

# Laser-Signal-Übertragung

## Informationsübertragung per Laserstrahl

## Teil 3

*Ausgehend von den in den beiden vorhergehenden Artikeln beschriebenen Möglichkeiten im Zusammenhang mit der Laser-Signal-Übertragung wird hier die konkrete Schaltung zur Modulation des ELV-Lasers vorgestellt.*

Gernot Stoffel  
Bonn

### **Die Stabilisierung des Lasers**

Wie bereits dargelegt, wird bei gesteuerter Stabilisierung einer Laser-Gasentladung ein Teil der Ballastspannung statt durch Vorwiderstände an einem geeigneten Transistor hervorgerufen. In Bild 4 ist das entsprechende Schaltbild des Lasernetzteils gezeigt. Beim Vergleich mit dem im „ELV-journal“ 52 auf der Seite 43 veröffentlichten Schaltbild ist zu erkennen, daß sich die Veränderungen hauptsächlich auf die Einfügung einer Konstantstromquelle konzentrieren. Die Funktionsweise dieses Schaltungsteils ist wie folgt:

An der Basis von T 7 steht eine über D 28 möglichst genau stabilisierte Referenzspannung von 8,2 V an. Am Emitter-Widerstand R 103 ergibt sich daher ein um die Basis-Emitter-Spannung verminderter Spannungsabfall von ca. 7,75 V (bei Endtemperatur).

Der diesen Spannungsabfall hervorruhende Strom speist sich fast ausschließlich aus dem Kollektor-Stromkreis und damit aus der Laserröhre (einen weiteren, wenn auch vergleichsweise geringen Beitrag stellt der um den Stromverstärkungsfaktor von T 7 verminderte Basis-Emitter-Strom dar). Zwischen Kollektor und Emitter stellt sich somit automatisch der richtige Spannungsabfall ein (ca. 150 V bei 5 mA bis hin zu ca. 350 V bei 3 mA).

Bei einer maximalen Verlustleistung von ca. 1 W wird T 7 hierbei nicht sonderlich stark beansprucht. Dennoch wurde ein Kühlkörper vorgesehen, da Messungen einen relativ starken Temperaturgang von ca. 0,7 ‰ pro Grad ergaben. Das Nachdriften des Röhrenstromes reduziert sich durch den Kühlkörper auf etwa 0,25 mA und ist relativ schnell beendet, d. h. im Einschaltmoment ist der Röhrenstrom ca. 0,25 mA niedriger

als im Normalbetrieb, wenn der Transistor nach einigen Minuten seine Betriebstemperatur erreicht hat.

D 29, D 30 schützen T 7 vor Überspannungen ab 400 V und dürfen keinesfalls weggelassen werden, denn bei jedem Zünden der Laserröhre tritt ein Strom/Spannungsstoß auf, wodurch der Transistor rasch zerstört würde. Nachweisbar ist dieser Stromstoß z. B. durch eine zu D 29, D 30 in Reihe geschaltete LED (Katode  $\triangle$  Pfeilspitze weist in Richtung der Schaltungsmasse).

Strombestimmendes Element ist der Emitter-Widerstand R 103. Der für einen bestimmten Röhrenstrom erforderliche Wert läßt sich nach der Formel  $R = U/I$  leicht berechnen. Zu berücksichtigen ist hierbei aber auch der Basisstrom von T 7, welcher ebenfalls über R 103 fließt. Er ändert sich zwischen 0°C und 100°C von ca. 9 auf 4% vom Kollektorstrom und muß hinzuaddiert werden

( $U_{BE}$  sinkt im genannten Temperaturbereich von ca. 0,65 V auf ca. 0,45 V).

Für den Sollstrom von 5,0 mA ergibt sich ein optimaler Widerstandswert von 1,47 k $\Omega$  (Reihe E-96). Der gängigere Wert von 1,50 k $\Omega$  führt zu ca. 4,9 mA, wobei sich diese Angaben auf die Endtemperatur des Gerätes beziehen. Bei Zimmertemperatur liegt der Strom zunächst um 0,2 bis 0,25 mA niedriger.

