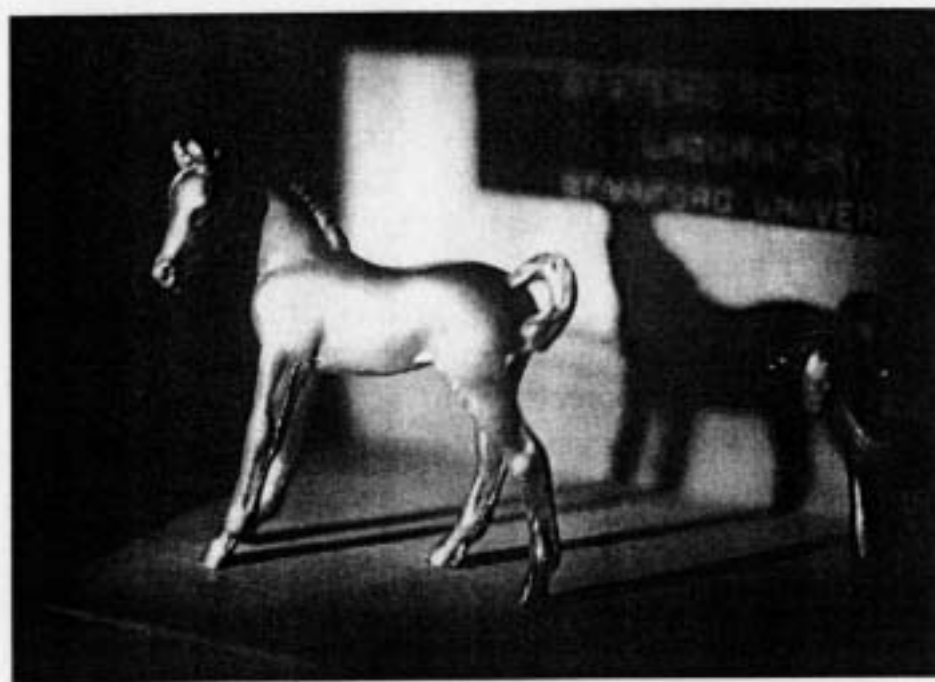


Synthetische Holographie



(a)



(b)

FIGURE 9.11
Photographs showing the three-dimensional character of the virtual image reconstructed from a hologram.

Gliederung

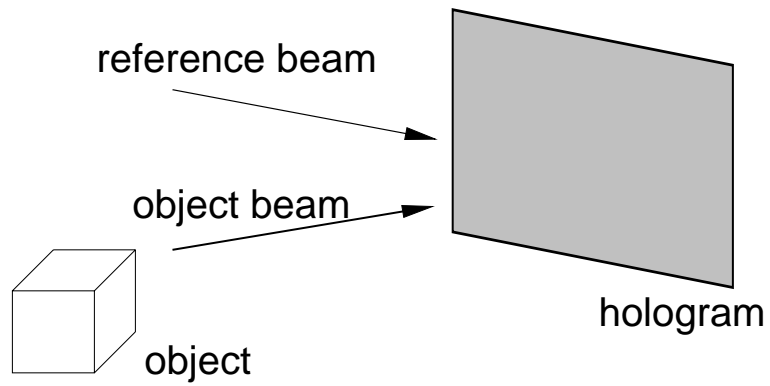
- physikalische Grundlagen
- (optische) Holographie
- Synthetische Holographie
- Anwendungen

Holographie

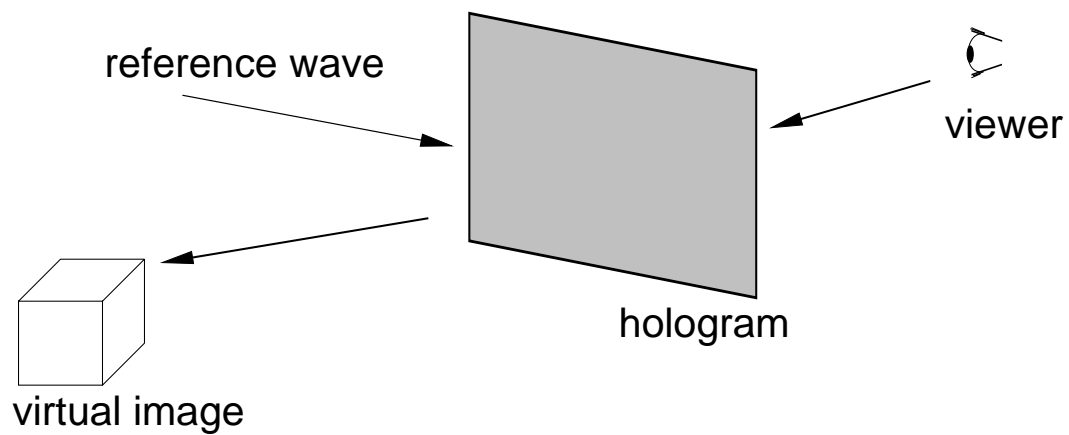
- 1948, Dennis Gabor, Nobelpreis 1971
- 1960er Leith und Upatnieks gelingt erste dreidimensionale „Photographie“
- zweistufiger Abbildungsprozeß
 1. Aufnahme von Amplitude und Phase eines Objektwellenfeldes
 2. Wiedergabe des (dreidimensionalen) Bildes des Objektes
- Unterschied zur Photographie (nur Aufnahme der Amplituden)

Holographie: Aufnahme und Wiedergabe

Recording:



Reconstruction:



Grundlagen der Holographie: Wellen

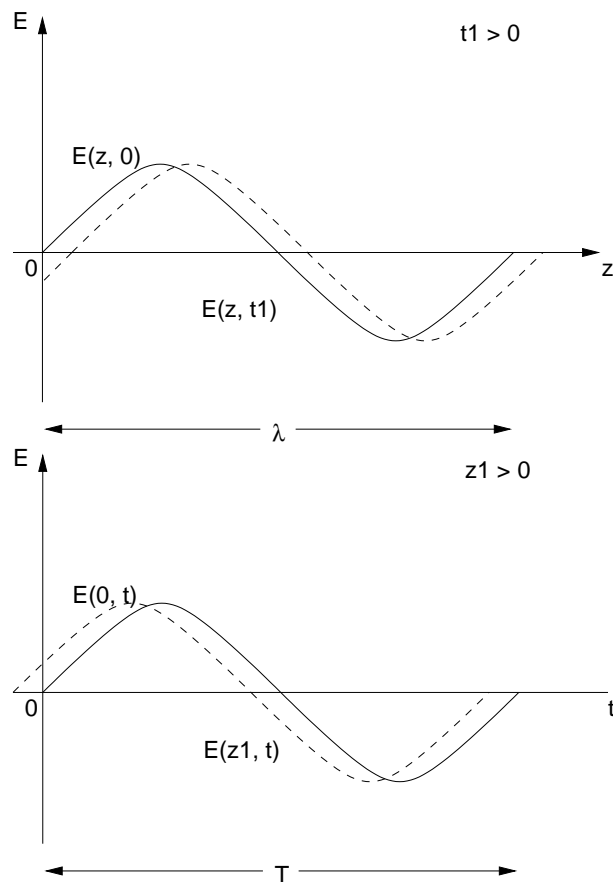
- Lösungen der Wellengleichung, die sich aus den Maxwell'schen Gleichungen ableiten läßt.
- z.B. die harmonische Welle (eindimensional):

