

## Der direkte Draht zum Gehirn

# toolbox-Brainstormer

von Carsten Fabich und Andreas Bartels

*Der Traum vieler Programmierer und Visionäre rückt in greifbare Nähe: Die unmittelbare Verbindung zwischen Mensch und Maschine. Es geht um ein Gerät zum Messen von körpereigenen Spannungen, wie sie beispielsweise vom Gehirn ausgesandt werden. Worum sich Unikliniken in der professionellen Form reißen, das bringen wir als preiswertes Experimentier-Paket für Studenten und Elektroniker: Soft- und Hardware zur Messung von Hirnströmen.*



Nach langer Entwicklungszeit ist es uns gelungen, ein an den Möglichkeiten gemessen spottbilliges Grundsystem für Mind-Machines und Biofeedback-Geräte zu entwickeln: den "toolbox-Brainstormer". Wir stellen Ihnen neben den theoretischen Grundlagen die passende Hard- und Software für Atari-ST sowie PC vor.

Bevor wir uns direkt mit der Manipulation und rechnergesteuerten Auswertung von Gehirnwellen befassen, müssen wir uns darüber klar werden, wie sich Körperfunktionen als meßbare Größe manifestieren.

Die meisten menschlichen Körperfunktionen werden über Nerven gesteuert oder beeinflusst. Dabei fließende elektrische Stromimpulse erzeugen an der Hautoberfläche Spannungen, die sich mit entsprechend empfindlichen Geräten messen lassen. Diese Tatsache macht man sich zunutze, wenn man die Funktion von Muskeln oder speziell des Herzmuskels untersuchen will. Die aufgezeichneten Spannungen nennt man Elektromyogramm (EMG) bei der Muskel-, oder Elektrokardiogramm (EKG) bei der Herzuntersuchung. Die Aufzeichnung der Aktivität der Augenmuskeln bezeichnet man als Elektrooculogramm (EOG).

Auch die Arbeit des Gehirns besteht vorwiegend aus Nervenaktivität, also auch aus elektrischen Impulsen. Diese elektrischen Vorgänge werden auf der Kopfhaut als sehr kleine Spannungen im Bereich von 10 bis 200 Microvolt abgebildet. Sie lassen sich dort mit empfindlichen Verstärkern nachweisen und aufnehmen. Die Aufzeichnung der Hirnstromaktivität heißt "Elektroenzephalogramm", kurz EEG. Diese Gehirnstromaktivität wurde 1924 von dem Jenaer Neurologen und Psychiater Hans Berger entdeckt, aber erst 1928 veröffentlicht.

Heute ist die Technik des EEG Grundlage für eine große Anzahl diagnostischer Methoden in der Medizin. Die dort in der Therapie verwendeten Geräte übersteigen oftmals den Etat kleinerer Kreiskrankenhäuser. Daß man aber auch mit überschaubarem finanziellen und technischem Aufwand brauchbare Ergebnisse erzielen kann, zeigen wir mit unserem "toolbox-Brainstormer". Aber bitte verstehen Sie den "Brainstormer" nicht als medizinische Wundermaschine, sondern als das, was er ist: eine hübsche Bastelei, um die Grundlagen der Elektrophysiologie zu erforschen.

Um die körpereigenen Spannungen in einen für handelsübliche A/D-Wandler auswertbaren Bereich zu verstärken und für den Computer nutzbar zu machen, setzen wir bei unserem Projekt eine Verstärkertechnik ein, die auch in den teuren EEG-Meßgeräten (Elektroenzephalogramm) der Medizintechnik verwendet wird. Professionelle EEG-Verstärker sind allerdings mehrkanalig aufgebaut und erfassen so Spannungsprofile auf dem ganzen Kopf, um Vorgänge in bestimmten Gehirnbereichen messen zu können. Für unsere Zwecke genügt ein Kanal für die Messung der allgemeinen Aktivität. Auch die Genauigkeit der Verstärkung ist nicht so entscheidend wie bei einem Profigerät.

### Diskret gescheitert

Grundlage der Schaltung ist ein Elektrometersubtrahierer<sup>3)</sup>, besser bekannt als "Instrumentation Amplifier". Der IA verstärkt die Spannungsdifferenz zwischen zwei Elektroden, bezogen auf ein gemeinsames Massepotential, das an einer dritten Elektrode abgegriffen wird.

Erste Versuche eines diskreten Aufbaus des IA aus einzelnen Operationsverstär-

kern mußten wir bei der Entwicklung schnell wieder aufgeben. Der korrekte Aufbau der Schaltung war schwer reproduzierbar, die Fehlerquellen vermehrten sich, und die Schaltung war zu empfindlich gegenüber elektromagnetischen Störfeldern – diese Schwierigkeiten sind auch einer der Gründe für die "schwere Geburt" unseres Projekts.

Wir haben auf einen integrierten IA von "Analog Devices" zurückgegriffen. Der AD 524 A zeichnet sich durch eine sehr hohe Eingangsimpedanz und gute Gleichtaktunterdrückung aus. Die maximale Eingangsverstärkung des IA von 1000 wird durch eine Brücke zwischen Pin 11 und 3 gewählt. Am Ausgangsverstärker wird mit P3 eine Verstärkung bis Faktor 20 eingestellt. Zuletzt bewirkt der Tiefpaß an IC2 durch Mitkopplung über den Spannungsteiler R10/R11 eine zweifache Verstärkung. Die Gesamtverstärkung beträgt daher:  $1000 \times 20 \times 2 = 40000$ . Eine Spannung von 50 Microvolt wird so auf 2 Volt angehoben.

Damit jetzt nicht irgendwelche Brummspannungen verstärkt werden, die beispielsweise aus dem 220-Volt-Netz kapazitiv auf Kopf und Schaltung einwirken, müssen einige Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden: Eine Hälfte des Operationsverstärkers IC2 hält als Spannungsfollower die Abschirmungen der Meßkabel auf dem Potential des Meßsignals, um Spannungsdifferenzen zwischen Innenleiter und Schirm und damit elektromagnetische Wechselwirkungen zu vermeiden.

Aus der zweiten Hälfte des Operationsverstärkers wurde ein aktiver Tiefpaß zweiter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 45 Hz aufgebaut. Er filtert höhere Frequenzanteile aus, die aus dem Netz oder anderen Störquellen stammen können. Bei elektromagnetisch stark ver-

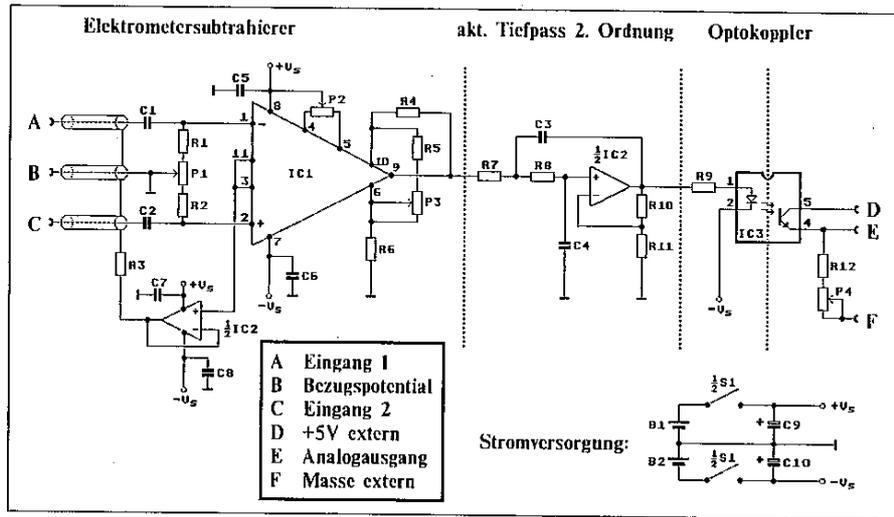
seuchter Umgebung sind EEG-Messungen übrigens unmöglich, weil die Störfelder das Meßsignal vollständig überdecken würden. Medizinischen EEG-Labors wurde aus diesen Gründen schon der Umzug in "elektromagnetisch saubere" Gegenden verordnet.

