

Diss. ETH No. 11078

NONLINEAR HOLOGRAPHIC ASSOCIATIVE MEMORIES

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology
Zürich

for the degree of Doctor of Natural Sciences

presented by

Markus Duelli

Dipl. Phys. ETH
born January 31, 1967
citizen of Austria

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. P. Günter, examiner
Prof. Dr. U. P. Wild, co-examiner

1995

Abstract

In associative memories the output data is recalled directly using the input data itself, without the use of separate addresses as it is the case in usual computer memories, where a separate unique address points to each stored datum. Associative memories have error correction and data completion properties in that a complete undistorted set of data can be retrieved using a distorted or partial version of input data.

The aim of this thesis is the design, demonstration and investigation of an all-optical associative memory. We present a new scheme which belongs to the class of the nonlinear holographic associative memories. It is based on a VanderLugt correlator in connection with a saturable absorber for thresholding and a phase conjugating mirror for readout. The correlator utilises a photorefractive LiNbO_3 crystal for long term data storage. The volume nature of the stored holograms increases the storage capacity of the associative memory. The nonlinearity, which is introduced in order to decide which stored object is the most similar one to the input object, is a novel saturable absorber. It consists of polymethylmetacrylate that is doped with dye molecules. The simultaneous illumination of this material with ultraviolet and blue light allows it to function as a saturable absorber for blue light i.e. weak beams are strongly absorbed by the material whereas strong beams see no absorption. The transmission threshold of the absorber can easily be shifted over a wide intensity range by adjusting the ultraviolet intensity. The thresholding behaviour of this device is analysed and tested. It is shown that such an element is useful for thresholding of the reconstructed reference beams in an associative memory due to the simplicity of the optical system. The reconstructed reference beams are amplified using photorefractive two wave mixing in a KNbO_3 crystal and phase conjugated via *degenerate four wave mixing* in another photorefractive KNbO_3 crystal. Due to the thresholding only one of the reconstructed reference beams has a non-negligible intensity by the time it addresses the storage crystal. This beam reads out the stored and associated object, which can be observed on a screen. The associative readout properties of this system are analysed and experimentally demonstrated.

With this implementation of an all-optical associative memory ten black-and-white objects are successfully recovered using only partial inputs. This is the largest number of stored and associative readout objects in nonlinear holographic associative memories published. Associative readout of grey scale images is also shown. We demonstrate that only a very small amount ($\approx 1/500$) of one of the stored objects has to be present at the input plane in order to associate the correct object and get full reconstruction of the stored data. The readout time is one second and is limited by the response time of the

nonlinear elements. In our case this limit is given by the response time of the two wave mixing crystal and the saturable absorber.

The problem of distinguishing between enclosed stored objects, that has not been discussed in the context of nonlinear holographic memories till now, is solved by a weighted storage scheme. This method is based on controlling the diffraction efficiency of each hologram corresponding to a stored image. By carefully choosing these diffraction efficiencies the discrimination of highly correlated patterns and even association of enclosed objects using a partial input is possible. This theory has been tested experimentally by associative readout of five stored letters which are partially enclosed in each other.

Zusammenfassung

Bei Assoziativspeichern werden die gespeicherten Daten direkt durch die Eingabedaten ausgelesen, ohne zusätzliche Angaben über die Speicheradressen zu benötigen, wie dies in herkömmlichen Computerspeichern der Fall ist. Sie gehören somit zu den inhaltsadressierbaren Speichern. Die wichtigste Eigenschaft eines Assoziativspeichers ist die Möglichkeit der Fehlerkorrektur und der Datenvervollständigung. Ein kompletter fehlerfreier Datensatz kann erhalten werden, auch wenn nur ein schadhafter oder teilweiser Datensatz als Eingabe verwendet wird.

