

5.7 Holographie

Dies ist eine Arbeitsversion als Auszug aus mein Handbuch der Informationsspeicherung Band 2, ergänzt um Etwas zu den digitalen optischen Speichern.

Ein Hologramm (*griechisch holos ganz und gramma Geschriebenes*) kann anschaulich – so wie es im Prinzip **Bild 34** zeigt – als ein Fenster zur Welt betrachtet werden. Je nachdem, wie dicht wir an dieses Fenster herantreten bzw. aus welcher Richtung wir hindurchschauen, sehen wir unterschiedliche Ausschnitte der Welt. Diese einfache Vorstellung lässt sich mittels der verschiedenen Modelle der Optik vertiefen. Für die photographischen Objektive ist im Abschnitt 5.1 das Strahlenmodell benutzt. Mit ihm werden Abbildungen so beschrieben und berechnet, als ob es Lichtstrahlen gibt, die sich geradlinig ausbreiten und an Grenzflächen entsprechend der Änderung des Brechungsindex n ihre Richtung ändern. Wird dieses Modell auf unser Sehen übertragen, so gilt für das Auge **Bild 35a**.

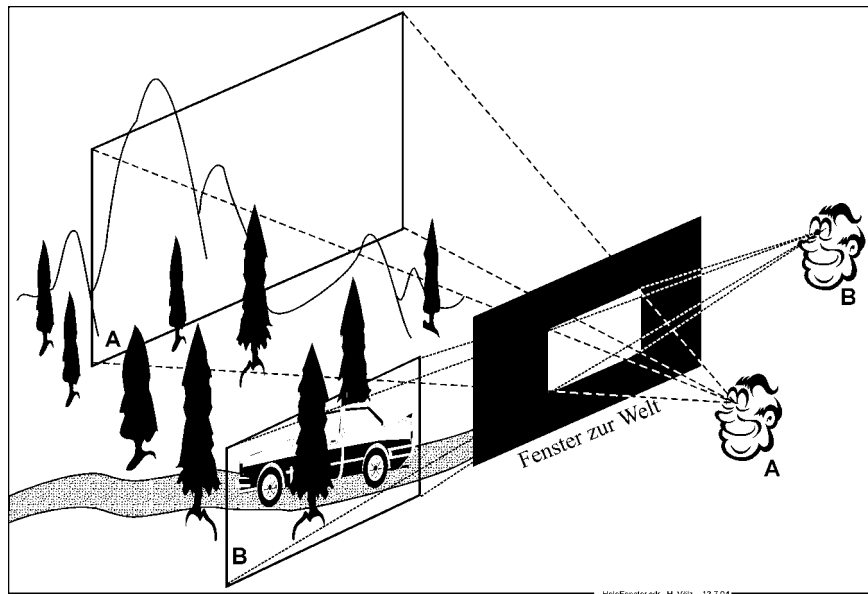


Bild 34. Durch ein Fenster sehen wir Ausschnitte der Welt. Ihre Größe hängt vom Abstand zum Fenster ab. Sie ändern sich außerdem mit der Richtung, aus der wir zum Fenster blicken.

Neben dem Quantenmodell des Lichtes – das in diesem Kapitel nicht benötigt wird – gibt es noch das Wellenprinzip, das auf Christiaan *Huygens* (1629 - 1695) zurückgeht. Es besagt, dass sich von jedem leuchtenden oder beleuchteten Punkt eine Kugelwelle ausbreitet. Bei einer Oberflächen überlagern sich diese Kugelwellen zur Wellenfront, die sich von der Oberfläche fortbewegt. Auch diese Wellenfront wird beim Durchlaufen von Grenzflächen mit verschiedenen Brechungsindizes verändert. Leider sind die Zusammenhänge dabei aber weniger anschaulich und deshalb ungebräuchlicher. Doch ganz analog zur Strahlenoptik ergibt sich so Bild 35b.

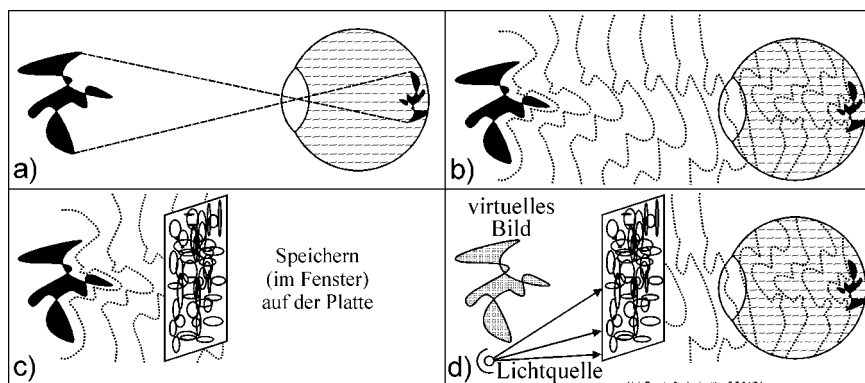


Bild 35. Abbildungen zu unserem Auge gemäß der Strahlenoptik (a) und dem Wellenmodell (b). Wird die Wellenfront auf eine Platte gespeichert (c), so kann sie das Bild der Welt ersetzen (d).

Wird bezüglich der sich mit Lichtgeschwindigkeit fortschreitenden Wellenfront der ein fester Ort gewählt, so ändern dort die elektromagnetischen Lichtwellen mit etwa 10^{15} Hz ihre elektrische und magnetische Feldstärke. Um einen Momentanwert festzustellen, muss die Messzeit folglich kleiner als 10^{-15} s gewählt werden. Obwohl dies z.Z. – wenn überhaupt – nur mit extrem hohem Aufwand möglich ist, sei diese Möglichkeit der Einfachheit halber einfach vorausgesetzt. Erfolgt dann dieses Kurzzeitmessung auch noch gleichzeitig auf einer Fläche gemäß dem Fenster von Bild 34, so steht das Ergebnis für alle Informationen, die durch dieses Fenster prinzipiell – von nah und fern und aus allen Richtungen wahrnehmbar waren, denn sie müssen ja durch dieses Fenster hindurch gelangt sein. Würde es somit gelingen dieses Wellen-

„Bild“ in der Fensterfläche einzufrieren, zu speichern, so enthielte diese Struktur die vollständige Information. Eine solche Aufzeichnung zeigt schematisch Bild 35c. Sie sei bereits als „Hologramm“ bezeichnet. Leider hat diese gespeicherte Information – wie später genauer gezeigt ist – auch nicht die geringste bildliche Ähnlichkeit mit dem Bild der Welt, das in ihr enthalten ist. Wir würden hierauf Nichts erkennen. Sie ist so etwas wie eine Kodierung der durch das Fenster gelangten räumlichen Wirklichkeit. Es gibt jedoch eine Möglichkeit der Decodierung. Hierzu ist das „Hologramm“ auf spezielle Weise von hinten zu beleuchten. Dann entsteht gemäß Bild 35d hinter dem Hologramm wieder die ursprüngliche Wellenfront. Sie breitet sich aus und gelangt zu unserem Auge, in dem dadurch das ursprüngliche Bild entsteht. Dabei besteht kein Unterschied ob wir durch das Fenster von Bild 34 oder auf das beleuchtete Hologramm von Bild 35d blicken. Wir können von dicht drauf blicken und sehen dann einen anderen Teil der Wellenfront und damit den dazugehörigen größeren Ausschnitt. Wir können aus anderen Richtungen oder von der Seite drauf schauen und erhalten wiederum andere Wellenfronten, die jeweils das zugehörige Bild herrufen. Vereinfacht und verkürzt gilt damit, wenn es gelänge, die Wellenfront in einem Fenster einzufrieren, so wäre das entstehende „Hologramm“ ununterscheidbar von einem entsprechenden Fenster zur Welt. Das gilt natürlich nur für die Welt zu diesem Zeitpunkt. Die Änderungen in der Zeit wären genauso wie bei einer Fotografie nicht verfügbar.