### Vorsicht, Lebensgefahr!

Ein Optokoppler am Ausgang trennt den Meßverstärker galvanisch vom A/D-Wandler. Auf einen teuren und komplizierten Trennverstärker konnte so verzichtet werden. Optokoppler haben aber leider den Nachteil, daß das Übertragungsverhältnis von Eingangs- zu Ausgangsstrom nicht ganz linear ist. Ein Referenzkoppler, der die übertragenen Meßwerte mit einem weiteren Operationsverstärker nachregelt, wäre die übliche technische Lösung. Einfacher und für unsere Zwecke ausreichend ist es, den Optokoppler im linearen Bereich zu betreiben.

Der Aufbau des "toolbox-Brainstormer" sollte ausnahmslos nur von erfahrenen Elektronikern durchgeführt werden. Alle Versuche von "Freizeitbastlern" sind von vornherein zum Scheitern verurteilt. Nicht umsonst kosten professionelle EEGs nicht unter 50.000,- DM. Viel schwerer als eine Fehlfunktion des Geräts wiegt aber die eventuelle Gefährdung des "Meßobjekts" Mensch. Daher zunächst einige wichtige **Sicherheitshinweise:**

Der Aufbau darf nur unter sorgfältiger Beachtung aller einschlägigen VDE-Bestimmungen stattfinden. Die Schaltung ist auf der Eingangsseite des Optokopplers grundsätzlich nur durch Batterien mit Strom zu versorgen. Bitte niemals – auch nicht zum Testen – Netzteile zur Stromversorgung bei angeschlossenen Elektroden verwenden.



Der analoge Teil des Brainstormers bereitet das Meßsignal für den A/D-Wandler auf

Die Meßelektronik muß gegenüber dem Gehäuse gut isoliert werden. Der normale Oberflächenwiderstand der Haut beträgt bis zu 100 kΩ pro cm<sup>2</sup>. Das Elektroden-system reduziert diese Werte drastisch. Von Elektrode zu Elektrode sind bei gutem Kontakt auch über große Entfernungen im Körper nur noch 2 kΩ zu messen. Daher genügen schon kleinste Spannungen an den Elektroden, um beispielsweise das Herz aus dem Tritt zu bringen.

Unsere Schaltung dient selbstverständlich nur der Messung von Spannungen, aber bei falscher Beschaltung der Bauteile könnte an den Elektroden auch Strom eingespeist werden. Die galvanische Trennung von Patient und Gerät muß daher strikt befolgt werden. Reißt beispielsweise ein Meßkabel von der Platine ab und rutscht dabei über die externe Stromversorgung des Optokopplers aus dem defekten Computer-Schaltnetzteil, kann diese Bastelei bei angeschlossenen Elektroden tödlich enden!

Das ist nur eine von vielen möglichen Gefahrenquellen. Deswegen noch einmal die Warnung: Dieser Aufbau darf nur von Fachmann oder -frau unter Beachtung aller Sicherheitsregeln der Elektrotechnik durchgeführt werden. Bei Nichtbeachtung besteht Lebensgefahr!

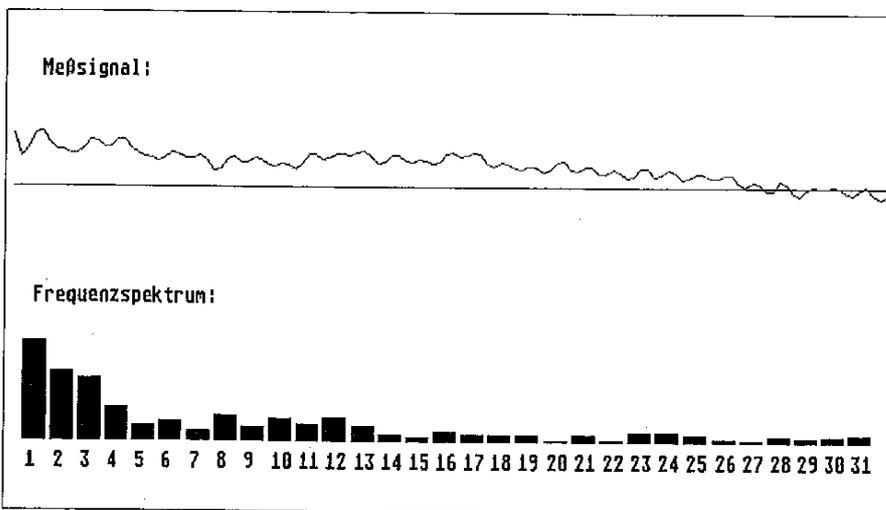
### The day after

Jetzt sind wir höchstwahrscheinlich mit den "schockfesten" Naturen unserer Leserschaft allein und können die Details bei der Realisierung der Schaltung besprechen. Als Kabel sollten möglichst kurze EKG- oder EEG-Kabel verwendet werden, die zu den Anschlußklipsen der Einwegelektroden passen. Um Kontaktprobleme zu vermeiden, werden die Kabel direkt auf die Platine gelötet – Zugentlastung nicht vergessen.

Der Eingang des IA wird symmetrisch aufgebaut. Das bezieht sich sowohl auf die Leitungslängen als auch auf Paarung und Toleranz der Eingangskondensatoren. Wer ein Meßgerät für Kapazitäten besitzt, kann C1/C2 und C3/C4 für den Tiefpaß engtoleriert aussuchen. Für die Schaltung empfiehlt sich generell die Verwendung engtolerierter Bauteile, um die korrekte Funktion zu gewährleisten. Als IC-Sockel sollten nur gedrehte und vergoldete Fassungen zum Einsatz kommen. Spannungen im Microvoltbereich und billiges Sockelmaterial mit hohen Übergangswiderständen passen einfach nicht zusammen.

Große Sorgfalt sollte man auch den Lötstellen widmen. Bei unsauberen Verbindungen können das Flußmittel des Lötzinns und etwaige Korrosionsprodukte des Lötvorgangs unerwünschte hochohmige Verbindungen zwischen Bauteilen erzeugen.

Auch die Suche nach geeigneten Stellen für die Abnahme der Signale am Kopf ist mit Schwierigkeiten verbunden. Nicht je-



Die Software für den Atari-ST wertet das Meßsignal über den schnellen Fast-Fourier-Transformations-Algorithmus aus

der "Patient" wird bereit sein, für dieses simple Experiment sein Haupthaar zu opfern.

Auch Kahlköpfige sind um den eventuell auf ihrer Kopfhaut noch verbliebenen Flaum stets besorgt. Nach langem Experimentieren fanden wir eine günstige Anordnung der Elektroden, die befriedigende Ergebnisse ohne Torturen ermöglicht. Die Stellen befinden sich links und rechts auf der Stirn in den Ecken des Haaransatzes. Personen mit Geheimratsecken haben es hier leichter und können gleich loslegen.

