

# Informationstransfer durch optische räumliche Solitonen in einem wechselwirkenden 2-Solitonensystem

M. Tiemann, J. Schmidt, V. M. Petrov, J. Petter, T. Tschudi

Institut für angewandte Physik, Technische Universität Darmstadt

<mailto:markus.tiemann@physik.tu-darmstadt.de>

Optische räumliche Solitonen können als Wellenleiter für infrarote Strahlung im Telekommunikationsbereich genutzt werden, wobei bisher nur die Übertragung von Energie gezeigt wurde. Wir haben die wichtigen Eigenschaften für die Informationsübertragung dieser Wellenleiter untersucht und wir präsentieren neben diesen Ergebnissen auch Kopplerelemente aus 2-Solitonensystemen.

## 1 Einführung

In photorefraktiven Kristallen kann gezielt eine Selbstfokussierung erzeugt werden, um die natürliche Strahldivergenz zu kompensieren. Propagiert in diesem Fall ein Laserstrahl ohne Änderung seines Querschnittsprofils durch den Kristall, spricht man von einem räumlichen Soliton. Dieses Soliton erzeugt in dem Kristall ein wellenleitendes Brechungsindexprofil, welches auch Infrarotlaserstrahlung führen kann. Daher können räumliche Solitonen als rein optische Koppelemente in der Telekommunikation eingesetzt werden.

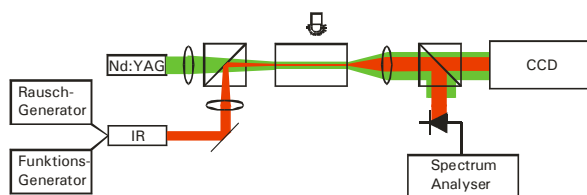
In unserem Fall erzeugen wir ein photorefraktives Soliton in einem Strontium-Barium-Niobat-Kristall mit Hilfe eines frequenzverdoppelten Nd:YAG-Laser, wie in [1] beschrieben. Die Untersuchungen zum Informationstransfer dieses Wellenleiters wurden im Telekommunikationswellenlängenbereich von 1520 nm – 1630 nm durchgeführt..

## 2 Informationstransfer nach Shannon

Nach Shannon [2] ist die Informationskapazität eines Kanals gegeben durch folgende Gleichung:

$$C = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \log_2 \left( 1 + \frac{S(\nu)}{N(\nu)} \right) d\nu \quad \text{in bit/s} \quad (1)$$

Der Versuchsaufbau zur Messung des frequenzabhängigen Signal-zu-Rauschverhältnisses (S/N) ist in Abb. 1 dargestellt. Dem Infrarotstrahl wird mit Hilfe zweier Funktionsgeneratoren eine Amplitudenmodulation mit einem bestimmten S/N aufgebracht. Dieses Signal wird in ein bestehendes Soliton eingekoppelt und am Ausgang wird das transmittierte S/N mit einem Spektrumanalysator in Abhängigkeit von der Wellenlänge untersucht. Es ergibt sich ein frequenzunabhängiges S/N von ca. 100 über dem nutzbaren Wellenlängenbereich (1520 - 1630 nm), der einer Frequenzbandbreite von 13,32 THz entspricht. Aufgrund der Frequenz-



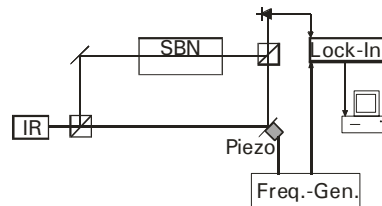
**Abb. 1:** Setup zur Vermessung des frequenzabhängigen Signal-zu-Rauschverhältnisses.

unabhängigkeit kann das Integral aus Gleichung (1) in eine einfache Multiplikation überführt werden.

$$C = 13,32 \text{ THz} \cdot \log_2(100) = 88,44 \text{ Tbit/s}$$

## 3 Pulstransfer

Da in vielen Anwendungen in der Telekommunikation die Information in Form von Pulsen übermittelt wird, ist die Wirkung eines Solitons als Wellenleiter auf einen Eingangspuls von besonderem Interesse. Die Verbreiterung eines Pulses wird von der zweiten Ableitung der Phasenverschiebung durch das Medium nach der Frequenz, der so genannten Gruppenverzögerungsdispersion (GVD), bestimmt. Mit Hilfe des in Abb. 2 dargestellten Aufbaus wurde dazu die frequenzabhängige Phasenverschiebung durch den eingeschriebenen Wellenleiter im Kristall bestimmt. Der Lock-In-Verstärker gibt die Phasenbeziehung zwischen der Modulationsfrequenz des Piezoaktuators und des wellenlängenabhängigen Interferenzsignals aus. Zur Eichung des Messverfahrens wurden die Phasenverschiebungen durch zwei BK7-Glassplatten unterschied



**Abb. 2:** Mach-Zehnder-Interferometer zur Vermessung der frequenzabhängigen Phasenverschiebung

licher Dicke gemessen und mit dem mit Literaturwerten berechneten Verlauf verglichen. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Abweichungen unter 1% liegen. Durch zweimalige numerische Differenziation ergibt sich für den selbstinduzierten Wellenleiter in dem Kristall eine GVD von 4706 fs. Mit Hilfe der folgenden Gleichung aus [3]:

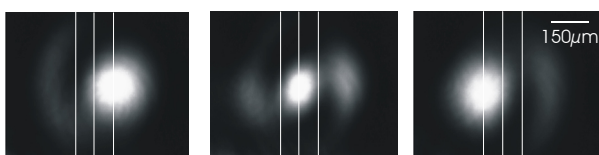
$$t_f^2 = t_i^2 + \left(4 \cdot \ln 2 \cdot \frac{GVD}{t_i}\right)^2$$

kann die Ausgangspulsdauer  $t_f$  bei einer Eingangspulsdauer von  $t_i$  in Abhängigkeit von der bestimmten GVD berechnet werden. Die minimale Ausgangsdauer liegt bei unserem Wellenleiter bei 161 fs und die maximale Pulstransferrate liegt dann bei 6,2 THz.

