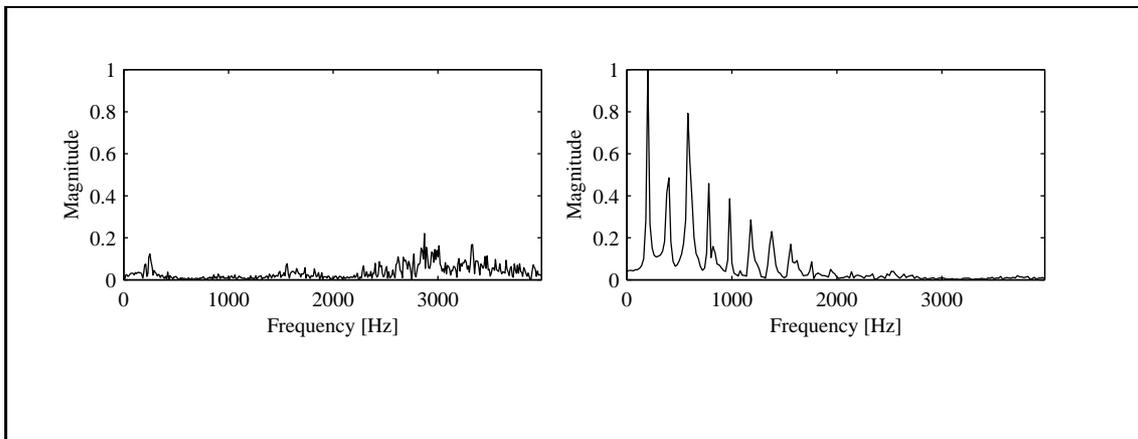
Natürlich kann der „digitale“ Sinus auch ohne Abtastung direkt im Rechner erzeugt werden.

5.2.3 Kurzzeitspektren

Die Spektralanalyse (also die Zerlegung eines Signals in seine Sinuskomponenten) lässt sich für ganz beliebige Signale, wie Sprache oder Musik, durchführen. *Sprache* besitzt für kurze Abschnitte bis zu etwa 20 ms (20 Tausendstel-Sekunden) konstante Charakteristika. Daher ist es üblich, Sprachdaten in Abschnitten von etwa dieser Länge (als sog. *Rahmen*) zu verarbeiten. Die Spektren zu diesen kurzen Signalabschnitten werden auch *Kurzzeitspektren* genannt und ermöglichen eine eingehendere Analyse der Eigenschaften von Sprache und Musik als sie im Zeitbereich möglich ist.

5.2.4 Fragen/Aufgaben

5.2.4.1 Welches Kurzzeitspektrum gehört zu einem stimmhaften Vokal und welches zu einem stimmlosen Konsonanten?



5.2.4.2 Bei welcher Frequenz liegt die charakteristische *Sprachgrundfrequenz* im rechten Kurzzeitspektrum?

5.2.5 Spektrogramme

Das *Spektrogramm* ermöglicht die Betrachtung von Sprache und Musik gleichzeitig in Zeit- und Frequenzbereich: Es stellt das Gewicht eines Spektralanteils in Abhängigkeit der Zeit und der Frequenz in Form von Farbabstufungen dar. Blaue Farbtöne bedeuten kleine Gewichte, rote Farbtöne hohe Gewichte. Wenn das Spektrogramm „senkrecht“ geschnitten wird, erhält man das Kurzzeitspektrum eines Rahmens zu einem *festen Zeitpunkt*. Ein „waagerechter“ Schnitt bei einer *festen Frequenz* dagegen zeigt den zeitlichen Verlauf dieser Frequenzkomponente. In der Abbildung 5.8 ist der Sprachvektor *She had your dark suit in greasy wash water all year* im Spektrogramm dargestellt.