Die dritte Elektrode für das Bezugspotential läßt sich am Hals unterhalb des Ohr läppchens befestigen. Der "Untergrund" für die Klebe-Elektroden sollte mit etwas Alkohol (selbstverständlich nur äußerlich!) von möglichen Salz- oder Fettrückständen befreit werden. Dann wird eine dünne Schicht Elektroden-Gel aufgetragen. Es ist völlig harmlos und in jeder gut sortierten Apotheke erhältlich. Das Gel verringert den Übergangswiderstand zur Elektrode. Nach dem Aufkleben der Elektroden sollte man noch zwei bis drei Minuten warten, damit sich ein elektrolytisches Gleichgewicht einpendeln kann.

### Meßprobleme und Feinheiten

Jetzt steht der Messung nur noch der Abgleich im Weg. Mit P1 (Grob-Offset) und P2 (Fein-Offset) wird der Ausgang des IA auf Massepotential (Mittelklemme der Batterien) gebracht. Bei voll aufgedrehter Verstärkung - P3 hat den kleinsten Widerstand - wird dann auf der Ausgangsseite des Optokopplers gemessen. Der Mittelwert des Ausgangs sollte mit P4 auf einen Wert von 1,27 Volt eingestellt werden - vorausgesetzt, man benutzt wie wir einen A/D-Wandler mit einer Ausgangsspannung von bis zu 2,55 Volt.

Es ist möglich, daß der Offset während der Messungen geringfügig driftet und ein Nachjustieren an P2 erfordert. Ursachen dafür sind beispielsweise austrocknende Elektroden oder Bewegungen des Patienten, die Potentialänderungen am Elektrodensystem bewirken. Die absolut gemessenen Spannungswerte sind weiterhin von der Einstellung der Verstärkung abhängig, was eine Skalierung erschwert. Sie ist aber zum Glück unnötig, da nur das relative Verhältnis der Meßwerte und die daraus resultierenden Frequenzbänder für unsere Beurteilung der Hirntätigkeit interessant sind.

Eine weitere Verwendungsmöglichkeit des Versuchsaufbaus: Befestigt man die Elektroden am Brustkorb und die Bezugselektrode am Unterarm, lassen sich bei niedriger Verstärkung auch einkanali-ge EKGs zur Erfassung der Herzrhythmus abnehmen.

### Stückliste für den "toolbox-Brainstormer":

#### Halbleiter:

IC 1 AD 524 A (DIL)  
IC 2 TLC 272 CP (DIL)  
IC 3 CNY 17

#### Kondensatoren:

C1..4 100 nF,  $\pm 5\%$   
C5..8 100 nF  
C9,10 1 $\mu$ F/16 V, Tantal

#### Widerstände (Metallfilm, $\pm 1\%$ ):

R1,2 2M2  
R3 100R  
R4,6 4k7  
R5 390R  
R7,8 55k  
R9 5k6  
R10,11 22k  
R12 1k

#### Potentiometer:

P1 500k  
P2 10k, Spindeltrimmer  
P3 5k  
P4 2k5

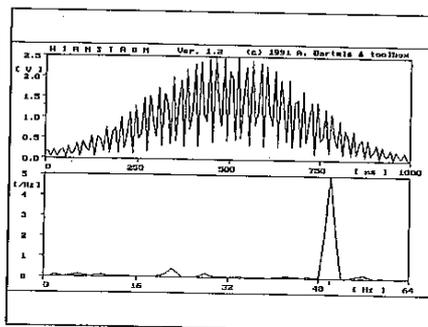
#### IC-Fassungen, gedreht, vergoldet:

1 x 16pol, DIL  
1 x 8pol, DIL  
1 x 6pol, DIL

#### Sonstiges:

S1 Schalter, 2 pol. Ein/Aus  
B1,2 9V E-Block  
2x Batterieclipse  
Cinchbuchse für Ausgang  
Lochrasterplatine  
Metallgehäuse  
3x EKG- oder EEG-Kabel  
EKG/EEG-Einwegelektroden  
Elektroden-Gel

Bei Versuchsmessungen sollte man aber immer einige Regeln und Hinweise im Hinterkopf haben. Die zu messenden Signale liegen typischerweise im Bereich von 40 bis 100 Microvolt. Sie sehen recht unterschiedlich aus - je nachdem, ob die Versuchsperson schläft oder wacht, gesund ist oder krank. Auch Hunger, Durst,



Das klassische 50-Hz-Brummen im Hämmung-Fenster. Bei den Messungen störend, ist es doch ein guter Indikator für funktionierende Hardware

Blutzuckerkonzentration und Blutsauerstoffgehalt sowie das Alter des Probanden beeinflussen das EEG. Normalerweise sind die Gehirnstrom-Muster von rechter und linker Gehirnhälfte sehr ähnlich. Abweichungen der Amplitude von mehr als 30 Prozent werden im klinischen Bereich als Krankheitsanzeichen interpretiert. Zwischen dem EEG und den Gedankeninhalten der Versuchspersonen besteht übrigens keinerlei Zusammenhang.

### Von Alpha- und Deltawellen

Man unterscheidet bei Gehirnstrommustern 4 typische Wellenformen. Die ganz langsamen Deltawellen liegen im Frequenzbereich von etwa 0,5 bis 3 Hertz und sind bei Kindern im Alter bis etwa sechs oder sieben Jahren vorherrschend. Sie treten ebenfalls bei Erwachsenen im Tiefschlaf auf. Neben den seltenen Theta- oder Zwischenwellen mit Frequenzen von zirka 4 bis 7 Hertz dominieren beim gesunden Erwachsenen bei Entspannung und geschlossenen Augen die Alphawellen im Frequenzbereich von etwa 8 bis 13 Hz. Mit geöffneten Augen treten bei den meisten Menschen spontan die sogenannten Betawellen mit Frequenzen von etwa 13 bis 30 Hz auf. Personen, die diese "normale" Reaktion zeigen, werden dem sogenannten R-Typ zugeordnet. Das "R" steht für "responsive", englisch für reagierend. Bei Versuchspersonen, deren Alpha-Rhythmus bei geistiger Tätigkeit erhalten bleibt, spricht man vom P-Typ - "P" wie "persistent" gleich fortdauernd. Sehr wenige Versuchspersonen gehören zum sogenannten M-Typ. Das "M" steht für minus. Bei ihnen treten auch bei völliger Entspannung keine Alphawellen, sondern nur Betawellen auf. Man trifft unter den M-Typen eher Menschen, die ein gutes bildhaftes Vorstellungsvermögen haben, wie beispielsweise Naturwissenschaftler. Unter den P-Typen werden dagegen eher Geisteswissenschaftler angetroffen.

Wenn man versucht, die Probanden in Abhängigkeit ihrer Hirnwellenaktivität so zu beeinflussen, daß sich letztlich ihre Hirnwellen verändern, spricht man von Biofeedback. Das heißt, daß man der Versuchsperson Signale, die sie selbst erzeugt - wie hier das EEG - in geeigneter Weise zuführt. Durch diese Wechselwirkung erhofft man eine bewußte und gewünschte Änderung des Signals in eine bestimmte Richtung. Dabei kann die Rückführung durch sensorische, optische oder auch akustische Reize erfolgen. In der Medizin werden derartige Verfahren beispielsweise zur Diagnose von bestimmten Anfallsleiden angewandt.