$$E(z, t) = A \sin(kz - \omega t + \alpha),$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \omega = \frac{2 * \pi}{T}$$

oder in komplexer Notation:

$$E(z, t) = E_0 \exp[i(kz - \omega t)]$$



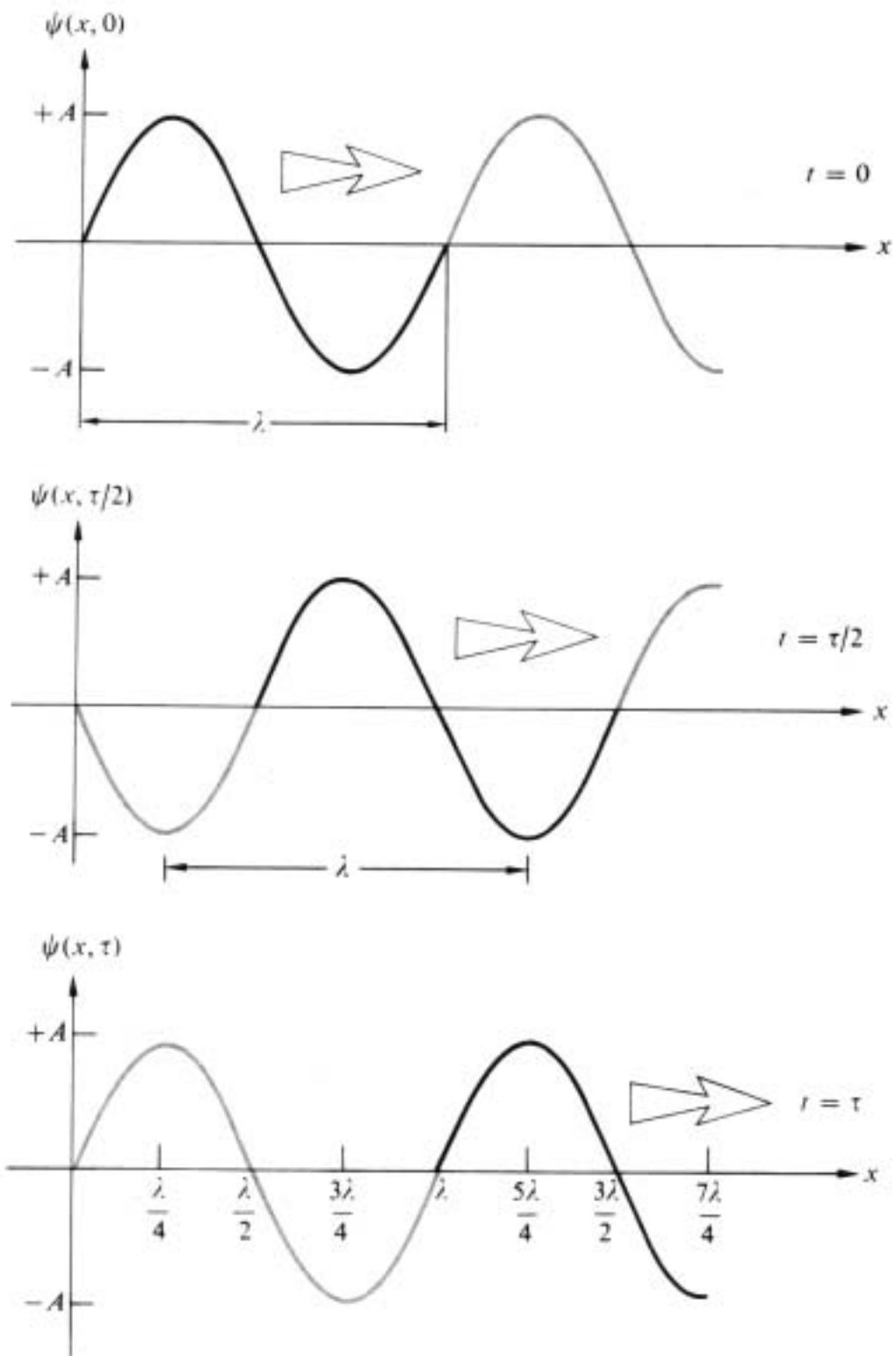


Abbildung 2.5 Eine fortschreitende Welle zu drei verschiedenen Zeiten.

Grundlagen der Holographie: Wellen

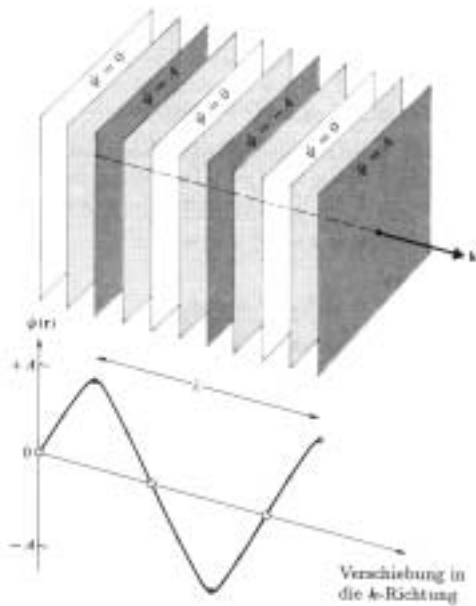


Abbildung 2.13 Wellenfronten für eine harmonische ebene Welle.

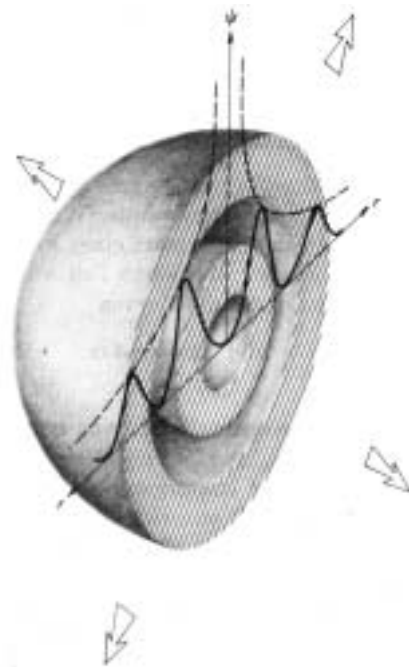


Abbildung 2.17 Kugelförmige Wellenfronten.

