

# Laser-Signal-Übertragung

## Informationsübertragung per Laserstrahl

## Teil 2

Im zweiten Teil dieser Artikelserie wird zunächst die „Direkte Modulation“ eines Lasers und anschließend die Strahlausbreitung durch die Atmosphäre sowie der Signalempfang beschrieben. Im dritten Teil folgen dann praktische Anwendungsbeispiele.

Gernot Stoffel  
Bonn

### Direkte Modulation

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, einen Gaslaserstrahl bereits bei seiner Entstehung, durch Verändern der Pumpleistung, in seiner Intensität zu beeinflussen und damit zu modulieren. Wegen einer gewissen Trägheit der atomaren Laserprozesse ist die hierbei mögliche Modulationsfrequenz beim HeNe-Laser auf maximal etwa 10 MHz begrenzt. (Die genaue Analyse der zugrundeliegenden Vorgänge ergibt eine Grenzfrequenz von 27 MHz.) Nach unten hin gibt es ebenfalls eine Grenze. Da innerhalb einer Gaslaserröhre mehrere komplexe rückgekoppelte Prozesse ineinandergreifen, emittiert diese selbst bei exakt stabilisierter Eingangsleistung und Röhrentemperatur kein völlig zeitkonstantes Laserlicht. Sie stellt vielmehr ein Paradebeispiel eines derzeit in der mathematisch-physikalischen Forschung hochaktuellen sogenannten chaotischen Prozesses dar. Die Einschwingvorgänge von Lasern waren sogar einer der Anlässe, die diese Forschung begründet haben.

Die Ausgangsleistung vollführt also gewisse Kapriolen. Die hierbei auftretende Schwankung liegt bei maximal etwa  $\pm 5\%$  vom Mittelwert, die typische Schwingungswellenlänge bei etwa 10 Sekunden.

Berücksichtigt man weiterhin, daß bei innerer Modulation maximal nur etwa 30% der gesamten Ausgangsleistung zur Übertragung dienen können und die Kennlinie Röhrenstrom/Ausgangsleistung außerdem nicht linear verläuft, ergibt sich eine klare Überlegenheit der frequenzmodulierten Übertragungsart, vorzugsweise digitalisierter Signale. Diese sind dann auch weitgehend unanfällig gegen Störeinflüsse der Übertragungstrecke, worauf noch eingegangen wird.

HeNe-Laser werden durch eine elektrische Gasentladung angetrieben (Fachdeutsch: gepumpt). Wie alle Gasentladungen besitzt sie eine negative I/U-Kennlinie und damit die Tendenz, bei allmählich zusammenbrechender Versorgungsspannung zu immer höheren Brennströmen zu eilen – über die Glimmentladung zur Bogenentladung und zum blitzartigen „Röhrentod“.

Damit dieser Prozeß aufgehalten wird, macht man die Versorgungsspannung über Vorwiderstände genügend nachgiebig. Bild 2 zeigt schematisch die Kennlinie einer HeNe-Laserröhre mit eingezeichneter Netzteilkennlinie (ohne Berücksichtigung der Zündschaltung). Man erkennt zwei Schnittpunkte. Ein stabiler Betrieb ist nur im rechten Kreuzungspunkt möglich. Denn da die