5.7.1 Zonenlinse

Die anschauliche Betrachtung des Holographieprinzips vom vorigen Abschnitt ist technisch so nicht realisierbar. Es müssen nicht die Feldamplituden der Wellenfront, sondern ihre Energiewerte gespeichert werden. Dies ist mit Interferenz möglich. Der einfachste Fall betrifft einen einzelnen Lichtpunkt, vom dem eine Kugelwelle ausgeht. Sie wird gemäß **Bild 36a** mit einer ebenen Wellenfront gleicher Frequenz überlagert. Die zugehörige Lichtquelle befindet sich im Unendlichen. Dabei addieren sich beide Wellen in jedem Raumpunkt entsprechend ihrer Phase. Bei gleicher Phase verstärken, bei entgegengesetzter subtrahieren sie sich. Für eine ausgewählte Ebene ist dies im Bild durch die schwarzen Ellipsen symbolisiert. Da sich an diesen Stellen die beiden Wellen (weitgehend) aufheben, ist es hier dunkel. Dazwischen addieren sich die Wellen und es ist hell. So entsteht in dieser Ebene das Bild 36b der Fresnelschen Zonenlinse (Augustin Jean **Fresnel**; 1788 - 1827). Wenig veränderte Zonenlinsen entstehen in parallelen Ebenen im Abständen von jeweils $\lambda/2$. Diese Intensitätsbilder bestehen solange, wie die Punktquelle und die ebene Wellenfront unverändert vorhanden sind. Daher kann mit ihnen eine Fotoplatte belichtet werden. Bei günstigen Belichtungsbedingungen und einer sehr dünnen Fotoplatte ergibt sich dann eine einzelne Zonenlinse. Im Idealfall ist sie in den hellen Bereichen völlig lichtdurchlässig und in den dunklen Total undurchsichtig. Bereits hier wird deutlich, dass Fotoplatten für die Holographie ein sehr hohes Auflösungsvermögen besitzen müssen. Bereits der zehnte Ring hat nur noch eine Breite von etwa $\lambda/3$. Soll grünes Licht mit etwa 550 nm aufgezeichnet werden, so beträgt seine Breite weniger als 200 nm. Das entspricht einer Auflösung von mehr als 5 000 Linien/mm. In dicken Fotoplatten wird eine Folge von Zonenplatten gespeichert. Die Verhältnisse sind dann unübersichtlicher (s.u. Volumen holographie).

Eine Eigenschaft der Zonenlinse lässt sich mittels Bild 36c herleiten. Dazu sei F der Ort einer Punktquelle. Er kann auch als Brennpunkt betrachtet werden. Ferner sei λ die verwendete Wellenlänge und l eine Entfernung, die einer Brennweite entspricht. In dieser Entfernung wird nun die Interferenz der Punktquelle mit der ebenen Welle betrachtet. Für alle ganzzahligen k addieren sich die Wellen in den radialen Entfernungen von $k \cdot l$ bis $k \cdot l + \lambda/2$. Dazwischen löschen sie sich mehr oder weniger aus. Diese Bereichslängen sind genau reziprok zum jeweiligen Radius des Ringes der Zonenlinse. Daher ist der Flächeninhalt aller hellen und dunklen Bereiche der Zonenlinse gleich groß. Genau in diesem Maßstab werden die Ringzonen nach außen immer schmaler.

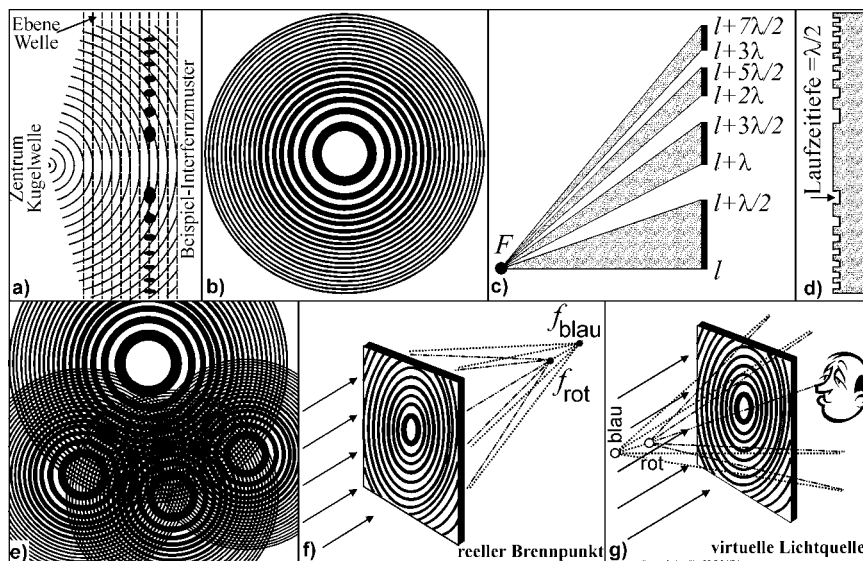


Bild 36. Zur Entstehung und zu den Eigenschaften der fresnelschen Zonenlinse.

Zwei wichtige Eigenschaften der Zonenlinse betreffen ihr Verhalten gegenüber einer ebenen Welle. Hinter der Zonenlinse bilden sich dabei Brennpunkte für die einzelnen Wellenlängen aus. Infolge der Bedingungen von Bild 36c befinden sie sich je nach der Farbe des Lichts in unterschiedlicher Entfernung. In diesem Sinne ist eine Zonenlinse eine **Sammellinse** mit stark ausgeprägtem chromatischem Fehler. Doch die Zonenlinse kann auch wie eine **Zerstreuungslinse**

wirken. Für einen Beobachter hinter der Linse scheint das aus den Unendlichen kommende parallele Licht von einer Punktquelle her zu rühren (Bild 36g). Dabei hat wieder jede Wellenlänge einen anderen Ausgangspunkt. In diesem Fall liegen virtuelle Lichtquellen vor. Sie zeigen sich nur einem Betrachter. Die „Brennpunkte“ in Bild 36f sind dagegen reelle Abbilder der unendlich fernen Lichtquelle sind. Sie können mit einem Blatt Papier aufgefangen werden.

Ein besonderer Vorteil der Zonenlinse besteht darin, dass ihr Verhalten für alle Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums gilt. Deshalb kann sie auch dort zur Abbildung benutzt werden, wo es kein geeignetes Linsenmaterial gibt, z.B. im fernen UV, IR oder Röntgenlicht. Sie funktioniert sogar für beliebige Wellen, also auch für Schall und ermöglicht hier „Linsen“ herzustellen.

Eine ideale Zonenlinse ist technisch schwierig herzustellen, denn die einzelnen Ringe müssen zusätzlich durch radiale Streben verbunden werden. Nachteilig ist ferner, dass immer nur die Hälfte des Lichtes die Linse genutzt werden kann. Beide Nachteile lassen sich für einzelne Wellenlängen vermeiden. Hierzu wird die Struktur der Zonenlinse in ein lichtdurchlässiges Material (z.B. Fotolack; s. Abschnitt 5.6.2) entsprechend Bild 36d eingepreßt. Die Tiefe muss dabei so gewählt werden, dass der Laufzeitunterschied in der Luftvertiefung im Vergleich zur Zeit im Medium $\lambda/2 \pm k \cdot \lambda$ für $k=0, 1, 2 \dots$ beträgt. Dann interferieren die Wellen aus den Vertiefungen mit denen im benachbarten Material. Hierdurch entsteht die zur Zonenlinse äquivalente Wirkung (vgl. Phasenhologramm). Dieses Prägen bietet außerdem den Vorteil, dass dann ein Hologramm (ähnlich einer CD) leicht mechanisch durch Pressung vervielfältigt werden können. Doch die Anfertigung des dazu notwendigen Musterhologramms bleibt sehr schwierig (s.u.).

Liegen statt der einen Punktquelle mehrere vor, so interferiert jede Punktquelle mit der ebenen Welle und erzeugt dabei eine eigene Zonenlinse. Dies sich daraus ergebende Überlagerung zeigt schematisch Bild 36e. Natürlich interferieren auch die Wellenfronten der Kugelwellen. Doch zur Vereinfachung der Betrachtung kann dies hier vernachlässigt werden. Daher ist Bild 36e ein Hologramm der vier noch gerade erkennbaren Punktquellen. Von einem beleuchteten Objekt gehen formal unendlich viele Punktquellen aus. Genauer bedeutet das eine Wellenfront. Wird sie mit einer ebenen Welle überlagert, so entstehen auch extrem viele Zonenlinsen. Genau sie bilden das Hologramm dieses Objektes und besitzen mit ihm keine bildliche Ähnlichkeit.

Eigentlich sind die Zonenlinsen bis ins Unendliche ausgedehnt. Jedoch für ihre Wirkung genügen bereits die etwa zehn ersten Ringe. Doch je weniger Ringe vorhanden sind, desto unschärfer wird der Brennpunkt bzw. Ort der virtuellen Punktquelle. Das gilt ähnlich für das Hologramm eines Objekts. So entsteht zwar die Aussage, das jedes Bruchstück von einem Hologramm das vollständige Bild des holographierten Objektes enthält. Das ist jedoch nur im Prinzip richtig. Denn je geringer die Fläche des Hologramms ist, desto weniger scharf ist in ihm das Objekt gespeichert. Auch wenn erst weiter unten auf die Hologrammwiedergabe eingegangen wird, ist bereits hier die entsprechende Wirkung durch **Bild 37** demonstriert. Die Informationsmenge in einem Hologramm ist daher etwa proportional seiner Fläche.

