

# Spannende Expo

**Elektrische Funken sind für viele beunruhigend bis beängstigend, für andere aber faszinierend und attraktiv. Wer sich vor einigen Kilovolt nicht fürchtet und mit Sachverstand ans Werk geht, der kann mit der hier vorgestellten Schaltung interessante Versuche machen. Wachsamkeit und Vorsicht sind aber unabdingbar, denn die verwendeten Spannungen und Ströme sind gefährlich.**

Von Ton Giesberts

Wer im Internet nach Beiträgen sucht, die mit Hochspannung zu tun haben, trifft bald auf Begriffe wie Tesla-Transformator oder Jakobsleiter. Der nach Nikola Tesla benannte Trafo ist in der Originalausführung ein luftgekoppelter Transformator, dessen zwei Spulen Schwingkreise in Resonanz bilden. Erzeugt man auf der Primärseite mittels einer Funkenstrecke eine Hochfrequenzschwingung, können durch die Resonanzüberhöhung am Sekundärkreis sehr hohe Spannungen von meh-

rerer Hundert Kilovolt bis zu mehreren Megavolt auf einfache Weise erzeugt werden. Bei derart hohen Spannungen wird es schnell sehr gefährlich, wenn Lichtbögen unkontrolliert auf die Umgebung überspringen. Viele werden bei Hochspannungsexperimenten das Bild von zwei Kugeln vor Augen haben, zwischen denen ein Funke überspringt. Bei einer solchen Anordnung handelt es sich oft um den von Dr. Robert J. Van de Graaff erfundenen und nach ihm benannten

Generator, der in der Lage ist, bis fünf Millionen Volt zu erzeugen.

Unsere Ambitionen gingen nicht so weit. Sicherer ist ein Apparat, bei dem definiert ein Funke zwischen zwei elektrischen Leitern bei kleinem Abstand erzeugt wird. Ein schönes Beispiel ist die Jakobsleiter. Ein elektrischer Lichtbogen zwischen zwei senkrecht angeordneten Leitern (zum Beispiel Drähten) erzeugt bei genügend Energie warme Luft und dadurch ausreichend Konvektion, um zu bewir-



# Experimente Lichtbögen auf der Jakobsleiter

ken, dass der Lichtbogen nach oben wandert. Lässt man die beiden Leiter nach oben auseinander streben (längliche V-Form), wird die angelegte Spannung bei einem bestimmten Abstand nicht mehr ausreichen, um den Lichtbogen aufrecht zu erhalten. Nach dem Verlöschen des Lichtbogens wird er von unten erneut beginnen. Eigentlich benötigt man hierfür keine Elektronik. Es genügt eine Spannung von 10 bis 15 kV bei einem Strom von 20 bis 40 mA. Mit anderen Worten: Ein Netztrafo, der ausreichend Spannung und Leistung liefert. An den Transformator werden hohe Anforderungen gestellt, wie ausreichende Isolierung und zur Strombegrenzung eine hohe Streuinduktion. Der Lichtbogen bildet nämlich einen starken Kurzschluss. Eine Schaltung, die nur aus einem Trafo besteht, ist natürlich für eine Elektronik-Zeitschrift nicht besonders interessant. Aber es gibt ja

noch andere Möglichkeiten, eine passende Hochspannung zu erzeugen. Wir haben uns dabei bewusst für Gleichspannung entschieden, weil ein Lichtbogen mit Gleichspannung eine schöne blaue Farbe aufweist (bei

**Arbeiten mit Hochspannung kann tödlich sein. Die hier vorgestellten experimentellen Schaltungen sind nur für Fachleute mit elektrotechnischer Ausbildung und Erfahrung in der Hochspannungstechnik geeignet.**

Wechselspannung ist der Lichtbogen weiß). Im Nachhinein war dies kein guter Entschluss, darüber aber später mehr.

## Die Schaltung

Zur Erzeugung der Hochspannung verwenden wir zwar auch einen Trafo, aber einen, der elektronisch angesteuert wird. Steigern wir die Frequenz weit über die Netzfrequenz hinaus, können auch bei höherer Leistung die Abmessungen bescheiden bleiben. Probleme beim Bau eines Trafos für hohe Spannungen sind die Isolation und die Durchschlagspannung der verwendeten Materialien. Auch muss beachtet werden, dass alles relativ ein-

fach nachzubauen ist.

Als Ausgangsspannung haben wir „nur“ 1000 V gewählt. Auch haben wir uns dafür entschieden, den Hochspannungswandler über einen Netztrafo mit 80 V als Betriebsspannung zu versorgen. Damit wird jedenfalls die Primärseite des Wandlers sicherer und das Windungsverhältnis des Trafos nicht zu groß. Das spart Windungen auf der Sekundärseite. Für die Primärwicklung benötigen wir 2 x 12 Windungen und für die Sekundärwicklung insgesamt 2 x 75 Windungen. Durch die Erdung der Mitte der Sekundärwicklung liegen

