

# Das zeitliche Emissionsverhalten eines beugungsbegrenzten kontinuierlichen Rubinlasers

D. Röss

Siemens & Halske AG, Zentrallaboratorium für Nachrichtentechnik

(Z. Naturforsch. **20 a**, 1655—1660 [1965]; eingegangen am 8. September 1965)

Das zeitliche Emissionsverhalten einzelner axialer Moden eines bei Zimmertemperatur im transversalen Grundmode schwingenden kontinuierlichen ebenen Rubinlasers von 2,5 cm Länge wurde mit einem FABRY-PEROT-Interferometer untersucht.

Die Gesamtemission zeigt quasiperiodische Relaxationsimpulse mit einer periodischen Modulation der Umhüllenden. Die Emission eines der 11 aktiven axialen Moden ist nahe der Schwelle auf periodische Emissionspakete von 0,5—1 ms Dauer bei etwa gleichlangen Emissionspausen beschränkt.

Auch bei hoher Pumpleistung bleibt der kontinuierliche Emissionsanteil eines Mode klein gegen die Spitzenleistung in den Relaxationsimpulsen. In der Gesamtemission wird durch die Aufsummierung der phasenverschobenen Relaxationsimpulse aller Moden dagegen bei hoher Pumpleistung der kontinuierliche Anteil vergleichbar mit den Spitzenwerten.

Durch Wobbelung der Phasenflächen im aktiven Material sollte sich in einem Laserresonator ein räumlich konzentrierter Inversionsabbau verhindern lassen, der als Ursache für die Koexistenz mehrerer axialer Moden und der daraus folgenden Instabilitäten anzusehen ist.

## 1. Experimentelle Anordnung

Die Untersuchung der zeitlichen Emission von gepulsten Rubinlasern führt je nach den Versuchsbedingungen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Einfache und reproduzierbare Relaxationsschwingungen werden überwiegend unter Verhältnissen beobachtet, bei denen eine große Anzahl von Schwingungsmoden gleichzeitig auftritt, wie in Ringresonatoren<sup>1, 2</sup> oder in Resonatoren mit gekrümmten Spiegeln<sup>3–6</sup>. Die in diesen Fällen beobachtete periodische oder gedämpft periodisch in kontinuierliche Emission übergehende Schwingung stellt die Summe der Emission zahlreicher untereinander verkoppelter Moden dar. Sobald die aktive Modenzahl durch axiale und transversale Modenselektion reduziert wird, geht das einfache Emissionsverhalten in der Regel verloren. Die Relaxationsschwingungen werden unregelmäßig, wobei eine gewisse quasiperiodische Modulation der Umhüllenden zu beobachten ist, und der kontinuierliche Anteil wird klein. Bei höchster Selektion z. B. durch gekoppelte Resonatoren, die nur einen einzigen Mode fester Frequenz in einem gegebenen Zeitpunkt zulassen, bilden sich zeitlich abgesetzte, etwa 100  $\mu$ s lange Emissionspakete

aus, in denen der Oszillator jeweils andere Moden emittiert<sup>7</sup>.

Die Instabilität der einzelnen Moden eines Rubinlasers ist einmal durch die starke Abhängigkeit der optischen Stablänge, der effektiven Resonatorkrümmung und der Lage der Linienmitte von der in einem Pumpimpuls zeitlich variablen Kristalltemperatur bedingt. Außerdem führt der zeitlich variable Durchmesser der aktiven Kristallzone zu einer Änderung der FRESNEL-Zahl und der Modenselektion. Als dritte Ursache für zeitliche Instabilitäten ist schließlich das Auftreten eines räumlich konzentrierten Inversionsabbaus in den Schwingungsbäuchen des betreffenden Mode zu berücksichtigen<sup>8</sup>. Die Charakteristika der einzelnen Effekte führen z. B. dazu, daß das spezielle Verhalten eines Lasers davon abhängt, ob die Resonatorspiegel direkt auf das Material aufgebracht oder getrennt davon aufgestellt sind und wo sich im letzteren Fall das aktive Material zwischen den äußeren Spiegeln befindet.

