

Hochleistungs- Netzteilplatine 0 bis 30 V, 0 bis 10 A

Teil 1

Mit einer stufenlos einstellbaren Spannung von 0 bis 30 V, bis zu 10 A Ausgangsstrom, einem Hochleistungslüfteraggregat sowie exzellenten Regeleigenschaften lässt diese Netzteilplatine kaum noch Wünsche offen.

Allgemeines

Zur wichtigsten Ausstattung eines Elektronik-Labors zählt nach wie vor ein gutes, stabilisiertes Netzgerät mit stufenlos einstellbarer Ausgangsspannung und einstellbarer Strombegrenzung. Weiterhin sind möglichst gute Regeleigenschaften und eine für die jeweilige Aufgabe ausreichende Ausgangsleistung wichtig.

Je nach Anwendungsfall können die Anforderungen an ein Labornetzgerät dabei recht unterschiedlich sein. So kann es vorkommen, dass niedrige Spannungen, dafür aber hohe Ströme oder umgekehrt benötigt werden. Gut, wenn das zur Verfügung ste-

hende Labornetzgerät alle auftretende Anforderungen abdeckt.

Von der ELV-Entwicklungsabteilung wurde nun eine Leistungs-Netzteilplatine konzipiert, die eine einstellbare Ausgangsspannung von 0 bis 30 V und einen Strom von maximal 10 A liefern kann, so dass für nahezu alle Aufgaben im Laborbereich genügend Leistung zur Verfügung steht. Zusammen mit einem leistungsfähigen Netztransformator (z. B. ELV-Best.-Nr: 61-105-72) ist die Platine dann in ein geschlossenes Gehäuse einzubauen. Besonders im Bereich der primärseitigen Netzspannung sind dabei unbedingt alle geltenden VDE- und Sicherheitsvorschriften zu beachten. Des Weiteren ist der ungehin-

derte Luftaustritt im Bereich des Kühlkörper-Lüfteraggregates sicherzustellen.

Da das mit einem leistungsfähigen Axiallüfter ausgestattete Lüfterprofil sich dann im Inneren des Gehäuses befindet, entfallen an der Rückseite des Gerätes störende Kühlkörper. Eine elektronische Steuerung des Lüfters sorgt dabei für einen guten Kompromiss zwischen Geräuschkentwicklung und Wärmeabfuhr.

Ein am Kühlkörperaggregat angebrachter Temperatursensor überwacht die Endstufentemperatur und schaltet bei Übertemperatur die Ausgangsspannung ab. Sobald die Temperatur sich wieder im zulässigen Bereich befindet, wird die Ausgangsspannung automatisch aktiviert.

Wie in Tabelle 1 zu sehen ist, erreicht diese Netzteilplatine bezüglich der technischen Daten ausgezeichnete Werte. So weist das Gerät als Spannungs-konstanter einen Innenwiderstand von $< 5 \text{ m}\Omega$ auf, und die Brummspannung liegt im Bereich von ca. 1 mV. Selbstverständlich ist der Ausgang dieser Netzteilplatine dauerkurzschlussfest.

Zur besonders genauen Einstellung der Ausgangsspannung und der Ausgangsstrombegrenzung sind jeweils zwei Potis vorhanden. Über Leuchtdioden werden der jeweils aktive Regler (U oder I), die Aktivierung des Lüfters und das Ansprechen der Temperatursicherung angezeigt. Desweiteren ist eine LED zur Betriebsanzeige vorhanden.

Schaltung

Abbildung 1 zeigt das Schaltbild der ELV-Hochleistungs-Netzteilplatine, dessen Schaltungsaufwand sich trotz der hervorragenden technischen Daten in Grenzen hält.

