

Biosignalverstärker für EKG und EMG

Dr.-Ing. KLAUS SANDER

Das Elektrokardiogramm, kurz EKG, gibt es nun bereits 100 Jahre. Was damals nur wenigen Forschern möglich war, können wir heute auch zu Hause durchführen.

Der Beitrag beschreibt eine einfache Baugruppe zur Messung von Aktionspotentialen des Herzens oder von Muskeln. Es ist zwar kein Präzisionsmeßgerät; trotzdem ermöglicht diese Baugruppe interessante Experimentiermöglichkeiten. Oder haben Sie schon mal mit einer Handbewegung das Licht eingeschaltet, ohne den Schalter zu berühren?

Die Informationsverarbeitung erfolgt innerhalb eines heutigen Computers durch elektrische Spannungen und Ströme. Ebenso werden die Bewegungen eines Roboters durch Spannungen und Ströme gesteuert. Das sind vielleicht die einzigen Dinge, worin sich Computer und Roboter nicht vom Menschen unterscheiden. Den Beweis dafür hat fast jeder schon einmal am eigenen Körper erlebt.

■ EKG, EMG und EEG

Gemeint ist hier nicht die unbeabsichtigte Erfahrung beim Berühren von Netzspannung, sondern das demgegenüber weniger schmerzhaft erlebte eines EKG (Elektrokardiogramms) beim Arzt. Dabei werden die zeitlich aufeinanderfolgenden Aktionspotentiale des Herzens auf einem Papierstreifen aufgezeichnet, um mögliche Krankheiten zu diagnostizieren.

Die Ursachen und Wirkungen der Aktionspotentiale sind kompliziert und noch nicht endgültig geklärt. Eine allgemeinverständliche Beschreibung der Vorgänge ist z. B. in [1] zu finden.

Wie eingangs erwähnt, ist das bekannteste Verfahren das EKG. Neben den Aktionspotentialen des Herzens kann man jedoch auch die von Muskeln (Elektromyogramm, EMG) und die des Gehirns (Elektroenzephalogramm, EEG) messen. EKG und EMG sind relativ leicht meßbar, denn die Spannung liegt im Millivoltbereich und die Frequenz im Bereich von einigen zehn Hertz.

Die Messung von Spannungen des Gehirns verlangt dagegen schon mehr Aufwand, denn hier betragen die zu messenden Spannungen nur noch einige Mikrovolt. Aus diesem Grunde wollen wir mit einem EKG- und EMG-Verstärker beginnen. Der EEG-Verstärker bleibt einer möglichen späteren Veröffentlichung vorbehalten. Beim Schaltungsentwurf wird es uns auf eine Weise nicht mehr so einfach gemacht wie den Entwicklern der ersten EKG-Geräte vor etwa 100 Jahren: Heute umgibt uns eine Vielzahl elektrischer Störsignale, die herauszufiltern sind.

■ Stromlaufplan

Die Biosignalspannungen liegen, wie bereits bemerkt, bei einigen Millivolt. Um eine für nachfolgende Geräte verarbeitbare Spannung zu erhalten, sind die Biosignale etwa 1000fach zu verstärken. Diese Verstärkung teilen wir zwischen zwei Stufen auf. Entsprechend diesen Voraussetzungen besteht unser Biosignalverstärker aus einem Eingangsverstärker, einem Filter zur Unterdrückung von Störfrequenzen und einer weiteren nachfolgenden Verstärkerstufe.