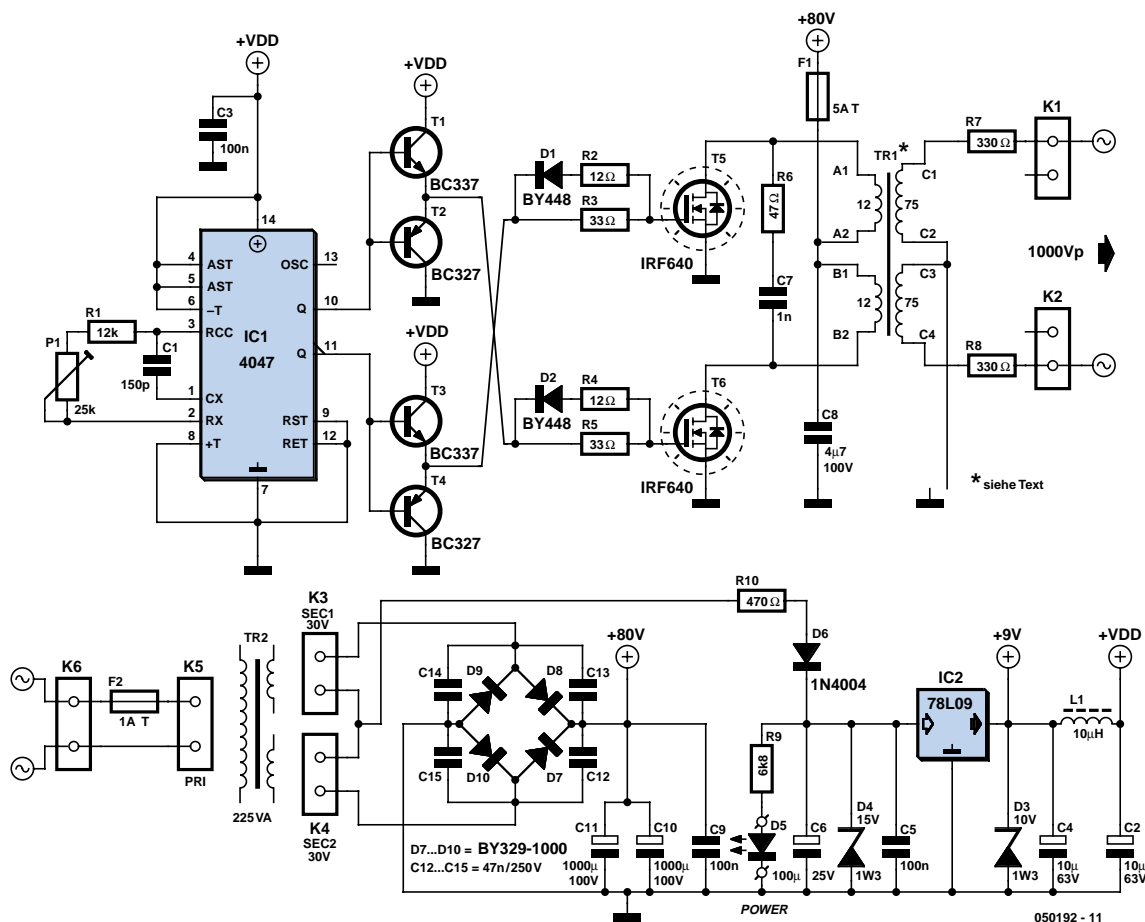
an den beiden Anschlüssen der Hochspannungsseite bezogen auf Masse „nur“ 500 V liegen. Die maximale Spannung zwischen der Primär- und der Sekundärwicklung wird damit einigermaßen in Grenzen gehalten. Natürlich steht es jedem frei, die Sekundärwicklung als eine einzige Wicklung auszuführen und erdfrei zu lassen. Dann ist es aber angebracht, die Isolierung zwischen den primären und den sekundären Wicklungen zu verdoppeln.

Damit die Elektronik einfach bleibt, wurde der Trafo für eine Gegentakt-Ansteuerung (Push-pull) mit zwei gleich großen primären Wicklungen ausgestattet. Wir kommen auf die exakte Konstruktion dieses Ringkerntrafos noch zurück. Dank der Push-pull-

## Kurze Anleitung für das Arbeiten mit Hochspannung

- Änderungen nur vornehmen, wenn die Spannung ausgeschaltet und abgebaut ist.
- Im Zweifel Kondensatoren entladen, das gilt besonders für die Kaskaden, aber auch für die Hauptstromversorgung.
- Stellen Sie sicher, dass alle Metallteile, die nicht mit der Schaltung verbunden sind, gut geerdet sind (Gehäuse usw.).
- Halten Sie immer ausreichend Abstand von den Elektroden, wenn die Schaltung eingeschaltet ist.
- Betrachten Sie alle Spannungen als lebensgefährlich.
- Ersetzen Sie die Sicherungen nie durch größere Typen als vorgeschrieben.
- Halten Sie kleine Kinder und Haustiere unbedingt fern. Sie sind neugierig, verbunden mit allen Risiken.
- Stellen Sie sicher, dass die Schaltung nicht einfach eingeschaltet werden kann (zum Beispiel Sicherung durch Schlüsselschalter).
- Nach eingehender Kontrolle alles nochmals überprüfen (double check).
- Keine Experimente in feuchter Umgebung.
- Muss etwas unter Spannung angepasst werden, immer mit nur einer Hand arbeiten.

Quelle: [www.pupman.com/safety.htm](http://www.pupman.com/safety.htm)

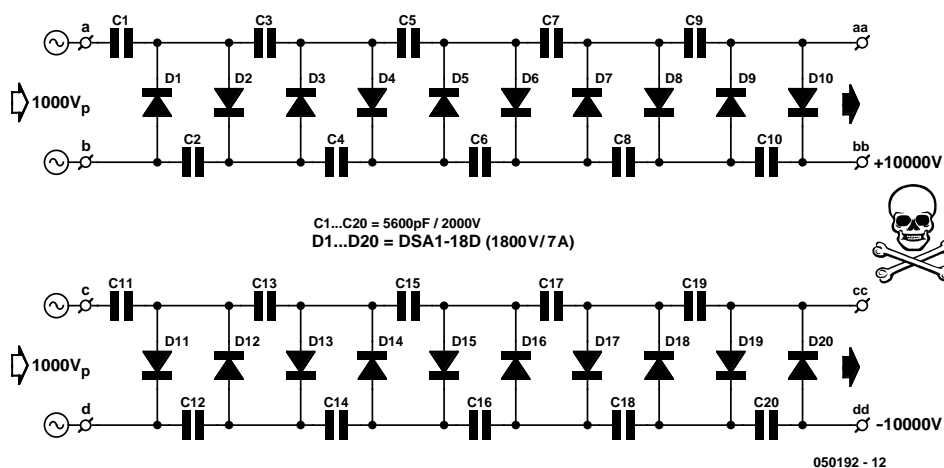


**Bild 1.** Bis auf die schnellen Dioden und den Trafo besteht die Schaltung aus Standard-Bauteilen.

Konfiguration kann der Kern seine maximale Leistung liefern. Faktisch ist die Mittelanzapfung der Primärwicklung mit dem Pluspol der Versorgung verbunden. Alternierend wird über jeweils einen Transistor einer der beiden anderen Anschlüsse mit Masse

verbunden. Damit beide Transistoren nie gleichzeitig leiten, ist die Einschaltdauer der beiden Transistoren etwas unterschiedlich dimensioniert. Dadurch gibt es eine Totzeit, in der keiner der beiden Transistoren leitet. Allerdings liegt an dem jeweils sper-

renden Transistor die doppelte Versorgungsspannung. Die Ursache ist die umgekehrte Polarität der beiden Primärwicklungen. In unserem Fall müssen die Transistoren also mehr als 160 V schalten können. Trotzdem kommt man mit den preiswerten Tran-



