

**ZEICHENERKENNUNG AN KEILSCHRIFTTEXTEN.
KOHÄRENT-OPTISCHE EXPERIMENTE UND ERGEBNISSE**

**Dr.-Ing.habil. Günther Wernicke, Dr. Nazif Demoli*, Dipl.-Phys. Hartmut Gruber, Dr. Uwe Dahms
Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Physik**

Invalidenstr. 110

10115 Berlin

Tel.: 030/20937897, Fax.: 030/20937666

*** Institut für Physik an der Universität Zagreb, Kroatien**

Die Techniken der Holographie werden in vielen Gebieten der optischen Bildverarbeitung zur parallelen Datenverdichtung und Mustererkennung eingesetzt. Bei der Klassifizierung und Dokumentation von archäologischen Objekten, insbesondere dreidimensionaler Schriftträger, wie es Keilschrifttafeln sind, wurden diese bisher jedoch nicht verwendet. Anwendungen der Holographie auf diesem Gebiet beschränkten sich lediglich auf die Gestaltung von Ausstellungen mit Displayhologrammen. In einem vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie geförderten Forschungsprojekt wurde die Anwendung holographischer und kohärent-optischer Techniken behandelt, die für die Lösung einiger Teilprobleme in der Archäologie vielversprechende Ansätze ermöglicht.

Im Gebiet zwischen Euphrat und Tigris begann mit der Entstehung größerer menschlicher Ansiedlungen auch die Notwendigkeit, bestimmte Vorgänge schriftlich festzuhalten. Aus bildlichen Darstellungen entwickelten sich symbolische Zeichen, die in dieser Region mit einem Griffel in weiches Material eingedrückt wurden. Aus der ursprünglichen Symbolschrift entstand eine Silbenschrift, die in der mittelbabylonischen Zeit (ca. 1500 bis 800 vor Chr.) aus ungefähr 500 bis 600 Zeichen bestand. Jedes Einzelzeichen wurde aus mehreren Keilen zusammengesetzt, die in bis zu fünf verschiedenen Orientierungen angeordnet sein können. Nur ein kleiner Teil der bis heute erhaltenen Keilschrifttafeln wurde in der damaligen Zeit gebrannt, der weitaus größte Teil besteht aus ungebranntem Ton oder Lehm, der lediglich getrocknet wurde. Sie sind deshalb durch Umwelteinflüsse hochgradig gefährdet.

Archäologische Fundstücke sind in der wissenschaftlichen Forschung besonders dann schwer auswertbar, wenn diese nur in Form von Bruchstücken vorliegen, die Oberflächen durch Erosion oder Korrosion beeinträchtigt wurden oder Risse, Kratzer, Verunreinigungen usw. die enthaltenen Informationen nahezu unlesbar machen. Für die Rekonstruktion von zerbrochenen archäologischen Fundstücken anhand von Merkmalen, wie z.B. Konturen und Kanten von Scherben, Strukturierungen auf der Oberfläche sowie spezifischen Formen, Krümmungen usw. werden zwar Bildverarbeitungsverfahren angewandt, diese gestatten das Zusammenfügen von Bruchstücken, die sich am gleichen Ort befinden. Diese Methoden versagen, wenn Zwischenstücke fehlen.

Häufig werden Tontafeln mit Keilinschriften bzw. Bruchstücke von diesen an verschiedenen Stellen der Welt gelagert. Inhaltlich zusammengehörige Texte oder auch Bruchstücke einer Tafel sind durch Fundteilungen oder durch willkürliche Verteilung durch den Antikenhandel zum Teil weit verstreut worden. Deshalb kann nur in wenigen Fällen die Zusammengehörigkeit durch den Epigraphisten erkannt werden.

Die für die wissenschaftliche Bearbeitung herkömmliche Methode der Veröffentlichung von Keilschrifttexten ist das Kopieren der Inschriften durch Nachzeichnen. Dies ist jedoch in hohem Maße subjektiv. Selbst wenn diese Subjektivität in manchen Fällen erwünscht ist, da der Kopist in der Regel auch den Text interpretiert, ist für andere Fälle eine objektive Zuordnung erforderlich, da nur auf diese Weise der volle Umfang der Informationen zugänglich bleibt.

