

# Laser-Signal-Übertragung

## Informationsübertragung per Laserstrahl

Teil 1

Die im „ELV journal“ Nr. 52 vorgestellten Artikel über Laser-Grundlagen und Laser-Hardware haben bei unseren Lesern große Resonanz hervorgerufen. In der hier beginnenden Artikelserie wollen wir uns mit der Lasertechnik auf vielfachen Wunsch hin noch detaillierter befassen. Im ersten und zweiten Teil werden die theoretischen Kenntnisse im Hinblick auf die Informationsübertragung per Laserstrahl im Vordergrund stehen. Im dritten Teil folgen dann besonders interessante praktische Anwendungsbeispiele.

Gernot Stoffel  
Bonn

### Grundsätzliches

Die Signalübertragung über modulierte Lichtstrahlen hat gegenüber herkömmlichen, „elektrischen“ Übertragungsarten den prinzipiellen Vorteil, daß ungleich mehr Information per Zeiteinheit übertragen werden kann. Der Faktor gegenüber Mikrowellen beträgt etwa 100 000; hauptsächlich aus diesem Grund erlebt die Lichtleitertechnik seit einigen Jahren eine stürmische Entwicklung.

Es ist theoretisch möglich, über einen einzigen Helium-Neon-Laserstrahl (Frequenz:  $4,74 \times 10^{14}$  Hz) gut  $10^{14}$  bit/sekunde (Einheit: Baud) zu übertragen; groben Eindruck dieser riesigen Zahl erhält man vielleicht, wenn man sich einen massiven Kubus von 13 m Kantenlänge vorstellt, bestehend aus dicht vollgedrucktem Computerpapier. Und zwar beidseitig und, wohl gemerkt, pro Sekunde.

Von derartigen Werten ist die Praxis derzeit jedoch noch weit entfernt. Solch eine ungeheure Datenrate will ja schließlich auch irgendwie aufgeprägt und später dann decodiert und weiterverarbeitet sein. Da man hier nach wie vor auf konventionelle elektrische Verfahren angewiesen ist, drängt sich der Vergleich mit einem Fluß auf, den man durch einen Wasserhahn kanalisieren will.

Mit dem Laser haben wir in der Tat die Herausforderung der „Informationsinstallateure“ in Händen; bei allen technischen Einschränkungen bleibt festzustellen, daß ein haardünnere (Glasfaser-) Lichtleiter dem schönsten, teuersten Koaxial-Kupferkabel um Größenordnungen überlegen ist. Nachteilig ist allenfalls, daß Sende- und Empfangseinrichtungen weniger einfach ausfallen und auf mechanische Oberflächlichkeit erheblich ungnädiger reagieren. Hierin liegt ein Großteil der Kosten für diese neuartige Technik.

Lichtleiter zur Datenübertragung werden heute nahezu ausschließlich über Leucht- oder Laserdioden angesteuert; hinsichtlich Lebensdauer, Größe, Wirkungsgrad und

