

Staatsexamen Herbst 1993

Schriftliche Hausarbeit

Thema:

**Computerunterstützte
Fourieranalyse und Synthese im
Physikpraktikum**

von:

Christian Bienmüller

Prüfer:

Priv. Doz. Dr. Ossau

Inhaltsübersicht

Einleitung.....	6
1. Physikalische Bedeutung der Fourierentwicklung.....	7
2. Mathematische Grundlagen der Fourierentwicklung.....	10
3. Computereinsatz im Praktikum	19
4. Neue Fragestellungen im Praktikumsversuch.....	22
5. Realisierung des Programms.....	26
6. Die Elektronik.....	32
7. Schlußbemerkungen und Erklärung.....	35
Literaturverzeichnis	36
Anhang A: Programmanleitung	37
Anhang B. Beispielversuch.....	58

In den Kapiteln 1 und 2 werden die allgemeinen Grundlagen der Fourierentwicklung und ihrer Anwendung erörtert. Im Kapitel 3 wird der Computereinsatz begründet und es werden die numerischen Methoden erläutert. Das vierte Kapitel stellt die Änderungen und Inhalte des Praktikumsversuchs vor. Die Kapitel 5 und 6 gehen darauf ein, wie die Arbeit durchgeführt wurde.

Zur Bedienung des Programms steht für Studenten eine Bedienungsanleitung im Anhang A zur Verfügung, der Anhang B führt einen Beispielversuch mit Ausdrucken vor.

Für den Betreuer des Praktikums steht außerdem ein "Technisches Handbuch" zur Verfügung. Dieses enthält eine Anleitung für Betreuer, das Programmlisting mit Erläuterung sowie Schaltplan der Elektronik und Datenblatt der Meßkarte.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	6
1. Physikalische Bedeutung der Fourierentwicklung.....	7
1.1. In der Mechanik	7
1.2. In der Akustik.....	8
1.3. In der Elektronik	9
2. Mathematische Grundlagen der Fourierentwicklung.....	10
2.1. Berechnung der Koeffizienten	10
2.2. Beliebige Periodenlängen.....	13
2.3. Verhalten der Fourierkoeffizienten bei großen n	14
2.4. Weitere Eigenschaften der Fourierreihe.....	15
3. Computereinsatz im Praktikum	19
3.1. Computer als Werkzeug in der Physik.....	19
3.2. Meßprinzip	20
3.3. Numerische Methoden	20
4. Neue Fragestellungen im Praktikumsversuch.....	22
4.1. Rechteckspannung.....	23
4.2. Messungen mit der Netzspannung	23
4.3. Vergleich zweier Sinusspannungen	23
4.4. Messung mit dem Mikrofon	24
4.5. Mathematische (Modell-) Versuche.....	24
4.6. Wiedergabe von Signalen	25
5. Realisierung des Programms.....	26
5.1. Programmiersprache	26
5.2. Benutzeroberfläche als zentrales Element des Programms.....	26
5.3. Unterstützung von Standards	27
5.4. Hilfestellungen durch das Programm.....	29
5.5. Objektorientierte Programmierung	29
5.6. Bedienung mit Maus und Tastatur	30
5.7. Anleitung zum Programm	30
5.8. Dateiformate.....	31
6. Die Elektronik.....	32
6.1. Meßkarte	32
6.2. Anschlußbox	33
6.3. Universeller Eingang mit Schutzschaltung	33

6.4. Spezielle Aufbauten für einzelne Versuche	34
7. Schlußbemerkungen und Erklärung.....	35
Literaturverzeichnis	36
Anhang A: Programmanleitung	37
A.1. Kurzanleitung	38
A.2. Bedienungsanleitung	39
A 2.1. Zum Verständnis der Programmfunktionen	39
A 2.2. Die Befehlsauswahl und Menübedienung	39
A 2.3. Das einfache Menü des Programms	41
A 2.4. Das vollständige Menü des Programms	49
A 2.5. Bedienung der Auswahlbox	54
A.2.6. Stichwortverzeichnis zur Anleitung	56
Anhang B. Beispielversuch.....	58
B.1. Die Untersuchung einer elektrischen Baß-Gitarre.....	58
B.2. Untersuchungen an einer Saite	60
B.3. Auswertung der Messungen	69
B.4.Überprüfung der Qualität des Mikrophons und des Verstärkers.....	70

Inhalt des Technischen Handbuchs

Anhang C: Betreuerhandbuch

Anhang D: Programmbeschreibung

 Allgemeine Funktion

 Beschreibung der Units

 Alphabetische Auflistung der Prozeduren

Anhang E: Listing des Programms

Anhang F: Schaltplan

Anhang G: Kopie der Meßkartenunterlagen

Einleitung

Der bisherige Praktikumsversuch

Im physikalischen Grundpraktikum wurde der Versuch Fourieranalyse mit einem Analogfilter durchgeführt. Man legte dazu ein periodisches Signal an und versuchte durch Ändern der Resonanzfrequenz des Filters Frequenzanteile im Signal zu finden und zu messen. Bei der Fouriersynthese wurden Amplituden von Sinusschwingungen mit Potentiometern eingestellt, die Phasenbeziehung mit Schiebeschaltern geändert und dann alle Schwingungen überlagert.

Probleme

Das Einstellen der Filterfrequenz war allerdings langwierig und fehlerträchtig, das Verändern der Phasen und Amplituden zur Synthese unhandlich und ungenau. Bei diesem Vorgehen hatte der Praktikant mehr Probleme mit diesen und anderen Tücken der Geräte, als mit der Physik. Dies kann bei Standardgeräten (wie Oszilloskopen, Frequenzgeneratoren...) sinnvoll sein, da der Student mit den Geräten vertraut werden soll. Andererseits sind die Geräte in diesem Versuch nicht gerade schwer verständlich, sondern eher unhandlich. Die Bedeutung der Fourierzerlegung ist zu wichtig, um beim Verständnis Kompromisse einzugehen. Also war eine Verbesserung notwendig.

Mit dieser Zulassungsarbeit wird nun der Praktikumsversuch auf Messung und Auswertung mit dem Computer umgestellt. Dabei sollen folgende Kriterien im Vordergrund stehen:

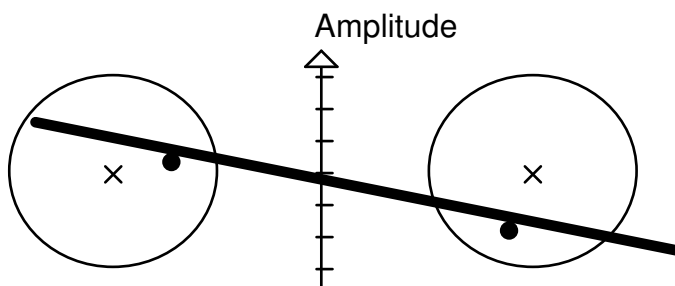
- Leichte Bedienbarkeit, um die Hemmschwelle zum Computer zu überwinden und eine schnelle Einarbeitung zu ermöglichen,
- vielfältige Analysemöglichkeiten (verschiedene Signale mit jeweils charakteristischen Eigenschaften),
- Absicherung des Programms und der Elektronik gegen Fehlbedienungen,
- Aufzeigen neuer Möglichkeiten im Praktikum.

1. Physikalische Bedeutung der Fourierentwicklung

Jede mechanische, akustische oder elektrische Schwingung, die durch das Zusammensetzen von harmonischen Schwingungen entsteht, kann mit Hilfe einer Fourierreihe beschrieben werden.

1.1. In der Mechanik

Man kann mechanische Schwingungen addieren. Eine Möglichkeit ist beispielsweise die Auslenkung durch zwei Exzenter, die sich mit unterschiedlicher Winkelgeschwindigkeit und Phase drehen. Dazu lenken beide Exzenter einen auf ihnen liegenden Stab gemeinsam aus. In der Mitte, zwischen den Exzentern, ist nun die Auslenkung halb so groß wie die Summe der einzelnen Exzenterauslenkungen. Dieser Versuch entspricht einer mechanisch durchgeführten Fouriersynthese. Die Frequenzen der gewünschten Schwingungen entsprechen den Winkelgeschwindigkeiten und die Amplituden den Radien der Exzenter.



Amplitudenaddition mit Exzentern

Mechanische Schwingungen lassen sich auch mechanisch in ihre Frequenzanteile zerlegen. Bekannt sind die Zungenfrequenzmesser (von Fourier¹ entwickelt), die z.B. zur Kontrolle der Netzfrequenz eingesetzt werden. Der Apparat besteht aus einer Reihe von verschiedenen langen Metallzungen mit unterschiedlichen, benachbarten Resonanzfrequenzen. Die Halterung der Zungen wird nun zum Schwingen gebracht. Diejenige Zunge, deren Resonanzfrequenz in der Schwingung vorkommt, gerät in eine Resonanzschwingung. Die Resonanzschwingung ist sichtbar. An einer Skala über den Zungen kann man nun die Frequenz ablesen. Man ist zwar auf eine geringe Zahl möglicher Frequenzen beschränkt, diese werden aber simultan gemessen.

¹Jean-Baptiste Joseph Baron de Fourier, *21.3.1768 Auxerre, †16.5.1830 Paris, einer der bedeutendsten Mathematiker des 19. Jahrhunderts, 1789 Professur, 1794 Lehrstuhl f. Mathematik, 1789 Mitglied Napoleons Kulturmission nach Ägypten, danach Präfekt des Départements Isère, 1816-1830 führendes Mitglied der Académie Française.

Math. Studien über Ebbe & Flut, Tonschwingungen, „Analytische Theorie der Wärme“ (Wärmeleitung), dann Forschungsarbeit über die Entwicklung periodischer Funktionen durch trigonometrische Reihen.

1.2. In der Akustik

Die größere Bedeutung der Fourieranalyse liegt in akustischen Betrachtungen:

Ein dem Zungenfrequenzmesser ähnlicher mechanischer Analysator ist nach Helmholtz unser Ohr. Die Schallwellen erregen feine Härchen (Haarzellen). Jede dieser Zellen kann eine Nervenfasern erregen. Das Bündel aus Nervenfasern (Hörnerv) führt vom Ohr zum Gehirn. Der Eindruck der einzelnen Nervenerregungen führt zu unserem Höreindruck.

Im Ohr wird also eine Analyse der eintreffenden Schwingungen vorgenommen. Die einzelnen Frequenzanteile werden getrennt wahrgenommen.²

Nach dem Höreindruck beurteilt man die Schwingungen. Man unterscheidet zwischen Ton, Klang, Geräusch und Knall.

Der Ton ist eine einzelne harmonische Schwingung (umgangssprachlich "Sinuston"). Wenn mehrere Töne in einem harmonischen, d.h. ganzzahligen, Verhältnis zueinander stehen, so erhält man einen Klang. Alle Schwingungen haben dann Frequenzen, die Vielfache einer gemeinsamen sogenannten Grundfrequenz sind.³

Dabei muß der sogenannte Grundton nicht unbedingt selber auftreten. Die meisten Kopfhörer "betrügen" den Hörer um die niedrigen Frequenzen. Das Gehirn interpretiert aber das Zusammenspiel der Obertöne als vollständige Information, so daß der fehlende Grundton nicht bemerkt wird.⁴

Wenn mehrere Töne unharmonisch und zeitlich veränderlich auftreten, so nennt man dies ein Geräusch. Im Gegensatz zu Ton und Klang ist ein Geräusch nicht periodisch.

Die Klangfarbe

Die Klangfarbe des Gehörten hängt vom Zusammenwirken der Obertöne ab. So klingt eine obertonarme Flöte bei demselben Grundton (z.B. beim Kammer-a) ganz anders als eine obertonreiche Geige.

Nach Helmholtz ist dieses Zusammenwirken unabhängig von den Phasenbeziehungen zwischen den einzelnen Tönen. Damit beschreibt ein Intensitätsspektrum⁵ den Höreindruck vollständig.

Auf die Schwingungen von Saiten gehe ich im Beispielversuch (Anhang B.) weiter ein.

Die Schallausbreitung

Bei der Ausbreitung von Schall in Platten durch BiegeWellen tritt Dispersion auf, d.h. Töne höherer Frequenz breiten sich mit höherer Geschwindigkeit aus. Dabei ist die Phasengeschwindigkeit V proportional zur Wurzel aus der Frequenz f^6 .

² Siehe [11] Seite 182 und [9], Stichwort "Ohr" Seite 1181; Zur sonstigen Funktion des Ohrs: [7] Seiten 504 f

³ vgl. [11] Seite 488 ff

⁴ [10] Seite 291

⁵ [7] Seiten 507

⁶ [7] Seiten 502 f

$$V \sim \sqrt{f}$$

Es gibt einige interessante Effekte die darauf beruhen, daß die vielfältigen Frequenzanteile eines Knalls (z.B. mit der Fourieranalyse zu ermitteln) nacheinander gehört werden:

Ein auf einen gefrorenen See geworfener Stein erzeugt ein pfeifendes Geräusch. Man hört, gerade in größerer Entfernung, zuerst hohe und dann niedrigere Frequenzen.

Ein weiteres Beispiel ist das Anschlagen einer langen Stange.⁷

Immer sind diese Phänomene leicht zu beschreiben, wenn man den auftretenden Knall als Frequenzgemisch betrachtet. Genau dies geschieht aber in der Fourierdarstellung der zugehörigen Schwingung.

1.3. In der Elektronik

In der Elektronik findet man bei den meisten Schwingungen auch die Ableitung bzw. das Integral der Schwingung wieder. Da das Differenzieren bzw. Integrieren einer Fourierreihe sehr leicht ist, kann man ohne großen Aufwand Rückschlüsse ziehen.

Eine interessante Untersuchung ergibt sich beispielsweise bei den Vorgängen an einem Kondensator bei rechteckähnlichem Umladen⁸. Wenn die rechteckförmige Spannung am Kondensator $f(t)$ ist, so ist der Ladestrom des Kondensators proportional zu $f'(t)$. Das bedeutet aber für die Fourierreihe der Stromfunktion, daß die höheren Oberwellen einen höheren Anteil am Signal haben, als sie es bei der Rechteckschwingung haben! Daraus ergeben sich wiederum Hinweise auf die Belastung am Bauteil bzw. der Abstrahlung von hochfrequenten Störungen etc.

⁷ [11] Seite 497

⁸ [7] Seiten 375 f

2. Mathematische Grundlagen der Fourierentwicklung

Nach Fourier lässt sich jede 2π -periodische Funktion $f(x)$ folgendermaßen darstellen:

$$f(x) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos (nx) + b_n \sin (nx)) \quad *$$

Dies ist die sogenannte Fourierreihe⁹. Es seien x , a_n , b_n und damit auch $f(x)$ reel.

Es stellen sich nun folgende Fragen:

- Wie berechnet man die Koeffizienten a_n und b_n ?
- Wie realisiert man beliebige Periodenlängen?
- Wie verhalten sich die Koeffizienten bei großen n ?

2.1. Berechnung der Koeffizienten

Es sei im folgenden immer eine reelle stetige Funktion $f(x)$ gegeben, die 2π -periodisch ist.

Grundlagen

Für die Berechnung der Fourierkoeffizienten benötigen wir zuerst:

$$\begin{aligned} \text{a,} & \int_0^{2\pi} \sin (nx) \, dx = 0 \\ \text{b,} & \int_0^{2\pi} \cos (nx) \, dx = \begin{cases} 0 & \text{für } n > 0 \\ 2\pi & \text{für } n = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

Der Beweis ergibt sich durch Nachrechnen.

⁹Die Darstellung der Fourierreihe wird bezüglich des Faktors a_0 unterschiedlich gehandhabt: In [5] wird diese Darstellung benutzt, was für a_0 und a_n mit $n \in \mathbb{N}$ dieselbe Formel ergibt. In [7] wird a_0 ohne den Faktor $1/2$ dargestellt, was dann in der Berechnung des Koeffizienten eine entsprechende Fallunterscheidung nötig macht. Darauf wird dort aber nicht eingegangen.