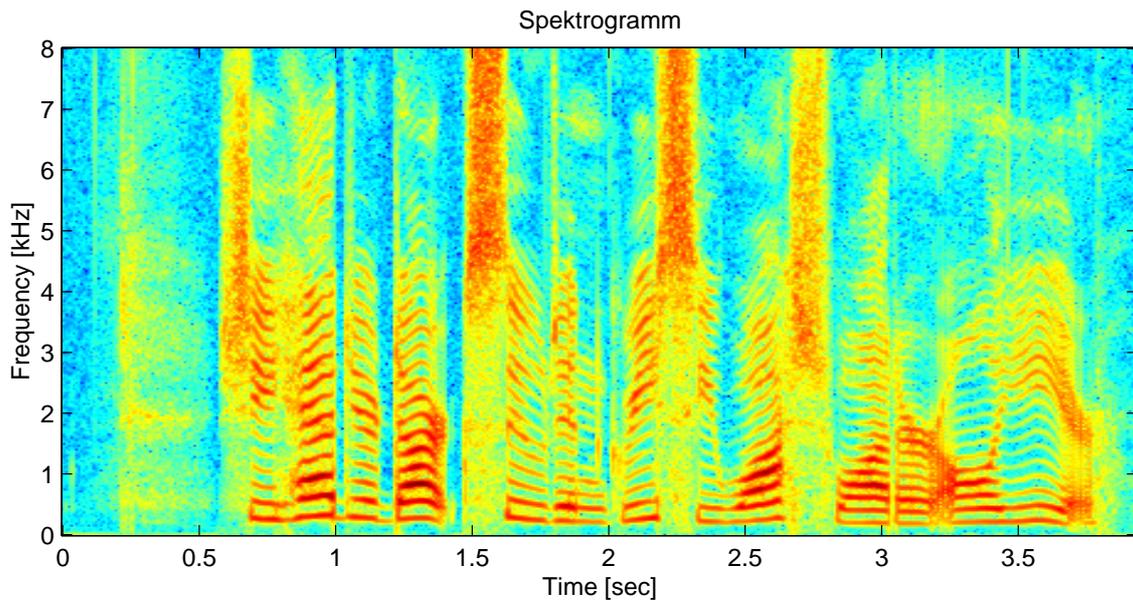


Abbildung 5.8: Spektrogramm des Testsatzes *She had your dark suit in greasy wash water all year.*

5.2.6 Ergebnisse

- Aus Sinussignalen lassen sich beliebige Signale zusammensetzen („*Signalsynthese*“), denen die zugrundeliegenden Sinussignale nicht mehr direkt anzusehen sind. Die Addition von den vier Sinussignalen in Abbildung 5.9 führt zu einem orgelähnlichen Ton.

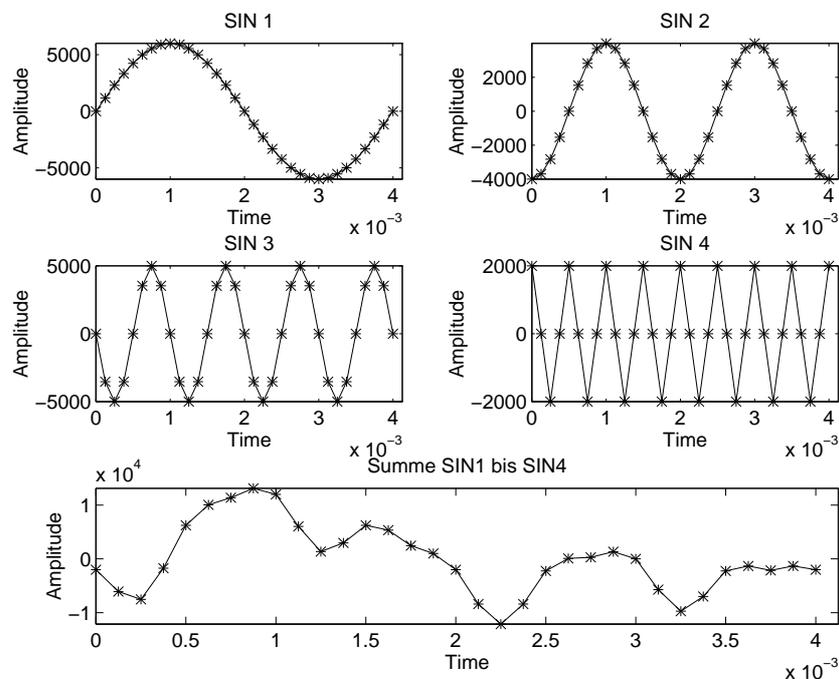


Abbildung 5.9: Addition von vier Sinussignalen verschiedener Frequenzen, Amplituden und Phasen führt z.B. zu einem orgelähnlichem Ton.