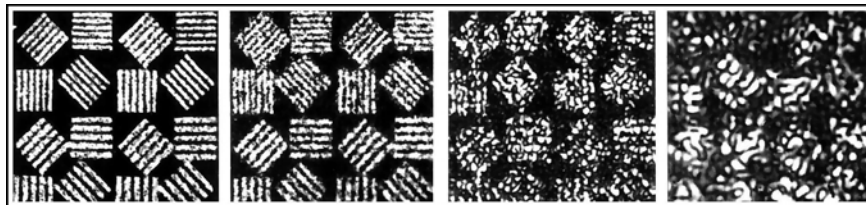


Bild 37. Rekonstruktion eines Hologramm in Abhängigkeit von der genutzten Größe. Von links nach rechts verkleinert sich die Fläche auf $1/4$; $1/16$ und $1/100$ des linken Bildes. Zunächst sind noch die Raster in den Quadraten, dann nur noch die Quadrate zu erkennen, bzw. zu errahnen.

5.7.2 Durchlichthologramm

Im Prinzip kann ein Hologramm ähnlich aufgenommen werden, wie es Bild 36a für die Zonenlinse zeigt. An der Stelle der Punktquelle muss dann das aufzunehmende Objekt stehen. Dies ist z.B. für durchsichtige (Glas-) Objekte möglich. Hierbei liegt die *Geradeaus-* bzw. *In-Line-Holographie* vor. Mit ihr wurden ab 1948 von Dennis **Gábor** (1900 - 1979) die ersten Hologrammversuche (s.u.) begonnen. Doch dabei wird u.a. der Betrachter durch die ihm gegenüberliegende helle Laserbeleuchtung geblendet. Daher wurde bald zu einer *schrágen Beleuchtung* übergegangen, die sogar den Brewsterwinkel mit Totalreflexion nutzen kann. Sie heißt auch *Off-Axis-*, *Off-Line-*, *Seitenband-* oder *Trägerfrequenz-Holographie*¹. Das Prinzip der so erfolgenden *Aufzeichnung* zeigt **Bild 38a**. Der vom Laser ausgehende Lichtstrahl wird zunächst erweitert und dann zu einem parallelen Lichtbündel geformt. Die dafür erforderliche optische Einheit aus Zerstreungs- und Sammellinse heißt *Kollimator*. Ein Teil des Lichtbündels – der Referenzstrahl – gelangt als ebene Wellenfront über einen Spiegel zur Fotoplatte. Der andere Teil trifft auf das Objekt, das jetzt auch undurchsichtig sein kann. Die von dort ausgehende, verformte Wellenfront interferiert mit dem Referenzstrahl. Das geschieht auch in der Platte, die so belichtet und anschließend entwickelt und fixiert wird. Das Ergebnis ist ein Hologramm. Wurde die Aufnahme mit hochauflösendem AgX-Material durchgeführt, so es mit bloßem Auge nahezu homogen grau aus. Bei Phasenhologrammen ähnelt es Pergamentpapier und ist nahezu durchsichtig. Nur unter einem Mikroskop mit sehr hoher Vergrößerung ist im Hologramm die Vielzahl der überlagerten Zonenlinsen zu errahnen.

¹ Der Begriff ergibt sich aus einer Analogie zur Modulation in der Nachrichtentechnik. Da die Richtung der Referenzwelle und die mittlere Richtung der Objektwelle sich unter einem Winkel treffen, wirkt die Objektwelle quasi modulierend den Träger, die Referenzwelle ein. Dieser Effekt wird besonders einsichtig, wenn die Raum-Frequenzen beider Wellen betrachtet werden. Eine andere Betrachtung geht von Beugungsbildern des Hologramms aus. Sie erscheinen hauptsächlich durch die +1. und -1. Beugungsordnung. Jedoch nur das eine der beiden Bilder – das im Bild 38c gezeigte – wird praktisch genutzt.

Für die hier gewählte Aufnahmetechnik gelangen der Objekt- und Referenzstrahl von derselben Seite auf die Fotoplatte. Dabei dürfen sich weder das Objekt noch der Spiegel gegenseitig abschatten. Beide Wellen müssen möglichst vollständig auf die Platte gelangen.

Zur **Wiedergabe** (Decodierung) wird das Hologramm an die gleiche Stelle gebracht und von einem gleichartig gerichteten, ebenen Referenzstrahl beleuchtet werden (Bild 38b). Dadurch wird die ursprüngliche Wellenfront hinter dem Hologramm rekonstruiert und von der Gegenseite kann das virtuelle Bild des Objektes genau an der Stelle, wo sich zuvor das Objekt befand, betrachtet werden. Entsprechend der Größe des Hologramms, kann es von verschiedenen seitlichen Orten sowie von nah und fern betrachtet werden. Es ist genau zu dem Fenster geworden, wie es in Bild 34 aufgezeigt ist. Mit einer Verkleinerung der Fläche des Hologramms reduziert sich daher auch nicht nur die Auflösung (vgl. Bild 37), sondern ebenso die „Fenstergröße“ für die Objektbetrachtung. Dabei können, wie die Positionen 1 und 3 zeigen, durchaus Teile des Objekt unsichtbar werden. Andererseits gelingt es, z.B. von der Position 1 aus, etwas hinter den vorderen Vorsprung zu schauen.

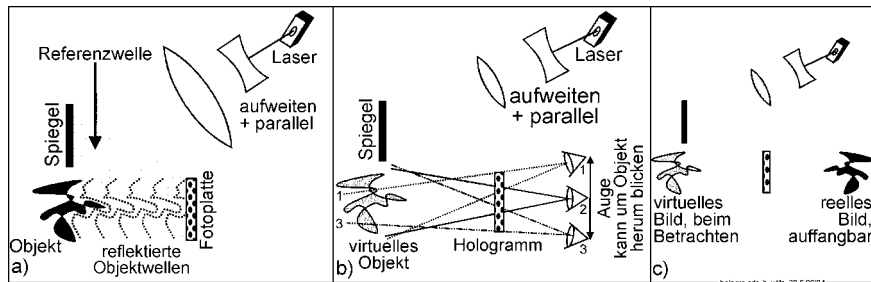


Bild 38. Aufzeichnung (a) und Wiedergabe (b) von Durchlichthologrammen, sowie Lage des reellen Bildes (c).

Bei der Hologramm-Wiedergabe existiert neben dem virtuellen auch ein **reelles Bild**. Es ergibt sich aus der doppelten Eigenschaft der Zonenlinse gemäß Bild 36f und g und befindet sich symmetrisch auf der Gegenseite des Hologramms (Bild 38c). Es ist ebenfalls 3-dimensional, jedoch „*pseudoskopisch*“ (Details s.S. 85). Sie können aber auf Papier aufgefangen oder zur Hologrammkopie (s.u.) genutzt werden.

In der Optik wird der Durchgang von Licht durch eine Substanz als Transmission bezeichnet. Genau dies geschieht bei der Wiedergabe des Hologrammprinzips von Bild 38. Daher liegen hier **Transmissions-Hologramme** vor. Sie sind im Gegensatz zu späteren entstandenen Prinzipien deshalb „unbequem“, weil sie von hinten beleuchtet werden müssen. Andere Typen sind später entstanden und in den nächsten Abschnitten besprochen. Doch fast alle Hologramme der Anfangszeit wurden so hergestellt, und auch heute noch sind die meisten Hologramme in Forschung und Technik von diesem Typ. Außerdem besitzen sie als Masterhologramme (s.u.) eine grundlegende Bedeutung. Von Vorteil ist, dass sie im Gegensatz zu anderen Varianten eine große optische Tiefe ermöglichen, die sogar mehrere Meter erreichen kann. Im Gegensatz zur Fotografie haben sie den großen Vorteil, dass es bei ihnen so gut wie **keine Tiefenschärfe** gibt. Stets ist die ganze Szene scharf abgebildet. Beim Betrachten müssen wir uns daher entscheiden, welches Abschnitt wir scharf fixieren wollen.

Der Aufbau für die Aufnahme des Transmissionshologramms nach Bild 38a kann unter einigen Randbedingungen auch vereinfacht werden. Zwei Beispiele zeigt **Bild 39**. Generell kann die Referenzwelle auch leicht divergieren. Sie kann außerdem wie in Bild 39a gleichermaßen zum Objekt und zur Fotoplatte gelangen. Das Hauptproblem besteht hier darin, dass immer eine gewisse gegenseitige Abschattung entsteht. Die Verhältnisse werden etwas günstiger, wenn eine Trennung für Referenzstrahl und Beleuchtung des Objektes mittels eines teildurchlässigen Spiegels erfolgt (Bild 39b). In beiden Fällen muss für die Wiedergabe der Referenzstrahl aus gleicher Richtung und mit unveränderter Divergenz auf das fertige Hologramm fallen. Die Betrachtung erfolgt dann ebenfalls hinter der Fotoplatte.

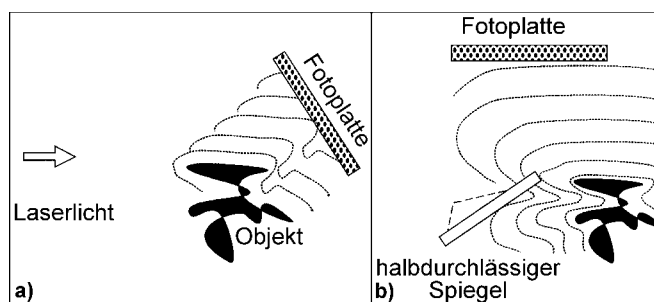


Bild 39. Weitere Anordnung für die Aufzeichnung von Transmissionshologrammen.

