

Demonstrations- Analogrechner mit Röhren

F. Vogel 21.08.2010

1. Überblick

Dieser kleine Röhren-Analogrechner dient zur Demonstration der elektronischen Analogrechentechnik, wie sie in der Zeit von ca. 1945 bis ca.1960 eingesetzt wurde und dann sehr rasch von Transistor- bzw. Halbleiter-Rechnern abgelöst wurden. Das Gerät erlaubt die Lösung einfacher, typischer Beispiele aus dem Gebiet der Analogrechentechnik. Die Anzahl der im Gerät vorhandenen Rechen-Komponenten ist auf diese Rechenbeispiele abgestimmt.



Der Analogrechner ist mit 10 Röhren bestückt (4x 6U8, 3x EAA91, 3x OA2) und arbeitet mit Betriebs-Spannungen von +300V und -150V. Die Rechen-Spannung bzw. die Maschinen-Einheit beträgt ± 50 Volt. Widerstände, die die Rechengenauigkeit beeinflussen, sind auf $\pm 0,5\%$ Toleranz selektiert. Die Integrierer-Kondensatoren besitzen eine Toleranz von $\pm 5\%$. Der Rechner ist in ein Metallgehäuse eingebaut und hat die Abmessungen 280x205x135 mm (LxB xH).

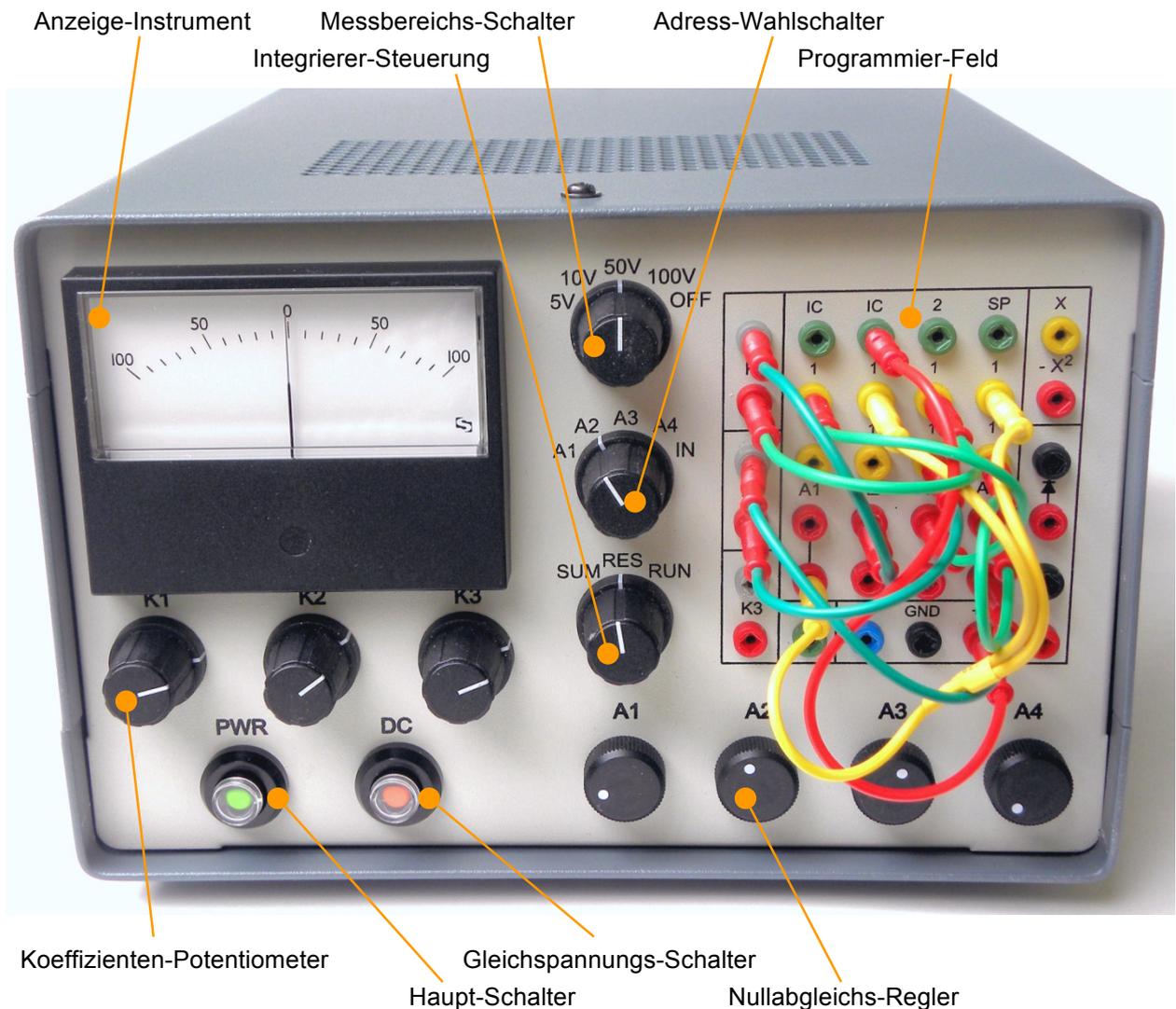
Folgende Rechen-Komponenten und Hilfseinrichtungen stehen zur Verfügung:

- 2 Integrierer bzw. Summierer
- 1 reiner Summierer
- 1 Offener Verstärker bzw. Inverter
- 3 Koeffizienten-Potentiometer
- 1 Dioden-Funktionsgeber für die Funktion $y = -x^2$
- 2 freie Dioden
- 2 Referenzspannungs-Quellen für +50,0V und -50,0V

- 1 Anzeige-Instrument mit Adresswahlschalter und Messbereichs-Umschalter
- 1 stabilisierte Stromversorgungseinheit für +300V/20mA und -150V/20mA

Zur Programmierung des Rechners werden die einzelnen Komponenten mit Patch-Kabeln verbunden. Diese Kabel sind in zwei verschiedenen Längen sowie als Verzweigungskabel vorhanden.

2. Bedienungselemente und Programmier-Feld:



3. Rechner-Komponenten

3.1 Rechen-Verstärker

Der Rechner besitzt vier identische Rechenverstärker (siehe [Schaltbild 1](#)). Die Schaltungstechnik dieser Verstärker wurde vom Analog-Rechner EC-1 übernommen, der von der Firma Heath Company als Schulungs-Rechner entwickelt wurde und ca. 1960 auf den Markt kam.

Es ist natürlich nicht möglich, mit nur einer Pentode-Triode einen hochwertigen Gleichspannungs-Verstärker aufzubauen. Durch eine sehr gekonnte Schaltungs-Auslegung ist es Heath aber gelungen, die Eigenschaften in Bezug auf Verstärkungs-Faktor, Linearität und geringen Ausgangswiderstand so weit zu optimieren, dass die Verstärker den Anforderungen eines Schulungs- oder Demonstrations-Computers vollkommen genügen.

Die Pentode der Eingangs-Stufe arbeitet mit einem sehr hohen Anodenwiderstand von 10 MΩ und einer Schirmgitterspannung von nur ca. 10Volt.