Als Eingangsverstärker benötigen wir eine hochohmige, symmetrische Differenzverstärkerstufe mit einer guten Gleichtaktunterdrückung und einer Verstärkung von 20. Im Stromlaufplan, Bild 1, ist IC1 ein TL 060 (wer so etwas noch hat, kann auch den B 060 verwenden). Mit der angegebene-

nen Dimensionierung erreichen wir nicht ganz den Verstärkungswert 20. Wichtiger als der absolute Spannungswert ist die Signalform. Sind E1 und E2 mit Masse verbunden, wird mit R6 die Ausgangsspannung des OV auf Null abgeglichen. R8, R9, R11, R12, C6, C7 und IC2.1 stellen den Tiefpaß dar, der (bei einer Verstärkung von 1) nur Frequenzen unter etwa 45 Hz passieren läßt. Für die passiven Bauelemente sollten möglichst solche mit niedrigen Toleranzen (Widerstände höchstens 1 %, Kondensatoren 5 bis maximal 10 % oder noch besser) eingesetzt werden. Bei größeren Toleranzen ändert sich die Grenzfrequenz kaum; es kommt aber im Bereich der Grenzfrequenz zu einer Überhöhung der Amplitude. Mit R13 und R14 wird die Verstärkung der zweiten Verstärkerstufe festgelegt, die etwa 50 betragen soll. IC3.2, R1 und R2 (beide 1-%-Werte) halbieren die Betriebsspannung und erzeugen eine künstliche Masse. Dadurch benötigen wir zur Versorgung nur eine 9-V-Batterie (Bild 2).

■ Safety first

Aus Sicherheitsgründen dürfen wir die Schaltung nur mit einer Batterie betreiben. Um ausgangsseitig auch netzversorgte Geräte, wie Computer, Oszilloskope oder ähnliches anschließen zu können, ist eine galvanische Trennung notwendig! Es mag sein, daß unsere Netzgeräte, Computer und alles andere in Ordnung sind und die Netztrennung sicher erscheint. Aber sobald in diesen Geräten ein Fehler auftritt, sind wir ungewöhnlich gut leitfähig mit den Elektroden und damit der Netzspannung verbunden. Herkömmliche Geräte entsprechen nicht solchen Forderungen und Vorschriften, wie sie an Medizintechnik gestellt werden. Also zur Wiederholung: nur mit Batterie betreiben und nur über den Trennverstärker an netzversorgte Meßgeräte anschließen.

Ab R13 beginnt der Trennverstärker, bestehend aus IC3.1, den beiden Optokopplern und IC6 [3]. Die Rückführung über den zweiten Optokoppler IC5 dient der Linearisierung. Damit setzt dieser Schaltungsteil Spannungen von etwa ± 2 V um

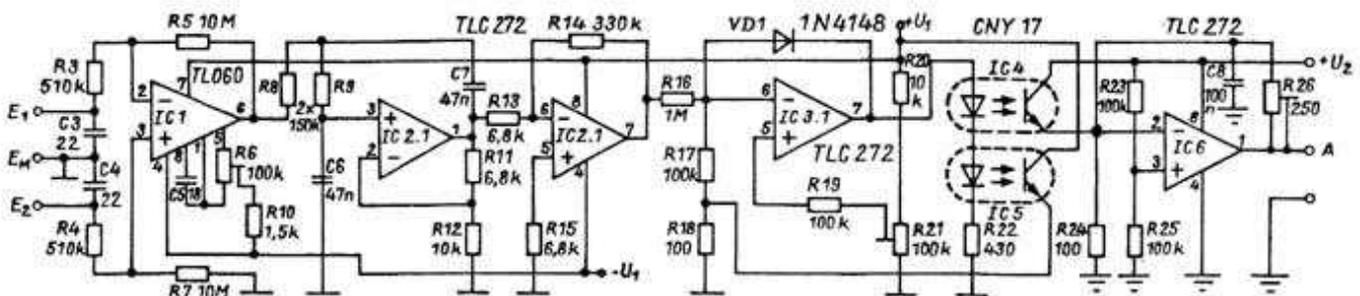


Bild 1: Der Biosignalverstärker ist durch die weitestgehende Verwendung von Doppel-Operationsverstärkern doch recht einfach.

und liefert am Ausgang ein exakt gleiches Signal, wenn die Verstärkung mit R26 entsprechend eingestellt ist. IC6 arbeitet mit nur einer Betriebsspannung. Die beiden in der Schaltung unterschiedlich gekennzeichneten Masseanschlüsse dürfen nicht miteinander verbunden sein! U_2 kann eine beliebige Spannung von 5 bis 9 V sein, wobei im Gegensatz zu U_1 auch eine Versorgung aus Netzgeräten zulässig ist.