In der aktuellen Forschung an Keilinschriften treten Probleme auf, die mit Hilfe von Korrelationsuntersuchungen gelöst werden können. Dazu gehört z.B. der Nachweis, daß verschiedene Texte von einem Schreiber oder auch aus einer Schreiberschule stammen, der die historische Zuordnung von Fragmenten, Texten und Archiven gestattet. In der heutigen Forschung sind hierzu sowohl die Vielfalt der vorkommenden Urkunden, das Vorkommen von Namen sowie auch die über die Zeit veränderte Anordnung von Urkunden in Formularform interessant, die anhand inhaltlicher Kriterien, nicht jedoch anhand objektiver äußerer Erscheinungsmerkmale untersucht werden. Für alle genannten Problemkreise ist es erforderlich, die Untersuchungsobjekte gegenständlich zur Verfügung zu haben. Dies ist häufig schwer, wenn nicht unmöglich.

Im Rahmen des geförderten Projektes wurden im Labor für Kohärenzoptik am Institut für Physik der Humboldt-Universität zu Berlin kohärent-optische und digitale Techniken zur Datenspeicherung, Datenfilterung, Mustererkennung und Korrelationsanalyse erprobt und entwickelt, um an Keilschrifttafeln oder den Hologrammen von Keilschrifttafeln, die am Labor für Biophysik der Universität Münster in einem

weiteren Projekt des Förderschwerpunktes hergestellt wurden, einige der oben genannten Probleme mit Hilfe kohärent-optischer Techniken und Methoden zu lösen.

Aufbau und Erprobung von zwei optischen Korrelatoren

1. Multifunktioneller erweiterter optischer Korrelator (MEOC) [1], [2], [3]

Der optische Aufbau des MEOC besteht im wesentlichen aus drei Linsensystemen (Abb. 1). Im Abstand der doppelten Brennweite vor der Linse 1 befindet sich die Ebene P1, in der Brennebene hinter der Linse 1 und gleichzeitig im Abstand der doppelten Brennweite vor der Linse 2 befindet sich die Ebene P2. Im Abstand der doppelten Brennweite hinter der Linse 2 kann ein holographisches Filter erzeugt werden, das mit einer unter einem Winkel einfallenden Referenzwelle aufgenommen wird. In einer Achse, die unter dem Winkel dieser Referenzwelle verläuft, befindet sich in einem Abstand der einfachen Brennweite von diesem Hologramm die dritte Linse, hinter der sich im Abstand der einfachen Brennweite eine CCD-Kamera befindet.

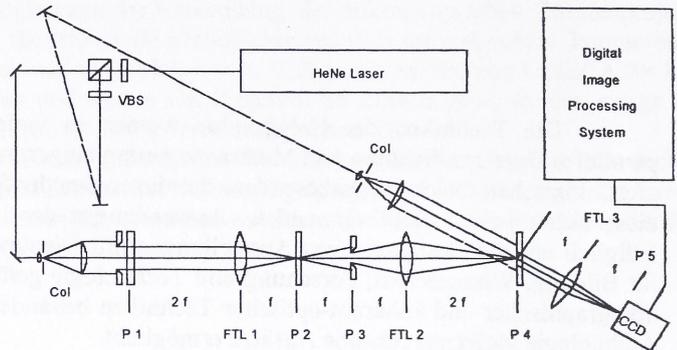


Abb. 1 Multifunktioneller erweiterter optischer Korrelator

In der Ebene P1 wird das Eingangssignal, im einfachsten Fall eine transparente Szene, mit einer durch einen Kollimator aus einem Laserbündel erzeugten ebenen Welle beleuchtet. In der Ebene P2 erzeugt eine Linse die Fouriertransformierte des Eingangssignals. Durch Einsatz eines Amplitudenfilters kann in P2 der Einfluß der quadratischen Eingangsapertur herausgefiltert werden. In der Ebene P3 ist eine Filterung im Bild möglich, so daß schließlich in der Ebene P4 durch die kohärente Überlagerung der Fouriertransformierten des gefilterten Eingangssignals mit einer Referenzwelle ein angepaßtes Filter (matched spatial filter, MSF) in einer Fotoplatte registriert werden kann.

