

Ein einfaches optisches Kammfilter für Faserstrecken nach dem Prinzip der Talbotschen Streifen

K.Schmid, W.Dultz, B.Hils, E.Frins*, H.Schmitzer**

J.W.Goethe Universität Frankfurt(Main); Universidad de la República, Montevideo, Uruguay*;
Xavier-Univ. Cincinnati**

mailto:kayschmid@web.de

Nach einem Streifzug durch die Geschichte der Talbotschen Streifen beschreiben wir ein einfaches, passives Kammfilter für die WDM-Übertragung in optischen Faserstrecken und vermessen seine Transmissionscharakteristik.

1 Historische Einleitung

Nachdem *Thomas Young* 1807 mit seinem Doppelspaltversuch die Interferometrie in die optische Messtechnik eingeführt hatte [1], bemerkte *William Henry Fox Talbot* 1837 [2], dass im Frequenzspektrum eines Zweistrahlinterferometers gleichabständige dunkle Bänder auftreten, deren Frequenzdifferenz vom Gangunterschied abhängt. Er nannte die dunklen Räume zwischen den Zähnen dieses Frequenzkammes „obscure bands“, heute heißen sie Talbotsche Streifen oder Linien. Als erster sah vermutlich *Wrede* die Talbotschen Streifen [3], als er ein dünnes Glimmerblatt zu einem Zylindermantel rollte und die strichförmige Reflexion einer Weißlichtquelle (Sonne) durch ein Prisma betrachtete. Die Phasendifferenz entsteht in diesem Falle durch die unterschiedlichen Weglängen der beiden Strahlen, die an der Vorder- und der Rückseite des Glimmerblattes reflektiert werden. *Ernst Esselbach* [3] nutzte die Talbotschen Streifen 1856 zur Bestimmung der Fraunhoferschen Linien im ultraviolett Teil des Sonnenspektrums durch einfaches Abzählen. Ein interessantes Phänomen der Talbotschen Entdeckung, das die Dispersion im Interferometer widerspiegelt, wird in diesem Konferenzbericht von *Jahns* und *Lohmann* vorgestellt [4].

2005 erhielt *Theodor Hänsch* den Nobelpreis in Physik für die Entwicklung der Frequenzkammspektroskopie zu einer Präzisionsmethode für die Frequenz- bzw. Zeitbestimmung. Als Weißlichtquelle dient jetzt ein Femtosekundenlaser, dessen Resonatorfrequenzen phasensynchronisiert (vulgo: mode-lock) werden. Die Bestimmung der präzisen Frequenzlagen geschieht durch Auszählen der Lichtimpulse bzw. der Schwebungsfrequenzen nach Frequenzverdoppelung.

2 Das Kammfilter

Übertragungsraten von Nachrichten über optische Faserstrecken im Gigahertzbereich lassen sich am leichtesten durch die Einführung von mehreren spektralen Kanälen erzielen. Durch das WDM-Verfahren (wavelength division multiplex) kann man die aufwendige Gigahertzelektronik durch Parallelübertragung um wenigstens eine Größenordnung in den Subgigahertzbereich verlagern. Nichtlineare optische Prozesse in der Faser oder bei der Verstärkung können nun die Übertragungsfrequenzen verschmieren, sodass eine passive Regeneration durch Frequenzkammfilter notwendig wird. Hierfür wurde von uns ein einfaches Frequenzkammfilter entworfen und aufgebaut, das auf dem Prinzip der Talbotschen Streifen beruht, Abb.1.

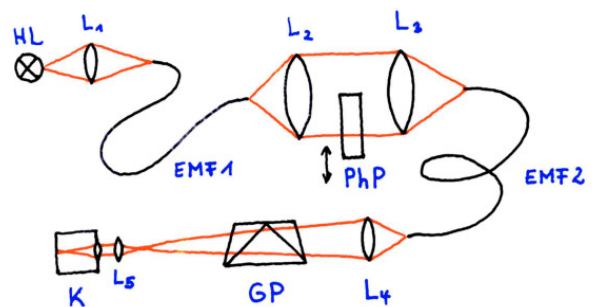


Abb.1 Unser Kammfilter zwischen den beiden Einmodenfasern EMF1/2 besteht aus zwei Linsen L_2/L_3 und einer Glasplatte PhP , die halb in den Strahlengang eingeschoben ist.

Das Licht einer Halogenlampe wird so gut es geht in die Einmodenfaser EMF1 (SM-633-FC, Kerndurchm. $4\mu m$, NA 0,1 der Firma Spindler & Hoyer) eingekoppelt und anschließend durch den Kollimator L_2 auf ca. $5mm$ Strahlquerschnitt aufgeweitet. Ein Mikroskopdeckglas PhP der Dicke d dient als Phasenplatte und kann kontinuierlich mit einer Schraube in den Strahlengang geschoben werden.