- Ebene Welle:
Phase für bestimmte Zeit t konstant in jeder Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung:

$kr = \text{const}$ mit $k = (k_x, k_y, k_z)$ und $r = (r_x, r_y, r_z)$
Harmonische ebene Welle: $E(r) = E_0 \exp(ikr)$

- Kugelwelle:
Phase konstant über eine Kugeloberfläche
Harmonische Kugelwelle:

$$E(r, t) = \frac{E_0}{r} \exp[i(kr + -\omega t)]$$

Grundlagen der Holographie: Intensität von Lichtwellen

- Intensität I ist die Energie, die durch ein bestimmtes Gebiet in einem gegebenen Zeitintervall fließt:

$$intensity = \frac{energy}{area * timeinterval}$$

- also:

$$I = \epsilon_0 c E^2, I \propto E^2$$

- Intensitätsmessungen nur über Zeitintervall T_m mit

$$T_m \gg T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$\bar{I}(z) = \frac{1}{T_m} \int_{-T_m/2}^{+T_m/2} I(z, t) dt$$

es folgt:

$$I(z) \propto 2E_0 E_0^*$$

für harmonische Wellen mit konstanter Intensität in Raum und Zeit wird die Intensität definiert als:

$$I = E_0 * E_0^* = |E_0|^2.$$

Grundlagen der Holographie: Kohärenz

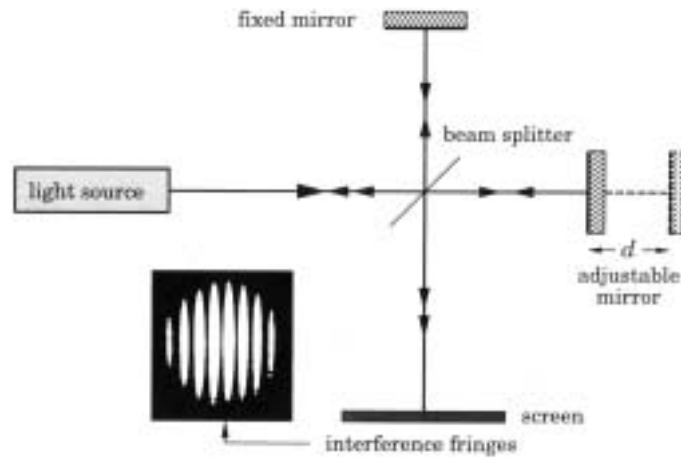


Fig. 4.1 The Michelson interferometer.

- *inkohärentes* Licht:
Licht verschiedener Frequenzen,
nicht interferenzfähig
- *kohärentes* Licht:
Lichtwellen gleicher Polarisierung und Frequenz,
aus dem gleichen Emissionsakt,

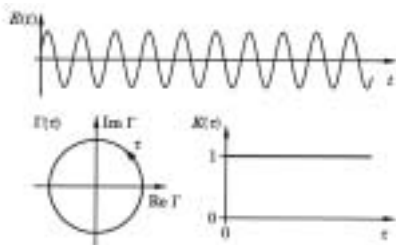


Fig. 4.4. Graph of the field amplitude E , the self-coherence function Γ , and the contrast function K for completely coherent light.

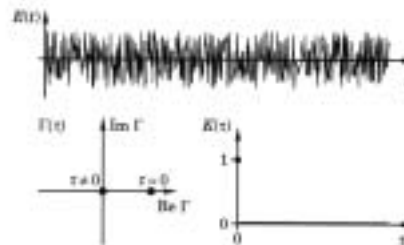


Fig. 4.5. Graph of the field amplitude E , the self-coherence function Γ , and the contrast function K for completely incoherent light.

Grundlagen der Holographie: Interferenz

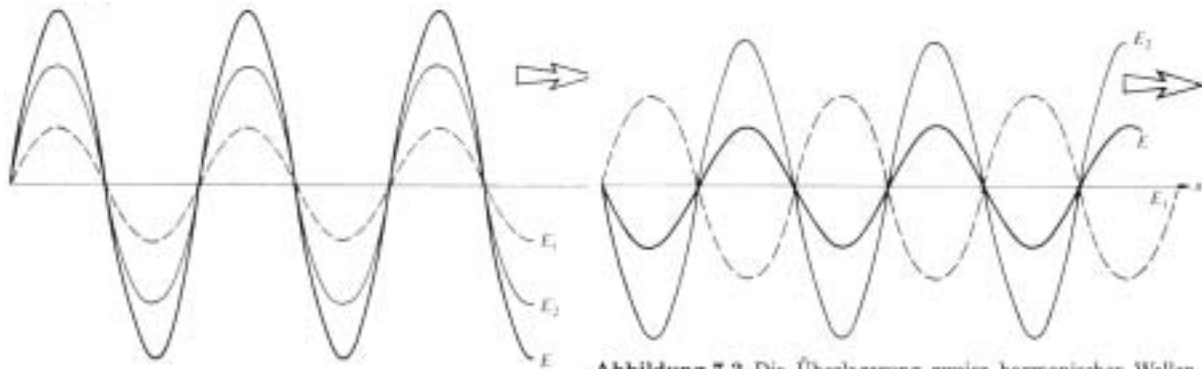
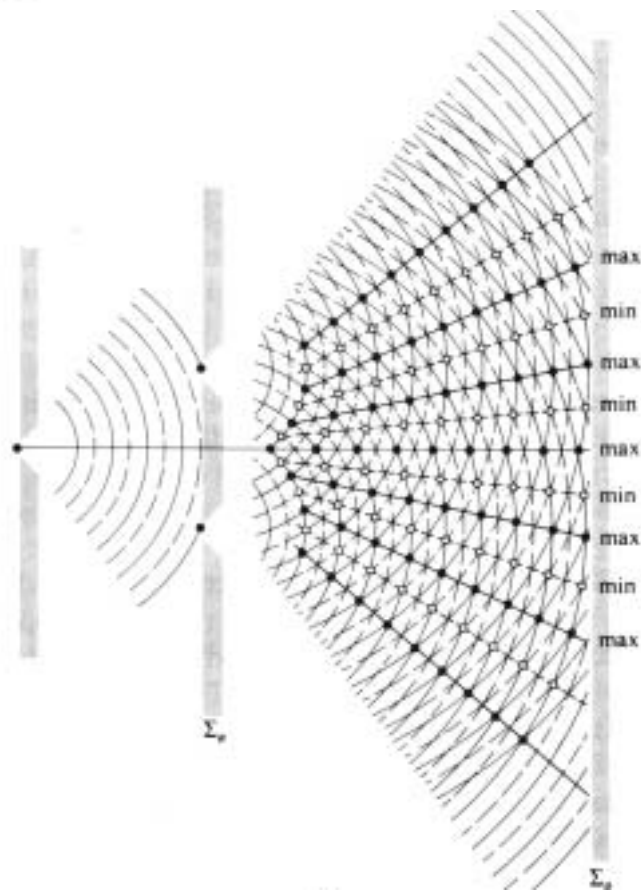
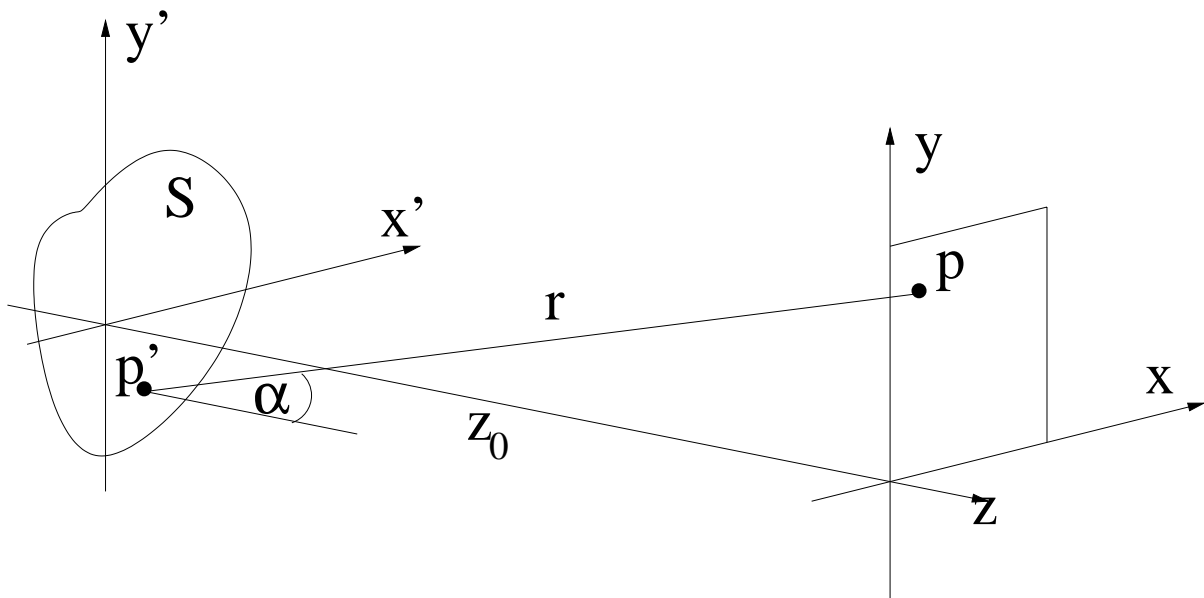