Das Ziel dieser Dissertation ist der Aufbau und die Demonstration eines rein optischen Assoziativspeichers. Wir präsentieren ein neues Konzept für einen *nichtlinearen holographischen Assoziativspeicher*. Dieser basiert auf einem VanderLugt Korrelator in Verbindung mit einem sättigbaren Absorber und einem phasenkonjugierenden Spiegel für den assoziativen Ausleseprozeß. Die Datenseiten (Bilder) werden als Phasenhologramme in einem photorefraktiven LiNbO_3 Kristall gespeichert. Da wir es hier mit Volumenhologrammen zu tun haben, wird die Speicherkapazität im Vergleich zu dünnen Speichermedien stark erhöht. Um einen Entscheidungsprozeß zwischen den gespeicherten Objekten während des assoziativen Auslesens zu erreichen, wird eine optische Nichtlinearität benötigt. Diese erhält man durch Verwendung eines neuartigen sättigbaren Absorbers bestehend aus Polymethylmetacrylat dotiert mit einem Farbstoff. Durch die gleichzeitige Beleuchtung dieses Materials mit ultraviolettem und blauem Licht erhält man einen sättigbaren Absorber für blaues Licht. Intensitätsschwache Lichtstrahlen werden stark absorbiert, wohingegen Strahlen mit hoher Intensität kaum absorbiert werden. Die Schwelle für die Transmission kann über einen großen Intensitätsbereich variiert werden, indem die Intensität des einfallenden ultravioletten Lichtes verändert wird. Das Schwellenverhalten dieses nichtlinearen Elementes wird analysiert und getestet.

Während der Adressierung des Speichermediums mit den Eingabedaten werden alle Referenzstrahlen, welche verwendet wurden um die einzelnen Hologramme zu erzeugen, rekonstruiert. Die rekonstruierten Referenzstrahlen werden durch Zweiwellenmischen in einem KNbO_3 Kristall verstärkt und durch Vierwellenmischen ebenfalls in einem KNbO_3 Kristall phasenkonjugiert. Durch den sättigbaren Absorber wird erreicht, daß nur der Referenzstrahl mit der höchsten Intensität für den Ausleseprozeß erhalten bleibt. Dieser kann nun die gewünschte Information aus dem Speicher auslesen und das assoziierte, vervollständigte Bild erscheint auf dem

Ausgabeschirm. Der assoziative Ausleseprozeß dieses Systems wird theoretisch analysiert und experimentell demonstriert.

Mit dieser Anordnung für einen rein optischen Assoziativspeicher konnten zehn Schwarzweißbilder (Buchstaben) gespeichert und auch assoziativ durch Eingabe nur eines Teils der gespeicherten Bilder ausgelesen werden. Dies ist die größte publizierte Zahl an gespeicherten Bildern für diesen Typ Assoziativspeicher. Auch Graustufenbilder konnten erfolgreich assoziiert werden. Es zeigt sich, daß nur ein sehr kleiner Teil ($\approx 1/500$) der gespeicherten Information als Eingabe verwendet werden muß, um eine vollständige Rekonstruktion der gespeicherten Information zu erhalten. Die Geschwindigkeit mit der die gespeicherten Bilder mit dem Eingabebild verglichen und ausgelesen werden, beträgt etwa eine Sekunde. Da der Vergleich des Eingabebildes mit allen gespeicherten Bildern parallel verläuft, wird diese Zeit durch die Reaktionszeit der nichtlinearen optischen Elemente bestimmt und nicht durch die Anzahl der gespeicherten Bilder.

Das Problem der Unterscheidung von Bildern, die ineinander enthalten sind, wurde bis jetzt noch nie behandelt. Wir zeigen eine Möglichkeit dieses Problem zu lösen. Diese besteht in der Speicherung der einzelnen Bilder mit verschiedenen Beugungseffizienzen. Bei richtiger Wahl dieser Beugungseffizienzen ist es möglich stark korrelierte Bilder oder sogar Bilder, die in anderen enthalten sind, zu unterscheiden und auszulesen. Diese Theorie wurde mit fünf gespeicherten Bildern getestet.