

Jürg Kögel

Stabilisiertes Labornetzgerät mit Operationsverstärkern

Dieser Artikel beschreibt einen universell verwendbaren Regelteil sowie ein damit aufgebautes Netzgerät für Spannungen von 0 bis 40 V und Ströme von 0 bis 2 A. Als schaltungstechnische Besonderheit wird in dem Gerät unter anderem ein Operationsverstärker verwendet.

Der universelle Regelteil

Mit Operationsverstärkern, deren Wirkungsweise hier als bekannt vorausgesetzt wird [1], lassen sich viele Schaltungen auf elegante Weise realisieren. Ein Beispiel dazu soll die nachfolgende Beschreibung des Regelteils für ein stabilisiertes Netzgerät sein.

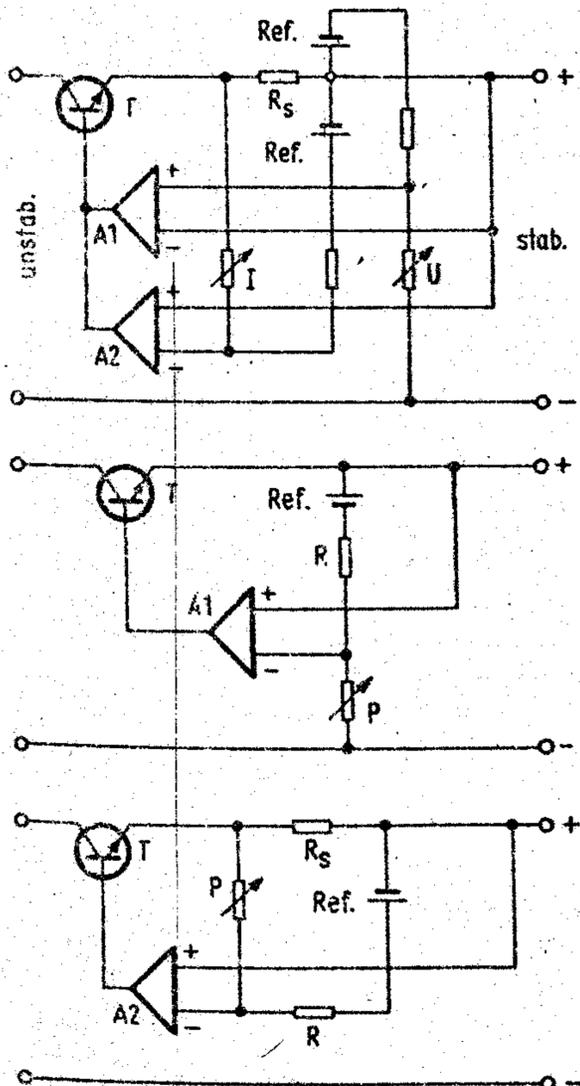
Die Forderungen an den Regelteil sind:

- a) universelle Verwendbarkeit,
- b) Spannungsregelung bis Null,
- c) Stromregelung (nicht nur Strombegrenzung) mit scharfem Knick der Spannungs-Strom-Kennlinie.

Die Grundidee für die Schaltung stammt aus dem Hewlett-Packard-Netzgerätekatalog [2] sowie aus einem Applikationsbeispiel der Firma Signetics [3]. Der Nullpunkt der Regelschaltung ist nicht mit dem Nullpunkt des Netzgerätes verbunden, sondern mit der stabilisierten Ausgangsspannung (Bild 1). Zum besseren Verständnis der Wirkungsweise sind in den Bildern 2 und 3 die Spannungs- und die Stromregelschaltung noch einmal getrennt herausgezeichnet. Der Spannungsregelverstärker mißt die Differenz zwischen der Ausgangsspannung und der Spannung an P. Sind diese Spannungen ungleich, so liefert der Verstärker ein Signal, das den Serienregler verstellt, bis am Ausgang wieder die gewünschte Spannung vorhanden ist. Im abgeglichenen Zustand ist der Strom durch R und P konstant, das heißt, daß die Ausgangsspannung direkt proportional zum Widerstandswert von P ist. Die Stromregelung funktioniert gleich, nur wird die Spannung nicht am Ausgang, sondern an einem kleinen Serienwiderstand gemessen.

Der Vorteil dieser Schaltungsart ist offensichtlich: Spannungs- und Strombereich des stabilisierten Netzgerätes können durch die Werte der Einstellpotentiometer festgelegt werden. Die Nennwerte sind 1 k Ω /V für die Spannung und 100 Ω /A für den Strom. So ist es ohne weiteres möglich, mit dem gleichen Regelteil ein Netzgerät für 0...6 V und 0...3 A oder 0...50 V und 0...0,5 A zu bauen. Der Transistor T muß allerdings eine genügende Sperrspannung aufweisen.

