

Kondensator-Leckstrom-Tester

Gerätekonzept

von Manuel Caldeira

In diesem Beitrag erkläre ich, warum das Testen von Kondensatoren bei der Restaurierung alter elektronischer Geräte von großer Bedeutung ist, und präsentiere mein Gerätekonzept für einen Tester zur Messung des Leckstroms von Kondensatoren. Da sich das dielektrische Medium von Kondensatoren im Laufe der Zeit zersetzt und Leckströme erzeugt, ist es häufige Fehlerquelle in elektronischen Schaltungen.



Für diejenigen mit Erfahrung in der Restaurierung alter elektronischer Geräte, insbesondere von solchen mit Röhren, ist der Austausch von Kondensatoren wahrscheinlich eine Routineaufgabe. Fehlerhafte Kondensatoren sind eine häufige Ursache für Gerätefehlfunktionen, folgerichtig sind sie daher Ausgangspunkt im Restaurierungsprozess.

Aber warum ist das so? Viele erwarten vielleicht, dass Röhren wegen der großen Hitze, die sie während des Betriebs aushalten müssen, als Erstes ausfallen. Es stimmt zwar, dass Röhren regelmäßig ausgetauscht werden müssen, der Austausch aber dank ihrer Stecksockel leicht möglich ist. Frühere Besitzer haben die Röhren wahrscheinlich mindestens einmal während der Lebensdauer des Geräts

erneuert. Kondensatoren hingegen sollten ursprünglich die gesamte Lebensdauer des Geräts überdauern, sodass sie im Gegensatz zu Röhren oder auch Sicherungen nicht für einen einfachen Austausch durch den Benutzer ausgelegt sind.

Interessanterweise habe ich bei über hundert restaurierten Röhrenradios oft Originalröhren gefunden, die noch zufriedenstellend funktionierten, dagegen nie eines, bei dem alle Kondensatoren in einem akzeptablen Zustand waren (Bild 1).

Der Grund ist ganz einfach: Kondensatoren bestehen aus zwei leitenden Oberflächen, die durch ein nichtleitendes dielektrisches Medium getrennt sind. Mit der Zeit verschlechtert sich diese dielektrische Schicht, was zum Ausfall des Kondensators führt. Häufig resultiert daraus ein sogenannter Leckstrom, der im Mittelpunkt dieses Artikels steht. Beschrieben wird der Entwurf eines Geräts, das dieses Problem messtechnisch erfassen kann.

Über den Autor

Manuel Caldeira schloss sein Studium der Elektrotechnik an der University of Natal (Durban) 1985 ab. Direkt nach der Universität begann er, bei Siemens (Südafrika) zu arbeiten. Danach ging er in die Wirtschaft, anstatt in der Technik zu bleiben. Schließlich kehrte er zur Elektronik zurück und restauriert alte Röhrenradios. Er tüftelt so ziemlich an allem, was ihm auf dem Gebiet der Elektronik gefällt.

Von seinem Wohnsitz auf Madeira aus betreibt Manuel Caldeira auf Youtube den Kanal [Electronics Old and New by M Caldeira](#), der sich hauptsächlich mit Röhrenradios beschäftigt. In den vergangenen acht Jahren hat er dazu mehr als 570 Videos veröffentlicht. Mittlerweile hat er mehr als 244500 Abonnenten.

Messen des Kondensatorzustands

Der erste Schritt zur Beurteilung der Verfassung eines Kondensators besteht darin, seine Kapazität zu messen. [Kapazitätsmessgeräte](#) sind weit verbreitet und recht günstig, was sie zu einem unverzichtbaren Werkzeug in jeder Elektronikwerkstatt macht. Sie liefern einen eindeutigen Messwert der Kapazität in Mikrofarad (oder Picofarad, Nanofarad usw.), der mit dem Nennwert und damit den Spezifikationen verglichen werden kann.

Die Kapazität allein reicht jedoch nicht aus, um den Zustand eines Kondensators abschließend zu bestimmen. Die Messung des äquivalenten Serienwiderstands (ESR: Equivalent Series Resistance) ist ebenfalls entscheidend. Insbesondere bei Elektrolytkondensatoren, in denen ein erhöhter ESR auf eine Verschlechterung der Kondensatorzustands hinweist. [ESR-Messgeräte](#) sind ebenfalls leicht und erschwinglich verfügbar.

Die größere Herausforderung besteht darin, den Leckstrom eines Kondensators zu messen – den „lautlosen Killer“, der Ihr Gerät beim unvorsichtigen Einschalten zerstören kann. Herausfordernd ist dabei, dass dieser Leck-Gleichstrom durch den Kondensator in Spannungsbereichen gemessen werden muss, die nahe bei den maximalen Betriebswerten liegen. Dies ist insbesondere bei Röhrengeräten wichtig, in denen diese sehr hohen Spannungen nahe den Spezifikationen auch tatsächlich schaltungsbedingt auftreten!

Papier- oder Filmkondensatoren, wie sie häufig in Röhrengeräten eingesetzt werden, neigen ebenfalls dazu, mit dem Alter abzubauen. Das Dielektrikum kann durch Einwirkung von Hitze, Luft oder Feuchtigkeit beschädigt werden, wodurch es seine isolierenden Eigenschaften verliert und den Kondensator effektiv in einen Widerstand verwandelt. Dadurch kann ein echter Gleichstrom durchgelassen werden, anstatt nur Ladung über die beiden Oberflächen zu übertragen. In diesem Fall spricht man davon, dass der Kondensator „leckt“.

Sind ungebrauchte, aber alte Lagerteile noch okay?

Besitzer wertvoller Vintage-Röhrengeräte möchten oft die vollständige Originalität ihrer Geräte bewahren und bestehen darauf, dass alle ausgetauschten Teile originalgetreu sind. Hier stoßen wir auf ein interessantes Problem: Selbst wenn eingelagerte, aber neue und damit unbenutzte Kondensatoren gefunden werden, gibt es keine Garantie dafür, dass sie nicht unter denselben altersbedingten Leckageproblemen leiden.

Die Alterung ist der gemeinsame Faktor, der sowohl gebrauchte als auch ungenutzte Kondensatoren ähnlichen Herstellungsdatums betrifft. Im Laufe der Zeit kann es zu einer Verschlechterung des Dielektrikums kommen, unabhängig davon, ob das Bauteil im Betrieb verwendet wurde oder nicht. Dieser Prozess ist häufiger bei Elektrolytkondensatoren vorzufinden, bei denen das Austrocknen des Dielektrikums ein Hauptproblem darstellt – aber auch das Eindringen von Feuchtigkeit kann andere gängige Kondensatortypen in Röhrengeräten beeinträchtigen.

Besitzer defekter Röhrengeräte sind daher gut darin beraten, ihren Wunsch nach Ästhetik zugunsten eines garantiert funktionierenden Geräts aufzugeben.