■ Aufbau und Abgleich

Auf der Leiterkarte sollte man zuerst den Trennverstärker aufbauen. Zum Abgleich bietet sich das folgende vereinfachte Verfahren an: Auf den linken Anschluß von R16 wird nach dem Anschluß der beiden Betriebsspannungen (für diesen Test kann die Batterie durch eine Stromversorgung ersetzt werden) eine einstellbare Spannung von -2 V bis +2 V gelegt (aus einem zwischen $-U_1$ und $+U_1$ als Spannungsteiler geschalteten Potentiometer) und mit R21 ein Wert eingestellt, der bei 0 V etwa die halbe Betriebsspannung am Ausgang A und bei einer Einstellung zwischen -2 V und +2 V nach beiden Richtungen gleichgroße Änderungen am Ausgang ergibt. Mit R26 stellt man dann die Verstärkung so ein, daß bei einer Änderung um ± 1 V bzw. 2 V eine gleichgroße Änderung (um die als virtuellen Nullpunkt gewählte halbe Betriebsspannung) am Ausgang A auftritt. Nach dem Aufbau der gesamten Baugruppe können auch andere Werte eingestellt werden, die z. B. für nachfolgende A/D-Wandler günstigere Signalpegel ergeben.

Funktioniert der Trennverstärker, so kann man stufenweise („von hinten nach vorn“) den Rest aufbauen, wobei nach Fertigstellung jeder Stufe ein Test sinnvoll ist (frei nach Murphy: Was verstärken soll, schwingt meistens). So lassen sich Fehler frühzeitig erkennen. Bei einer vollständig aufgebauten Schaltung kann man Verursacher wilder Schwingungen mit Amateurmitteln nämlich kaum noch lokalisieren.

Übrigens täuschen auch offene Eingänge Schwingungen vor. Die Eingänge der Baugruppe sind so hochohmig und empfindlich, daß Netzspannung und Rundfunksender trotz des Filters auch als Ausgangssignale meßbar sind (Netzfrequenzeinstrahlungen führen zu „schönen“ Rechtecken).

Für die Leitungen zu den Elektroden E1 und E2 ist abgeschirmtes Kabel notwendig. Der Schirm beider Leitungen wird an der Baugruppe mit EM verbunden und muß an den Elektrodenenden offen bleiben (um eine Masseschleife zu verhindern!). Für die EM-Leitung genügt beliebige Litze.

Für einen einfachen Aufbau kann das Leiterkartenlayout in Bild 3 verwendet werden. Bild 4 zeigt den zugehörigen Bestückungsplan. Da es hier um extrem geringe Span-

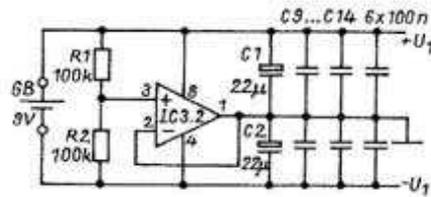


Bild 2: Erzeugung der Betriebsspannungen

nungsänderungen geht, kamen für die Einstellregler die etwas teureren Spindeltrimmer (würfelförmige Bauform) zum Einsatz. Obwohl die Baugruppe sehr empfindlich ist, ist unter normalen Umgebungsbedingungen kein abgeschirmtes Gehäuse notwendig, da die Eingänge symmetrisch sind und auf beide Eingänge gleichzeitig wirkende Störspannungen unterdrückt werden.