Abbildung 7.2 Die Überlagerung zweier harmonischer Wellen, die oben phasengleich und unten phasenverschoben sind.

$$E = E_1 + E_2$$



Grundlagen der Holographie: Kirchhoffs Beugungsintegral



- Feldverteilung E im Punkt p des Hologramms:

$$E(p) = \frac{1}{i\lambda} \int_S E(p') \frac{\exp(ikr)}{r} \cos(\alpha) ds$$

- $E(p')$: die Feldstärke vom Punkt p'
- λ : Wellenlänge des Lichtes
- r : Abstand zwischen p' und p
- α : Winkel zwischen $p' - p$ und dem einfallenden Licht

Grundlagen der Holographie: Beugung

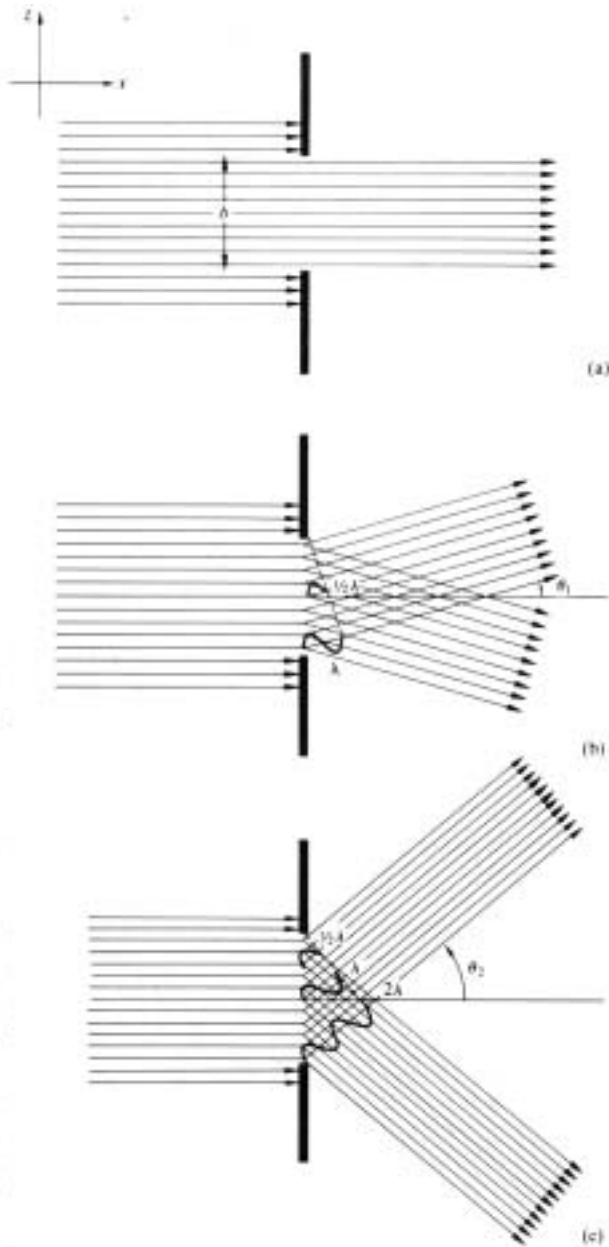
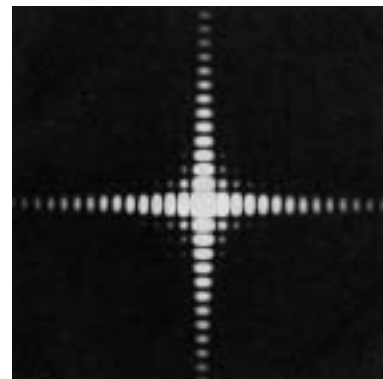


Abbildung 10.12 Die Beugung des Lichtes in verschiedene Richtungen. Wie in Abbildung 10.10 ist die Öffnung ein Einzelspalt.



Grundlagen der Holographie: Speckels

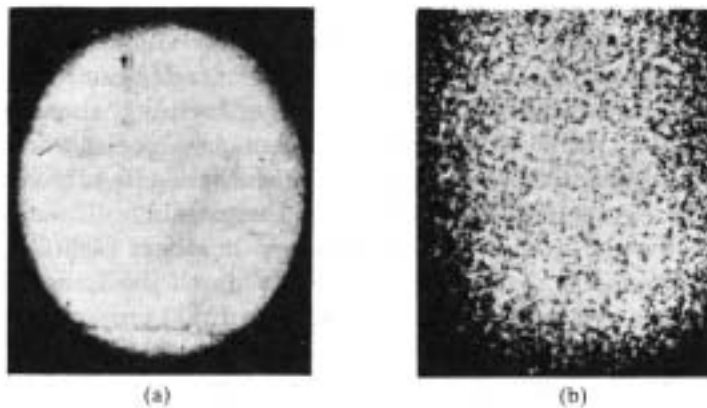


Abbildung 14.38 Granulation (Fleckenmuster). Ein Zementblock beleuchtet (a) von einem Quecksilberlichtbogen und (b) von einem He-Ne-Laser. (Aus B.J. Thompson, *J. Soc. Phot. Inst. Engr.* 4, 7 (1965).)

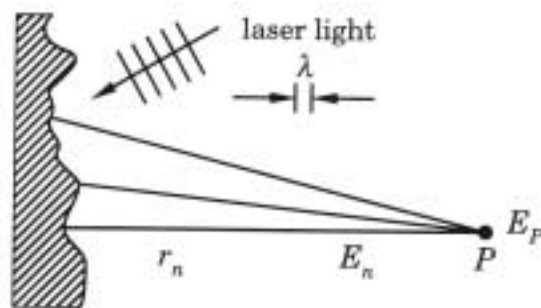


Fig. 6.2. Laser light being scattered at a rough surface.