Alte Kondensatoren sollten durch moderne Typen ersetzt werden, die nicht nur besser konstruiert, sondern auch viel kleiner als ihre alten Gegenstücke sind. Oft können diese neuen Teile so „getarnt“ werden, dass sie wie die Originale aussehen. Hierfür werden sie in den Gehäusen der alten Kondensatoren versteckt. Bei diesem Verfahren wird das Innenleben der alten Kondensatoren entfernt, danach werden die neuen, kleineren Kondensatoren in die ursprüngliche physische „Hülle“ eingesetzt. So bleibt die Anwesenheit neuer Komponenten in alten Schaltungen verborgen. Dies ist zwar ein sehr zeitaufwendiges Verfahren, liefert jedoch optisch elegante Ergebnisse ohne Kompromisse bei Funktion und Sicherheit.



Bild 1: Einige der üblichen „Opfer“ von Restaurierungsprojekten

Fazit: Unabhängig davon, ob ein Kondensator ständig verwendet oder jahrzehntelang unbenutzt in einer Bauteileschublade gelagert wurde – es immer eine gute Idee, ihn vor dem Einbau auf Leckströme zu testen.

Wird nur ein Gleichspannungsnetzgerät benötigt?

Im Wesentlichen wird nur eine Gleichspannungsquelle benötigt, weil das Ziel darin besteht, den Leckstrom durch den Kondensator zu messen, wenn er seiner Betriebsspannung ausgesetzt ist ([Bild 2](#)).



Bild 2: Leckströme können bei erhöhter Spannung unterhalb der maximalen Nennspannung des Bauteils gemessen werden.

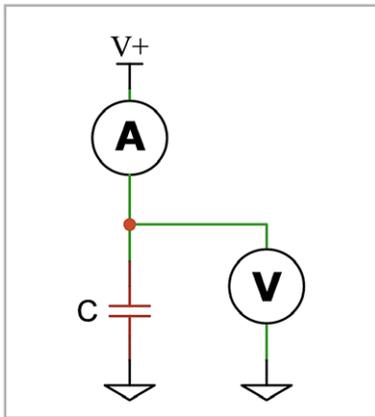


Bild 3: Die einfachste Testschaltung für Kondensatorleckströme

Daher muss eine solche Spannung an den Kondensator auch angelegt und der durch ihn fließende Strom gemäß Bild 3 gemessen werden. Das Amperemeter misst den Leckstrom, während das Voltmeter parallel die angelegte Spannung misst.

Da die Nennspannungen von Kondensatoren enorm variieren, wird eine einstellbare Stromversorgung benötigt. Der von ihr zu liefernde Strom ist sehr klein, da der zu erwartende Leckstrom sehr gering sein wird. Wie gering? Nun, jeder Kondensator, der mehr als ein paar Milliampere Leckstrom aufweist, kann als fehlerhaft angesehen werden. Daher gilt es als vernünftig, eine mit 10 mA mehr als ausreichende Obergrenze festzulegen.

Warum ist Leckstrom ein so großes Problem?

Wenn der Leckstrom eines Kondensators sehr gering sein kann, warum ist er dann ein so großes Problem in elektronischen Schaltungen? Dies lässt sich am besten anhand des Schaltbilds einer typischen Leistungsstufe eines Röhrenradios (wie sie im Grundig 2147 Röhrenradio verwendet wird), verstehen (siehe Bild 4).

Das Audiosignal wird von der vorhergehenden Vorverstärkerstufe über einen Kondensator (C) in das Gitter der Leistungsrohre eingespeist. Der Vorverstärker besteht aus einer Triode, an deren Anode das Ausgangssignal erzeugt wird und die ein relativ hohes Gleichspannungspotential von 84 V_{DC} aufweist.

Der Kondensator C blockiert die Gleichspannung und lässt nur das Audiosignal passieren. Normalerweise funktioniert das problemlos, vorausgesetzt, der Kondensator blockiert die Gleichspannung vollständig. Doch was passiert, wenn der Kondensator einen Leckstrom aufweist? Welche Auswirkungen können ein paar Mikroampere in diesem Fall haben?

Die Folgen von nur wenigen Mikroampere (z. B. 3 µA) können erheblich sein, wie eine einfache Rechnung mit dem ohmschen Gesetz aufzeigt.

Die Leistungsrohre muss für den Betrieb richtig vorgespannt sein. In der Schaltung von Bild 4 ergibt ein 140-Ω-Widerstand zwischen Kathode und Masse eine Kathodenspannung (V_K) von 5,6 V auf Masse bezogen. Normalerweise fließt kein Strom in oder aus dem Gitter der Röhre, da es eine sehr hohe Impedanz hat. Folglich fließt kein Strom durch den

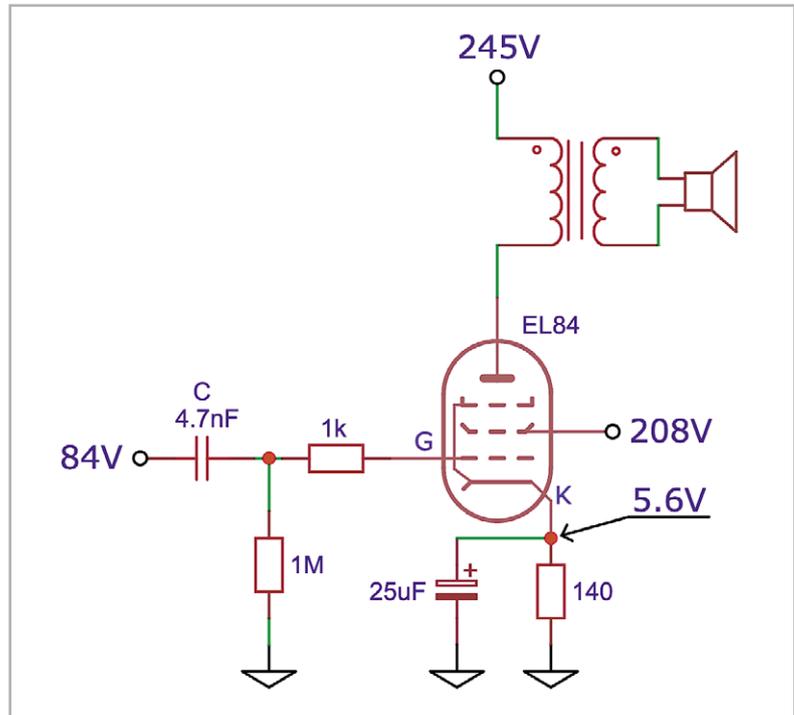


Bild 4: Typische Leistungsausgangsstufe eines Röhrenradios, die über den Kondensator C mit der vorhergehenden Vorverstärkerstufe gekoppelt ist

Gittervorwiderstand (1 kΩ), der auch als „Gridstopper“ bezeichnet wird und hauptsächlich dazu dient, jegliche Hochfrequenzstörungen zu beseitigen bzw. zu „stoppen“, sowie durch den Gitterableitwiderstand (1 MΩ). Dies bedeutet, dass die Spannung am Gitter (V_G) der Röhre 0 V betragen muss, da diese über die Widerstände, durch die kein Strom fließen kann und an denen daher kein Spannungsabfall auftritt, mit Masse verbunden ist.

Wir haben also:

$$V_K = 5,6 \text{ V}$$

$$V_G = 0 \text{ V}$$

Daher gilt:

$$V_{GK} = V_G - V_K$$

$$= 0 - 5,6 \text{ V}$$

$$= -5,6 \text{ V}$$

Erwartungsgemäß benötigt die Röhre eine negative Gitter-Kathoden-Spannung (V_{GK}), um eine sichere Vorspannung zu gewährleisten. Wenn diese Spannung „weniger“ negativ wird, steigt der Ruhestrom in der Röhre, was wiederum ihre Verlustleistung erhöht. Umgekehrt wird bei negativerer V_{GK} der Anodenstrom in der Röhre schließlich vollständig gesperrt.