Es ist inzwischen möglich geworden, Rubinlaser bei Zimmertemperatur kontinuierlich zu betreiben<sup>9–11</sup>. Damit kann nunmehr das zeitliche Emissionsverhalten im thermischen Gleichgewicht studiert werden, wobei ein wesentlich vereinfachtes Verhalten zu erwarten

<sup>1</sup> D. Röss, Proc. IEEE **51**, 468 [1963].

<sup>2</sup> P. WALSH u. G. KEMENY, J. Appl. Phys. **34**, 956 [1963].

<sup>3</sup> R. E. JOHNSON, W. H. McMAHAN, F. J. OHAREK u. A. P. SHET-PARD, Proc. IRE **49**, 1942 [1961].

<sup>4</sup> K. GÜRS, Z. Naturforsch. **17 a**, 990 [1962].

<sup>5</sup> K. GÜRS, Z. Naturforsch. **18 a**, 1363 [1963].

<sup>6</sup> D. Röss, G. GEHRER u. W. HEINLEIN, Z. Naturforsch. **20 a**, 256 [1965].

<sup>7</sup> D. Röss, Proc. IEEE **52**, 196 [1964].

<sup>8</sup> C. L. TANG, H. STATZ u. G. DEMARS, J. Appl. Phys. **34**, 2289 [1963].

<sup>9</sup> D. Röss, Microwaves **1965**, Nr. 4, S. 29; Electronics **38**, Nr. 3, S. 17 [1965].

<sup>10</sup> K. GÜRS, Phys. Letters, in Vorbereitung.

<sup>11</sup> V. EVTUHOV u. J. K. NEELAND, Appl. Phys. Letters **6** (4), 75 [1965].



ist. Weiter zeigten wir, daß kontinuierliche Rubinlaser mit FABRY-PEROT-Resonator ohne zusätzliche transversale Selektion in einem großen Bereich der Pumpleistung beugungsbegrenzt im Grundmode, oder bei Selektion durch Unsymmetrien in einem transversalen Mode niedriger Ordnung, schwingen<sup>12</sup>. Abb. 1 zeigt als Beispiel das Fernfeld des Grundmode für eine Ausgangsleistung von 50 mW. Die Beobachtungen an einem solchen Laser werden nicht mehr durch das zeitliche Nacheinander verschiedener transversaler Moden kompliziert.

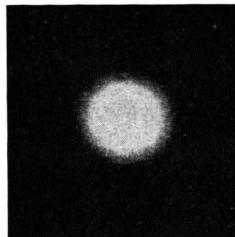


Abb. 1. Fernfeldaufnahme des Grundmode eines kontinuierlichen FABRY-PEROT-Lasers.

Wir haben für die Untersuchung des zeitlichen Schwingungsverhaltens im kontinuierlichen Betrieb einen direkt an den ebenen, planparallelen Enden verspiegelten, ummantelten Rubin mit 2 mm Kerndurchmesser und 25 mm Stablänge verwendet. Die dielektrischen Spiegel hatten 99 und 95% Reflexion. Der Stab wurde in einem nichtfokalen ellipsoiden Pumpspeigel<sup>13</sup> von 1 Zoll Systemlänge mit einer Quecksilberbogenlampe vom Typ A unter Wasserkühlung gepumpt<sup>9</sup>. Die Pumpleistung lag in einem Bereich bis zur 1,2-fachen Schwell-Leistung; dabei treten in dem Stab nach früheren Messungen<sup>12</sup> 6–25 axiale Moden auf. (Wegen der geringen axialen Modendichte wurde für diese Untersuchung ein möglichst kurzer Stab verwendet.) Der Rubinstab wurde so in die Beleuchtungsachse des Ellipsoids einjustiert, daß für alle Pumpleistungen der Grundmode  $TEM_{00}$  weitaus überwiegend angeregt wurde.