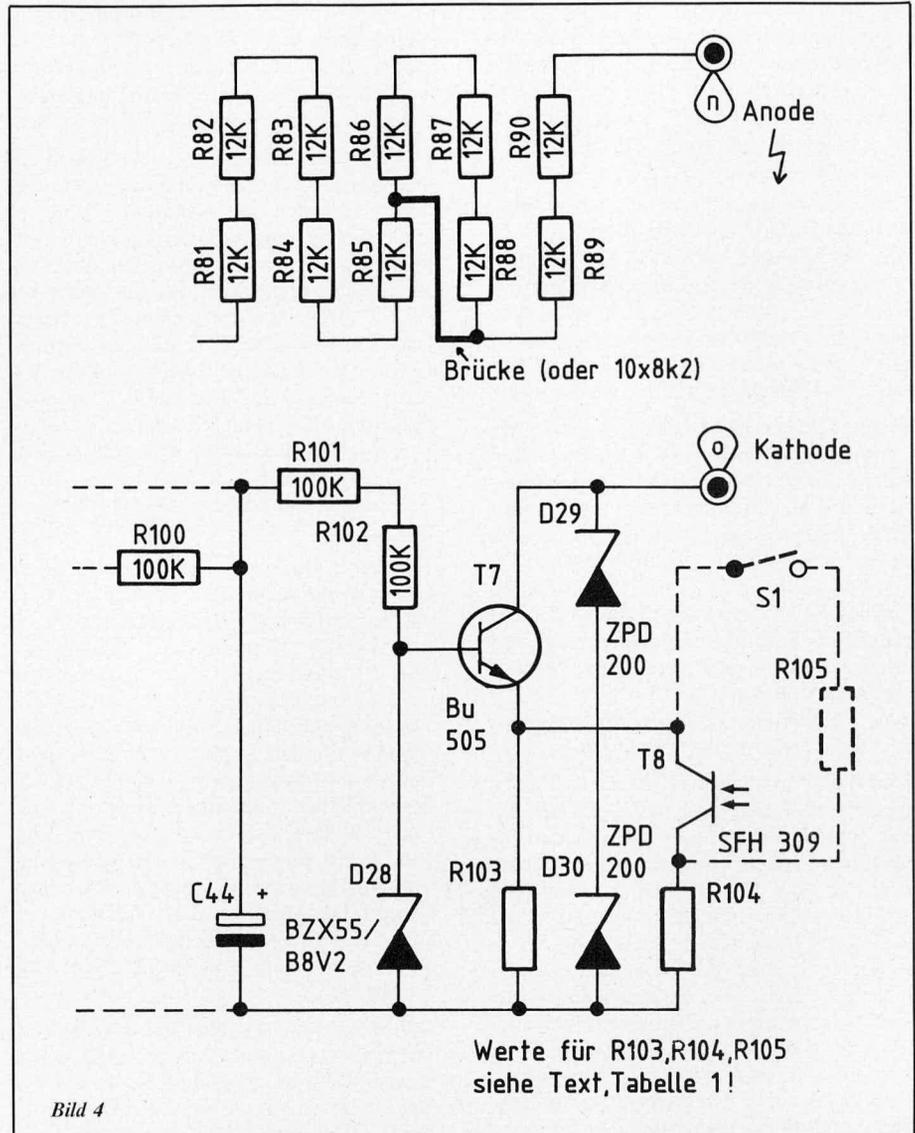
Wichtig ist, daß Röhrenströme von über 5,2 mA vermieden werden sollten, da diese die Röhrenlebensdauer bereits beeinträchtigen können. Für D 28 wurde nicht zuletzt deshalb ein ungewöhnlich eng toleriertes Bauelement von 2 % gewählt, damit sich der Anwender auf die genannten Widerstandswerte verlassen kann.

### Vorteile der Stabilisierung

Neben dem mühelosen Auffang von Netzspannungsschwankungen bis etwa  $\pm 15$  V (in Deutschland im allgemeinen ein eher theoretisches Problem) vermindert die diskutierte Schaltung die Anfälligkeit des Lasers gegen Netz-Störimpulse, die normalerweise Laseraussetzer verursachen. Kennlinien-toleranzen der Röhre werden vollständig ausgeglichen. Darüber hinaus wird das Zündverhalten insbesondere heißer Röhren erheblich verbessert.