So weit, so gut. Es besteht ein stabiler Ruhezustand und das Audiosignal moduliert die Gitterspannung, um das Ausgangssignal zu erzeugen. Richtig, es sei denn, die Gittergleichspannung beträgt nicht 0 V, was durch den Leckstrom des Kondensators verursacht werden kann und, wie wir erkennen werden, möglicherweise dramatische Auswirkungen hat.

Nehmen wir beispielsweise einen Leckstrom von 3 µA an – wohin fließt dieser Strom? Er kann nicht in das Gitter der Röhre fließen, also muss er durch den einzigen verfügbaren Weg zur Masse abfließen, nämlich durch den 1-MΩ-Gitterableitwiderstand.

Hier beginnt das Problem: Der 3-µA-Strom fließt durch den 1-MΩ-Widerstand und erzeugt einen Spannungsfall von 3 Volt, was zur Folge hat, dass das Gitter nun auf 3 V_{DC} und nicht mehr auf einem Potential von 0 V liegt.

Achtung, Gefahr! – Hochspannung!

Die Spannungen im Inneren eines Röhrenradios und die, die beim Gebrauch dieses Testgeräts auftreten, können sehr hoch sein – im Bereich von Hunderten von Volt, sodass äußerste Vorsicht geboten ist, um lebensbedrohliche Stromschläge zu vermeiden. Die beschriebenen Arbeiten dienen nur als Anschauungsbeispiel und zum Verständnis der verwendeten Technologie und sollten nur von dafür qualifizierten Technikern durchgeführt werden.

Nun sieht unsere Rechnung so aus:

$$\begin{aligned} V_{GK} &= V_G - V_K \\ &= 3\text{ V} - 5,6\text{ V} \\ &= -2,6\text{ V} \end{aligned}$$

Mit einer deutlich geringeren negativen Spannung am Gitter „öffnet“ die Röhre weiter und ihr Ruhestrom steigt dramatisch an. Ein kurzer Blick in das Datenblatt der EL84 (Bild 5) zeigt einen Anodenstromanstieg von etwa 45 mA auf 88 mA, ein Zuwachs von nahezu 100 Prozent!

Der Leckstrom könnte auch noch höher sein. Betrüge er beispielsweise 10 µA, so würde die Spannung zwischen Gitter und Kathode positiv werden, was zum vollständigen Öffnen und praktisch zum Schmelzen der Röhre führen würde. Diese Situation wäre nicht nur verheerend für die Röhre, sondern auch für den Ausgangstransformator, durch den dieser Anodenstrom fließt.

So können einige wenige µA Leckstrom in einem Bauteil, dessen Ersatz weniger als einen Euro kostet, zum Verlust einer Röhre und eines sehr teuren (und schwer zu beschaffenden) Ausgangstransformators führen.

Das Design der Stromversorgung

Kondensatoren gibt es in vielen Formen und Größen, und ihre Nennspannungen variieren je nach Anwendung stark. Viele Papierkondensatoren in Röhrenradios haben eine Nennspannung von 400 V bis 600 V, einige erreichen sogar bis zu 1000 V!

Diese hohe Spannung stellt eine Herausforderung für die Prüfung dar. Um den Leckstrom eines Kondensators genau zu messen, ist ein Test bei seiner maximalen Nennspannung ideal. Die Konstruktion eines Gleichspannungsnetzgeräts, das 1000 V_{DC} liefern kann, ist aber sowohl komplex als auch kostspielig und birgt erhebliche Risiken sowohl bei der Konstruktion als auch bei der Verwendung. Um diese Herausforderungen zu verringern, wurde ein System mit niedrigerer Spannung entwickelt, welches auf spezielle Anforderungen zugeschnitten ist, anstatt zu versuchen, jedes mögliche Szenario abzudecken.

Die meisten Röhrenradios arbeiten mit Spannungen von 300 V_{DC} oder weniger. Die Konstruktion einer Stromversorgung für diesen Spannungsbereich ist viel einfacher – daher wurden 300 V_{DC} als ungefähre Obergrenze des Projekts festgelegt.

Dennoch nochmal der eindringliche Hinweis:

Selbst diese „reduzierte“ Spannung von 300 V_{DC} ist immer noch extrem gefährlich und stellt eine tödliche Stromschlaggefahr dar. **Es besteht absolute Lebensgefahr!**

Den Lesern wird dringend davon abgeraten, diesen Aufbau nachzustellen, wenn sie keine Erfahrung im Umgang mit hohen Spannungen haben.

Die Restaurierung von Röhrenradios oder anderen Röhrengeräten beinhaltet den Umgang mit Spannungen dieser Höhe und erfordert äußerste Vorsicht. Sollten Ihre Fähigkeiten und Kenntnisse nicht ausreichend sein, versuchen Sie es keinesfalls!

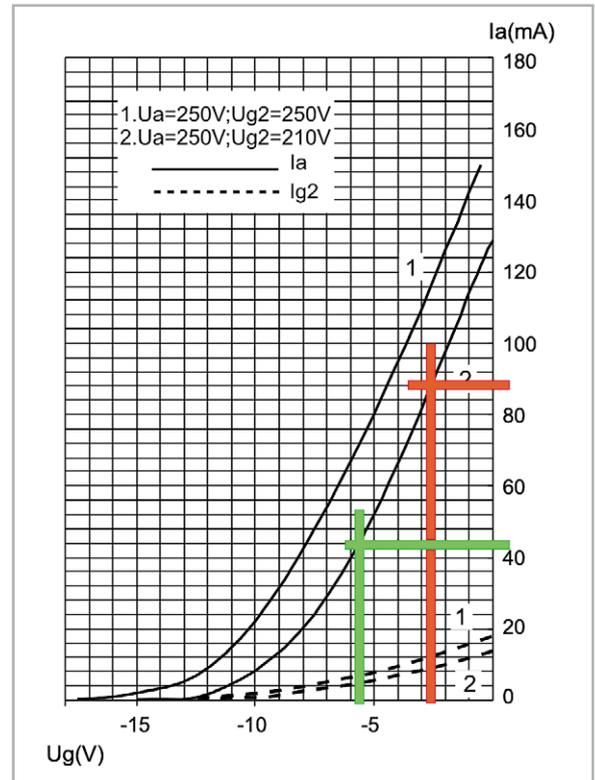


Bild 5: Auswirkung einer Erhöhung der Gitterspannung um 3 V auf den Anodenstrom einer EL84-Röhre

Einführung in das Design

Die Grundlage dieses Designs ist eine einfache Gleichstromversorgung, die die maximal erforderliche Spannung liefern kann. In diesem Fall liegt das Ziel bei etwa 300 V_{DC}, was einen Transformator erfordert, der dieses Spannungsniveau liefern kann. Der Transformator muss für die Netzspannung ausgelegt sein und eine Sekundärspannung von etwa 230 V_{AC} haben. Nach der Gleichrichtung durch einen Brückengleichrichter sollte die daraus resultierende Spannung wie folgt aussehen:

$$\begin{aligned} V_{DC} &= (V_{AC} \times 1,414) - (2 \times 0,7) \\ &= (230\text{ V}_{AC} \times 1,414) - 1,4 \\ &= 323,8\text{ V}_{DC} \end{aligned}$$