Bild 4 zeigt die Gesamtschaltung des Regelteils. A1 ist der Spannungsregelverstärker, A2 der Stromregelverstärker. Damit sich die Verstärker nicht gegenseitig beeinflussen, werden die Ausgangssignale über die Dioden D1 und D2 zusammengeführt. Diese Dioden bilden mit R1 ein ODER-Tor. Der Transistor T1 wirkt in der Gesamtschaltung des Netzgerätes als Treiber. Die Dioden D3 und D4 schützen die Eingänge von A1 vor unzulässigen Spannungen. Die Diode D5 verhindert

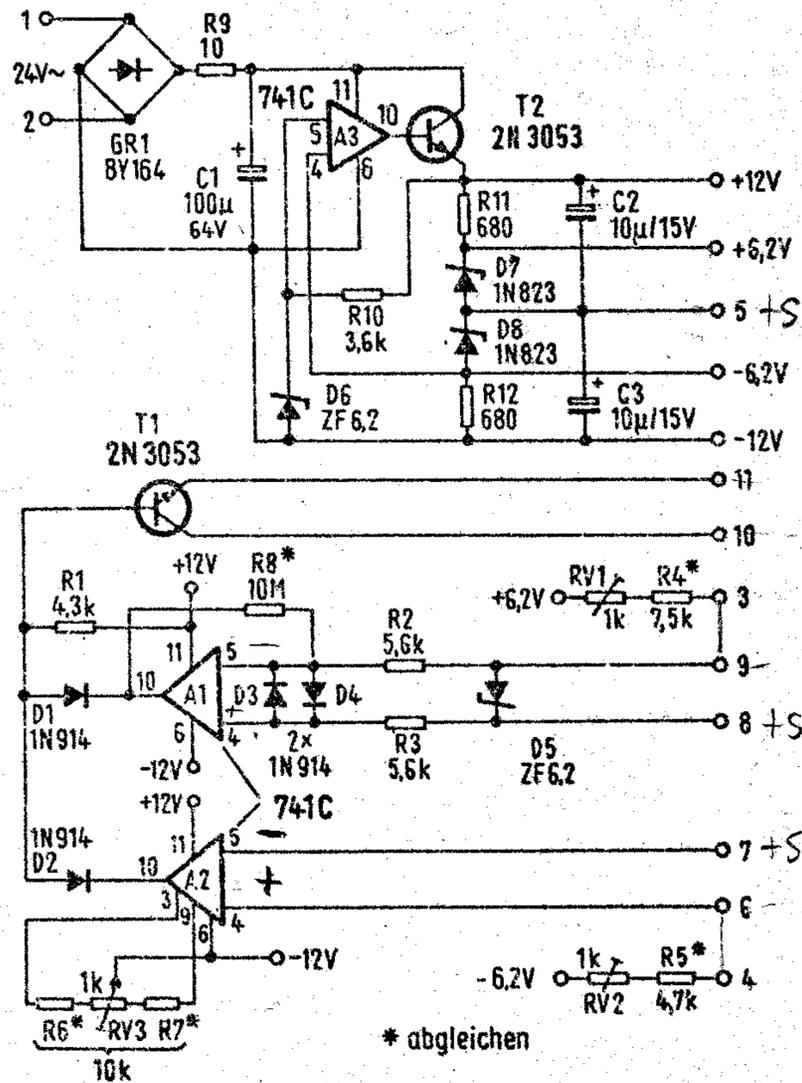


◀ Bild 1. Prinzipschaltung des Regelteils

◀ Bild 2. Spannungsregelschaltung

◀ Bild 3. Stromregelschaltung

Bild 4. Gesamtschaltung des Regelteils



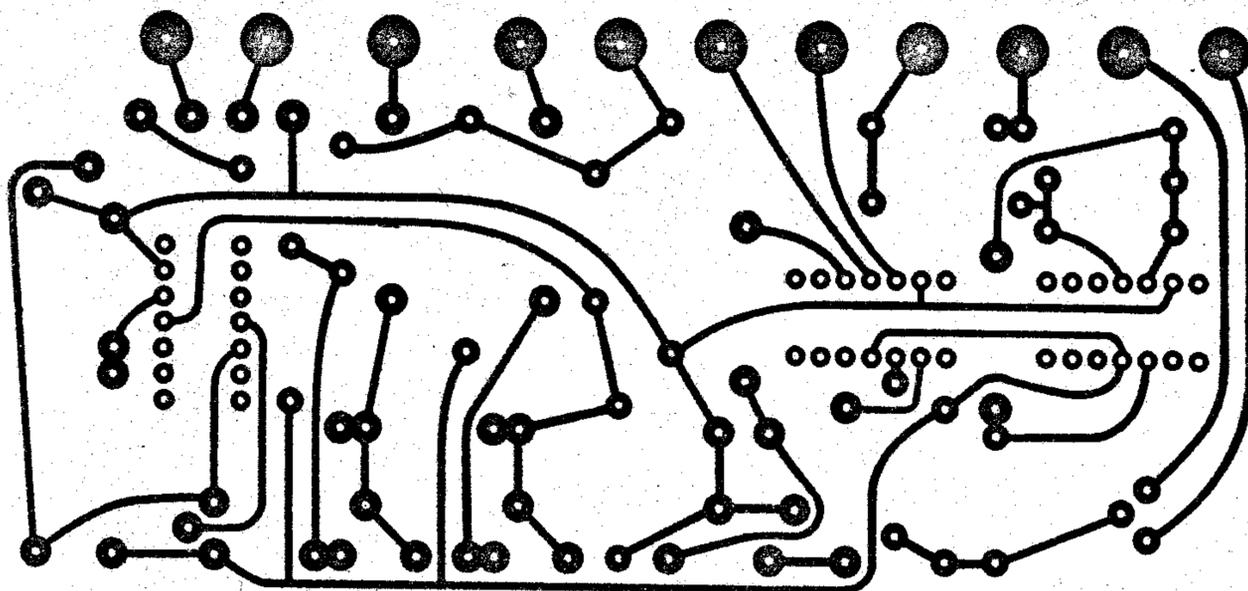