Für alle Laserröhren gilt die Faustregel, daß sie nicht bei Umgebungstemperaturen (im Gehäuse gemessen) von über 50°C betrieben werden sollten. Aufgrund des außerordentlich geringen Wirkungsgrades z. B. bei Helium-Neon-Laserröhren und der damit verbundenen hohen Verlustleistung läßt sich dies jedoch nicht immer erreichen. Man sollte sich allerdings darüber klar sein, daß eine Temperaturerhöhung um 20 K auf 70°C sowohl die Lebensdauer (wenn auch nur geringfügig) als auch insbesondere das Zündverhalten in heißem Zustand beeinträchtigen kann.

Trotz sehr genau eingehaltener Betriebsparameter ist das Zündverhalten einzelner Laserröhren recht individuell und kann mitunter zu Problemen führen. Dies gilt auch für den besonders eng tolerierten und hochwertigen ELV-Röhrentyp (Kennlinienschwankungen meist weit unter 1 % bei sehr gut eingehaltener Ausgangsleistung von im Mittel 1,8 mW,  $\pm 10$  %) und macht sich im Zweifelsfall durch längeres Flimmern der Gasentladung vor dem eigentlichen Zündvorgang bemerkbar. Der Grund hierfür ist, daß bei rein ohmscher Erzeugung der Ballastspannung die Zündspannung immer nur bis zur untersten Zündschwelle steigen kann. Ein gewisser Energiebedarf während des eigentlichen Zündvorgangs wird daher oft nicht schnell genug durch Nachlieferung gedeckt. Außerdem ist dem Ausgang der Kaskadenschaltung die Eingangs-Wechselspannung überlagert, wodurch die Zündbedingungen oft bereits während des beginnenden Kippvorgangs wieder unterschritten werden. Als Folge ergibt sich das besagte Flimmern, bis eine besonders günstige Konstellation von Eingangsspannungsphase, Kondensatorladungen usw. zum Zündvorgang führt. Durch maßgeschneiderte Bestückung der Kaskadenschaltung mit zur



Werte für R103, R104, R105 siehe Text, Tabelle 1!

Bild 4

Ausgangsseite kleiner werdenden Kapazitäten oder Parallelschaltung eines einzelnen 10-kV-Kondensators kann diese Tendenz vermindert werden – allerdings mit entsprechend größerem Aufwand.

Die Stabilisierungsschaltung behebt dieses Problem, da sich an T 7 während des Zündspannungsaufbaus infolge des fast unmeßbar kleinen Stromflusses eine beträchtliche Spannungsdifferenz herausbildet, die während des Zündens quasi als Reserve zur Verfügung steht. Auch der verkleinerte ohmsche Vorwiderstand (auch Ballast-Widerstand genannt) wirkt sich günstig aus, denn hierdurch folgt eine geringere Zunahme des Spannungsabfalls während des Zündprozesses. Das Ergebnis ist, daß auch problematische Röhren meist auf Anhieb, ohne jedes Flimmern, gezündet werden.

Hauptvorteil der Stabilisierungsschaltung ist jedoch die nachfolgend beschriebene Modulationsmöglichkeit.

### Modulierbarkeit des Lasers

Hierzu ist R 103 so zu vergrößern, daß sich ein möglichst geringer, aber noch stabiler Röhrenstrom einstellt.

Durch Parallelschalten eines Fototransistors (T 8, Typ SFH 309) einschließlich eines Reihenwiderstands kann dieser Strom dann, abhängig von der auffallenden Lichtmenge,

Tabelle 1:

Röhrenstrom und Modulationsgrad in Abhängigkeit von R 103 (Reihe E 96; Metallfilm 1 %) Gehäuselufttemperatur 50°C; Wärmewiderstand Transistor 50°/W