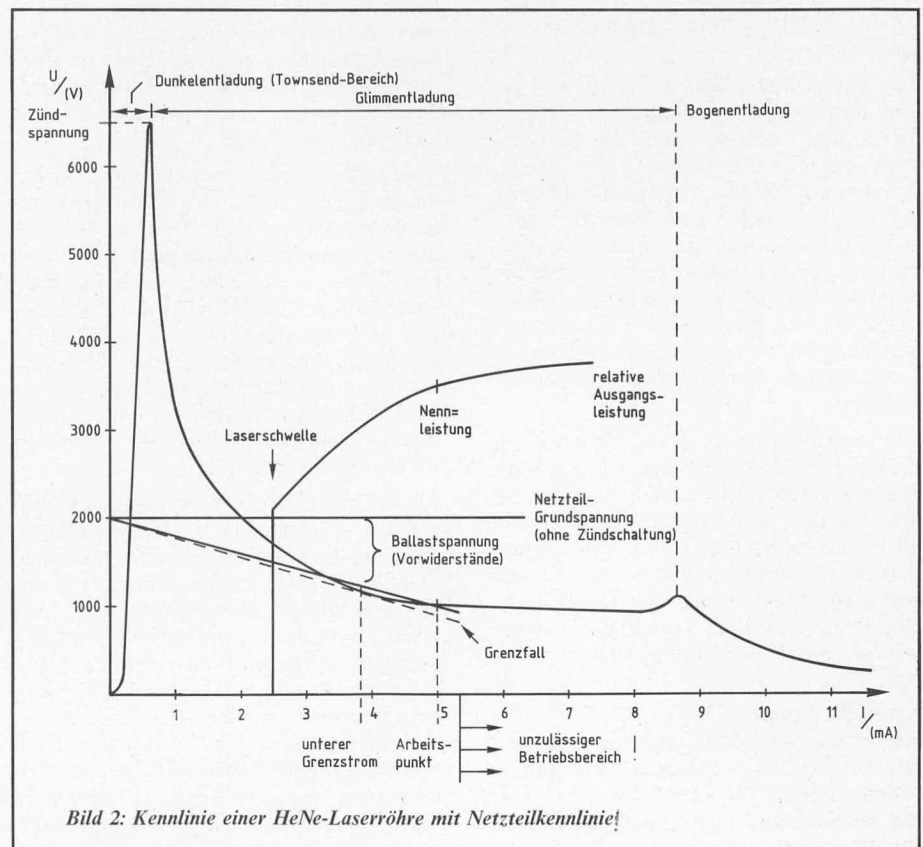
Röhrenkennlinie im linken Schnittpunkt noch steiler verläuft als die der Versorgungsquelle, fände der nie völlig gleichförmige Röhrenstrom im Falle eines zufälligen Mehrbedarfs an Spannung diese auch vor. Hierauf schließt sich ein rascher dynamischer Vorgang des Zusammenbruchs an, bei dem die überschüssige Versorgungsspannung für induktive und kapazitive Prozesse herhält, bis sich der Arbeitspunkt am rechten Schnittpunkt befindet.

Durch Vergrößern des Vorwiderstandes lassen sich beide Schnittpunkte aufeinanderzuschieben. Der Röhrenstrom läßt sich also drosseln. Es leuchtet aber ein, daß dies nur so weit fortsetzbar ist, wie sich überhaupt noch Schnittpunkte ergeben (gestrichelte Linie). In der Praxis muß man um etliches über diesem Wert bleiben, da beide Kurven, infolge Eingangsspannungsschwankungen/Netzverunreinigungen sowie Röhrenfluktuationen/thermischer Drift, jeweils einige Schwankungsbreite besitzen. Dies ist auch der Grund für die meist hohe Empfindlichkeit von HeNe-Lasern gegen Netzspannungsimpulse (Resultat: Aussetzer). Es ist nahezu unmöglich, diese Geräte über handelsübliche Wechselrichter zu betreiben, da deren Ausgangsspannung nicht

homogen genug ist. In manchen Fällen muß sogar bei normalem Netzbetrieb das Vorschalten eines Netzfilters erwogen werden, wenn zu viele Störsignale auftreten.

Will man den Röhrenstrom über die im Schaubild gezeigte Grenze hinaus verringern, bleibt nur die Möglichkeit einer Erhöhung der Grundspannung. Der Aufwand hierzu rechtfertigt aber in keiner Weise den Nutzen. Edelgaslaser besitzen ohnehin schon einen extrem schlechten Wirkungsgrad.

Durch Verkleinern des Vorwiderstandes ist im Prinzip auch eine Vergrößerung des Röhrenstroms erzielbar. Hiervor wird jedoch ausdrücklich gewarnt, da Überströme die Lebensdauer der Röhre rapide mindern. Außerdem geht der Laserprozeß oberhalb des Sollstromes sehr bald in Sättigung, d. h. man erreicht nur eine stark unterproportionale Zunahme der Ausgangsleistung. Daher sollte ein Sollstrom von 5 mA um höchstens 0,2 mA überschritten werden! (Ein warnendes Beispiel aus der Praxis: die Aufnahme der I/U-Kennlinie der ELV-Laserröhre bedingte für wenige Sekunden einen Betrieb mit ca. 7,5 mA; seither strahlt die mißhandelte Röhre nur-



mehr mit 70% ihrer ursprünglichen Leistung, was einer Alterung von etwa 10 000 Stunden entspricht.)