Eine gewisse mathematische Vereinfachung der komplexen Zusammenhänge für die Transmissions-Hologramm-Aufzeichnung tritt dann ein, wenn der Abstand zwischen Objekt und Hologramm im Vergleich zur Dimensionen des Objektes groß ist. Dann ist das Hologramm die Fourier-Transformierte der Objektform. Folglich wird dann auch von **Fraunhofer-** bzw. **Fourier-Holographie** gesprochen (Joseph von **Fraunhofer**; 1787 - 1826), Jean-Baptiste Joseph Baron de **Fourier**; 1768 - 1830). Da durch wird deutlich, dass eine Hologramm immer eine spezielle (mathematische) Abbildung des Objektes darstellt und die Wiedergabe auch als Rücktransformation aufgefasst werden kann (vgl. z.B. [Ostrowski]).

Wird ein Hologramm mit der Wellenlänge λ_a aufgenommen und mit λ_w wiedergegeben, so entsteht ein zusätzlicher Effekt. Das Bild ist gegenüber dem Original um den Faktor $V = \lambda_w / \lambda_a$ vergrößert bzw. verkleinert. Dieses Prinzip wird bei der **Mikroskop-Holographie** genutzt. Bei einer Fourier-Holographie-Anordnung ist dann die sphärische Aberration Null. Auch

ein Koma lässt sich vermeiden. Jedoch tritt etwas Astigmatismus auf (vgl. Abschnitt 5.1.2). Gegenüber der üblichen Mikroskopie ist weiter ein viel größeres Beobachtungsfeld erreichbar.

Bei der Aufzeichnung und Wiedergabe des Hologramms sind folgende Bedingungen und Einschränkungen zu beachten:

- Für eine **einwandfreie Interferenz** von Referenz- und Objekt-Welle darf nur eine einzige Wellenlänge, d.h. eine gut **monochromatische Lichtquelle** benutzt werden. Außerdem muss die **Kohärenzlänge** der Strahlung mindestens so lang sein, wie die größte Entfernung von der Lichtquelle über den Spiegel bzw. über das Objekt bis zur Fotoplatte. Beides ist nur mit hochwertigen Lasern zu erfüllen.
- Für die **notwendige Auflösung** von mindestens 1000 Linien/mm werden sehr hoch auflösenden Speichermedien benötigt. Sie besitzen eine geringe Lichtempfindlichkeit (vgl. Bild 33). Dadurch entstehen recht **lange Belichtungszeiten**. Während dieser Zeit dürfen sich die Abstände der einzelnen Teile um weniger als die Wellenlänge ändern. Dies verlangt einen sehr stabilen **mechanischen Aufbau** sowie **gute Temperatur- und Feuchtekonstanz**.

Die bisher dargestellten Durchlichthologramme habe einige Nachteile, die durch veränderte Techniken weitgehend zu vermeiden sind. Dies betrifft vor allem:

- Hologramme sollten wie Bilder an der Wand hängen und durch Beleuchtung von vorn zu betrachten sein. Diese **Reflexhologramme** sind im nächsten Abschnitt behandelt.
- Hologramme sollten zur Betrachtung kein monochromatisches bzw. Laser-Licht benötigen. Es sollte gewöhnliches **Tages- oder Kunstlicht** genügen. Dies ist bei Volumen- bzw. Regenbogen-Hologrammen der Fall (Abschnitt 5.7.3 und 5.7.6).
- Da die Erzeugung eines Hologramms sehr aufwendig ist, sind für eine massenweise Herstellung einfache **Kopierverfahren** erforderlich (Abschnitt 5.7.5).
- Damit Hologramme nicht Blitzlichtfotos ähneln, ist bei der Aufnahme eine **ausgewogene Beleuchtung** mit mehreren „Lichtquellen“ erwünscht (Abschnitt 5.7.4).
- Hologramme sollten auch **farbig** sein und/oder einen Rundblick, wie bei einem **Panorama** ermöglichen (Abschnitte 5.7.4).

5.7.3 Reflexions- und Volumen hologramm

Beim Durchlichthologramm befinden sich Referenzstrahl und Objekt auf der gleichen Seite der Fotoplatte. Entsprechend **Bild 40a** besteht auch die Möglichkeit sie auf beiden Seiten einer durchsichtigen Fotoplatte anzuordnen. Trotz ihrer entgegengesetzten Ausbreitungsrichtung, interferieren dann Referenz- und Objektwelle im Bereich der Fotoplatte. Sie wird daher mit ebenfalls mit den Zonenlinsen belichtet, die dem Objekt entsprechend. Das daraus hervorgehende Hologramm muss für die Betrachtung – wie jedes andere Hologramm – genauso wie bei der Aufzeichnung beleuchtet werden. Das virtuelle Bild liegt dann genauso wie das ursprüngliche Objekt hinter der Fotoplatte. Folglich muss sich der Betrachter auf der Seite der Lichtquelle befinden. Es liegt ein **Reflexions-Hologramm** vor. Doch die in Bild 40a gezeigte Geradeaus- bzw. In-Line-Technik ist ähnlich wie beim Durchlichthologramm ungünstig. Denn hierbei können sich Betrachter und Lichtquelle gegenseitig verdecken. Besser ist eine entsprechend abgewandelte Off-Axis- oder Seitenbandtechnik, wie sie Bild 40b zeigt. Die dazugehörige Hologrammbetrachtung erfolgt gemäß Bild 40c. Derartige Reflexhologramme werden bewusst mit divergierendem Licht aufgenommen, denn dann kann die Wiedergabe mit einer leichter verfügbaren punktförmigen Lichtquelle erfolgen. Für die optimale Betrachtung eines Reflexhologramms müssen die Winkel der Beleuchtung und der Beobachtung gegenüber dem Hologramm möglichst genau eingehalten werden. Abweichungen hiervon machen das Hologrammbild zumindest unschärfer. Besonders deutlich tritt dies für weiter entfernten Bildteile auf. Damit ein Reflexhologramm möglichst gut sichtbar ist, sollte von hinten kein Licht einfallen. Recht gut bewährt sich eine dahinter angebrachte schwarze Fläche. Generell erscheinen jedoch die Bilder von Reflexionshologrammen deutlich flacher und unschärfer als die von Durchlichthologrammen.

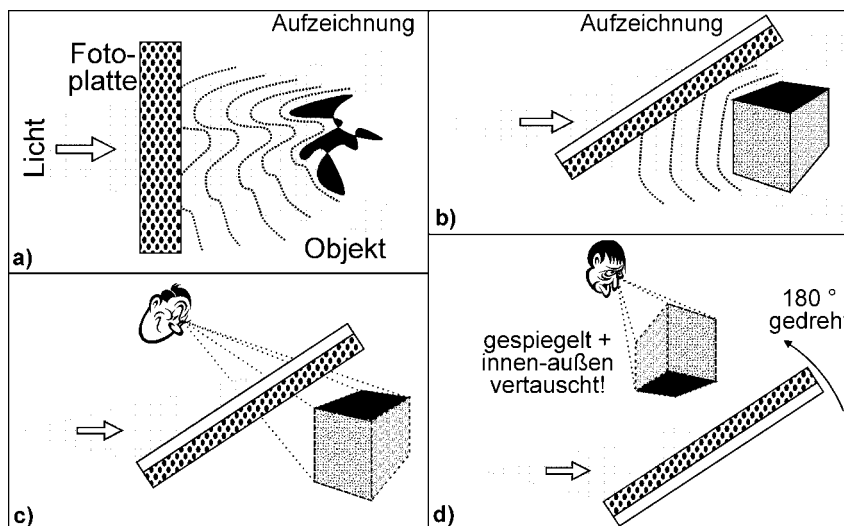


Bild 40. Aufnahme und Wiedergabe für Reflexionshologramme.