R 103	I (mA) Leerlauf	R 104 $\geq$	Modulationshub	R 105 (optional)
2K49	2,98	3K40	+40%	165 R
2K43	3,05	3K48	+38%	215 R
2K37	3,13	3K65	+36%	191 R
2K32	3,20	3K74	+34%	243 R
2K26	3,28	3K92	+32%	255 R
2K21	3,36	4K12	+30%	237 R
2K15	3,45	4K32	+28%	287 R
2K10	3,53	4K53	+26%	324 R
2K05	3,63	4K75	+24%	392 R
2K00	3,71	5K11	+22%	383 R
1K96	3,79	5K36	+20%	453 R
1K91	3,88	5K76	+18%	549 R
1K87	3,96	6K19	+16%	590 R
1K82	4,04	6K81	+14%	732 R
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
1K54	4,77	—	—	—
1K50	4,89	—	—	—
1K47	5,00	—	—	—
1K43	5,11	—	—	—

Berechnung von R 105 für andere (größere) Werte von R 104:

$$R 105 \geq \frac{R 103 \times 1K466}{R 103 - 1K466} - R 104$$

vergrößert werden. Der Reihenwiderstand R 104 dient hierbei zur Begrenzung des maximal möglichen Stromes. Er wird so bemessen, daß der Röhrenstrom bei voller Durchsteuerung von T 8 5,1 mA nicht übersteigt. Bis zum Nennstrom von 5,0 mA arbeitet T 8 dann nahezu linear.

Soll der Laser des öfteren zwischen Normal- und Modulations-Betrieb umgestellt werden, kann parallel zu T 8 ein zuschaltbarer Widerstand (R 105, S 1) angebracht werden. Hierdurch besteht die Möglichkeit, schnell zwischen Modulationsmodus und Soll-Strahlstärke umzuschalten (Soll-Strahlstärke: T 8 unbeleuchtet und S 1 geschlossen).

Tabelle I zeigt in Abhängigkeit von R 103 die optimalen Werte für R 104 sowie den optionalen Parallelwiderstand R 105 auf. Wichtig ist hierbei, daß die angegebenen Widerstandswerte zwar geringfügig überschritten, aber möglichst nicht unterschritten werden können bzw. sollten. Ein Zugriff auf die eng gestaffelte Reihe E-96 kann bei dem für Laser geltenden Genauigkeitsgebot kaum vermieden werden. Ggf. können die entsprechenden Widerstandswerte durch Reihen- oder Parallelschaltung von Widerständen der Reihe E-12 hergestellt werden.

Damit die Modulierung des Lasers über die steuerbare Stromquelle bestehend aus T 7 mit Zusatzbeschaltung im gewünschten Bereich überhaupt vorgenommen werden kann, muß an T 7 ein entsprechend hoher Spannungsabfall entstehen können. Wesentlich ist daher das Kurzschließen der 3 Vorwiderstände R 86, 87, 88, welches am einfachsten durch eine kurze enganliegende Drahtbrücke an der Platinenunterseite erfolgt. Im Nennbetrieb wird der an diesen 3 Vorwiderständen aufgetretene Spannungsabfall jetzt auf T 7 verlagert, der nun eine Steuerungsmöglichkeit bietet.

Obwohl es wünschenswert wäre, läßt sich der Röhrenstrom über R 103 nicht beliebig verkleinern (bestmöglicher Modulationsgrad!). Vielmehr existiert ein unscharf definierter, konkret röhrenabhängiger unterer Grenzstrom, bei dem die Gasentladung instabil wird (sehen Sie hierzu auch im Grundlagenartikel in „ELV-journal“ Nr. 55 die Diskussion der Laserkennlinie). Mit Annäherung an diesen Wert (durch Vergrößern von R 103) wird der Laser zunehmend anfällig gegen kleine, schließlich kleinste Netzimpulse. Am Ende verursacht bereits ein Annähern etwa einer Hand an den Röhrenaussgang Aussetzer, und die Zündsequenz dehnt sich zunehmend aus.

Wie nah man sich an den umschriebenen Grenzstrom letztlich heranwagt, ist eine Frage der angestrebten Betriebszuverlässigkeit sowie der lokalen Netzbedingungen. Für Modulationsbetrieb sind Aussetzer besonders unvorteilhaft. Ein gewisser Sicherheitsabstand zum Mindeströhrenstrom ist daher unverzichtbar. Zu berücksichtigen ist hier, daß sich die Anfälligkeitsschwelle mit der Netzspannungsqualität ändert und außerdem mit der Röhrentemperatur ansteigt.