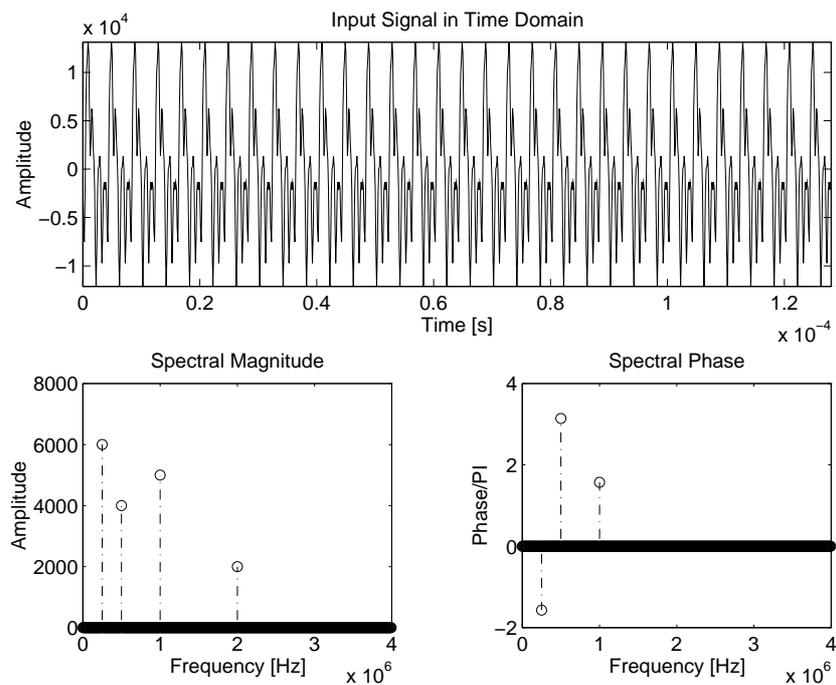


Abbildung 5.10: Spektralanalyse. Die vier im „Orgelton“ enthaltenen Frequenzkomponenten lassen sich in Form des Spektrums wiedergewinnen.

- Die in einem Signal enthaltenen Frequenzen mit ihren zugehörigen Gewichten (Amplitude, Phase) lassen sich durch Spektralanalyse mittels FFT-Algorithmus wiedergewinnen („Spektrum“). Abbildung 5.10 zeigt dies für das obige Beispiel des „Orgeltons“ bestehend aus vier Sinuskomponenten. Es können nur *relative* Phasenwinkel zwischen den Signalen bestimmt werden, da die absolute Phase vom Signalausschnitt abhängt, der zur Berechnung des Spektrums herangezogen wird.

- Stimmhafte und stimmlose Rahmen eines Sprachvektors lassen sich sehr deutlich im Spektrum unterscheiden (Abbildung 5.11). Stimmhafte Rahmen zeichnen sich durch eher niedrige Frequenzen („Berg liegt links im Spektrum“) und durch Linien (Spitzen) bei Vielfachen der sprechercharakteristischen *Sprachgrundfrequenz* aus. Stimmlose Rahmen haben starke Frequenzkomponenten bei höheren Frequenzen („Berg liegt eher rechts im Spektrum“) und keine ausgeprägte Linienstruktur an Vielfachen der Sprachgrundfrequenz. Grund hierfür ist die unterschiedliche Erzeugung von stimmhaften und stimmlosen Lauten im Sprechtrakt. Im Spektrogramm 5.8 lässt sich für eine gesamte sprachliche Äus-