Eine solches Verfahren kann beispielsweise aus einer Anordnung bestehen, bei

der die Versuchsperson Lichtblitze mit langsam ansteigender Frequenz zu sehen bekommt, die im Bereich von zirka 1 Hz bis ungefähr 30 Hz laufen. Wenn die Blitzfrequenz den Alpha-Rhythmus der Versuchsperson erreicht, "rastet" sie dort ein und folgt ihr eine Weile. Diesen Effekt nennt man "Photodriving". Vor der Anwendung solcher Praktiken durch Nicht-Mediziner können wir hier aber nur warnen. Sie sind durchaus nicht so ungefährlich, wie sie auf den ersten Blick erscheinen.

## Safety first

Bei Personen, die unter Krankheiten wie etwa Epilepsie leiden, kann die Anwendung von Biofeedback einen zerebralen Anfall verursachen. Aber auch bei einer gesunden Versuchsperson kann eine unsachgemäße Anwendung zum Teil irreparable Schäden hervorrufen. Daher warnen wir Sie hier ausdrücklich davor, Biofeedback anzuwenden, wenn Sie sich nicht vorher – möglichst mit Ihrem Arzt – von der Ungefährlichkeit des jeweiligen Experiments überzeugt haben!

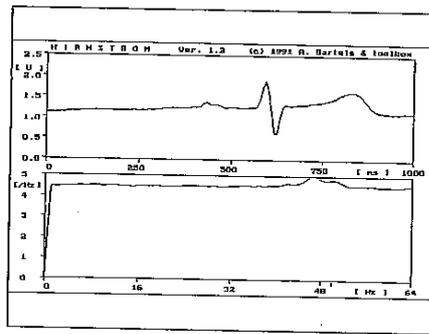
Wenn Sie nun in die Technik des EEG einsteigen wollen, müssen Sie zuerst einmal wissen, wie der Hirnstromverstärker angeschlossen wird. Wir verwenden eine bipolare Ableitung eines einzigen Kanals. In der Medizin werden dagegen bis zu etwa 20 Kanäle gleichzeitig aufgezeichnet. Neben der Masse-Elektrode gibt es eine aktive Elektrode und eine weitere, die als inaktive Elektrode bezeichnet wird. Diese ist natürlich nicht wirklich inaktiv, sondern nur im Vergleich zur aktiven Elektrode. Sie dient als Referenz.

Die optimale Positionierung der Elektroden sollten Sie selbst ausprobieren. Dabei ist zu beachten, daß die Meßergebnisse durch die Herzrhythmusverfälschung verfälscht werden können.

Am Anfang ist es wohl am besten, wenn Sie sich zuerst einmal die ganz "normalen" Gehirnwellen Ihrer Versuchsperson betrachten. Die Messungen mit Probanden sollten dabei in Ruhe, bei geschlossenen Augen im Wach- und Schlafzustand und bei angestrengter geistiger Tätigkeit vorgenommen werden.

Wenn Sie Ihre eigenen Wellen studieren wollen, so sollten Sie sie erst abspeichern und später betrachten. Jede Konzentration auf das Programm selbst ist eine Störung des eigentlichen Versuchsablaufs. Vielleicht erweitern Sie sich das Programm so, daß es ein fortlaufendes Protokoll der Messungen auf der Festplatte vornimmt.

Sehr aufschlußreich kann auch die Langzeitaufnahme im Schlaf sein. Wenn man pro Minute eine Hirnstromdatei automatisch abspeichert, kann man die Schlaf-



Ein einfaches Elektrokardiogramm mit Signal- und Frequenzspektrum, aufgenommen über toolbox-Brainstormer und unser Turbo-Pascal-Programm

phasen sehr gut nachvollziehen, die jeder Mensch im Laufe einer Nacht durchmacht. Dabei kann man entweder die Hirnströme aufnehmen oder die Aktivität der Augenmuskeln mit einem sogenannten "Elektrookulogramm" (EOG). Gerade EOG-Aufnahmen sind sehr gut für solche Messungen geeignet, da man die Augen in leichtem Schlaf sehr intensiv bewegt. In diesem Zusammenhang spricht man auch von den sogenannten REM-Phasen des Schlafs; "REM" steht für "rapid eye moving", also schnelle Augenbewegung.

Das Programm "Hirnstr.Pas" verarbeitet die gemessenen Hirnströme und stellt sie als Zeitsignal grafisch dar. Als Hardware-Grundlage dient der in der letzten Ausgabe der toolbox beschriebene A/D-Wandler<sup>2)</sup> am Gameport. Wichtigstes Bindeglied ist die entsprechend diesem Artikel modifizierte Gamecard.

## Hinweise und Bezugsquellen

- 1) Ulrich Schmitz, Traumreisen aus dem Computer, toolbox 1'91, DMV-Verlag
- 2) Andreas Bartels, Neues vom Gameport: Sound-Sampling und Gehirnstrommessung, toolbox 5'91, DMV-Verlag
- 3) Halbleiter-Schaltungstechnik, U. Tietze / Ch. Schenk, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo
- 4) Die Messung von Biosignalen in der Psychologie, W. Teder, Elektor April '87
- 5) High-quality recording of bioelectric events, A. C. Metting van Rijn / A. Peper / C. A. Grimbergen, Medical & Biological Engineering & Computing September '90
- 6) Datenbuch Linear ICs, Analog Devices (Verstärker Instrumentation)
- 7) Butterfly-Algorithmus, Theorie und Praxis der Fourier-Transformation, Norbert Schaefer / Manfred Bertuch, c't August '86

## Bezugsquelle für EKG-Kabel und Binnaal-Elektroden

Nicolai Medizintechnologie,  
Siemensstraße 27,  
3008 Garbsen 4,  
Tel. 05131/7097-0 oder 0511/28090-0

Natürlich lassen sich mit diesem System auch Herz- oder Atemgeräusche sowie beliebige Schallsignale aufnehmen, speichern und analysieren. Bitte beachten Sie, daß Sie bei Verwendung des original "ANDI"<sup>2)</sup> den Widerstand R6 entfernen müssen, damit der Wandler den Bereich von 0 bis 2,55 Volt verarbeitet, der aus dem Hirnstromverstärker herauskommt. Außerdem wird durch die ebenfalls dort beschriebene "Fast-Fourier-Transformation" (FFT) das Frequenzspektrum der Hirnwellen berechnet und ebenfalls grafisch dargestellt. Sie können also Veränderungen des EEG sowohl im Zeitsignal als auch im Spektrum verfolgen.

## Die PC-Software

Damit die Frequenzen richtig berechnet werden, muß die Abtastrate des Wandlers genau justiert werden. Die Verzögerung zwischen zwei Wandlungen wird in der Prozedur "DatenLesen" durch die leere "k"-Schleife erzeugt. Bei richtig dimensionierter Schleifenlänge sollte bei offenem Wandleringang eine deutliche Zacke bei 50 Hz zu sehen sein. Eventuell müssen Sie noch ein Stück Kabel als "Antenne" an den Wandler anschließen, damit er sich genug Netzbrummen einfängt. Je nachdem, wie lange die Zeitphasen sind, die Sie wandeln wollen, müssen Sie auch die Beschriftungen ändern. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß die Beschriftung der Y-Achse des Spektrums keine absolute Einheit darstellt, sondern immer nur relativ zum aktuellen Maximum zu sehen ist. Das Spektrum wird stets so dargestellt, daß ein Maximum gerade noch Platz im Diagramm findet.

Das Zeitsignal in Volt am "ANDI" ist dagegen geeicht. Als besonderes Feature verfügt das Programm über eine eingebaute Routine zum Abspeichern des aktuellen Signals und Spektrums. Wenn Sie die <S>- oder <Space>-Taste drücken, ermittelt das Programm automatisch einen Dateinamen aus Uhrzeit und Datum und speichert die Daten ab. Die gespeicherten Signale und Spektren lassen sich im Programm später wieder einladen und betrachten.