**Bild 2.** Das Schaltbild der Kaskade ist eigentlich auch Standard.

sistoren aus. Der verwendete IRF640 kann 200 V verarbeiten und 18 A bei einem Kanalwiderstand von 0,18  $\Omega$  schalten. Wer größere Reserven haben möchte, der kann den wesentlich robusteren (und teureren) IRFB260N ausprobieren. Dessen maximaler Dauerstrom beträgt immerhin 56 A (in einem TO220-Gehäuse!) und die maximale Junctiontemperatur 175 °C. Auch der Kanalwiderstand ist mit weniger als 0,04  $\Omega$  sehr viel niedriger. Nachteilig ist hingegen die um den Faktor 3,5 höhere Eingangskapazität und die damit verbundenen höheren Schaltverluste. Die Pufferstufe zum Ansteuern der MOSFETs in der Schaltung (**Bild 1**) ist dafür eigentlich nicht ausgelegt. Zur Ansteuerung wird mit dem 4047 ein fast schon antikes Logik-IC aus der 4000er-Reihe verwendet. Es handelt sich um einen monostabilen/astabilen Multivibrator. Es verfügt über einen separaten Ausgang des internen Multivibrators (OSC) und einen integrierten 2-Teiler mit zwei gegenphasigen Ausgängen. Das IC wird in unserer Schaltung als AMV verwendet. Die Frequenz an den Teiler-Ausgängen ist mittels P1 zwischen etwa 35 und 110 kHz einstellbar. Dies ermöglicht es, eventuell anderes Kernmaterial auszuwählen oder die Anzahl der Windungen zu ändern. Bei unserem Test konnte die Frequenz auf den niedrigsten Wert eingestellt werden (P1 ganz links herum drehen). Die gegenphasigen Ausgänge eignen sich sehr gut zur Gegentakt-Ansteuerung der MOSFETs. Leider ist der Strom, den ein 4000-Ausgang liefern kann, nicht sehr groß. Man benötigt daher besondere Pufferstufen, um MOSFETs mit großer Gate-Kapazität ansteuern zu können.

Die Pufferstufen bestehen aus zwei komplementären Emitterfolgern, gebildet aus T1 bis T4. Die Typen BC337/327 bilden die NPN/PNP-Paare. Diese können 1 A Spitzenstrom schalten und besitzen genügend Verstärkung. Durch die Parallelschaltung eines zusätzlichen Widerstands mit einer Diode an R3 und R5 werden die MOSFETs ungefähr drei mal schneller ausgeschaltet als eingeschaltet. Damit ist garantiert, dass die beiden MOSFETs niemals gleichzeitig leiten, was einem Kurzschluss entspräche. Das RC-Netzwerk R6/C7 dämpft Schwingungen, die durch das Schalten der MOSFETs entstehen können. C8 bildet eine zusätzliche Entkopplung für die Versorgungsspannung des Trafos und ist so nahe wie möglich bei den

betreffenden Anschlüssen angeordnet. R7 und R8 schützen den Trafo bei einem regelrechten Kurzschluss, haben aber auch noch eine andere Funktion. Ordnet man die Leiter nämlich näher beieinander an, als es für die maximal erreichte Spannung erforderlich ist, dann bildet der Eingang der Kaskade eine Art Hochspannungszenerdiode. Der Abstand zwischen den Leitern bestimmt, bis zu welcher Spannung die Kondensatoren aufgeladen werden. Ein darüber hinaus gehende Spannung wird in R7 und R8 „vernichtet“. Die Sicherung F1 schützt den Hochspannungstrafo vor länger dauernder Überlastung, während die Sicherung F2 des Netztrafos die Schaltung insgesamt schützt.

Die Versorgungsspannung für den Hochspannungstrafo wird von einem 2 x 30-V-Trafo geliefert. Ein Trafo mit einer Sekundärspannung von 60 V ist nämlich nicht so leicht erhältlich. Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass die Mitteleingangsspannung dazu benutzt werden kann, um auf effiziente Weise die Hilfsspannung für das IC 4047 zu erzeugen (geringerer Spannungsabfall). R10, D6 und D4 erzeugen aus der halben Trafospaltung eine 15-V-Gleichspannung, damit die Verlustleistung des 78L09-Reglers nicht zu groß wird. Die Ausgangsspannung des 78L09 wird durch L1, C2 und C3 nochmals gut entkoppelt beziehungsweise gepuffert, um die Spitzenströme zum Schalten der MOSFETs auszugleichen. D3 schützt den Ausgang des 78L09 vor eventuellen Spannungsspitzen, während D4 diese Funktion auch für die Eingangsspannung des Spannungsreglers übernimmt.

Die Hauptversorgung wird gebildet durch vier schnelle Gleichrichterioden, die 7 A bei einer Spannung von 1000 V vertragen können. Die hohe Sperrspannung ist genau genommen nicht erforderlich; sie wurde eher aus Sicherheitsgründen gewählt. Die Dioden sind nebeneinander am Rand der Platine angeordnet, so dass sie eventuell einfach durch ein Aluminiumblech gekühlt werden können (dann aber elektrisch isolieren!). C12 bis C15 filtern die Schaltspitzen der Dioden aus. Dafür haben wir handelsübliche MKT-Kondensatoren eingesetzt, weil sie eine höhere Nennspannung aufweisen als die üblichen keramischen Kondensatoren.

Für das Anschließen des Netztrafos sind drei Steckverbinder (K3 bis K5) auf der Platine vorhanden. Die vierte Platinen-Steckverbindung (K6) ist für das

Anschließen des Netztrafos an die Netzspannung (via Sicherung F2) gedacht.

Zurück zum Ausgang dieses Umsetzers. Eine Methode, um eine Wechselspannung unter Verwendung von Standard-Bauteilen in eine hohe Gleichspannung umzuwandeln, ist der Einsatz von so genannten Kaskaden. Eine Reihe von Dioden/Kondensator-Paaren erhöht mit jeder Sektion die Spannung um den Spitzenwert der angelegten Wechselspannung (siehe **Bild 2**). Ein Nachteil dieses Aufbaus ist, dass die kapazitive Belastung der Wechselspannungsquelle mit jeder Sektion größer wird, während die scheinbare Kapazität des Hochspannungsausgangs kleiner wird. Faktisch liegen alle Kondensatoren in Reihe, so dass die Ausgangskapazität der Kaskade bei zehn gleichen Sektionen nur 1/10 des einzelnen Kondensatorwerts beträgt. Mit anderen Worten: Die Ausgangsimpedanz nimmt erheblich zu. Eine Möglichkeit, dies zu kompensieren, besteht darin, die Frequenz der Wechselspannung zu erhöhen und gleichzeitig dafür zu sorgen, dass der Trafo eine möglichst kleine Ausgangsimpedanz aufweist, also eine „harte“ Wechselspannung liefert.

Eine ähnliche Philosophie wie bei der sekundären Wicklung haben wir auch bei der Kaskade angewendet. An Stelle einer einzigen Kaskade, die die Spannung liefert, gibt es deren zwei. Jede Kaskade liefert die Hälfte der gewünschten Hochspannung, aber mit entgegengesetzter Polarität. Zwischen den Ausgängen der beiden Kaskaden liegt dann die volle Spannung, während bezogen auf die Umgebung (beziehungsweise Masse) nur die halbe Spannung anliegt. Es handelt sich immer noch um eine gefährlich hohe Spannung, aber der halbe Wert ist doch etwas weniger gefährlich.