Weniger der Schaltungsaufwand, sondern vielmehr der Aufbau und die Leiterbahnführung des Layouts sind für die Regeleigenschaften, den Innenwiderstand sowie das Brummen und Rauschen eines

Technische Daten:

Ausgangsspannung:	0 - 30 V
Ausgangsstrom:	0 - 10 A
Brummen und Rauschen	
Spannungskonstanter:	1 mV _{eff}
Stromkonstanter:	0,01 %
Innenwiderstand	
Spannungskonstanter:	5 mΩ
Stromkonstanter:	20 kΩ
Einstellmöglichkeiten	
Spannung:	stufenlos, grob und fein
Strom:	stufenlos, grob und fein
LED-Anzeigen: ...	U-Regler, I-Regler, Temp., Lüfter, Betrieb
- Hochleistungs-Kühlkörper-Aggregat mit elektronischer Lüftersteuerung	
- Übertemperatur-Schutzschaltung	
Leiterplatten-Abmessungen:	235 x 186 mm

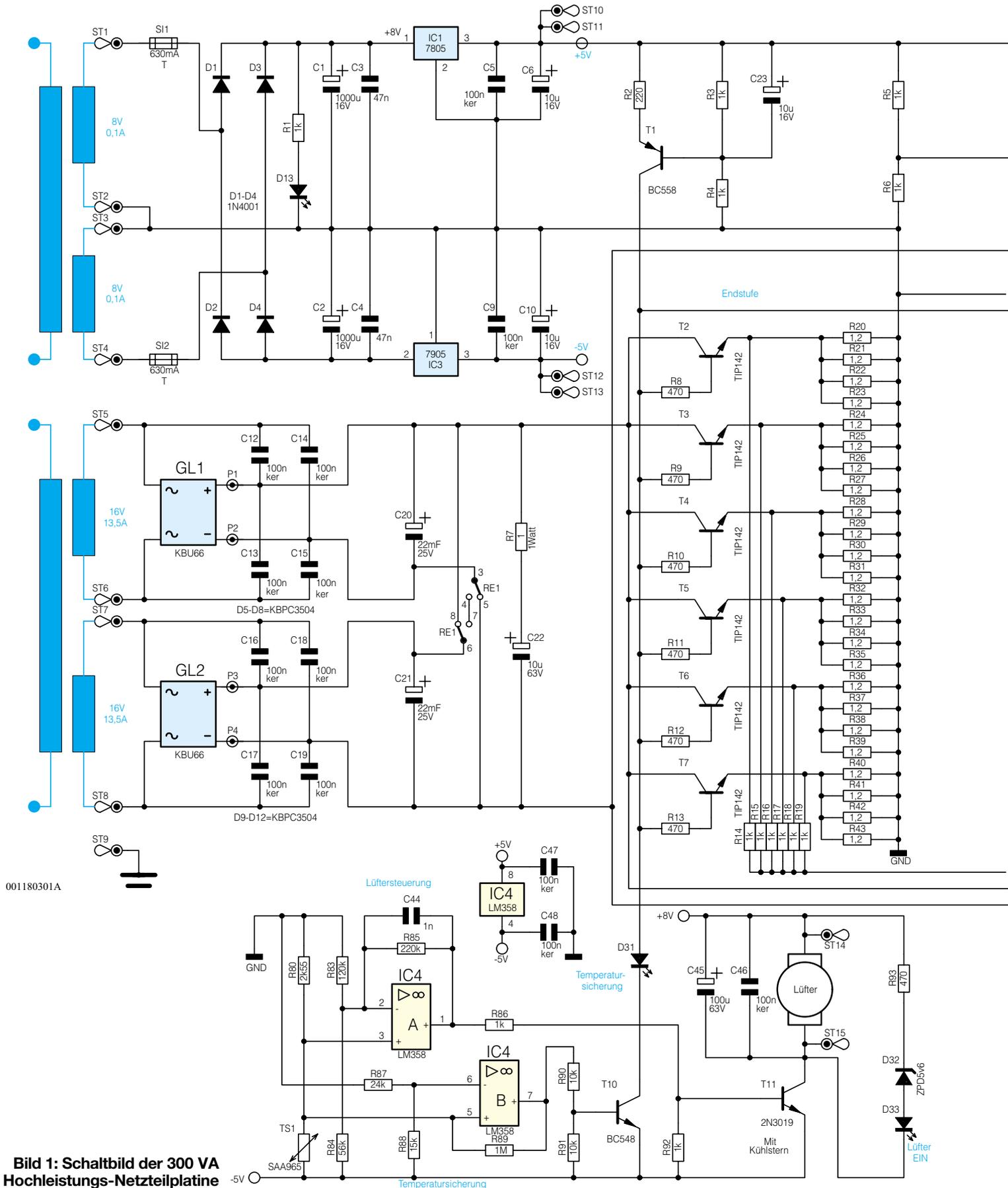
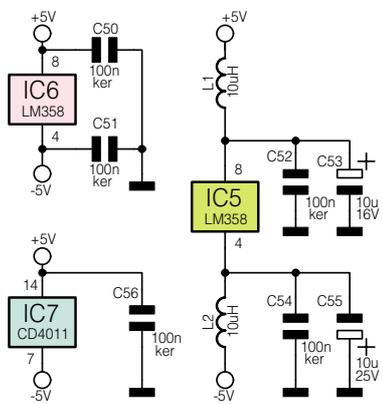
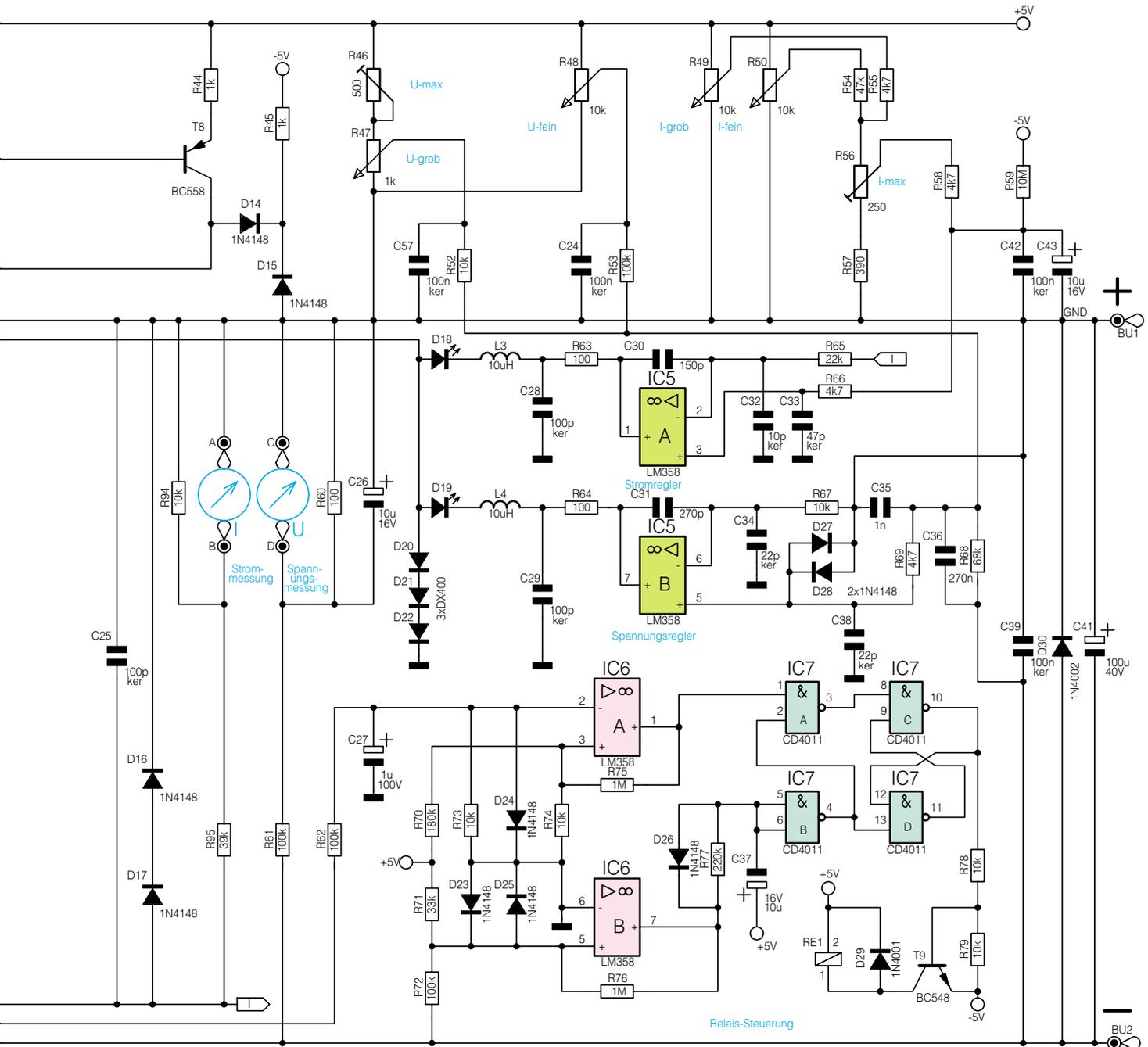


Bild 1: Schaltbild der 300 VA Hochleistungs-Netzteilplatine

Netzteils von ausschlaggebender Bedeutung. Hervorragende technische Daten sind des Weiteren nur bei entsprechender Bauteilpositionierung zu erreichen.

