Die axialen und transversalen Moden eines Laserresonators

Die Modenstruktur eines Lasers bestimmt die räumliche Verteilung der Laserleistung über dem Strahlquerschnitt. Sie ist daher ein wichtiges Charakteristikum eines Lasers. Was versteht man jedoch unter den axialen und transversalen Moden eines Lasers?

Prof. Dr. Axel Donges/Isny im Allgäu

■ Wir betrachten zum Einstieg in die Problematik zunächst ein räumlich eindimensionales Problem: die Eigenschwingungen eines beidseitig eingespannten Seils (z.B. Gitarrensaite). Wird eine solche Saite harmonisch angeregt, so treten bei ganz bestimmten Frequenzen, den sogenannten *Eigenfrequenzen,* Resonanzen auf, d.h. es bilden sich stehende Wellen aus. Zu jeder Eigenfrequenz gehört eine typische Schwingungsform der Saite. Diese Schwingungsformen werden *Eigenschwingungen* oder *Moden* der Saite genannt. Abbildung 1 zeigt drei Beispiele. Die möglichen Eigenschwingungen des Seils zeichnen sich dadurch aus, dass die Seillänge gerade einem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge entspricht. Eigenschwingungen können sich deshalb nur bei den sogenannten Eigenfrequenzen

$$f_q = q\frac{c}{2L} (q = 1, 2, 3, ...)$$

ausbilden (c – Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen, L – Länge des Seils).

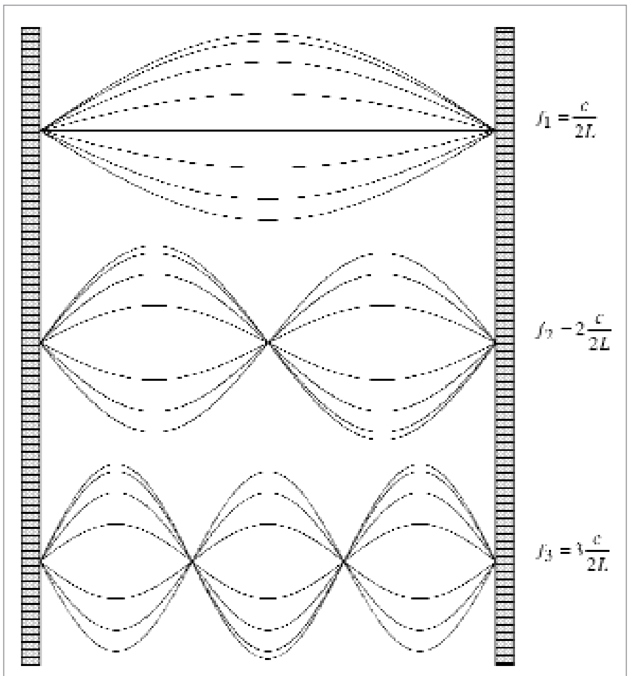


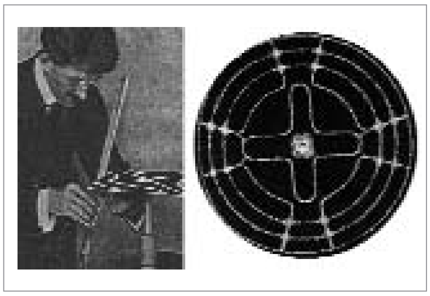
Abb.1: Dargestellt sind für drei verschiedene Eigenschwingungen einer eingespannten Saite die Auslenkungen der Saite zu acht verschiedenen Zeitpunkten.

Eigenschwingungen einer Membran

Wir gehen nun zu einem räumlich zweidimensionalen Beispiel über: Den Eigenschwingungen einer Membran oder Platte. Auf solche flächenhaften Strukturen bilden sich ebenfalls bei ganz bestimmten Eigenfrequenzen Eigenschwingungen aus, für die sich jedoch nicht mehr so eine einfache Gleichung wie im Fall der Saite angeben lässt. Der deutsche Physiker Ernst Chladni entdeckte 1787 die nach ihm benannten *Klangfiguren*. Chladni strich mit einem Geigenbogen Metallscheiben an, die er zuvor mit feinem Sand bestreut hatte. So machte er die Eigenschwingungen der Scheiben sichtbar (Abb. 2). Zur Erklärung: Zwischen den Knotenlinien, die stets in Ruhe sind, schwingt die Platte auf und ab und der Sand „tanzt" auf der Platte und sammelt sich in den ruhenden Knotenlinien an, die auf diese Weise sichtbar werden. Abbildung 3 zeigt zusätzlich einige Momentaufnahmen einer schwingenden rechteckigen Membran oder Platte.