Nun interessieren die Integrale der Produkte von verschiedenen $\sin nx$ bzw. $\cos nx$:

$$c, \quad \int_0^{2\pi} \cos(mx) * \cos(nx) dx = \begin{cases} 0 & \text{für } m \neq n \\ \pi & \text{für } m = n \neq 0 \\ 2\pi & \text{für } m = n = 0 \end{cases}$$

$$d, \quad \int_0^{2\pi} \sin(mx) * \sin(nx) dx = \begin{cases} 0 & \text{für } m \neq n \\ \pi & \text{für } m = n \neq 0 \\ 0 & \text{für } m = n = 0 \end{cases}$$

$$e, \quad \int_0^{2\pi} \sin(mx) * \cos(nx) dx = 0 \quad \text{für alle } m, n \in \mathbb{N}_0$$

Beweis

Der Beweis für die Richtigkeit der Formeln c, bis e, erfolgt mit Hilfe der Additionstheoreme. Der Beweis sei hier exemplarisch für c, durchgeführt:

Nach den Additionstheoremen gilt:

$$\cos(mx) * \cos(nx) = \frac{1}{2} (2 \cos(mx) \cos(nx)) = \frac{1}{2} [\cos((m-n)x) + \cos((m+n)x)]$$

Damit kann man das Integral teilen:

$$\int_0^{2\pi} \cos(mx) \cos(nx) dx = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \cos((m-n)x) dx + \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \cos((m+n)x) dx$$

Nun behandelt man die möglichen Fälle getrennt:

i, $m \neq n$

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \cos(mx) \cos(nx) dx &= \frac{1}{2(m-n)} [\sin((m-n)x)]_0^{2\pi} + \frac{1}{2(m+n)} [\sin((m+n)x)]_0^{2\pi} = \\ &= 0 \quad \text{(was es natürlich auch schon nach Gleichung a, ist,} \\ &\quad \text{ohne, daß man integrieren müßte)} \end{aligned}$$

ii, $m = n \neq 0$

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \cos(mx) \cos(nx) dx &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} 1 dx + \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \cos(2mx) dx \\ &= \frac{1}{2} [x]_0^{2\pi} + 0 \quad \text{nach a,} \\ &= \pi \end{aligned}$$

iii, $m = n = 0$

$$\int_0^{2\pi} \cos(mx) \cos(nx) dx = \int_0^{2\pi} (\cos 0)^2 dx = \int_0^{2\pi} 1 dx = 2\pi$$

Die Beweise zu d, und e, werden entsprechend geführt.

Es besteht kein Grund die Integrale nur im Intervall $[0, 2\pi]$ zu betrachten. Wegen der Periodizität der Funktion und der Reihe ist die Betrachtung jedes Intervalls $[c, c + 2\pi]$ äquivalent.

Wenn wir die Funktionen $1, \cos x, \sin x, \cos(2x), \sin(2x), \dots$ als Funktionensystem ansehen, so drücken die Formeln a) ... e) folgendes aus: „Das Integral des Produktes aus je zwei beliebigen verschiedenen Funktionen des Systems über ein beliebiges Intervall der Länge 2π ist gleich Null. Diese Eigenschaft wird gewöhnlich als Orthogonalität des Systems in dem angegebenen Intervall bezeichnet.“¹⁰

Berechnung der Fourierkoeffizienten

i, Bestimmung von a_n mit $n \geq 0$

Wir multiplizieren beide Seiten der Gleichung * mit $\cos nx$ und integrieren über die Periodenlänge 2π . Dabei ist $n \in \mathbb{N}_0$

$$\int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx =$$

$$= \underbrace{\int_0^{2\pi} \frac{1}{2} a_0 \cos(nx) dx}_{\text{I}} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\underbrace{\int_0^{2\pi} a_m \cos(mx) \cos(nx) dx}_{\text{II}} + \underbrace{\int_0^{2\pi} b_m \sin(mx) \cos(nx) dx}_{= 0 \text{ nach e)} \right]$$

Fallunterscheidung:

1.,	$m = 0:$	$I = \pi a_0$	$II = 0$
2.,	$m > 0, m \neq n:$	$I = 0$	$II = 0$
3.,	$m > 0, m = n:$	$I = 0$	$II = \pi a_n$

Dabei ergibt sich I nach Formel b) und II nach c).

Das ergibt allgemein:

$$\int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx = \pi a_n$$

und nach a_n aufgelöst

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx.$$

Also ist speziell $a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx.$

ii, Bestimmung von b_n mit $n > 0$

Man verwendet hierfür einen ähnlichen Ansatz. Das Produkt der Funktion mit $\sin(nx)$ wird integriert:

$$\int_0^{2\pi} f(x) \sin(nx) dx =$$

¹⁰aus: [4] S. 364f, siehe auch [6] Seite 608

$$= \underbrace{\int_0^{2\pi} \frac{1}{2} a_0 \sin(nx) dx}_{= 0 \text{ nach a,}} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\underbrace{\int_0^{2\pi} a_m \cos(mx) \sin(nx) dx}_{= 0 \text{ nach e,}} + \underbrace{\int_0^{2\pi} b_m \sin(mx) \sin(nx) dx}_{I} \right]$$

Fallunterscheidung:

- 1., $n \neq m$: $I = 0$ nach d,
- 2., $n = m$: $I = \pi b_n$ nach d,

Also ist

$$\int_0^{2\pi} f(x) \sin(nx) dx = \pi b_n \quad \text{und nach } b_n \text{ aufgelöst}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(nx) dx.$$

2.2. Beliebige Periodenlängen

Bei einer anderen Periodenlänge als 2π muß an den entsprechenden Stellen diese Periodenlänge T eingesetzt werden. Es müssen die Argumente der trigonometrischen Funktionen normiert und die Integralgrenzen angepaßt werden. Das ergibt dann folgende Terme für die Koeffizienten:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) dx$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cos\left(\frac{2\pi}{T} nx\right) dx.$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \sin\left(\frac{2\pi}{T} nx\right) dx.$$

2.3. Verhalten der Fourierkoeffizienten bei großen n

In der Physik möchte man mit der Fourierreihe Funktionen approximieren. Da eine unendliche Summe recht unhandlich ist, bricht man in der Praxis die Summe nach endlich vielen Gliedern ab und erhält so ein trigonometrisches Polynom. Dieses Vorgehen ist aber nur gerechtfertigt, wenn die Glieder mit hohem Index, gegenüber den anderen, schnell gegen Null gehen. Diese Eigenschaft ist die gleichmäßige Konvergenz und trifft zu, wenn die Funktion $f(x)$ zweimal stetig differenzierbar ist.

Beweis, daß die Fourierreihe von $f(x)$ gleichmäßig konvergiert:¹¹

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx \\
 &= \underbrace{\left[\frac{1}{n\pi} f(x) \sin(nx) \right]_0^{2\pi}}_{=0} - \frac{1}{n\pi} \int_0^{2\pi} f'(x) \sin(nx) dx \\
 &= \underbrace{\left[-\frac{1}{n^2\pi} f'(x) \cos(nx) \right]_0^{2\pi}}_{=0} - \frac{1}{n^2\pi} \int_0^{2\pi} f''(x) \cos(nx) dx \\
 &= -\frac{1}{n^2\pi} \int_0^{2\pi} f''(x) \cos(nx) dx
 \end{aligned}$$

Nun ist $\int_0^{2\pi} f''(x) \cos(nx) dx < \int_0^{2\pi} |f''(x)| dx = K$

Wegen der Stetigkeit von f'' ist $K < \infty$, und man erhält daraus:

$$|a_n| \leq \frac{K}{n^2} \quad \text{für alle } n = 1, 2, \dots \text{ (} K \text{ unabhängig von } n \text{)}$$

Entsprechendes erhält man auch für b_n .

Summiert man die Beträge der beiden Summanden mit Index n in der Fourierreihe, so ist diese Summe kleiner gleich $\frac{2K}{n^2}$. (Da das Multiplizieren mit Sinus und Cosinus den Betrag nur verringert).

Da aber schon $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$ konvergiert, konvergiert die Fourierreihe bei allen x absolut¹² und ist damit auch gleichmäßig konvergent.

¹¹nach [5] Kap. 9, Fourierreihen

¹²siehe [6] Kap.3.1.14.3.

2.4. Weitere Eigenschaften der Fourierreihe

2.4.1. VERHALTEN AN UNSTETIGKEITSSTELLEN (SATZ V. DIRICHLET)

Bisher war die Funktion $f(x)$ als stetig vorausgesetzt. Sei $f(x)$ nun unstetig, aber stückweise stetig und beschränkt. Dann hat sie an jeder Unstetigkeitsstelle einen links- und rechtsseitigen Grenzwert:

$$\lim_{h \rightarrow 0} f(x-h) \quad \text{bzw.} \quad \lim_{h \rightarrow 0} f(x+h)$$

Die Fourierreihe konvergiert an allen Stetigkeitsstellen gegen den Funktionswert $f(x)$. An den Unstetigkeitsstellen ist der Wert der Fourierreihe gleich dem arithmetischen Mittel der beiden Grenzwerte:¹³

$$\frac{1}{2} * \left[\lim_{h \rightarrow 0} f(x-h) + \lim_{h \rightarrow 0} f(x+h) \right]$$

2.4.2. INTEGRATION UND DIFFERENTIATION VON FOURIERREIHEN

Als Approximation für das Integral bzw. Differential der Funktion $f(x)$ integriert bzw. differenziert man die Fourierreihe.

$$\begin{aligned} \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx &= \int_{\alpha}^{\beta} \left[\frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) \right] dx \\ &= \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{2} a_0 dx + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_{\alpha}^{\beta} a_n \cos(nx) dx + \int_{\alpha}^{\beta} b_n \sin(nx) dx \right] \\ &= \frac{1}{2} a_0 (\beta - \alpha) + \frac{1}{n} \frac{1}{n} \left[a_n \sin(nx) - b_n \cos(nx) \right]_{\alpha}^{\beta} \end{aligned}$$

Die Differentiation wird entsprechend vorgenommen:

$$\begin{aligned} f(x)' &= \left[\frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) \right]' \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos(nx) \right]' + \left[b_n \sin(nx) \right]' \\ &= \frac{1}{n} a_n n \sin(nx) + b_n n \cos(nx) \end{aligned}$$

Damit ergeben sich neue Reihen z.B. für das Differential:

$$f(x)' = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \cos(nx) + q_n \sin(nx)$$

mit: $p_n = n b_n$ und $q_n = -n a_n$

¹³Der Beweis findet sich in [4] Seite 402

Die Bedeutung dieser Zusammenhänge

Mit dieser Reduktion der Integration bzw. Differentiation auf einfache Koeffizientenumformungen erhält man die Möglichkeit die Auswirkungen einer physikalischen Integration bzw. Differenzierung direkt an den Koeffizienten ablesen zu können.

2.4.3. AMPLITUDENDARSTELLUNG

Man kann, anstelle von a_n und b_n , auch eine Amplitude A_n und eine Phase φ_n für jeden Summanden angeben. Das ergibt dann folgende Darstellung der Fourierreihe:

$$f(x) = \frac{1}{2}A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(nx + \varphi_n)$$

Die Umrechnung kann man sich leicht geometrisch veranschaulichen und lautet folgendermaßen:

$$a_0 = A_0 \quad {}^{14}$$

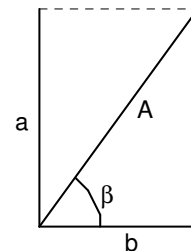
$$a_n = A_n * \sin \varphi_n \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}$$

$$b_n = A_n * \cos \varphi_n \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}$$

Die umgekehrte Umrechnung verläuft entsprechend (wobei bei dem arctan Probleme mit Vorzeichen und Nullstellen der Fourierkoeffizienten zu beachten sind):¹⁵

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n} \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}$$



Natürlich ist die Wahl des Nullpunkts und des Vorzeichens des Phasenwinkels willkürlich.

2.4.4. SPEZIELLE FOURIERREIHEN

Bei einigen Funktionen ergeben sich einfache Zusammenhänge für die Fourierkoeffizienten. Dabei sind insbesondere übereinstimmende Symmetrien wie die von Sinus- oder Cosinusfunktionen und der zu untersuchenden Funktion entscheidend:

So hat die Fourierreihe einer achsensymmetrischen (geraden) Funktion nur Koeffizienten

$$b_n = 0 \quad (n \in \mathbb{N}) \quad \text{bzw.} \quad \varphi_n \in \{90^\circ, 270^\circ\},$$

da jeder Sinusanteil diese Art der Symmetrie zerstören würde.

¹⁴Smirnov [4] setzt hier $A_0 = 1/2 a_0$ an. Das bedingt aber wieder eine Sonderbehandlung bei der Berechnung der Koeffizienten. So gilt: φ_0 ist 90° , daher ist $a_0 = A_0 * \sin 90^\circ = A_0$.

¹⁵Beispielsweise liefert a,b jeweils negativ dasselbe φ wie a,b positiv, muß aber gerade $180^\circ + \varphi$ liefern. Außerdem darf b nicht Null sein, da sonst der Bruch nicht definiert wäre. Trotzdem ist $b=0$ in der Fourierreihe erlaubt und erwünscht. Der entsprechende Winkel ist $90^\circ (a \geq 0)$ bzw. $270^\circ (a < 0)$

Die Fourierreihe einer punktsymmetrischen (ungeraden) Funktion hat entsprechend Fourierkoeffizienten

$$a_n = 0 \quad (n \in \mathbb{N}_0) \quad \text{bzw.} \quad \varphi_n \in \{0^\circ, 180^\circ\}.$$

Wiederum würde ein konstanter oder ein Cosinusanteil die Symmetrie zerstören.

Beweis:

Für eine achsensymmetrische Funktion gilt $f(-x) = f(x)$. Wenn man auf beiden Seiten die Fourierreihe einsetzt, so kann man einen Koeffizientenvergleich für jedes $n \in \mathbb{N}$ durchführen:

$$\begin{aligned} & a_n \cos(-nx) + b_n \sin(-nx) = a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) \\ \Rightarrow & a_n \cos(nx) - b_n \sin(nx) = a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) \\ \Rightarrow & 2 b_n \sin(nx) = 0 \quad \text{da dies für jedes } x \text{ gelten muß:} \\ \Rightarrow & b_n = 0 \end{aligned}$$

Für eine punktsymmetrische Funktion verläuft der Beweis entsprechend.

Anschaulich ist der Zusammenhang auch aus den Eigenschaften von Integralen über gerade und ungerade Funktionen erkennbar.

Gegebenenfalls kann es sinnvoll sein, eine Funktion in Abszissen- bzw. Ordinatenrichtung zu verschieben um Achsen- bzw. Punktsymmetrie zu erreichen. Dann sind die Berechnungen der Fourierkoeffizienten erheblich einfacher.

Im ersten Fall ergeben sich neue Winkel φ_n , und gleichbleibende A_n .

Im zweiten Fall ändert sich nur der Wert von A_0 .

Abschließend möchte ich noch einige bekannte Fourierreihen aufzählen ohne die Beweise bzw. Berechnungen zu liefern; sie beruhen ausschließlich auf Integrationen und evtl. trigonometrischen Umformungen.¹⁶

Rechteck:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & 0 < x < \pi \\ -1 & \pi < x < 2\pi \end{cases}$$

Wegen der Punktsymmetrie sind die Fourierkoeffizienten $a_n = 0$. Für die Koeffizienten b_n ergibt sich $\frac{4}{\pi n}$ für alle ungeraden n , und Null für alle geraden n .

¹⁶aus [8]. Weitere Beispiele finden sich dort, ausführlichere und auch anspruchsvollere Beispiele in [4], Seiten 369ff

Dreieck:

$$f(x) = \begin{cases} x & 0 < x < \pi \\ 2\pi - x & \pi < x < 2\pi \end{cases}$$

Wegen der Periodizität entspricht dies $|x|$ mit $x \in [-\pi, \pi]$.

Durch die Achsensymmetrie sind die Fourierkoeffizienten $b_n = 0$. a_0 ist $\frac{\pi}{2}$. Für die Koeffizienten a_n ergibt sich $-\frac{4}{\pi n^2}$ für alle ungeraden n , und Null für alle geraden n .

Gleichgerichteter Sinus:

$$f(x) = |\sin x|$$

Achsensymmetrie $\Rightarrow b_n = 0$. a_0 ist $\frac{2}{\pi}$. Für die Koeffizienten a_n ergibt sich

$$-\frac{4}{\pi(n-1)(n+1)} \text{ für alle geraden } n, \text{ und Null für alle ungeraden } n.$$

3. Computereinsatz im Praktikum

3.1. Computer als Werkzeug in der Physik

Heutzutage stoßen Computeranwendungen in alle Bereiche vor. Dies ist gerade in der Physik von großer Bedeutung, da nicht nur Arbeiten vereinfacht werden (Auswertungen, Datenverwaltung) sondern sich neue Möglichkeiten auftun. Diese kann man in drei Kategorien einteilen:

Datenverarbeitung

„Die (...) anfallende Informationsmenge beträgt in modernen physikalischen Experimenten $10^8 \dots 10^{10}$ Byte. (...) Von einer manuellen Auswertung solcher Informationsmengen kann nicht die Rede sein, die Verarbeitung und Darstellung derartiger Datenmengen bedarf der Anwendung numerischer Verfahren (Algorithmen), die nur auf elektronischen Rechnern zu realisieren sind.“¹⁷ Beispiele sind: Röntgentomographie, Kristallographie, Fourierspektrometer, Bildverarbeitung (wie z.B. Rekonstruktion dreidimensionaler Geländestrukturen auf Venus aus mit Satelliten gewonnenen Bildern im UHF-Bereich).