Für dieses Projekt wurde ein Ringkerntransformator (Bild 6) von einem Röhrenvorverstärkerprojekt wiederverwendet, das nie abgeschlossen wurde. Dieser Transformator mit einer Sekundärspannung

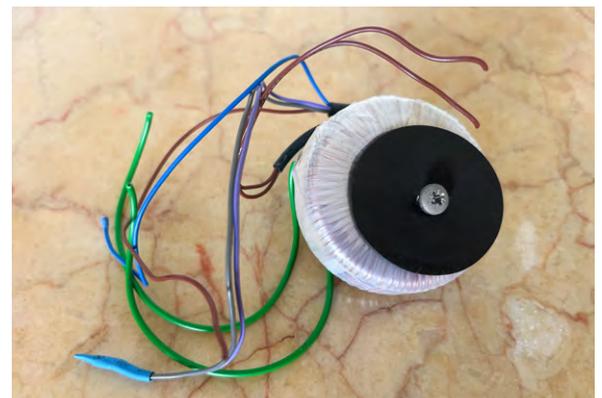


Bild 6: Ein im Originaldesign verwendeter Transformator mit geringer Leistung für einen Röhrenvorverstärker

von 230 V_{AC} bei maximal 30 mA verfügt außerdem über eine 6,3-V_{AC}-Heizwicklung. Da das Ziel darin besteht, mit sehr kleinen Leckströmen zu testen, reicht ein Transformator aus, der nur 10 mA liefern kann. Ein Trafo mit diesen Leistungsdaten ist zudem nicht sehr teuer. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Artikels bietet ein großer Online-Händler einen Transformator mit diesen Spezifikationen für weniger als zwanzig Euro an.

Bild 7 zeigt das grundlegende Schaltbild des ersten Teils des Projekts. Die Primärseite ist durch eine Sicherung geschützt, eingeschaltet wird das System über einen Schalter. Der Schutzleiter ist aus Sicherheitsgründen fest mit dem Chassis verbunden. Die Sekundärspannung wird durch einen Brückengleichrichter gleichgerichtet, was zu einer Gleichspannung von ungefähr 320 V führt. Der Minuspol der gleichgerichteten Gleichspannung wird zur gemeinsamen Masse für den Schaltkreis, jedoch nicht

mit dem Chassis (Netzerde) verbunden, da die Versorgung vollständig „schwimmen“ muss. Der Grund dafür wird später in diesem Artikel erläutert.

Ein 10- μ F-Siebkapazität dient der Glättung dieser Gleichspannung und ist auf eine Nennspannung von 450 Volt ausgelegt. Da die Strombelastung des Transformators sehr gering ist, reduziert ein 100- Ω -Widerstand den Einschaltstrom, wenn der Siebkondensator zum ersten Mal aufgeladen wird. Ein dem Kondensator parallel geschalteter Widerstand dient zu seiner Entladung, wenn das Gerät ausgeschaltet wird.

Die Heizungsversorgungsspannung wird mit einer einzelnen Diode gleichgerichtet und mit einem 100- μ F-Kondensator geglättet. Dadurch wird eine Niederspannungsquelle für die LED-Einschaltanzeige sowie für das digitale Voltmetermodul bereitgestellt, das zur Anzeige der Ausgangsspannung verwendet wird.