Die Emission des Lasers trifft nach Abb. 2 auf ein hochauflösendes FABRY-PEROT-Interferometer in einen

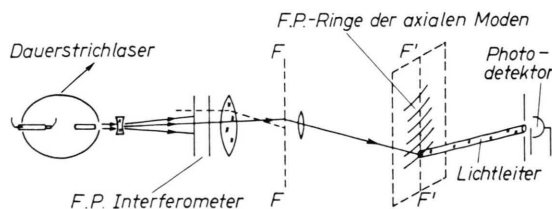


Abb. 2. Experimentelle Anordnung zur Untersuchung der Emission eines axialen Mode.

solchen Winkelbereich auf, daß in der Brennebene FF einer Linse gerade ein Dispersionsbereich ausgeleuchtet wird. Die FABRY-PEROT-Ringe werden mit einem Mikroskop-Objektiv vergrößert in der Beobachtungsebene F'F' abgebildet. Mit einem Lichtleiter kann die zeitliche Emission einzelner axialer Moden abgetastet und in einem Photomultiplier aufgelöst werden. Zur Beobachtung der spektral nichtaufgelösten Gesamtemission wird das FABRY-PEROT-Interferometer aus dem Strahlengang geschwenkt und in F'F' eine Streufolie eingesetzt.

Durch die Optik werden die FABRY-PEROT-Ringe der einzelnen axialen Moden in der Beobachtungsebene rund 5 mm getrennt, so daß sie ohne Schwierigkeit einzeln beobachtet werden können.

Zeitliche Fluktuationen der Kristalltemperatur führen zu unregelmäßigen Variationen der Resonanzfrequenzen um maximal einen Modenabstand. Solche Instabilitäten wurden bei den Messungen durch visuelle Kontrolle des Ringsystems während der Aufnahmen ausgeschaltet.

## 2. Beobachtungen bei streng kontinuierlichem Betrieb

Abb. 3 zeigt Oszillogramme der zeitlichen Emission bei Pumpen mit Gleichlicht ohne Restwelligkeit. Bei den einzelnen Aufnahmen mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung ist die Pumpleistung etwa gleich der 1,1-fachen Schwell-Leistung; die Aufnahmen sind jedoch nicht quantitativ gleich wegen langzeitlicher Schwankungen der Lampenausbeute.

Die Emission ist durch ausgeprägte Relaxationschwingungen gekennzeichnet, in denen die Spitzenleistung bei mittleren Leistungen von rund 20 mW kurzzeitig Werte von 1 W überschreitet. Die Relaxations-Impulse folgen quasiperiodisch mit Impulsabständen im Bereich von 15–20  $\mu$ s aufeinander. Die Umhüllende der Relaxationsimpulse zeigt eine quasiperiodische Modulation mit einer Periode von rund 200  $\mu$ s. In den Minima dieser Umhüllenden treten Phasensprünge der Relaxationsschwingung auf; dabei wird die Emission kurzzeitig überwiegend kontinuierlich. Die Relaxationsimpulse sind einem kleinen, aber durchaus endlichen kontinuierlichen Strahlungsanteil überlagert.

Die Beobachtungen entsprechen den Befunden an Impulslasern bei Betrieb nahe der Schwelle<sup>14, 15</sup> und sind auch ähnlich den Ergebnissen von NELSON und BOYLE am kontinuierlichen Rubin-„Trompeten“-Laser bei 78 °K<sup>16</sup>. Wir hatten die Beobachtungen am gepulsten Laser durch die Hypothese zu erklären ver-

<sup>12</sup> D. Röss, Z. Naturforschg. **20 a**, 1348 [1965].

<sup>13</sup> D. Röss, Appl. Opt. **3**, 259 [1964].

<sup>14</sup> M. BIRNBAUM u. T. L. STOCKER, Appl. Phys. Letters **3**, 164 [1963].