Doch nun zur eigentlichen Schaltung, wobei wir mit der vom Transformator kommenden Wechselspannungszuführung an ST 1 bis ST 8 beginnen.

Zunächst wird für die Steuerelektronik eine Sekundärwicklung mit Mittelanzapfung (2 x 8 V) oder zwei getrennte 8-V-Wicklungen benötigt, die an ST 1 bis ST 4 anzu-



Panelmeter zu versorgen sind. Werden diese Trafowicklungen ausschließlich für die Steuerelektronik benötigt, so reicht bereits eine Strombelastbarkeit von 2 x 100 mA.

Eine mit D 1 und D 3 aufgebaute Mittelpunkt-Zweiweg-Gleichrichterschaltung versorgt dann den positiven Zweig mit einer unstabilisierten Gleichspannung und eine mit D 2 und D 4 aufgebaute Mittelpunkt-Zweiweg-Gleichrichterschaltung den negativen Versorgungszweig.

Die Elektrolytkondensatoren C 1 und C 2 dienen in diesem Bereich zur ersten Pufferung.

Der Festspannungsregler IC 1 stellt ausgangsseitig eine stabilisierte positive Spannung von +5 V und der Festspannungsregler IC 3 eine stabilisierte negative Spannung

von -5 V für die Regel- und Steuerelektronik zur Verfügung. C 3, C 4, C 5 und C 9 dienen dabei zur Störunterdrückung und C 6 und C 10 zur Schwingneigungsunterdrückung jeweils am Ausgang der Festspannungsregler.

Bevor wir nun zur Beschreibung der eigentlichen Steuer- und Regelschaltung kommen, befassen wir uns zuerst mit den beiden Sekundär-Leistungswicklungen des Netztransformators, die an ST 5 bis ST 8 anzuschließen sind. Die beiden Wicklungen sollten vollkommen identisch sein und jeweils 16 V bei 13,5 A Strombelastbarkeit abgeben können. Mit Hilfe der beiden Leistungs-Brückengleichrichter GL 1 und GL 2 am Kühlkörperprofil erfolgt dann die Gleichrichtung, wobei C 12 bis C 19 jeweils zur

Störunterdrückung im Bereich der Schaltschwellen über die, im Gleichrichter integrierten, Dioden geschaltet sind.

Je nach gewünschter Ausgangsspannung des Netzteils werden die beiden gewonnenen Gleichspannungen entweder parallel oder in Reihe geschaltet. In der eingezeichneten Schalterstellung des Relais RE 1 liegen beide Spannungen parallel, d. h., zur Versorgung der Leistungs-Endstufe erhalten wir ca. 22 V.

Befindet sich das Relais in der entgegengesetzten Schalterstellung, so entsteht aufgrund der Reihenschaltung ca. die doppelte Spannung. Die RC-Kombination, aufgebaut mit R 7, C 22 dient zur Störunterdrückung im Umschaltmoment des Relais.

Die unstabilisierte Betriebsspannung des Netzgerätes liegt somit zwischen der negativen Ausgangsbuchse und den Kollektoren der Leistungs-Endstufen-Transistoren T 2 bis T 7.

Die Leistungsstufe ist als Längsregler ausgeführt, wobei in den Emitterleitungen die Widerstände R 20 bis R 43 eingefügt sind. An diesen Widerständen wird eine dem Ausgangsstrom proportionale Messspannung gewonnen und gleichzeitig Exemplarstreuungen in den Transistordaten ausgeglichen. Des Weiteren dienen die Basisvorwiderstände R 8 bis R 13 zum Ausgleich unterschiedlicher Transistordaten.