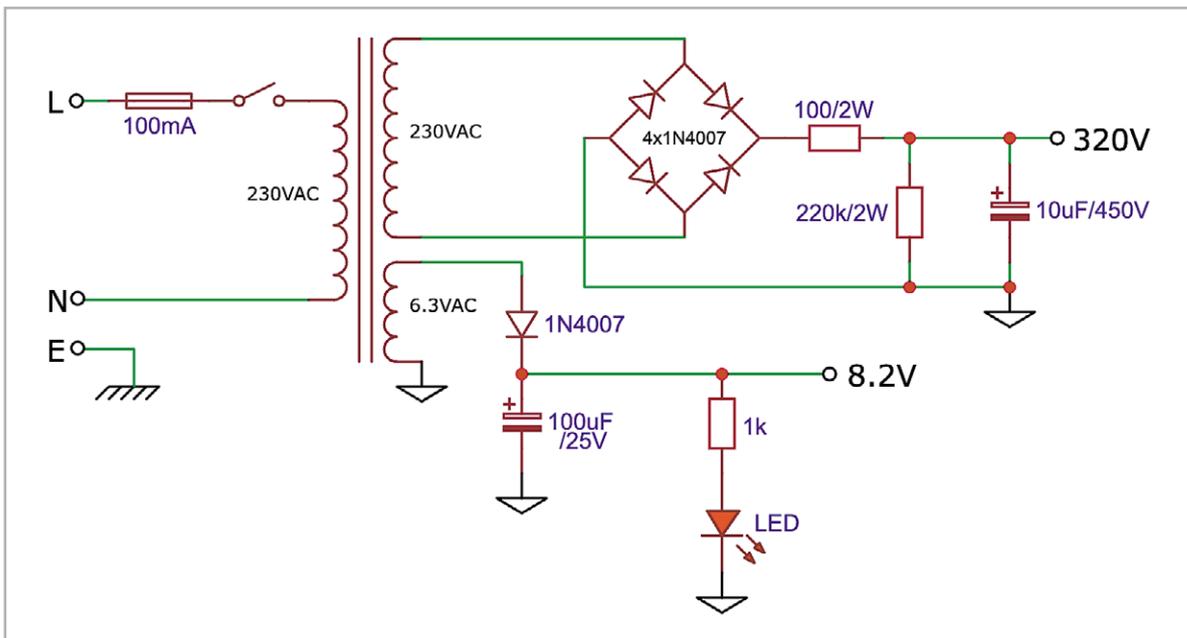


Bild 7: Schaltbild der Hauptspannungsversorgung

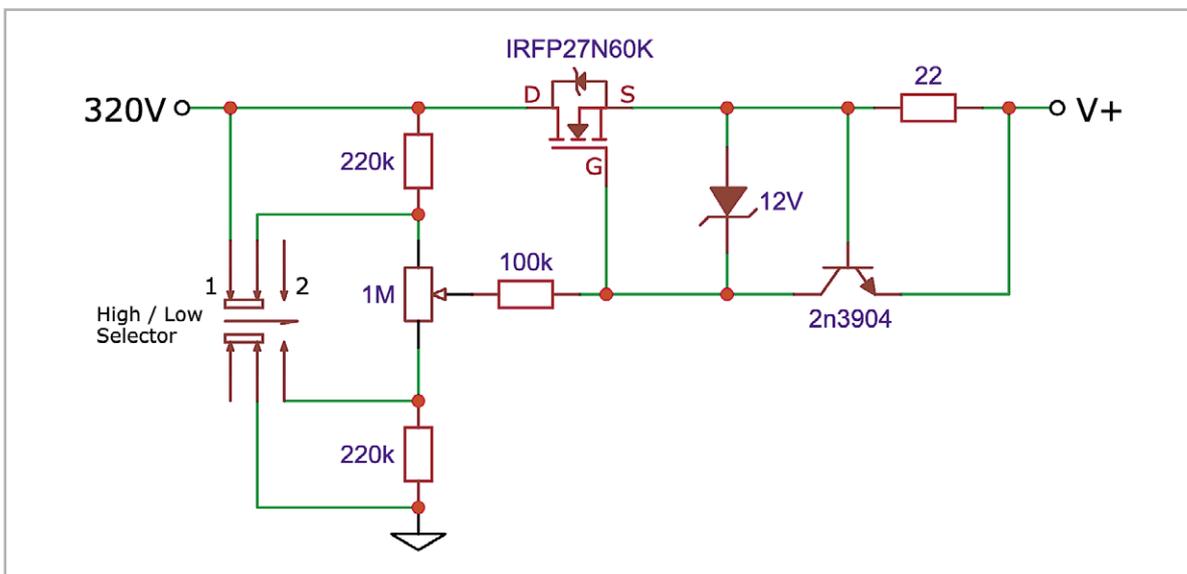


Bild 8: Strombegrenzte variable Spannung mit MOSFET-Source-Folger

Variable Versorgung

Die gleichgerichtete, stabile Spannung von ungefähr 320 V muss nun einstellbar gemacht werden. Idealerweise sollte sie von 0 V bis zur maximalen Spannung kontrolliert veränderbar sein. Dafür gibt es zwei grundlegende Gründe:

1. Die Nennspannungen der Kondensatoren variieren, daher ist es unpraktisch und auch gefährlich, an alle die gleiche Festspannung anzulegen.
2. Wenn Kondensatoren längere Zeit inaktiv waren, zeigt die Praxiserfahrung, dass es gut ist, sie einer inkrementellen Spannung auszusetzen, die niedrig beginnt und langsam auf den Betriebs- oder Nennwert ansteigt. Dies gilt insbesondere für Elektrolytkondensatoren, da sie sich bei angelegter Spannung tatsächlich „reformieren“ können, ein Vorgang, der die dielektrischen Eigenschaften ändert und die Leistung verbessert oder wiederherstellt, was jedoch einige Zeit dauern kann.

Eine der einfachsten Möglichkeiten, dies zu erreichen, ist die Verwendung einer MOSFET-Source-Folger-Schaltung, wie in **Bild 8** dargestellt. Diese Schaltung ist bei Gitarrenverstärkerbauern sehr beliebt, um eine „Leistungsskalierung“ zu erreichen. Die Schaltung funktioniert, indem sie die Eigenschaft des „variablen Widerstands“, des MOSFET, ausnutzt, wenn er in seinem linearen Bereich betrieben wird. Der Drain-Source-Pfad wird effektiv entsprechend der Gate-Source-Spannung (V_{GS}) geöffnet und geschlossen. Wenn V_{GS} 0 ist, ist der Pfad geschlossen und es fließt kein Strom – wie bei einem unendlich großen Widerstand.

Überschreitet V_{GS} einen bestimmten Pegel (die sogenannte Schwellenspannung), öffnet er sich vollständig und stellt nahezu einen Null-Widerstand für den Drain-Source-Pfad dar. Die am Source-Anschluss auftretende Spannung folgt (mit einer kleinen Differenz) der am Gate vorhandenen Spannung, daher auch der Name „Source-Folger“ (source follower).

Die Spannung von ca. 320 V, die im vorhergehenden Abschnitt erzeugt wurde, liegt am Drain-Anschluss des MOSFET an. Sie tritt auch an den drei Widerständen zur Masse auf, von denen einer ein Potentiometer ist. Diese Widerstandskette fungiert als Spannungsteiler, wodurch ein Teil der 320 V (über einen Gate-Vorwiderstand) an das Gate des MOSFET geleitet werden kann, was wiederum dafür sorgt, dass sie am Source-Anschluss wegen der Source-Folger-Funktion des MOSFET am Ausgang erscheint. Ein zweipoliger Umschalter schließt einen von zwei Widerständen kurz und nimmt ihn aus dem Stromkreis. Dadurch ergeben sich zwei Möglichkeiten:

- Position 1: Der obere Widerstand ist kurzgeschlossen und das Potentiometer ist direkt mit 320 V verbunden. Der untere Widerstand ist dabei mit Masse verbunden.
- Position 2: Der untere Widerstand ist kurzgeschlossen, das Potentiometer ist mit Masse und über den oberen Widerstand mit 320 V verbunden.

Die Funktion der zwei Widerstände

Sehen wir uns an, welche Spannungen am Schleifkontakt des Potentiometers in den beiden Positionen möglich sind:

Position 1:

Am oberen Ende des Potentiometers (1 M Ω) liegen 320 V, wobei der untere Widerstand (220 k Ω) mit Masse verbunden ist. Dieser einfache Spannungsteiler sorgt dafür, dass am Verbindungspunkt der beiden eine Spannung von

$$V = 320 \text{ V} \times 220 / (1000 + 220) \\ = 57,7 \text{ V}$$

anliegt. Das bedeutet, dass die Spannung am Schleifer zwischen 57,7 V und 320 V variieren kann, wenn er im Uhrzeigersinn gedreht wird.

Position 2:

Das Potentiometer ist jetzt mit einem Ende an Masse und mit dem anderen Ende über einen 220-k Ω -Widerstand mit 320 V verbunden, sodass an der Verbindung eine Spannung von

$$V = 320 \text{ V} \times 1000 / (1000 + 220) \\ = 262,3 \text{ V}$$

anliegt. Das bedeutet, dass die Spannung am Schleifer zwischen 0 V und 262,3 V variieren kann, wenn er im Uhrzeigersinn gedreht wird.

Es wurden damit effektiv zwei Spannungsbereiche (niedrig und hoch) geschaffen, um das Gate des MOSFET zu versorgen. Nun könnte man argumentieren, dass dies überflüssig sei, da das Potentiometer ohne diese Widerstände den ganzen Bereich von 0 V bis 320 V abdecken würde. Es soll jedoch vermieden werden, dass die vollen 320 V über dem Potentiometer angelegt werden, da viele dieser Potentiometer nicht für Spannungen über 250 V ausgelegt sind. Dies erfordert den Einsatz eines Potentiometers von optimaler Qualität. Zudem sollte keine Miniaturausführung eingesetzt werden, da es eine angelegte Spannung von 262,3 V aushalten muss. Ziel sollte es sein, eine übermäßig starke elektrische Belastung zu vermeiden. Die Leistung stellt kein Problem dar, da der Strom sehr gering ist (etwa 0,26 mA).

Die Zenerdiode verhindert, dass die Gate-Source-Spannung des MOSFET jemals ihren Nennwert überschreitet, wodurch das Gerät beschädigt werden könnte. Dies wäre der Fall, wenn das Potentiometer schnell reduziert wird, während die Ausgangsspannung aufgrund großer (Test-)Kondensatoren in der Last kurzzeitig höher als die Gate-Spannung gehalten wird.