Der Dateiname besteht aus Stunde, Minute, Sekunde und Tag mit jeweils zwei Stellen. Die Dateierweiterung bilden der Monat mit zwei und das Jahr mit einer Stelle. Beispiel: Die Datei "02053111.031" wurde

um 02.05.31 Uhr aufgenommen, und zwar am 11.03.1991. Es ergibt sich also folgende interpretierte Anzeige: 02.05.31 11.03.(199)1.

Die weitere Verarbeitung, Auswertung oder eine Druck- oder Plotfunktion mag sich jeder entsprechend seinen Wünschen und verfügbarer Hardware selbst in das Programm einbauen. Dank des konsequent modularen Aufbaus sollte das keinerlei Probleme bereiten.

Die Hirnstrommessung à la toolbox setzt sich aus drei Komponenten zusammen: Die Eingangsschaltung mit Verstärker und Filter bereitet die schwachen Signale auf. Diese Schaltung ist für alle Rechner universell verwendbar. Ein Analog-Digitalwandler, dessen Anschluß vom jeweiligen Computertyp abhängt, bringt die zuvor aufbereiteten Signale in den Rechner. Die Anforderungen an Genauigkeit, Auf-

lösung und Geschwindigkeit sind für unsere Aufgabe nicht besonders hoch. Die benötigte Auflösung von 8 Bit und Sample-Frequenzen bis 1 kHz erfüllt heute fast jeder Wandler. Völlig ausreichend ist beispielsweise der low-cost-A/D-Wandler "ANDI"<sup>2)</sup>, der sich beim ATARI-ST etwa an die Druckerschnittstelle oder den ROM-Port anschließen läßt. Für den PC eignet er sich ebenso für die Meßwertaufnahme wie unsere Schaltung aus dem Joystickport-Projekt<sup>2)</sup>.

## Die ATARI-ST-Software

Das letzte Glied der "Hirnstromkette" ist die Software. Sie nimmt die Meßwerte auf und stellt sie grafisch dar. Durch die Fouriertransformation der Samples werden die aktiven Frequenzbereiche des Gehirns sichtbar.

Wir wollen Ihnen hier auch die Software für den Atari-ST vorstellen. Ein einfache Programm in GFA-Basic ab 3.0 nimmt in einer Schleife die Messung für eine A/D-Wandler am ROM-Port vor. Dabei gliedert sich die Meßwertanalyse in folgende Abschnitte:

- Meßwertaufnahme im Interrupt
- Darstellung der Meßwerte
- Fouriertransformation in das Frequenzspektrum
- Darstellung des Frequenzspektrums

Die Meßwertaufnahme muß für die geringen Samplefrequenzen nicht unbedingt im Interrupt geschehen. Der Interrupt vereinfacht nur die Einstellung der Samplefrequenz. Eine Meßschleife mit einstellbarer Verzögerung ist genauso effektiv und erleichtert die Anpassung an andere A/D-Wandler.

(us)

```

1: (* ----- *)
2: (*           HIRNSTR.PAS           *)
3: (*           Programm zur Aufnahme und *)
4: (*           Auswertung von Gehirnwellen *)
5: (*           (c) 1991 by Andreas Bartels & TOOLBOX *)
6: (* ----- *)
7: ($A-,B-,D-,E+,F+,I-,L-,O-,R-,S-,V-)
8: PROGRAM Hirn_Strom_Messung;
9:
10: {$IFDEF CPU87} {$N+} {$ELSE} {$N-} {$ENDIF}
11:
12: USES
13:   Crt, Dos, Graph;
14:
15: CONST
16:   MaxLaenge = 128;                { = 512 SHR ShiftL }
17:   dxOben    = 250;
18:   DX        = 128;                { X-Achsen-Strichabstand }
19:   XStrOben  = '[ ms ]';
20:   XStrUnten = '[ Hz ]';
21:   YStrOben  = '[ V ]';
22:   YStrUnten = '[ /Hz ]';
23:   { Falls ein Coprozessor vorhanden ist: }
24: {$IFDEF CPU87}
25:   TYPE REAL = EXTENDED;
26: {$ENDIF}
27:
28: TYPE
29:   IntegerFeld = ARRAY[0..MaxLaenge] OF INTEGER;
30:   RealFeld    = ARRAY[0..MaxLaenge] OF REAL;
31:   DatenFile  = RECORD
32:     Signal      : RealFeld;
33:     Spektrum    : RealFeld;
34:     Kommentar  : STRING;
35:   END;
36:
37: VAR
38:   GraphDriver,
39:   GraphMode, MaxyWert,
40:   XLinks, XRechts,
41:   YOben, YUnten,
42:   Y1Oben, Y1Unten,
43:   IMR2L, IMR1L,
44:   ShiftL, dxUnten, MYH,
45:   MaxY, i, j, Hilf      : INTEGER;
46:   Faktor, MaxWert      : REAL;
47:   CH                    : CHAR;
48:   HStr                  : STRING;
49:   BitRev                : IntegerFeld;
50:   Sinus, Cosinus,
51:   RealTeil, ImagTeil   : RealFeld;
52:   DatenFileName       : STRING[12];
53:   Dat                  : DatenFile;
54:   DatFile              : FILE OF DatenFile;
55:   DateiOK              : BOOLEAN;
56:
57: FUNCTION DatumUndZeitStr : STRING;
58: VAR
59:   Year, Month, Day, WeekDay,
60:   Hour, Min, Second, Sec100 : WORD;
61:   Monat, Tag,
62:   Stunde, Minute, Sekunde  : STRING[2];
63:   Jahr                      : STRING[4];
64: BEGIN
65:   GetDate(Year, Month, Day, WeekDay);
66:   Str (Day:1, Tag);
67:   IF Day < 10 THEN Tag := '0' + Tag;
68:   Str(Month:1, Monat);