Die Eigenschaft eines Hologrammes, assoziativ zwei Signale zu speichern, wird in der Zeichenerkennung in der Weise genutzt, daß von einem optischen Signal mit Hilfe einer ebenen Referenzwelle ein Hologramm aufgenommen wird. Von diesem Hologramm kann mit der Referenzwelle die Objektwelle und mit der Objektwelle die Referenzwelle rekonstruiert werden. Wird das Hologramm exakt in die Aufnahmeposition gebracht, erzeugt die zur Rekonstruktion des Hologrammes verwendete Signalwelle wiederum eine ebene Wellenfront, die nach einer weiteren Fouriertransformation in der Ebene P5 bei Übereinstimmung mit der Signalwelle zu einem scharfen Korrelationspeak führt. Ein solches Hologramm wird als angepaßtes Filter (MSF) bezeichnet.

Die Eigenschaft eines Hologrammes, assoziativ zwei Signale zu speichern, wird in der Zeichenerkennung in der Weise genutzt, daß von einem optischen Signal mit Hilfe einer ebenen Referenzwelle ein Hologramm aufgenommen wird. Von diesem Hologramm kann mit der Referenzwelle die Objektwelle und mit der Objektwelle die Referenzwelle rekonstruiert werden. Wird das Hologramm exakt in die Aufnahmeposition gebracht, erzeugt die zur Rekonstruktion des Hologrammes verwendete Signalwelle wiederum eine ebene Wellenfront, die nach einer weiteren Fouriertransformation in der Ebene P5 bei Übereinstimmung mit der Signalwelle zu einem scharfen Korrelationspeak führt. Ein solches Hologramm wird als angepaßtes Filter (MSF) bezeichnet.

Ein von einem einzelnen Objekt hergestelltes MSF kann identische Objekte mit höchster Empfindlichkeit nachweisen. Bereits geringe Abweichungen zwischen Objekten einer Gruppe (in-class-Objekte) führen allerdings zu großen Abweichungen in der Intensität des Korrelationssignals. Die Konsequenz daraus ist, daß handschriftlich erzeugte Zeichen, wie es Keilschriftzeichen sind, mit einem derartigen MSF nicht ohne Weiteres nachweisbar sind. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Empfindlichkeit des MSF für in-class-Objekte zu reduzieren und gleichzeitig die Diskriminationsschwelle für out-of-class-Objekte möglichst hoch zu halten. Zur Lösung dieses Problems hat sich die Herstellung gemittelter angepaßter Filter als geeigneter Weg erwiesen. Die Mittelung kann dabei durch das Überlagern von MSF einzelner gleichartiger Zeichen (Multiplexing), durch digitale, inkohärent-optische oder kohärent-optische Methoden erfolgen. Verschiedene dieser Methoden wurden hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten getestet.

Zur Untersuchung der Korrelation zweier Signale wurde ein Eingangssignal in die Ebene P1 und das angepaßte Filter des Referenzsignals in die Ebene P4 des MEOC gesetzt. Dann ergibt sich die Amplitude des Korrelationssignals in der Ebene P5 als die Fouriertransformation des Produkts aus der Fouriertransformation des modifizierten Spektrums des Eingangssignals mit der Filterübertragungsfunktion des MSF. Die Intensität des Korrelationssignals ist dann das Quadrat dieser Amplitude. Die zu messenden Größen sind die maximale Intensität des Korrelationssignals sowie die Gesamtintensität der gefilterten Fouriertransformierten des Eingangssignals. Aus diesen lassen sich eine normierte Maximalintensität und eine Unterscheidbarkeit (discrimination ability) berechnen.

2. Joint-Transform-Korrelator (JTC) [4], [5]

Bei allen Vorteilen (Möglichkeiten der Filterung in der Bild- und Frequenzebene, einstellbare Empfindlichkeit u.ä.) ist der MEOC aufgrund der Aufnahme eines Hologrammes als angepaßtes Filter relativ empfindlich für äußere Einflüsse, wie z.B. Schwingungen der Umgebung. Die Aufnahme des angepaßten Filters erfordert außerdem einige Vorverarbeitungsschritte. Dieser Nachteil wird durch die Verwendung des Joint Transform Correlators (JTC) überwunden. Der JTC zeichnet sich durch einen robusten Aufbau aus, der keine hohen Anforderungen an die Schwingungsisolierung stellt. Im JTC sind in seiner Eingangsebene das hinsichtlich seiner Ähnlichkeit zu beurteilende Zeichen und das Referenzzeichen nebeneinander angeordnet. Beide Zeichen werden innerhalb des Korrelators parallel optisch verarbeitet (fouriertransformiert).