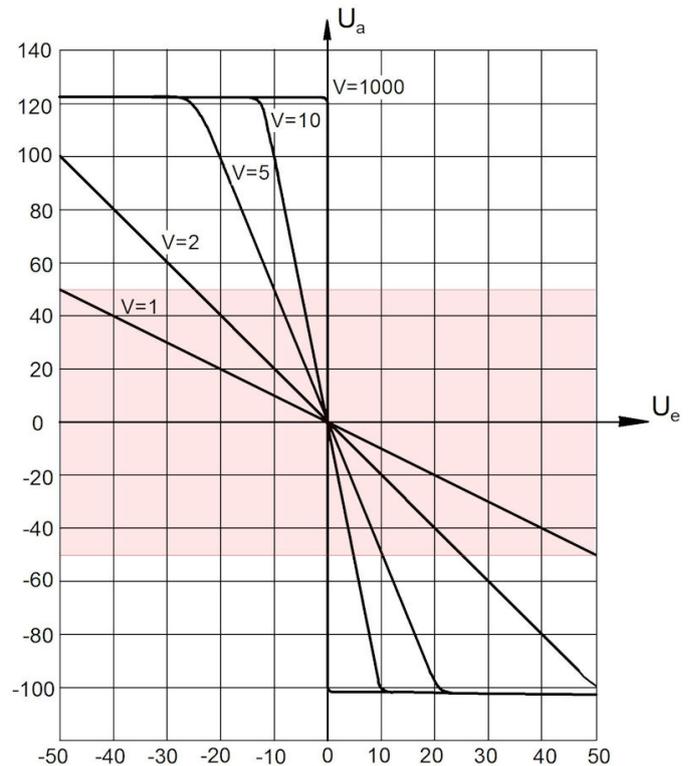
Die zweite Röhrenstufe ist ohne Spannungsteiler mit der ersten Stufe gekoppelt.

Um die Gesamtverstärkung auf ca. 1000 anzuheben, wird über den Widerstand R15 (2,2MΩ) eine geringe positive Rückkopplung erzeugt.

Um zu verhindern, dass durch diese positive Rückkopplung eine Schwingungs-Neigung auftritt, wurde in die Schaltung eine Tiefpassfilter (R14, C11) eingefügt. Dadurch wird zwar auch die Grenzfrequenz der Verstärker sehr stark reduziert, bei der vorgesehenen Anwendung ist das aber ohne Bedeutung.

Die zweite Röhrenstufe arbeitet als Kathodenfolger und bietet dadurch einen sehr geringen Verstärker-Ausgangswiderstand.

Als Folge der direkten Stufenkopplung liegt die Kathodenspannung der Triode sehr hoch über dem Null-Potential. Sie wird deshalb durch die Reihenschaltung von zwei Glimmlampen um ca. 120V nach unten verschoben.



Aus dem ermittelten Verstärkungs-Diagramm ist zu erkennen, dass die Rechenverstärker im normalen Arbeits-Bereich von ± 50 Volt eine sehr gute Linearität aufweisen.

Die vier Rechen-Verstärker A1 bis A4 besitzen verschiedene, *fest vorgegebene Rechen-Funktionen*:

Die Verstärker A1 und A2 können wahlweise als Integrierer oder als Summierer verwendet werden. Sie besitzen zwei Variablen-Eingänge x_1 und x_2 mit einem Verstärkungsfaktor 1 und einen zusätzlichen Eingang IC für die Vorgabe einer Anfangsbedingung.

Durch einen Steuerschalter können drei Betriebsfunktionen vorgewählt werden:

In der Schalterstellung SUM arbeiten die beiden Verstärker als Summierer:

$$y = -(x_1 + x_2).$$

In der Schalterstellungen RUN arbeiten die Verstärker A1 und A2 als Integrierer:

$$y = -\frac{1}{T} \int_0^t (x_1 + x_2) dt - IC. \quad \text{Die Integrations-Zeitkonstante } T \text{ beträgt 1 Sekunde.}$$

In der Schalterstellung RES werden die Anfangsbedingungen der Integrierer definiert:

$$y = -IC.$$

Der Verstärker A3 ist ein Summierer mit drei Variablen-Eingängen. Die Eingänge x_1 und x_2 haben einen Verstärkungsfaktor 1, der Eingang x_3 hat einen Verstärkungsfaktor 2:

$$y = -(x_1 + x_2 + 2 \cdot x_3).$$

Der Verstärker A4 ist ein offener Verstärker mit zwei Eingängen x_1 und x_2 und einen weiteren Eingang SP, über den der Summenpunkt des Verstärkers zugänglich ist.

$$y = -A \cdot (x_1 + x_2) \quad A \approx 1000.$$

Wird der Eingang x_2 mit dem Ausgang verbunden, arbeitet der Verstärker A4 als normaler Inverter:

$$y = -x_1.$$

Bei Verwendung als Inverter darf der Eingang SP nicht beschaltet werden.