Bild 5. Platine für Regelteil, Leiterseite (ITT-Schaub-Lorenz, Abt. Hobbykits)

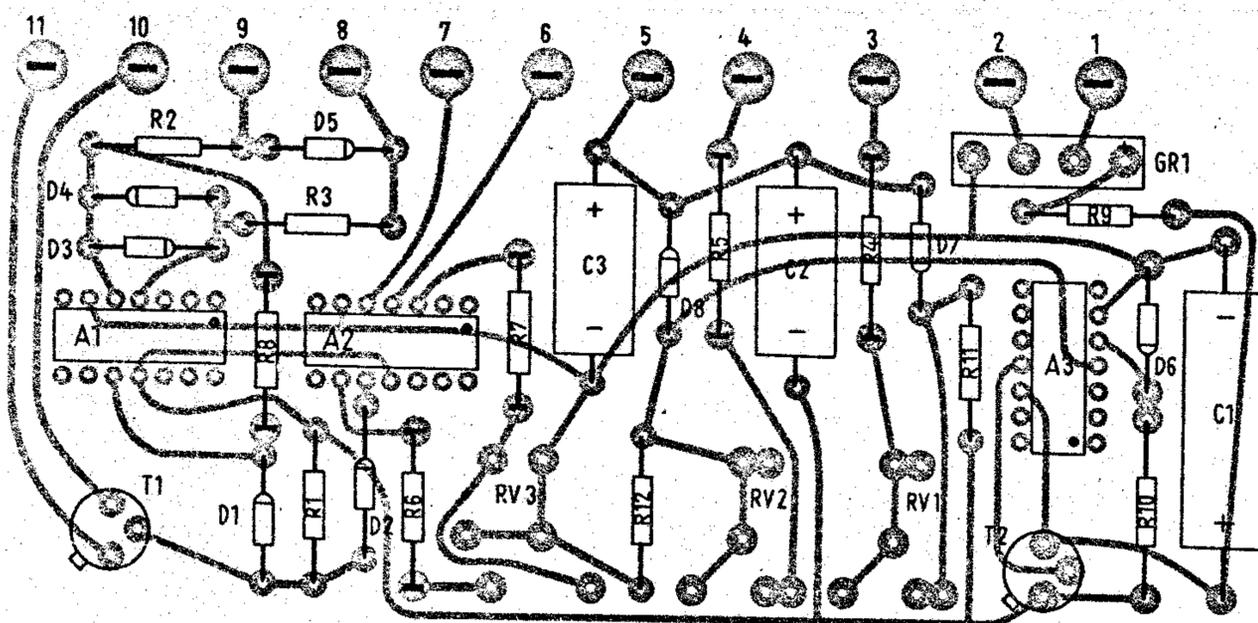


Bild 6. Print für Regelteil, Bestückungsseite

ein „Latch-up“¹⁾ des Verstärkers. Dieser Fall kann auftreten, wenn das Spannungsregelpotentiometer rasch zurückgedreht wird und keine oder nur eine kleine Last am Ausgang angeschlossen ist. Der Rückkopplungswiderstand R 8 verringert den Innenwiderstand des Netzgerätes. (Er kann sogar negativ gemacht werden.) Im Stromregelverstärker wirkt sich die Offsetspannung stark aus. Sie erzeugt ein Fehlersignal, und der Strom läßt sich je nach Verstärker nicht unter 50...150 mA regeln. Die Offsetspannung wird mit RV 3 kompensiert.