Bild 2 zeigt die aufwendig ermittelten Betriebskurven der ELV-Laserröhre. Man erkennt, daß der untere Grenzstrom etwa um einen Mittelwert von 3,1 mA + 0,3 mA/

-0,5 mA schwankt. Als sicher kann daher im allgemeinen ein Betriebsstrom ab etwa 3,5 mA gelten. Röhrenabhängig liegt er zum Teil erheblich niedriger. Dies müßte aber bei jeder Röhre individuell ausprobiert werden.

In kritischen Anwendungen sind auch ein größerer Sicherheitsabstand und damit höhere Leerlaufströme angeraten. In erster Linie hängt dieses von den lokalen Gegebenheiten des Versorgungsnetzes ab. Störverbraucher wie geschaltete Induktivitäten (Kühlschränke/Leuchtstofflampen), Hochlastverbraucher, Phasenanschnittschaltungen können selbst bei Nennstrom von 5,0 mA Lichtaussetzer hervorrufen. Dies ist bei praktisch allen netzbetriebenen HeNe-Lasern ein Problem. Durch Vorschalten eines geeigneten kleinen Netzfilters läßt es sich im Zweifelsfall aber leicht in den Griff bekommen.

T 8 wird über eine geeignete Infrarot-Leuchtdiode angesteuert (ideal: Typ SFH 409,  $I_{max.} = 100$  mA). Diese wird zur sicheren galvanischen Trennung der Signalquelle über ein mindestens 15 mm langes, möglichst undurchsichtiges Plastikröhrchen mit T 8 gekoppelt. Diese Mindestlänge ist aufgrund der hohen Zünd- und Betriebsspannungen des Lasers unbedingt einzuhalten. In der von ELV gewählten Konstruktion wird sogar ein Plexiglasröhrchen mit einer Länge von 70 mm eingesetzt, das geringfügig aus dem Metallgehäuse des Lasernetzteils herausragt. Die Ansteuer-LED kann dann von außen in das Röhrchen eingesteckt werden, wodurch sich eine hohe Berührungssicherheit ergibt.

Die Signale können über einen geeigneten Vorwiderstand direkt an die LED gelegt werden (Beispiel: Abstand LED zu T 8 = 7 mm ergibt einen Vorwiderstandswert von 580  $\Omega$  bei einem Signalspannungsbereich von 1 V bis 5 V - Bild 5).

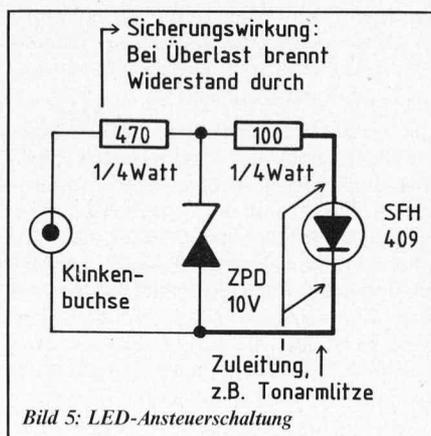


Bild 5: LED-Ansteuerschaltung

In Bild 2 erkennt man ein unlineares Anwachsen der Ausgangsleistung mit dem Röhrenstrom. Die Abweichungen sind aber gering, so daß auch ohne Korrekturglieder (insbesondere bei geringem Modulationsgrad) bereits eine passable Übertragung von Analog-Signalen möglich ist. Für größere Sendestrecken sind aber die im Grundlagenartikel in „ELV-journal“ Nr. 55 gemachten Einschränkungen zu beachten, die sich mit der Beschreibung optischer Störphänomene befassen.

Durch einfache Kompensationsschaltungen im Sende- oder Empfangsteil könnte die Un-

linearität weitgehend abgestellt werden. Für eine besonders lineare Signalübertragung sollte man ohnehin auf frequenzmodulierte Signale zurückgreifen.