Über die zur Entkopplung dienenden Vorwiderstände R 14 bis R 19 gelangt die so gewonnene stromproportionale Messspannung, die auf die Schaltungsmasse bezogen ist (positive Ausgangsbuchse des Netzteils), über R 65 auf den invertierenden Eingang (Pin 2) des für die Stromregelung dienenden Operationsverstärkers IC 5 A. Gleichzeitig kann über den mit R 94, R 95 aufgebauten Spannungsteiler diese Messspannung zur Stromanzeige dienen, indem z. B. ein Panelmeter an die Lötstifte A und B angeschlossen wird.

Stromregler

Die Sollwertvorgabe für den Ausgangsstrom wird über R 66 am nicht invertierenden Eingang (Pin 3) von IC 5 A vorgegeben. Eingestellt wird der Sollwert mit den beiden Potis R 49 (grob) und R 50 (fein), wobei der Trimmer R 56 zum Feinabgleich des Bereichsendwertes (10 A) dient. R 59 stellt sicher, dass grundsätzlich auch bei einer Offset-Spannung des Operationsverstärkers die Einstellung auf 0 möglich ist.

Eine eventuell auftretende Schwingneigung des OPs wird mit C 30 unterdrückt und C 32, C 33 verhindern HF-Einkopplungen auf den OP-Eingang.

Anhand eines kompletten Regelzyklus ist die Funktionsweise des Stromreglers am besten zu verdeutlichen.

Dazu nehmen wir an, dass die Aus-

gangsklemmen des Netzteils hinreichend niederohmig belastet werden oder kurzgeschlossen sind. Außerdem wird angenommen, dass sich beide Einstellpotis für den Strom (R 49, R 50) am Rechtsanschlag (Maximalwert) befinden. An Pin 3 (nicht-invertierender Eingang) des IC 5 A wird dann eine Sollspannung von 500 mV vorgegeben.

Überschreitet der Ausgangsstrom den eingestellten Maximalwert von 10 A auch nur geringfügig, entspricht dies einem Spannungsabfall an den Emitterwiderständen (R 20 bis R 43) der Endstufe, der ebenfalls 500 mV übersteigt. Am invertierenden Eingang (Pin 2) des OPs stellt sich dadurch eine höhere Spannung als am nicht invertierenden Eingang (Sollwertvorgabe) ein und der Ausgang (Pin 1) strebt in Richtung negative Spannung. D 18 wird leitend (leuchtet auf) und ein Teil des Stromes der mit T 1 und externen Komponenten aufgebauten Konstantstromquelle fließt nicht mehr über die Basen der Endstufentransistoren, sondern über den Ausgang von IC 5 A ab. Der Ausgang des OPs wird jedoch nur soweit negativ, dass der Spannungsabfall an den Emitterwiderständen R 20 bis R 43 wieder gerade 500 mV erreicht. Der Ausgangsstrom stellt sich auf 10 A ein und an den beiden Eingängen des IC 5 A erhalten wir ein Spannungsgleichgewicht.

Die Bauelemente L 3, C 28 und R 63 verhindern im Bereich des Stromreglers eine Störeinkopplung auf den OP-Ausgang.

Durch Verändern der Sollspannungsvorgabe an Pin 3 des OPs ist nun jeder beliebige Ausgangsstrom einstellbar, der dann vom Stromregler konstant gehalten wird.

Solange der Stromregler aktiv arbeitet, leuchtet die Leuchtdiode D 18, und D 19 (U-Regler) befindet sich im gesperrten Zustand, da der Ausgang von IC 5 B (Pin 7) in diesem Betriebszustand High-Pegel führt.

Bei der Sollstrom-Vorgabe beträgt der Einfluss von R 50 nur ca. 10 % aufgrund der unterschiedlichen Gewichtung von R 54 und R 55. R 49 dient somit zur Grobeinstellung und R 50 zur Feineinstellung des Ausgangsstroms.

Spannungsregler

Wird nun ausgehend von der Funktion als Stromregler der Belastungswiderstand erhöht, hält der Stromregler den eingestellten Stromwert konstant und die Ausgangsspannung steigt an. Sobald der mit den Spannungs-Einstellreglern (R 47, R 48) vorgewählte Spannungsendwert erreicht wird, kann der Stromregler den Ausgangsstrom nicht mehr konstant halten und der mit IC 5 B aufgebaute Spannungsregler übernimmt die Kontrolle, indem die Ausgangsspannung auf den Sollwert begrenzt wird.