Experimentsteuerung

„Für eine ganze Reihe physikalischer Experimente ist die präzise und schnelle Steuerung der experimentellen Apparatur, die nur mit Hilfe eines Rechners ausgeführt werden kann, ein entscheidender Faktor.“ Ein Beispiel ist die Steuerung von Radioteleskopen. „[Sie] dienen dem Empfang der Radiofrequenzstrahlung von Planeten, der Sonne, der Sterne und von anderen astronomischen Objekten. In einigen großen Radioteleskopen wird die Oberfläche der Antenne aus einzelnen beweglichen Scheiben gebildet, die in Abhängigkeit von der Lage der beobachteten Strahlungsquelle unterschiedlich ausgerichtet werden. Das automatische Steuerungssystem eines solchen Radioteleskops steuert auch die [mehreren Hundert] einzelnen Scheiben während der Verfolgung der Strahlungsquelle, um die Oberfläche des Teleskops mit hinreichender Genauigkeit einer Parabel anzunähern“¹⁸. Solche Experimente wären ohne Computerhilfe nicht durchführbar.

Mathematische Modellierung und numerische Experimente

„Das Ziel der physikalischen Forschung ist es, ein Modell der untersuchten Erscheinung oder des untersuchten Prozesses zu entwerfen, dieses Modell zu erforschen und Schlußfolgerungen für praktische Anwendung oder für weitere Untersuchungen zu ziehen. Die einfachsten Modelle sind Formeln. (...) Ihre Anzahl ist begrenzt. Mit der Weiterentwicklung der Wissenschaften treten häufiger Aufgaben auf, deren Lösung nicht als Formel, d.h. als Abhängigkeit der gesuchten Größen von den gegebenen existiert. Für derartige Aufgaben gibt es keine explizite Lösung. Sie werden genähert mit geeigneten konvergierenden numerischen Rechenverfahren gelöst, die zu unendlichen Rechenprozessen führen, die beim Erreichen einer gegebenen Genauigkeit abgebrochen werden. (...)

Während sich der Wissenschaftler früher im wesentlichen auf die unterschiedlichsten Vereinfachungen seiner Aufgabe konzentrierte, kann er heute, mit Unterstützung der Rechentechnik, *alle* wichtigen Aspekte der Aufgabe berücksichtigen. (...) Gegenwärtig gibt es eine Vielzahl effektiver numerischer Methoden zur Lösung von algebraischen und transzendenten Gleichungen, von Differential- und Integralgleichungen, die in der physikalischen Forschung auftreten. (...)

Als Bestätigung für den Nutzen numerischer Experimente, kann der mit dieser Methode entdeckte T-Schicht-Effekt dienen. Dieser Effekt besteht darin, daß sich bei der Bewegung von Plasma in einem Magnetfeld dünne, stabile Schichten hoher Temperatur ausbilden. Später wurde dieser Effekt auch in einem natürlichen Experiment nachgewiesen“¹⁹

¹⁷ [1] Seite 24

¹⁸ nach [1] Seiten 33f

¹⁹ [1] Seiten 35ff

Bei diesem Versuch soll nun auch ein Computer zum Einsatz kommen. Er mißt die Spannung eines angelegten Signals, verarbeitet die anfallenden 64 kByte Daten und ermöglicht die mathematische Synthese eines neuen Signals. Außerdem sollen Studenten bei dieser Gelegenheit mit dem Computer als zukünftigem Handwerkszeug vertraut gemacht werden.

Die zentrale Aufgabe ist dabei der Ersatz einer elektronischen Analyse durch eine mathematische Zerlegung. Das elektronische Verfahren konnte immer nur die Amplitude *einer* Frequenz im Signal, das dazu über mehrere Minuten stabil sein mußte, ermitteln. Nun reicht ein in einem kurzen Zeitintervall von typischerweise 0,5 Sekunden gemessenes Signal aus, um alle Frequenzen zu ermitteln. Der Vorteil wird besonders deutlich bei nicht identisch reproduzierbaren Signalen wie Stimmen, Geräuschen etc. Hier wird das Signal aufgenommen und dann zerlegt, während 'früher' die Zerlegung nacheinander von nicht unbedingt identischen Signalen vorgenommen wurde. Mit der elektronischen Messung war außerdem keine Beobachtung der Phasenbeziehung der einzelnen Anteile möglich.

3.2. Meßprinzip

Die zu messenden Signale stehen entweder als elektrisches Spannung (z.B. Frequenzgenerator) oder als Schallwelle (Stimmgabel) zur Verfügung. Die elektrischen Signale werden über eine Schutzschaltung an den Eingang der Meßkarte weitergeleitet. Schallwellen werden mit dem Mikrophon erfasst, elektronisch verstärkt und dann an den Eingang weitergeleitet. Die Meßkarte schaltet mit Hilfe einer Sample&Hold-Schaltung in festen Zeitintervallen die Eingangsspannung auf einen AD-Wandler, so daß dieser das Signal wandeln kann, ohne, daß es sich dabei ändert. Der AD-Wandler arbeitet nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation. Er halbiert in 12 Schritten durch Vergleiche das Intervall, in dem die Spannung liegen kann. Das erste Intervall ist der Spannungsbereich von +/-10V. Der erste Vergleich bestimmt das oberste Bit in der Binärzahl des Ergebnis. Das Intervall ist nun die positive oder der negative Hälfte des Spannungsbereichs. Der nächste Vergleich halbiert diesen Bereich wieder auf ein Spannungsintervall der Länge 5V und liefert, je nachdem, in welchem Bereich die Spannung liegt, das zweite Bit. Dies wiederholt sich im Takt von ca. 1MHz weitere zehn mal²⁰ und läuft vollständig in der Hardware ab. Das Ergebnis liegt dann als Zahlenwert vor, der vom Meßprogramm in eine Liste (Array) eingetragen wird. Diese Liste kann dann vom Programm verarbeitet werden. Die Messung und das Eintragen in die Liste erfolgt in einem vorgegebenen Takt, der Sample- oder Abtastfrequenz. Diese wird vom Programm vorgegeben und liegt bei maximal 60 kHz.

3.3. Numerische Methoden

Die Analyse

Die Funktion des Signals liegt nach einer Messung als Wertetabelle (als Menge von Stützpunkten) vor. Für die Fourieranalyse muß man Integrale bilden. Die Integrale werden über das Produkt der Funktion mit einem Sinus bzw. Cosinus gebildet.

²⁰Weitere Informationen siehe Technisches Handbuch

Dazu wird für jeden Wert, der durch die Messung bekannt wurde, das Produkt gebildet, und über diese Produkte summiert. Die Intervalllänge für die Berechnung ist die Anzahl der Meßwerte.

Die Synthese

Für die Synthese werden wieder die Spannungswerte für die diskreten Stellen benötigt. Dazu wird einfach die Fourierreihe für einzelne Punkte berechnet.

Die Periodenlänge

Die Integrale sind nur über eine Periode des Signals zu bilden. Dazu muß der Anwender mit Hilfe des Programm eine Periode suchen und markieren. Die Berechnung läuft dann nur über das Intervall zwischen diesen Marken.

Bei der Synthese wird wiederum nur der Bereich zwischen den Marken errechnet. Die Fortsetzung ober- und unterhalb des Bereichs wird durch Aneinandersetzen identischer Intervalle erreicht. Damit ergibt sich auch eine gute Kontrollmöglichkeit, um zu testen wie gut man die Periode markiert hat: Wenn sich die Fortsetzung mit dem ursprünglichen Signal deckt, so war die Markierung gut.

Das Abtasttheorem

Durch die digitale Erfassung der Funktion treten folgende Probleme auf:

Das Abtasttheorem besagt, daß eine Sinusschwingung mit mindestens der doppelten Frequenz abgetastet werden muß, um erkannt zu werden. Bei einer Samplefrequenz von 60 kHz ist die höchste erkannte Oberwelle 30 kHz. Eine Frequenz von beispielsweise 32 kHz wird als 28 kHz erkannt. Höhere Frequenzen werden also an der Maximalmarke "gespiegelt". Man kann sich leicht vorstellen, daß jede Halbwelle des Signals wenigstens einmal abgetastet werden muß, um eine korrekte Messung zu erhalten.

Außerdem wird natürlich nicht mehr korrekt zwischen einer Rechteckschwingung und einer Sinusschwingung bei z.B. 25 kHz unterschieden. Da die erste auftretende Oberschwingung des Rechtecks bei 75 kHz liegt, und damit als 15 kHz gemessen wird, ist kein einfacher Rückschluß auf die eigentliche Schwingung möglich. Daher sind solche Signale zu vermeiden.

Die Messung erfolgt mit einem AD-Wandler. Dieser hat eine beschränkte Auflösung von typischerweise 12 Bit. Das entspricht 4096 Schritten. Wenn das Signal eine Spannung von +/- 8 Volt hat, bei einem Meßbereich von +/- 10 Volt, so liegt die Spannung in Stufen von 4,9 mV vor. Das sind 0,03 % der Gesamtspannung und ein geringer Fehler. Legt man allerdings nur eine Spannung von +/- 1 Volt an, so steigt der Fehler auf 0,24 %

Gerade Oberwellen haben betragsmäßig einen niedrigen Anteil am Signal²¹, der noch deutlich über dem Fehler liegen soll. Schließlich will man nicht die Treppenfunktion einer digitalisierten Sinusschwingung untersuchen.

²¹Die 10. auftretende Oberwelle eines Rechtecks hat nur noch ein 21-tel der Amplitude der Grundschwingung, also 4,8%. Der Fehler in der Oberwelle beträgt bei einem Signal mit +/- 1 Volt also schon über 10% !.

4. Neue Fragestellungen im Praktikumsversuch

Änderungen im Versuchsablauf

Im Gegensatz zur bisherigen Praxis nimmt die Durchführung der Fourieranalyse mit dem Computer viel weniger Zeit in Anspruch. Dem Praktikanten bleibt die Messung und Vorbereitung der Signale für die Berechnung. Die frei werdende Zeit wird genutzt, um vielfältigere Signale als zuvor zu analysieren. Außerdem sind inhaltlich umfangreichere Analysen möglich.

Synthese

Möglich wird nun auch eine Veränderung der ermittelten Spektren und ihre Rücktransformation in eine 'Meßkurve', also den dazugehörigen Spannungsverlauf. Damit kann überprüft werden, ob die Fourierreihe das Signal korrekt beschreibt. Es sind Änderungen möglich, wie z.B. Transponieren, Integrieren, Differenzieren oder direkte Eingaben. Ihre Auswirkungen auf den Kurvenverlauf sind in Sekundenschnelle zu ermitteln. Die neue Kurve kann mit der ursprünglichen Kurve direkt verglichen werden.

Inhalte des Versuchs

Es ergeben sich neue Inhalte, die der Versuch vermitteln kann. So sind nicht nur einfache Analysen von Frequenzanteilen möglich. Es kann auch das Zusammenwirken der Frequenzen mit ihren Phasenbeziehungen und ihr Einfluß auf das Gesamtsignal in der Synthese untersucht werden.

Neue Experimente und ihre Auswertung

- Messung von Signalen, die ein Frequenzgenerator liefert (Sinus, Rechteck, Dreieck). Vergleich der Messung mit den mathematisch zu erwartenden Werten; Beurteilung der Qualität des Generators, Stichwort Klirrfaktor.
- Analyse von Signalen, die ein Mikrophon liefert, insbesondere gesprochene Vokale, Pfeifentöne, Saitenschwingungen. Evtl. können andere Klänge erzeugt und analysiert werden. Worin unterscheidet sich der Klang von Musikinstrumenten bei gleicher Grundfrequenz und warum?
- Messungen an der Netzspannung über einen Transformator. Ist diese eine Sinus-schwingung? Überlegung, welche Fehler ein Transformator bei der Übertragung macht. Messung an zweitem Transformator.

Neue Analysemöglichkeiten

Die Erzeugung neuer Schwingungen durch Festlegen von Amplituden und Phasenlage möglicher Frequenzanteile (Synthese) ist möglich. Man kann eine gemessenen Kurve mit der Maus verändern und analysieren. Genau genommen handelt es sich hierbei um ein mathematisches Experiment bzw. eine Modellierung.

Die Versuche im Einzelnen:

4.1. Rechteckspannung

Von einer Rechteckspannung am Universaleingang werden wie im alten Versuch die Oberwellen bestimmt. Dann wird die Rechteckwelle wieder synthetisiert und die Unterschiede werden festgestellt. Dabei stellt sich die Notwendigkeit einer hohen Anzahl von Oberwellen heraus. Das Spektrum läßt sich integrieren und ergibt dann (nach Synthese) eine Dreiecksfunktion. Genauso läßt sich eine Dreieckspannung messen und durch Differenzieren in eine Rechteckfunktion umrechnen. Die Zusammenhänge sind zu erklären.

4.2. Messungen an der Netzspannung

Der Versuch

Die Vorstellung, daß die Netzspannung einer Sinuswelle entspricht, ist weitverbreitet. Aber selten überprüft man die Realität. Viele Verbraucher haben eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Durch den Ohmschen Widerstand in der Zuleitung entstehen neue Kurvenformen. Andere Verbraucher schalten erst im Verlauf einer Halbwelle ein (Phasenanschnittverfahren, z.B. bei Motorregelungen) oder benutzen nur eine Halbwelle (Leistungsregelung bei Fön, Heizlüfter). All dies führt zu einem nichtsinusförmigen Verlauf, welcher aber wieder einer Sinuswelle mit Oberwellen entspricht. Das will man mit diesem Programm analysieren. Die genannten Einflüsse hängen natürlich sehr von dem Netz ab, an das die Apparatur angeschlossen ist.

Netzspannung messen

Über den eingebauten Netztransformator wird die Netzspannung gemessen und analysiert. Die ermittelten Oberwellen sind zu erklären. Zu beachten ist, daß die Messung durch die Eigenschaften des Transformators verfälscht wird.

4.3. Vergleich zweier Sinusspannungen

Es werden Sinusspannungen aus zwei verschiedenen Frequenzgeneratoren verglichen. Dabei ist der Klirrfaktor als Qualitätskriterium aus den Oberwellen zu bestimmen. Die Spannungen werden an den Universaleingang gelegt.

Außerdem wird die Netzspannung über den genannten Transformator einem nichtlinearen Verstärker zugeführt. Dessen Ausgangssignal ist zu messen und mit der Netzspannung zu vergleichen.

4.4. Messungen mit dem Mikrophon

Tonquellen

Es werden verschiedene Tonquellen wie Monochord, Stimmgabeln, Pfeifen (mit Instrument und Lippen, evtl. Finger), Sprachstimme, Singstimme aufgenommen. Auch bei gleicher Grundfrequenz unterscheiden sich die Signale durch die Oberwellen. Dies sollte erklärt werden. Evtl. kann man auch interessante Signale über den universellen Eingang mittels Recorder (z.B. Walkman^{®22}) einspeisen. Ein Adapter mit dem notwendigen 3.5 mm-Stecker ist vorhanden.

Variable Signale

Beim Sprechen von Vokalen kann man während der Messung den Buchstaben verändern (z.B. von a zu e, i,o,u). Die einzelnen Stellen sind bei derselben Messung nacheinander anwählbar (Speichern der Messung / Auswahl des Bereichs / Bearbeiten der Messung / erneut Laden / anderen Bereich auswählen / Bearbeiten / Laden etc.). Wenn man während der Messung die Tonhöhe hält, so ist ein direkter Vergleich möglich. Für die lange Meßzeit ist ein Verändern der Meßdauer/Meßfrequenz notwendig.

Qualitätsunterschiede

Beim Analysieren von Singstimmen kann man Unterschiede zwischen klareren und 'rauhern' Stimmen feststellen. Worin bestehen diese?

4.5. Mathematische (Modell-) Versuche

Zweck

Über den reinen Meß- und Analysevorgang hinaus ist die mathematische Betrachtung von Funktionen interessant. Man möchte z.B. errechnete Koeffizienten in eine Funktion umsetzen. Eine weitere Möglichkeit ist das Erstellen einer individuellen nichtanalytischen Funktion (mit der Maus) und die Untersuchung der dazugehörigen Koeffizienten.

Umsetzung

Mit diesem Programm kann der Praktikant selbst Schwingungen synthetisieren. Dazu muß ein Spektrum bzw. die Koeffizienten vorliegen. Das können errechnete, modifizierte oder neu eingegebene Werte sein. Dazu gibt es die Möglichkeit, die Eingaben in einer Tabelle durchzuführen und dabei Amplituden und Phasen einzugeben. Das Ergebnis kann man am Bildschirm betrachten und auch, mit Hilfe einer Soundkarte und Lautsprechern, anhören.