Die Möglichkeit, mit dem JTC Korrelationsuntersuchungen in Echtzeit durchführen zu können, ist durch den Einsatz moderner, elektronisch adressierbarer Lichtmodulatoren wesentlich erleichtert worden. Aufgrund ihrer Verfügbarkeit und ihres günstigen Preis/Leistungsverhältnisses finden in den letzten Jahren vor allem Flüssigkristalldisplays (LCD) als Lichtmodulatoren Anwendung. Diese LCDs, die vornehmlich für Computer (Monitore), Videoprojektoren und großflächige Anzeigen entwickelt wurden, besitzen Modulationseigenschaften, die ihren Einsatz als Amplitudenmodulator wie auch als Phasenmodulator in optischen Aufbauten zur Bildverarbeitung und Mustererkennung favorisieren.

Für den optischen Aufbau fanden die Einzelkomponenten, die auch im MEOC eingesetzt wurden, Verwendung (Abb. 2).

Die optischen Elemente im aufgebauten JTC sind in zwei parallelen optischen Achsen angeordnet. Zwei Flüssigkristalldisplays (LCD1, LCD2) aus einem Daten/Videoprojektor (Typ: Sanyo PLC 300 ME)

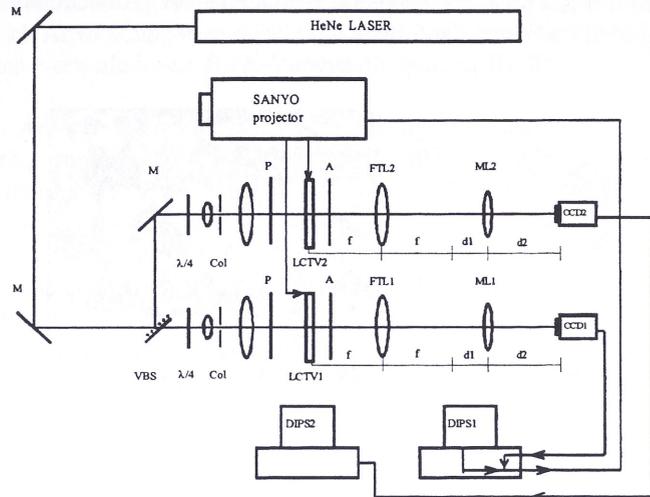


Abb. 2 Joint-Transform-Korrelator

wurden in die Objekt- und die Frequenz-ebene eingesetzt und über die Originalelektronik des Projektors angesteuert. In der ersten Achse des Korrelators wird die gesamte Eingangsszene mit Hilfe der Linse FTL1 fouriertransformiert. Das Fourierpektrum wird durch das Mikroskopobjektiv ML1 vergrößert und mit Hilfe der Kamera CCD1 und des Bildverarbeitungssystems DIPS1 als Joint-Power-Spektrum (JPS) aufgezeichnet. Dieses wird auf das sich in der Eingangsebene der zweiten optischen Achse befindende Display LCD2 gegeben und durch die Linse FTL2 ein zweites Mal fouriertransformiert (inverse Transformation). Nach Vergrößerung durch das Mikroskopobjektiv ML2 wird durch die Kamera CCD2 das Korrelationssignal aufgezeichnet.

In beiden optischen Achsen ist die Vergrößerung $d2 / d1$ der Mikroskopobjektive bezüglich des Auflösungsvermögens der LCDs, CCD Kameras und des Ausgangskorrelationssignals optimiert worden. Drehbare Polarisatoren vor und hinter den LCDs gestatten es, die günstigsten Konstellationen für den Einsatz als Amplituden- bzw. Phasenmodulator auszuwählen.

Ergebnisse

Die in den folgenden Punkten A bis E aufgeführten Arbeitsschritte beschreiben zusammenfassend die an den Originalkeilschriftzeichen durchgeführten Operationen.