```

```

69:   IF Month < 10 THEN Monat := '0' + Monat;
70:   Str(Year:1, Jahr);
71:   Jahr := Copy(Jahr,4,1);
72:   GetTime(Hour, Min, Second, Sec100);
73:   Str(Hour:1, Stunde);
74:   IF Hour < 10 THEN Stunde := '0' + Stunde;
75:   Str(Min:1, Minute);
76:   IF Min < 10 THEN Minute := '0' + Minute;
77:   Str(Second:1, Sekunde);
78:   IF Second < 10 THEN Sekunde := '0' + Sekunde;
79:   DatumUndZeitStr := Stunde + Minute + Sekunde +
80:     Tag + ',' + Monat + Jahr;
81: END;
82:
83: PROCEDURE RahmenUndSoWeiter; { An Grafikkarte anpassen }
84: BEGIN
85:   GraphDriver := Detect;
86:   InitGraph(GraphDriver, GraphMode, GetEnv('BGIPATH'));
87:   IF NOT (GraphDriver IN (HercMono, EGA, VGA)) THEN BEGIN
88:     WriteLn('Sorry: Das Programm benötigt eine EGA-, VGA-' +
89:       ' oder Hercules-Grafikkarte!');
90:     Halt;
91:   END;
92:   IF GraphResult <> GOK THEN BEGIN
93:     WriteLn('Grafik konnte nicht initialisiert werden!');
94:     WriteLn('Geben Sie den Pfad zu den Treibern mit ' +
95:       'Hilfe der Umgebungsvariablen "BGIPATH" an!');
96:     ^G;
97:     Halt;
98:   END;
99:   Rectangle(0, 0, 600, 347);
100:  OutTextXY( 55, 6, 'H I R N S T R O M   Ver. 1.2 ' +
101:    ' (c) 1991 A. Bartels & toolbox';
102:    { Beschriftung oben }
103:  Rectangle(XLinks, YOben, XRechts, Y1Oben);
104:  FOR i := 0 TO 4 DO BEGIN
105:    Line(XLinks + i * DX, Y1Oben, XLinks + i * DX,
106:      Y1Oben + 5);
107:    Str((i * dxOben):3, HStr);
108:    OutTextXY(XLinks + i * DX - 15, Y1Oben + 10, HStr);
109:  END;
110:  OutTextXY(XLinks + Round(3.5 * DX) - 15,
111:    Y1Oben + 10, XStrOben);
112:  FOR i := 0 TO 5 DO BEGIN
113:    Line(XLinks-5, Y1Oben - 1 - Round(i * MaxyWert / 5),
114:      XLinks, Y1Oben - 1 - Round(i * MaxyWert / 5));
115:    Str((i * 0.5):4:1, HStr);
116:    OutTextXY(XLinks - 40, Y1Oben -
117:      Round((i * MaxyWert / 5) + 1), HStr);
118:  END;
119:  OutTextXY(XLinks-45, Y0Oben + Round(MaxyWert / 8),
120:    YStrOben);
121:  Rectangle(XLinks, Y0Unten, XRechts, Y1Unten);
122:  FOR i := 0 TO 4 DO BEGIN
123:    Line(XLinks + i * DX, Y1Unten, XLinks + i * DX,
124:      Y1Unten + 5);
125:    Str((i * dxUnten):3, HStr);
126:    OutTextXY(XLinks + i * DX - 15, Y1Unten + 10, HStr);
127:  END;
128:
129:  Line(Round(XLinks + (50 SHR Succ(ShiftL)) *
130:    (dxOben / 250)), Y1Unten + 2,
131:    Round(XLinks+(50 SHR Succ(ShiftL)) *
132:      (dxOben / 250)),
133:    Y1Unten + 7);
134:  OutTextXY(XLinks + Round(3.5 * DX) - 15,
135:    Y1Unten + 10, XStrUnten);
136:  FOR i := 0 TO 5 DO BEGIN

```

```

137:   Line(XLinks - 5, Y1Unten - Round(i * MaxYWert / 5),
138:         XLinks, Y1Unten - Round(i * MaxYWert / 5));
139:   Str(i:2, HStr);
140:   OutTextXY(XLinks - 40,
141:             Y1Unten - Round((i * MaxYWert / 5) + 1),
142:             HStr);
143:   END;
144:   OutTextXY(XLinks - 45, Y0Unten + Round(MaxYWert / 10),
145:             YStrUnten);
146: END;
147:                                     ( RahmenUndSoWeiter )
148: PROCEDURE Speichern;
149: BEGIN
150:   Sound(50);
151:   DatenFileName := DatumUndZeitStr;
152:   Dat.Kommentar := 'Signal und Fourierspektrum.';
153:   Assign(DatFile, DatumUndZeitStr); ReWrite(DatFile);
154:   Write(DatFile, Dat); close(DatFile);
155:   CH := 'x'; NoSound;
156: END;                                     ( Speichern )
157:
158: PROCEDURE Laden;
159: VAR HilfStr : STRING[12];
160: BEGIN
161:   ClrScr; GotoXY(10, 6);
162:   Write('Datum des zu ladenden Signals (tt.mmj) > ');
163:   ReadLn(DatenFileName);
164:   GotoXY(10, 7);
165:   Write('Uhrzeit des zu ladenden Signals (hhmmss) > ');
166:   ReadLn(HilfStr);
167:   DatenFileName := HilfStr + DatenFileName;
168:   {$I-}
169:   Assign(DatFile, DatenFileName); Reset(DatFile);
170:   IF (IORResult <> 0) OR (DatenFileName = '') THEN BEGIN
171:     WriteLn('Datei kann nicht geladen werden!', ^G);
172:     Delay(1000);
173:     DateIOk := FALSE;
174:     Exit;
175:   END;
176:   DateIOk := TRUE; Read(DatFile, Dat);
177:   {$I+}
178:   Close(DatFile); GotoXY(10, 9);
179:   WriteLn('Kommentar in ', DatenFileName, ' : ',
180:           Dat.Kommentar);
181:   GotoXY(10, 12); Write('Bitte <Return> drücken ');
182:   ReadLn;
183: END;                                     ( Laden )
184:
185: FUNCTION Fenster(i, Fnr : INTEGER) : REAL;
186: BEGIN
187:   CASE Fnr OF
188:     0 : Fenster := 1;                                     ( Rechteck )
189:     1 : Fenster := 1 - 2 *                               ( Dreieck )
190:         Abs(1 - (MaxLaenge SHR 1)) / MaxLaenge;
191:     2 : Fenster := 0.5 - 0.5 *                           ( Hanning )
192:         Cos(2 * Pi * i / MaxLaenge);
193:     3 : Fenster := 0.54 - 0.46 *                          ( Hamming )
194:         Cos(2 * Pi * i / MaxLaenge);
195:   END;
196: END;                                     ( Fenster )
197:
198: PROCEDURE DatenLesen;
199: VAR
200:   i, k : INTEGER;
201:   c : REAL;
202: BEGIN
203:   IMR21 := Port[$21];                                     ( Interrupts sperren )
204:   IMR1 := Port[$A1];
205:   Port[$21] := $FF;
206:   Port[$A1] := $FF;
207:
208:   i := Port[$208];                                       ( A/D-Wandler abfragen )
209:   Delay(1);                                             ( 1. mal Initialisieren )
210:   FOR i := 0 TO MaxLaenge DO BEGIN
211:     Dat.Signal[i] := Port[$208] * Fenster(i,0);
212:     { andere Fensterfunktion wird symmetrisch um 127 durch: }
213:     { Dat.Signal[i] := 127+(PORT[$208]-255) * Fenster(i,3)/2; }
214:     { Verzögerung zur Einstellung der Samplefrequenz }
215:     { Justierung einfach nach 50 Hz-Brummen }
216:     FOR k := 0 TO 3330 DO;
217:   END;
218:   Port[$21] := IMR21;                                     ( Alte Interrupts wieder zulassen )
219:   Port[$A1] := IMR1;
220: END;
221:                                     ( DatenLesen )
222: PROCEDURE SignalDarstellen;
223: BEGIN
224:   MaxWert := 255; ( Nicht auf das Signalmaximum normiert )
225:   SetViewPort(XLinks + 1, Y0Oben + 1,
226:               XRechts - 1, Y1Oben - 1, TRUE);
227:   ClearViewPort;
228:   SetViewPort(XLinks, Y0Oben,
229:               XRechts, Y1Oben, TRUE);
230:   Faktor := MaxYWert / MaxWert;
231:   MoveTo(0, MaxYWert - Round(Dat.Signal[0] * Faktor));
232:   FOR i := 1 TO MaxLaenge DO
233:     LineTo(i SHL ShiftL,
234:            MaxYWert - Round(Dat.Signal[i] * Faktor));
235: END;
236:                                     ( SignalDarstellen )
237: PROCEDURE LookUpTable;
238: ( Erstellt eine Tabelle für Sinus, Cosinus und Bit-Umkehr )
239: VAR
240:   Laenge, L12,
241:   AdrNorm, AdrBRev : INTEGER;
242:   WinkelEinheit, Wi : REAL;
243: BEGIN
244:   WinkelEinheit := 2 * Pi / MaxLaenge; ( Sinus und Cosinus )