Für die innere Modulierbarkeit entscheidend ist, daß man einen Teil der Ballastspannung statt an Widerständen über einen geeigneten Hochvolt-Transistor steuern kann. Hierdurch ist zum einen eine sehr wirksame Stromstabilisierung und Röhrenzündhilfe realisierbar, und zum anderen läßt sich wegen der relativ flach abfallenden Röhrenkennlinie außerdem praktisch der gesamte überhaupt stabile Betriebsstrombereich der Röhre abdecken. Hierdurch ergibt sich bei geeigneter Beschaltung eine rasche und wirksame Modulierbarkeit.

Die Netzteilplatine des ELV-Lasers ist für eine derartige Schaltung bereits ausgelegt. Sie wird im weiteren Verlauf dieser Artikelserie ausführlich erörtert.

### **Strahlausbreitung durch die Atmosphäre**

Sollen mit einem Lichtstrahl größere Strecken überbrückt werden, taucht sofort die Frage nach der möglichen Reichweite des Gerätes auf. Eine derartige Reichweite müßte demnach definiert werden, auf jeden Fall aber kann man sie in hohem Maße günstig beeinflussen. Hierzu im folgenden näheres.

#### **Die Justierung**

Zuallererst: Es ist durchaus kein triviales Problem, mit einem Laser ein Objekt in größerer Entfernung, also etwa einen Empfänger, punktgenau und zeitkonstant zu treffen. Ist eine Distanz von mehreren Kilometern zu überwinden, kommt man zur Justierung um einen Helfer und ein Paar Sprechfunkgeräte kaum herum. Anderenfalls benötigt man eine ruckfreie und kalkulierbare Einstellmöglichkeit sowie aufreißenden Pendelverkehr zwischen „Start“ und „Ziel“.

Der Laser muß möglichst drift- und erschütterungsfrei aufgestellt werden. Besser als ein Stativ bewährt sich hier die Dreipunktlagerung des Gerätes selbst (harte, unnachgiebige Füße verwenden!) auf einer soliden Unterlage. Das Zwischenfügen eines Stückes Schreibmaschinenpapiers vorne würde den Aufpunkt in 1 km Entfernung dann um ca. 30 cm anheben. Wer es besser machen will, stellt sich eine Justierplattform her, deren Dreipunktlagerung in vorn abgerundeten Feingewindeschrauben besteht.

Die seitliche Justierung ist hiermit noch nicht ausreichend zu bewerkstelligen. Man warte also eine leicht diesige Nacht ab, in der man den Strahl nachblickend gerade noch ausmachen kann, und besorge die seitliche Positionierung dann mit Ticken des Fingernagels gegen das Geräteheck. Der letzte Schliff ist durch die Justierschrauben der Dreipunktplattform erzielbar.

#### **Strahldivergenz**

Einen wesentlichen Beitrag zur Lichtabschwächung bei größeren Übertragungswegen „leistet“ die Strahldivergenz, d. h. das allmähliche Anwachsen des Strahldurchmessers.

Gaslaser strahlen in aller Regel Licht von einer Parallelität ab, die nur wenig über der physikalisch überhaupt erreichbaren Minimaldivergenz liegt. Diese Untergrenze beruht auf Beugung, ist lediglich abhängig von Anfangsdurchmesser und Wellenlänge und kann, etwa durch Sammellinsen, nicht weiter reduziert werden, ja hat in der Tat mit geometrischer Optik nicht das mindeste zu tun. Die Berechnungsformel lautet:  $\varphi = 1,22 \cdot \lambda / d_{\text{Blende}}$ , wobei  $\varphi$  = Beugungswinkel =  $\frac{1}{2}$  Kegelwinkel (in Radiant),  $\lambda$  die Lichtwellenlänge und  $d_{\text{Blende}}$  der Anfangsdurchmesser ist (beides in derselben Einheit!). Die ungewohnte Einheit Radiant trägt dabei wesentlich zur Vereinfachung der Rechnung und Anschauung bei, da man hier bei sehr kleinen Winkeln (um nichts anderes geht es aber!) bestimmte trigonometrische Funktionen mit ihren Argumenten gleichsetzen kann. Ein Milliradian bedeutet nichts anderes als eine Zunahme von 1/1000 pro Längeneinheit.