Grundlagen der Holographie: Aufnahme und Wiedergabe eines Punktes

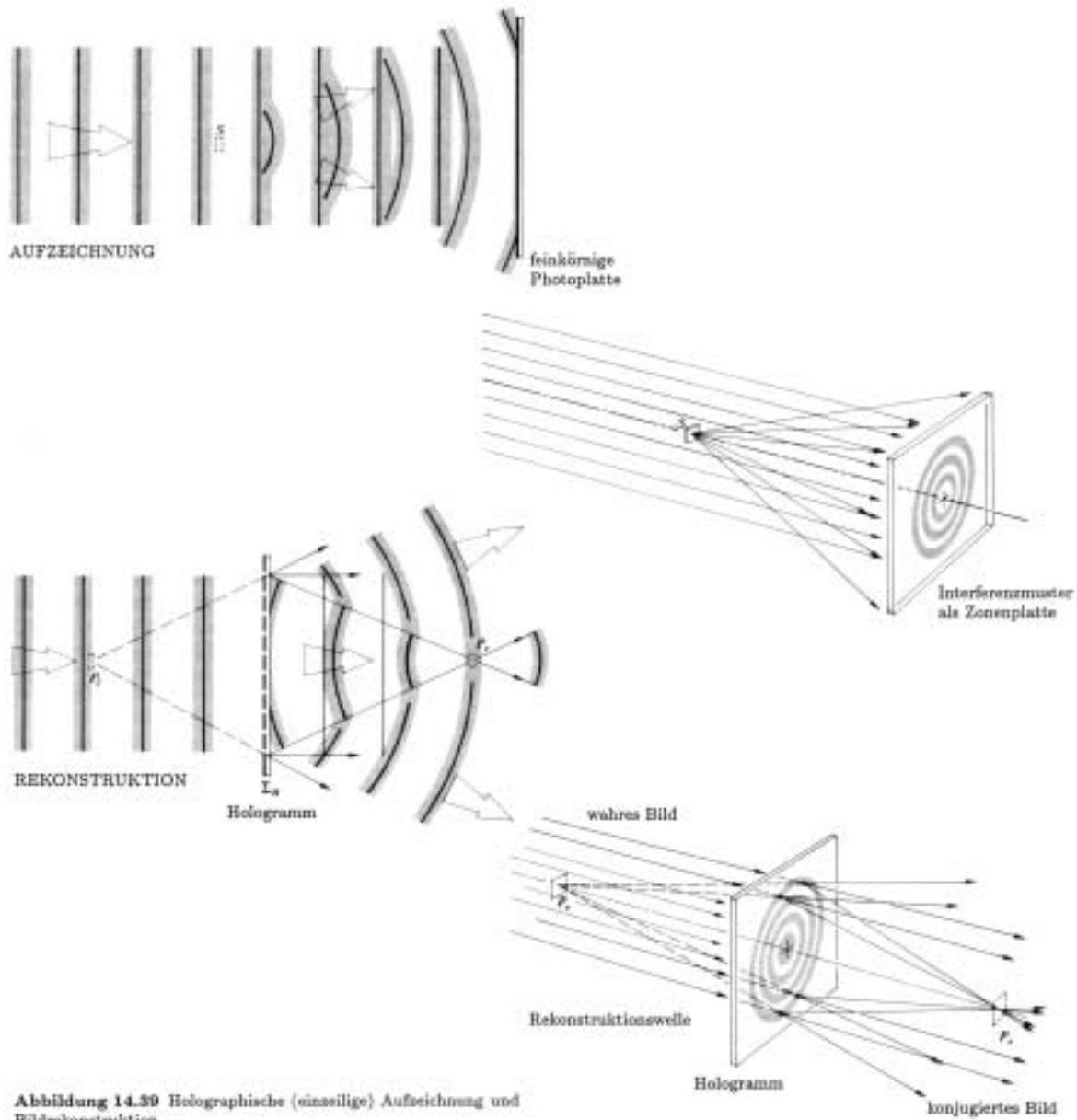
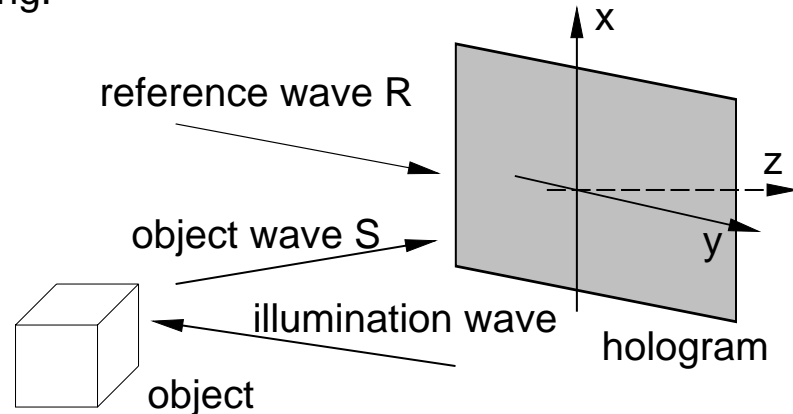


Abbildung 14.30 Holographische (einsilige) Aufnahme und Bildrekonstruktion.

Grundlagen der Holographie: Aufnahme

- Objektwelle S interferiert mit Referenzwelle R

Recording:



- Elektrisches Feld im Punkt (x, y) des Hologramms:

$$E(x, y, t) = S(x, y, t) + R(x, y, t)$$

- Intensität im Punkt (x, y) :

$$I(x, y) = |R(x, y) + S(x, y)|^2 = (R + S)(R + S)^*,$$

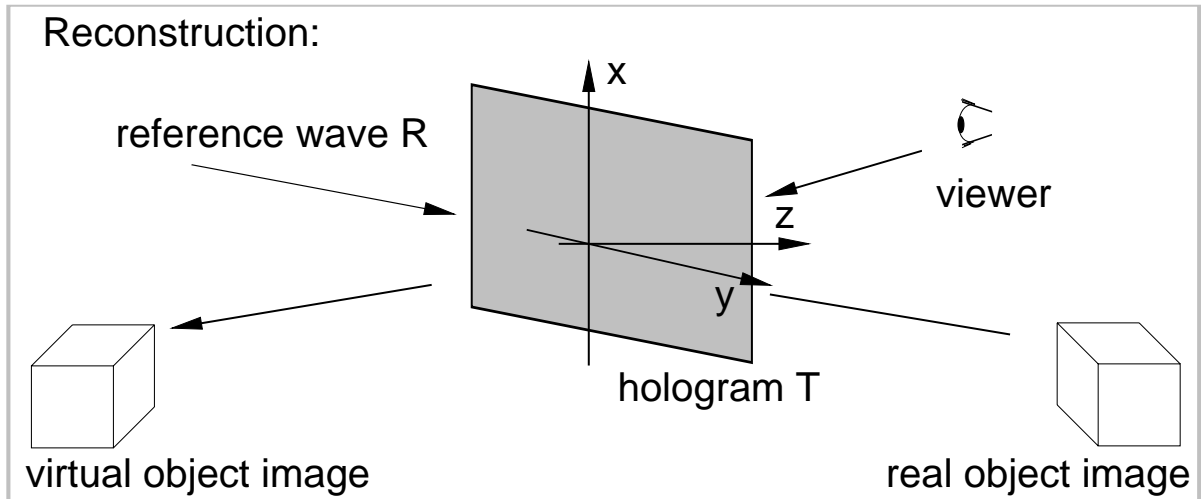
$$I(x, y) = RR^* + SS^* + R^*S + RS^*$$

- Hologramm speichert:

$$T(x, y) = a - bt_b(RR^* + SS^* + R^*S + RS^*)(x, y)$$

Grundlagen der Holographie: Wiedergabe

- Referenzwelle R beleuchtet Hologramm T



- Elektrisches Feld im Punkt (x, y) des Hologramms:

$$E_a(x, y) = T(x, y)E_e = T(x, y)R$$

$$E_a(x, y) = Ra - bt_b R(RR^* + SS^* + R^*S + RS^*)$$

- Hierbei ist:

1. $(a - bt_b|R|^2)R \propto R$ Beugung nullter Ordnung
2. $bt_b|S|^2R$ modulierte Beugung nullter Ordnung
3. $bt_b|R|^2S \propto S$ Objektbild (virtuell)
4. $bt_bR^2S^*$ konjugiertes Objektbild (real)

Grundlagen der Holographie: Hologrammtypen

- Gabor-Hologramme

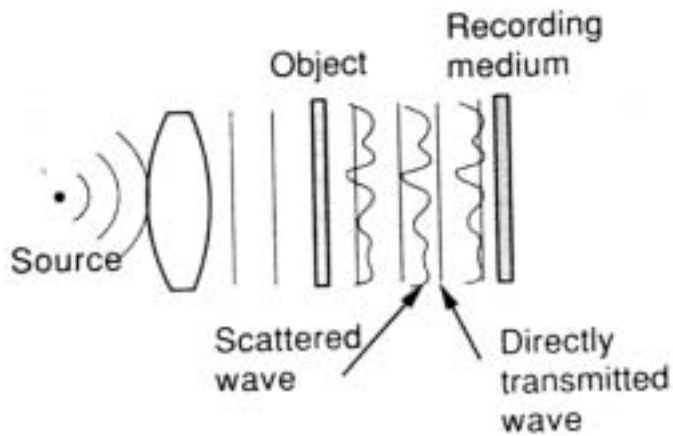


FIGURE 9.4
Recording a Gabor hologram.

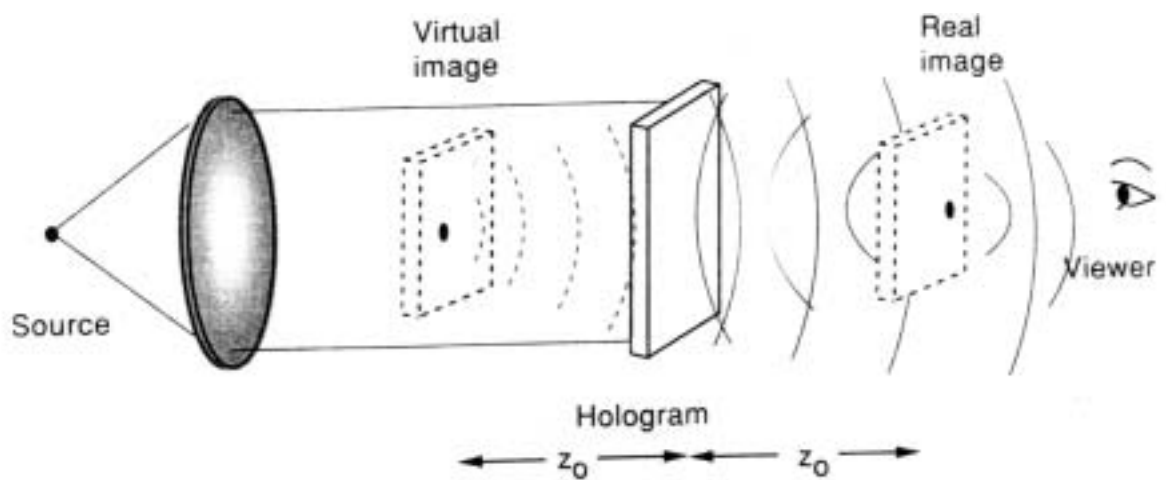


FIGURE 9.5
Formation of twin images from a Gabor hologram.

Grundlagen der Holographie: Hologrammtypen

- Reflektions-Hologramme

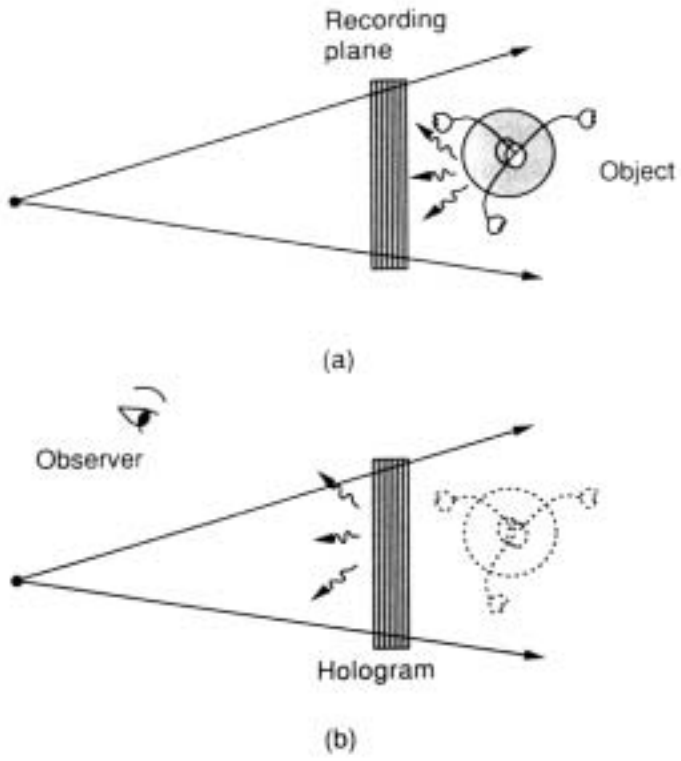


FIGURE 9.15
(a) Recording a reflection hologram, and (b) reconstructing an image in reflected light.