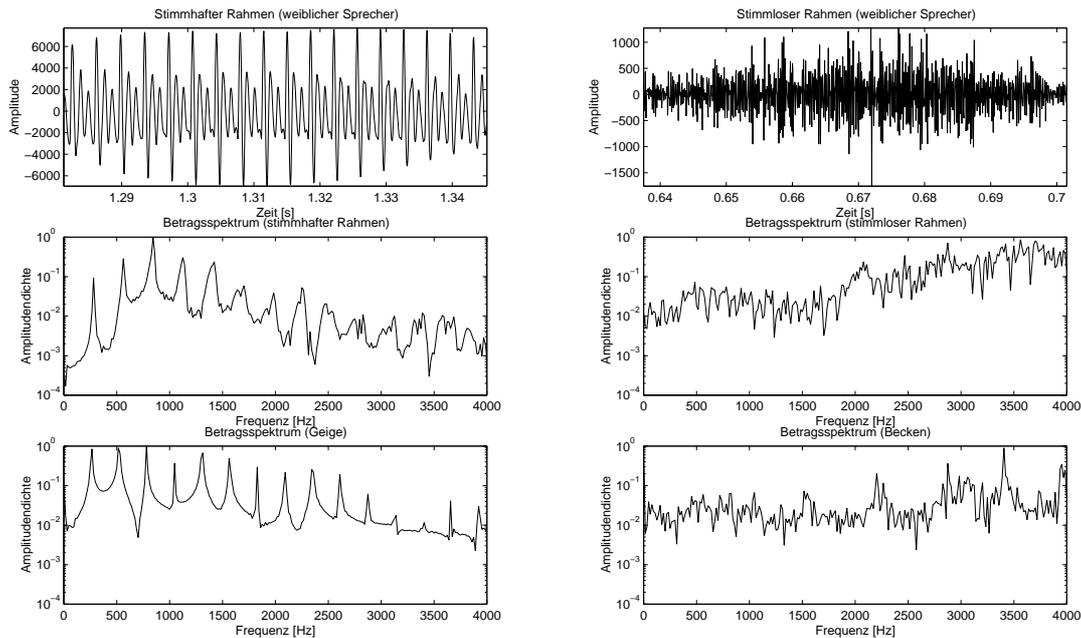


Abbildung 5.11: Sprachrahmen im Zeitbereich (oben) und zugehörige Spektren (mitte): Rahmen mit stimmhafter (links) und stimmloser (rechts) Anregung. Unten: Stimmhaftes Spektrum der Geige (links) und stimmloses Spektrum des Beckens (rechts).

serung der Wechsel von stimmhaften („Linienstruktur bei niedrigen Frequenzen“) und stimmlosen Abschnitten („Berge bei hohen Frequenzen“) gut beobachten.

- Eine spektrale Untersuchung von Musikinstrumenten zeigt, dass ein Ton nicht aus einer Frequenzkomponente besteht, sondern aus einer ganzen Vielzahl von Frequenzkomponenten, insbesondere an Vielfachen des Grundtones („Oberwellen“). Für den charakteristischen Klang eines Instrumentes sind die Lage und Intensität der Oberwellen bestimmend. Das Spektrogramm 5.12 zeigt diese unterschiedliche Verteilung der Oberwellen für die Instrumente: Klavier, Panflöte, Xylophon, Akkordeon, Geige und Trompete.
- Auch im Spektrum zeigt sich die Verwandtschaft zwischen „klingenden“ Instrumenten, wie Klavier, Geige, . . . und stimmhaften Abschnitten von

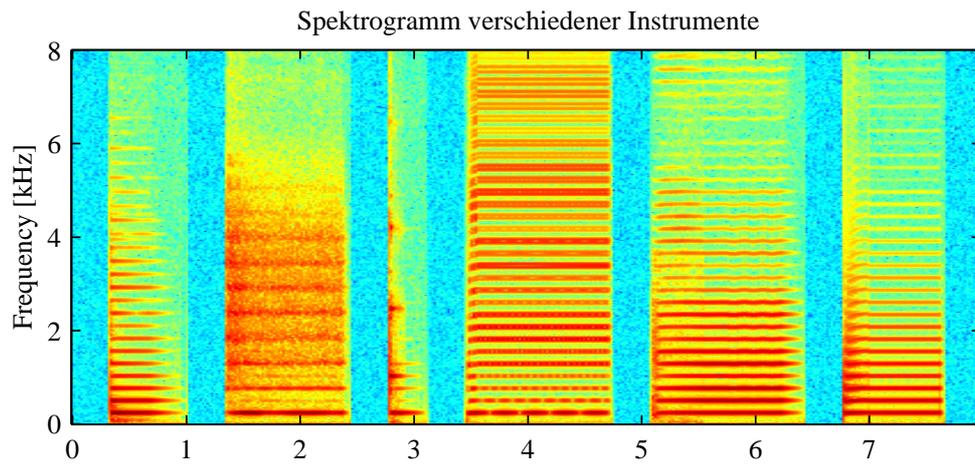


Abbildung 5.12: Spektrogramm von verschiedenen Instrumenten. Entscheidend für den Klang eines Instruments sind seine Oberwellen.

Sprache einerseits, und zwischen dem Schlagzeug und stimmlosen Sprachabschnitten andererseits. In der Abbildung 5.11 sind das „stimmhafte“ Spektrum der Geige und das „stimmlose“ Spektrum des Beckens gegenübergestellt.

- Der Zusammenhang zwischen „Noten“ und Frequenzen ist nichtlinear (Spektrogramm in Abb.5.13). Eine Oktave entspricht einer Verdopplung der Frequenz. Bei einem Halbtonschritt erhöht sich die Frequenz um den Faktor $\sqrt[12]{2}$.