Der 22- Ω -Widerstand und der Transistor in der Schaltung dienen als Strombegrenzer. Wenn die Spannung über dem 22- Ω -Widerstand aufgrund des zunehmenden Stromflusses durch ihn steigt, wird der Transistor irgendwann leitend, da diese auch die Basis-Emitter-Spannung des Transistors ist. Sein Kollektor-Emitter-Pfad beginnt sich zu öffnen und zwingt die Gate-Spannung des MOSFET zum Abfallen. Hierdurch wird der MOSFET abgeschaltet und ein maximaler Stromfluss durch ihn aufrechterhalten. So wie es in diesem Beispiel aussieht, ist der maximale Strom mit etwa 27 mA tatsächlich etwas hoch, kann aber durch Erhöhen des Widerstandswerts reduziert werden. Ein 47- Ω -Widerstand würde den Strom beispielsweise auf etwa 10 mA begrenzen.

Bei der Auswahl eines geeigneten MOSFET ist etwas Sorgfalt geboten. Es muss eine N-Kanal-Ausführung sein, die mindestens die maximale Ausgangsspannung unserer Versorgung plus einen gewissen Spielraum verarbeiten kann.

Dies ist notwendig, weil die gesamten 320 V über der Drain-Source-Strecke anliegen, wenn wir das Potentiometer so einstellen, dass am Ausgang 0 V vorhanden sind. Auch wenn der Stromfluss zwar gering ist, kann ein Kühlkörper immer noch notwendig werden. Alle Widerstände in der Schaltung haben eine Nennleistung von 2 W, hauptsächlich aus Sicherheitsgründen und zur persönlichen Beruhigung.



Bild 9: Das 100- μ A-Analogmessgerät mit 0,216-V-Abfall bei Vollausschlag

Das Ergebnis ist eine Spannungsversorgung, die wir durch Einstellung des Potentiometers zwischen 0 V und 262,3 V in der Schalterstellung „Low“ und zwischen 57,7 V und 320 V in der „High“-Position variieren können. Der Ausgangsstrom ist für den Fall eines Kurzschlusses oder übermäßiger Belastung durch den Strombegrenzer auf 27 mA limitiert.

Die Messschaltung

Der Schlüssel zum Erhalt aussagekräftiger Leckstromwerte ist ein sorgfältig entworfenes Shunt-

Netzwerk mit einem empfindlichen Mikroamperemeter. Um dies zu erreichen, muss berücksichtigt werden, welche Stromstärke voraussichtlich gemessen wird.

Hier sind einige Beispiele:

1. Kurzgeschlossener Testkondensator:
Es wird der maximale Strom fließen, den die Versorgung liefern kann, in diesem Fall 27 mA.
2. Großer Elektrolytkondensator:
Bis zu 10 mA oder mehr aufgrund von Stromspitzen beim Laden
3. Undichte Elektrolytkondensatoren: 1–10 mA
4. Papier- oder Folienkondensatoren mit mäßig hohem Leckstrom: unter 1 mA
5. Papier- oder Folienkondensatoren mit mäßig niedrigem Leckstrom: unter 100 μ A

Da die Verwendung von Verstärkern in der Strommessschaltung unerwünscht ist, wird der niedrigste Strom, den dieses System messen kann, durch die Empfindlichkeit des Messinstruments begrenzt. Das empfindlichste, seinerzeit verfügbare Messgerät, war ein analoges 100- μ A-Zeigerinstrument (Bild 9). Durch Messungen wurde festgestellt, dass der Spannungsfall bei Vollausschlag 0,216 V beträgt, was für die folgende Berechnung des Shunt-Widerstands wichtig ist.

Diese Betrachtungen führten zur Definition der festgelegten Bereiche durch entsprechende Shunt-Widerstände, die zum genauen Ablesen des Stroms erforderlich sind, siehe Bild 10. Die angelegte Spannung wird, während sie mit dem Potentiometer eingestellt wird, von einem Voltmeter angezeigt. Das verwendete Voltmeter ist ein LED-Modul mit einer Nennspannung von 500 V_{DC}, das schnell und günstig auf dem Markt zu finden ist. Es handelt sich um ein Messgerät mit drei Anschlussdrähten, das von der 8,2-V_{DC}-Versorgung der Heizwicklung gespeist wird. Der Messeingang wird an den Ausgang der variablen

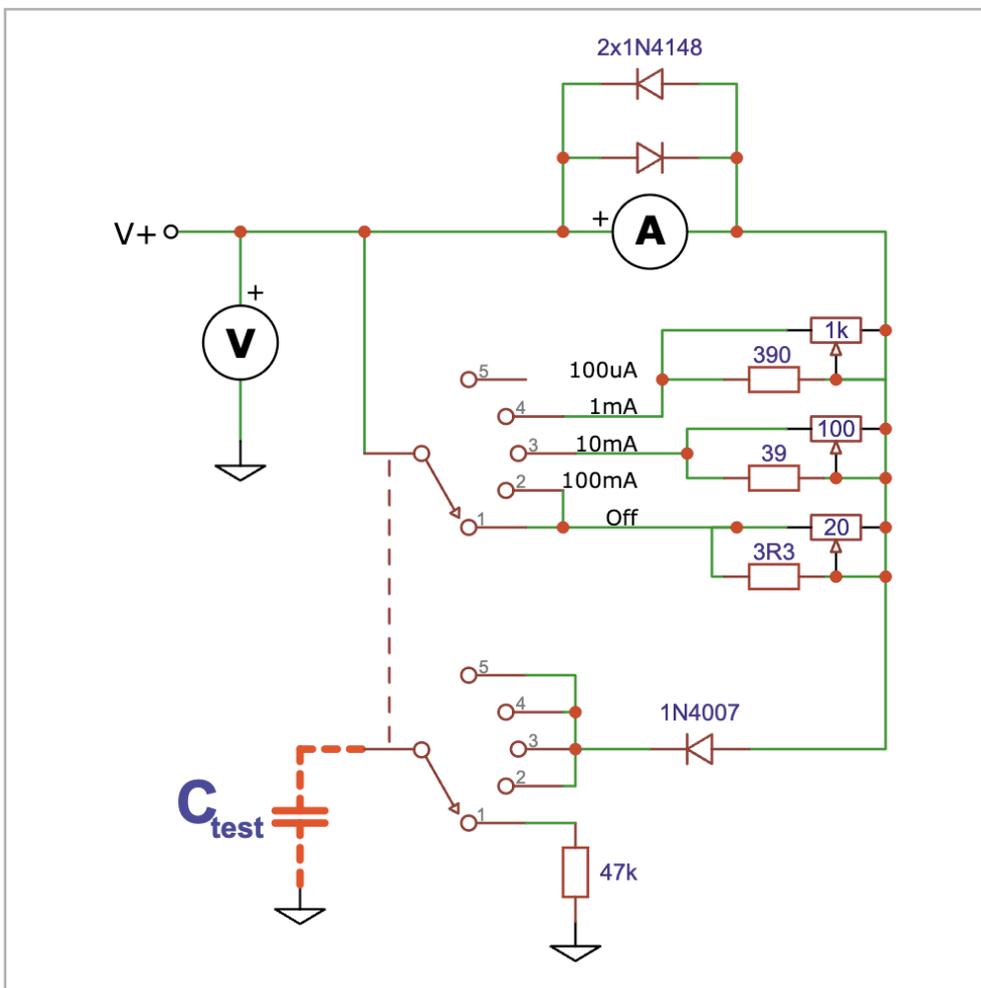


Bild 10: Die Mess- und Shunt-Schaltung

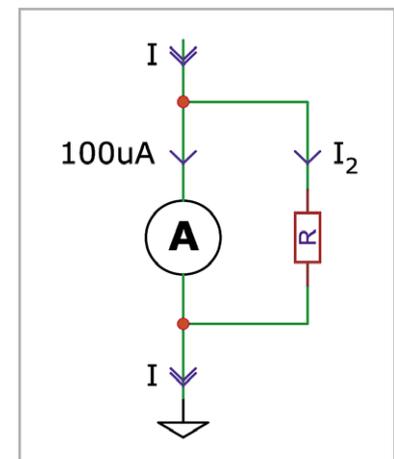


Bild 11: Shunt (Parallelwiderstand) für Amperemeter

Versorgung angeschlossen. Anfangs wurde ein analoges Voltmeter verwendet, das in den Abmessungen dem Amperemeter ähnelte. Später wurde aber doch die LED-Option gewählt, da diese besser in das Gehäuse passt.