Desweiteren ist es möglich, sowohl eine Funktion als auch Koeffizienten graphisch mit der Maus „einzugeben“. Dazu gibt man bei der Funktion einfach den Kurvenverlauf mit der Maus auf dem Bildschirm vor, oder ändert den existierenden ab..

²²Warenzeichen von Sony

Es kann insbesondere untersucht werden, was mit einem Signal nach einer Veränderung des Spektrums passiert. Dazu soll z.B. ein Signal gemessen und analysiert werden. Dann wird das Ergebnis (Frequenzspektrum) zurück in eine Spannungskurve umgerechnet. Woher kommen die Veränderungen? (maximale Oberwelle, Abtastfrequenz) Dann kann auch eine absichtliche Änderung durch Manipulation am Spektrum oder der Spannungskurve vorgenommen und die Auswirkungen auf das entsprechende Gegenstück untersucht werden. So kann z.B. eine (auch asymmetrische) Übersteuerung durch Kappen der Spannungsspitzen simuliert werden. Ihre zerstörerischen Auswirkungen auf beispielsweise HiFi-Hochtöner sollten erklärt werden.

4.6. Wiedergabe von Signalen

Gemessene und synthetisierte Signale können angehört werden. Dabei treten typische Probleme durch die geringe Bandbreite der Soundkarte auf. Die Effekte sind eine niedrige Verstärkung in tiefen Tonlagen und eine Samplefrequenz von 11 kHz. Dadurch können gespiegelte Frequenzen wiedergegeben werden (Abtasttheorem). Durch diese anharmonische Frequenzmischung werden Klänge zu Geräuschen.

5. Realisierung des Programms

Der Erfolg der Programmierarbeit hängt von verschiedenen Faktoren ab:

5.1. Programmiersprache

Anforderungen

An die verwendete Programmiersprache wird der Anspruch gestellt, daß die damit erzeugten Programme verhältnismäßig einfach zu warten sind und sie stabil in ausreichender Geschwindigkeit laufen.

Turbo Pascal

Verwendet wurde TurboPascal 6.0 von Borland. Bei der Erstellung des Programms unterstützt es den Programmierer durch vielfältige (auch abschaltbare) Kontrollen, gibt jederzeit Hilfen zu Befehlen und Fehlermeldungen. Die Programme sind daher recht stabil. Eine zusätzliche Unterstützung erhält man durch die sogenannte objektorientierte Programmierung (OOP). Sie verwirklicht eine weitergehende Strukturierung als dies mit Standardpascal möglich wäre. Und hiermit wächst auch die Sicherheit des Programms, während seine Ausführungsgeschwindigkeit etwas sinkt. Durch wenige Kunstgriffe wurde an kritischen Stellen Zeit eingespart, so daß das Programm schnell genug läuft.

5.2. Benutzeroberfläche als zentrales Element des Programms

Die oben genannten Möglichkeiten schließen eine Steuerung des Versuchablaufs durch den Computer aus. Es ist also nicht möglich, daß das Programm die Kontrolle über den gesamten Ablauf behält. Vielmehr ist es sinnvoll, ein Programm so zu schreiben, daß es im Dialog entsprechend den Wünschen des Benutzers einzelne Aktionen in der gewünschten Reihenfolge durchführt. Dieser benutzergesteuerte oder auch ereignisgesteuerte Ablauf von Programmen ist heutzutage üblich.

User Interface, der Kontakt zum Benutzer

Die ganze Kommunikation zwischen Programm und Benutzer erfolgt über den Bildschirm. So erfolgen Ausgaben als Graphen und die Eingaben des Benutzers mit der Maus beziehen sich auf den Bildschirminhalt. Seiner Gestaltung kommt also eine zentrale Rolle zu. Da die eigentlichen Aktionen des Programms vom Benutzer über die Oberfläche gesteuert werden, ist es nur sinnvoll, das ganze Programm auf der Benutzeroberfläche aufzubauen.

Graphische Oberfläche

Um jederzeit gleichzeitig die Daten graphisch darstellen zu können, aber auch Befehle zu deren Manipulation eingeben zu können, ist eine graphische Benutzeroberfläche (die also nicht zwischen Text- und Grafikdarstellung umschaltet) sinnvoll. Um sie ganz den Bedürfnissen anpassen zu können, wurde sie neu entwickelt. Dabei wird als direkte Grafikschnittstelle der BGI-Treiber von Borland verwendet. Für evtl. einmal vorhandene SuperVGA-Karten steht der erweiterte Treiber SVGA-BGI von Herrn Ullrich von Bassewitz zur Verfügung. Auf die Benutzung der Standardoberfläche MS-Windows wurde verzichtet, da einige Zweifel daran bestehen, ob sie wirklich so benutzerfreundlich für Anfänger ist, wie behauptet wird. Für den Profi, mit dem man es im Praktikum allerdings nicht unbedingt zu tun hat, ist ihre Leistungsfähigkeit aber unbestritten.

Die Graphen werden in zwei Fenstern ausgegeben. Deren Größe bleibt unverändert, so daß entsprechende Eingaben nicht nötig bzw. möglich sind.

5.3. Unterstützung von Standards

Zweck

Es ist sinnvoll sich bei der Entwicklung auf Standards zu stützen. Damit wird allen (Benutzern wie Programmierern) der Umgang mit dem Programm erleichtert.

Programmierstandards

Mit TurboPascal wird eine weit verbreitete und damit quasi standardisierte Sprache benutzt. Durch die Nutzung der BGI-Treiber wird jede Graphikkarte ab VGA unterstützt, wenn für sie ein BGI-Treiber existiert. Wenn man auf das Lernprogramm verzichtet, ist auch der EGA-Betrieb möglich.

Die Objektorientierte Programmierung wird sich in den nächsten Jahren zu einem neuen Standard entwickeln, dessen Benutzung hier bestimmt nicht verfrüht ist, da er in TurboPascal, wenn auch nicht vollständig, so doch zuverlässig implementiert ist. Damit ist sowohl die Stabilität des Programms als auch die Dauerhaftigkeit der Unterstützung bzgl. zukünftiger Versionen gemeint.

Daß man mit Pascal an sich schon eine strukturierte Programmierung durchführt ist selbstverständlich.

Bedienungsstandards

Die Bedienung hält sich an die bekannte Vorgehensweise von Programmen nach dem SAA-Standard (durch IBM 1987 ins Leben gerufen²³), wobei hier nur die Benutzeroberfläche (CUA, Common User Access) imitiert wird. Bekanntestes kommerzielles Beispiel dürfte MS-WORKS sein. Wer also schon einmal mit einem Programm mit SAA/CUA-Oberfläche (dazu gehört auch MS-Windows) gearbeitet hat, dürfte mit dieser Oberfläche keine Probleme haben. Der SAA/CUA-Standard baut auf eine visuelle Unterstützung der Eingaben auf. Dies geschieht primär über Menüs:

²³ [2] Seiten 13ff

Menüs als zentrale Eingabemöglichkeit

Der Benutzer muß eine Wahl aus den zur Verfügung stehenden Befehlen treffen können. Da man die möglichen Befehle nicht in einer einzelnen Liste zur Auswahl anbieten kann, wurde früher eine Verschachtelung solcher Listen vorgenommen (das letzte große Beispiel dafür war MS-Word 5.0). Nach einer Auswahl in der Hauptliste erschien die nächste Liste für eine erneute Wahl. Dies wiederholte sich bis ein Befehl gewählt wurde.

Neue Menüstrukturen

Für Profis ist keine Art der Bedienung ein Problem, doch man muß sich bei verschiedenen Bedienungsmöglichkeiten unterschiedlich lang einarbeiten. So etablierte sich eine einfachere Art der Befehlsauswahl. Man legte die Hauptauswahl permanent auf den Bildschirm, und zwar in einer Zeile am oberen Bildschirmrand. Die untergeordneten Auswahllisten wurden bei Bedarf einzeln, senkrecht, in Spalten unter dem aufrufenden Hauptauswahlpunkt dargestellt. Nun war ein optischer Zusammenhang zwischen den Auswahlmöglichkeiten gegeben. Diese Organisation nennt man im allgemeinen "Menü". Der Aufruf mit der Maus und die Darstellung ist grob standardisiert. Es bestehen hauptsächlich Unterschiede bei verschiedenen Rechnern (AtariST, Amiga, MacIntosh und PC (bei MS-Windows z.B.)). Ich hielt mich an die Standards PC-Programme und baute in das Programm eine entsprechende Menüverwaltung ein.

Untermenüs

Um alle Funktionen des Programms logisch richtig anzuordnen (nur so findet man die Funktionen im Menü), wären zu viele Befehle im "Rechnen"-Menü erschienen. Das ist zu unübersichtlich, da keine Trennung zwischen wichtigen und selten benutzten Befehlen zu erkennen ist. Wie z.B. in TurboPascal 6.0 wurden daher Untermenüs eingeführt. Das ist zur Zeit nur das "Verändern..."-Menü. Der Befehl "Verändern..." steht in der Menüliste unter Rechnen. Wenn man ihn wählt, erscheint eine weitere Menüliste während die ursprüngliche stehen bleiben. So hat man einen Überblick über den Weg, der zu dem aktuellen Menü führte. Dies unterstützt das intuitive Vorgehen.

Verschiedene Menüs

Um die Fülle von Befehlen, die man nicht sofort alle benötigt, vor dem Anfänger zu verbergen, ist das Menü nach dem Programmstart nur in einer verringerten Variante zu sehen. Man kann es aber mit einem Befehl auf den vollen Umfang umschalten (Extras/volles Menü).

Standards bei den Einsteckkarten

Da die Karten vom Programm direkt angesprochen werden, ist man über das Programm an eine Karte gebunden.

Für Meßkarten ist leider kein Standard in Sichtweite. Daher ist die Wahl nach rein technischen Gesichtspunkten getroffen worden.

Die Soundkarte ist kompatibel zum SoundBlaster^{®24}-Standard. Sie enthält unter anderem einen DA-Wandler. Leider kann dieser nur mit 11kHz betrieben werden, was aber für Demonstrationen ausreichen dürfte. Im Hinblick auf Ersatzteilprobleme ist dies dennoch die einfachste Lösung, da die Karte einfach ausgetauscht werden kann.

5.4. Hilfestellungen durch das Programm

Standard

Die Hilfe, die das Programm dem Benutzer zukommen läßt, orientiert sich an der sogenannten kontextsensitiven Hilfe, die moderne Programme meist bieten. Das bedeutet, daß man zu der Stelle im Programm, an der man sich befindet, durch Druck auf F1 (oder bei anderen Rechnern die Help-Taste) einen Hilfstext eingeblendet bekommt. Dies ist übrigens auch ein Teil des CUA-Standards.

Erweiterung

Vom Programm Calamus auf dem Atari ST wurde folgende Idee übernommen: Zu jedem Menütitel oder Objekt auf dem Bildschirm, das die Maus berührt, wird ein kurzer Kommentar eingeblendet. Dieser erscheint rechts oben neben der Menüzeile, wo er schnell gelesen werden kann.

In der untersten Zeile wird außerdem immer ein Text eingeblendet, der allgemeinere Hinweise gibt, was man als nächstes tun kann. Es erfordert jedoch wahrscheinlich einige Konzentration des Benutzers, um diese Hilfen zu nutzen, was wiederum kein Grund ist, sie nicht wenigstens anzubieten.

²⁴Warenzeichen der CreativeLabs

5.5. Objektorientierte Programmierung

Probleme

Es muß zu jedem Bereich, der auf dem Bildschirm eine Funktion haben soll, folgendes verzeichnet sein: seine Funktion, die nötigen Hilfsinweise, der Inhalt des Bereichs sowie Mauszeigerform etc. Daher ist es sinnvoll, die Oberfläche des Programms folgendermaßen zu strukturieren:

- jedem solchen Bereich auf dem Bildschirm entspricht eine Datenstruktur (ein Objekt), das die genannten Informationen enthält.
- diese Objekte sind außerdem für die Reaktionen des Bereichs auf Nachrichten zuständig, können auf Anfrage Auskünfte geben und Funktionen durchführen. (Nachrichten sind z.B. Mauskoordinaten, Auskünfte entsprechen z.B. "ich wurde berührt" und Funktionen sind z.B. Mauszeigerform ändern, Hilfe ausgeben etc.)

Lösung

Eine perfekte Lösung für diese Probleme stellt die Objektorientierte Programmierung dar, da sie gerade diese Verknüpfung von Daten und Befehlen (Instanzen und Methoden in der OOP-Nomenklatur²⁵) unterstützt, indem die Trennung zwischen Programm und Daten aufgegeben wird. Damit verbessert sich sowohl der Komfort beim Programmieren, als auch die Möglichkeit, das Programm zu warten (also Fehler zu korrigieren, Verbesserungen und Erweiterungen zu integrieren). In der Beschreibung der Programmierung des Programms (Anhang B) wird auf die Realisierung der Objekte näher eingegangen. Für eine vollständige Beschreibung der Ideen und Prinzipien der OOP ist hier allerdings kein Platz.

5.6. Bedienung mit Maus und Tastatur

Möglichkeiten

Die Maus kann fast immer als Eingabemedium benutzt werden. Ausnahmen sind die Eingaben, bei denen Buchstaben und Ziffern für Beschreibungen, Namen oder Werte benötigt werden. Die Tastatur ist ansonsten als Ergänzung gedacht und kann bei der Menübedienung und bei Dialogboxen eingesetzt werden.

Einschränkung

Die Tastatureingaben sollten nur der Beschleunigung der Bedienung dienen und nicht die Maus ersetzen, da diese für einige Eingaben notwendig ist. Daher werden nur direkte Aufrufe der Menübefehle mittels des Anfangsbuchstabens (wo möglich) und das Verlassen von Dialogboxen mit ESC und RETURN unterstützt. Auf eine Cursortastensteuerung wurde verzichtet. Man kann außerdem die bei der Periodenwahl erscheinenden Felder mit den Tasten m, < und > bedienen, was aber nicht schneller ist.

²⁵ [3] Seiten 8 & 12,

5.7. Anleitung zum Programm

Bedarf

Das Programm ist recht komplex und verfügt über eine große Zahl von Wahlmöglichkeiten. Die einzelnen Bedienungsmöglichkeiten greifen ineinander. Daher ist die Bedienung nicht mehr rein intuitiv möglich; es sollte eine umfassende Anleitung zur Verfügung stehen. Diese muß natürlich über den Umfang einer nur Knöpfe und Schalter erklärenden Gerätebeschreibung hinausgehen. Sie sollte es ermöglichen, sich auch ohne Computer auf die Bedienung des Programms vorzubereiten. Bei der Benutzung soll sie weitere Informationen zur Verfügung stellen. Auch sollte man schnell zu einem Ergebnis kommen können.

Aufteilung der Anleitung

Am sinnvollsten erschien mir eine Aufteilung der Anleitung in eine Kurzanleitung, und eine ausführliche Anleitung. Diese ist wiederum für das einfache Menü und für das vollständige Menü aufgeteilt.

Die Kurzanleitung hilft, wenn man am Rechner sitzt, schnell einen Versuch durchführen will (z.B. zum Testen einer Signalquelle) und mit dem Menüsystem keine Probleme hat. Dann kann man mit dieser schrittweisen Anleitung schnell zu einem Ergebnis kommen.

Zum Vorbereiten ist hauptsächlich die Anleitung für die einfachen Menüs gedacht. Sie gibt die Informationen, die man braucht, um das Arbeitsprinzip des Programms zu verstehen und es bedienen zu können.

Wenn man dann beim Praktikum umfassende Analysen vornehmen will, also alle Befehle braucht, so wird man auf das vollständige Menü umschalten. Dazu benötigt man dann die entsprechende Anleitung.

5.8. Dateiformate

Anforderungen

Die Dateien sollen vom Programm schnell zu lesen sein. Die Datei mit den Hilfstexten muß außerdem leicht zu verändern sein. Ich halte folgende Formate, die natürlich eher für Programmierer interessant sind, für sinnvoll:

Das Meßdatenfile

Die Meßwerte liegen im Speicher als Array (oder Feld) aus Integerwerten vor. Die Datei besteht aus einem Header, gefolgt von einem Abbild des Arrays (der Speicherbereich wird direkt in die Datei geschrieben). Der Header enthält Informationen bzgl. der Länge der Daten und der Meßparameter, sowie mehrere Kennungen, um den Benutzer identifizieren zu können und die Datei auf Echtheit zu testen. Das Headerformat ist in F_DATEI.PAS beschrieben.