3.2 Dioden-Funktionsgeber

Als typisches Beispiel für die Anwendung eines Dioden-Funktionsgebers wurde die Funktion $y = -x^2$ realisiert.

Der Kurven-Verlauf der Funktion wird dabei im Variablen-Bereich

$$0 \leq x \leq +1 \quad \text{bzw.} \quad 0 \leq U_e \leq +50V$$

durch fünf Geraden-Stücke angenähert.

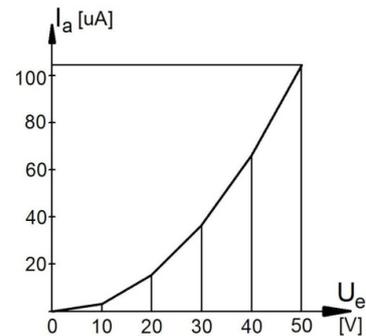
Schaltbild 2 zeigt den Aufbau des Dioden-Funktionsgebers. Die Geraden-Knickpunkte werden durch die Teiler-Widerstände $R82$ bis $R89$ festgelegt. Die Steigungen der Geradenstücke werden mit den Reglern $P1$ bis $P5$ eingestellt.

Die maximale Abweichung der angenäherten Kurve vom mathematischen Verlauf liegt unter 1%.

Mit zwei zusätzlichen freien Dioden und einem Inverter kann der Dioden-Funktionsgeber auf den Variablen-Bereich

$$-1 \leq x \leq +1 \quad \text{bzw.} \quad -50V \leq U_e \leq +50V$$

erweitert werden. Nähere Details dazu werden im Rechenbeispiel 6.3.1 beschrieben.



3.3 Koeffizienten-Potentiometer

Die drei Koeffizienten-Potentiometer sind eingängige Cermet-Potentiometer mit einem Nennwiderstand von 100k Ω und einer Belastbarkeit von 0,5W.

3.4 Referenzspannungs-Quellen

Die Maschinen-Einheit des Analogrechners beträgt $\pm 50V$. Das Gerät verfügt deshalb über zwei Referenzspannungen von +50V und -50V, die durch Serienschaltung von je zwei selektierten Zenerdioden erzeugt werden. Die Genauigkeit dieser Spannungen liegt bei $\pm 0,5V$.

3.5 Anzeige-Instrument

Das eingebaute Drehspul-Instrument besitzt eine Skala mit Nullpunkt in der Mittelstellung und einer Skalenteilung von ± 100 .

Mit einem Drehschalter können vier Messbereiche ausgewählt werden: $\pm 100V$, $\pm 50V$, $\pm 10V$ und $\pm 5V$.

Mit einem Adresswahlschalter kann das Anzeige-Instrument an die Ausgänge der vier Rechenverstärker gelegt werden oder an die Eingangsbuchse „IN“ am Programmier-Feld.

3.6 Stromversorgungseinheit

Die Stromversorgungseinheit (siehe Schaltbild 2) versorgt die Rechenverstärker mit zwei stabilisierten Gleichspannungen von +300V und -150V.

Da der Gesamtstrombedarf der vier Rechenverstärker nur ca. +15mA bzw. -20mA beträgt, wurde die Spannungsversorgung mit drei Stabilisator-Röhren OA2 ohne zusätzliche Längs-Regelröhren aufgebaut.

Die Stromversorgungseinheit liefert auch die beiden Referenz-Spannungen +50V und -50V.