Elektromagnetische Eigenschwingungen in einem optischen Resonator

Als letztes Beispiel betrachten wir elektromagnetische Eigenschwingungen in einem (räumlich dreidimensionalen) optischen Resonator. So wie sich stehende Wellen auf einem Seil oder auf einer Platte ausbilden können, so können sich auch stehende Lichtwellen zwischen zwei Spiegeln ausbilden. Diese Eigenschwingungen ähneln den zuvor betrachteten Beispielen. Zwischen den Spiegeln bauen sich (analog zur schwingenden Saite) stehende Wellen aus, die sich durch die Anzahl der Knoten entlang der Resonatorachse unterscheiden (*axiale* oder *longitudinale* Moden). Wegen der transversalen Begrenztheit des Resonators und den damit verbundenen Beugungseffekten bildet sich (in Analogie zu den zuvor betrachteten Plattenschwingungen) ein transversales Intensitätsmuster aus. Die Eigenschwingungen oder Moden des Resonators werden mit der Abkürzung TEM_{mnq} charakterisiert. Hierbei erinnert TEM daran, dass Licht eine transversale elektromagnetische Welle ist, d.h. dass das elektrische und magnetische Feld der Welle senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung steht. q+1 gibt die Anzahl der Knoten längs der Resonatorachse an. In



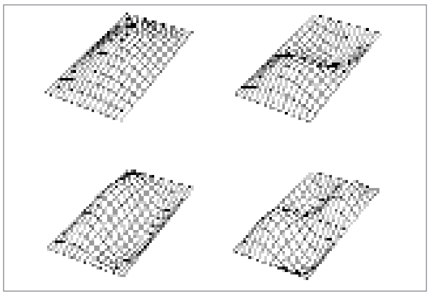


Abb. 2: Mit einem Geigenbogen wird eine mit (hellem) Sand bestreute (dunkle) Platte in Schwingungen versetzt. Es bilden sich bei den Eigenfrequenzen sogenannte Chladnische Klangfiguren aus (aus: Die Wunder der Natur, Deutsches Verlagshaus Wien-Stuttgart, 1912). Der Sand sammelt sich in den Knotenlinien an. Dazwischen liegen die Bereiche der Platte, die schwingen. – **Abb. 3:** Momentaufnahmen einer schwingenden rechteckigen Membran. Die vier Bilder zeigen vier verschiedene Eigenschwingungen.

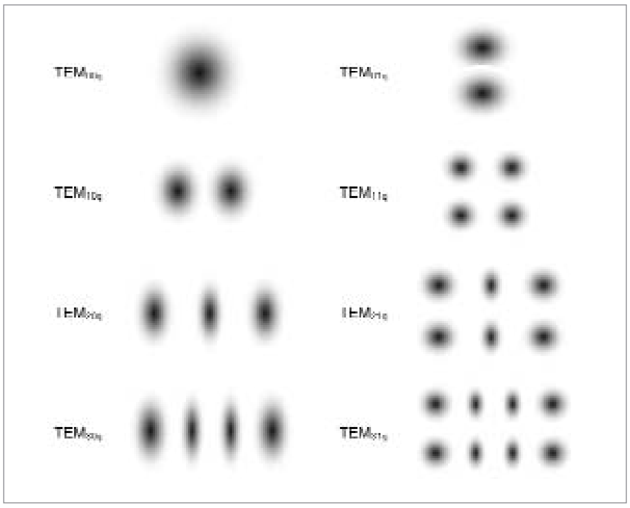


Abb. 4: Schematische Darstellung der Intensitätsverteilung einiger transversaler Moden quer zur Resonatorachse (je dunkler, desto intensiver).