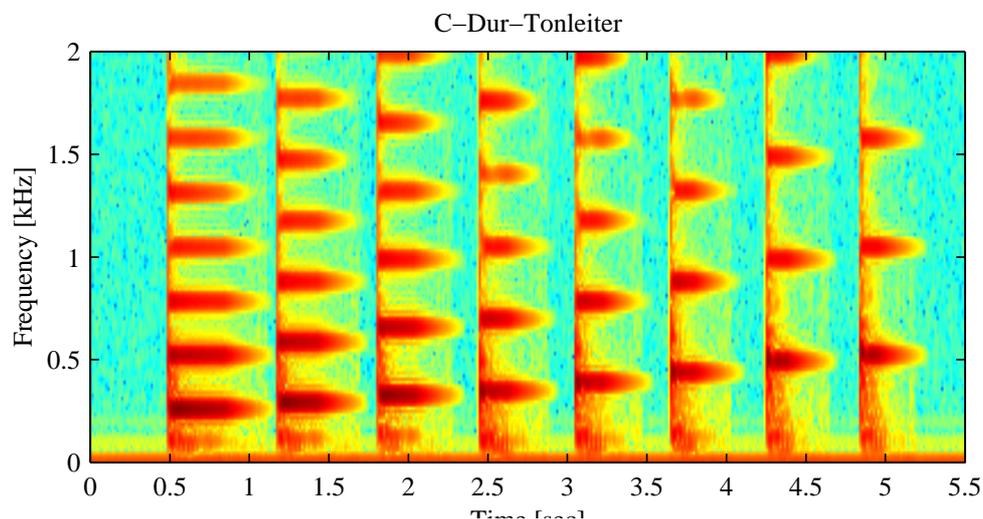


Abbildung 5.13: Spektrogramm der C-DUR-Tonleiter, gespielt auf einem Klavier.

5.3 Anwendungen der digitalen Sprach- und Signalverarbeitung

5.3.1 Einleitung

In diesem Teil sollen Anwendungen der digitalen Sprach- und Signalverarbeitung vorgestellt werden. Beispielhaft werden dazu

- die **Modulation**, zur Anpassung von Signalen an die Übertragungstrecke,
- die **Codierung** zur Datenkompression von Sprach- und Musikdaten,
- die **Geräuschunterdrückung** zur Beseitigung von Hintergrund- und Störgeräuschen in Sprachdaten und
- ein Beispiel aus der **Psychoakustik** (Maskierung)

vorgestellt.

5.3.2 Modulation

Modulation ermöglicht die Anpassung von Signalen an die Übertragungstrecke (es wird oft auch vom Übertragungs„kanal“ gesprochen). Was ist darunter zu verstehen? Beispielsweise erfordert die Übertragung von Sprache über den Funkkanal (Mobilfunk, Satellitenkommunikation) Frequenzen im Bereich mehrerer Megahertz (1.000.000 Hz) bis hin zu einigen Gigahertz - (1.000.000.000 Hz). Sprache und Musik hingegen enthalten aber nur wesentliche Frequenzanteile bis zu einigen Kilohertz (1.000 Hz). Modulation „verschiebt“ die Frequenzen von Sprache/Musik in einen Frequenzbereich, der für die Übertragung geeignet ist.

Weiterhin kann Modulation zur besseren Ausnutzung eines Kanals angewandt werden, wenn die „Aufnahmefähigkeit“ des Kanals größer ist als für ein einzelnes Sprach- oder Musiksignal benötigt wird. So wird durch Modulation erreicht, dass beispielsweise mehrere hunderttausend Menschen gleichzeitig über eine einzige Glasfaser Telefonate führen können (ohne auch nur etwas von den jeweils anderen Teilnehmern zu ahnen).

Das Prinzip der Modulation soll nur kurz veranschaulicht werden. Da sich Signale aus einer Überlagerung von Sinus- bzw. Cosinussignalen darstellen lassen, wird das folgende Cosinussignal stellvertretend für das gesamte Spektrum eines beliebigen Nutzsignals (wie Sprache/Musik) betrachtet:

$$y(t) = A \cdot \cos(\omega_N \cdot t), \quad \text{mit } \omega_N = 2\pi f_N. \quad (5.3)$$

Wenn dieses Signal nun mit einem Cosinus einer (meist wesentlich höheren) Frequenz Ω_T multipliziert wird, ergeben sich nach dem Additionstheorem

$$\cos(x) \cdot \cos(y) = \frac{1}{2} [\cos(x - y) + \cos(x + y)] \quad (5.4)$$

zwei Cosinussignale der Frequenzen $(\Omega_T - \omega_N)$ und $(\Omega_T + \omega_N)$:

$$y_{mod}(t) = \cos(\Omega_T t) \cdot A \cdot \cos(\omega_N t) = \frac{A}{2} [\cos((\Omega_T - \omega_N)t) + \cos((\Omega_T + \omega_N)t)]. \quad (5.5)$$

Diese Multiplikation des Nutzsignals mit $\cos(\Omega_T t)$ wird als *Modulation*, Ω_T als *Modulations- oder Trägerfrequenz* bezeichnet. Der Vorgang der Modulation wird in der folgenden Abbildung nochmals (für das gesamte Spektrum des Nutzsignals) im Frequenzbereich betrachtet:

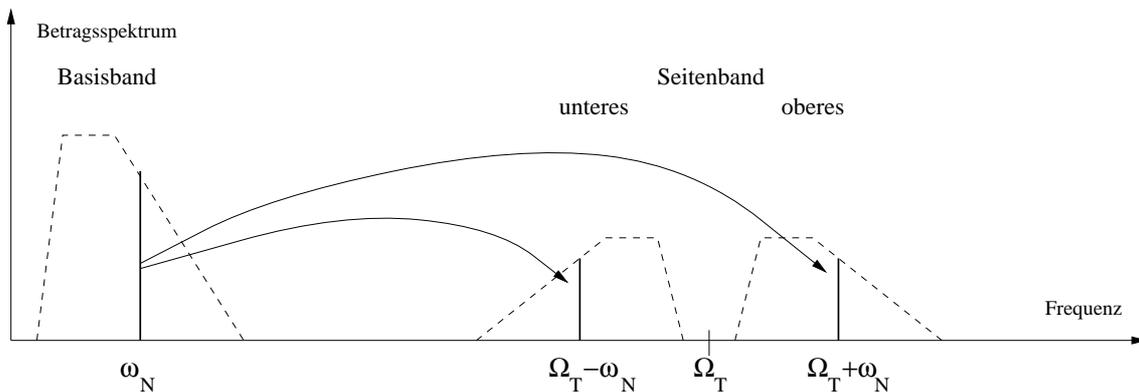


Abbildung 5.14: Frequenzbereichsbetrachtung der Modulation eines Nutzsignals durch Multiplikation mit $\cos(\Omega_T t)$.

Offensichtlich steht das Spektrum des Nutzsignals nach der Modulation in zwei neuen Frequenzbereichen (bestimmt durch die Trägerfrequenz Ω_T) zur Verfügung – einmal in einer rein verschobenen Version und einmal in einer „gekippten“ und verschobenen Version. Die gekippte Version wird *unteres Seitenband*, die verschobene Version *oberes Seitenband* genannt. Beide Seitenbänder enthalten die *volle* Information des Nutzsignals, so dass nur eines der Bänder übertragen werden braucht (das nicht zu übertragende Band wird durch eine Bandpassfilterung entfernt). Es wird, je nach übertragenem Band, von Unter- oder Oberseitenbandmodulation gesprochen. Wenn nun jedem Telefonteilnehmer eine andere geeignete Trägerfrequenz zugeordnet wird, dann können die Sprachspektren der einzelnen Teilnehmer nebeneinander ohne Überlappung aneinander gereiht werden (Frequenzmultiplex), d.h. ohne eine gegenseitige Beeinflussung übertragen werden. Damit die Sprache/Musik wieder verständlich wird, müssen die Spektren der einzelnen Teilnehmer nach der Übertragung wieder ins sog. Basisband (also zu den ursprünglichen Frequenzen hin) *demoduliert* werden. Dies erfolgt in gleicher Weise wie bei der Modulation durch Multiplikation mit $\cos(\Omega_T t)$ und geeignete Filterungen.

5.3.3 Codierung

Eine weitere wichtige Anwendung ist die *Datenkompression* durch Codierung. Eine Kompression wird erforderlich, da digitale Daten schnell riesigen Umfang annehmen können. Wenn man beispielsweise an die Compact Disc (CD) denkt, die mit einer Datenmenge von 650 MByte (einst also mehrere Festplatten füllend) nur 74 Minuten Musik zu speichern vermag, und diese riesige Datenmenge mit den im Vergleich dazu kleinen Übertragungsraten im

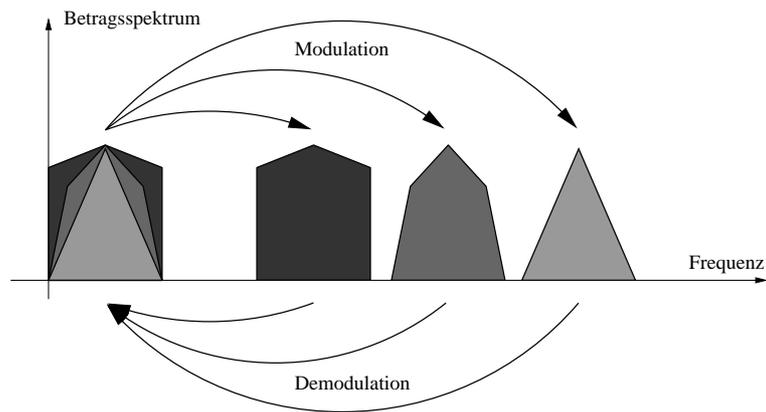


Abbildung 5.15: Gleichzeitige Übertragung mehrerer Sprecher über einen Kanal durch Modulation mit verschiedenen Trägerfrequenzen.