Die Hilfsdatei

Die Hilfstexte sind in einer ASCII-Datei abgelegt. Jeder Text ist in der Form, in der er erscheinen soll, aufgebaut, also zeilenweise und mit CR getrennt. Jeder Text beginnt mit "[12]<CR>", wobei jeder Text eine andere Zahl, anhand der er identifiziert wird, besitzt. Die Menüs belegen die Werte 10-19 (Datei), 20-29 (Rechnen) usw.

Die Submenüs sind bei 60ff untergebracht, der Rest recht ungeordnet verteilt. Das Programm sucht sich beim Aufruf einer Hilfe selber den richtigen Text. Die Reihenfolge ist dabei egal. Bei zwei gleichen Nummern würde der erste Text genommen werden.

Jeder Text wird mit dem Zeichen "#" abgeschlossen. Ein folgendes ">23" bedeutet einen Verweis auf den Text Nummer 23. In diesem Fall wird bei der Darstellung des Hilfstextes ein Knopf "Mehr Hilfe" zum Anklicken angeboten, mit dem man zu dem nächsten Text kommt.

Lernprogrammdateien

Es werden zwei Dateitypen für das Lernprogramm benutzt. Der eine (f_lern#.dat) besteht aus einer einfachen sequentiellen Liste von Dateinamen im ASCII-Format. Die Dateinamen sind zeilenweise untergebracht. Es sind nur Namen von BPL-Dateien zugelassen. Die angegebenen Dateien werden innerhalb des Lernprogrammes hintereinander dargestellt.

Der andere Typ sind die angesprochenen BPL-Dateien (BPL → BitPLane). Es handelt sich hierbei um ein speziell auf VGA-Karten im 640x480x16-Modus abgestimmtes Grafikformat, das recht schnell zu laden ist. Es wurde von Herrn Girwidz eingeführt und wird von seinem Programm BPLCAPT.EXE erzeugt. Dieses Programm speichert (wenn es resident im Speicher ist) den aktuellen Bildschirminhalt in einer BPL-Datei, sobald man die Tasten Shift-Druck drückt.

6. Die Elektronik

Aufgaben

Der elektrische Aufbau stellt die Schnittstelle zwischen dem Standard-PC und der physikalischen Umwelt dar. Mit ihm müssen Spannungen verschiedener Quellen gemessen werden. Dabei ist eine schnelle, genaue und für die Elektronik ungefährliche Messung notwendig.

Ausstattung der Apparatur

Die Apparatur besteht aus dem Computer mit Meßkarte, verschiedenen Signalquellen und einer 'Anschlußbox', die die Verbindung herstellt. Außerdem ist eine handelsübliche Soundkarte eingebaut, um Töne auch ausgeben zu können.

Das Programm muß beliebige Signale messen können (bis auf technische Einschränkungen); es muß vielfältige Analysemöglichkeiten bereitstellen. Es müssen Möglichkeiten zum Verändern der Signale und Spektren bestehen.

Die Anschlußbox wurde von mir so konzipiert, daß sie gegen Überlastung des Eingangs durch externe Signale (z.B. Frequenzgenerator) geschützt ist. Ein Verstärker für das Mikrophon und Transformatoren sind Schaltungen für einzelne Versuche, die integriert wurden. Für den Betreuer des Grundpraktikums bleibt in der Box genug Platz, um schaltungstechnisch weitere Versuche zu ermöglichen.

6.1. Meßkarte

Anforderungen

Die Meßkarte muß zumindest einen Analog-Digital-Wandler besitzen. Bei dessen Qualität und der Zahl weiterer Ausstattungsmerkmale (Controller, Sample&Hold, Meßbereichsumschalter) muß man überlegen, welche Anforderungen man stellt.

Die Wahl der Meßkarte

Von Anfang an stand die Karte ME-40 der Firma Meilhaus zur Verfügung. Die Karte beinhaltet einen 12Bit-AD-Wandler. Die damit gegebene Genauigkeit von 4096 Stufen über den Meßbereich ist für diese Anwendung voll ausreichend. Um im NF-Bereich, in dem sich die Messungen abspielen, die Meßzeitpunkte präzise einzuhalten, ist eine Sample&Hold-Schaltung und ein Timer eingebaut. Die mitgelieferte Software erlaubt Meßreihen bis zu 32000 Werten am Stück.

Eine Karte mit eigenem Controller würde höhere und präzisere Abtastraten (mit einem natürlich teureren AD-Wandler) ermöglichen, wobei evtl. noch mehr Meßwerte auf einmal eingelesen werden könnten. Der damit verbundene Kostenaufwand wäre aber bei dieser Anwendung nicht zu rechtfertigen, da die möglichen 60kHz Abtastrate voll ausreichen.

Die Meßkarte steckt in einem Slot des PC und arbeitet mit seiner Stromversorgung. Dadurch hat die Meßapparatur dasselbe Potential wie der Rechner. Solange erdfreie Signalquellen verwendet werden, dürfte sich daraus keine Schwierigkeit ergeben. Die Alternative wäre eine externe Meßstation mit z.B. seriell/parallelem Anschluß. Dagegen spricht der Aufwand, da wieder ein eigener Controller nötig wäre. Außerdem ist die Kommunikation des Rechners mit der Karte schnell und unproblematisch.

Der Meßbereich ist bei dieser Karte bipolar zwischen 10V, 1V und 0.1V zu wählen. Das wird über Jumper vorgenommen. Da alle Signale auf diesen Pegel gebracht werden können, wurde sicherheitshalber der Bereich 10V eingestellt.

So blieb die Wahl bei der Karte. Ihre Daten sind im Anhang F von den Originalbeschreibungen kopiert, damit sie auch künftig zur Verfügung stehen.

6.2. Anschlußbox

Die Karte hat eine 25-poligen D-Sub-Buchse um Signale einspeisen zu können. Natürlich ist es zu aufwendig, wenn Praktikanten an diese Buchse ihre Leitungen anschließen sollten. Also ist über ein abgeschirmtes Kabel ein Kasten mit den entsprechenden Standardeingangsbuchsen und einem mechanischen Umschalter angeschlossen. In den Kasten (im folgenden Anschlußbox) wurden die Versuchsaufbauten für Standardexperimente integriert. Außerdem wurden die von außen zugänglichen Eingänge vor Fehlbelegung, Überlastung usw. geschützt.

6.3. Universeller Eingang mit Schutzschaltung

Um eine beliebige Spannung analysieren zu können, wurde dieser Eingang eingebaut. Mit ihm kann man z.B. Frequenzgeneratoren oder andere Signalquellen anschließen. Um eine Zerstörung des Geräts zu vermeiden gibt es die Schutzschaltung.

Gefahren

Ein Praktikant kann an den Eingang natürlich jede Spannung anschließen. Die Karte ist für Überspannungen bis 20V ausgelegt. Höhere anliegende Spannungen müssen also verhindert werden. Außerdem besteht immer die Gefahr statischer Aufladungen, deren hohe Spannungen einen entsprechenden Schutz (z.B. Erden) notwendig machen.

Doppelter Schutz

Um Überspannungen zu vermeiden, kann man abschalten oder die Spannungen ableiten. Üblicherweise bedient man sich des einfacheren und dabei sichereren (da schnelleren) Verfahrens, dem Ableiten. Dazu wird der Eingang mit jedem Pol gegen die einseitig geerdete Versorgungsspannung über Dioden abgesichert. Wenn man nun eine zu hohe Spannung anlegt, so ist sie höher als die Versorgungsspannung, die Diode leitet und verringert die Überspannung durch Belastung. Was aber, wenn die Überspannung belastbar ist? Dann steigt die Versorgungsspannung an und kann zur Zerstörung des Rechners führen. Also muß sie begrenzt werden. Das geht am einfachsten mit einem Vorwiderstand. Dieser ändert nichts an der Messung, da er klein gegenüber des Eingangswiderstands der Meßkarte ist. Um bei abgeschaltetem Rechner auch einen Schutz zu gewährleisten, wird der Eingang mit einem Relais abgeschaltet. Dieses hängt einfach an der Versorgungsspannung des Rechners.

6.4. Spezielle Aufbauten für einzelne Versuche

UNTERSUCHUNG DER NETZSPANNUNG

Da eine direkte Messung der Netzfrequenz über Vorwiderstände aus Sicherheitsgründen ausfällt, wird ein Transformator ans Netz angeschlossen. Die Sekundärseite wird mit der Karte über den Umschalter und die Schutzschaltungen verbunden. Dann kann man die Netzspannung indirekt messen.

QUALITÄTSPRÜFUNG EINES VERSTÄRKERS

Die Netzspannung wird über den Transformator auch einem schlechten Verstärker zugeführt. Dieser liefert seine Ausgangsspannung über den Wahlschalter an den Eingang. Der Verstärker wurde von der Elektronikwerkstatt des Physikalischen Instituts der Uni Würzburg entwickelt.

ERFASSEN VON TÖNEN UND KLÄNGEN

Aufgabe

Man möchte im NF-Bereich natürlich auch Töne und Klänge analysieren. Dazu dürfte ein Mikrofon am geeignetsten sein, das man aber an einen Verstärker anschließen muß, um die nötigen Pegel zu erreichen.

Mikrofon und Verstärker

Das Mikrofon muß hauptsächlich robust sein, um im täglichen Betrieb möglichst lange zu bestehen.

Auch die Entwicklung dieses Verstärkers wurde der Elektronikwerkstatt überlassen. Er ist auf ein dynamisches Mikrofon abgestimmt und sollte eine Ausgangsspannung von $\pm 8V$ liefern.

AUSGABE VON SIGNALEN MIT LAUTSPRECHERN

Aufgabe

Die gemessenen oder errechneten Signale sollte man auch hören können. Es können beispielsweise die Unterschiede zwischen Sinus, Dreieck und Rechtecksignalen hörbar gemacht werden.

Ansprüche

Da hierbei keine hohe Qualität notwendig ist, reicht eine einfache Soundkarte aus. Sie ist kompatibel zum SoundBlaster®-Standard. Sie enthält einen DA-Wandler mit max. 11kHz Samplefrequenz und einen kleinen Verstärker, der mitgelieferte Kleinlautsprecher ansteuern kann.

7. Schlußbemerkungen und Erklärung

Ich hoffe, daß der Versuch Fourieranalyse für viele Studenten verständlicher geworden ist. Insbesondere möchte ich erreicht haben, daß die Angst vor dem Computer bei einigen überwunden werden kann, indem sie erkennen, daß ein Computer ein durchaus hilfreiches Werkzeug ist.

Herrn Ossau möchte ich für die interessante Themenstellung und die freundliche und unkomplizierte Unterstützung danken.

Herrn Girwidz danke ich für die hardwarenahen Routinen zur Behandlung der BPL-Dateien.

Erklärung

Ich erkläre hiermit, daß ich diese Arbeit nur mit den angegebenen Hilfsmitteln alleine angefertigt habe.

Literaturverzeichnis

- [1] A. N. Vystavkin in: Einführung in die Experimentautomatisierung, Hrsg. Prof. Dr. R. A. Pose, Akademie-Verlag Berlin 1988
- [2] Michael Tischer, SAA-Power-TOOLS in C, Sybex-Verlag 1990
- [3] TurboPascal 6.0, Anleitung Objektorientierte Programmierung, Borland 1990
- [4] W. I. Smirnov, Lehrgang der höheren Mathematik, Teil II, VEB dt. Verlag der Wissenschaften, Berlin 1964
- [5] L. Kuipers, R. Tiemann, Handbuch der Mathematik, Walter de Gruyter & Co., Berlin 1968
- [6] Bronstein-Semendjajew, Taschenbuch der Mathematik, Teubner VG Leipzig 1985,
- [7] Hering Martin Stohrer, Physik f. Ingenieure, VDI-Verlag Düsseldorf 1988
- [8] Murray R. Spiegel, Handbuch für Mathematik, Formeln u. Tabellen, Theorie u. Anwendung.
- [9] H. Franke (Hrsg.), Lexikon der Physik, Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart 1969
- [10] Dorn, Physik Oberstufe, Ausgabe A, Hermann Schroedel Verlag, Hannover 1977 (Schulbuch)
- [11] Bergmann, Schäfer, Experimentelle Physik, Band 1 Mechanik, Akustik, Wärme, Walter de Gruyter Berlin 1975

Anhang A: Programmanleitung

Anspruch

Diese Anleitung soll Ihnen nur die Bedienung des Programms erklären. Die Experimente sind nach der Praktikumsanleitung durchzuführen.

Dazu ist diese Anleitung dreigeteilt. Sie enthält:

- eine schrittweise Kurzanleitung, mit der ein einfacher Versuch durchgeführt werden kann,
- eine Anleitung für die wichtigsten Befehle,
- und eine Anleitung für die restlichen spezielleren Befehle.

Ausstattung

Das Programm ist mit einem Lernprogramm ausgestattet. Dieses kann Ihnen besser als eine Anleitung vorführen, wie das Programm bedient wird. Wählen Sie dazu den Befehl "Extras/Lernen", also den Befehl "Lernen" im Menü "Extras". Diesen erreichen Sie beispielsweise mit Hilfe der Tasten "e" und "l" (in dieser Reihenfolge). Im Folgenden steht dafür "el" !

Programmstart

Das Programm ist im Praktikum so installiert, daß es nach dem Einschalten des Rechners automatisch gestartet wird.

Geben Sie dann Ihre(n) Namen und eine Abkürzung dafür ein. Der Wechsel zwischen den Eingabezeilen geschieht mit der Cursor-nach-unten-Taste.

Fourierprogramm

Bitte geben Sie folgendes ein:

Gruppenname (bis 38 Zeichen): A.E. Altmann & H.R. Kunz
 Abkürzung davon (?-18 Zeichen) Alt+Kunz_
 Die Abkürzung identifiziert Ihre Dateien

Willkommen beim
Fourieranalyseprogramm

(c) '93 Christian Bienmüller
Zulassungsarbeit 1993

Wünschen Sie eine Anleitung
oder ein Lernprogramm?

Wenn Sie sofort beginnen wollen:
Wählen Sie in der dann erscheinenden Dialogbox mit der Maus die Option "Nichts" oder drücken Sie die ESC-Taste.

A.1. Kurzanleitung

Wenn Sie schnell zu einem Ergebnis kommen wollen und im Umgang mit Computern Routine besitzen, dann sollte Ihnen für den Anfang diese Kurzanleitung genügen. Gehen Sie dabei bitte folgendermaßen vor:

- Wenn Sie schon mit dem Programm gearbeitet haben, so geben Sie die Tastenfolge "es" für "Standardwerte setzen" im Extras-Menü ein.
- Legen Sie am Eingang ein Signal an, z.B. schalten Sie den Drehschalter auf "Trafol".
- Wählen Sie nun den Befehl "Messen" im Menü "Datei" (z.B. mit den Tasten "dm").
- Nach $\frac{1}{2}$ Sekunde Meßzeit erscheint im oberen Fenster die Messungskurve (gemessene Spannung über der Zeit aufgetragen).
- Verzichten Sie einfachheitshalber auf die dann geforderte Einschränkung der Meßdaten durch Drücken der ESC-Taste.

Jetzt haben Sie die Messung abgeschlossen und beginnen die Analyse

- Wählen Sie nun innerhalb Ihrer Meßwerte eine Periode des Signals aus, indem Sie z.B. zwei Nulldurchgänge der Kurve markieren. Dies erreichen Sie durch Anklicken des ersten Nulldurchgangs, Wechseln der aktuellen Marke und darauf folgendes Anklicken des zweiten Nulldurchgangs:

Beim Markieren werden grüne Balken an die markierten Stellen gesetzt, um diese zu kennzeichnen. Es kann immer nur eine Marke mit der Maus gesetzt werden. Sie heißt aktuelle Marke und wird heller dargestellt. Das Wechseln der aktuellen Marke wird durch Anklicken des Feldes "andere Marke" zwischen den Fenstern erreicht. Im unteren Fenster werden die Kurvenausschnitte um die Marken vergrößert gezeigt. Eine korrekte Wahl der Periodenbegrenzungen erkennen Sie an der Deckung der Kurvenausschnitte.

Feinabstimmungen sind mit den Feldern mit den Pfeilen "<<|<" und ">|>>" in zwei Geschwindigkeiten möglich. Durch Anklicken der Felder erreichen Sie ein Verschieben der aktuellen Marke.

- Wählen Sie jetzt den Befehl "Kurve→Spektrum" aus dem Menü "Rechnen", um aus der Meßkurve ein Spektrum zu errechnen (z.B. mit der Tastenfolge "rk").
- Nun erscheint im unteren Fenster ein Spektrum mit den Amplituden der beteiligten Frequenzen.
- Wenn Sie im Spektrumsfenster einen der weißen Balken mit der Maus berühren, so werden Ihnen oben rechts auf dem Bildschirm die folgenden Daten angezeigt: Nummer der Harmonischen (Nr.1 = Grundfrequenz, also die, die als Periodenlänge Ihr markiertes Intervall hat²⁶) und deren Frequenz, Amplitude und Phasenbeziehung zur Grundfrequenz.
- Geben Sie nun z.B. "dd" für Drucken (im Menü Datei) ein, und Sie bekommen den Bildschirminhalt und die Koeffizienten ausgedruckt.