Die Referenzspannungen werden in einem separaten stabilisierten Netzteil erzeugt. Auch dieser arbeitet mit einem Operationsverstärker (A 3). Dieser Verstärker vergleicht die Spannung an der Z-Diode D 6 mit der Spannung an R 12 und regelt über T 2 jede Änderung wieder aus. Zwei Widerstände und zwei Referenzdioden teilen die Ausgangsspannung von 24 V in ± 12 V und $\pm 6,2$ V

1) Unter Latch-up versteht man folgenden Effekt: Überschreitet das Potential an der Basis des Eingangstransistors das Kollektorpotential, so geht der Ausgang des Verstärkers wegen der jetzt bestehenden Mitkopplung an die positive oder negative Aussteuerungsgrenze und bleibt dort.

auf. Die ± 12 V dienen zur Versorgung der Regelverstärker, die $\pm 6,2$ V bilden die Referenz für Spannung (+ 6,2 V) und Strom (- 6,2 V).

Die ganze Schaltung ist auf einer Printplatte (Bild 5 und 6) aufgebaut. Als Operationsverstärker wird der Typ 741 C verwendet. Er ist intern kompensiert. Mit externen Kompensationselementen läßt sich auch der billigere Typ 709 C einsetzen. Wenn die Anforderungen an Langzeitstabilität und Temperaturkonstanz nicht groß sind, können die Referenzdioden durch gewöhnliche 6,2-V-Z-Dioden ersetzt werden. Um die gedruckte Schaltung in allen Lagen verwenden zu können, sind für die drei Einstellpotentiometer verschiedene Einbaumöglichkeiten vorgesehen (10-Gang-Trimpotentiometer, Flachtrimmer liegend oder stehend). Für die Widerstände R 4, R 5, R 6, R 7 und R 8, die beim Abgleich eventuell ausgewechselt werden müssen, sind Lötösen eingepreßt. Der Regelteil benötigt eine Speisepannung von 24 V ~ (Strom etwa 25 mA) und muß immer an einer eigenen Transformatorenwicklung betrieben werden.

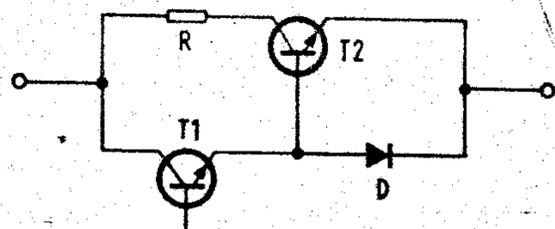


Bild 7. Der Leistungsteil

Das stabilisierte Netzgerät

Mit dem beschriebenen Regelteil wurde ein Netzgerät für 0...40 V und 0...2 A aufgebaut. Dabei stellt die Verlustleistung im Serientransistor das größte Problem. Mehrere Lösungsmöglichkeiten bieten sich an:

- a) Parallelschalten mehrerer Leistungstransistoren. Es muß auf gleichmäßige Stromverteilung geachtet werden.
- b) Kühlung mit Ventilator. Dabei stört das Geräusch und das Gerät kann verstauben.
- c) Verringern der Eingangsspannung mit einem Reguliertransformator oder durch Abgriffe am Netztransformator. Nachteile: Reguliertransformatoren sind teuer und das Einstellen der Spannung mit Stufenschalter und Potentiometer ist unpraktisch.
- d) Vorregeln der Eingangsspannung mit einem Schaltregler. Dabei entstehen Störimpulse, die sich durch den nachfolgenden Serienregler meistens nicht mehr ganz beseitigen lassen.