Internet vergleicht, wird klar, dass Daten (unter weitgehender Beibehaltung der Musik- und Sprachqualität) für den Datenaustausch komprimiert werden müssen. Bekannte Codierer sind beispielsweise der GSM-Codec für mobile Kommunikation und die MPEG-Codecs zur Codierung von Bild-, Sprach- und Musikdaten für Internetanwendungen.

Kann die Datenrate denn nicht durch Reduzierung der Abtastfrequenz und/oder der Anzahl der Quantisierungsstufen (siehe Abbildung 5.16) verkleinert werden? Nein, denn eine nennenswerte Datenreduktion durch Senkung der Ab-

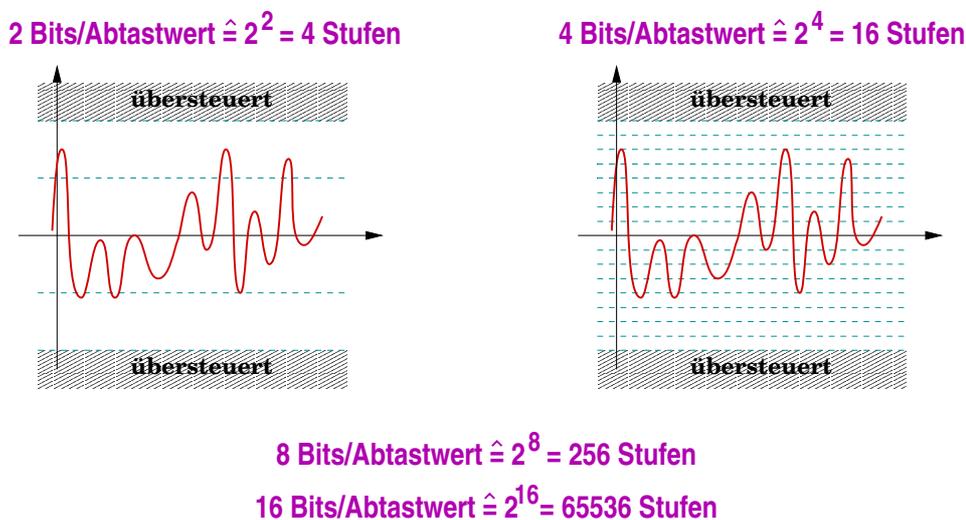


Abbildung 5.16: Datenreduktion durch Senkung der Bits pro Abtastwert (Anzahl der Quantisierungsstufen) führt zu höheren Quantisierungsfehlern.

tastrate oder der Bits pro Abtastwert ist ohne großen Qualitätsverlust nicht möglich. Möglich ist dies jedoch durch Codierung, die bezogen auf den Bereich der Sprache die *Nichtlinearität des Gehörs* und die *Kurzzeitstationarität von Sprache* ausnutzt. Ersteres hat zur Folge, dass Sprache Informationen enthält, die das Ohr gar nicht wahrnehmen kann. Diese können also entfernt werden, ohne dass der Hörer davon etwas merkt. Das zweite bedeutet, dass

Sprache über kleine Abschnitte (bis zu ca. 20 ms) gleiche Eigenschaften besitzt. Wenn dies erkannt wird, kann der gesamte Abschnitt durch dieselben Parameter beschrieben werden und braucht nicht vollständig übertragen werden.

5.3.4 Geräuschreduktion

Sprache oder andere Nutzsignale liegen oft nicht in reiner Form vor, sondern sind Störungen ausgesetzt, die die Verständlichkeit z.T. erheblich beeinträchtigen können. Beispielsweise wird bei einem Telefongespräch über eine Freisprecheinrichtung in einem fahrenden Auto die Sprache durch Motor- und Windgeräusche gestört. Aufgabe der *Geräuschreduktion* ist es, diese dem Sprachsignal überlagerten Störungen im digitalen Datenstrom zu entfernen. Diese wird insbesondere bei der automatische Spracherkennung („dem PC diktieren“, sprachgesteuerte Navigationssysteme im Auto) erforderlich. Die der Geräuschreduktion zugrunde liegende Idee ist es, die Eigenschaften der Störung aus dem gestörten Sprachsignal (z.B. in Sprachpausen) zu schätzen und von dem gestörten Signal zu subtrahieren.

5.3.5 Psychoakustik

Das Gehör besitzt eine Reihe von (nichtlinearen) Eigenschaften, die beispielsweise bei der Codierung von Sprache (s.o.!) genutzt werden können. So wird eine Verdoppelung der *Frequenz* eines Tones *nicht* als Verdopplung der *Tonhöhe* und zwei Töne gleichen Schalldrucks, aber unterschiedlicher Frequenzen, nicht als gleich laut empfunden.