Für die detaillierte weitere Beschreibung des Spannungsreglers nehmen wir nun an,

dass die Ausgangsklemmen des Netzteils weitestgehend unbelastet sind. Zumindest soll die Stromvorgabe grundsätzlich höher sein als der „Ist-Strom“, so dass wir am Ausgang von IC 5 A einen High-Pegel erhalten und die Leuchtdiode D 18 gesperrt ist.

Über R 67 ist der invertierende Eingang von IC 5 B (Pin 6) direkt mit der Schaltungsmasse (positive Ausgangsklemme des Gerätes) verbunden.

Die mit R 47 (Grobeinstellung) und R 48 (Feineinstellung) erzeugten Sollwertvorgaben werden über R 52 und R 53 zusammen mit der negativen Ausgangsspannung über R 68 auf einen gemeinsamen Summenpunkt gegeben. R 69 verbindet nun diesen gemeinsamen Summenpunkt mit dem nicht invertierenden Eingang (Pin 5) des IC 5 B.

Sobald die Spannung an Pin 5 die Sollwertvorgabe an Pin 6 unterschreitet, strebt der Ausgang (Pin 7) in Richtung negativer Spannung, und ein Teil des von der Konstantstromquelle, aufgebaut mit T 1 und externen Komponenten, zur Verfügung gestellten Stromes fließt nicht über die Basen der Endstufentransistoren sondern über D 19, L 4, R 64 und den Ausgang von IC 5 B ab. Die Ausgangsspannung des Netzteils sinkt nun soweit, bis die Spannung an IC 5 B, Pin 5 den Wert der Sollwertvorgabe an Pin 6 erreicht.

An den beiden OP-Eingängen stellt sich auch hier ein Spannungsgleichgewicht ein, und die Netzteil-Ausgangsspannung wird konstant gehalten. Wird mit Hilfe der Einstellpotis die Sollwertvorgabe an Pin 5 verändert (z. B. erhöht), so erhöht sich im gleichen Maße die Ausgangsspannung des Netzteils.

Eventuell auftretende Schwingneigungen des Reglers werden mit C 31 unterdrückt und das mit L 4, C 29, R 64 aufgebaute Filter sowie die Keramikkondensatoren C 34, C 38 verhindern hochfrequente Störeinflüsse auf den OP.

Die weiteren Kondensatoren in diesem Bereich beeinflussen die Dämpfungs- und Regelparameter des Netzteils, so dass eine möglichst schnelle und dennoch stabile Regelung entsteht.

Aufgrund der Dimensionierung ist die Ausgangsspannung von 0 bis 30 V linear einstellbar, wobei durch die Gewichtung von R 52 und R 53 das Einstellpoti R 47 zur Grobeinstellung und das Einstellpoti R 48 zur Feineinstellung dient.

Welcher der beiden Regler gerade aktiv ist, richtet sich nach dem Geräteausgangsstrom relativ zum vorgewählten Maximalstrom. Bleibt der Geräte-Ausgangsstrom bei der Soll-Ausgangsspannung unter dem vorgegebenen Maximalwert, so arbeitet alleine der Spannungsregler und hält den Sollwert aufrecht. Erreicht jedoch, als Folge eines verringerten Lastwiderstandes am Netzteil, der Ausgangsstrom den einge-

stellten Grenzwert, so übernimmt nun der Stromregler die Arbeit. Er senkt die Ausgangsspannung jeweils so tief ab, dass der eingestellte Maximalstrom fließt (Stromkonstanter). Wenn nun die externe Last wieder abnimmt, d. h., der Stromregler eine Ausgangsspannung in Höhe der Vorgabespannung oder darüber ausgibt, übernimmt wieder der Spannungsregler die Stabilisierung. Auf diese Weise werden beide eingestellten Werte nie überschritten.

T 8 stellt in Verbindung mit R 5, R 6 und R 44 eine Konstantstromquelle mit ca. 2 mA Strom dar. Dadurch wird der Ausgang geringfügig vorbelastet, so dass in Verbindung mit den Dioden D 14, D 15 sowie R 45 die Ausgangsspannung auf genau 0 V einstellbar ist.