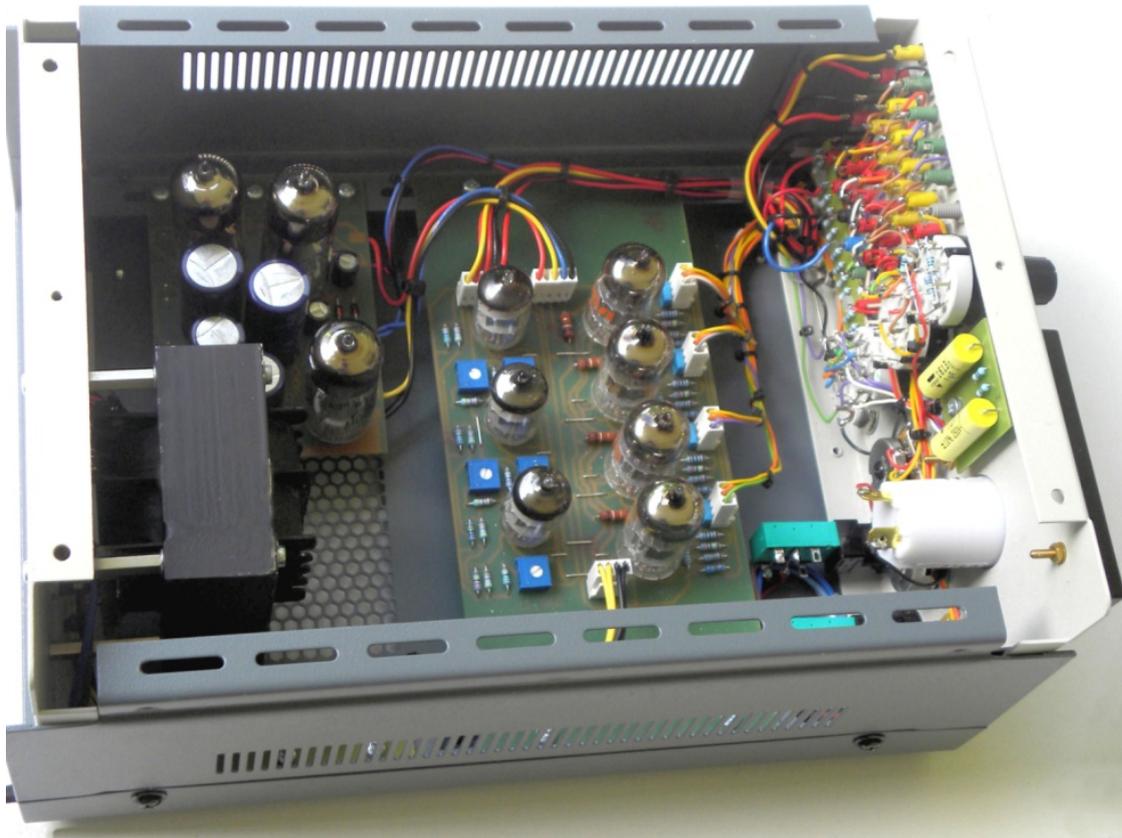
4. Mechanischer Aufbau

Der Analogrechner ist in ein Metallgehäuse mit den Abmessungen 280x205x133 mm (LxB xH) eingebaut. Alle Bedienung-Elemente und das Programmierfeld befinden sich an der Frontseite.

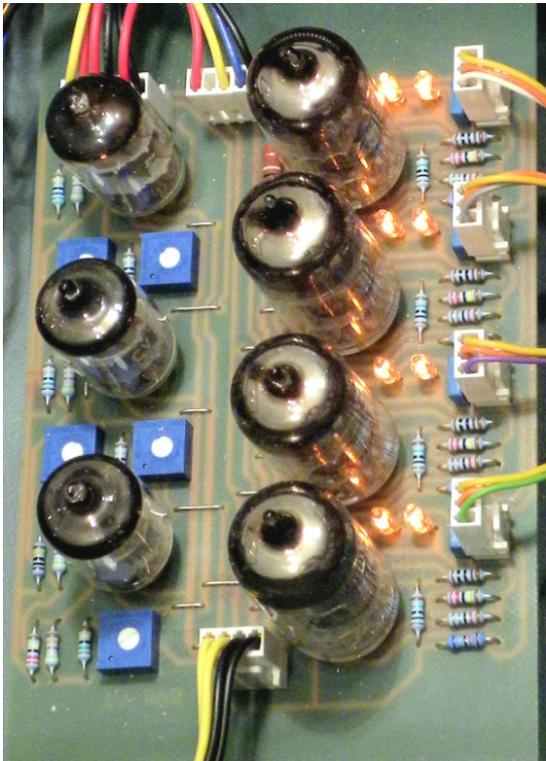
Die Elektronik des Analogrechners ist auf zwei Platinen untergebracht:

Auf der Verstärker-Platine befinden sich die vier Rechenverstärker, der Diodenfunktionsgeber sowie zwei freie Dioden.