A. 2-D Eingangssignale

1. Aufnahme der zur Untersuchung ausgewählten Flächen von der Originalkeilschrift mit einer CCD Kamera (Reduzierung der Information 3-D \Rightarrow 2-D),
2. Auswahl der in-class und out-of-class Objekte, digitale Vorverarbeitung,
3. Auswahl eines Satzes von Trainingsobjekten,
4. Speichern der ausgewählten Objekte auf Photomaterial

B. Charakteristische Merkmale der Trainingsobjekte

1. Auswahl und Verstärkung charakteristischer Merkmale (Fourieranalysator, Bildverarbeitungssystem),
2. Analyse dieser Merkmale in der Objekt- und der Fourierebene,
3. Festlegung verschiedener optischer Vorverarbeitungsparameter

C. Vorverarbeitung

1. Digitale Vorverarbeitung (Kontrastverstärkung, Normierung, Addition von Bildern usw.),
2. In-line optische Vorverarbeitung (Hoch- und Tiefpaßfilterung),

3. Kohärent-optische Mittelung ausgewählter in-class Objekte,
 4. Herstellen von nichtlinearen Dämpfungsmasken für Quasiphasenfilter (quasi-phase-only filter, QPOF),
- D. Korrelationsfilter
- Optischer Einsatz verschiedener Korrelationsfilter (KF)
1. KF für Einzelkeil
 2. KF für Einzelzeichen
 3. Multiplex - KF, optisch und digital gemittelte KF für Modellzeichen
 4. KF für optisch und digital gemittelte Originalzeichen
- E. Charakterisierung von Keilschriften
1. Charakterisierung anhand von Objektmerkmalen und des Fourierspektrums
 2. Charakterisierung anhand der Ergebnisse der Korrelationsexperimente

In der Abbildung 3 ist als Beispiel die Wiedererkennung des Keilschriftzeichens "I" in einer Objektszene an Hand des Korrelationssignals im MEOC bei der Anwendung eines aus einem gemittelten Vergleichszeichen hergestellten Filters dargestellt.



Abb. 3a Zeichen I-av zur Herstellung des angepaßten Filters

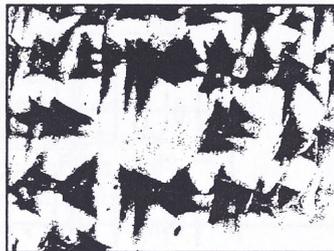


Abb. 3b Objektszene mit Zeichen I

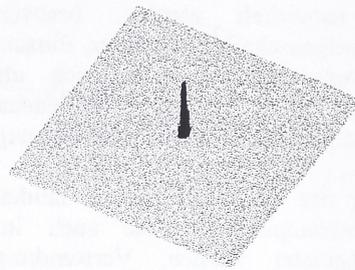


Abb. 3c Korrelationspeak, der das Zeichen I anzeigt

Abbildung 4 zeigt die untersuchte Szene mit dem Zeichen I und das Referenzzeichen I-av, sowie das Ausgangssignal des Joint-Transform-Korrelators. In diesem ist in der Mitte das Auto-korrelationssignal der Szene selbst und oben und unten die Kreuzkorrelation des Referenzzeichens mit der Szene zu erkennen.

In beiden Fällen handelt es sich um ein kohärent-optisch gemitteltes Zeichen I-av, das von drei Zeichen aus der Keilschrifttafel HS 158b (Hilprecht-Sammlung Vorderasiatischer Altertümer Jena) hergestellt und mit einem Ausschnitt aus dieser Tafel korreliert wurde.



Abb. 4a Objektszene aus einer Keilschrift und Referenzzeichen



Abb. 4b Ausgangssignal des JTC

Literatur

- 1 N. Demoli, H. Gruber, U. Dahms, G. Wernicke, *Journal of Modern Optics* **42**(1) 191-195 (1995)
- 2 G. Wernicke, N. Demoli, U. Dahms, H. Gruber, *Naturwissenschaften* **82**(9) 395-402 (1995)
- 3 H. Gruber, G. Wernicke, N. Demoli, U. Dahms, in *Holography and Correlation Optics II*, Chernovtsy 1995, O.V. Angelsky (Ed.), SPIE-Proceedings 2647, 138-144
- 4 N. Demoli, U. Dahms, B. Haage, H. Gruber, and G. Wernicke, *Fizika A* **4** (3), 581-590 (1995)
- 5 U. Dahms, B. Haage, H. Gruber, G. Wernicke, N. Demoli, *Optik* **101** (1996) (im Druck)