In der Praxis gab es mit diesem Konzept aber ein Problem. Trotz der hohen Schaltfrequenz schien die Ausgangsimpedanz höher zu sein als erwartet. Durch Schaltspitzen am Ausgang von TR1 wurden die Kondensatoren in der Kaskade auf eine zu hohe Spannung aufgeladen. Auch die Spannung an den Dioden schien auf einen gefährlich hohen Wert anzusteigen. Wenn der Funke zwischen den Leitern/Elektroden überschlägt, sinkt die Spannung über den Kondensatoren auf einen geringeren Wert. Dadurch wird der Lichtbogen kurzzeitig unterbrochen, die Spannung an den Kondensatoren nimmt wieder zu, und es entsteht im Endeffekt eine

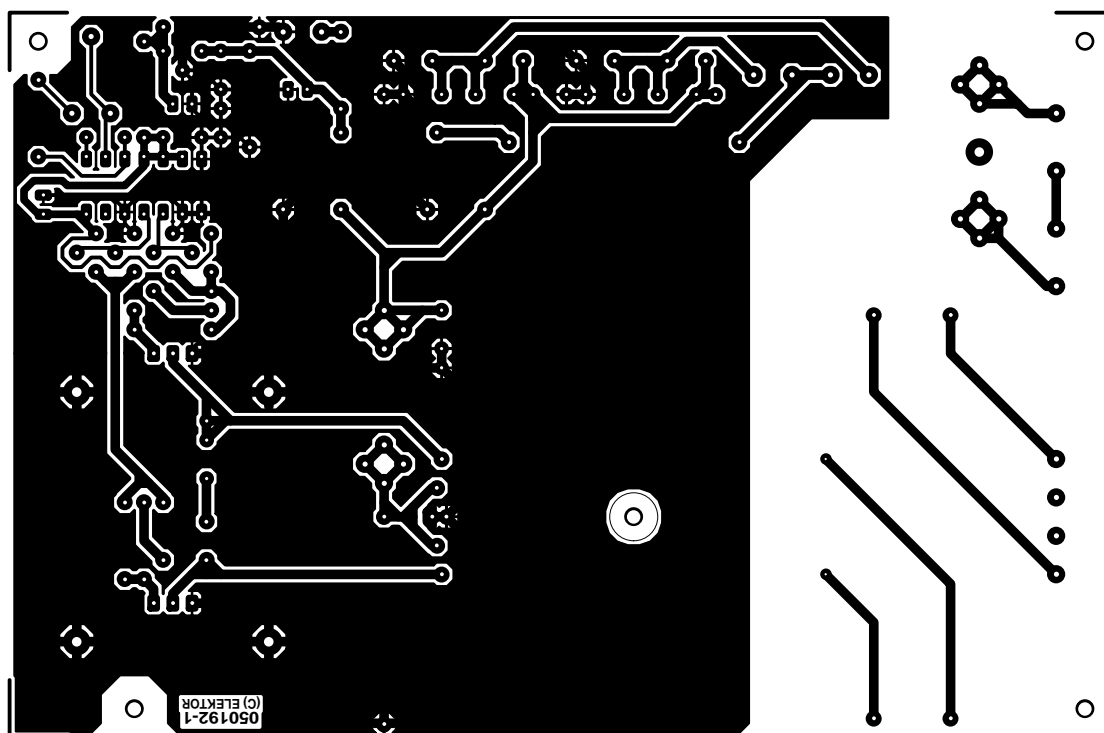
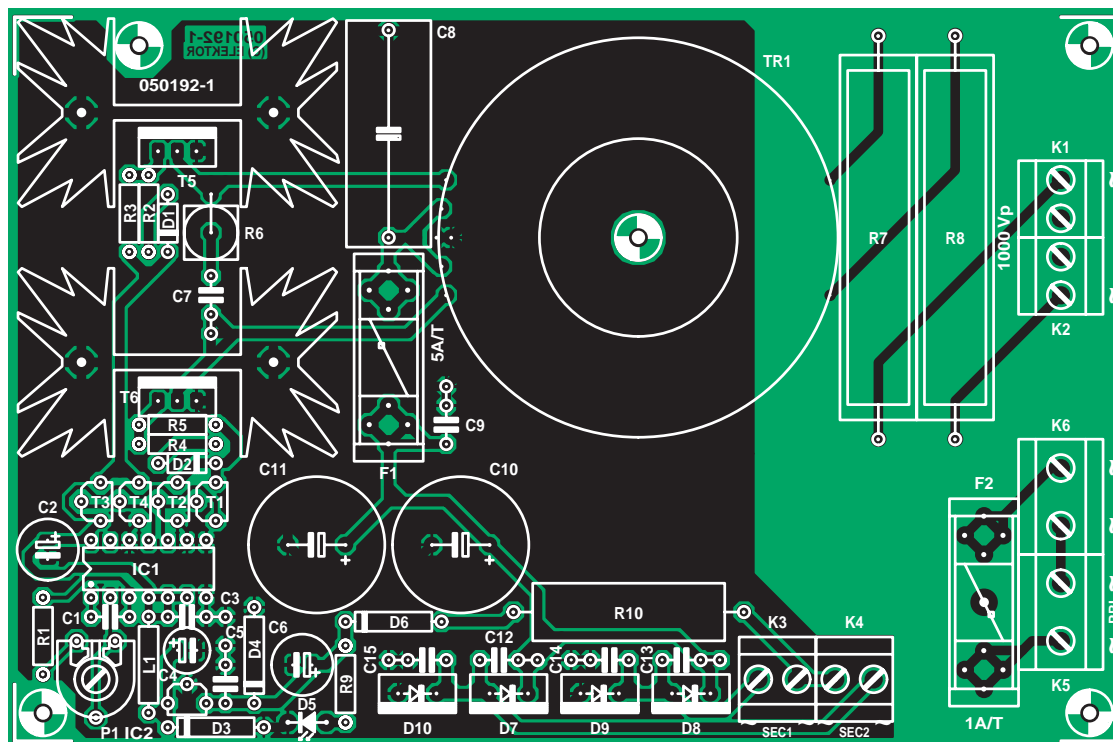


pulsierende Hochspannung.