Der ELV-Laser strahlt mit einer Divergenz von etwa 1,5 mrad; er hat in 100 m Entfernung also bereits etwa 15 cm  $\varnothing$ , in 1 km entsprechend 1,50 m.

Da die spezifische Bestrahlungsleistung im Quadrat mit dem Durchmesser sinkt, geht sie rapide zurück. In 10 m Entfernung vom Laser beträgt sie etwa 1/200, in 1 km Entfernung dagegen nurmehr 1/2 000 000 der Strahlungsdichte am Geräteausgang.

Der dargestellten Intensitätsabnahme läßt sich zum Glück auf zweierlei Weise wirksam begegnen.

Zum einen ist es sehr einfach möglich, die am Zielort zum Empfänger gelangende Lichtmenge beträchtlich zu steigern, nämlich durch Vorschalten einer möglichst großen Sammellinse, in deren Brennpunkt der Detektor plaziert wird. Man nehme also eine große Leselupe (ist z. B. für die bekannte Löthilfe „die dritte Hand“ preiswert erhältlich) oder noch besser eine mit einer Fresnellinsenfolie beklebte Glasplatte, und einer Aufbesserung der Empfangssignalstärke um einige Dutzend dB steht nichts mehr im Wege.

Zum anderen kann man den Strahldurchmesser bereits am Sender kontrolliert vergrößern; gemäß obiger Formel sinkt in gleichem Maße die Divergenz. Es dienen hierzu die sogenannten teleskopischen Strahlaufweitungssysteme. Eine erste, meist winzige Präzisionslinse formt den Strahl in ein stark divergentes Bündel, und eine zweite, größere Sammellinse parallelisiert es nach einigem Abstand (= Linsenbrennweite, gemessen vom [teils virtuellen] Brennpunkt aus) wieder.

Ein Selbstbau derartiger Systeme ist grundsätzlich möglich. Doch ist zu bedenken, daß angesichts der extremen Richtungsgenauigkeit, die bei Laserstrahlempfang aus größerer Distanz Bedingung ist (s. o.), erhebliche mechanische Präzision und Robustheit walten müssen. Aufweitungslinsen, speziell auf die HeNe-Wellenlänge hin berechnet und entspiegelt, sind hierzu von einigen renommierten Optikfirmen auch einzeln erhältlich. Verwendet man unspezifische Linsen, kann wegen Linsenfehlern nur ein Bruchteil der theoretischen Divergenzverminderung realisiert werden.

Ein weiteres Problem wäre die Brennweitenjustierung. Erst bei etwa 1/100 mm Genauigkeit kommt man der OptimalEinstellung nahe. Profisysteme besitzen hierzu Differenzgewinde, bei denen sich der Fokussierbereich von 10 m bis  $\infty$  z. B. auf zehn Umdrehungen verteilt. Da die Linsen hierbei nicht gedreht, sondern lediglich verschoben werden, ergibt sich beim Nachjustieren auch kein Auswandern des Strahls. Dies wäre anderenfalls wegen nie ganz exakter Linsenzentrierung und -ausrichtung kaum vermeidbar.

Der Fachhandel bietet Aufweiter von etwa 3x bis 50x. Die letzteren sind wahre „Kanonen“, besitzen mehrlinsige, zentrierbare Optiken und eine spezielle „Reinigungsblende“ für den Eintrittsstrahl (sogenannter Raumfilter). Die Aufweiter werden an die Geräte durch Normschraubgewinde angeflanscht.

Wenn man die gegenüber Fotoobjektiven bestehenden Präzisionsforderungen bedenkt, kann man die Preise für fertige Systeme eigentlich nicht überhöht finden (ca. DM 400,— bis DM 5000,—), lassen sich damit Laserstrahlen nach zwei Kilometern Laufweite immerhin zum Teil auf weniger als 35 mm Durchmesser (!!!) bündeln.