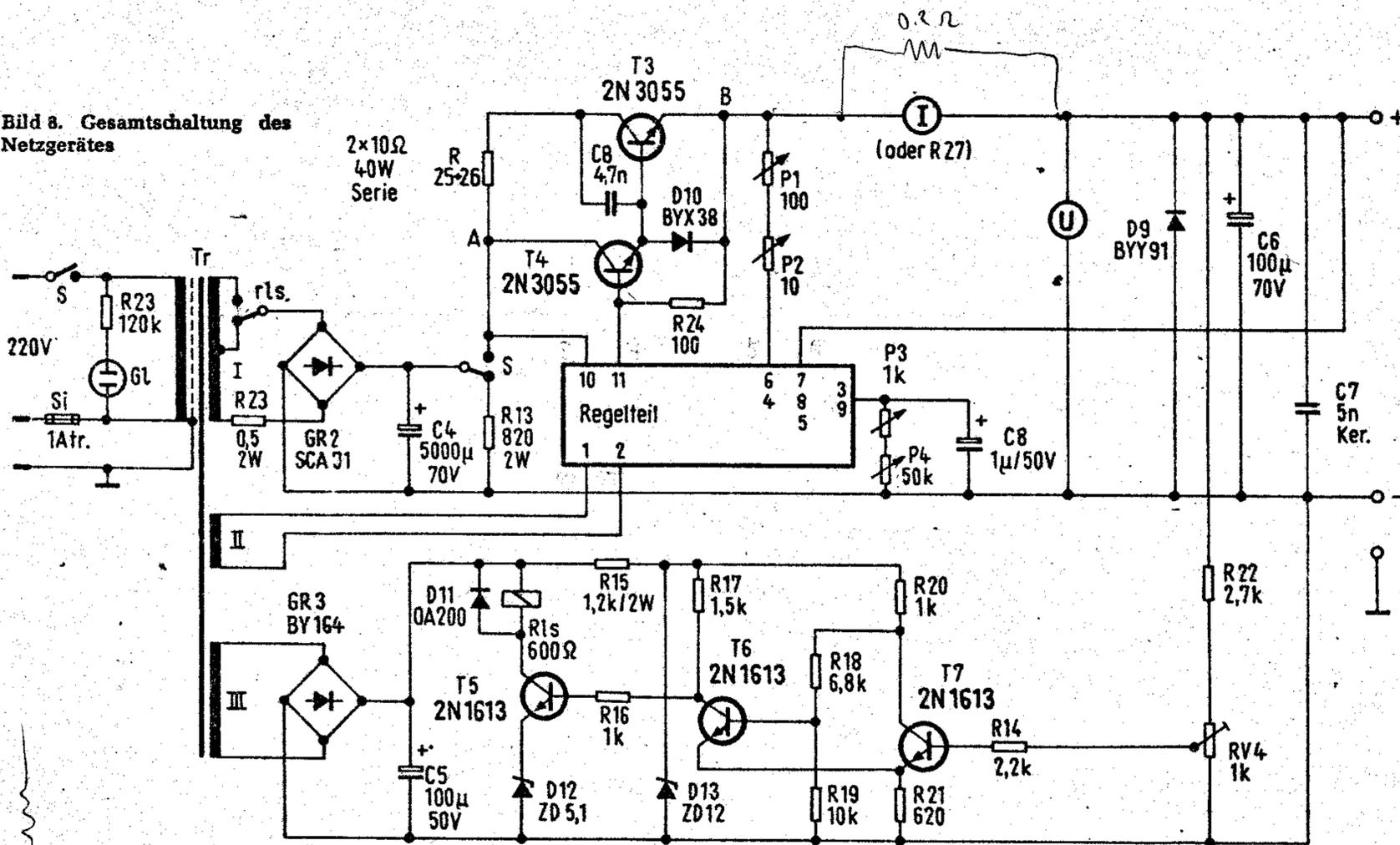
e) Eine weitere, bis jetzt nicht sehr bekannte Möglichkeit zeigt Bild 7 [4]. Bei richtiger Dimensionierung übernimmt der Widerstand R einen großen Teil der Verlustleistung. Tabelle 1 zeigt, wie sich die Verlustleistung bei verschiedenen Betriebsfällen auf den Widerstand und die beiden Transistoren verteilt.

Das Netzgerät wurde mit der zuletzt genannten Schaltung aufgebaut (Bild 8). Zur weiteren Verringerung der Verlustleistung wird zusätzlich noch die Sekundärwicklung umgeschaltet. Die Umschal-

Tabelle 1. Verteilung der Verlustleistung auf T 1, T 2 und R

U_A	I_A	P_{T1}	P_{T2}	P_R
20 V	0,5 A	3,5 W	15,5 W	3,5 W
	1 A	5 W	18 W	13 W
	2 A	14 W	10 W	45 W
30 V	0,5 A	2,5 W	10 W	3 W
	1 A	5 W	11 W	13 W
	2 A	16 W	0,5 W	32 W
40 V	0,5 A	2 W	5,5 W	3 W
	1 A	4 W	5,5 W	19,5 W
	2 A	17 W	0,2 W	19,5 W