Zum Anschluss eines Panelmeters für die Spannungsanzeige dienen die Platinenanschlusspunkte C und D, wobei die Ausgangsspannung mit Hilfe des Spannungsteilers R 60, R 61 heruntergeteilt wird. Ein für die Stromanzeige zuständiges Panelmeter ist an die Platinenanschlusspunkte A und B anzuschließen. Hier ist dann die Messbereichs-Anpassung mit Hilfe der beiden Widerstände R 94 und R 95 vorzunehmen.

Bei der vorliegenden Dimensionierung entsprechen 30 mV an den Platinen-Anschlusspunkten C und D 30 V Ausgangsspannung, und bei 10 A Ausgangsstrom erhalten wir an A und B eine Spannung von ca. 100 mV.

Als nächstes wenden wir uns der elektronischen Trafoumschaltung zu.

Dieser mit IC 6 A, B und IC 7 aufgebaute Schaltungsteil übernimmt die Ansteuerung von RE 1 zur Parallel- bzw. Reihenschaltung der beiden getrennten unstabilisierten Betriebsspannungen, die an C 20 bzw. an C 21 anstehen. Die Funktionsweise sieht im Einzelnen wie folgt aus:

Bei niedrigen Ausgangsspannungen bis ca. 16 V ist das Relais RE 1 deaktiviert, d. h. die Kontakte nehmen die im Schaltbild eingezeichnete Position ein. Die über die beiden Haupt-Sekundärwicklungen in Verbindung mit den nachgeschalteten Gleichrichtersätzen erzeugten Betriebsspannungen, einschließlich der großen Lade-Elkos C 20 und C 21, sind nun parallel geschaltet.

Über den Spannungsteiler R 62, R 73 wird der Spannungsabfall an der Leistungsendstufe abgefragt und auf den invertierenden Eingang (Pin 2) des Komparators IC 6 A gegeben. Je größer die eingestellte Ausgangsspannung des Netzgerätes eingestellt wird, desto geringer ist der Spannungsabfall an der Endstufe. Unterschreitet dieser Spannungsabfall einen Wert von ca. 2,5 V, so wechselt der Ausgang (Pin 1) von vormals Low-Pegel auf High-Pegel. Vorausgesetzt, die Ausgangsspannung beträgt mindestens 15 V (mit IC 6 B detek-

tiert), liegen nun beide Eingänge (Pin 1 und Pin 2) des Gatters IC 7 A auf High-Potential, und der Ausgang (Pin 3) wechselt auf Low. Hierdurch wird der Speicher IC 7 C, D, über Pin 8 gesetzt, und Pin 10 nimmt High-potential an. Über R 78 wird T 9 durchgesteuert, das Relais RE 1 zieht an und die beiden Haupt-Betriebsspannungen, erzeugt in den beiden Haupttrafo-Sekundärwicklungen, werden in Reihe geschaltet.

Durch die Umschaltung steht nun an den Kollektoren der Endstufentransistoren nahezu die doppelte Spannung an, d. h. der Ausgang (Pin 1) des IC 6 A wechselt unmittelbar darauf auf Low-Potential (es sei denn, Ausgangsspannung und Strom des Netzgerätes sind annähernd auf die Maximalwerte eingestellt). Dieses Umschalten des IC 6 A und damit des nachgeschalteten Gatters IC 7 A ist jedoch unerheblich, da der Vorgang mit Hilfe von IC 7 C, D abgespeichert wurde, wodurch das Relais aktiviert bleibt.

Wird nun mit den Spannungs-Einstellpotis R 47 und R 48 eine Ausgangsspannung unter ca. 14 V eingestellt, so gelangt diese Information über den Spannungsteiler R 71, R 72 auf den Komparator IC 6 B, welcher bei einer Netzgerätausgangsspannung unterhalb von 14 V seinen Ausgang (Pin 7) von ursprünglich Low-Potential auf High-Potential umschaltet.

Über R 77 gelangt dieses Potential auf die Eingänge Pin 5, 6 des als Inverter geschalteten Gatters IC 7 B, dessen Ausgang (Pin 4) nimmt daraufhin Low-Potential an und der Speicher IC 7 C, D wird über Pin 13 zurückgesetzt. Der Transistor T 9 sperrt und das Relais RE 1 fällt ab, die Hauptbetriebsspannungen werden wieder parallel geschaltet.