■ Elektroden

Ein besonderes Problem stellen die Elektroden dar. Um galvanische Elemente (und damit Fehlerspannungen) zu vermeiden, benutzt man in kommerziellen Systemen Silberelektroden. Für einen guten Kontakt wird spezielle Elektrolytcreme auf Basis eines Silbersalzes verwendet. Für unsere Anwendungen erfüllen Edelstahlplättchen, versilberte Kupferplättchen (entgra-

tetes Leiterkartenmaterial) oder ähnliches den gleichen Zweck. Wichtig ist guter Kontakt, und den erreichen wir durch kleine zwischen Elektrode und Haut gepreßte Schwämmchen. Die Schwämmchen taucht man vorher in eine Kochsalzlösung und drückt sie etwas aus. Die Elektroden können mit Heftpflaster am Körper befestigt werden

■ Inbetriebnahme

War bis dahin alles in Ordnung, kommt der heiße Test. Also Hemd auf, Batterie, Stromversorgung und Elektroden anschließen: Auf dem Oszilloskop muß nun das EKG sichtbar sein.

Aus medizinischer Sicht gibt es unterschiedliche meßtechnische Möglichkeiten. Die Baugruppe mißt Differenzspannungen. Man kann also die Elektroden E1 am rechten und E2 am linken Handgelenk anschließen. Die Masselektrode EM wird am Unterschenkel befestigt. Bei anderen Anordnungen wird die Masselektrode z. B. in der Mitte des Brustkorbes befestigt und die Elektroden E1 und E2 in etwas Abstand rechts und links daneben. Es muß dann eine der in Bild 5 dargestellten Kurven zu sehen sein.

Es sind sicher noch mehr Elektrodenanordnungen denkbar. Um Muskelspannungen zu messen, läßt sich beispielsweise

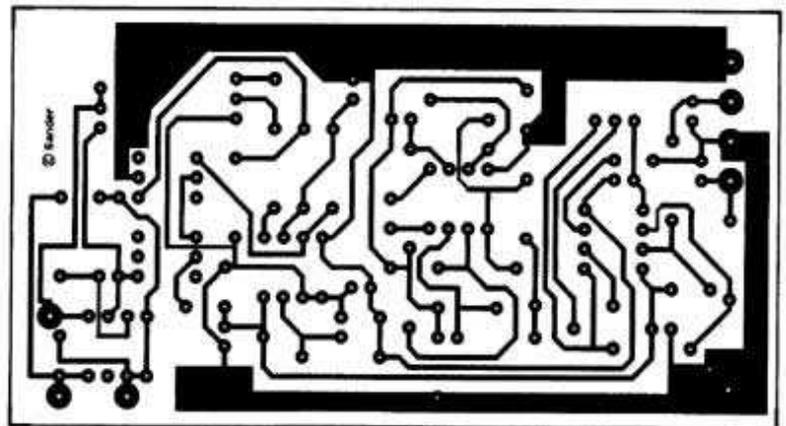


Bild 3: Das einseitige Platinenlayout

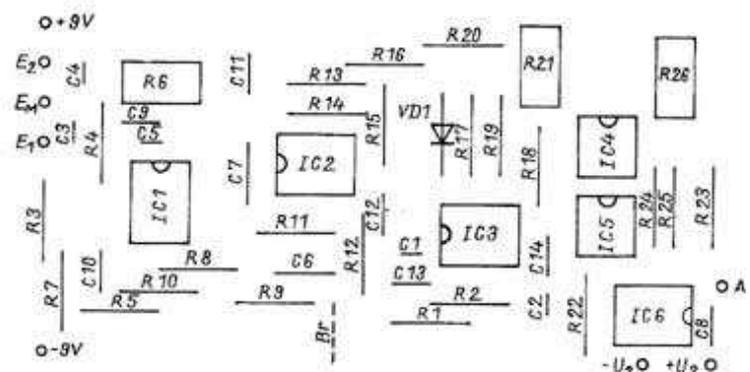


Bild 4: Bei der Bestückung darf die Brücke BR nicht vergessen werden.