Anschließend wird das Licht mit einem zweiten Kollimator L_3 in ein zweites Stück EMF2 der gleichen Einmodenfasern eingekoppelt. Dabei wird darauf geachtet, dass die Airyscheiben der Aus- und Einkoppeloptik größer als die Kerndurchmesser der Fasern sind. Es zeigt sich, dass die 1m bzw. 2m langen Fasern zur Vermeidung von störenden Mantelmoden zu Spulen von ca. 5cm Durchmesser aufgerollt werden müssen. Als Spektralapparat dient ein Geradsichtprisma GP. Die Spektren wurden mit einer handelsüblichen Digitalkamera K aufgenommen, ein Beispiel zeigt Abb.2.

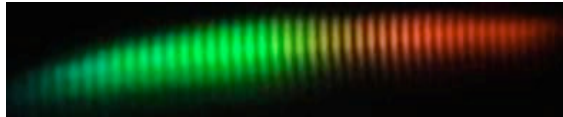


Abb.2 Weißlichtspektrum mit Talbotschen Streifen, aufgenommen mit einer Digitalkamera im Aufbau Abb.1.

Die dunklen Linien im Weißlichtspektrum der Halogenlampe sind die Talbotschen Streifen, die durch die halb eingeschobene Phasenplatte PhP ($d = 0,208\text{mm}$, $n = 1,52$) erzeugt werden. Ihren Abstand bestimmen wir zu

$$\Delta v = 2,63 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \text{ (ca. } 2,94\text{nm)}. \quad (1)$$

Wegen der strahlmischenden Eigenschaften eines kleinen Loches [5], kann der Ort des Frequenzkamms im Spektrum durch kleine transversale Verschiebungen der Phasenplatte geändert werden – bei geringen Kontrastverlusten.

3 Diskussion

Das Zweistrahlinterferometers zur Erzeugung der Talbotschen Streifen in Abb.1 besteht aus der räumlich kohärenten thermischen Lichtquelle am Ausgang der Faser EMF1 und den beiden Armen mit bzw. ohne Phasenplatte PhP im unteren bzw. oberen Teil des Strahlenganges. Der Ausgang befindet sich am Ende der zweiten Faser EMF2. Zwischen den beiden Armen besteht eine optische Weglängendifferenz $d(n-1)$.

Die Weißlichtquelle erzeugt einzelne unkorrelierte Femtosekundenimpulse mit einem kontinuierlichen Frequenzspektrum. Durch die Phasenplatte wird jeder Impuls in zwei aufeinanderfolgende Impulse mit dem gleichen zeitlichen Abstand

$$\Delta T = \frac{d(n-1)}{c_0} \quad (2)$$

aufgespalten.

Die Fouriertransformierte dieser Impulspaare enthält keine Komponenten der (dunklen) Talbotfrequenzen:

$$v_T = \frac{c_0}{d(n-1)} (N + 1/2), \quad N = 0,1,2,\dots \quad (3)$$

c_0 ist die Vakuumlichtgeschwindigkeit. Man kann das Licht, das aus der zweiten Faser austritt als ein „Weiß höherer Ordnung“ bezeichnen, das entsprechend dem in der Kristalloptik, aus periodischen spektralen Banden besteht und nichts anderes als die Durchlaßcharakteristik eines Zweistrahlinterferometers ist. Wie bei anderen Interferometern geht das Licht aus den dunklen Banden in andere Ordnungen. Dies wurde deutlich als wir an Stelle der zweiten Faser eine Blende mit einem nicht zu kleinen Loch verwendeten. Das Licht hinter dem Loch zeigt dann das Beugungsbild eines Einzelspalt, bei dem die Talbotsche Streifen in den einzelnen Ordnungen jeweils versetzt sind.

Das Licht der Laserquellen von *T.Hänsch* besteht nicht nur aus zwei, sondern aus sehr vielen Femtosekundenimpulsen mit gleichem Abstand. Daher sind die hellen Bereiche im Spektrum sehr schmale, feine Linien und die dunklen Talbotschen Streifen entsprechend breit. Ihr Abstand hängt in unserer Näherung ohne Dispersion aber auch nur von dem Abstand der Impulse ab.

4 Danksagung

E. Frins möchte dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) für die Unterstützung dieser Arbeit danken. H. Schmitzer wurde durch ein Cottrell Science Award gefördert.

Literatur

- [1] T.Young; Lectures on Natural Philosophy. London 1807.
- [2] Siehe J.Müller; Lehrbuch der Physik und Meteorologie Bd.I S. 696 Braunschweig 1856. Der Versuch ist sehr leicht nachzumachen.
- [3] E.Esselbach; Eine Wellenlängenmessung im Spektrum jenseits des Violett; Ann.d.Physik u.Chemie XCVIII 513 (1856)
- [4] J.Jahns, A.Lohmann; Diffraktiv-refraktive Filterung von kurzen optischen Impulsen; DGaO Tagung, Weingarten 2006
- [5] K.Schmid, E.Frins, H.Schmitzer, W.Dultz; Beam mixing with a Pinhole; J.Opt.Soc.Am.**A22** 2672 (2005)