Mit R 77, C 37 wird beim Herunterschalten eine Verzögerung von ca. 2 Sek. erreicht, während über D 26 das Heraufschalten nahezu verzögerungsfrei erfolgt.

Im unteren Spannungsbereich ist zudem der zweite Eingang (Pin 2) des Gatters IC 7 A gesperrt (Low-Pegel). Ein Heraufschalten (Reihenschaltung) bei höheren Ausgangsspannungen kann erst dann erfolgen, wenn IC 6 B ab einer Ausgangsspannung von ca. 15 V Pin 2 des IC 7 A freigegeben hat und danach IC 6 A einen Spannungsabfall von weniger als 2,5 V an den Endstufentransistoren detektiert. Diese Schaltungsweise hat den Vorteil, dass bei geringen Ausgangsströmen ein Umschalten erst bei 16 V bis 18 V Ausgangsspannung erfolgt, da die parallel geschalteten Betriebsspannungen bei geringerer Last eine höhere unstabilisierte Spannung abgeben und der Rest-Spannungsabfall an der Leistungsendstufe des Transistors höher ist. Unter allen Betriebsbedingungen wird somit die Verlustleistung in den Endstufentransistoren gering gehalten.

Nachdem nun alle Funktionsgruppen des eigentlichen Netzteils beschrieben sind, wenden wir uns der im Schaltbild unten links eingezeichneten Temperaturschutzschaltung sowie der temperaturgeführten Lüftersteuerung zu.

Der Temperatursensor (TS 1) des Typs SAA 965 ist direkt am Leistungs-Kühlkörperprofil montiert und dient gleichzeitig als Fühlerelement für die Lüftersteuerung und sorgt im Falle einer zu hohen Endstufentemperatur für das Abschalten des Netzgerätes.

Betrachten wir zuerst die mit IC 4 B aufgebaute Temperaturschutzschaltung.

In Folge einer Erwärmung der Endstufe und somit auch des Temperatursensors TS 1 steigt dessen Widerstandswert. Dadurch steigt auch kontinuierlich die Spannung am nicht invertierenden Eingang des Komparators IC 4 B. Übersteigt die Spannung an diesem Eingang das durch den Spannungsteiler R 87, R 88 vorgegebene Potential, so wechselt der Ausgang (Pin 7) von High- auf Low-Pegel. Über den Transistor T 10 sowie die Leuchtdiode D 31 (zur Anzeige der aktiven Temperatursicherung) wird die Endstufe gesperrt. Der Widerstand R 89 sorgt dabei für eine Schalthysterese von ca. 5° C.

Wie bereits erwähnt ist das Hochleistungs-Kühlkörperprofil dieses Netzgerätes mit einem DC-Lüfter mit elektronischer Kommutierung ausgestattet. Der Lüfter ist direkt vor dem Lufteintritt des Kühlkörperprofils montiert und drückt die Luft durch, das mit Kühlrippen ausgestattete, Kühlkörperinnere.

Solange an der Endstufe nur eine geringe Verlustleistung entsteht, ist der Lüfter deaktiviert. Steigt die Temperatur am Leistungskühlkörper, erhöht sich die Spannung am nicht invertierenden Eingang (Pin 3) des IC 4 A und die Spannung am Ausgang (Pin 1) steigt an. Mit zunehmender Erwärmung von TS 1 steigt auch die Durchsteuerung von T 11, bis bei etwa 3,5 V der Lüfter sanft anläuft. Die hierdurch erreichte Wärmeabfuhr im Kühlkörper wirkt einer weiteren Erwärmung entgegen, so dass sich nach kurzer Zeit ein Gleichgewicht zwischen Lüfterdrehzahl und benötigter Energiezufuhr einstellt. Es erfolgt also eine stetige, automatische elektronische Nachregelung des Lüfters.

Der Elko C 45 und der Keramik-Kondensator C 46 dienen zur Störunterdrückung und die über R 93 und die Z-Diode D 32 mit Spannung versorgte Leuchtdiode D 33 zeigt den Betrieb des Lüfters ab einer nennenswerten Drehzahl an.

Die Schaltungsbeschreibung dieses interessanten Netzteilmoduls ist damit abgeschlossen, so dass wir uns im zweiten Teil dieses Artikels ausführlich dem Nachbau und der Inbetriebnahme zuwenden können.

ELV