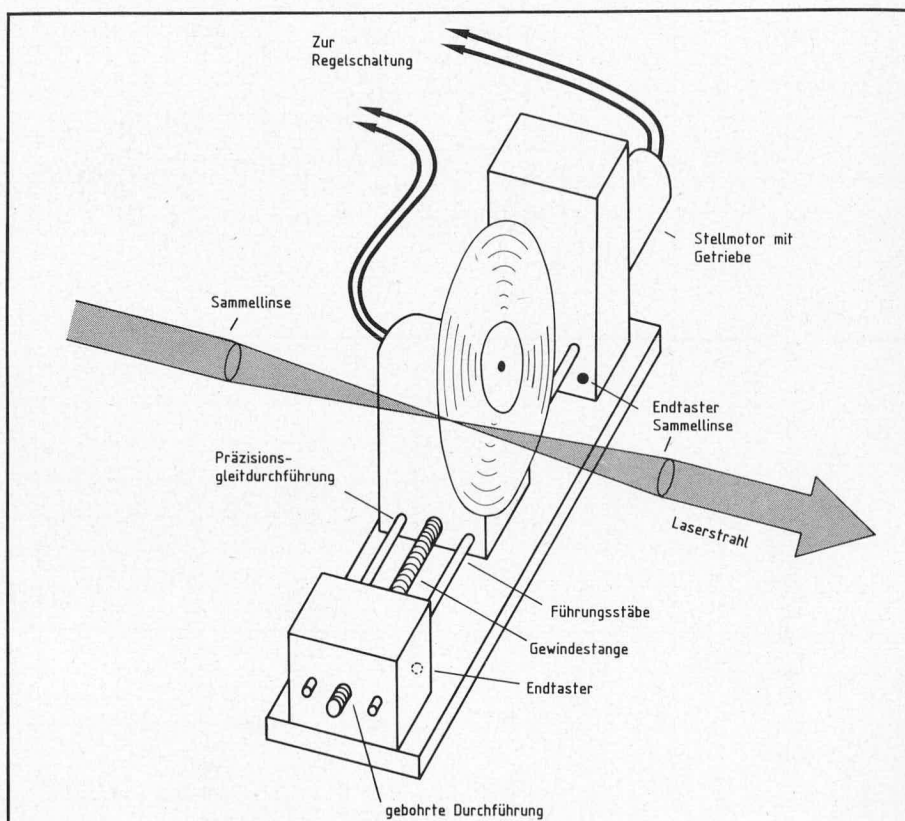
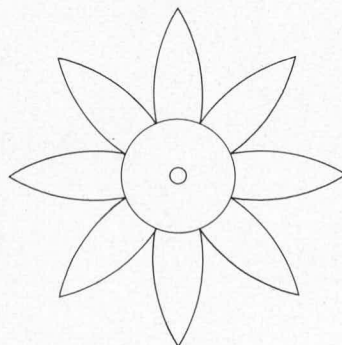
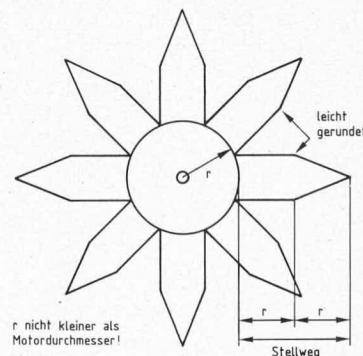


Bild 1: Prinzipielle Aufbauskiizze eines mechanischen Strahlzerhackers



$$\left( t_{\text{ein}} \text{ zu } t_{\text{aus}} = \frac{\text{geregelter Strecke}}{\text{Restregelstrecke}} \right)$$

Idealform der Rotorscheibe zur Verstellung des Puls-/Pausen-Verhältnisses



Achtung:  
Gleichförmigkeit der Zerhackerscheibe (dünne Edelmetallfederstahlplatte!) sollte bei unter 1/10mm liegen.  
Herstellung z.B. durch Ätztechnik.

Hinreichende Form der Rotorscheibe zur Verstellung des Puls-/Pausen-Verhältnisses

Ansteuerbarkeit besitzen sie gegenüber dem Gaslaser gewaltige Vorteile. Und die Lichtübertragung durch die freie Atmosphäre ist in gleicher Weise „out“, was knallharte professionelle Belange angeht; zu unsicher sind die Betriebsbedingungen, zu schwierig die Justierarbeiten. Immerhin gibt es heute schon Lichtleiter, deren Durchlässigkeit in bestimmten Spektralbereichen die der irdischen Lufthülle selbst unter Idealbedingungen weit übertrifft.

Dennoch will sich dieser Artikel gründlich mit optischer Signalübertragung via Gaslaser und Atmosphäre befassen; und dies ist nicht etwa steinzeitlich, sondern hat viel mit einer Sache zu tun, die bei „professioneller“ Lichtleitertechnik nahezu völlig auf der Strecke bleibt: mit Faszination und Experimentierfreude. Wie sich das für einen „Show-Laser“ auch gehört. Beethovens „NEUNTE“, die als mattschimmernder Lichtstrahl aus der lauen Nachtluft ins Zimmer strömt, über zwei Kilometer kalter Einöde hinweg, hat ja auch nichts mehr mit HiFi zu tun, wenn es plötzlich einen wilden Aussetzer gibt, weil sich irgendwo eine Eule zum Mäusefang entschlossen hat.