Die Interferenz von Referenz- und Objektwelle erzeugt Zonenlinsen im gesamten Interferenzraum, vgl. Bild 36a und S. 79. Die einzelnen Zonenlinsen stehen dabei senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Referenzwelle und folgen aufeinander im Abstand von $\lambda/2$. Bisher wurde eine so dünne Fotoplatte angenommen, dass nur eine einzelne Zonenlinse gespeichert wird. Dieser Fall wird als ebene Holographie bezeichnet. Ist die Fotoschicht deutlich dicker, etwa 5 bis 30 μm , so befinden sich rund 20 bis 100 verschiedene Zonenlinsen hintereinander in der Fotoschicht (Zonenlinsenfolge). Dann liegt *Volumenholographie* vor. Das **ebene** oder **Dünnschicht-Hologramm** ist besonders für Durchlichthologramme geeignet. Bei der Wiedergabe wirkt es auf die Referenzwelle wie ein Gitter ablenkend, streuend ein. Das gewünschte Bild entsteht in der 1. Beugungsordnung. Beim **Volumenhologramm** addieren sich die Wirkungen der einzelnen Zonenlinsen. Dafür gelten die Betrachtungen der Bragg-Reflexion (Sir William Henry **Bragg**; 1862 - 1942 und Sohn Sir William Lawrence **Bragg**; 1890 - 1971). Es treten vor allem die -1., 0. und +1 Beugungsordnung auf. Für die Reflexionshologramme kann dieses Prinzip als eine Weiterentwicklung der Farbfotographie nach Gabriel Jonas **Lippmann** (1845 - 1921) gelten (Abschnitt 5.3.2; Bild 17a). Es kann mit weißem Licht bestrahlt werden. Die einzelnen Zonenlinsen wirken dann interferierend so zusammen, dass nur ein Bild nur für die „richtige“ Wellenlänge entstehen kann. Deshalb ist die Beleuchtung mit weißem Tages- oder künstlichem Licht möglich. Das Volumen-Reflex-Hologramm erzeugt dann das reflektierte Bild ausschließlich mit der aufgezeichneten Wellenlänge. Alle anderen Wellenlängen werden durch Interferenz unterdrückt. Daher wird es auch als **Weißlichthologramm** bezeichnet. Es erfordert jedoch eine höhere Auflösung des Fotomaterials. Genügen für Transmissionshologramme 1 000 bis 1 500 Linien/mm, so sind für Weißlichtholgramme mindestens 5 000 notwendig.

Reflexions-Hologramm-Bilder sind häufig grünelbe bis orange. Sie wurden dennoch mit einem rotem Laser aufgenommen. Doch nach der Entwicklung und Fixierung schrumpft die Gelatine und dadurch verringerten sich die Abstände zwischen den einzelnen Zonenlinsen, so dass schließlich eine kürzere Wellenlänge wirksam wird. Dies lässt sich teilweise durch Anhauchen beobachten. Infolge der zunehmenden Feuchtigkeit wird dann das Bild rötlicher. Dies gilt natürlich nicht für Dünnschichthologramme und insbesondere für die Regenbogenhologramme (Abschnitt 5.7.6).

Beim Reflexionshologramm besteht noch die Möglichkeit, es von der „falschen“ Seite zu beleuchten und zu betrachten. Um dies deutlicher zu zeigen, sind in Bild 40b bis d die Unterlage und Fotoschicht unterschiedlich gekennzeichnet. In Bild 40d ist dann das Hologramm um 180° gegenüber der Aufnahmeposition gedreht. Dadurch entsteht das Bild *vor* dem Hologramm. Es ist jedoch, wie das reelle Bild beim Durchlichthologramm (s.S. 82) reell und **pseudoskopisch** (*griechisch pseudos Täuschung; skopein betrachten*). Bei ihm sind die Tiefenverhältnisse gegenüber dem Original invertiert, vorn und hinten sowie bei hohlen Objekten innen und außen sind vertauscht. Wenn das Original eine gewölbte Form besaß, so scheint es jetzt umgestülpt zu sein. Solch ein Bild verhält sich zum Objekt wie ein Gipsabdruck zum Original. Durch die veränderte Blickrichtung kann auch der Vordergrund durch den Hintergrund verdecken. Hinzu kommt, dass derartige Bilder oft merkwürdig flach erscheinen. Dadurch all diese Veränderungen sind pseudoskopische Bilder oft schwer zu erkennen und zu interpretieren. Sie widersprechen unseren Seherfahrungen. Wenn das Hologramm hinreichend hell und die Umgebung dunkel ist, lässt sich dieses reelle Bild auch auf einer Mattscheibe sichtbar machen.

5.7.4 Mehrfachbeleuchtung und -belichtung

Wenn mit Blitzlicht fotografiert wird, so entstehen vielfach hart aussehende, ästhetisch unbefriedigende Bilder. Die Gegenstände besitzen helle Vorderflächen und werfen tiefe Schlagschatten. Ein Photograph arbeitet daher mit mehreren, gut verteilten Lichtquellen. Alle zuvor behandelten Hologramme sind quasi mit nur einer Lichtquelle beleuchtet. Um besser ausgeleuchtete Hologramme zu erhalten, sind folglich mehrere Lichtquellen notwendig. Wegen der Kohärenz, müssen sie aber von einem Laser abgeleitet werden. Das ist nur durch Strahlteilung (Splitting) möglich. Ein Beispiel hierfür zeigt Bild 41a. Der Aufbau ähnelt weitgehend Bild 38a. Mittels des Strahlteilers wird zusätzlich ein zweiter Strahl gebildet, der über einen Spiegel 2 und den sich den anschließenden Kollimator das Objekt aus einer zweiten Richtung beleuchtet. Das Prinzip kann durch mehrfache Strahlteilung erweitert werden. Nach diesem Prinzip entsteht ein Durchlichthologramm, das genauso wie die einfachen Durchlichthologramme betrachtet werden kann. Die mehrfache Beleuchtung ist ähnlich auf die Reflexionshologramme übertragbar. Dann entsteht in Abwandlung von Bild 40b das Bild 41b. Hier ist darauf zu achten, dass der 2. Beleuchtungsstrahl nicht direkt auf die Fotoplatte trifft. Dann wären nämlich zwei Referenzwellen vorhanden, wodurch die Betrachtung deutlich erschwert würde.

Bei einem Volumenhologramm können auf ähnliche Weise nacheinander sogar **mehrere Bilder** weitgehend ohne gegenseitige Störung aufgezeichnet werden. Durch Mehrfachbelichtung entsteht ein Multi- oder **Vielfach-Hologramm**. Für jedes einzelne Bild muss lediglich der **Referenzstrahl** aus einer anderen Richtung und/oder mit einer anderer Divergenz auf die Fotoplatte fallen. Im Hologramm entstehen dabei für jedes Bild individuell geneigte Folgen von Zonenlinsen. Zur Betrachtung der einzelnen Bilder ist lediglich die Beleuchtung entsprechend dieser Zonenlinsenfolgen zu wählen. Das entsprechende Bild wird dabei durch Interferenz an den Folgen der Zonenlinsen selektiert. Vielfach genügt sogar ein einfaches Kippen des Hologramms. Wurde z.B. ein Gesicht einmal mit dem rechten offenen und dann geschlossenen Auge aufgenommen, so scheint bei der Hinundher-Bewegung des Hologramms die Person zu blinzeln². Eine Erweiterung auf mehrere Bilder ermöglicht sogar die Darstellung ein filmähnliches Geschehens.

In ähnlicher Weise sind auch **farbige Hologramme**³ möglich. Das Prinzip hierfür zeigt Bild 41d. Jede Wellenlänge erzeugt im Volumenhologramm den entsprechenden Abstand der Zonenlinsenfolge. Im Hologramm werden quasi gleichzeitig die drei Farbauszüge gespeichert und bei der Wiedergabe richtig zusammengefügt. Dieses Prinzip wurde erstmalig 1965 durch B. T. **Cathy** verwirklicht. Doch die praktischen Schwierigkeiten hierfür sind gleich dreifach:

² Dieser simple Effekt kann auch mit den viel einfacheren Wackelbildern erreicht werden, s. Abschnitt 6.###.

³ Farbige Bilder erzeugt auch das Regenbogenhologramm von Abschnitt 5.7.x. Doch seine Farben hängen nicht mit den Farben des aufgenommenen Objekt zusammen.

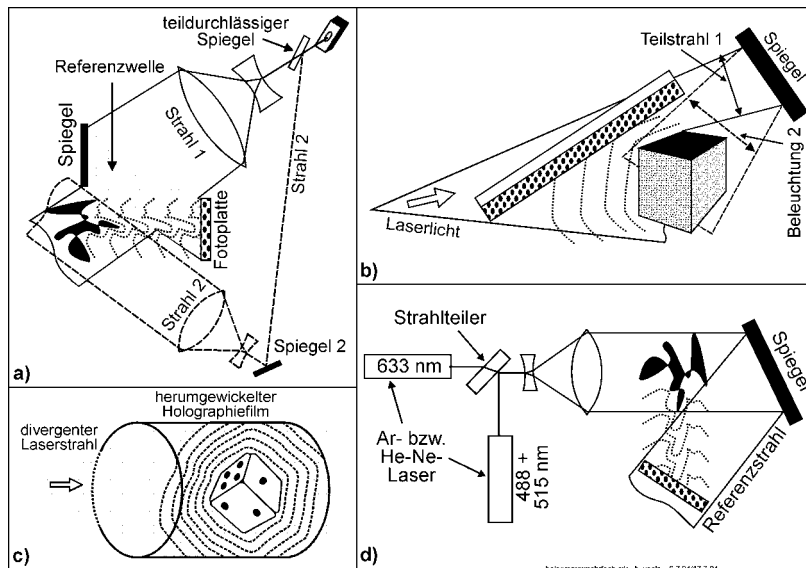


Bild 41. Hologrammaufnahmen mit mehrfacher Beleuchtung: a) Durchlicht- und b) Reflexionshologramm, sowie c) Aufnahme eines Rundherum-Hologramms und d) eines 3-Farbenhologramms.