Grundlagen der Holographie: Hologrammtypen

- Stereogramme

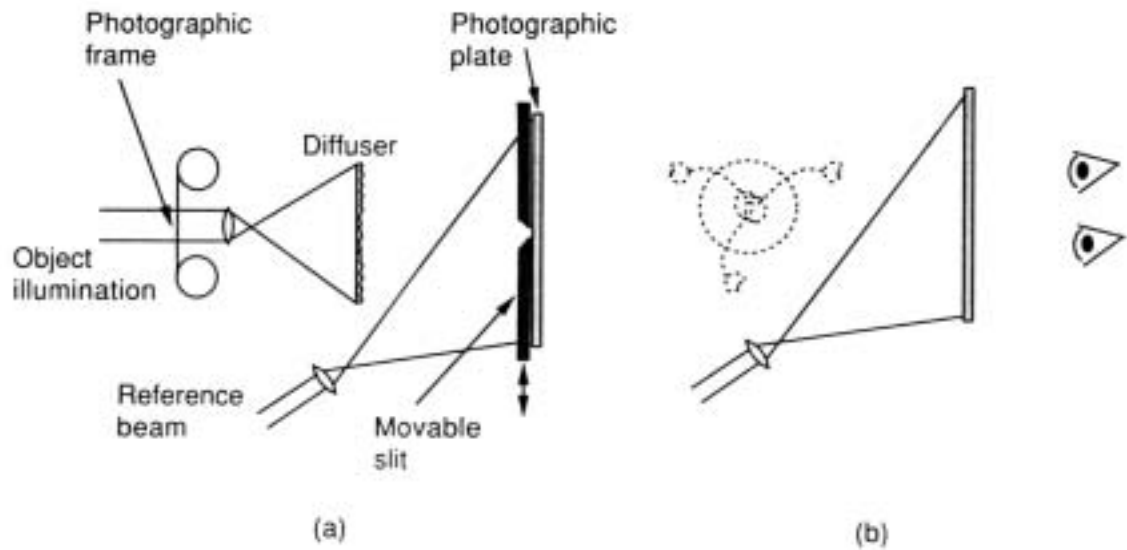


FIGURE 9.17 Recording a holographic stereogram (top view). (a) Recording the holograms, and (b) viewing the image.

Grundlagen der Holographie: Hologrammtypen

- Fourier-Hologramme

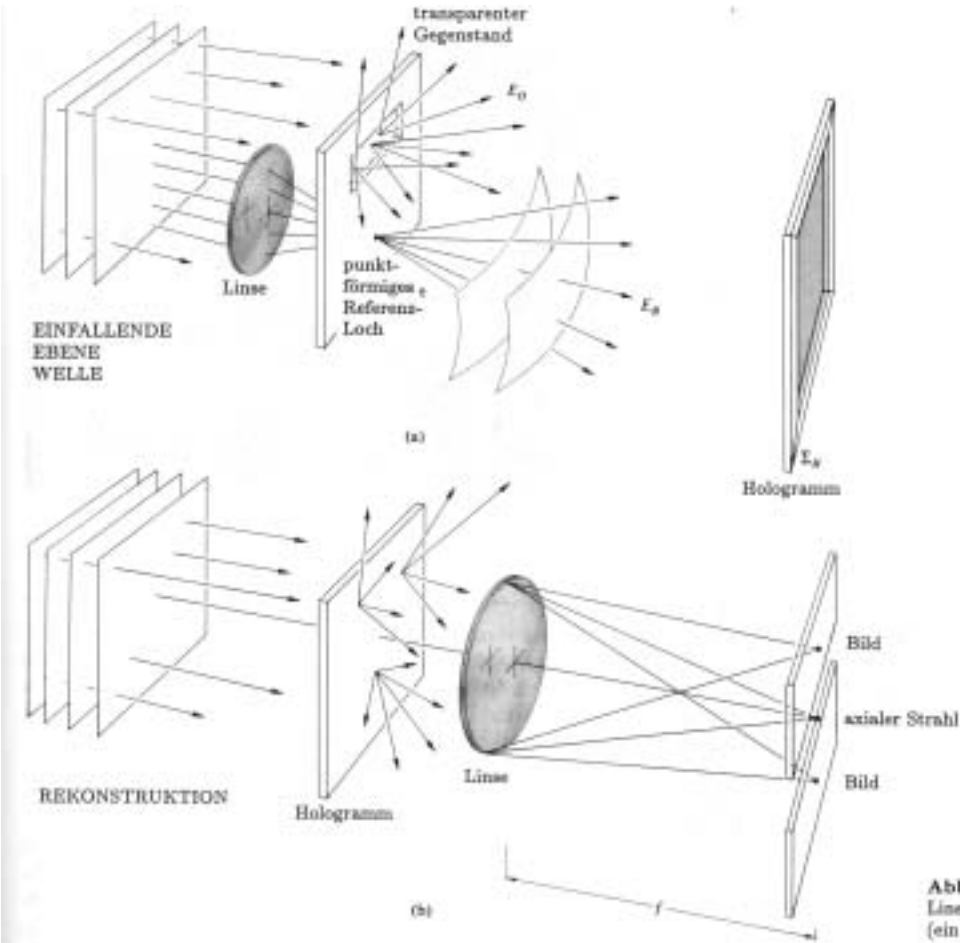
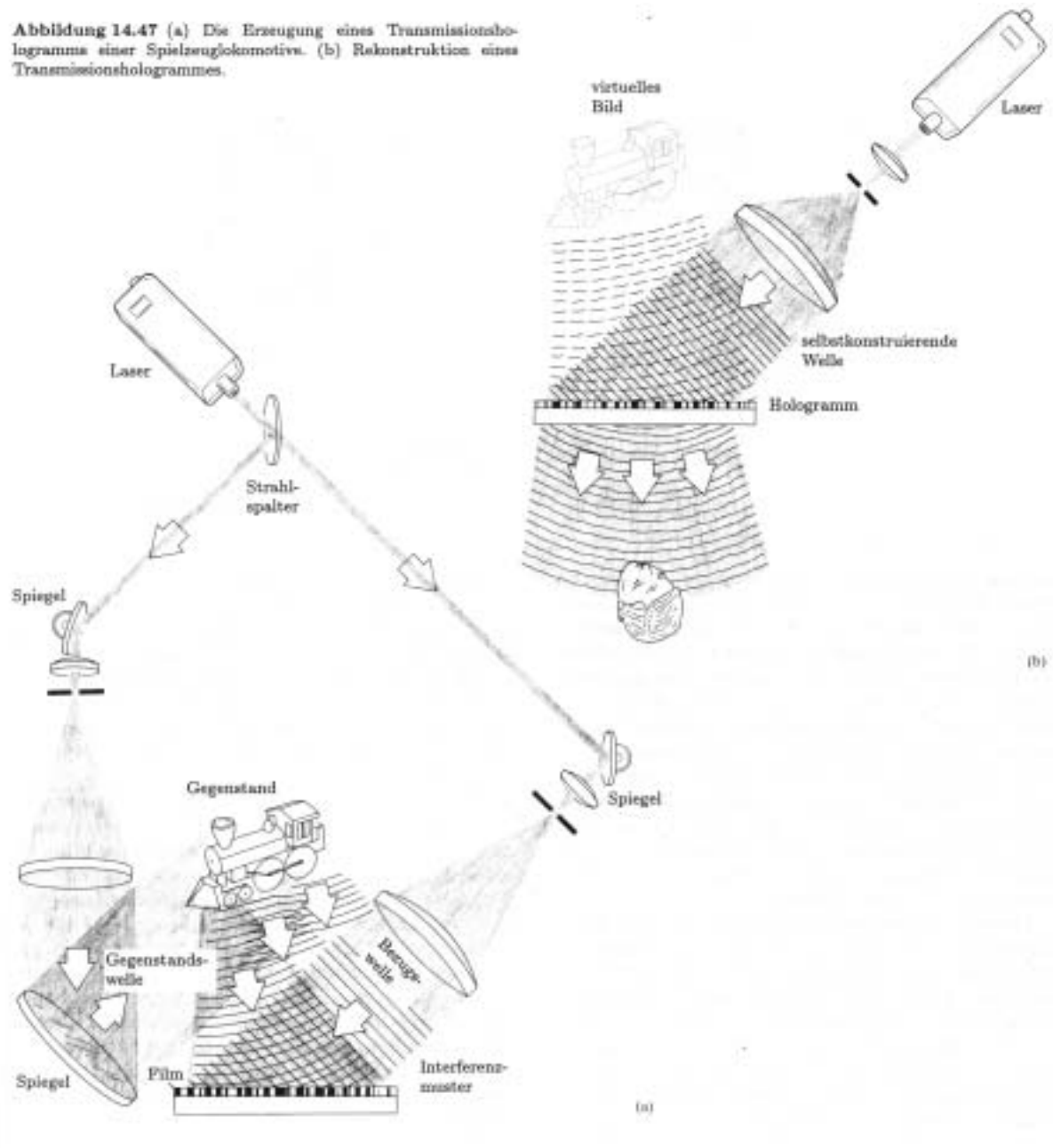


Abbildung 14.49
 Linzenlose Fourier-Holographie
 (ein transparentes Objekt).