## **Die wichtigsten äußeren Modulationsverfahren**

Will man einem Lichtstrahl Information aufbürden, muß man ihn modulieren, d. h. seine Intensität und/oder seine Laufrichtung variieren. Technisch gibt es hierzu eine ganze Reihe von Methoden. Ihr Einsatz für bestimmte Zwecke gehorcht den jeweiligen Vor- und Nachteilen.

### **1. Strahlzerhacker**

Die zweifellos einfachste Art der Modulation wird durch eine steuerbare mechanische Blende, engl. „chopper“ (= Zerhacker) bewirkt. Man denke nur an das Lichtmorsen auf See, das per Scheinwerfer und (manueller) Klappblende bewerkstelligt wird.

Neben elektromechanischen Choppern ist vor allem die rotierende Loch- oder Flügelscheibe interessant, mit der sich aus dem kontinuierlichen Strahl eine gleichmäßige Folge von Pulsen oder Pulssequenzen erzeugen läßt. Einfachstes Beispiel: Der Laserstrahl wird durch die Flügel eines Ventilators zerhackt. Zur Datenübertragung ist diese Methode nahezu komplett ungeeignet. Man kann zwar die Rotordrehzahl

variieren, aber das dauert eben seine Zeit. Außerdem erfolgt die Austastung des Strahls, bedingt durch dessen Durchmesser, relativ unscharf. Zur Abhilfe kann man sich allerdings über 2 gleichartige Linsen einen Zwischenbrennpunkt erzeugen, der genau in der Zerhackerebene liegt (Bild 1).

Vorteilhaft ist, daß sich, etwa mittels genau gesteuerter Synchronmotoren, Pulsfrequenzen beliebiger Konstanz einprägen lassen. Das Verfahren eignet sich daher sehr gut zum Aufbau „überlistungssicherer“ Lichtschranken, bei denen der Empfänger genau auf Pulsfrequenz und -anordnung abgestimmt ist. Berücksichtigt man die Möglichkeit des Aufbaus ungleichförmiger Zerhackerscheiben, läßt sich der Einsatz beliebig komplexer Schlüssel-Schloß-Systeme, ja sogar hierarchischer Systeme denken. Phantasie und Bastlertrieb sind keine Grenzen gesetzt.

Elektromechanische Chopper finden ihre Anwendung vor allem in Bühnenlaseranlagen. Sie bieten zwar die Möglichkeit der diskontinuierlichen Steuerung, doch sind dem aufgrund der Systemträgheit enge Grenzen gesetzt (einige kHz). Nennenswer-

te Datenraten sind auf diese Weise nicht übertragbar. Zu erwähnen wäre noch ein relativ hoher Preis sowie der allen mechanischen Systemen anhaftende Hang zu Verschleiß, Vibrations- und Geräuschemission.

## 2. Kippspiegel

Das räumliche Gegenstück zum Strahlzerhacker ist der elektromechanisch getriebene Kippspiegel, allgemein „Scanner“ genannt. Er ist im Prinzip aufgebaut wie ein kräftiges Drehspulinstrument mit einem kleinen Spiegel anstatt der Nadel. Ein Scanner fächert den Laserstrahl somit zu einem rasch hin- und herlaufenden Lichtpunkt auf, der dem Auge bei Frequenzen ab etwa 10 Hz als ruhige Linie erscheint. Scanningfrequenz und -amplitude werden über spezielle, genau auf die Systemparameter abgestimmte unlineare Treiberschaltungen gesteuert.

Durch Hintereinanderschalten zweier Scanner „über Kreuz“ lassen sich zweidimensionale Muster zeichnen – im einfachsten Fall die altbekannten Lissajous'schen Figuren.

Es gibt mittlerweile extrem schnelle Scanner (zu entsprechend hohen Preisen), mit denen sich Frequenzen von einigen zig Kilohertz verarbeiten lassen. Da Spiegel und Drehspule unweigerlich Trägheit besitzen und Federresonanz absolut unerwünscht ist, kann man sich ausmalen, zu welchen Energieumwandlungsraten es hierbei kommt – der Nachteil der schwingenden gegenüber einer drehenden Bewegung.