Wie bereits bemerkt, begrenzen R7 und R8 den „Kurzschlussstrom“. Dabei kommen wir der Sache auf den Grund. Der Trafo, der fast ideal ist, scheint das Problem zu sein. Um den Lichtbogen brennen zu lassen, wird zu viel Wärme

in R7 und R8 umgesetzt, und es besteht sogar die Gefahr, dass der Transformator überlastet wird. Der Kern wird dann in die Sättigung gesteuert und bildet direkt einen Kurzschluss. Bis die Sicherung F1 schmilzt, haben T5 und T6 längst den Geist auf-

gegeben. Es ist also vernünftig, den Abstand zwischen den Elektroden derart zu wählen, dass nur ein leicht pulsierender Überschlag entsteht (denken Sie an die Faustregel 10 kV pro cm). Dieser Effekt ist durchaus spektakulär und liefert neben prächtigen blauen



**Bild 3.** Die Hauptplatine ist ziemlich kompakt geblieben. R7 und R8 müssen ausreichenden Abstand zur Platine haben.

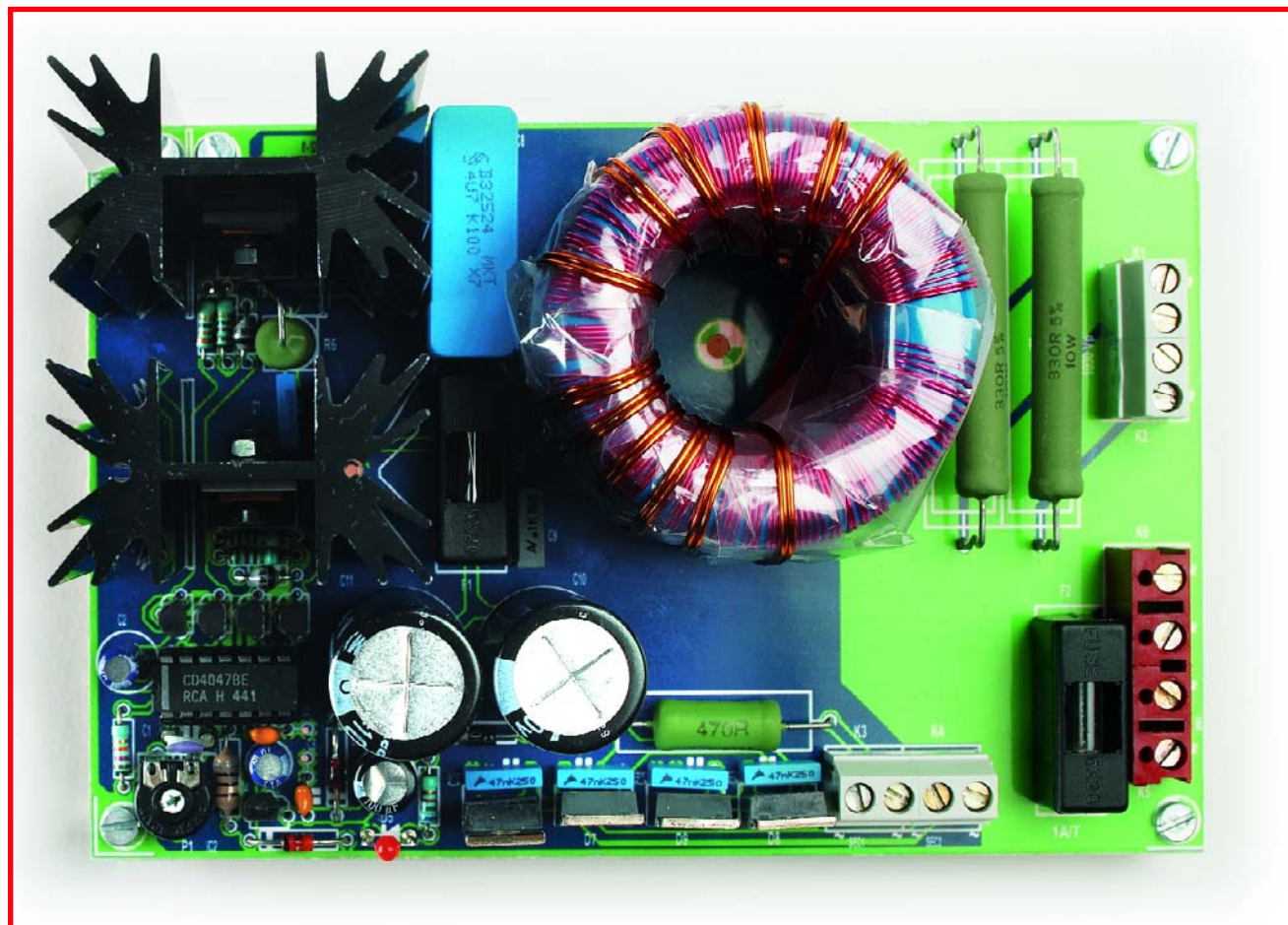
Funken auch ein bisschen Krach, aber leider auch das unvermeidliche Ozon. Den Experimentierraum muss man also gut lüften. Die Hauptschaltung sollte man in einem gut geerdeten Metallgehäuse mit aktiver Kühlung unterbringen, um die von R7 und R8,

TR1 und dem Kühlkörper von T5 und T6 produzierte Wärme abzuleiten.

### Aufbau

Die Bestückung der Hauptplatine wird keine Probleme bereiten (siehe Bild 3

und 4). Lediglich die Anschlüsse des selbstgebauten Trafos sind etwas schwierig anzuordnen. Um die Transistoren T5 und T6 thermisch zu entlasten, müssen die drei Anschlussstifte leicht geknickt werden. Danach werden die Transistoren isoliert auf den



**Bild 4.** Trotz der kompakten Abmessungen liefert der Musteraufbau immerhin etwa 200 W bei 1000 V.

## Stückliste

### Hauptschaltung

#### Widerstände:

R1 = 12 k  
R2, R4 = 12  $\Omega$   
R3, R5 = 33  $\Omega$   
R6 = 47  $\Omega$ /5 W  
R7, R8 = 330  $\Omega$ /10 W  
R9 = 6k8  
R10 = 470  $\Omega$ /5 W  
P1 = 25 k Poti

#### Kondensatoren:

C1 = 150 p  
C2, C4 = 10  $\mu$ /63 V stehend  
C3, C5 = 100 n keramisch.  
C6 = 100  $\mu$ /25 V stehend  
C7 = 1 n/400 V MKT

C8 = 4 $\mu$ 7/100 V MKT, Raster 27,5 mm  
C9 = 100 n/100 V MKT  
C10, C11 = 1000  $\mu$ /100 V stehend, Durchmesser 18 mm max.  
C12...C15 = 47 n/250 V MKT