<sup>15</sup> D. Röss, Z. Naturforschg. **19 a**, 387 [1964].

<sup>16</sup> D. F. NELSON u. W. S. BOYLE, Appl. Opt. Suppl. **1**, 99 [1962]; Appl. Opt. **1**, 181 [1962].

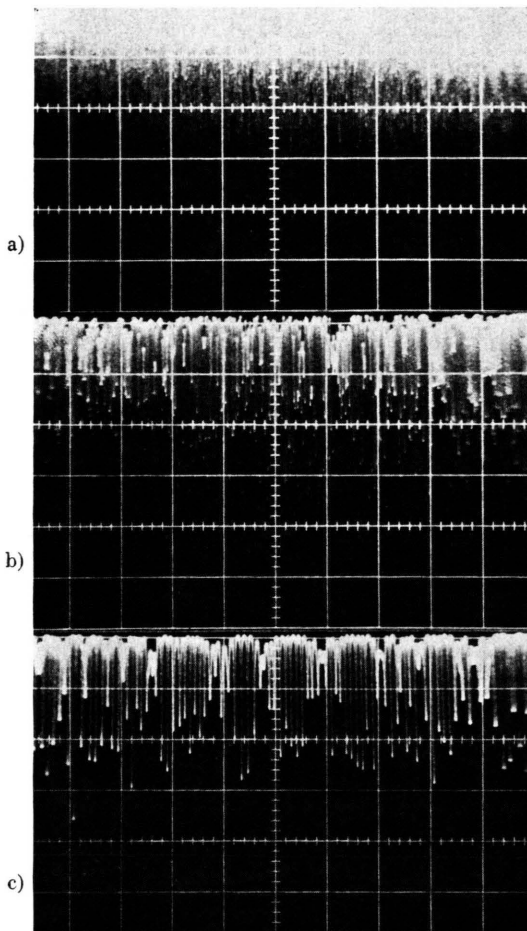


Abb. 3. Gesamtemission aller axialen Moden bei Pumpen mit Gleichlicht. a) 10 ms/Einheit; b) 0,5 ms/Einheit; c) 0,2 ms/Einheit.

sucht, daß verschiedene Moden nacheinander anschwngen<sup>15</sup>. Diese Annahme läßt sich nun im kontinuierlichen Betrieb verifizieren.

Abb. 4. zeigt Oszillogramme der Emission eines axialen Mode, die durch das FABRY-PEROT-Interferometer nach Abb. 2 aus der Gesamtstrahlung von 11 axialen Moden des transversalen Grundmode ausgefiltert wurde. Dargestellt ist die Emission eines Mode nahe der Linienmitte. Im Gegensatz zur Gesamtemission nach Abb. 3 ist ein bestimmter Mode jeweils nur für kurze Dauer existenzfähig und emittiert nahe der Schwelle in deutlich abgesetzten Ausbrüchen von 0,5 – 1 ms Dauer mit Pausen von der gleichen Größenordnung. Bei höherer Pumpleistung wird die Periode kürzer.