#### **Atmosphärische Lichtdämpfung**

Wie unterschiedlich die Lichtdurchlässigkeit der Atmosphäre sein kann, ist aus eigenem Augenschein bekannt. Da der HeNe-Laser gerade in diesem Spektralbereich strahlt – übrigens ein Gebiet besonders hoher atmosphärischer Durchlässigkeit, ein sogenanntes optisches Fenster –, kann man seine Ausbreitungschancen, zumindest tagsüber, schon recht gut abschätzen. (Ein noch erheblich besseres optisches Fenster besitzt der CO<sub>2</sub>-Laser (etwa Faktor 3). Er strahlt jedoch bei einer weit im Infrarot liegenden Wellenlänge (10,6  $\mu$ m), wodurch sich die beugungsbedingte Divergenz stark erhöht und den Ausbreitungsvorteil überwiegt.)

Atmosphärische Strahldämpfung gehorcht einer e-Funktion, d. h. gleiche Distanzen ergeben Abschwächungen um jeweils den gleichen Faktor. Als Einheit verwendet man daher dB/km. Die hierbei wesentlichen Phänomene sind Streuung, Brechung und Absorption.

**Absorption** verursachen vor allem H<sub>2</sub>O-, CO<sub>2</sub>- und O<sub>3</sub>-Moleküle. Dem Strahl gehen hierdurch zwischen 0,5 und 10 dB/km verloren (Umwandlung in Molekularbewegung, d. h. Wärme).

Der **Streuung** ist zu verdanken, daß man den Laserstrahl im Dunkeln „so schön sehen“ kann: kleinste Partikel in der Luft lenken Teile des Strahls aus ihrer Richtung ab und entziehen ihm damit fortwährend Leistung. Da Streuung bevorzugt um geringe Winkel zur ursprünglichen Strahlrichtung erfolgt, „sieht“ man entgegenkommende Laserstrahlen ungleich besser, als wenn man etwa seitlich steht. Bei stärker dunstiger oder rauchiger Luft ist außerdem feststellbar, daß man den Strahl auch bei achsnahem Nachblicken erkennen kann, während er bei seitlicher Ansicht (noch) nicht sichtbar ist. Dies ist kein Widerspruch. Es wird in der Tat das allerwe-

ngste Licht nach hinten, um  $180^\circ$  also, gestreut, doch erscheinen dem Auge diese wenigen Streuprozesse bei achsnahem Nachblicken auch in einem besonders kleinen Raumwinkel konzentriert und überschreiten daher die Sichtbarkeitsgrenze.

Nächtliche Laserversuche geraten bei Nebel leicht zu ästhetischen Leckerbissen. Aber je mehr man von diesem Licht sieht, desto stärker sinkt natürlich dessen Reichweite. Es empfiehlt sich bei ganz leichtem Dunst zu arbeiten. Die Sichtbarkeit ist für alle Belange (einschließlich Ästhetik) ausreichend, die Dämpfung hingegen, verglichen mit der Intensitätsabnahme durch Divergenz, noch gering.

Der Physiker unterscheidet zwei Arten von Streuung:

1. Die streuenden Teilchen können klein sein gegen die Wellenlänge oder
2. von deren Größenordnung an aufwärts angesiedelt sein.

Im ersten Fall tritt Rayleigh-Streuung auf. Bei HeNe-Licht sind hierfür vor allem Moleküle verantwortlich. Die Rayleigh-Streuung der freien Atmosphäre ist im allgemeinen vernachlässigbar gering.

Anders bei der sogenannten Mie-Streuung: Staub, Nebel, Zigarettenqualm, Schnee und Regen fallen unter diese Kategorie. Die Verluste liegen bei Dunst um 1,5 dB/km, bei Nebel und Regen bei  $4/9 > 20$  dB/km, bei Schnee um  $6/14 > 30$  dB/km, unterschieden jeweils nach leicht/mittel/stark.

Die Gesamtdämpfung eines HeNe-Strahls unterschreitet hierzulande in etwa 40% aller Fälle 1,5 dB/km, ist in 90% aller Fälle besser als 3,5 dB/km, in etwa 1% aller Fälle schlechter als 35 dB/km.