#### Spulen:

L1 = 10  $\mu$ H

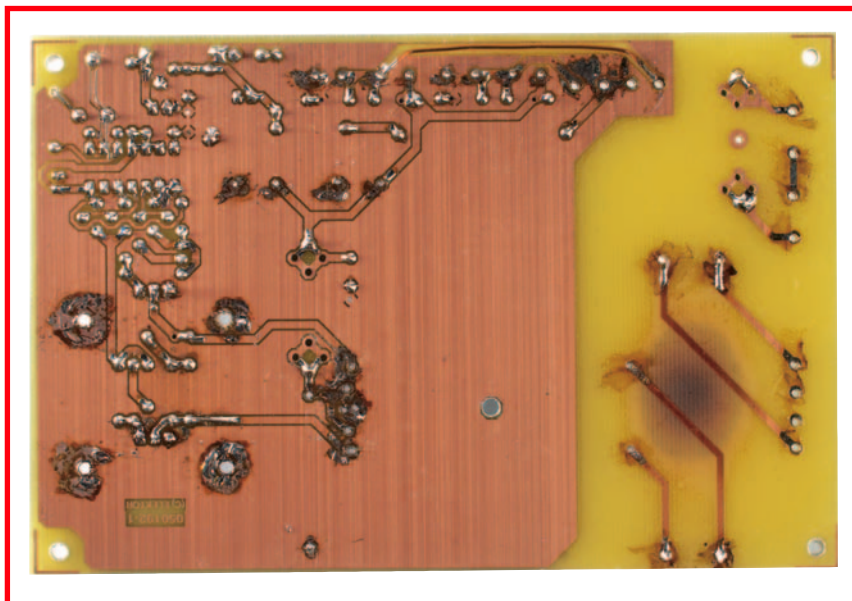
#### Halbleiter:

D1, D2 = BY448  
D3 = 10 V/1W3  
D4 = 15 V/1W3  
D5 = low-current LED  
D6 = 1N4004  
D7...D10 = BY329-1000  
T1, T3 = BC337  
T2, T4 = BC327  
T5, T6 = IRF640 (oder IRFB260N)  
IC1 = 4047  
IC2 = 78L09

#### Außerdem:

K1...K4 = 2-polige Platinen-Steckverbindung, Raster 5 mm  
K5, K6 = 2-polige Platinen-Steckverbindung, Raster 7,5 mm  
TR1 = 2 x Kern B64290-L82-X830 (N30, 50 x 20 mm)\*, z.B. Epcos (Schuricht Katalog Nr.: 330603), 2 x 12 Wdg. 0,8 mm CuL primär ( $\approx$  2 x 1,5 m), 2 x 75 Wdg. 0,5 mm CuL sekundär ( $\approx$  2 x 8 m)  
F1 = 5A/T + Platinen-Sicherungshalter  
F2 = 1A/T + Platinen-Sicherungshalter  
2 x Kühlblech SK129 63,5 STS Fischer (63,5 mm hoch, 4,5 K/W)  
Netztrafo sec. 2 x 30 V/225 VA, z.B. Amplimo 68017  
Platine 050192-1 lieferbar über ThePCBShop (siehe [www.elektor.de](http://www.elektor.de))

\* siehe Text



**Bild 5.** Lokale Überhitzung durch R7 und R8 bei unzureichendem Abstand von der Platinenoberfläche.

Kühlkörpern montiert. Die Kühlkörper werden darauf als erste verlötet und erst dann die Transistoren. Da R7 und R8 doch einige Wärme erzeugen, müssen sie mit etwas

Abstand von der Platine montiert werden. 1 cm ist ausreichend. Ist der Abstand kleiner, so ist eine lokale Überhitzung der Platine nicht auszuschließen (**Bild 5**). Für die Gleichrich-

terdioden kann man eventuell auch andere Typen einsetzen, wenn sie pin-kompatibel sind, ein TO220-Gehäuse haben und mindestens 200 V und 7 A verarbeiten können.

Der Aufbau der Kaskaden ist unauwendig (siehe **Bild 6** und **7**). Für die Dioden gibt es auf der Platine eine kombinierte Form, so dass hier auch andere Typen als die von uns verwendeten DSA 1-18D von IXYS (1800 V/7 A) eingesetzt werden können. Neben den häufigeren TO220-Typen lassen sich auch SMDs in SMB-Gehäusen einsetzen, beispielsweise STTH112. Diese Diode haben wir als erste in einer Kaskade mit kleineren Kapazitäten ausprobiert. Beim Experimentieren brannte sie aber häufig durch. Es gibt Dioden, die höhere Spannungen vertragen können (wie die SM6500-Serie von VMI), die aber nicht so gut erhältlich sind.

Während des Experimentierens wurde klar, dass die Impedanz der Kaskade mit zehn Kondensator/Dioden-Paaren zu hoch ohmig ist. Grund genug, um Kondensatoren mit 5600 pF statt der bis dahin verwendeten 1800 pF einzusetzen. Beide stammen aus einer

## Stückliste

### Kaskadenplatine

#### Kondensatoren:

C1...C20 = 5600 p/2000 V Panasonic (High Voltage Disk Capacitor (Y5P))

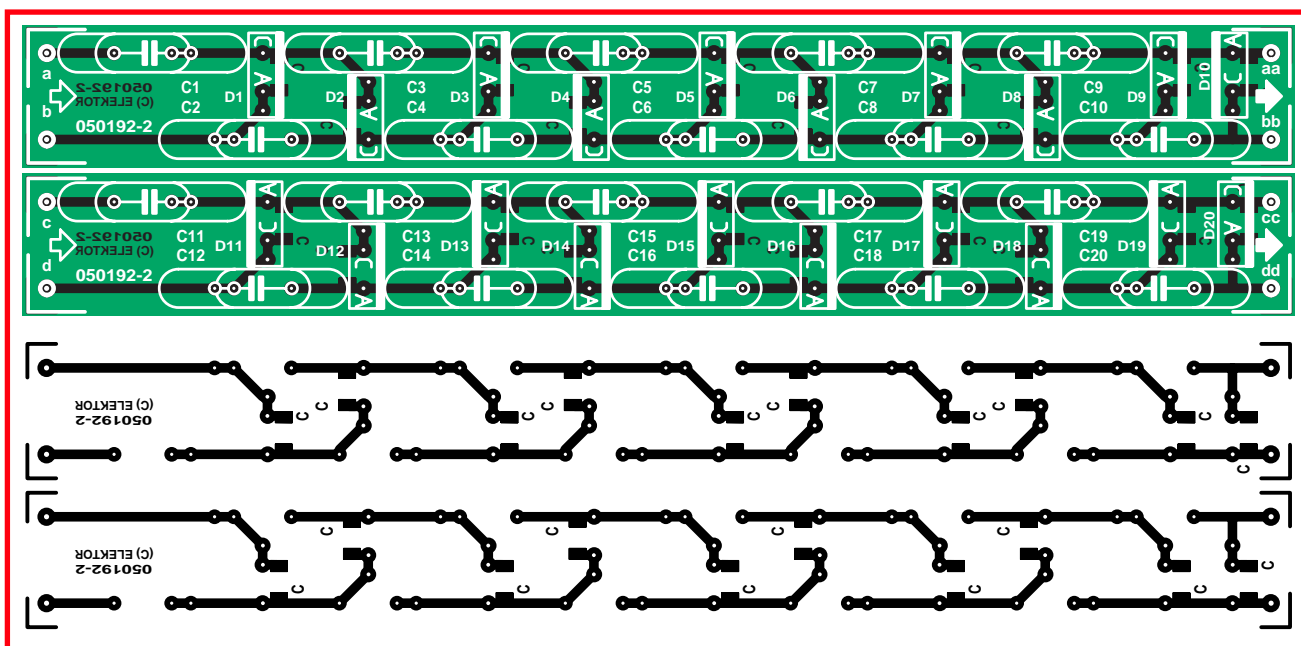
ECK3D562KBP), Digi-Key-Bestellnr. P9574-ND

#### Halbleiter:

D1...D20 = DSA 1-18D (1800 V/7 A) IXYS, Digi-Key Bestellnr. DSA1-18D-ND

#### Außerdem:

Platine 050192-2 lieferbar über ThePCBShop (siehe [www.elektor.de](http://www.elektor.de))



**Bild 6.** Die beiden Platinen der Kaskadestufen sind fast identisch. Der einzige Unterschied besteht in der Anordnung der Dioden.