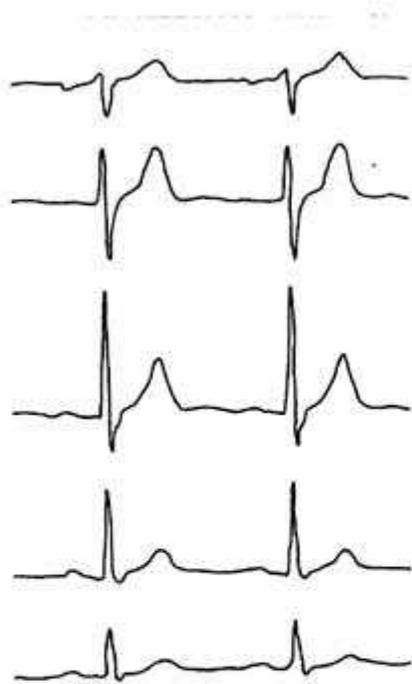


Bild 5: Eine dieser EKG-Kurven muß je nach Meßpunkt auf dem Oszilloskop sichtbar sein.

die Elektrode EM in der Mitte des Unterarms befestigen. E1 wird am Handgelenk und E2 in der Nähe des Ellenbogens angeschlossen. Ähnlich können wir bei Beinmuskelspannungen verfahren. Übrigens geben Beinmuskeln höhere Spannungen ab.

■ Keine falschen Schlüsse

Diese Baugruppe ist nur für Experimentierzwecke vorgesehen. Auf eine echte Auswertung des EKG muß deshalb verzichtet werden. Die Begründung ist einfach: Es handelt sich hier nicht um ein Präzisionsmeßgerät. Dafür müßten neben einigen Schaltungsänderungen Präzisions-OV und passive Bauelemente mit geringen Toleranzen zum Einsatz kommen. Andererseits wird dem Amateur kaum ausreichende Meßtechnik zum Abgleich zur Verfügung stehen, und die richtige Auswertung verlangt Fachkenntnisse und viel Erfahrung.

Zur Kostendämpfung im Gesundheitswesen eignet sich die Baugruppe deshalb kaum.

Trotzdem sind einige interessante Experimente möglich: Mit der einen AD-Wandler an einen Computer angeschlossenen Baugruppe kann man Untersuchungen bei körperlichen (wann haben Sie die letzten fünfzig Kniebeugen gemacht?) oder seelischen (denken Sie doch mal an einen Politiker) Belastungen durchführen. Neben der Darstellung der Kurve kann durch den Computer auch die Änderung der Herzfrequenz ermittelt werden. Ich will zwar nicht zum Rauchen aufrufen, aber zeigen Sie die zusätzliche Belastung einmal im EKG.

Andere Experimentierfelder ergeben sich bei der Messung des EMG. Mit mehreren dieser Baugruppen werden an unterschiedlichen Stellen, z. B. des Handgelenks bzw. Unterarms, die Muskelpotentiale gemessen. Anschließend versucht man durch Summen- bzw. Differenzbildung der verschiedenen Signale, die auch der Computer ausführen kann, Veränderungen im EMG bei der Bewegung der Hand festzustellen. Mit solchen Auswertungen wäre eine Steuerung von Geräten, z. B. von Leuchten oder eines Modellfahrzeugs, denkbar.

Andere Einsatzmöglichkeiten ergeben sich, wenn die Baugruppe eine LED oder einen spannungsgesteuerten NF-Oszillator ansteuert (wenn alles über Batterien versorgt wird, ist der Trennverstärker entbehrlich). Die Töne können dann über einen Lautsprecher hörbar gemacht werden und beim autogenen Training als Entspannungshilfe dienen (Biofeedback). Leiterkarte, Bausatz oder Baugruppe können vom Autor bezogen werden.

Literatur

- [1] Katona, Z.: Interessantes aus der Medizintechnik, Urania-Verlag Leipzig, Jena, Berlin 1984
- [2] Tietze; Schenk: Halbleiterschaltungstechnik, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 9. Auflage 1991
- [3] Sichla, F.: Deckel auf! 17 Schaltungen aus der Trickkiste, FUNKAMATEUR 40 (1991), H. 10, S. 573