Der Strom fließt durch das Amperemeter, geschützt durch zwei antiparallele Dioden und einen der parallelen Shunt-Widerstände, bevor er den zu testenden Kondensator erreicht.

Ein 2-poliger Drehschalter mit fünf Positionen wird verwendet, um durch die Bereiche zu schalten - beginnend mit „Aus“ in Position 1, 100 mA in Position 2, 10 mA in Position 3, 1 mA in Position 4 und schließlich 100 uA in Position 5. Der Schalter verbindet den jeweiligen erforderlichen Shunt-Widerstand parallel zum Messgerät.

Um eine höhere Genauigkeit und zudem Kalibrierung zu ermöglichen, besteht jeder Shunt-Widerstand aus einem Festwiderstand mit einem parallel geschalteten 10-Gang-Trimpmpotentiometer, sodass für jeden Bereich eine sehr genaue Feineinstellung erzielt werden kann. Der Shunt-Widerstandswert wird berechnet, indem darauf geachtet wird, dass das 100-uA-Messgerät bei Vollausschlag einen Spannungsabfall von 0,216 V anzeigt. Dadurch werden uns die notwendigen Daten bereitgestellt, um den Wert des Shunt-Widerstands R für die unterschiedlichen Bereiche zu berechnen.

Die Berechnung ist dabei sehr einfach. Der maximale Strom durch das Messgerät bei vollem Zeigerausschlag beträgt 100 µA, sodass jeder zusätzliche Strom durch den parallelen Shunt-Widerstand fließen muss, siehe Bild 11. Der hineinfließende Strom (I) ist der gleiche wie der aus der Parallelschaltung herausfließende Strom, sodass in jedem gewählten Bereich jeder über 100 uA hinausgehende Strom durch R fließen muss. Der Spannungsabfall über dieser Kombination beträgt bekannterweise 0,216 V. Hiermit erhalten wir mithilfe des ohmschen Gesetzes die erforderlichen Werte:

Bereich	Instrumentenstrom	I ₂	R
100 µA	100 µA	0	-
1 mA	100 µA	0,9 mA	240 Ω
10 mA	100 µA	9,9 mA	21,8 Ω
100 mA	100 µA	99,9 mA	2,16 Ω

Weil die berechneten Widerstandswerte keine Standardwerte sind, wird der nächsthöhere Standardwert verwendet und ihm, wie bereits aufgeführt, ein 10-Gang-Trimpmpotentiometer zum präzisen Bereichsabgleich parallel geschaltet.

Zusätzlich sollte beachtet werden, dass ein unterbrechungsfreier Schalter (make before break) verwendet wird, um eventuelle Stromspitzen zu vermeiden. Diese könnten das Messinstrument beschädigen.

Weiter mit dem Schaltplan: Sofern sich der beschriebene Schalter in den Positionen 2 bis 5 befindet, wird die Spannung über die Schaltkontakte des Schalters an den zu testenden Kondensator angelegt. In Position 1 wird der Kondensator über einen 47-k-Widerstand mit Masse kurzgeschlossen, um ihn nach einem Testzyklus entladen zu können. Die Diode verhindert dabei, dass Strom zurück in den Schaltkreis fließt, wenn aus irgendeinem Grund die Spannung am Kondensator höher, als die von der Versorgung ausgegebene Spannung ist.

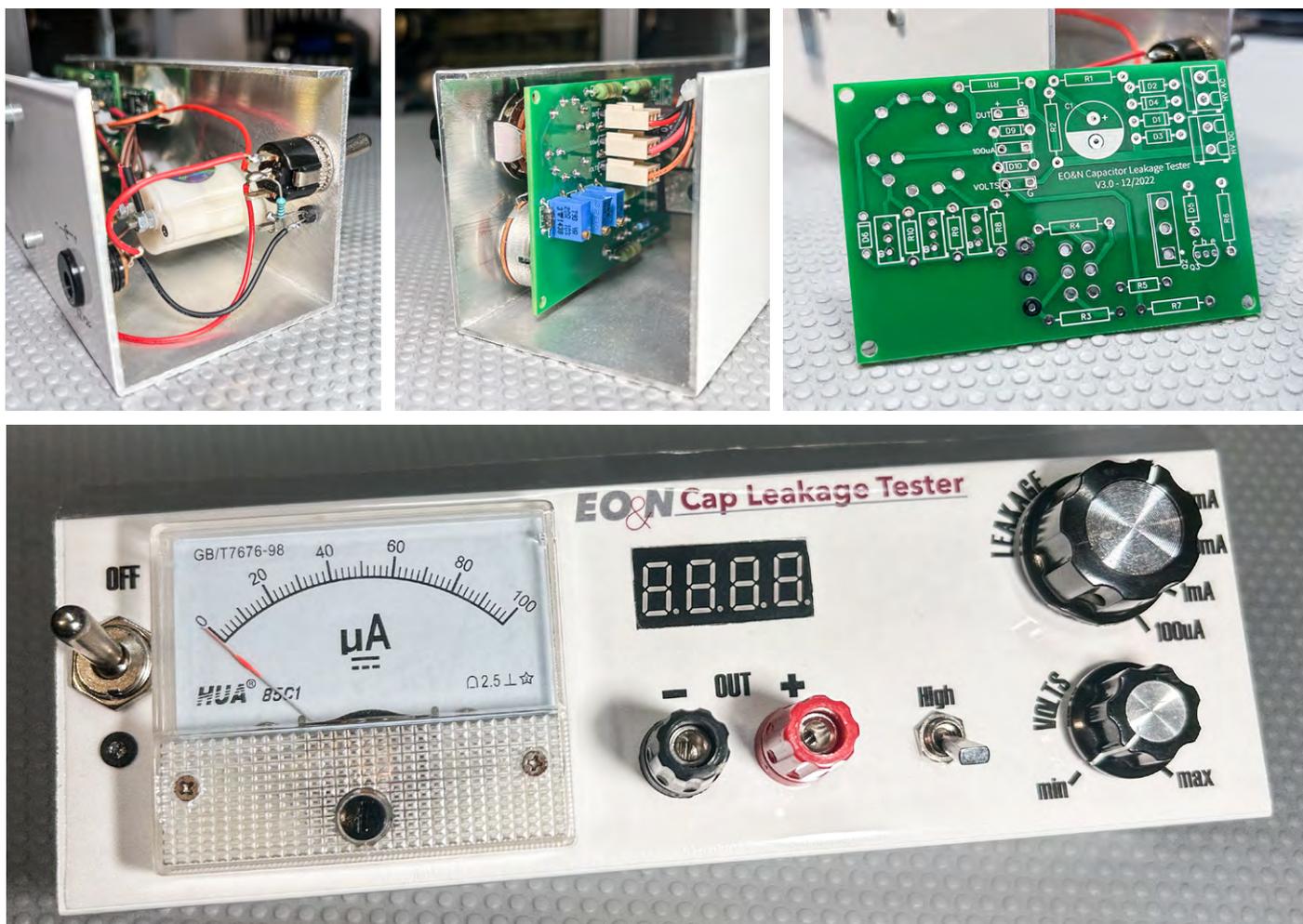


Bild 12: Die aktuelle Version des Kondensator-Leckstromtesters verwendet eine Leiterplatte.