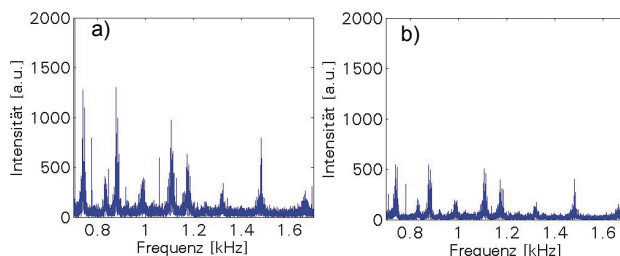
#### 4 Solitonensysteme

Im Folgenden wurden die Informationstransferigenschaften zweier verschiedener Solitonensysteme untersucht. Zum Einem realisierten wir einen Strahlschalter der einen eingehenden Infrarotstrahl auf drei verschiedenen Ausgängen ausgeben kann (siehe Abb. 3). Zu diesem Zweck konnten zwei räumliche Solitonen in einen Kristall geschrieben werden, die auf der Frontfläche am selben Punkt auftreffen und die Rückfläche an zwei getrennten Punkten verlassen. Trifft der Infrarotstrahl auf denselben Punkt auf die Frontfläche kann er in die Solitonen als Wellenleiter eingekoppelt werden. Ist nur eines der beiden Solitonen eingeschrieben verlässt der Infrarotstrahl den Kristall an dem jeweiligen Ausgang. So ergibt sich ein reinoptischer Schalter mit zwei Ausgängen. Den dritten Ausgang erhält man wenn beide Solitonen gleichzeitig in den Kristall geschrieben werden. Aufgrund der möglichen Wechselwirkung ziehen sich die Solitonen an [4] und es entsteht nur ein Ausgang in der Mitte der beiden Ursprünglichen Ausgänge. In Abb. 4 ist ein Teil des Frequenzspektrum eines transmittierten Musiksignals dargestellt. Abgesehen von einer Dämpfung aufgrund der Einkoppelverluste konnte die Information, die im Frequenzspektrum enthalten ist, ohne Verluste durch dieses Solitonensystem geleitet werden.

Zum Anderen realisierten wird einen so genannten Y-Koppler; hierbei wird ein Eingangssignal auf zwei Ausgänge verteilt. Dazu werden zwei sich kreuzende Solitonen in den Kristall eingeschrieben. Bei geeigneter Konfiguration koppelt das Infrarotlicht, welches in ein Soliton eingestrahlt wird, beim Schnittpunkt auch in das zweite Soliton.

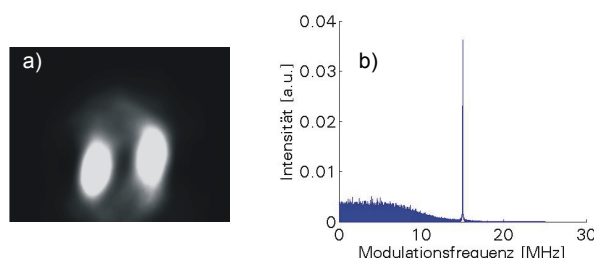


**Abb. 3:** Die drei möglichen Ausgänge des realisierten Strahlschalters. Die drei durchgezogenen Linien sind zum Vergleich der Ausgangslagen eingefügt.



**Abb. 4:** Teil des fouriertransformierten Signals. a) Eingangssignal und b) exemplarisch ein Ausgangssignal.

In Abb. 5a) sind die beiden Ausgänge auf der Rückfläche des Kristalls bei 1520 nm dargestellt. Abb. 5b) zeigt das Spektrum eines transmittierten Signals mit aufgeprägtem Rauschen, wie in Absatz 2 beschrieben, exemplarisch bei einer Wellenlänge von 1520 nm. In diesem System wurden die Informationskapazitäten gemessen und es wurden vergleichbare Ergebnisse wie bei einzelnen Solitonen erzielt.



**Abb. 5:** a) die beiden Ausgänge des Y-Kopplers und b) exemplarisch ein transmittiertes Signal bei 1520 nm.

#### 5 Zusammenfassung

Die Messungen der Informationskapazität und der Pulstransferrate in räumlichen Solitonen belegen die Möglichkeit der Übertragung in der Größenordnung von Tbit/s. In Solitonensystemen konnten, im Rahmen unserer Messgenauigkeit, keine Einschränkungen gegenüber Einzelsolitonen festgestellt werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von photorefraktiven Solitonen in Anwendungen als adaptive Kopplerelemente in der optischen Telekommunikation eingesetzt werden könnten ohne heutige und zukünftige Übertragungsraten zu beschränken.

#### Literatur

- [1] J. Petter und C. Denz „Guiding and dividing waves with photorefractive solitons“ in Opt. Comm. **188**, S. 55-61 (2001)
- [2] C. E. Shannon und W. Weaver, *The mathematical theory of communication*, The University of Illinois press (1964)
- [3] A. E. Siegmann, *Lasers*, University Science Books (1986)
- [4] C. Denz et al “Dynamics of formation and interaction of photorefractive screening solitons”, Phys. Rev. E. **60**, S. 471-478, 1999