Bild 8. Gesamtschaltung des Netzgerätes



tion erfolgt automatisch mit einem Relais, das von einem Schmitt-Trigger gesteuert wird. Der Schmitt-Trigger hat eine Hysterese von 3...4 V, damit das Relais sicher nicht zu klappern beginnt. Als Serienwiderstand für die Strommessung wird der Innenwiderstand des Amperemeters benützt. Für die Spannungs- und Stromeinstellung sind je zwei Potentiometer (grob und fein) vorgesehen. Der Ladekondensator C4 wird beim Abschalten des Gerätes mit einem Kontakt des Netzschalters über 820 Ω entladen. Dem Ausgangskondensator C6 ist zum Verkleinern des Innenwiderstandes bei hohen Frequenzen noch ein Keramik-kondensator C7 parallelgeschaltet. Die Diode D9 ermöglicht die gefahrlose Serienschaltung mehrerer Netzgeräte.

Der Aufbau ist unkritisch. Das Mustergerät wurde in einem Elma-Simplex-Gehäuse Nr. 1441-61 eingebaut (Bild 9). Der Kühlkörper mit einem Wärmewiderstand von etwa 2 °C/W ist im Innern des Gerätes an einer Seitenwand angeschraubt. Auf dem Kühlkörper befinden sich die beiden Leistungstransistoren T3 und T4 und die Diode D10. Diese Halbleiter müssen mit Glimmerscheiben isoliert befestigt werden. Wegen der großen Wärmeentwicklung sind die Widerstände R25 und R26 außen an die Rückwand montiert. Ein Abdeckblech dient als Berührungsschutz. Die gedruckte Schaltung mit dem Regelteil befindet sich gut zugänglich über dem Netztransformator. Die Schmitt-Trigger-Platine ist an der Rückwand befestigt. Bei der Verdrahtung muß nur darauf geachtet werden, daß Gleich- und Wechsel-

spannungsleitungen getrennt geführt werden. Punkt 8 des Regelteils ist direkt mit der Plus-Ausgangsklemme zu verbinden.

Abgleich

Neben dem Abgleich sollen hier einige Hinweise gegeben werden, wie die Schaltung für andere Ausgangsspannungen und -ströme dimensioniert werden muß.

Spannung

Für andere Spannungen als 40 V oder, wenn für das Potentiometer der gewünschte Wert (1 kΩ/V) nicht erhältlich ist, muß auch der Widerstand R4 geändert werden. Zuerst sind für die Potentiometer P3 und P4 solche Werte zu suchen, daß bei der gewünschten Maximalspannung ein Strom von 0,5...1,5 mA fließt. Dann errechnet sich der Widerstandswert von R4 nach:

$$R_4 = \frac{U_{ref} \cdot R_{pot}}{U_{max}} - 500 \Omega$$

Der Wert 500 Ω entspricht dem halben Wert von RV1.

Beispiel: Ausgangsspannung 25 V

$$R_{pot \min} = \frac{25 \text{ V}}{1,5 \text{ mA}} = 16,6 \text{ k}\Omega$$

$$R_{pot \max} = \frac{25 \text{ V}}{0,5 \text{ mA}} = 25 \text{ k}\Omega$$

gewählter Wert für P4: 22 kΩ

gewählter Wert für P3: 1 kΩ

$$R_4 = \frac{6,2 \text{ V} \cdot 23 \text{ k}\Omega}{25 \text{ V}} - 500 \Omega = 5,2 \text{ k}\Omega$$

gewählter Wert für R4: 5,1 kΩ

Bei ganz aufgedrehten Potentiometern P3 und P4 kann dann die Maximalspannung mit RV1 eingestellt werden.