Der Frequenzbereich der Schaltung reicht bis etwa 100 kHz. Mit der Annäherung an diese Grenze reagiert die Schaltung zunehmend träge auf die Modulation, d. h. der Modulationsgrad geht zurück, und die Verzerrungen der übertragenen Signale steigen überproportional an. Bei digitaler Ansteuerung und geeigneter Auffrischung im Empfänger sind aber auch höhere Signalfrequenzen realisierbar.

## Zum Nachbau

Auf das Überbrücken von 3 Vorwiderständen (R 86, 87, 88) wurde bereits eingegangen. Anstelle dieser Überbrückung könnten auch alle 10 Ballastwiderstände gegen den Typ 8,2 k $\Omega$  ausgetauscht werden.

Besondere Sorgfalt ist auf die korrekten Werte von D 28 und R 103 zu verwenden, da eine fehlerhafte Bestückung Röhrenströme bis 6,5 mA und damit sehr raschen, überproportionalen Röhrenverschleiß zur Folge haben kann. Auch der seitenrichtige Einbau von T 7 ist nochmals zu prüfen. Zu beachten ist weiterhin, daß die Schaltung nie ohne D 29, D 30 oder ohne korrekt angeschlossene Röhre in Betrieb genommen werden darf. Soll D 28 aus eigenem Vorrat bestückt werden, so sollte zunächst eine genaue Messung ihrer Zenerspannung bei 1,5 mA durchgeführt werden. Die in der Tabelle I angegebenen Widerstandswerte müssen dann mit einem Faktor multipliziert werden, der sich wie folgt ergibt: Gemessene Dioden-Stabilisierungsspannung/8,172 V. Es wird aber darauf hingewiesen, daß sich der angegebene Diodentyp BZX 55/B 8 V 2 auch deshalb so gut eignet, weil er im fraglichen Stromgebiet einen besonders geringen differentiellen Innenwiderstand aufweist.

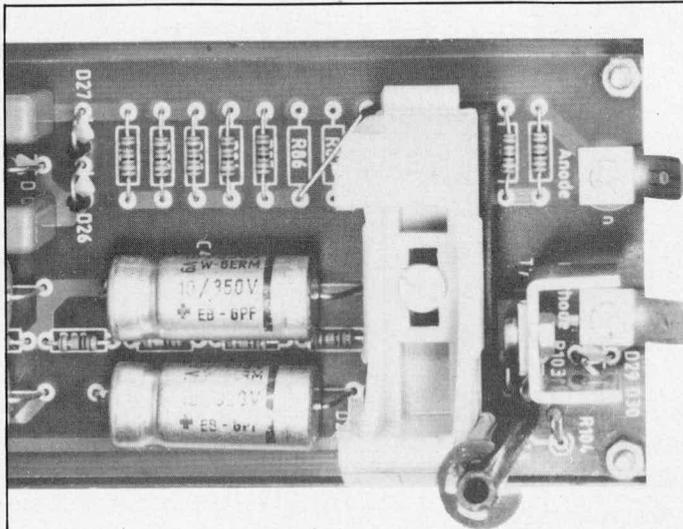
In Bild 6 ist der geänderte Bestückungsplan unter Berücksichtigung des in Bild 4 gezeigten Schaltbildes des Lasernetzteils dargestellt.

Die Bestückung wird in gewohnter Weise anhand des Bestückungsplanes vorgenommen. Ist bereits die ursprüngliche Version aus dem „ELV-journal“ Nr. 52 aufgebaut, so sind die entsprechenden Brücken wieder zu entfernen und danach die neuen Bauteile zusätzlich einzusetzen.

Die Ankopplung der Senderdiode an den Fototransistor T 8 im Lasernetzteil erfolgt aus Sicherheitsgründen über ein ca. 70 mm langes Plastikröhrchen, das senkrecht über T 8 gesetzt und verklebt wird. Im Gehäuseoberteil ist an entsprechender Stelle eine 5-mm-Bohrung anzubringen, durch die das Plastikröhrchen ca. 2 bis 3 mm aus dem Gehäuseoberteil hervorsteht. Eine kleine Kerbe, mit einem Sprengring versehen, sichert das Röhrchen zusätzlich gegen Herausziehen. Zur Fixierung wird dieses Röhrchen zusätzlich mit der vorderen Röhrenhalterung verklebt (Cyanacrylat-„Sekundenkleber“).