Ausgefeilte Computerprogramme und Spannungssynthesizer können über ein genügend flinkes x/y-Scannerpaar auch komplizierte gegenständliche Figuren und Schriften projizieren. Die meisten großen Werbe- und Showlaseranlagen arbeiten nach diesem Prinzip. Die Trägheit respektive Qualität der verwendeten Scanner erkennt das geübte Auge an der Flimmerrate und den Überschwängwülsten bei scharfen Figurenkicks. Als Lichtquelle werden im allgemeinen leistungsstarke, wassergekühlte Argon- und Krypton-Ionen-Laser eingesetzt, die bei unsachgemäßem Gebrauch zu einer erheblichen Gefahr für das Augenlicht werden können.

(Für die Experten unter unseren Lesern sei noch angemerkt, daß man bei Scannern, ausgehend von glatten Wechselspannungen, 2 x/y-Paare benötigt, will man die Figuren des ELV-Show-Lasers nachbilden. Umgekehrt braucht man zur Erzeugung von Lissajous-Figuren per Drehspiegel ebenfalls zwei Paare von Motoren jeweils gleicher (gegenläufiger) Frequenz und Ablenkung.)

## 3. Ultraschallmodulator

Noch entfernt mit herkömmlicher Mechanik zu tun hat ein Modulationsprinzip, das in den meisten, wenn nicht allen Laserdruckern verwendet wird und den schönen Namen „akustooptischer Modulator“ trägt. Dies hat nichts zu tun mit einem Lautsprecher, dessen Membrane einen federnd befestigten Spiegel antreibt (gibt allerdings für Showeffekte viel her!), sondern ist High-Tech erster Güte.

Ein planparalleler Glasblock oder auch eine entsprechend geformte Flüssigkeitsküvette wird unter einem exakt definierten Winkel von einem Laserstrahl durchsetzt. Seitlich angebracht ist ein Wandler, der den Körper mit einer extrem hohen Ultraschallfrequenz beaufschlagt (40–500 MHz). Hierdurch entstehen im Medium periodische Dichteschwankungen, deren Abstand in der Größenordnung der Lichtwelle liegt – eine Art Gitterstruktur also. An ihr wird ein Teil des Laserlichts abgelenkt – fachkundig: gebeugt.

Diese Ablenkung wird auch in der Röntgenlicht-Kristallographie ausgenutzt (Laue-Diagramme) und ist als Bragg (sprich: Bräck)-Reflexion bekannt; je nach Schallintensität kann man nahezu die gesamte Strahlenergie in die neue Richtung umlenken.

Bedingt durch die hohe Frequenz des ablenkenden Ultraschallfeldes besitzt man also eine recht flinke Möglichkeit der Modulation des durchgelassenen oder, wichtiger, des abgelenkten Laserstrahls. Denn durch Verändern der Schallfrequenz ist auch der Ablenkwinkel variabel. Da dabei aber gleichzeitig auch der Eintrittswinkel des Strahls optimiert werden müßte, was technisch undurchführbar ist, lassen sich nur sehr geringe Winkeldifferenzen herbeiführen. Was aber andererseits, etwa für Laserdrucker, den Vorteil exzellenter Feinsteuerbarkeit bedeutet.

## 4. Kristalloptische Modulatoren

Eine Reihe von Methoden zur Intensitätsmodulation beruht auf Manipulationen an polarisiertem Licht. Bei linear polarisiertem Licht schwingt der E-Vektor nur in einer Schwingungsrichtung, z. B. der vertikalen Ebene, und nicht statistisch „kreuz und quer“.

Obwohl der Laserprozeß grundsätzlich keine Polarisationsrichtung begünstigt und Laser daher im allgemeinen unpolarisiert strahlen, erfolgt jede einzelne stimulierte Emission eines Lichtteilchens exakt in der Polarisationsrichtung des jeweils auslösenden Teilchens. Sorgt man also dafür, daß der Resonator des Lasers für eine bestimmte Polarisationsrichtung besonders geringe innere Verluste aufweist, stellt sich per Rückkopplung der gesamte Laserprozeß darauf ein, und es wird ein sehr hochgradig polarisiertes Licht emittiert.