Laserlicht ist aufgrund seiner Kohärenz in hohem Maße interferenzfähig, d.h. verschiedene Wellenzüge können sich je nach Phasenlage entweder addieren oder auch auslöschen. Hauptsächlich deshalb spielt auch die **Lichtbrechung** bei atmosphärischer Lasersignalübertragung eine wichtige Rolle.

Schon bei geringer Projektionsweite erkennt man im Strahllaufpunkt eine Art „Wabern“ (nicht mit dem so faszinierenden Granulationseffekt zu verwechseln!), das von Brechungsschwankungen der Luftstrecke herrührt (thermische Turbulenz) und insbesondere bei bodennaher Strahlführung auftritt. Hierbei entsteht sowohl eine geringe räumliche Schwankung des Aufpunkts (im allgemeinen wenige Prozent von dessen Durchmesser) als auch ein steter Wechsel seiner inneren Helligkeitsverteilung. Die „Frequenzen“ gehen bis einige zig Hertz.

Bei großen Projektionsweiten nimmt der Effekt zu. Weil es dann normalerweise nicht mehr gelingt, das gesamte ankommende Licht auf den Empfänger zu bündeln und die Fluktuationen somit auszumitteln, erhält man eine unfreiwillige, niederfrequente Modulation. Die Größe der verantwortlichen Luftturbulenzzellen liegt bei etwa 15 cm. Daher wird es auch normalerweise nicht möglich sein, einen statistisch ausreichend großen Teilbereich des Bündels aufzufangen. (Beispiel: das altbekannte Flim-

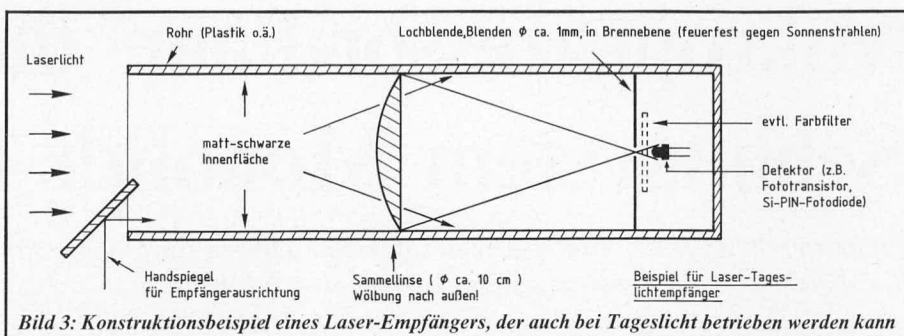


Bild 3: Konstruktionsbeispiel eines Laser-Empfängers, der auch bei Tageslicht betrieben werden kann

mern der Sterne am Nachthimmel verschwindet, sobald man Beobachtungsgeräte mit mehr als 30 cm Eintrittsöffnung benutzt.)

Als Ratschlag bleibt, den Lichtstrahl möglichst mehr als 5 m oberhalb der Erdoberfläche zu führen, da „unten“ die Temperaturdifferenzen erfahrungsgemäß am stärksten sind, und im übrigen digitalisierte Signale (PCM) zu übertragen. Bei Verwendung einer 10 cm großen Empfängerlinse dürften dann kaum noch brechungsbedingte Blackouts auftreten.

### Signalempfang

Da es im Hobbybereich, wie oben angedeutet, kaum um Signalnachweise in Grenzreichen gehen kann, erübrigt sich eine Behandlung der zahlreichen hochspezifischen und -empfindlichen Empfängertypen für Laserlicht. Wichtig ist hier eher die richtige optische Konfiguration des Empfängers. Hinweise hierzu wurden bereits gegeben.

Zu berücksichtigen ist die vergleichsweise kurze Wellenlänge der zu empfangenden Strahlung. Ein Großteil der handelsüblichen Strahlungsdetektoren besitzt seine Vorzugsfrequenz erst im infraroten Bereich. Die Siliziumtechnik fällt hier zum Glück aus dem Rahmen. Es sind sehr schnelle und empfindliche Silizium-Fotodioden (aktiv oder passiv betrieben) ohne weiteres erhältlich. Da die mit innerer Modulation übertragbare Frequenz nicht allzu hoch liegt, können auch die mit einer Anstiegszeit von etwa  $1 \mu s$  recht trägen Silizium-Fototransistoren Verwendung finden. Hierbei erfolgt bereits eine Signalverstärkung um den Faktor 50–100.