# Alternative Möglichkeiten

Auf [www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/5322/hv2.html](http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/5322/hv2.html) ist eine Sammlung von Alternativen zu finden. Für die Jakobsleiter kann man auch Neontrafos, Mikrowellen-Netzteile und Zündspulen verwenden. Neben der Jakobsleiter wird auf dieser Webseite zum Beispiel der Selbstbau von Hochspannungskondensatoren (Leidener Flasche) beschrieben.

Auch auf [www.uoguelph.ca/~antoon/circ/hv/hv.html](http://www.uoguelph.ca/~antoon/circ/hv/hv.html) gibt es eine Anzahl von Hochspannungsprojekten.

Auf der Webseite [www.teslamania.com/](http://www.teslamania.com/) kann man spektakuläre Photos und Filme von Hochspannungseffekten sehen und etwas über einen "Quarter Shrinker" lesen.

Auch [www.richieburnett.co.uk/tesla.shtml](http://www.richieburnett.co.uk/tesla.shtml) bietet viele Themen und Photos mit einem Schwerpunkt im Bereich der Grundlagen der Erzeugung von hohen Spannungen.

Immer noch nicht genug? Auch bei unseren „Antipoden“ (<http://tesladownload.iinet.net.au/index.html>) wird tüchtig experimentiert. Außer mit Hochspannung auch mit Magnetischem, wie zum Beispiel mit ferromagnetischen Flüssigkeiten.



Hochspannungsserie von Panasonic (High Voltage Ceramic Disc Capacitors), die sich durch geringe Verluste auszeichnet und speziell für geschaltete Anwendungen mit hoher Spannung eignet. Wir haben hier eine Serie mit einer Nennspannung von 2 kV ausgewählt, weil auch die Spannungsspitzen am Ausgang des Transformators kein Problem sein dürfen.

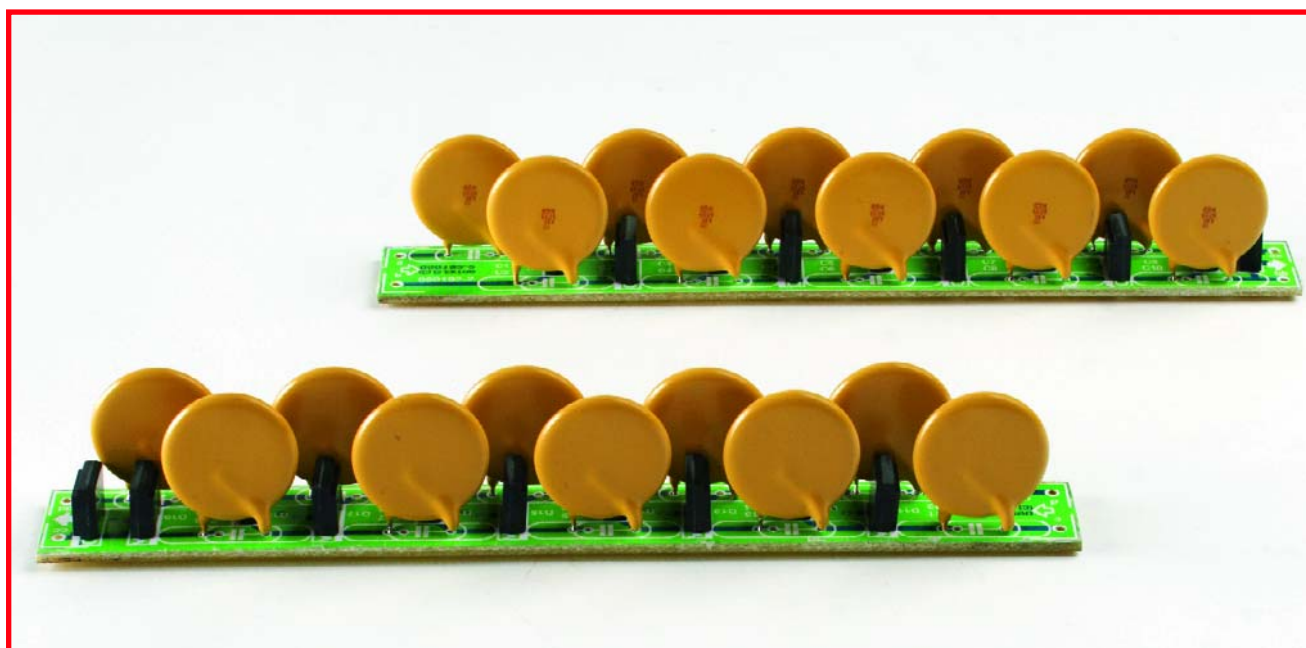
Die Kaskaden-Platinen sind für alle Werte aus dieser ECKA3DxxxKBP-Serie geeignet. Das Raster für die kleineren Werte ist 7,5 mm und für die größeren 10 mm. Natürlich ist eine Kaskade so einfach strukturiert, dass man überlegen kann, sie auch ohne Platine aufzubauen, aber sicherer ist doch eine Lösung mit Platine. Das in Bild 6 gezeigte Layout bietet die Möglichkeit, die Kaskaden zu erweitern. Platinen derselben Polarität können in Serie

geschaltet werden. Die Ausgangsspannung lässt sich so mit jeweils 10 kV pro Platine erweitern. Die Eingänge a (c) und b (d) werden dann mit aa (cc) und bb (dd) verbunden, bb (dd) ist der Ausgang pro Platine. Die Nulllastspannung pro Platine ist etwas höher als 10 kV!