In Abbildung 7 ist die mechanische Konstruktion der Zusatzschaltung bei abgenommenem Gehäuseoberteil gezeigt.

Soll das Gerät mit der Umschaltoption ausgestattet werden (R 105, S 1), ist zu beachten,



Teilansicht des ELV-Lasernetzteils mit Modulationsschaltung

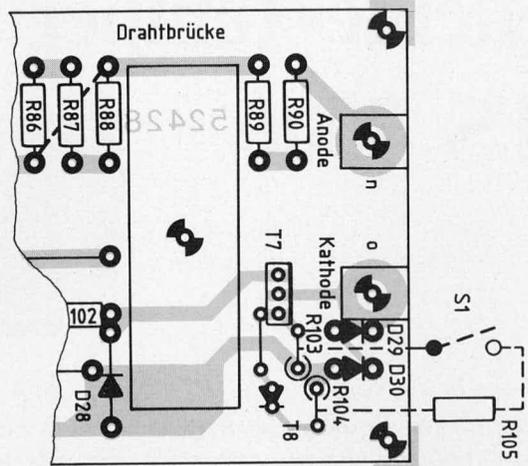


Bild 6: Bestückungsplan auszugsweise zu der in Bild 4 gezeigten Veränderung des Schaltbildes des ELV-Lasernetzteils

daß die entsprechenden Bauelemente mit ausreichenden Sicherheitsabständen zu anderen Bauteilen innerhalb des Gehäuses angeordnet werden. Keinesfalls dürfen Schalter oder sonstige Leitungen aus dem Lasergehäuse herausgeführt werden wegen der sehr hohen Zünd- und Betriebsspannungen. Ein Umschalten von S 1 ist daher nur bei ausgeschaltetem Gerät und anschließend abgenommenem Gehäuseoberteil möglich. Bevor jedoch das Gehäuseoberteil entfernt wird, sollte das Gerät bereits einige Minuten vom Netz getrennt sein, damit sich die Kondensatoren weitgehend entladen konnten.

Nachdem das Gehäuseoberteil aufgesetzt und verschraubt wurde, d. h. sich der Laser wieder in einwandfreiem, betriebsbereitem Zustand befindet, kann durch Einstecken einer Senderdiode in die obere Öffnung des Plastikröhrchens die Modulation des Lasers vorgenommen werden. Durch richtiges Voreinstellen des Ansteuerstrombereichs läßt sich die Stromsteuerung im Lasernetzteil hierbei in einem recht gut linearen Bereich halten. Besser ist es jedoch, nur rein digitale Signale zu übertragen, die z. B. frequenzmoduliert werden können.

Abschließend wollen wir nochmals ausdrücklich darauf hinweisen, daß die Schaltung nur von Profis aufgebaut und in Betrieb genommen werden darf, die aufgrund ihrer

Ausbildung dazu befugt sind. Die entsprechenden VDE- und Sicherheitsbestimmungen sind sorgfältig zu beachten.

### Zur Sicherheit

Es wurde bereits in der Vorstellung des Laserbausatzes („ELV journal“ Nr. 52) auf die mit der hohen Laser-Betriebsspannung einhergehende Gefahr und auf das unbedingte Einhalten der einschlägigen VDE- und sonstigen Bestimmungen hingewiesen.

Eine Besonderheit von HeNe-Netzschaltungen soll hier jedoch nicht verschwiegen werden. Diese besteht darin, daß eine Berührung spannungsführender Bauteile anodenseitig unweigerlich heftige elektrische Schläge und evtl. eine Beschädigung der inneren Transformatorisolation zur Folge hat (wobei allerdings wegen des hohen Schaltungsinnenwiderstandes nur eingeschränkt gefährliche Körperströme auftreten können). Berührungen an der Kathodenseite sind hingegen im allgemeinen kaum spürbar. Ein Katodenpotential gegen Erde ist nur über Glimmlampen oder hochempfindliche Meßgeräte überhaupt nachweisbar (im allgemeinen -100 bis -200 V). Der hierbei wirksame Innenwiderstand ist aber so groß, daß diese Spannung bereits durch den üblichen Meßgeräteinnenwiderstand von 10 M $\Omega$  nahezu vollständig kurzgeschlossen wird.