- Es müssen drei richtig abgestimmte Laserfrequenzen zur Verfügung stehen. Im Bild genühten zwei Gas-Laser, weil der Argon-Gas-Laser unter bestimmten Bedingungen zwei Frequenzen abstrahlt. Da heute fast ausschließlich Halbleiterlaser verwendet werden, gab es bis vor kurzem Schwierigkeiten mit dem blauen Laser.
- Die Fotoplatte muss für alle drei Wellenlängen etwa gleich empfindlich sein. Andernfalls müssen im Nachhinein, die einzelnen Farbauszüge mit großen Schwierigkeiten wieder irgendwie zusammengefügt werden.
- Bei der Entwicklung und Fixierung darf das Fotomaterial nicht schrumpfen. Andernfalls müssen entsprechend tiefere Laserfrequenzen eingesetzt werden.

Durch eine noch weiter abgeänderte Aufnahmetechnik ist auch ein **Zylinder-** bzw. **380°-Hologramm** möglich, um das man vollständig herumgehen kann. Hierzu wird um das Objekt entsprechend Bild 41c ein Film in Form eines Zylinders herumgelegt. Die Laserbeleuchtung erfolgt von einer offenen Seite. Als Referenzwelle trifft sie direkt auf das Fotomaterial. Vom gleichzeitig beleuchteten Objekt breiten sich Wellenfronten in alle Richtungen aus. Sie gelangen auch zum Fotomaterial und erzeugen dort mit den Referenzwellen die speicherbaren Zonenlinsen. Es entsteht ein Durchlichthologramm. Zur Wiedergabe muss wieder das Laserlicht wieder von der Seite eingestrahlt werden.

5.7.5 Kopieren und Vervielfältigen

Das Herstellen eines Hologramms ist nur mit großem technischen Aufwand und einer langer Belichtungszeit möglich. Aber das allgemeine Gesetz, nach dem Kopieren und Vervielfältigungen von Gespeichertem deutlich einfacher, schneller und effektiver möglich sind, gilt auch hier. Beim Kopieren ist das reelle Bild eines primären bzw. Master- oder Mutterhologramms erforderlich. An diesen Ort wird die Kopier-Fotoplatte gebracht und mit einer Referenzwelle überlagert. Durch Interferenz entstehen dadurch erneut die dem eigentlichen Originalobjekt entsprechende Zonenlinsen und belichten die Fotoplatte. So entsteht eine Kopie des Masterhologramms. Eine typische Anordnung für originale Durchlichthologramme zeigt **Bild 41a**. Die Anordnung für Reflexions-Master-Hologrammen entspricht Bild 41b. Im Gegensatz zu beiden Bildern befindet sich das reelle Bild jedoch meist links oder rechts von der Kopier-Fotoplatte. Trifft dann die Referenzwelle von der gleichen Seite auf die Fotoplatte, so entsteht ein Durchlichthologramm. Geschieht es von der Gegenseite, so entsteht ein Reflexionshologramm. In Bild 41a und b befindet sich jedoch das reelle Bild teilweise vor als auch hinter der Fotoplatte. In diesem Fall entsteht ein **Bildebenen-Hologramm**. Bei seiner Betrachtung erscheint ein Teil des virtuellen Objektes vor und der andere Teil hinter dem Hologramm. Das Bild tritt also teilweise aus dem Hologramm heraus. Durch weitere verschiedene Anordnungen lassen sich beim Kopieren auch Hologramme erstellen, die sowohl originale geformte als auch pseudoskopischen (s.S. 85) Bilder zeigen.

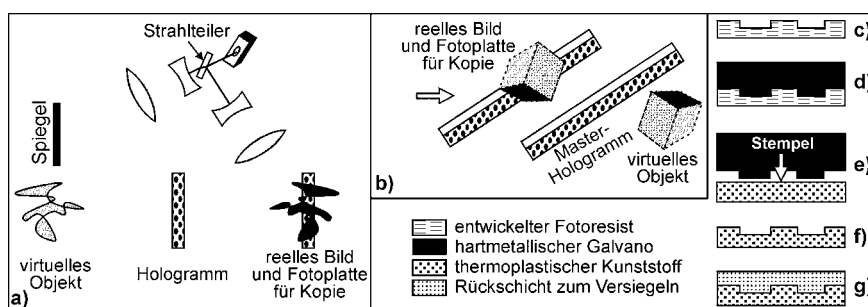


Bild 41. Kopieren von a) Durchlicht- und b) Reflexionshologrammen sowie c) bis g) ihre Vervielfältigung.

Mit den geschilderten Methoden ist jedoch noch keine *massenweise Herstellung* von Hologrammen möglich. Hierzu muss ein Prozess genutzt werden, der auch bei der Vervielfältigung von CDs, DVDs usw. gebräuchlich ist. Die Grundlage ist bei der Herstellung von Zonenlinsen im Zusammenhang mit Bild 36d auf S. 80 erklärt. Zuerst wird das Hologramm auf einen Fotoresist belichtet oder kopiert. Das funktioniert jedoch nur bei ebenen Dünnschichthologrammen. Entsprechend den gebildeten Zonenlinsen werden dann $\lambda/2$ -Vertiefungen gemäß Bild 41c herausgewaschen. Auf diese Oberfläche erfolgt eine stromfreie Abscheidung oder Bedampfung mit einem dünnen metallischen Belag, der elektrolytisch mit einem harten Metall verstärkt wird (Bild 41c). Als Stempel wird er bei recht hoher Temperatur und mit hohem Druck in einen thermoplastischen Kunststoff gepresst (Bild 41e). Dadurch wird der Kunststoff zu einem Hologramm (Bild 41f), das nur noch durch eine Rückschicht zu versiegeln ist (Bild 41g). Das Einprägen des Hologramms kann mit dem gleichem Stempel *im Sekundentakt* auf ständig neuen Kunststofffolien erfolgen. Nach mehreren Tausend Pressungen ist der Stempel jedoch zu stark abgenutzt. Werden mehr Hologramme benötigt, so müssen zunächst vom Stempel viele (eventuell tausend) Negative hergestellt werden, von denen wiederum viele positive Stempel zum Pressen erhalten werden können. In den meisten Fällen werden als Master die Regenbogenhologramme des nächsten Abschnittes verwendet. 1984 wurden auf diese Weise bei 11 Millionen Exemplaren des Märzheftes der „Geographie“ das Hologramm des Adlers aufgebracht. Auch das verständlich geschriebene Buch zur Holographie [Ernst] mit vielen Hinweisen für die Amateurherstellung von Hologrammen besitzt auf seinem Deckel ein solches Hologramm von reichlich $11 \times 11 \text{ cm}^2$. Weitere Hinweise für Amateurholographen enthält [Heiß]. Um so mehr ist es erstaunlich, dass solche Hologramme als hochwertiges *Sicherheitskennzeichen* auf Geldscheinen, Kreditkarten, Software usw. angebracht werden. Die Sicherheit dafür besteht darin, dass nach wie vor die Masterhologramme nur mit sehr großem Aufwand in Speziallaboren hergestellt werden können und auch die Vervielfältigung und Einfügung in Hochsicherheitstrakts erfolgt. Zusätzlich sind die Kunststofffolien so dünn gehalten, dass sie nicht zerstörungsfrei abgetrennt werden können. Dennoch kamen 1992 Softwarepiraten an Kopien des Hologramms von Microsoft und konnten so scheinbare „Original-“ Software in den Handel bringen.

5.7.6 Regenbogenhologramm

Ein neue Holographie-Technik entstand 1969 durch Arbeiten von Steve *Benton*, die zu einer künstlerisch nutzbaren Display-Holographie führen sollten. Von einem vollständigen Hologramm wird nur ein schmaler horizontaler Streifen, z.B. mittels eines Spaltes ausgewählt (Bild 42a). Von ihm wird – ähnlich wie im Bild 41a gezeigt – jedoch eine „ganzflächige“ Kopie angefertigt. Wird von ihr das virtuelle Bild reproduziert, so ist es, entsprechend dem schmalen Ausgangsstreifen, auch nur innerhalb eines schmalen Bereiches, dem virtuellen Spalt sichtbar (Bild 42b). Diese Änderung hat daher zur Folge, dass das virtuelle Bild *nur seitlich* aus verschiedenen Richtungen zu betrachten ist. Ein vertikal veränderter Betrachtungsort ist nicht mehr möglich. Durch diese Technik gehen vom Objekt alle räumlichen „Höhen“-Informationen verloren. Dieser Nachteil hat jedoch auch Vorteile.