Bild 13: Die sorgfältige Verwendung des Bereichsschalters und der Spannungseinstellung ist für den sicheren Betrieb des Testers von entscheidender Bedeutung.

Aufbau des Testers

Der hier beschriebene Tester hat einige Entwicklungsstufen bis zur finalen Version durchlaufen. Ich habe ihn zunächst mit Punkt-zu-Punkt-Verdrahtung, dann auf einer Prototypen-Platine aufgebaut und abschließend eine Leiterplatte dafür entworfen (Bild 12). Die genauen Ausführungen sind nicht allzu wichtig, aber einige Erfahrungswerte sind erwähnenswert:

- Es wird ein Metallgehäuse verwendet, das aus Sicherheitsgründen mit dem Schutzleiter des Netzanschlusses verbunden ist.
- Die eigentliche Masse des Schaltkreises ist nicht mit dem Gehäuse verbunden, um sicherzustellen, dass das gesamte System potentialfrei ist. Dadurch ist es möglich, Kondensatoren im Schaltkreis zu testen, indem einfach eine Leitung abgeklemmt wird, während der andere Anschluss an Ort und Stelle bleibt.
- Die gesamte Verdrahtung muss sorgfältig geprüft werden, insbesondere um Fehler zu vermeiden, die den Tester zerstören und während des Gebrauchs ein Sicherheitsrisiko darstellen könnten.
- Aufgrund der äußerst hohen Spannungen sind Potentiometer und Drehschalter von professioneller Qualität zu verwenden.
- Das LED-Voltmeter wurde anstelle des ursprünglichen analogen Messinstruments installiert, da es besser in das endgültige Gehäuse passte. Zusätzlich konnte damit der Sicherheitsaspekt erhöht werden, da die anliegende Spannung bei der Benutzung des Testers nochmals optisch hervorgehoben wird. Das Messgerät ist ein Modul mit drei Anschlussdrähten, welches von der Niederspannungsgleichstromversorgung versorgt wird. Der Messeingang ist mit der tatsächlichen Ausgangsspannung verbunden. Der Messbereich von 0–500 V_{DC} ist für den Anwendungsfall ideal geeignet.
- Die Überwachung der Spannung kann nicht am Kondensator selbst erfolgen, sondern muss vor dem Amperemeter erfolgen. Dies liegt daran, dass die Stromaufnahme des Amperemeters, so gering sie auch sein mag, die Messwerte verfälscht.
- Obwohl das 100- μ A-Analogmessgerät recht empfindlich ist, könnte der Einwand kommen, dass für zuverlässige Testergebnisse eine höhere Empfindlichkeit erforderlich ist. Ich würde dem zustimmen, aber ein Messgerät mit höherer Empfindlichkeit wird unverhältnismäßig teuer. Ich tausche den Kondensator daher einfach aus, wenn im niedrigsten Messbereich irgendein Leckstrom angezeigt wird.

Testablauf

Um einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten, muss beim Testen eines Kondensators ein bestimmtes Vorgehen eingehalten werden:

1. Schließen Sie den Kondensator bei ausgeschaltetem Tester an die Testbuchsen an und beachten Sie bei polarisierten Kondensatoren die Polarität (Bild 13).

2. Schalten Sie den High-Low-Wahlschalter auf „Low“.
3. Drehen Sie das Spannungspegelpotentiometer vollständig gegen den Uhrzeigersinn auf die Nullposition.
4. Drehen Sie den Bereichsdrehschalter auf die Position „Aus“.
5. Schalten Sie den Tester ein. Die Anzeige leuchtet auf und das Voltmeter wird 000,0 V anzeigen.
6. Drehen Sie den Drehbereichsschalter auf die Position 100 mA.
7. Beginnen Sie, die Spannung langsam zu erhöhen und behalten Sie dabei das Mikroamperemeter im Auge. Wenn es einen hohen Strom anzeigt (könnte so hoch sein wie die im Versorgungsstromkreis festgelegte Grenze), schalten Sie den Bereichsschalter auf die Position „Aus“. Dies würde auf einen kurzgeschlossenen Kondensator hinweisen.
8. Wenn der Strom niedrig ist, erhöhen Sie die Spannung langsam auf einen Wert unterhalb der Nennspannung des Kondensators.
9. Beobachten Sie den Strommesswert, während Sie sich noch im 100-mA-Bereich befinden. Wenn er unter 10 mA liegt, drehen Sie den Schalter in den 10-mA-Bereich.
10. Beobachten Sie den Strommesswert. Wenn er unter 1 mA liegt, drehen Sie den Schalter in den 1-mA-Bereich.
11. Beobachten Sie den Strommesswert. Wenn der Wert unter 100 μ A liegt, drehen Sie den Schalter auf den 100- μ A-Bereich.
12. Mit Erreichen des empfindlichsten Bereichs sollten Sie eine Vorstellung des Zustands des Kondensators haben. Bei Elektrolytkondensatoren kann der Strom langsam abfallen, während sich der Kondensator neu formiert.
13. Um den Testzyklus zu beenden, drehen Sie den Bereichsschalter auf die Position „Aus“. In dieser Position entlädt sich der Kondensator über den 47-k Ω -Widerstand und ist nach einigen Sekunden sicher in der Handhabung.
14. Jetzt senken Sie die Spannung wieder auf 0 V.
15. Das Gerät ist bereit für den nächsten Test.

Fazit

Dieser Leckstromtester für Kondensatoren ist zu einem unverzichtbaren Werkzeug bei meinen Restaurierungsprojekten geworden und liefert durchweg wertvolle Einblicke in den Zustand von Kondensatoren unter echten Betriebsbedingungen – ein kritischer Faktor, der bei herkömmlichen Testmethoden mit niedrigeren Spannungen oft übersehen wird.

In einem Video auf meinem [YouTube-Kanal](#) finden Sie weitere Informationen zu diesem Projekt.

Ich freue mich bereits zu sehen, wie andere Hobbyisten und Techniker dieses Projekt einsetzen und von den Ergebnissen in ihren Projekten profitieren. Die Verwendung außerhalb meiner Werkstatt unterstreicht den praktischen Nutzen und Wert in der breiteren Gemeinschaft der Elektronikbegeisterten.