Es ist deshalb im allgemeinen ohne Gefährdung möglich, katodenseitig an Laserschaltungen zu arbeiten (Achtung: nicht in jedem Fall ungefährlich, da schaltungsabhängig), R 103 also z. B. zum Einmessen durch einen Spindeltrimmer zu ersetzen (Anfangseinstellung: 2 k $\Omega$ ) und den Röhrenstrom über ein Strommeßgerät zu führen (wohlgemerkt: **nur** katodenseitig!). Hierdurch werden eine Reihe von Arbeiten erleichtert. Befürchtungen von Meßgeräteüberlastungen durch zu hohe Erdpotentiale bestehen üblicherweise nicht. Ganz wesentlich ist es in diesem Zusammenhang, zu beachten, daß im Betrieb der Laserstromkreis auf gar keinen Fall unterbrochen werden darf.

Der Vollständigkeit halber wollen wir in diesem Zusammenhang nochmals eingehend darauf hinweisen, daß der ELV-Laser ausschließlich im betriebsbereitem Zustand im ordnungsgemäß geschlossenen Gehäuse in Betrieb genommen werden darf. Die vorstehend aufgeführten Messungen am geöffneten Gerät (nur über einen vorgeschalteten Trenntrafo) dürfen selbstverständlich nur unter Laborbedingungen von Fachleuten vorgenommen werden. Neben der Laser-Hochspannung liegt immerhin im Gerät unter anderem die zum Teil ungeschützte Netzspannung an. Die VDE- und Sicherheitsbestimmungen sind zu beachten.

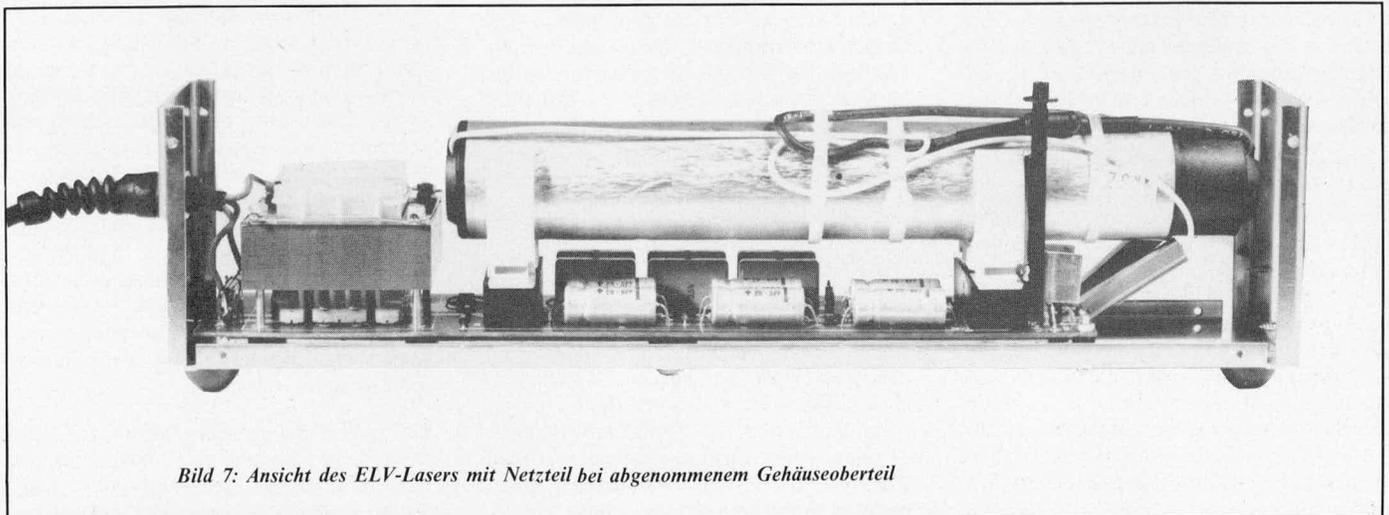


Bild 7: Ansicht des ELV-Lasers mit Netzteil bei abgenommenem Gehäuseoberteil