Damit haben Sie nun das einfachste, aber auch wichtigste Analyseergebnis erreicht!

²⁶Bitte beachten Sie folgende Zählweisen: Grundschiwingung=1.Harmonische=0.Oberwelle

A.2. Bedienungsanleitung

A 2.1. ZUM VERSTÄNDNIS DER PROGRAMMFUNKTIONEN

Daten

Wie jedes Programm verarbeitet auch dieses Daten. Bei dem Versuch Fourieranalyse fallen zwei Sorten von Daten an:

- "Meßkurve"
- "Spektrum"

Die Meßkurve stellt eine Folge von schnell hintereinander gemessenen Spannungswerten eines Signals (z.B. einer Schwingung) dar.

Das Spektrum ist das sogenannte Amplitudenspektrum²⁷ der Frequenzen, die am Zustandekommen des Signals (der Schwingung) beteiligt sind.

Die aktuelle Meßkurve wird permanent dargestellt (s.u.). Sie kann außerdem auf die Festplatte kopiert werden. Dort können mehrere Meßkurven abgelegt sein.

Die Daten des Spektrums sind nur im Rechner präsent, und werden nicht auf der Festplatte abgelegt. Dafür können sie ausgedruckt werden.

Darstellung

Die Daten werden grundsätzlich graphisch dargestellt. Das bedeutet, daß Sie gewöhnlich eine Kurve auf dem Bildschirm sehen. Sie entspricht dem Aussehen des Signals auf einem Oszilloskop, es wird die Spannung über die Zeit aufgetragen. Diese Kurve wird im oberen der zwei Fenster gezeigt.

Das Spektrum wird ebenfalls graphisch gezeigt, und zwar wahlweise als Amplitudenspektrum, über dem die Phasen der Schwingungen als kleine Uhren eingeblendet sind, oder als Koeffizientenspektrum, in dem die a_j und b_j gezeigt werden.

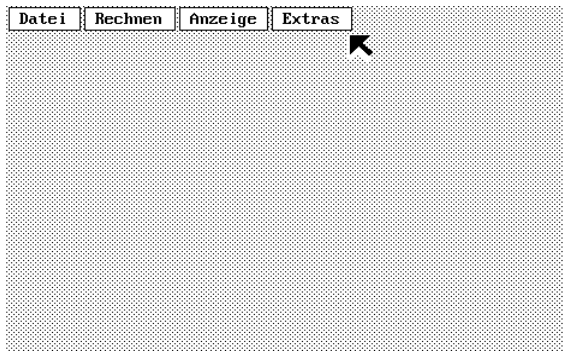
Die verschiedenen Spektrumsanzeigen werden immer im unteren Fenster eingeblendet. Ausnahme: Wenn Sie eine Vergrößerung der Meßdaten gewählt haben, so wird im unteren Fenster diese Vergrößerung gezeigt.

A 2.2. DIE BEFEHLSAUSWAHL UND MENÜBEDIENUNG

Wie gerade angedeutet, können Sie zwischen den verschiedenen Darstellungsformen wählen, wenn Sie die entsprechenden Befehle eingeben. Außerdem haben Sie mit dem Programm noch viel mehr Möglichkeiten, die Sie über eine Fülle von Befehlen nutzen können.

Da man die Auswahl an Befehlen übersichtlich halten will, ist es üblich, die Befehle zu gruppieren. Das führt dazu, daß ca. 5-10 Befehle einem Oberbegriff zugeordnet werden. Wenn Sie den Bildschirm betrachten, so sehen Sie dort in der obersten Zeile mehrere Worte geschrieben. Es sind " Datei | Rechnen | Anzeige | Extras ". Diese Worte sind die angesprochenen Oberbegriffe. Man nennt Sie meist "Menütitel"

²⁷ [7] Seiten 374 f



So sind die Menütitel plaziert.

Anklicken

Um die eigentlichen Befehle zu erreichen, müssen Sie mit der Maus einen der Menütitel "Anklicken". Bewegen Sie dazu den Pfeil auf dem Bildschirm zu einem dieser Wörter, indem Sie die Maus verschieben. Die Maus ist das kleine Kästchen rechts vom Computer, das mit diesem über ein Kabel verbunden ist und die Bewegung weitergibt. Wenn Sie den Pfeil auf einen der Menütitel bewegt haben, so wird er anders dargestellt (invertiert, d.h. Vorder- & Hintergrundfarbe werden vertauscht), um anzuzeigen, daß Sie ihn getroffen haben. Wenn Sie nun die linke Maustaste kurz drücken, so haben Sie den Menütitel angeklickt.

Befehlsauswahl

Nach dem Anklicken eines der Menütitel "fällt" eine Menüleiste direkt darunter herab (womit sich der Name "Menütitel" erklärt haben dürfte). In dieser Menüleiste finden Sie direkt die Befehle aufgelistet, die Sie dem Programm geben können. Einen dieser Befehle können Sie sich nun aussuchen und wie oben beschrieben anklicken. Im Normalfall wird er nun durchgeführt, z.B. eine Berechnung gestartet oder eine Auswahlliste angeboten, aus der Sie eine Datei zum Laden auswählen können.

Keine Befehlsauswahl

Wenn Sie aber doch keinen der angebotenen Befehle geben wollen, so drücken Sie einfach die ESC-Taste. Dasselbe erreichen Sie, wenn Sie die linke Maustaste drücken, wenn sich der Mauszeiger außerhalb der Menüliste befindet.

Untermenüs

Wenn einer der genannten Befehle mit drei Punkten endet (z.B. "Verändern..."), so wird er nicht aufgerufen, sondern er ist ein neuer Menütitel für weitere Befehle. Wenn er angeklickt wird, so erscheint ein weiteres Menü. Man nennt es ein Untermenü. Nun können Sie aus den neu erschienenen Befehlen auswählen. Die älteren bleiben nur der Übersicht halber ("...wo komm ich her") auf dem Bildschirm stehen und haben keine Funktion mehr.

Tastatur


Sie können jeden Befehl und jeden Menütitel mit der Taste, die dem ersten groß geschriebenen Buchstaben entspricht, aufrufen. Sie können also beispielsweise die Taste "r" drücken; dies löst die zum Menütitel "Rechnen" gehörige Menüliste aus. Tippen Sie nun ein "k", so wird der Befehl "Kurve→Spektrum" aufgerufen.

A 2.3. DAS EINFACHE MENÜ DES PROGRAMMS

Das einfache Menü sollte jeder Benutzer beherrschen, da es alle grundlegenden Bedienungsmöglichkeiten des Programms beinhaltet. Wenn Sie mit der Bedienung keine Probleme haben bzw. weitere Analysemöglichkeiten benötigen, so sollten Sie mit dem Befehl Extras/volles Menü auf das vollständige (aber etwas unübersichtlichere) Menü umschalten.

Übersicht

Die Menüzeile mit den Menütiteln ist ja bereits angesprochen worden. Wenn man alle Menüs herunterklappen könnte, so ergäbe das folgendes Bild (etwas auseinandergezogen, um Ihnen einen Rest an Überblick zu bewahren...):

Datei	Rechnen	Anzeige	Extras
Laden 	Kurve→Spectr	Phasenspektrum	Über Hilfe
Speichern	Spectr→Kurve	Koeff.-spektrum	Lernen
Entfernen	-----	Lupe	-----
auswahl	Periodenwahl	-----	Standardwerte
Drucken		Daten-Info	-----
-----			volles Menü
Messung			
Abspielen			

Dies ist das einfachere Menü. Mit dem Befehl Extras/volles Menü können Sie zu dem in A 2.4. beschriebenen vollständigen Menü umschalten. Es enthält noch einige weitere Analyse- und Einstellmöglichkeiten. Die Menüliste mit dem Titel Datei ist übrigens so dargestellt, als ob der Befehl „Laden“ berührt werden würde. Wenn Sie sich über die Groß- und Kleinschreibung wundern, so sollten Sie den Absatz „Tastatur“ (s.o.) beachten.

DIE MENÜLISTE DATEI

Befehl Laden

Meßdaten werden direkt nach dem Messen automatisch in der Datei mit der Bezeichnung „Letzte Messung, unbearbeitet“ auf Festplatte gesichert²⁸. Kommt es also während der Arbeit zu einem Computerausfall (z.B. Probleme mit der Stromversorgung), so ist die Messung nicht verloren. Allerdings überschreibt jede Messung diese temporäre²⁹ Datei. Daher kann man die Daten auch selber abspeichern und ihnen eine erklärende Bezeichnung geben.

Mit dem Befehl "Laden" werden die Dateien wieder zur Bearbeitung in den Arbeitsspeicher geholt. Dazu wird Ihnen eine Auswahlbox angeboten, in der alle für Sie verfügbaren Dateien mit ihrer Beschreibung aufgezählt sind. Zur Bedienung der Auswahlbox siehe A.2.5.

Die Daten, die vorher im Arbeitsspeicher waren, werden überschrieben. Auch die Meßparameter der geladenen Meßdaten werden rekonstruiert. Wollen Sie nach dem Bearbeiten der Daten eine Messung durchführen, so empfehle ich vorher den Befehl "Extras/Standardwerte" aufzurufen. Dieser stellt die Parameter wieder auf die Werte, die nach dem Einschalten eingestellt sind.

Es ist übrigens auch ein Schutz eingebaut, so daß alte Daten anderer Studenten nicht mehr verfügbar sind. Wenn Sie ein berechtigtes Interesse an den Daten haben, so wenden Sie sich an den Betreuer bzw. Herrn Ossau.

Befehl Speichern

Mit diesem Befehl können Sie Ihre Daten auf der Festplatte in einer Datei ablegen, so daß sie für Sie auch nach anderen Messungen wieder verfügbar sind. Es ist empfehlenswert die geforderte Bezeichnung in verständlicher Form anzugeben. Das hilft Ihnen die Daten auch nach Stunden wiederzuerkennen.

Wenn Sie zwei Datensätzen dieselbe Bezeichnung geben, so werden sie trotzdem getrennt gesichert, es besteht dann eine unnötige Verwechslungsgefahr!

²⁸„auf Festplatte gesichert“ heißt, daß eine Kopie der Daten, wie sie im Rechner zur Verarbeitung vorliegen, auf der Festplatte erstellt werden.

²⁹temporär: vorläufig, nur für kurze Zeit bestehend. Die Datei steht Ihnen nicht beliebig lange zur Verfügung.

Befehl Entfernen

Meist werden erst einmal viele Messungen gemacht, flüchtig ausgewertet und auf Festplatte gesichert. Die daraus resultierende Fülle von zum Teil vorläufigen Dateien ist recht unübersichtlich. Diesem kann durch das Löschen einzelner Dateien entgegengewirkt werden, was mit diesem Befehl möglich ist.

Vorsicht: Einmal gelöschte Daten können von diesem Programm aus nicht mehr rekonstruiert werden. Da das Verlassen des Programms im Praktikumsbetrieb nicht vorgesehen ist, sind die Daten verloren.

Zum Löschen bekommen Sie eine Auswahl der Dateien, die Sie löschen dürfen. Wenn Sie eine Datei ausgewählt haben, werden Sie noch einmal gefragt, ob Sie diese Datei wirklich löschen wollen. Danach bekommen Sie wieder die Auswahl der zu löschenden Dateien usw., bis Sie diese Auswahl abbrechen (z.B. mit der rechten Maustaste oder der ESC-Taste).

Befehl Auswahl der zu benutzenden Daten

Evtl. haben Sie unübersichtlich viele Meßdaten, d.h. erheblich mehr Wellenzüge, als Sie sehen wollen oder erkennen können. Dann können Sie hiermit deren Anzahl einschränken. Wählen Sie Anfang und Ende der zu bearbeitenden Daten durch einfaches Anklicken der entsprechenden Stellen mit der Maus.

Die Wahl ist unwiderruflich. Die kompletten Daten sind nur über eventuelle vorherige Aufrufe von Speichern gesichert. Die reinen Meßdaten wurden nach einer Messung automatisch abgespeichert! Sie sind unter der Bezeichnung "Letzte Messung, unbearbeitet" wiederzufinden.

Wenn die Auswahl beendet ist, dann werden die Daten automatisch mit der Beschreibung "Letzte Auswahl" abgespeichert. So können Sie die ausgewählten Daten wiederbekommen, wenn Sie sie z.B. durch eine Synthese überschrieben.

Befehl Drucken

Um die Ergebnisse fixieren zu können, sie also auch ohne Computer zur Verfügung zu haben, können die am Bildschirm erstellten Grafiken ausgedruckt werden. Sie werden mit Datum und Gruppennamen versehen. Im Anhang B können Sie einen Beispielausdruck betrachten. Zu den Graphen werden Ihnen noch die Werte Ihres Spektrums ausgedruckt.

Es ist ein Limit von 10 Ausdrucken pro Versuchsgruppe vorgesehen. Eine Überschreitung ist nur mit Hilfe des Betreuers möglich (Passwortschutz). Bei Gruppen mit mehr als 2 Personen wird empfohlen von den Ausdrucken Kopien anzufertigen, oder mit dem Betreuer zu sprechen. Bei Problemen mit dem Ausdruck (Drucker verweigert Arbeit, Papierstau, Fehler im Druckbild wie fehlende Linien etc.): Betreuer informieren; bitte keine unfachmännische Selbsthilfe.

Befehl Messung

Hiermit wird die eigentliche Messung durchgeführt. Nach der Messung müssen Sie evtl. die Zahl der Meßwerte einschränken. Das können Sie auch explizit mit Datei/Auswahl machen.

Direkt nach der Messung werden die Ergebnisse, wie erwähnt, in der Datei mit der Beschreibung "Letzte Messung, unbearbeitet" abgelegt.

Die Parameter für die Messung (Abtastfrequenz und Meßdauer) können im vollständigen Menü über "Rechnen/Meßparameter" eingestellt werden und unterliegen nach oben der Beschränkung, daß maximal 32000 Meßwerte eingelesen werden können und die maximale Meßfrequenz bei 60 kHz liegt!

Sie können durch das Laden von Daten geändert worden sein. Daher empfiehlt sich eine Kontrolle (mit "Rechnen/Meßparameter") oder das Zurücksetzen auf die Startwerte mit "Extras/Standardwerte".

Befehl Abspielen

Hiermit können Sie die Meßdaten (oder entsprechend die errechneten) mit Hilfe einer installierten Soundkarte als Klang ausgeben. Es wird grundsätzlich mit einer konstanten Samplerate von ca. 11 kHz ausgegeben. Dazu werden die Werte interpoliert. Es werden nur die Daten zwischen den Marken benutzt (und wiederholt). Es wird so viel ausgegeben, daß 3 Sekunden lang ein Ton/Klang zu hören ist.

Beachten Sie, daß durch die Fähigkeiten der Soundkarte die maximale Frequenz, die ausgegeben werden kann, bei ca. 5.5 kHz liegt. Andernfalls entstehen gespiegelte Frequenzen (7 kHz werden als 4 kHz ausgegeben). Dabei ist nur noch Krach zu hören. Die niedrigste Frequenz, die wiedergegeben wird, ist ca. 220 Hz. Tiefere Frequenzen sind aufgrund des Verstärkers der Soundkarte unhörbar.

DIE MENÜLISTE RECHNEN

Rechnen
Kurve->Spectr
Spectr->Kurve

Periodenwahl

Befehl Kurve in Spektrum umrechnen (Fourieranalyse)

Dies ist die eigentliche, zentrale Berechnung, die den Versuch ausmacht. Hier wird die Fourieranalyse durchgeführt.

Aus den Meßdaten (Kurve) wird ein Spektrum berechnet. Damit dies möglich ist, muß vorher eine periodische Funktion markiert sein. (Nach Fourier sind nur periodische Funktionen oder ein einzelnes Intervall durch eine unendliche Summe von Sinus/Cosinusfunktionen zu interpolieren). Das Markieren wird mit dem Befehl Periodenwahl vorgenommen.

Befehl Spektrum in Kurve umrechnen (Fouriersynthese)

Wenn Sie das Spektrum verändert haben oder überprüfen wollen, ob das errechnete die Kurve korrekt wiedergibt, so können Sie hiermit aus dem Spektrum wieder eine Kurve errechnen lassen. Dabei wird grundsätzlich die neue Kurve so gesetzt, daß ihr Periodenanfang auf der ersten Marke liegt. Sie wird aber auch schon vor der Marke berechnet. Somit sollte sie sich mit der originalen Kurve decken. Das können Sie z.B. mit dem Befehl Ansicht/Hintergrund überprüfen (→A.2.4.).