Die Stromversorgungs-Platine ist beidseitig bestückt. Alle Leistungs-Widerstände sind auf der Print-Unterseite montiert und werden über das Belüftungsgitter der Bodenplatte gekühlt. Dadurch wird eine Erwärmung der Elektrolytkondensatoren auf der Print-Oberseite verhindert.



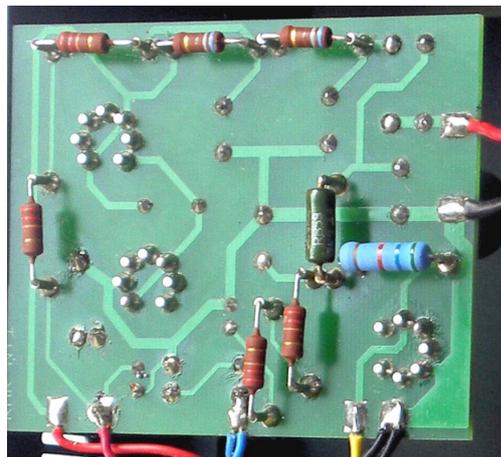
Innenansicht



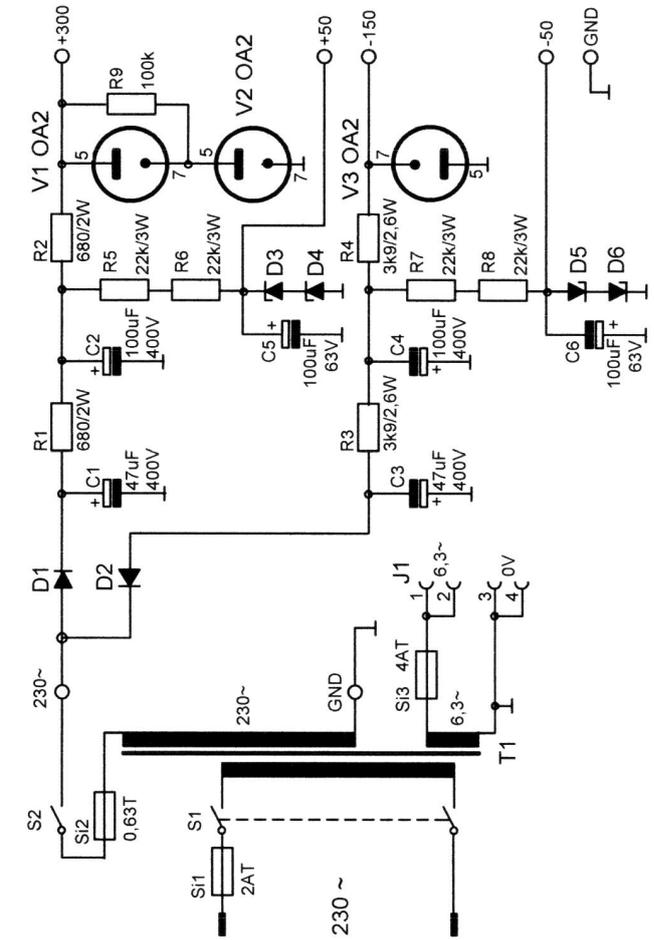
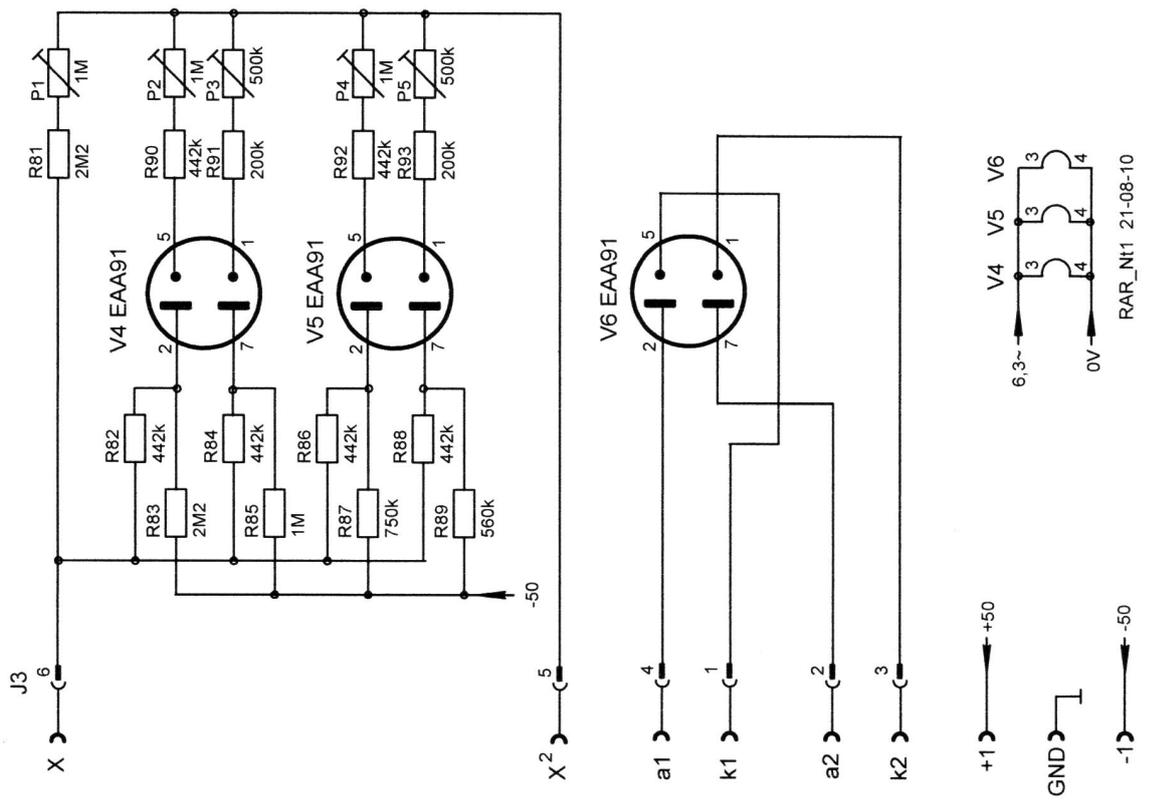
Verstärker-Platine