Auch „ganz normale“ Fotowiderstände sind für geringe Strahlweiten und Frequenzen unter 10 kHz problemlos einsetzbar. Die einfachste Laser-Lichtschranke benutzt nichts anderes als einen Fotowiderstand, ein in Reihe geschaltetes hochohmiges Miniaturrelais und eine Spannungsquelle. Sorgt man durch geeignete Blenden dafür, daß diese Anordnung wirklich nur aus Richtung des Lasers Licht empfangen kann, ist sie, etwa durch eine Taschenlampe, praktisch nicht manipulierbar, ohne zumindest kurzzeitig auszulösen.

### Tageslichtbetrieb

Obwohl es ein bißchen witzlos ist, spricht nichts dagegen, Signalübertragung per Laserstrahl auch im hellen Sonnenschein zu praktizieren. Denn durch geeignete einfache Maßnahmen läßt sich das Störlicht ohne nennenswerte Schwächung des Nutzsinalns sehr weitgehend ausblenden, so daß der Detektor quasi unter Neumondbedingungen arbeiten kann. Ein Beispiel hierfür

gibt Bild 3. Eine Erklärung erübrigt sich weitgehend. Ein bißchen schwierig ist allerdings die Ausrichtung eines solchen Empfängers, d.h. das Justieren des Linsebrennpunktes genau auf die Blendenöffnung. Man kann hierzu entweder eine verschließbare „Peilklappe“ anbringen oder einen kleinen Handspiegel benutzen, der von vorn, ohne nennenswerte Verdunklung des Eingangsstrahls, Einblick in die Anordnung gewährt.

Eine ganz erhebliche Verbesserung des Störsignalabstandes kann man mit geeigneten Farbfiltern herbeiführen. Einfaches dunkelrotes Glas leistet bereits Beachtliches. Für schwierigere Fälle sind auch sehr schmalbandige Spezialfilter erhältlich. Sie lassen etwa 50% ihrer Auslegungswellenlänge durch, sperren dagegen mehr als 99,9% des sonstigen (sichtbaren) Spektrums.

### Risiken und Handikaps

Abschließend noch ein Wort zu rechtlichen und sonstigen Bedenken.

Bitte beachten Sie: Die Strahlstärke darf an keinem einseharen Ort größer als  $5 \mu W/cm^2$  sein. Als physiologisch unbedenklich gilt das direkte Hineinsehen in einen HeNe-Laserstrahl von 2 mW daher, wenn er einen Durchmesser von ca. 25 cm erreicht hat (DIN 58215). Selbst unter diesen Bedingungen werden Sie aber immer noch eine beträchtliche, ja verblüffende Blendwirkung konstatieren (sie verschwindet bei kohärentem Licht eigentlich nie so ganz). Es leuchtet ein, daß derartige Blendung im Dunkeln mitunter zu Gefährdung führen kann. Seien Sie sich dessen stets bewußt.

Der Betrieb von Laseranlagen durch nicht sachkundige Personen ist derzeit noch ein ziemliches juristisches Vakuum. Das Problem stellte sich bislang ja kaum. Damit hier aber nicht in Kürze unerfreulicher Handlungsbedarf entsteht, kann nur nachdrücklich empfohlen werden, die dadurch existierenden Freiräume verantwortungsvoll zu nutzen und keinesfalls überzustrapazieren. Mit 2 mW kann man schon eine Menge gefährlichen oder zumindest ärgerisierender Unfug treiben.

Die Laser-Hobbygemeinde ist noch klein, aber das wird sich wohl ändern. Daß dabei alle Beteiligten verantwortlich und informiert handeln, ist, außer mit der juristischen Planiermaße, schwerlich garantierbar; seien Sie also umsichtig. Der Rest der „Fans“ wird es Ihnen danken. In der kommenden Ausgabe des „ELV journals“ stellen wir Ihnen die Sende- und Empfangschaltungen vor.