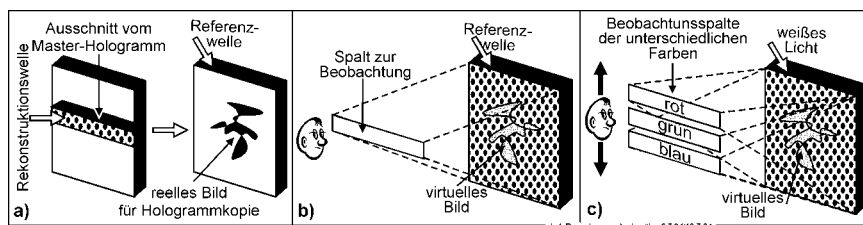


Bild 42. Herstellung und Eigenschaften von Regenbogenhologrammen.

Eine solche Hologrammkopie kann mit weißem Licht beleuchtet werden. Dann ist das virtuelle Bild in verschiedenen Höhenpositionen in einer jeweils anderen Regenbogenfarben zu sehen. So entstand der Begriff Regenbogenhologramm. Bild 42c zeigt davon nur drei Positionen. In Wirklichkeit erfolgt der Übergang zwischen den Farben gleitend. Dieser Fakt ähnelt der einfacheren Brennpunktverlagerung einer Zonenlinse in Bild 36f. Die Farben dieser virtuellen Bilder haben nichts mit ursprünglichen Objektfarben zu tun. Es liegt nur ein Schwarz-Weiß-Bild vor, dass lediglich mit einer Regenbogenfarbe „beleuchtet“ ist. Die optimale Breite für den Streifen aus dem Masterhologramm liegt – entsprechend unserer mittleren Pupillenöffnung – bei etwa 4 mm. Ist er breiter, so wird das virtuelle Bild unscharf; ist er schmaler wird es lichtschwächer.

Der zweite Vorteil der Regenbogenholographie besteht darin, dass hier im Gegensatz zur Weißlichtholographie (s.S. 85) ebene Dünnschichthologramme genügen. Sie können dadurch massenweise vervielfältigt werden (Bild 41 c bis f).

Das Prinzip der Regenbogenhologramms lässt sich auch umkehren. Das Hologramm wird dazu mit *zwei Lichtquellen in komplementärer Farben* beleuchtet. Sie sind so anzuordnen, dass die beiden virtuellen Spalte an der gleichen Stelle entstehen. Dadurch ergibt sich ein weißes Bild. Leider hat es jedoch farbige Ränder, denn die beiden Teilbilder besitzen immer unterschiedliche Größe. Wie bei den anderen Hologrammen gehört auch zum Regenbogenhologramm ein zweites reelles, pseudoskopisches Bild. Es wird hier dann sichtbar, wenn das Hologramm um 180° in seiner Bildebene – und nicht bezüglich Vorder-Rückseite – gedreht wird. Auch das Prinzip der Mehrfachhologramme ist auf Regenbogenhologramme anwendbar.

5.7.7 Technische Anwendungen und Computerhologramme

Hologramme besitzen nicht nur für virtuell räumliche Bilder Bedeutung. Sie haben auf mehreren anderen Gebieten Anwendung gefunden. Hier kann nur ein kleiner Ausschnitt kurz erwähnt werden. Einige weitere Beispiele enthalten u.a. [Ostrowski] und [Heiß]. Breiten Einsatz findet die holographische Methode in der *Messtechnik*. Dabei lassen sich

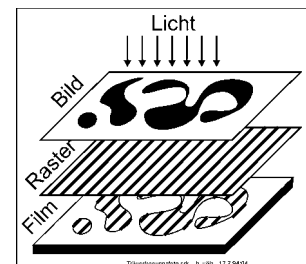
insbesondere sehr kleine Änderungen im μm -Bereich, wie sie z.B. durch Abnutzungen oder Druck-Zug Belastungen entstehen, gut sichtbar machen. Hierbei erfolgen u.a. *Mehrfachbelichtungen*. Daher wird auch von *Hologramm-Interferometrie* gesprochen.

Hologramme ermöglichen besondere Art der *Zeichenerkennung*. Auf einem kleinen Hologramm sei nur der Buchstabe E gespeichert. Bei der optischen Abbildung eines Textes wird dieses Hologramm als Filter in die Fourier-Ebene (\approx Brennpunkt) eingefügt. Bei der Projektion des Textes werden dann alle Orte hervorgehoben, wo ein E steht. Die Größe oder Drehung der jeweiligen E sind dabei von untergeordneter Bedeutung. Aber auch ähnliche Zeichen, wie z.B. F, B oder L werden - allerdings deutlich schwächer - hervorgehoben. Dementsprechend geht auch der Schriftfont ein. Die E anderer Zeichensätze erscheinen weniger hervorgehoben. Besonders vorteilhaft ist dieses Verfahren bei der Suche nach komplexen Strukturen und Gebilden.

Praktische Anwendungen haben sogenannte *holographisch-optische Elemente* (HOE) erlangt. Dies sind keine eigentlichen Hologramme. Ihre Wirkung besteht darin, dass sie Lichtstrahlen in genau vordefinierter Weise so beeinflussen, wie es mit Spiegeln oder Linsen bestenfalls bei großem Aufwand möglich ist. Ihre Mikrostruktur wird berechnet. Sie werden zunächst größer hergestellt und dann optisch verkleinert gespeichert. Ein Beispiel zur chromatischen Korrektur ist im Abschnitt 5.1.5 im Zusammenhang mit Bild 7c erwähnt. Auf ähnliche Weise sind auch *synthetische Hologramme* über Berechnungen möglich. Ein Pascal-Programm für einfache Punktgebilde enthält [Heiß].

Indirekte Methoden der Holographie kommen z.B. bei Röntgenstrahlen und Mikrowellen sowie beim Schall zur Anwendung. Wenn sich z.B. bei Ultraschall die Referenzwelle mit der vom zu untersuchenden Objekt reflektierenden Wellen überlagert entstehen Schalldruckknoten, die den Zonenlinsen entsprechen, Sie werden mit einem Mikrophon gescannt. Ihre bildliche Aufzeichnung ist ein Hologramm, das bequem optisch sichtbar zu machen ist [Ostrowski].

Eine abgewandelte Methode ist die *Trägerfrequenz-Fotographie*. Ihr Schema zeigt das nebenstehende Bild. Das Originalbild wird über eine feines Streifenraster auf eine fotografische Platte ausgezeichnet. Bei Drehung und Abstandsänderung des Rasters sind so auf die gleiche Fotoplatte mehrere Bilder übereinander zu speichern. Hierbei wird (angeblich) die Speicherkapazität der Platte weiter ausgenutzt. Die Wiedergabe der einzelnen Bilder muss mit dem gleichen Rastern erfolgen.



Schließlich kann das Hologramm auch zur elektronischen Datenspeicherung genutzt werden. Viele immer wieder erfolgreiche Versuche gibt es seit den 70er Jahren. Ein technischer Durchbruch ist noch nicht erfolgt. Details hierzu enthält Band 3.

Die Geschichte der Holographie ist noch recht kurz (vgl. **Tabelle 13**). Sie wird wesentlich durch die Entwicklung des Lasers bestimmt. Daher dauert es ca. 15 Jahre bis die Ideen von *Gábor* praktisch nutzbar werden. Bis zur ersten Massenherstellung vergehen sogar fast 40 Jahre.

Schwieriger ist eine Klassifikation der verschiedenen Hologramm-Methoden und Prinzipien. Dies ist im **Bild 43** versucht. Dabei zeigt sich der Unterschied von Dünnschicht- und Volumen-Holographie als besonders wichtig. Nur Dünnschicht-Hologramme sind massenweise zu vervielfältigen. Volumen-Hologramme ermöglichen aber mehrere Varianten, sind jedoch fast nur in Reflexion und bevorzugt durch Beleuchtung mit natürlichem oder Weißlicht zu verwenden. Das einzige Dünnschicht-Hologramm für Weißlicht ist das Regenbogenhologramm. Ansonsten werden die Dünnschicht-Hologramme insbesondere als Masterhologramme verwendet. Die in der oberen Zeile aufgeführten Beispiele sind vielfach sowohl als Dünnschicht- als auch als Volumen-Hologramm ausführbar.

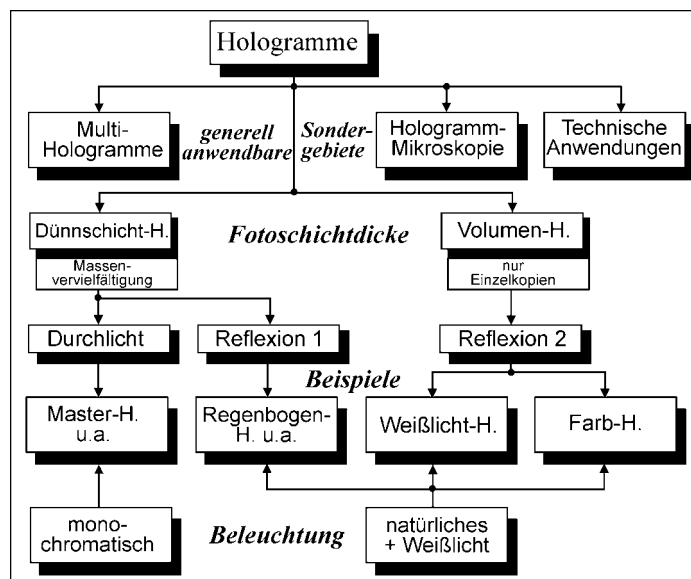


Bild 43. Versuch einer Systematik für die verschiedenen Hologrammarten.