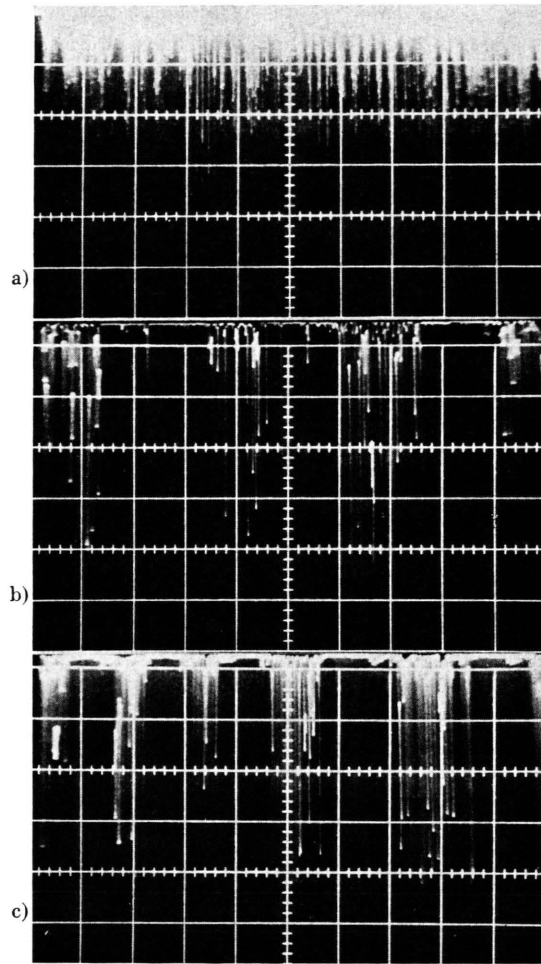


Abb. 4. Emission eines axialen Mode in der Linienmitte bei Pumpen mit Gleichlicht. a) 5 ms/Einheit; b) 0,5 ms/Einheit; c) 0,5 ms/Einheit, höhere Pumpleistung.

Da das Tastverhältnis der Emissionspakete eines Mode von der Größenordnung 1 ist, müssen von den 11 aktiven Moden stets mehrere ineinander verschachtelt emittieren. In Abb. 4 c sind die nicht völlig unterdrückten Emissionspakete der benachbarten axialen Moden mit kleinerer Amplitude erkennbar.

In den einzelnen Emissionspaketen sind vereinzelt kurzzeitige periodische Einschwingvorgänge zu einer kontinuierlichen Emission erkennbar, sonst treten sehr kurze Einzelimpulse auf, deren Dauer um einen Faktor 2 – 5 kürzer ist als die der Impulse in der Gesamtemission nach Abb. 3.

In dem ebenen, kontinuierlichen, beugungsbegrenzten Rubinlaser emittieren einzelne axiale Moden teilweise in zeitlich isolierten, teilweise in ineinandergeschachtelten Relaxationsschwingungen. Die peri-

odische Modulation in der Umhüllenden der Gesamtemission zeigt die Aufeinanderfolge unterschiedlicher Moden an, wobei jedoch die Periode für die Existenz eines bestimmten Mode etwa 5-fach länger ist, als die in der Umhüllenden erkennbare Periode. In einem Relaxationsimpuls der Gesamtemission emittieren mehrere axiale Moden; dabei ist die Emissionsdauer eines Mode kürzer als die Gesamtimpulsdauer. Der kontinuierliche Anteil der Emission entsteht im wesentlichen durch Addition der Relaxationsimpulse verschiedener nichtgekoppelter Moden und ist nicht auf kontinuierliche Emission von Wellen definierter Frequenz und Raumverteilung zurückzuführen<sup>17</sup>.

Abb. 4 a zeigt, daß die Emission eines Mode langzeitlichen Schwankungen unterliegt. Sie sind auf Fluktuationen der Pumpleistung und der Kristalltemperatur zurückzuführen.

Bei höherer Pumpleistung werden die Lücken zwischen den Emissionsperioden eines Mode kleiner und bei der 1,2-fachen Schwelle ist in der Emission eines Mode keine längerperiodische Modulation mehr deutlich zu erkennen; alle Moden emittieren dann ineinandergeschachtelt (siehe Abb. 5).

### 3. Betrieb mit 100 Hz-Halbwellen

Es ist für die experimentelle Untersuchung von Rubinlasern interessant zu wissen, welchen Störungen die Emission adiabatisch ohne merkliche Änderungen des Schwingungsverhaltens folgen kann. Daraus folgt, inwieweit die an Impulslasern gewonnenen Ergebnisse auf kontinuierliche Laser übertragen werden können. Wir haben dieses Problem durch Pumpen des beugungsbegrenzten Rubinlasers mit 100 Hz-Halbwellen untersucht.