Ein Effekt, der im Rahmen eines Schülerbesuchs an der TF untersucht werden kann, ist die in Abbildung 5.18 skizzierte *Maskierung*. Ein Testschall (*Maskierer* genannt), der beispielsweise nur eine Frequenzkomponente bei 1 kHz enthält (reiner Sinuston), sorgt dafür, dass Frequenzkomponenten knapp unter- und oberhalb von 1 kHz vom Gehör nicht mehr so gut wahrgenommen werden können, d.h. das Gehör wird in diesem Bereich „etwas taub“. Ein Schall in der Nähe des 1-kHz-Tones muss also wesentlich lauter sein, wenn er von Gehör wahrgenommen werden soll, als wenn er nur alleine auftritt.

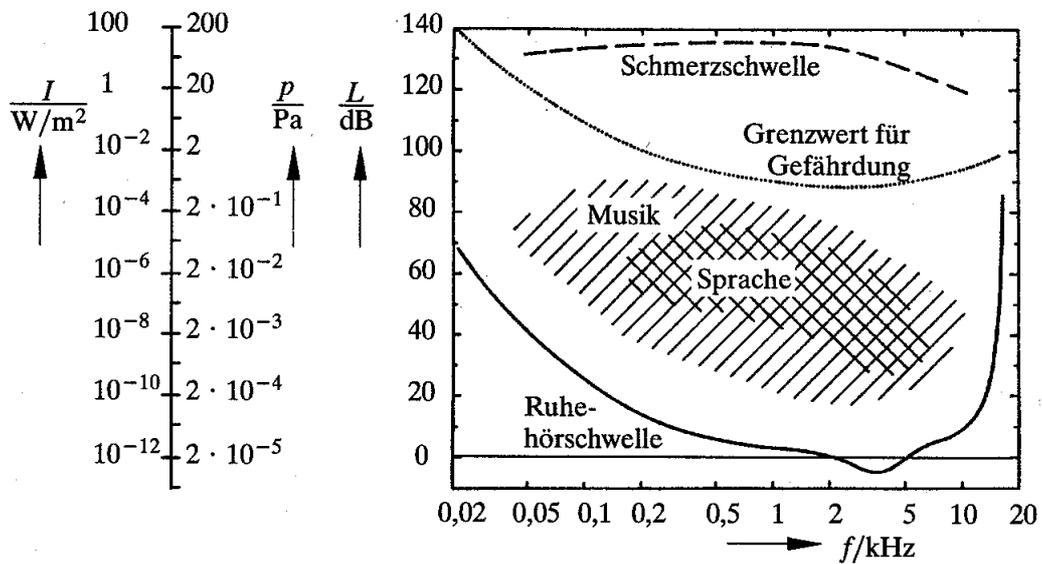


Abbildung 5.17: „Hörfläche“. Frequenzabhängiges Lautstärke-Empfinden des menschlichen Gehörs.

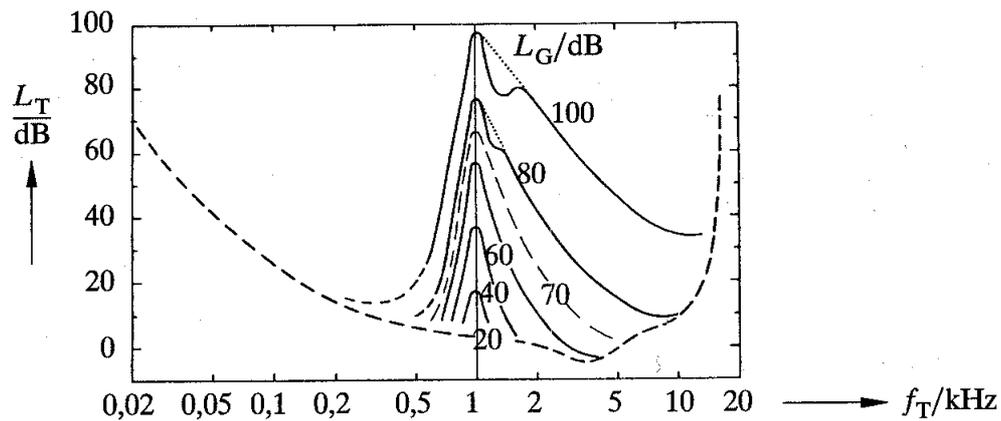


Abbildung 5.18: Reduzierung der Empfindlichkeit des Gehörs im Frequenzbereich um einen Maskierer.