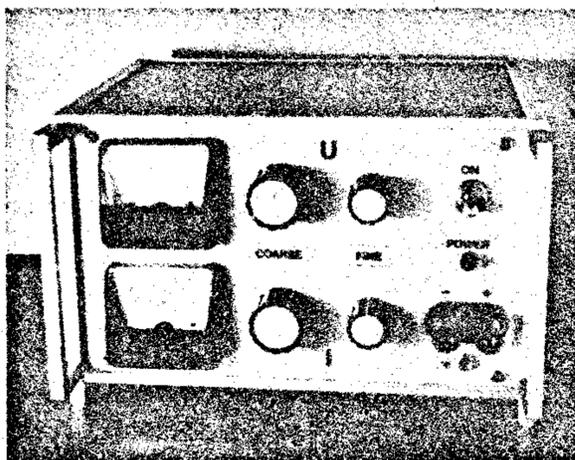


Bild 9. Ansicht des Netzgerätes

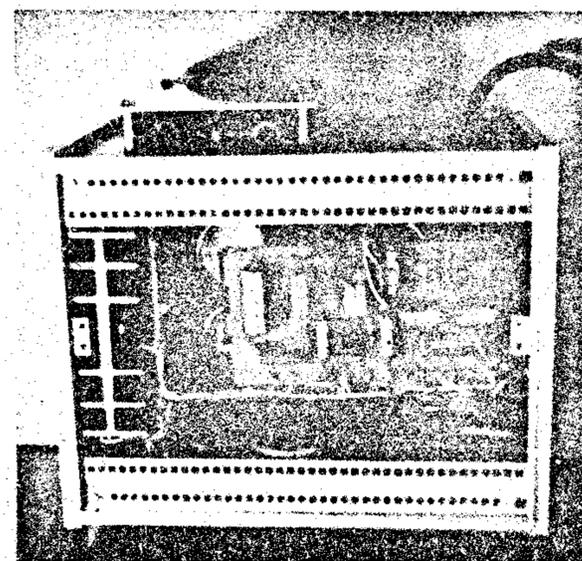


Bild 10. Das Innere des Netzgerätes

Strom

Ein günstiger Wert für den Serienwiderstand R 27 ist 0,1 Ω/A. (Meistens kann der Innenwiderstand eines eventuell eingebauten Amperemeters dazu benutzt werden.) An den Potentiometern P 1 und P 2 muß bei einem Strom von wieder 0,5...1,5 mA die gleiche Spannung liegen wie am Serienwiderstand. Wenn der Widerstandswert der Potentiometer festliegt, kann R 5 bestimmt werden nach:

$$R_5 = \frac{U_{ref} \cdot R_{pot}}{R_s \cdot I_{max}} - 500 \Omega$$

Beispiel: Maximalstrom 0,5 A

Instrumenten-Innenwiderstand: 0,2 Ω

$$U_{Ri} = 0,5 A \cdot 0,2 \Omega = 0,1 V$$

$$R_{pot \min} = \frac{0,1 V}{1,5 mA} = 66 \Omega$$

$$R_{pot \max} = \frac{0,1 V}{0,5 mA} = 200 \Omega$$

gewählter Wert für P 1: 100 Ω

gewählter Wert für P 2: 10 Ω

$$R_5 = \frac{6,2 \cdot 110 \Omega}{0,2 \Omega \cdot 0,5 A} - 500 \Omega = 6300 \Omega$$

gewählter Wert für R 5: 6,2 kΩ

Für den Abgleich ist bei voll aufgedrehten Potentiometern P 1 und P 2 ein Amperemeter an den Ausgangsklemmen anzuschließen. (Bei eingebautem Amperemeter können die Ausgangsklemmen kurzgeschlossen werden.) Die Spannung wird auf einige Volt geregelt. Dann wird mit RV 2 der gewünschte Maximalstrom eingestellt.

Minimalstrom

Wegen der Offsetspannungsdrift soll der Minimalstrom nicht auf Null, sondern auf etwa 10 mA eingestellt werden. Dazu sind die Stromregelpotentiometer ganz nach links zu drehen und ein Milliampereometer an den Ausgang zu legen. Dann ist der Strom mit RV 3 auf 10 mA einzustellen. Für RV 3 empfiehlt sich ein 10-kΩ-Zehngang-Trimpotentiometer. Noch einfacher wird das Einstellen mit einem 1-kΩ-Zehngang-Trimpotentiometer und zwei ausgesuchten Vorwiderständen R 6 und R 7. (Der Gesamtwiderstand muß wieder etwa 10 kΩ sein.)

Ausgangskondensator C 6

Falls das Netzgerät schwingt, ist der Ausgangskondensator C 6 zu vergrößern. Wenn dies nicht erwünscht ist (Entladestromstoß bei Kurzschluß!), muß C 8 vergrößert und evtl. ein weiterer Kondensator über die Kollektor-Basis-Strecke von T 4 geschaltet werden.