Abb. 5 zeigt Oszillogramme der Gesamtemission bei Anregung des Grundmode für 2 verschiedene Pumpleistungen mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung.

Die Emission in den 2 – 3 ms langen, mit 100 Hz periodischen Schwingungsimpulsen folgt grob dem sinusförmigen Verlauf der Pumpleistung. Im Bereich hoher Pumpleistung ist sie überwiegend kontinuierlich. Der Emission sind wieder quasiperiodische Relaxationsschwingungen überlagert, in deren Umhüllenden man wie beim Betrieb mit Gleichlicht eine periodische Modulation beobachtet. Die Phasensprünge in der Relaxationsschwingung werden bei hoher Pumpleistung sehr häufig.

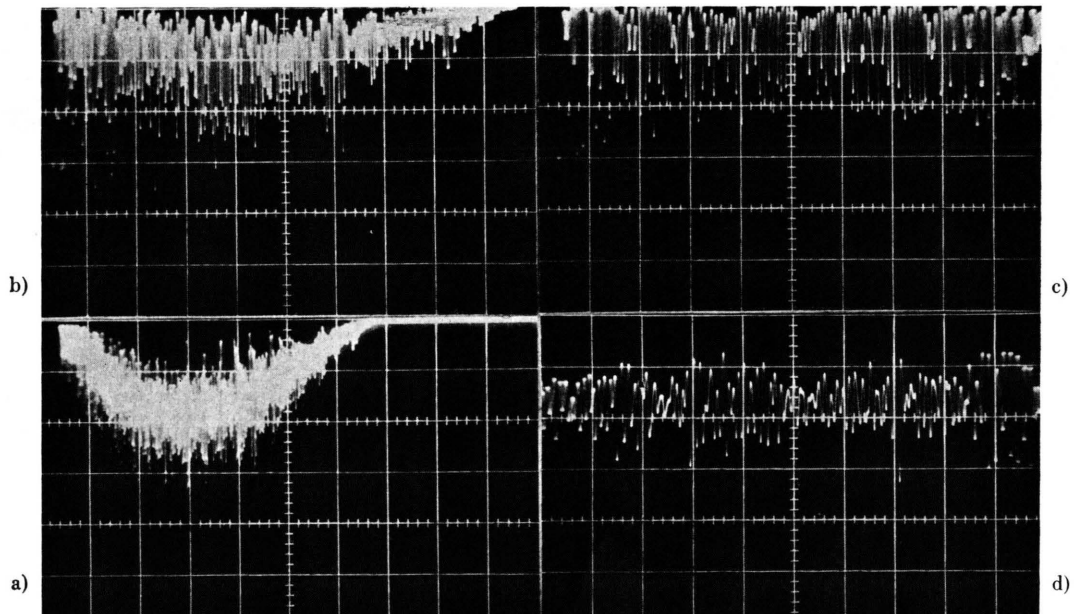


Abb. 5. Gesamtemission aller axialen Moden bei Pumpen mit 100 Hz-Halbwellen. a), b) nahe der Schwelle; c), d) bei höherer Pumpleistung. a) 200  $\mu$ s/Einheit; b) 100  $\mu$ s/Einheit; c) 500  $\mu$ s/Einheit; d) 40  $\mu$ s/Einheit.

<sup>17</sup> H. STATZ, C. LUCK, C. SHAFER u. M. CIFTAN, *Advances in Quantum Electronics*, (Ed. J. SINGER), Columbia University Press, New York 1961, S. 342.