Tabelle 13. Wichtige Etappen der Holographie

1948 Ungar Dennis *Gábor* (1900 - 1979) entwickelt in den USA die Idee der Holografie

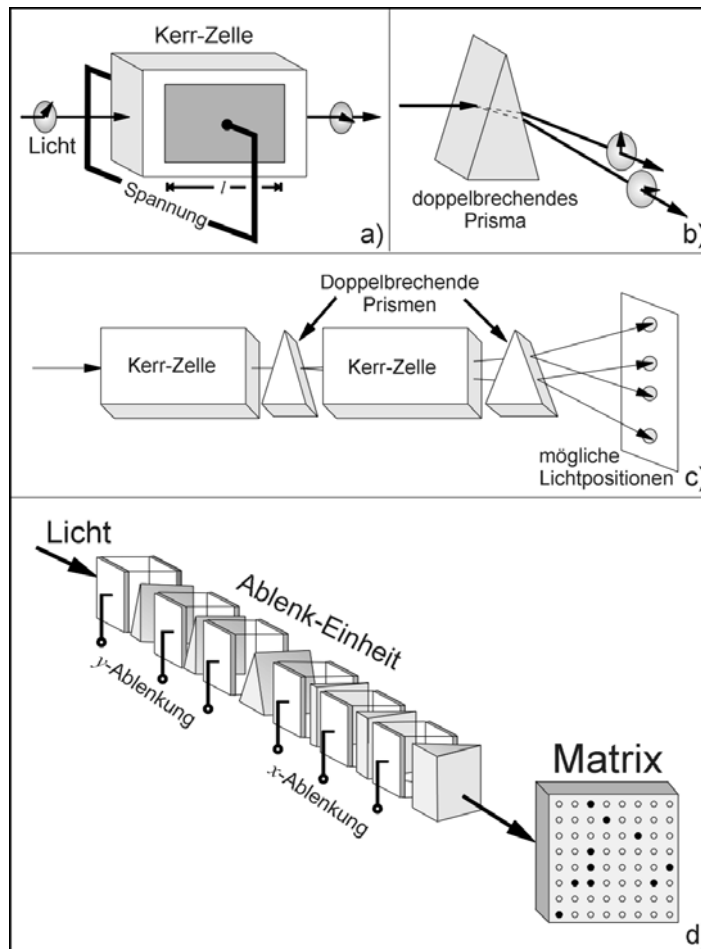
- 1954 NH₃-Laser von **Basov** und **Prochorov**
- 1960 Rubinlaser von Theodore H. **Maiman**
- 1961 Yuri **Denisyuk** experimentiert mit Weißlicht-Reflex-Volumenhologrammen
- 1962 GaAs-Injection-Laser von R.N. **Hall** und unabhängig M. I. **Nathan**
- 1963 Pieter J. van **Heerden** schlägt dreidimensionalen holographischen Speicher vor
- 1963 erste öffentliche Hologrammvorführung von E. N. **Leith** und J. **Upatnieks**
- 1965 Farbhologramme mit mehrfarbigen Lasern durch B. T. **Cathy**
- 1969 Steve **Benton** erfindet das Regenbogen-Hologramm
- 1973 Jan **Rajchmann** demonstriert holographischen Speicher für Rechner
- 1984 11·10⁶ Exemplare des Märzheftes der Geographica enthalten Hologramm vom Adler
- 1992 Softwarepiraten benutzen das Hologramm von Microsoft

**Dies ist die noch alte Ergänzung zum digital optischer Speicher,
die einer späteren Überarbeitung bedarf**

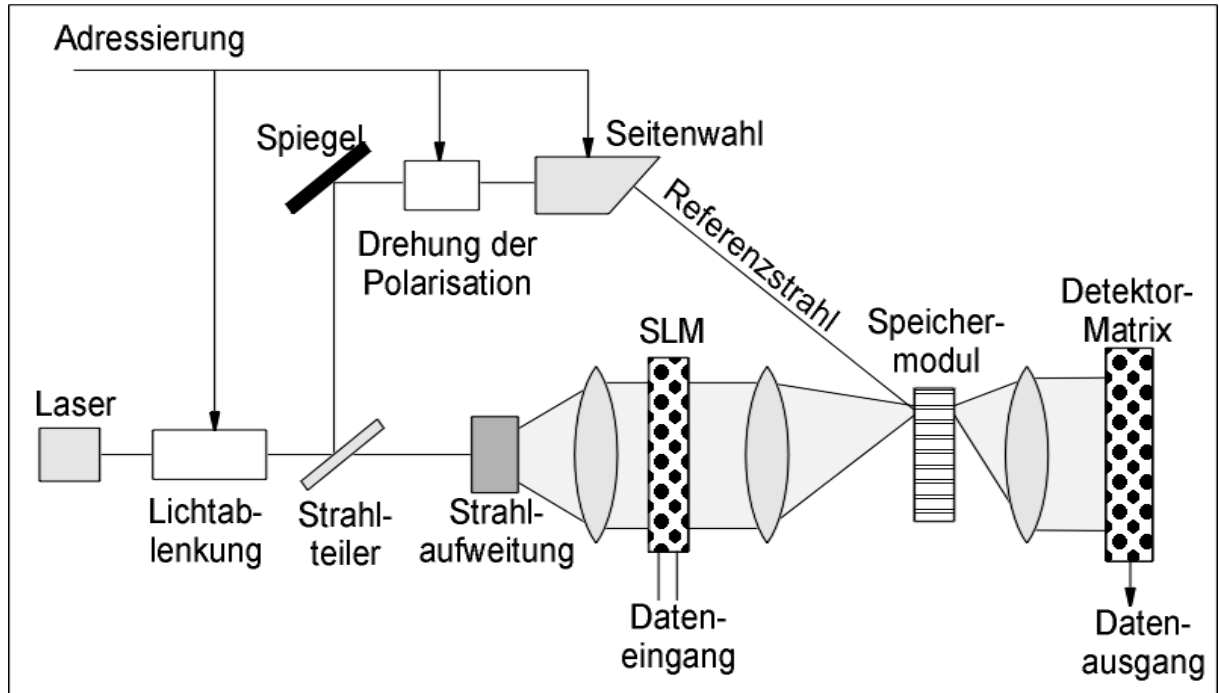
Ein digital optischer Speicher verlangt einmal die digitale Lichtablenkung. Sie besteht aus doppelbrechenden Prismen und Kerrzellen. In ein doppelbrechendes Prisma wird das eintretende Licht je nach seiner Polarisierung in zwei mögliche Richtungen abgelenkt. Mit den Kerrzellen wird die Polarisationsrichtung passend gedreht. Zwei Kerrzellen und zwei Prismen ermöglichen so 4 Positionen. Mit je 3 in x- bzw. 3 in y-Richtung sind dann 64 Positionen in der Fläche möglich. Infolge von Verlusten und Mängeln der optischen Bauelemente werden heute bis zu einer Million Positionen erreicht. Doch für einen Speicher genügt das nicht. Deshalb erfolgt eine Kombination mit der Holographie. An jeder Position werden dann mehrere Hologramme geschrieben, und zwar mit unterschiedlicher Wellenlänge und Polarisationsrichtung. Gelöscht wird die Information durch flächenhaftes, gleichmäßiges Erwärmen, entweder total oder lokal je Position, also immer für sehr viel Bit gemeinsam.

Bei den hochauflösenden und reversiblen optischen Speichermedien hat immer noch das F-Zentrum größte Bedeutung. Das Prinzip findet eine einfache Anwendung bei den sich unter Sonneneinstrahlung verfärbenden Sonnenbrillen. Es wird z.Z. hauptsächlich bei den digitalen optischen Speichern verwendet.

Generell gilt für hochauflösende Medien, dass das Produkt aus notwendiger Leistung und Auflösung etwa konstant ist. Für die folgenden Betrachtungen haben vor allem Photopolymere, Diazo-Material und spezielle Photoschichten Bedeutung. Beim Diazo wird eine Amoniumgruppe meist durch UV-Licht verändert, bei den Polymeren wird durch Lichteinstrahlung deren Löslichkeit verändert. Bei den Halogensilberschichten, werden freie Elektronen relativ stabil erzeugt, die dann bei der Entwicklung die Reduktion des Halogensilbers zu Silber steuern.



optipet.odr h. völk 15.6.94



holostor.cdr h. vözl 4.8.95