Innenwiderstand

Ohne Widerstand R 8 hat das Netzgerät einen Innenwiderstand von etwa 2,5 mΩ. Mit R 8 kann der Innenwiderstand verringert oder gleich Null gemacht werden. Im Mustergerät liegt der Wert für R 8 bei ungefähr 8...12 MΩ. Die

Tabelle 2. Daten des Netzgerätes

Spannung:	0...40 V
Strom:	10 mA...2 A
Stabilität	
bei ±10% der Netzspannung:	< 1 mV
bei 0...2 A Last:	< 1 mV
Innenwiderstand	
Gleichspannung:	< 1 mΩ
1 kHz:	4 mΩ
10 kHz:	7 mΩ
100 kHz:	0,2 Ω
1 MHz:	0,5 Ω
Brumm und Rauschen	
I = 2 A, Bandbreite	
1 Hz bis 30 kHz:	
Konstantspannung u_{ss}	< 200 μV
Konstantstrom i_{ss}	< 1 mA

Tabelle 3. Im Mustergerät verwendete Spezialteile

Gehäuse	Simplex 1441-61 (230 × 130 × 180 mm) (Elma Wetzikon)
Transformator Tr	siehe Tabelle 4
Gleichrichter GR 1,3	BY 164 (Philips)
Gleichrichter GR 2	Semtech SCAJ 1, 100 V/5 A (Bourns) oder B 80 C 3200-2200
Referenzdioden D 7, 8	1 N 823 (Motorola)
Diode D 9	BY 91 (Intermetall)
Diode D 10	BYX 38 (Philips)
Transistor T 1, T 2	2 N 3053 mit Kühlring (RCA)
Operationsverstärker A 1, A 2, A 3	RC 741 C (Raytheon) oder beliebige 741 C
Relais	24 V/600 Ω mit Starkstromkontakten REL 20-KWP-10-DC-AgCd 0 (Erni)
V-Meter	0-50 V Mod. VT 2
A-Meter	0-2 A Mod. VT 2 (japanisch, Neukom AG, Zürich)
Trimpotentiometer RV 1, 2, 3, 4	1 kΩ, Mod. 3005 (Bourns)

Tabelle 4. Daten des Netztransformators

Kern: SM 85 b	(Schnittbandkern)
Wicklungsisolationen:	je 1 × Polikarbonatfolie 0,2 mm
Lagenisolationen:	je 1 × Polikarbonatfolie 0,05 mm
Primär:	550 Wdg., CuL 0,5 φ
Schirm:	Cu-Folie 0,05 mm
Sekundär I:	55 Wdg., CuL 1,1 φ
	55 Wdg., CuL 1,1 φ
Sekundär II:	73 Wdg., CuL 0,2 φ
Sekundär III:	52 Wdg., CuL 0,2 φ

Kompensation stimmt allerdings nicht über den ganzen Spannungsbereich. Vorsicht: Wenn R 8 zu klein gewählt wird, schwingt das Netzgerät. Für den genauen Abgleich benötigt man ein Digital- oder Differentialvoltmeter mit einer Auflösung von 1 mV.

Schaltpunkt des Schmitt-Triggers

Ein Voltmeter ist an die Punkte A und B anzuschließen. Das Netzgerät wird mit einem einstellbaren Leistungswiderstand belastet. Dann fährt man mit der Spannung langsam von oben nach unten und stellt den Schaltpunkt mit RV 4 so ein, daß die Spannung an den Punkten A und B nach dem Schalten des Relais 5 V ist. (Bei maximalem Strom und minimaler Eingangsspannung.)

Widerstand R 25+26

Für den Widerstand R 25+26 gibt [4] folgende Dimensionierung an:

$$R_{25+26} \approx \frac{U_{max}}{I_{max}}$$

U_{max} ist die maximale Spannung zwischen den Punkten A und B.

Ausbau- und Verbesserungsvorschläge

- a) Wenn einige Punkte des Regelteils nach außen geführt werden, sind weitere Betriebsarten (externe Programmierung mit Widerständen oder Spannungen, Auto - Parallel, Auto - Serie usw.) möglich [2].
- b) Der Schmitt-Trigger kann vereinfacht werden. (Im Mustergerät wurde eine gerade vorhandene Schaltung eingebaut.)
- c) Es ist möglich, auf Schmitt-Trigger und Relais zu verzichten und die Umschaltung rein elektronisch vorzunehmen.

Aus Tabelle 2 sind die Daten des Netzgerätes ersichtlich. In der in diesem Artikel beschriebenen Art wurden zwei Geräte gebaut. Weitere elf Geräte mit geändertem mechanischem Aufbau werden von einer Gruppe von Lehrlingen nachgebaut (zum Teil ohne Umschaltung der Sekundärwicklung). Davon sind vier Geräte in Betrieb.

Tabelle 3 enthält die im Mustergerät verwendeten Spezialteile.

Literatur

- [1] Der Operationsverstärker. FUNKSCHAU, Heft 8/1970.
- [2] Regulated DC Power Supplies 1968 Catalog Hewlett Packard.
- [3] Signetics Linear Applications, 1969, S. 12.
- [4] Regulator Elements Using Transistors. Electronic Engineering, März 1964.