Befehl Periodenwahl

Für eine vernünftige Frequenzanalyse ist eine korrekte Periodenwahl unabdingbar³⁰. Man kann daher mit diesem Befehl aus dem gemessenen Signal einen Bereich auswählen, der für die Rechnung verwendet werden soll. Dies geschieht durch Setzen zweier Marken. Der Bereich zwischen den Marken ist der ausgewählte. Bitte wählen Sie die Marke weit genug vom Anfang Ihrer Messung entfernt, so daß man beim Rekonstruieren der Messung aus dem Spektrum (mittels Spektrum→Kurve) eine Extrapolation über die Marken hinaus vornehmen kann, um die Qualität der Wahl der Marken zu überprüfen.

Wenn Sie diesen Befehl wählen, ändert sich das Aussehen des Bildschirms. Es erscheinen zwei Felder(" <<| <" und "> |>>"), um die Marken in Einzelschritten verschieben zu können. Desweiteren erscheint ein Knopf ("andere Marke"), um zwischen den beiden Marken (von denen man immer nur eine, die aktuelle, setzen kann) zu wechseln. Gehen Sie dann wie folgt vor:

Wählen Sie innerhalb Ihrer Meßwerte eine periodische Funktion aus, indem Sie z.B. zwei Nulldurchgänge markieren. Dies erreichen Sie durch Anklicken des ersten Nulldurchgangs, Wechseln der aktuellen Marke und darauf folgendem Anklicken des zweiten Nulldurchgangs.

Beim Markieren werden grüne Balken an die markierten Stellen gesetzt, um diese zu kennzeichnen. Das Wechseln der aktuellen Marke (die gesetzt werden soll) wird durch Anklicken des Feldes "andere Marke" zwischen den Fenstern erreicht. Die aktuelle Marke erkennen Sie daran, daß sie in hellerem Grün als die andere gezeichnet wird. (Anklicken wird in A 2.2 erklärt)

Die genaue Lage Ihrer Marken können Sie im unteren Fenster verfolgen, wo eine Vergrößerung um die Marken eingeblendet wird. Dabei gibt es einen Vordergrund (weiß, feiner gepunktet) und einen Hintergrund (gelb, mit größerem Abstand zw. den Punkten). Der Vordergrund ist die Umgebung um die aktuelle, hellere, gerade zu setzende Marke, der Hintergrund die entsprechend andere.

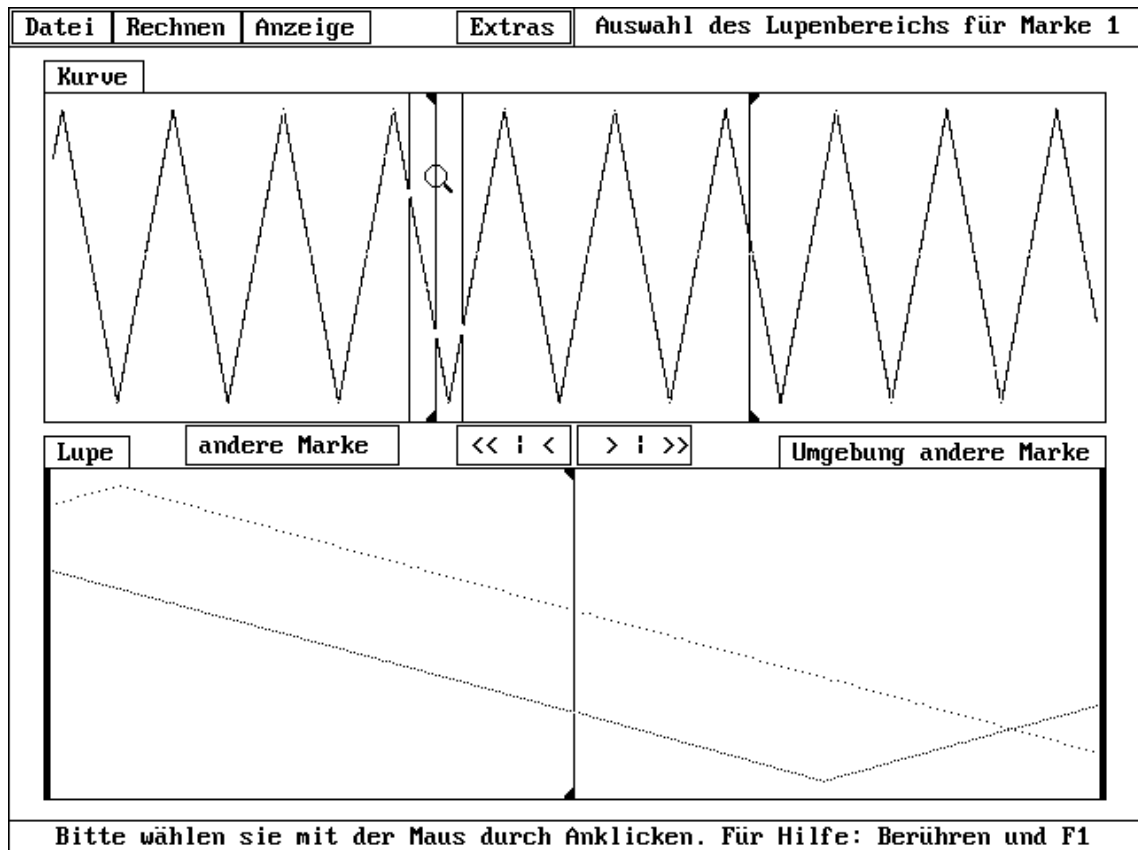
Die Periode Ihres Signals haben Sie wahrscheinlich dann richtig gewählt, wenn die Darstellung des Vordergrundes und die des Hintergrundes sich decken, d.h. die jeweiligen Umgebungen der Marken sich decken. Dies ist bei einer periodischen Funktion nach der Periodenlänge auch zu erwarten. Mit Periodenlänge T gilt ja:

$$U(t)=U(t+T) =U(t+2T) \text{ etc.}$$

³⁰Es soll das ganze Signal interpoliert werden. Dazu ist ein repräsentativer Ausschnitt notwendig. Für die Fourieranalyse ist dies ein Bereich, der, periodisch aneinandergesetzt, das ganze Signal wiedergibt.

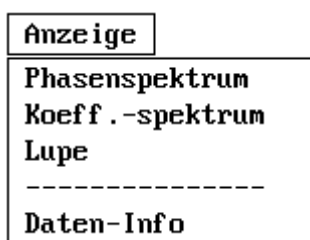
Um die Darstellungen präzise zur Deckung zu bringen, ist es möglich, die Marken durch Anklicken der Kästchen mit den Pfeilen < und > in Einzelschritten, mit << und >> fortlaufend in Schritten zu verschieben. Probieren Sie es einfach aus!

Nach Abschluß dieser Markierung (z.B. durch Aufruf einer Berechnung) werden die zusätzlichen Bedienungselemente wieder entfernt.



Hier sehen Sie, wie der Bildschirm bei der Periodenwahl aussieht. Dabei ist die feiner gepunktete Linie im unteren Fenster die Umgebung um die aktuelle Marke. Im oberen Fenster sind die grünen, senkrechten Linien, die mit Dreiecken enden, die Marken. Die linke Marke ist die hellgrüne "aktuelle Marke", wird im unteren Fenster noch einmal abgebildet und hat zwei Nachbarn ohne Dreiecke. Diese im Original roten Linien geben an, welcher Bereich in der Vergrößerung dargestellt wird. Um dies zu verdeutlichen, ist auch die Vergrößerung mit roten Balken begrenzt. Der Mauszeiger hat die Form einer Lupe bekommen.

DIE MENÜLISTE ANZEIGE



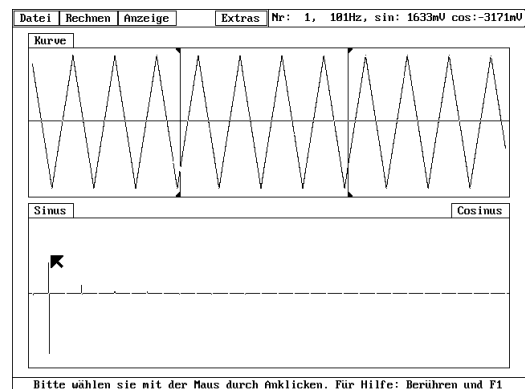
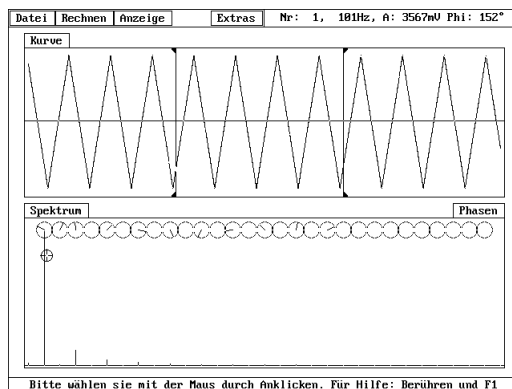
Mit den ersten drei Befehlen kann man wählen, was in dem unteren Grafikfenster zu sehen ist:

Befehl Spektrum in Phasendarstellung

Sie haben die Wahl zwischen der Darstellung des Spektrums mit Amplituden und Phasenwinkeln und der Darstellung mit Sinus- und Cosinuskoeffizienten. In der Phasendarstellung sind nur 30 Werte auf einmal zu sehen, da die Phasen als Uhren mit Winkeln wie beim Einheitskreis dargestellt werden und so etwas Platz brauchen. Die Amplitude ergibt sich aus der Wurzel der Summe der Quadrate der Sinus- und Cosinuskoeffizienten. Die Phase ergibt sich aus dem Arcustangens des Verhältnisses aus Sinus- / Cosinuskoeffizient und hat damit folgenden Wert: Wenn nur Cosinusanteile vorkommen, so sind nur die Phasen 90° und 270° möglich. Bei reinen Sinusanteilen ist die Phase 0° oder 180° . Sie gibt also an, um welchen Winkel die Sinuswelle nach rechts verschoben ist. Genaueres siehe Theorieteil Anhang B.

Befehl Spektrum in Koeffizientendarstellung

Bei der Berechnung der Fourierkoeffizienten fallen je Frequenz zwei Koeffizienten durch die Integration über das Produkt mit der Cosinuswelle (meist A_j) bzw. der Sinuswelle (dann B_j) an. Diese können direkt betrachtet werden (hiermit) oder in Gesamtamplitude und Phasenwinkel umgerechnet werden (siehe Befehl Anzeige/Phasenspektrum).



Hier sehen Sie links die Spektrumsdarstellung (mit Phasenanzeige) und rechts die Koeffizientendarstellung (leider ist es hier nicht möglich, die zwei verschiedenen Farben, die zur Unterscheidung der a_j und b_j gewählt wurden, darzustellen).

Der Zusammenhang zwischen den Darstellungen ergibt sich aus den verschiedenen Formulierungen der Fourierreihe (mehr dazu im Theorieteil):

$$f(x) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(nx + \varphi_n)$$

Befehl Lupendarstellung

Sie können einen Ausschnitt aus den Meßdaten vergrößert dargestellt bekommen. Durch Anklicken einer Stelle im Meßkurvenfenster (mit der Maus) wird die Umgebung um diese Stelle vergrößert dargestellt. Bitte lassen Sie sich nicht irritieren, es wird nur in horizontaler Richtung vergrößert, und die Kurve und deren Vergrößerung sehen sich auf den ersten Blick nicht sehr ähnlich (Verzerrung). Sie können natürlich mehrmals anklicken, um nacheinander verschiedene Stellen zu betrachten.

Der Vergrößerungsfaktor hängt von der Bildschirmauflösung und der Einstellung mit dem Menüpunkt Anzeige/Vergrößerung ab. Dieser ist nur im vollständigen Menü erreichbar.

Befehl Dateninfo

Ihnen werden die dem Programm bekannten Eckdaten Ihrer Messung angegeben.

Information

Messung:
Anzahl der Messwerte: 5633
bei Messfrequenz: 61440 Hz
und bei Messdauer: 92 ms

Extremwerte:
Maximum: 2028 Minimum: -2028 (in mV)

Markierung:
Marke 1: 1924 Marke 2: 3755
Intervalllänge zw.den Marken: 30 ms
Grundfrequenz zw. Marken: 33.56 Hz

Spektrum:
Oberwellen: 50
Berechnungszeit: 3.84 sek.
Anzahl der markierten Perioden: 1
Freier Speicher: 146984 kByte

Die Anzahl der Meßwerte kann (wie dargestellt) durch den Befehl Datei/ausWahl eingeschränkt worden sein. Daraus errechnet sich bei fester Meßfrequenz eine kürzere Meßdauer. Die Extremwerte sind die maximal in der Messung vorkommenden Spannungen. Die gesetzten Marken werden durch ihre Nummer innerhalb der Meßwerte angegeben. Dabei gehört genaugenommen die erste Marke zum Intervall, der Meßwert mit der Nummer der zweiten Marke nicht mehr. Die Anzahl der Meßwerte zwischen den Marken wird in eine Zeit und eine Frequenz umgerechnet. Zur Bedeutung dieser Grundfrequenz siehe: Befehl Rechnen/Periodenwahl und Rechnen/Oberwellen (im vollständigen Menü). Beim Spektrum ist die Anzahl der berechneten Oberwellen, die benötigte Rechenzeit (für Interessierte) sowie die Anzahl der markierten Perioden (siehe Befehl Rechnen/Oberwellen) angegeben.

DIE MENÜLISTE EXTRAS



Befehl Über Hilfe

Wenn Sie diesen Befehl auslösen, so werden Ihnen erst die Hilfemöglichkeiten an sich erklärt, und dann ein umfangreicher Hilfstext angeboten, der Ihnen die Bedienung des Programms erklären soll.

Befehl Lernen

Hiermit wird Ihnen ein einfacher Versuchsablauf vorgeführt. Dazu sehen Sie eine von drei Bildershow (die Sie natürlich wählen können). Sie können mit der rechten Cursortaste weiterblättern oder mit der linken Cursortaste wieder zurückblättern. Wenn Sie genug gesehen haben, so drücken Sie die ESC-Taste, um das Lernen zu verlassen.

Befehl Standardwerte setzen

Um nach Veränderungen der Meßparameter wieder die Werte zu bekommen, die am Programmanfang gesetzt waren, kann man diesen Befehl wählen.

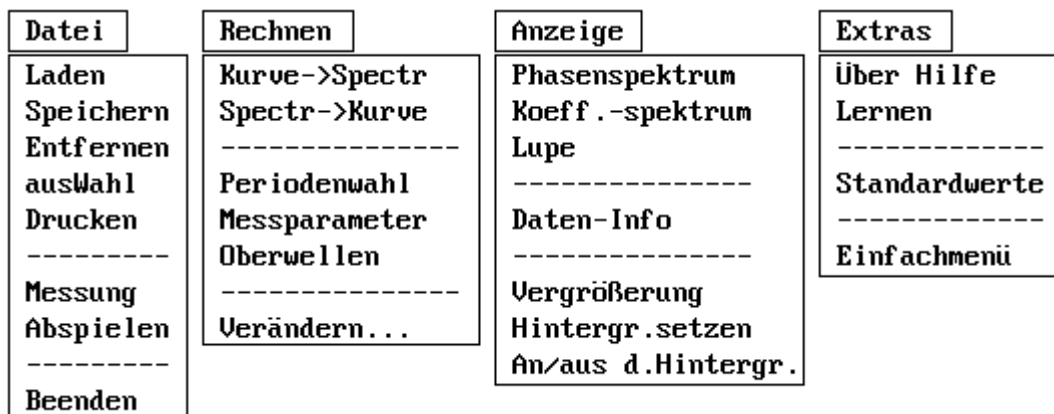
Befehl Volles Menü

Damit Sie nicht durch die Fülle an Befehlen überfordert werden, meldet sich das Programm in einer leichteren Fassung, in der nur die Grundfunktionen verfügbar sind. Wenn Sie Funktionen vermissen, so können Sie hier in das vollständige Menü umschalten. Dann sehen Sie...

A 2.4. DAS VOLLSTÄNDIGE MENÜ DES PROGRAMMS

Wenn Sie mit der Bedienung des Programms zurechtkommen und die weiteren Möglichkeiten nutzen wollen, Sie also nicht durch die Anzahl der Befehle verwirrt werden können, so sollten Sie das vollständige Menü benutzen. Es dürfte ausreichend sein, das einfache Menü zu beherrschen und das vollständige Menü anhand der Anleitung zu bedienen.