Vor Jahren noch strahlten alle käuflichen Edelgaslaser/röhren ausschließlich polarisiertes Licht ab, da sich die Resonatorspiegel außerhalb der eigentlichen Röhre befanden und man zur verlustlosen Auskoppelung des Lichts einen optischen Trick namens Brewsterfenster anwenden mußte. Dieser begünstigt aber genau eine Polarisationsrichtung. Der Anwender hat hierdurch fast nur Vorteile, da er, etwa bei gekapselten Aufbauten, seine Ein- und Austrittsfenster ebenfalls verlustfrei (d. h. ohne Oberflächenreflexe) gestalten kann und somit teure Lichtenergie spart und Störlicht vermeidet.

Bei den heute üblichen Instant-HeNe-Laserröhren stehen die Resonationspiegel direkt mit dem Gas in Verbindung. Daher entfällt im allgemeinen die Polarisierung,

denn für Brewsterfenster besteht im Grunde kein Bedarf mehr. Wenn man also polarisiertes Licht benötigt, hat man die Wahl, entweder einen Filter vorzuschalten und daran 50 % des teuren Lichts zu verlieren, oder man legt sich – gegen oft saftigen Aufpreis – eine gleichartige Laserröhre mit integriertem Brewsterfenster zu.

Die Röhre des ELV-Lasers indes besitzt, trotz ihres sehr günstigen Preises, von vornherein ein solches Fenster und entbindet den Anwender von derartigen Überlegungen.

Die Modulation per Polarisation beruht, wie auch bei den altbekannten LCDs, stets darauf, daß die Polarisationssebene beim Lichtdurchgang durch bestimmte Medien (gesteuert) gedreht wird, so daß ein nachgeschalteter Polarisationsfilter (sogenannter Analysator) dann je nach Drehwinkel alles bis gar nichts mehr durchläßt.

Unterschiedlich sind hierbei die Verfahren, nach denen die Drehung bewirkt und gesteuert wird. Es gibt den quadratischen und linearen elektrooptischen Effekt (Kerr- bzw. Pockelszelle) sowie den auch für das Hobbylabor interessanten (da erschwinglichen) Faraday-Modulator. In Kerr- und Pockelszellen wird die Polarisationsrichtung durch Anlegen einer hohen elektrischen Spannung an 2 gegenüberliegende Elektroden des Mediums gesteuert. Bei den gängigen Kristallgrößen (Kantenlänge um 5 mm) sind einige bis einige zig kV nötig. Technisch wird vor allem die Pockelszelle benutzt. Es lassen sich Anstiegszeiten im Picosekundenbereich und damit immerhin Modulationsfrequenzen um 100 GHz erreichen. Nachteilig ist allenfalls, daß eine schlüsselfertige kristalloptische Modulationsanlage so teuer wie ein halbes Dutzend Kleinwagen ist und daher in Hobbykreisen wohl kaum angetroffen wird.

Anders beim Faraday-Effekt. Er besteht darin, daß bestimmte Glassorten bei Anlegen eines starken Magnetfeldes doppelbrechend werden und die Polarisationssebene von längs dieser Feldlinien durchfallendem Licht drehen. Ein Faraday-Modulator ist also ein beidseitig plangeschliffener Spezialglasstab im Inneren einer kräftigen elektrischen Spule. Was ihn für manche Demonstrationsanwendungen interessant macht, ist sein relativ günstiger Preis. Der Faraday-Effekt ist aber schwach, so daß zum Erreichen nennenswerter Modulationsgrade bereits beträchtliche Ströme fließen müssen. Die hierdurch bedingte hohe Induktivität der Spule begrenzt die theoretische Bandbreite auf etwa 100 kHz. Die erforderliche Leistung ist hoch und ein Dauerbetrieb ist daher in den seltensten Fällen möglich. (Beispiel aus der Praxis: Faradaymodulator der Fa. Spindler & Hoeyer, Göttingen, Ø 25 mm x 80 mm, Induktivität 1 mH, Gleichstromwiderstand 1,7 Ω, Frequenzbereich bis 3 kHz, max. Belastbarkeit 50 Watt für eine Minute, Drehwinkel ca. 1°/Ampère, Preis ca. 250,- DM.)

In der kommenden Ausgabe des „ELV journal“ werden die elektronischen Modulationsverfahren – die sog. „Direkte Modulation“ – ausführlich besprochen.