Abb. 6 zeigt für verschiedene mittlere Pumpleistungen die Emission eines axialen Mode in der Linienmitte. Wie in Abb. 4 ist auch hier die Existenz eines bestimmten Mode auf periodische Ausbrüche von ca.  $200 \mu\text{s}$  Dauer begrenzt. Bei hoher Pump-

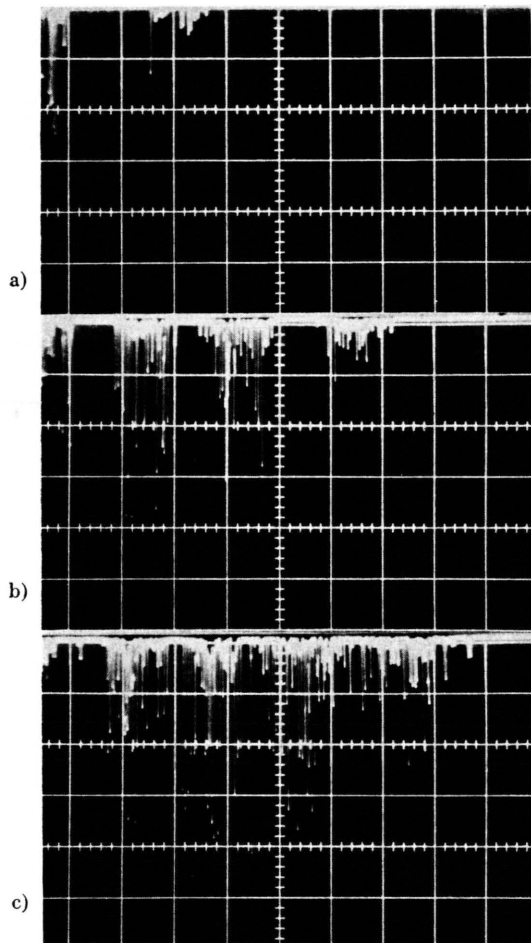


Abb. 6. Emission eines axialen Mode in der Linienmitte bei Pumpen mit 100 Hz-Halbwellen;  $200 \mu\text{s}/\text{Einheit}$ .  
a  $\rightarrow$  b  $\rightarrow$  c wachsende Pumpleistung.

leistung gehen die einzelnen Emissionspakete ineinander über. Interessant ist, daß in der Emission eines Mode kein wesentlicher kontinuierlicher Anteil auftritt; der hohe Betrag in Abb. 5 entsteht durch Addition der Relaxationsimpulse phasenverschobener Moden (hier 20–25 axiale Moden).

Das Experiment zeigt, daß im quasiperiodischen 100 Hz-Betrieb der beugungsbegrenzte Rubinlaser bereits adiabatisch der Pumpleistung folgt und kein wesentlich anderes Schwingungsverhalten zeigt als bei Gleichlichtbelastung.

#### 4. Emission bei Koexistenz mehrerer transversaler Moden

Wie bereits beschrieben<sup>12</sup>, können beim ebenen kontinuierlichen Rubinlaser durch Kristallfehler transversale Moden höherer Ordnung selektiert werden.

Abb. 7 zeigt eine Aufnahme der Gesamtemission unter Versuchsbedingungen, bei denen 4 reine Moden unterschiedlicher transversaler Ordnung gleichzeitig auftreten können. Die Gesamtemission zeigt 4 Stufen in der Umhüllenden der Relaxationsschwin-

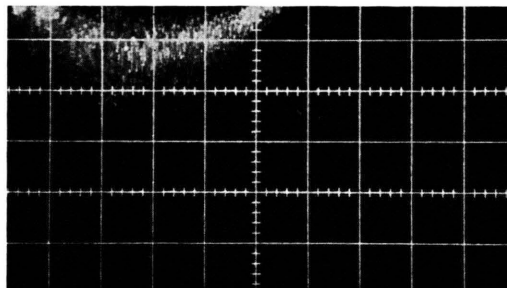


Abb. 7. Gesamtemission bei Koexistenz mehrerer transversaler Modentypen. 100 Hz-Halbwellenbetrieb;  $0,5 \text{ ms}/\text{Einheit}$ .

gung, welche das aufeinanderfolgende Anschwingen verschiedener transversaler Modentypen markieren. Erwartungsgemäß wird in diesem Laser hoher Modenselektion das Schwingungsverhalten bei Koexistenz mehrerer transversaler Modentypen komplizierter.