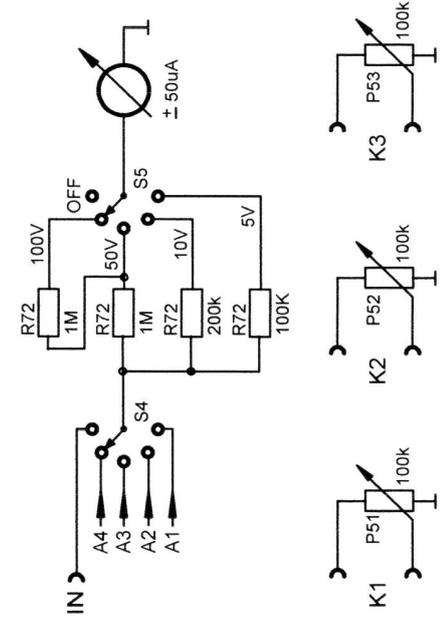
Stromversorgungs-Platine: Oberseite



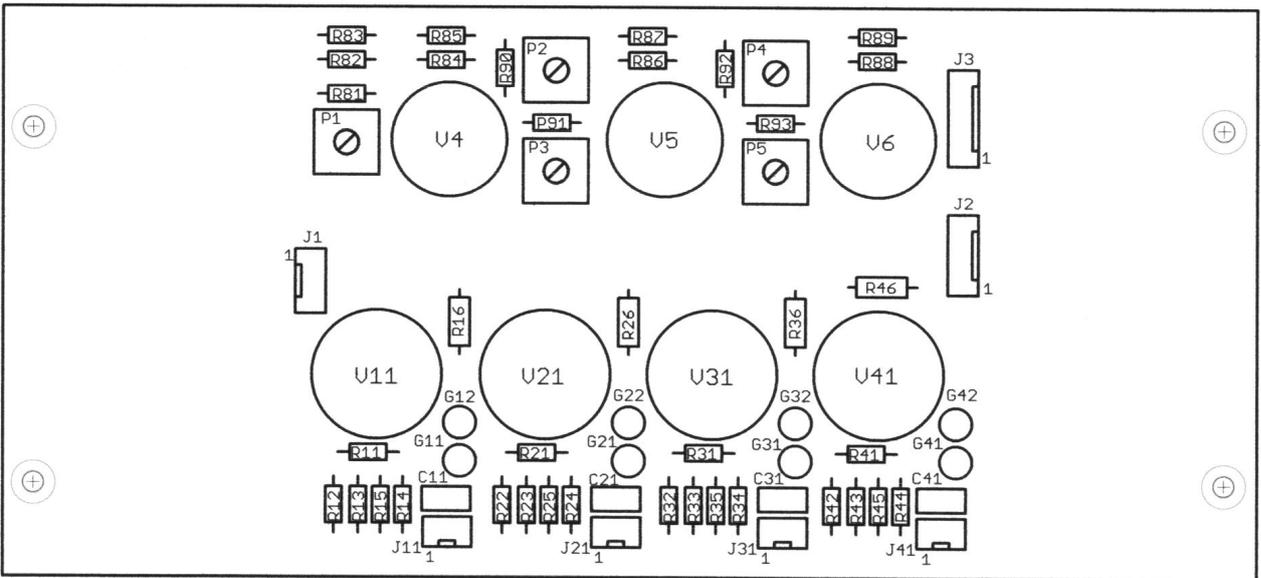
Stromversorgungs-Platine: Unterseite



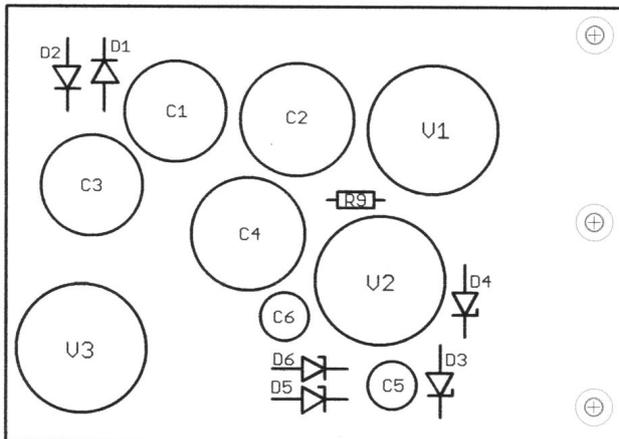
D1, D2: 2A/1000V
D3 - D6: BZX85



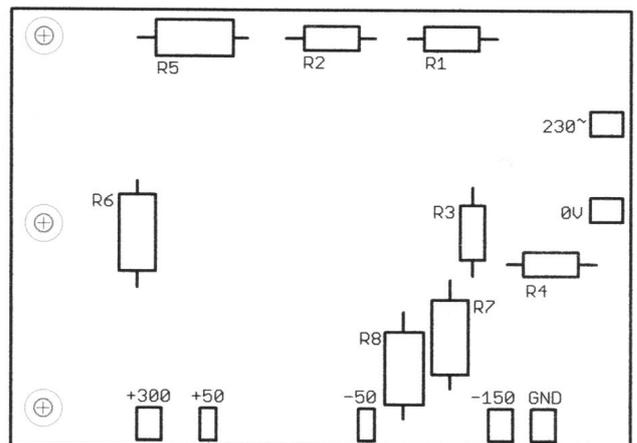
Schaltbild 2: Stromversorgung, Dioden-Funktionsgeber, freie Dioden, Koeffizienten-Potentiometer, Referenz-Spannungen, Anzeige-Instrument



Verstärker-Platine: Lageplan



Stromversorgungs-Platine: Lageplan Oberseite



Lageplan Unterseite