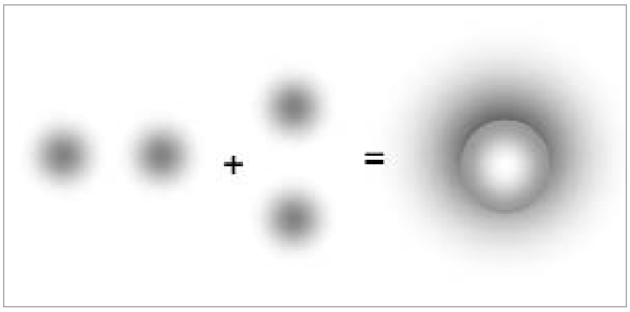


Abb. 5: Die Überlagerung eines TEM_{10q}- und eines TEM_{01q}-Modes, die gegeneinander nicht phasenverschoben sind, führt zu einem ringförmigen „Doughnut"-Mode.

der Regel ist diese Zahl sehr groß. Die Zahlen *m* und *n* charakterisieren die transversale Modenstruktur. Abbildung 4 zeigt schematisch die Intensitätsverteilung einiger transversaler Moden. Der *transversale Grundmode* (TEM_{00q}) besitzt die geringste beugungsbedingte Divergenz und damit auch die kleinsten Beugungsverluste. Er schwingt daher in der Regel bevorzugt an. Durch gezieltes Verkippen der Resonatorspiegel lassen sich auch höhere transversale Moden anregen. Die Eigenfrequenzen der Moden sind in erster Näherung durch die Gleichung gegeben.

Überlagerung von Moden

In einem Laserresonator können gleichzeitig mehrere Moden schwingen *(Multimode-Laser)*. Ist nur ein einzelner Mode angeregt, liegt ein Singlemode-Laser vor. Abbildung 5 zeigt als Beispiel die phasengleiche Überlagerung zweier transversaler Moden, nämlich des TEM_{10q} und TEM_{01q} zu einem ringförmigen „Doughnut"-Mode. Ein weiteres, sehr wichtiges Beispiel ist die Überlagerung von phasenstarr gekoppelten axialen Moden *(Modenkopplung)*, was zu einer gepulsten Laserstrahlung führt. Abbildung 6 zeigt als Beispiel die Überlagerung von zwei benachbarten axialen Moden (Frequenzunterschied: $c/(2L)$). ■

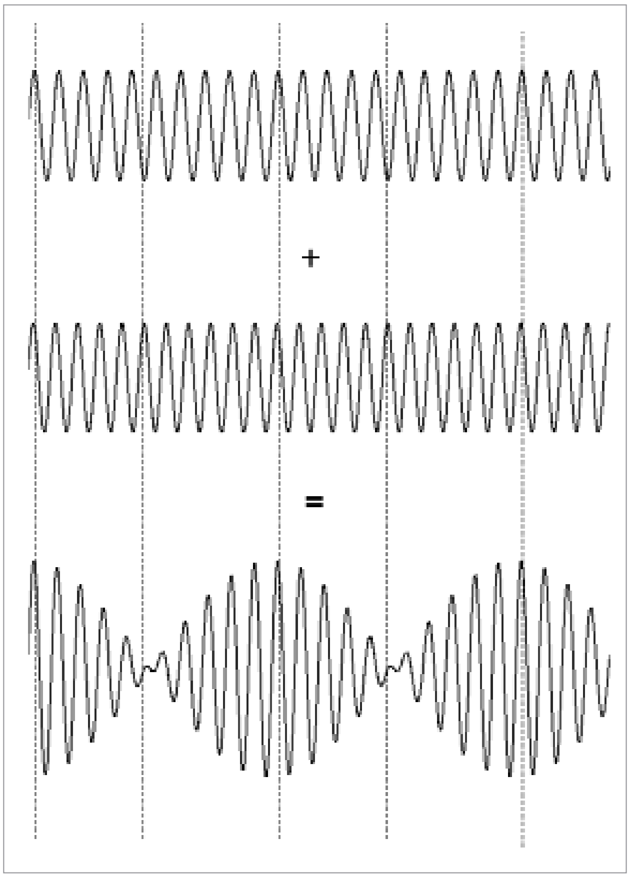


Abb. 6: Überlagerung zweier axialer Moden, die sich geringfügig in der Frequenz unterscheiden. Die resultierende Welle zeigt das Phänomen der Schwebung, d.h. die Amplitude der Welle ändert sich im Laufe der Zeit periodisch.

KONTAKT

Prof. Dr. Axel Donges
Fachhochschule des Berufskollegs NTA
Seidenstraße 12–35
88316 Isny im Allgäu