```

```

245:   L12 := MaxLaenge SHR 1;
246:   FOR i := 0 TO L12 DO BEGIN
247:     Wi := WinkelEinheit * i;
248:     { Symmetrieausnutzung bringt weiteren Zeitgewinn }
249:     Sinus[i] := -Sin(Wi); Sinus[L12 - i] := Sinus[i];
250:     Sinus[L12 + i] := -Sinus[i];
251:     Sinus[MaxLaenge - i] := -Sinus[i];
252:     Cosinus[i] := Cos(Wi); Cosinus[L12 - i] := -Cosinus[i];
253:     Cosinus[L12 + i] := -Cosinus[i];
254:     Cosinus[MaxLaenge - i] := Cosinus[i];
255:   END;
256:   AdrBRev := 0; BitRev[0] := 0;
257:   FOR AdrNorm := 1 TO Pred(MaxLaenge) DO BEGIN ( Bit-Umkehr )
258:     Laenge := MaxLaenge SHR 1;
259:     WHILE AdrBRev + Laenge > Pred(MaxLaenge) DO
260:       Laenge := Laenge SHR 1;
261:     AdrBRev := AdrBRev MOD Laenge + Laenge;
262:     IF AdrBRev > Pred(AdrNorm) THEN BEGIN
263:       BitRev[AdrNorm] := AdrBRev;
264:       BitRev[AdrBRev] := AdrNorm;
265:     END;
266:   END;
267: END;                                     ( LookUpTable )
268:
269: PROCEDURE FFT( Realt : RealFeld ); ( Hintransformation ! )
270: VAR
271:   TempReal, TempImag,
272:   WichtigungReal, WichtigungImag : REAL;
273:   TabNr, l, m, ischritt : INTEGER;
274: BEGIN
275:   FOR i := 0 TO Pred(MaxLaenge) DO BEGIN
276:     Realt[i] := Realt[BitRev[i]];
277:     ImagTeil[i] := 0;
278:   END;
279:   l := 1;
280:   WHILE l < MaxLaenge DO BEGIN ( FFT - Algorithmus )
281:     ischritt := l SHL 1;
282:     FOR m := 1 TO 1 DO BEGIN
283:       TabNr := Round(MaxLaenge SHR 1 DIV l) * Pred(m);
284:       WichtigungReal := Cosinus[TabNr];
285:       WichtigungImag := Sinus[TabNr];
286:       i := Pred(m);
287:       REPEAT
288:         j := i + 1;
289:         TempReal := WichtigungReal * Realt[i] -
290:                     WichtigungImag * ImagTeil[j];
291:         TempImag := WichtigungReal * ImagTeil[j] +
292:                     WichtigungImag * Realt[i];
293:         Realt[j] := Realt[i] - TempReal;
294:         ImagTeil[j] := ImagTeil[i] - TempImag;
295:         Realt[i] := Realt[i] + TempReal;
296:         ImagTeil[i] := ImagTeil[i] + TempImag;
297:         i := i + ischritt;
298:       UNTIL i >= MaxLaenge
299:     END;
300:     l := ischritt;
301:   END;
302: END;                                     ( FFT )
303:
304: PROCEDURE SpektrumDarstellen;
305: BEGIN
306:   MaxWert := 1;
307:   Dat.Spektrum[0] := 0;
308:   FOR i := 0 TO MaxLaenge SHR 1 DO
309:     IF Dat.Spektrum[i] > MaxWert THEN
310:       MaxWert := Dat.Spektrum[i];
311:   SetViewPort(XLinks + 1, Y0Unten + 1,
312:               XRechts - 1, Y1Unten - 1, FALSE);
313:   ClearViewPort;
314:   SetViewPort(XLinks, Y0Unten,
315:               XRechts, Y1Unten, TRUE);
316:   Faktor := MaxYWert / MaxWert;
317:   MoveTo(0, MaxYWert - Round(Dat.Spektrum[0] * Faktor));
318:   FOR i := 1 TO MaxLaenge SHR 1 DO
319:     LineTo(i SHL (ShiftL + 1),
320:            MaxYWert - Round(Dat.Spektrum[i] * Faktor));
321: END;
322:                                     ( SpektrumDarstellen )
323: BEGIN ( Hauptprogramm )
324:                                     ( je nach Grafik-Karte anpassen )
325:   XLinks := 50; XRechts := 562;
326:   Y0Oben := 17; Y1Oben := 562;
327:   MaxYWert := Y1Oben - Y0Oben; Y0Unten := 182;
328:   Y1Unten := Y0Unten + MaxYWert; ShiftL := 0;
329:   Hilf := MaxLaenge;
330:   WHILE Hilf < 512 DO BEGIN
331:     Hilf := Hilf SHL 1; Inc(ShiftL);
332:   END;
333:   dxUnten := (64 SHR ShiftL) * 250 DIV dxOben;
334:   FOR i := 0 TO MaxLaenge DO Dat.Signal[i] := 0;
335:   WriteLn('Erstelle Look-up-table... ');
336:   LookUpTable;
337:   REPEAT
338:     ClrScr; GotoXY(5, 2);
339:     Write('***** H I R N S T R O M Ver. 1.2 ' +
340:           '(c) 1991 A. Bartels & toolbox *****');
341:     GotoXY(5, 4);
342:     WriteLn('Befehle : <M>-essen (<S>-peichern, <P>pause)');
343:     WriteLn(' <L>-aden');
344:     WriteLn(' <Q>-uit oder <Esc> : Ende ');
345:   REPEAT
346:     UNTIL KeyPressed;
347:   CH := ReadKey;
348:   CASE UpCase(CH) OF
349:     'M': BEGIN
350:       RahmenUndSoWeiter;
351:     REPEAT
352:

```

```

353:         IF KeyPressed THEN
354:             CH := ReadKey;
355:             CH := 'x';
356:             DatenLesen; SignalDarstellen;
357:             FFT(Dat.Signal);
358:             Dat.Spektrum[0] := 0;
359:             FOR i := 1 TO MaxLaenge SHR 1 DO
360:                 Dat.Spektrum[i] := Sqrt(Sqr(RealTeil[i]) +
361:                                         Sqr(ImagTeil[i]));
362:             SpektrumDarstellen;
363:             (Wartet, ob's gespeichert werden soll)
364:             Delay(1000);
365:             IF KeyPressed THEN CH := ReadKey;
366:             IF CH IN ['S', 's', ' ' ] THEN Speichern;
367:             IF CH IN ['P', 'p'] THEN BEGIN
368:                 REPEAT UNTIL KeyPressed;
369:                 CH := ReadKey;
370:             END;
371:             UNTIL CH IN [#27, 'Q', 'q'];
372:             CH := #0;
373:             RestoreCrtMode;
374:             END;
375:             'L' : BEGIN
376:                 Laden;
377:                 IF DateIOK THEN BEGIN
378:                     RahmenUndSoWeiter;
379:                     SignalDarstellen;
380:                     SpektrumDarstellen;
381:                     CH := ReadKey;
382:                     RestoreCrtMode;
383:                     CH := #0;
384:                 END;
385:             END;
386:             END;
387:             UNTIL UpCase(CH) IN [#27, 'Q'];
388:             RestoreCrtMode;
389:             ClrScr;
390:         END.                                     ( Hirn_Strom_Messung )
191: (* ----- *)
192: (*           Ende von HIRNSTR.PAS           *)