Übersicht



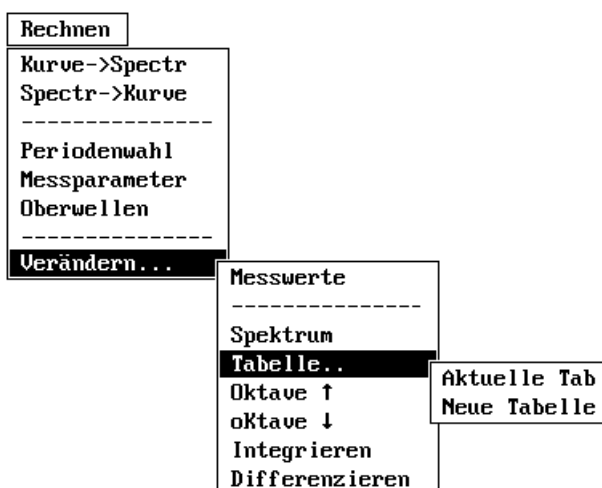
Wie man sieht, hat das Rechnen-Menü noch ein Untermenü "Verändern..." bekommen. Dies wird weiter unten beschrieben. Das einfache Menü ist bis auf den Befehl "volles Menü" eine Teilmenge des vollständigen Menüs. Auch die Stellen, an denen man die Befehle findet, sind unverändert.

DIE ERWEITERTE MENÜLISTE DATEI

Befehl Beenden

Außer im Praktikumsbetrieb kann über diesen Befehl das Programm verlassen werden. Die letzten gemessenen Daten wurden in der Datei 'Letzte Messung, unbearbeitet' gespeichert und gehen also nicht verloren. Analysenergebnisse gehen jedoch verloren.

DIE ERWEITERTE MENÜLISTE RECHNEN



Befehl Meßparameter

Sie können die beim Start des Programms eingestellten Standardwerte für die Messung (Meßfrequenz und Meßdauer) neu einstellen. Dabei müssen Sie aber auf die Maximalzahl von 32000 Meßwerten achten! Außerdem ist die Abtastfrequenz (Samplerate) der Meßkarte auf 60 kHz beschränkt. Die Eingaben sind in Hertz (Hz) und Millisekunden (ms) zu machen. Korrigieren Sie Ihre Eingaben mit Backspace (Rückschritttaste "←") und wechseln Sie zwischen den beiden Eingabefeldern mit der Tabulatortaste ("←→").

Vorsicht: Die Meßparameter werden außerdem durch das Laden von Daten geändert (siehe dort).

Die hier gemachten Veränderungen können Sie mit dem Befehl "Standardwerte setzen" im "Extras"-Menü rückgängig machen.

Befehl Oberwellen

Bei diesem Befehl können Sie zwei Eingaben machen. Wenn Sie dies nicht vollständig machen, werden einfach jeweils die alten Werte weiterhin benutzt.

E i n g a b e

Anzahl der Oberwellen (<1000): 100

Wieviel markierte Perioden: 1

Sie können hier eingeben, wieviele Oberwellen berechnet werden sollen und wieviele Perioden Sie markiert haben. Bei der Eingabe sollten Sie beachten, daß die Rechenzeit für das Spektrum proportional zur Anzahl der Oberwellen ist. Die Maximalzahl berechneter Oberwellen liegt bei 999 Stück.

Sie müssen für die Berechnung eine periodische Funktion markieren. Die Frequenz dieser Periode ist die Grundfrequenz des Spektrums. Die Frequenzen der Oberwellen sind ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. Wenn nun das Signal aber innerhalb Ihrer Marken mehrfachperiodisch ist, also wie die Funktion $y=\sin(2*x)$ im Bereich $x \in [0, 2\pi]$, dann werden alle (echten) Oberwellen dieses Vielfache (hier zwei) widerspiegeln. Dadurch ist aber nur noch jede zweite berechnete & angezeigte Oberwelle eine echte Oberwelle des Signals und die anderen Null³¹.

Um dies zu vermeiden (auch wegen des unnötigen Rechenaufwandes), ohne die Vorteile der Markierung größerer Bereiche zu verlieren (Mittelung über die einzelnen Schwingungszüge), wurde die folgende Möglichkeit geschaffen: die Anzahl der markierten Perioden kann mit diesem Befehl eingegeben werden.

Bei der genannten Funktion $y=\sin(2*x)$ könnten Sie den Bereich $x \in [0, 2\pi]$ markieren, der dann 2 Perioden hätte. Im Spektrum sehen Sie die eigentliche Grundfrequenz als Oberwelle Nr.1. Nun wählen Sie mit diesem Befehl: markierte Perioden: 2. Es erscheint das Spektrum so, als ob Sie nur eine Periode markiert hätten (Spektrum und Signal haben dieselbe Grundfrequenz); es wurde aber über beide Perioden gemittelt!

³¹Wenn sie dies nicht sind, so aufgrund von Unterschieden zwischen den einzelnen Perioden bzw. Rechenungenauigkeiten durch die diskrete Abtastung des Signals.

Also: wenn Sie mehrere Perioden des Signals markieren, z.B. drei, so ist die Grundfrequenz des Spektrums immer noch die, deren Periode einmal zwischen die Marken paßt. Die Grundfrequenz des SIGNALS erscheint nun als ZWEITE Oberwelle des markierten Bereichs! Die Oberwellen 1, 2 usw. des Signals erscheinen als Oberwellen 3, 5 etc im Spektrum. Erst wenn Sie mit diesem Befehl den Wert 3 für die Zahl der markierten Perioden eingeben, wird eine korrekte Darstellung des Spektrums Ihres Signals erscheinen.

Bitte beachten Sie auch, daß man unter der ersten Oberwelle die zweite Harmonische versteht. Die Grundschwingung ist also die nullte Oberwelle, aber die erste Harmonische. Im Programm wird immer die Nummer der Harmonischen angegeben, da dies mit der Nummerierung der Koeffizienten a_j und b_j übereinstimmt. Die nullte Harmonische (a_0), die angegeben wird, ist also die (doppelte) Verschiebung der Schwingung von der x-Achse, also dem Nullpunkt, weg. Ihre Phase ist nicht definiert und wird nicht angezeigt.

Untermenü Verändern

Die Daten sollen nicht nur gemessen, sondern auch verändert werden. Dazu kann entweder die Kurve direkt mit der Maus manipuliert werden, oder das Spektrum wird mit einer der folgenden Methoden geändert:

- direktes Ändern mit der Maus bei unveränderter Phase,
- Eintragen der gewünschten Amplituden- und Phasen-Werte in eine Tabelle,
- Verschieben des Spektrums um eine Oktave nach oben oder unten in der Tonleiter.

Befehl Meßwerte ändern (im Untermenü Verändern)

Sie können nach Aufruf dieses Befehls einfach mit der Maus im Kurvenfenster "klicken" und damit einen neuen Wert "eingeben" (genauer: die benachbarten Werte werden auch gesetzt, entsprechend der Wertauflösung). Wenn Sie mit gedrückter Maustaste über die Fläche ziehen, so legen Sie gleich einen neuen Kurvenzug fest. Es empfiehlt sich, für möglichst glatte Kurvenzüge langsam zu ziehen.

Befehl Spektrum mit der Maus ändern (im Untermenü Verändern)

Gearbeitet wird hier in der Phasendarstellung.

Sie können im Spektrumfenster "klicken" und damit einen neuen Wert "eingeben", indem Sie die Länge des bisherigen Balkens verändern. Dabei bleiben die Phasenbeziehungen erhalten. Phasenveränderungen sind nur in der Tabelleneingabe möglich (s.u.). Wenn die nicht sichtbaren höheren Oberwellen gelöscht werden sollen (ein Verändern ist nicht vorgesehen), so muß die Zahl der Oberwellen auf die sichtbaren 30 eingeschränkt werden³².

³²Dabei ist der Befehl Rechnen/Oberwellen zu benutzen. Mit diesem geben Sie die Zahl 30 als Oberwellenanzahl ein. Wenn Sie meinen, daß eine größere Zahl von Oberwellen bearbeitet werden soll, so wahrscheinlich deshalb, weil Sie mehrere Perioden eines Signals markiert haben und deshalb ein auseinandergezogenes Spektrum haben. Lesen Sie zur Behebung dieses Problems ebenfalls unter dem Oberwellenbefehl nach.

Befehl um Oktave \uparrow bzw. \downarrow Verschieben (im Untermenü Verändern)

Sie können wie bei einer Transposition die Tonlage Ihres Signals ändern. Das geht in Oktavschritten nach oben oder unten in der Tonleiter (also Faktor zwei in der Frequenz).

Befehl Integrieren

Die Koeffizienten im Spektrum werden hiermit entsprechend einer Integration verändert. Dabei werden die Koeffizienten neu normiert, so daß sie bis zu +/- 10Volt erreichen. Damit werden Rechenfehler minimiert.

Befehl Differenzieren

Wie beim vorhergehenden Befehl werden die Koeffizienten verändert; nun entsprechend einer Differenzierung (Ableitung). Die Normierung wird wegen der Anhebung der höheren Frequenzen auf +/- 5Volt durchgeführt.

Unter-Untermenü Tabelle...(im Untermenü Verändern)

Sie können hier eine Tabelle mit 20 Amplituden und Phasen direkt durch Eingabe der Zahlenwerte verändern. Beachten Sie, daß die Nummern immer auf die Grundfrequenz Ihres markierten Bereichs im Kurvenfenster bzw. der Oberwellen bezogen sind.

Sie können die Werte innerhalb Ihres Spektrums auf zwei Arten ändern: erstens durch Eingabe/Ändern der Werte im aktuellen Spektrum (unter Beibehaltung von Periodendauer, Grundfrequenz...). Zweitens durch Eingabe eines vollkommen neuen Spektrums, indem Sie leere Felder bekommen und die Grundfrequenz neu wählen. Deshalb bekommen Sie die folgenden Befehle angeboten:

Befehl Aktuelle Tabelle (im Untermenü Tabelle im Untermenü Verändern)

Sie können die aktuellen Werte im Spektrum individuell ändern, wobei nicht geänderte Werte unangetastet bleiben. Sie können z.B. nur die Phasen der 2. und 3. Harmonischen ändern.

Befehl Neue Tabelle (im Untermenü Tabelle im Untermenü Verändern)

Hiermit können Sie ein komplett neues Spektrum erzeugen. Alle Werte werden auf Null gesetzt, es wird eine neue Grundfrequenz erfragt. Benutzen Sie dies, um Funktionen zu synthetisieren.

DIE ERWEITERTE MENÜLISTE ANZEIGE

Anzeige
Phasenspektrum
Koeff.-spektrum
Lupe

Daten-Info

Vergrößerung
Hintergr.setzen
An/aus d.Hintergr.

Tabelle

Befehl Vergrößerung

Sie können hiermit die Vergrößerung, die Ihr Lupenfenster durchführt, einstellen. Dazu bekommen Sie eine Auswahlbox mit den Wahlmöglichkeiten. Besonders für einen anstehenden Ausdruck sollte man eine sinnvolle Darstellung wählen.

Befehl Hintergrund setzen

Um eine neu berechnete Meßkurve mit der bisherigen vergleichen zu können, kann man die aktuelle mit diesem Befehl "einfrieren", bzw. als Hintergrund setzen. Sie bekommen dann die aktuelle Kurve in dunkelgrün eingeblendet. Sie bleibt auch bei Neuberechnungen erhalten. Wo sie sich mit der aktuellen Kurve überschneidet, werden diese Stellen türkis. Nach Ausführung dieses Befehls ist also die gesamte Kurve, bis eine neue produziert wird, eingefärbt.

Befehl Hintergrund an/aus

Der Hintergrund kann an- und ausgeschaltet werden. Dabei wird sein Inhalt nicht verändert (im Gegensatz zum Befehl "Hintergrund setzen").

Befehl Tabelle

Die Zahlenwerte der ersten 40 Koeffizienten können hiermit betrachtet werden. Dargestellt werden sowohl die absoluten Amplituden und Phasen, als auch die Sinus- und Cosinuskoeffizienten.

DIE ERWEITERTE MENÜLISTE EXTRAS



Befehl Einfaches Menü

Um den Anfänger nicht zu verwirren, steht das Menü in einer abgespeckten Version zur Verfügung. Hiermit können Sie zu diesem Menü umschalten. Zurück geht es dann wieder mit Extras/Vollmenü. Dieser Befehl ist jetzt natürlich nicht erreichbar.

A 2.5. BEDIENUNG DER AUSWAHLBOX

Wozu...

In der Auswahlbox können Sie eine weitere Auswahl treffen, als es ein Menü ermöglicht; so kann der Inhalt der Box sich im Programmverlauf ändern.

Wenn Sie z.B. Meßdaten laden wollen, so müssen Sie sich entscheiden, welche Datei Sie haben wollen und dies dem Programm mitteilen. Dies geschieht indem Ihnen eine Auswahlbox wie folgende gezeigt wird:



In dieser Auswahlbox sind alle für Sie verfügbaren Dateien mit Ihrer Beschreibung aufgelistet.

Bedienung

Klicken Sie nun einfach die gewünschte Beschreibung an oder geben Sie den davor stehenden Buchstaben (hier z.B. c für Rechteck 1021 Hz) ein. Wenn Sie keine Wahl treffen wollen (also beispielsweise den Ladevorgang abbrechen und mit den alten Daten weiterarbeiten wollen), so drücken Sie die ESC-Taste oder die rechte Maustaste.

Entsprechende Auswahlboxen gibt es an verschiedenen Stellen. Jedesmal sollten Sie sich eine der angebotenen Optionen aussuchen und anklicken.

A.2.6. STICHWORTVERZEICHNIS ZUR ANLEITUNG

"Letzte Auswahl", 43

"Letzte Messung, unbearbeitet", 44

A

Abspielen, 44

Abtastfrequenz, 44; 51

Aktuelle Marke, 45

Aktuelle Tabelle, 54

Amplitude, 47

Amplitudenspektrum, 39

Anklicken, 40

Arbeitsspeicher, 42

Ausdruck (Wahl d. Darstellung), 54

Auswahl der zu benutzenden Daten, 43

Auswahlbox, 55

Automatisches Sichern, 42

B

Beenden, 51

Befehlsauswahl, 40

Bildschirm bei der Periodenwahl, 46

C

Computerausfall, 42

Cursortaste, 50

D

Datei, 42

Dateninfo, 49

Deckung von Vor- und Hintergrund, 46

Differenzieren, 53

Drucken, 43

E

Einfaches Menü, 55

Entfernen, 43

ESC-Taste, 40; 56

Extrapolation, 45

Extremwerte der Meßwerte, 49

F

Festplatte, 42

Formel der Fourierreihe, 48

Fourieranalyse, 44

Fourierkoeffizienten, 47

Fouriersynthese, 45

Funktionen synthetisieren, 54

G

Grundfrequenz, 49; 52

Gruppenamen, 43

H

Harmonische, 52

Hilfemöglichkeiten, 49

Hintergrund

an/aus, 55

Markenumgebung, 45

setzen, 55

I

Integrieren, 53

Invertierung, 40

K

Koeffizientendarstellung, 47

Kurve in Spektrum umrechnen, 44

L

Laden, 42

Lernen, 50

Löschen, 43

Lupendarstellung, 48

M

Maus, 40

Maximalzahl berechneter Oberwellen, 52

Menüleiste, 40

Menütitel, 39

Menüübersicht

einfach, 41

Rechnenmenü, 51

vollständig, 50

Messung, 43

Meßdauer, 44; 51

Meßfrequenz, 51

- Meßkurve, 39
- Meßparameter, 51
- Meßwerte ändern, 53
- N**
- Neue Tabelle, 54
- Nulldurchgang, 45
- P**
- Passwortschutz, 43
- Periode, 45
- Periodenanzahl, 52
- Periodenwahl, 45
- Periodische Funktion, 44; 45; 52
- Phase, 47
- Phasendarstellung, 47
- Probleme mit dem Ausdruck, 43
- S**
- Samplerate
 - Abspielen, 44
- Setzen der Marken, 45
- Sichern der Daten, 42
- Soundkarte, 44
- Speichern, 42
- Spektrum
 - Daten, 39
 - in Koeffizientendarstellung, 47
 - in Kurve umrechnen, 45
 - in Phasendarstellung, 47
 - mit der Maus ändern, 53
- Standardwerte setzen, 50
- T**
- Tabelle
 - Anzeige, 55
 - Verändern, 54
- Tastatur, 41
- Tonleiter, 53
- Transposition, 53
- U**
- Untermenüs, 40
- Ü**
- Über Hilfe (Befehl), 49
- V**
- Verändern, 53
- Veränderung der Meßparameter durch Laden, 44
- Vergleichen zweier Meßkurven, 55
- Vergrößerung, 45; 48
 - Befehl, 54
- Verschieben um Oktave, 53
- Versuchsablauf vorgeführt bekommen, 50
- Volles Menü, 50
- Vordergrund, 45
- W**
- Wahl, 43