#### 5. Schlußfolgerungen

Auch bei Selektion eines einzigen transversalen Mode ist das Schwingungsverhalten des kontinuierlichen Rubinlasers noch recht kompliziert. Die Koexistenz von mehreren axialen Moden des transversalen Grundmodentyps führt zu verschiedenen Instabilitäten. Sie dürften in ähnlicher Weise wie die Koexistenz mehrerer Moden nach dem Modell von TANG, STATZ und DEMARS<sup>8</sup> auf dem räumlich konzentrierten Inversionsabbau in den Wellenbäuchen der aktiven Moden zurückzuführen sein: Die einzelnen aktiven Moden sind durch diesen Effekt nicht-linear verkoppelt. Mehrere nicht notwendig benachbarte Moden schwingen in einem Relaxationsimpuls der Gesamtemission zeitlich gegeneinander teilweise versetzt an; die Modenfrequenzen werden dabei so ausgewählt, daß die vorliegende Gesamtinversionsverteilung optimal abgebaut wird. Durch die Exi-

stanz eines gegebenen Satzes von Moden wird die Inversionsverteilung verändert, so daß noch innerhalb der Einschwingzeit dieser Moden eine andere Modenkombination wahrscheinlicher wird. Die Schwingung kippt um auf einen anderen Satz von Moden. Dieses Modell würde die beobachtete langzeitliche Instabilität eines gegebenen Mode erklären. Zu seiner Verifizierung ist eine zeitliche Auflösung des Spektrums aller aktiven Moden notwendig, die wir zur Zeit vorbereiten.

Nach den Beobachtungen folgt der Rubinlaser Schwankungen der Pumpleistung adiabatisch, wenn sie langsam gegen die langzeitliche Instabilitätsperiode eines Mode sind. Für Impulslaser mit Emissionszeiten groß gegen  $100 \mu\text{s}$  ist ein mit dem kontinuierlichen Betrieb vergleichbares Emissionsverhalten zu erwarten und die dort gewonnenen Ergebnisse sind weitgehend auf den kontinuierlichen Betrieb übertragbar, soweit die sonstigen Parameter (Modenselektion, reproduzierbarer Temperaturverlauf) vergleichbar sind.

Um ein einfaches Emissionsverhalten bei hoher Modenselektion zu erhalten, wird es notwendig sein, die Koexistenz mehrerer verkoppelter Schwingungen zu verhindern. TANG, STATZ und DEMARS ist dies im Impulsbetrieb in einem Wanderfeldlaser unter Ver-

meidung stehender Wellen kurzzeitig gelungen<sup>18</sup>. Wir schlagen eine andere Methode vor, bei der in einem Resonator konstanter optischer Länge nach Abb. 8 im

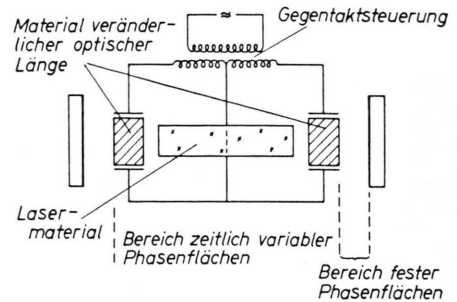


Abb. 8. Anordnung zur Vermeidung eines räumlich konzentrierten Inversionsabbaus in einem Resonator-Laser.

aktiven Material die Knotenflächen des aktiven Mode gewobelt werden, so daß sich keine Inversionsmaxima ausbilden können. In einer solchen Anordnung, deren Untersuchung wir zur Zeit vorbereiten, sollte sich ein einziger, durch den Spiegelabstand in der Frequenz einstellbarer und stabilisierbarer Schwingungsmodus ausbilden können.

<sup>18</sup> C. L. TANG, H. STATZ u. G. DEMARS, Appl. Phys. Letters **3**, 222 [1963]; Phys. Rev. **136**, 1 [1964].