```

```

1:  *****
2:  *   Gehirnstrommessung und Auswertung auf Atari ST *
3:  *   BRAIN.GFA für GFA-BASIC ab Version 3.0   *
4:  *   Version 1.0 vom 8.3.'91                 *
5:  *   (c) 1991 toolbox & Carsten Fabich      *
6:  *****
7:
8:  Sampler initialisieren:
9:
10:  im folgenden Inline ist Platz für die Interruptroutine
11:  und den Datenpuffer. Bitte hier Assemblersource laden:
12:  INLINE obj%,4150
13:  Zeiger auf aktuelles Byte vom AD-Wandler:
14:  ABSOLUTE count%,obj%+&H32
15:  Anzahl der Datenbytes:
16:  ABSOLUTE anzahl%,obj%+&H34
17:  Adresse des ersten Datenbytes:
18:  puffer%:=obj%+&H36
19:
20:  Fouriertransformation vorbereiten:
21:
22:  Speicher für Real- und Imaginärteil der FFT:
23:  DIM rt(1024),it(1024),merk(1024)
24:  n%:=128 ! Anzahl der Frequenzbänder
25:  nn%:=n%-1 ! FFT-Felder beginnen mit dem Index 0
26:  kwnn=1/nn% ! Kehrwert von nn% für schnellere Division
27:  kwn=1/n% ! Kehrwert von n% für schnellere Division
28:  btOf=1/128 ! für Umwandlung von Byte nach Float
29:
30:  Nummerierung der Frequenzbänder:
31:  FOR i%:=1 TO 31
32:      TEXT i%*20-5,STR$(i%)
33:  NEXT i%
34:  TEXT 10,16,"Meßsignal:"
35:  TEXT 10,216,"Frequenzspektrum:"
36:  DEFFILL 0,0,0
37:
38:  jetzt wird gesampelt:
39:
40:  REPEAT
41:  Anzahl der zu samplenden Bytes in die
42:  Interruptroutine kopieren:
43:  anzahl%:=n%
44:  Zaehler zurücksetzen:
45:  count%=0
46:
47:  Mit XBIOS 31 Samplefrequenz einstellen, Timer starten:
48:  VOID XBIOS(31,W:0,W:4,W:245,L:obj%)
49:  Einstellung des Kontroll- und Datenworts für Timer A:
50:  4 / 245 für 200 Hz Samplefrequenz
51:  4 / 99 für 500 Hz
52:  2 / 245 für 1 kHz
53:
54:  Abwarten bis Interrupt-Routine fertig ist:
55:  REPEAT
56:  UNTIL count%<=n%
57:
58:  Timer abstellen:
59:  VOID XBIOS(31,W:0,W:0,W:0,L:0)
60:
61:  jetzt liegen ab "Puffer%" "anzahl%" gesampelte Bytes
62:
63:  altes Meßsignal löschen:

```

```

64:  PBOX 0,19,639,200
65:  ' Null-Linie Zeichnen:
66:  LINE 0,100,639,100
67:
68:  ' Neue Messwerte auf den Bildschirm plotten und
69:  ' in komplexes Zahlenfeld übertragen:
70:  PLOT 0,100-50*(-1+PEEK(puffer%)*btOf)
71:  FOR i%:=0 TO nn%
72:      ' Integerwerte aus dem Puffer in FFT-Feld kopieren:
73:      rt(i%):=-1+PEEK(puffer%+i%)*btOf
74:      ' Imaginärteil zurücksetzen:
75:      it(i%):=0
76:      ' Die Float-Werte liegen jetzt zwischen -1 und 1
77:      ' Messwert zeichnen
78:      DRAW TO i%*640*kwnn,100-50*rt(i%)
79:  NEXT i%
80:
81:  ' Bitreverse shuffling für Butterfly-FFT:
82:  a%:=0
83:  FOR b%:=1 TO nn%
84:      pos%:=SHR(n%,1)
85:      WHILE (a%+pos%)>nn%
86:          pos%:=SHR(pos%,1)
87:      WEND
88:      a%:=(a% MOD pos%)+pos%
89:      IF a%>b%
90:          SWAP rt(b%),rt(a%)
91:      ENDF
92:  NEXT b%
93:
94:  ' jetzt die eigentliche FFT:
95:  pos%:=1
96:  WHILE pos%<n%
97:      sch%:=pos%+pos%
98:      a:=PI/pos%
99:      c:=COS(a)
100:     s:=SIN(a)
101:     wr=1
102:     wi=0
103:     FOR m%:=1 TO pos%
104:         i%:=SUB(m%,1)
105:         REPEAT
106:             j%:=ADD(i%,pos%)
107:             tr=wr*rt(j%)-wi*it(j%)
108:             ti=wr*it(j%)+wi*rt(j%)
109:             rt(j%):=rt(i%)-tr
110:             it(j%):=it(i%)-ti
111:             rt(i%):=rt(i%)+tr
112:             it(i%):=it(i%)+ti
113:             i%:=i%+sch%
114:         UNTIL i%>=n%
115:         tr=wr*c-wi*s
116:         wi:=wi*c+wr*s
117:         wr=tr
118:     NEXT m%
119:     pos%:=sch%
120: WEND
121:
122:  ' Altes Frequenzspektrum löschen
123:  PBOX 0,219,639,305
124:
125:  ' Neues Spektrum zeichnen:
126:  DEFINE 1,15 ! Linienstärke für Balken einstellen
127:  FOR i%:=1 TO 31
128:      x%:=1+i%*20
129:      y%:=800+SQR(rt(i%)*rt(i%)+it(i%)*it(i%))*kwn
130:      LINE x%,300,x%,300+y%
131:  NEXT i%
132:  DEFINE 1,1
133:  ' Abbruch bei Mausclick oder Taste
134:  UNTIL MOUSEK OR INKEYS<>"
135:  END
136:  *****
137:  *           Ende von BRAIN.GFA           *

```

```

1:  *****
2:  * INTSERV.ASM: Interrupt-Server-Routine für Atari-ST *
3:  * Dieser Interruptserver kann über XBIOS-31 für Timer A *
4:  * installiert werden. Er liest dann einen Datensatz von *
5:  * einem Sampler am ROM-Port, wenn COUNT zurückgesetzt wird.*
6:  *****
7:
8:  SAMPLE: MOVEM.L D4-D5/A6,-(A7) * Register retten
9:          MOVE.B $FA001,D4 * AD-Wandler lesen
10:         MOVE.W COUNT(PC),D5 * Zähler laden
11:         CMP.W UNTIL(PC),D5 * Schon am Ende ?
12:         BEQ EXIT * Dann raus !
13:         LEA DATA(PC),A6 * Tabellenadresse laden
14:         MOVE.B D4,0(A6,D5.W) * Wert in Tabelle legen
15:         ADDQ.W #1,D5 * sonst hochzählen
16:         LEA COUNT(PC),A6 * Adresse von Count
17:         MOVE.W D5,(A6) * Zähler sichern
18:         EXIT: MOVEM.L (A7)+,D4-D5/A6 * Register zurückladen
19:              ANDI.B #$11011111,$FFFA0F * Interrupts freigeben
20:              RTE * Ab nach Hause
21:         COUNT: .DC.W 4096 * Zähler auf Daten
22:         UNTIL: .DC.W 4096 * Ende des Datenfeldes
23:         DATA: .DS.B 4096
24:         .END
25:
26:  *****
27:  *           Ende von INTSERV.ASM           *

```