## Der Hochspannungstrafo

Das schwierigste (oder das lästigste) an der Konstruktion eines jeden induktiven Wandlers ist das Wickeln der Spule oder des Trafos, jedenfalls dann, wenn kein Standard-Bauteil eingesetzt werden kann. Um es noch etwas spannender zu machen, haben wir uns für einen Ringkern entschieden. Um einen Ringkern von Hand zu wickeln, muss man vorab die Länge des für die vorgegebene Windungszahl erforderlichen

Drahtes berechnen. Es ist natürlich sinnvoll, die Drahtlänge etwas aufzurunden, bevor man schneidet. Auch die Wickelmethode ist anspruchsvoll. Der Grund für die Verwendung eines Ringkerns ist die hohe Sekundärspannung. Da wir keinen speziell isolierten Hochspannungsdraht verwenden wollten, haben wir uns dafür entschieden, die Sekundärwicklung in einer einzigen Lage auszuführen. Allein mit dieser Methode ist sichergestellt, dass die Spannung zwischen zwei Windungen so gering wie möglich ist. Wenn man mit Spannungsspitzen von fast 2 kV rechnet, dann beträgt die Spannung zwischen zwei Windungen der Sekundärwicklung nur 13 V. Da wir auch die Spannung zwischen Primär- und Sekundärwicklung niedrig festlegen wollten, haben wir die Sekundärwicklung mit einer Mittenanzapfung verse-



**Bild 7.** Aufgebaute Kaskadeschaltung. Klein, aber (lebens)gefährlich!



hen, die an Masse gelegt wird. Wir beginnen mit dem Wickeln der Sekundärwicklung in zwei Etappen. Daher sind für die Mittenanzapfung zwei Anschlüsse auf der Massefläche vorgesehen. Pro Windung benötigt man ca. 105 mm Draht. Insgesamt sind also 2 x 8 Meter lackierter Kupferdraht mit 0,8 mm Durchmesser erforderlich. Ob man letztlich exakt 2 x 75 Windungen erreicht, ist nicht wichtig. Es kommt nicht auf ein paar Windungen mehr oder weniger an. Wickeln Sie aber mit Bedacht, und legen Sie die Windungen stramm nebeneinander auf den Kern. Achten Sie darauf, dass kein Knick im Draht entsteht. Stellen Sie sicher, dass die beiden Enden des Drahtes der Sekundärwicklung mit einigem Abstand die Wicklung verlassen, so dass man sie gut auf der Platine einlöten kann. Dies gilt auch für die beiden Enden der Mittenanzapfung. Ist das geschehen, muss die Sekundärwicklung mit einer speziellen Folie isoliert werden. Klebeband oder Ähnliches ist ungeeignet. Das Material muss ausreichende mechanische Festigkeit und elektrische Isolationseigenschaften besitzen sowie thermisch belastbar sein.

Die symmetrische Primärwicklung ist viel einfacher zu wickeln. Um eine gute Symmetrie zu erreichen, werden zwei Drähte gleichzeitig nebeneinander gewickelt (siehe Bild 8). Für die Primärwicklung reichen 2 x 1,5 Meter aus 0,8-mm-Kupferlackdraht. Man beginnt mit dem Wickeln neben der Mittenanzapfung der Sekundärwicklung in Richtung der sekundären Anschlüsse. Nach sechs Windungen wechselt man zu einer Stelle auf dem Kern, die vom Sekundäranschluss genau so weit entfernt ist wie die Stelle, an der an der man mit der sechsten Windung geendet hat. Beim Wechseln zu dieser Stelle müssen die beiden Drähte gedreht werden, so dass die Polarität der beiden Primärwicklungen stimmt. Vergisst man das, gibt es einen heftigen Kurzschluss, weil der Kern direkt in Sättigung gerät. Wickelt man die sechs verbleibenden Windungen weiter, dann endet man an der anderen Seite der sekundären Mittenanzapfung. Der Trafo muss nun ziemlich symmetrisch aussehen. Beim ersten Test haben wir einen Kern mit 50 mm Durchmesser, 20 mm Höhe und N30 als Kernmaterial verwendet (Bezugsquelle: Schuricht). Weil die Leistung nicht reichte, haben wir zwei Kerne mit Zweikomponentenkleber aufeinander geklebt (siehe Foto der Schaltung).

### Praktischer Aufbau

Verwenden Sie für die Verbindung zwischen Hauptplatine und Kaskaden nur Drähte mit guter Isolation. Zusätzlich kann man die Drähte noch durch Isolierschläuche oder Isolationsrohre führen. Der Abstand zwischen den beiden Eingängen der beiden Kaskaden braucht nicht groß zu sein. Zwei bis drei Zentimeter sind ausreichend. Hingegen muss der Abstand zwischen den Ausgängen natürlich viel größer sein. Hier kann die Spannung kurz vor dem Überschlag erheblich größer sein als 20 kV. Als Regel gilt, dass ein spontaner Überschlag bei etwa 10 kV/cm erfolgt. Für unsere Experimente haben wir einen kleinen Schraubstock mit isolierten Klemmen verwendet, um die beiden Kaskaden festzuklemmen. Um bei einem Spannungsüberschlag einen saftigen Kurzschluss zwischen den Kaskaden zu vermeiden, wurden beim provisorischen Aufbau zwei 10-W-Widerstände von 1800  $\Omega$  aus der AC10-Serie von Vishay-BCcomponents mit den Elektroden in Serie geschaltet. Diese schienen mit der hohen Spannung besonders gut zu Recht zu kommen. In Serie sind dünne Drähte verlötet, die derart gebogen wurden, dass

die Lötstellen einen ausreichenden Abstand haben, um einen sekundären Überschlag zu vermeiden. Hochspannung schlägt nämlich vorzugsweise auf spitze und kleinere Oberflächen über, auch wenn der Abstand größer ist. Für maximale Sicherheit ist ein transparentes Kunststoffgehäuse sehr zu empfehlen. Man kann dann auch die Elektroden sehr einfach und gut isoliert montieren.

Beim Testen haben wir einen Regeltrafo verwendet, um die Netzspannung einzustellen. Auf diese Weise lässt sich auch die Ausgangsspannung einfach variieren. Bei Verwendung eines normalen Trafos empfehlen wir eine Einschaltverzögerung, zum Beispiel die „Kompakte Netz-Einschaltverzögerung“ aus ELEKTOR 7-8/1997, Seite 104. Man kann die Schaltung auch mit einem geregelten Standard-Netzteil mit Spannung versorgen, das allerdings 80 V und einige Ampere liefern können muss, wobei eine Strombegrenzung die Lebensdauer des einen oder anderen Bauteils erhöht. Dabei sollte R10 mit 1 k $\Omega$  oder noch etwas höher dimensioniert werden, weil sonst die Verlustleistung an R10 und der Strom durch D4 zu groß wird.

(050192ot)



**Bild 8.** Hier kann man sehen, wie der Trafo gewickelt werden muss. Der Trafo auf dem Foto ist die Version 2.0 (das Foto am Artikelanfang zeigt die Version 3.0), aber das Wickelverfahren ist identisch.  
Erklärung der Anschlusspunkte: ① = C4 im Schaltbild, ② = C1, ③ = B2, ④ = A2, ⑤ = C2 und C3, ⑥ = B1 und ⑦ = A1.