Grundlagen der Holographie: Hologrammtypen

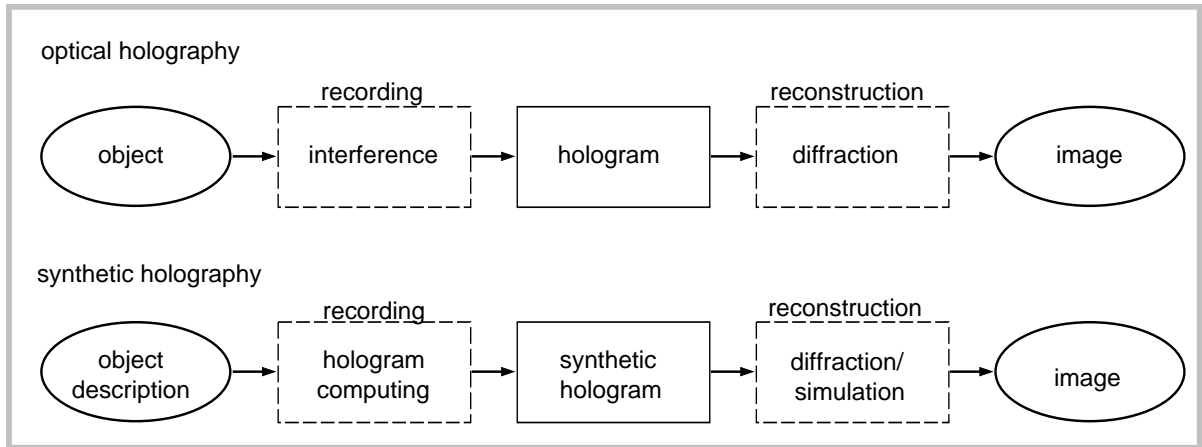
- Transmissions-Hologramme

Abbildung 14.47 (a) Die Erzeugung eines Transmissionshologramms einer Spielzeuglokomotive. (b) Rekonstruktion eines Transmissionshologrammes.

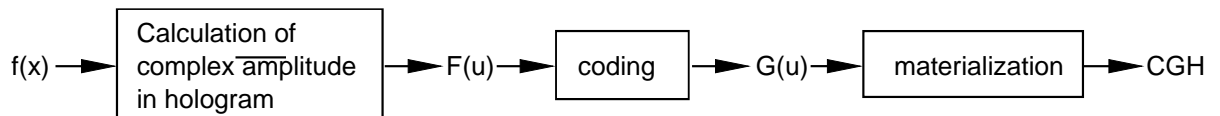


Synthetische Holographie: Übersicht

- Vergleich zwischen optischer und synthetischer Holographie



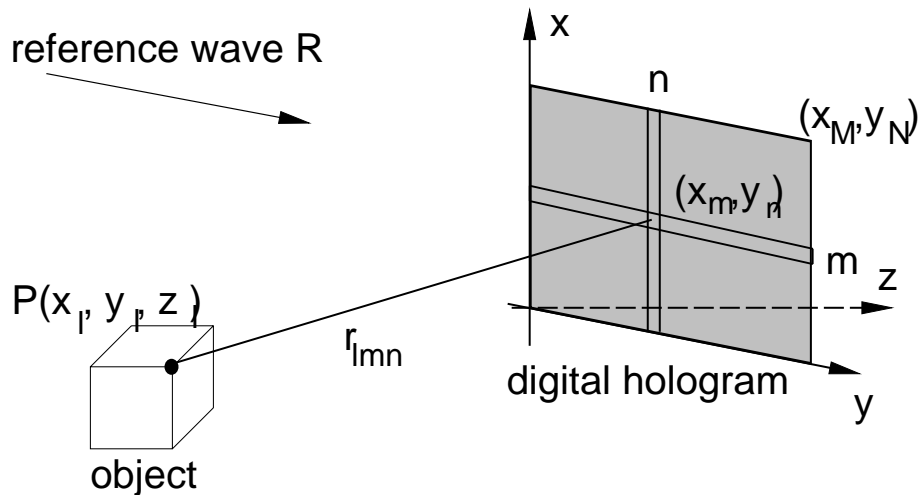
- Die einzelnen Schritte zur Herstellung eines computer-generierten Hologramms (CGH)



- Berechnung des Wellenfeldes in der Hologrammebene
- Diskretisierung der Werte (n Grauwerte)
- Optisches Element erstellen (Belichtung)

Synthetische Holographie: Methoden

Direkte Simulation



- Objekt repräsentiert als eine Anzahl L leuchtender Punkte $P_l, l = 1, \dots, L$ mit (x_l, y_l, z_l)
- Hologramm ist Gitter von Punkten in $z = 0$ mit $(x_m, y_n, 0); m = 1, \dots, M; n = 1, \dots, N$
- Komplexe Amplitude ausgehend von P_l :

$$E_{lmn} = A_l \exp(i\phi_l) \frac{\exp(ikr_{lmn})}{r_{lmn}}$$

mit $r_{lmn} = \sqrt{(x_l - x_m)^2 + (y_l - y_n)^2 + z_l^2}$

- Komplexe Amplitude in (x_m, y_n) :

$$E_{Smn} = \sum_{l=1}^L E_{lmn}$$

- Überlagerung mit Referenzwelle:

$$I_{mn} = |E_{Rmn} + E_{Smn}|^2$$

Synthetische Holographie: Methoden

- Fresnel-Hologramme

Für $|x|, |y|, |x'|, |y'| \ll z$ ist $\cos(n, r) = 1$, also

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2} \approx z + \frac{(x - x')^2}{2z} + \frac{(y - y')^2}{2z},$$

$$E(x, y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \int \int_{-\infty}^{\infty} E(x', y') \exp\left(\frac{ik}{2z}((x-x')^2 + (y-y')^2)\right) dx' dy'$$

oder als Faltung $E(x, y, z) = E(x', y') * h_z(x', y')$ mit

$$h_z(x', y') = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left(\frac{ik}{2z}(x'^2 + y'^2)\right)$$

Berechnung im Diskreten: $FFT(E \times \text{quadr. Phase})$

- Fourier-Hologramme

Für $z \gg \pi/\lambda(x^2 + y^2)$ wird

$$\exp\left(\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right) \approx 1,$$

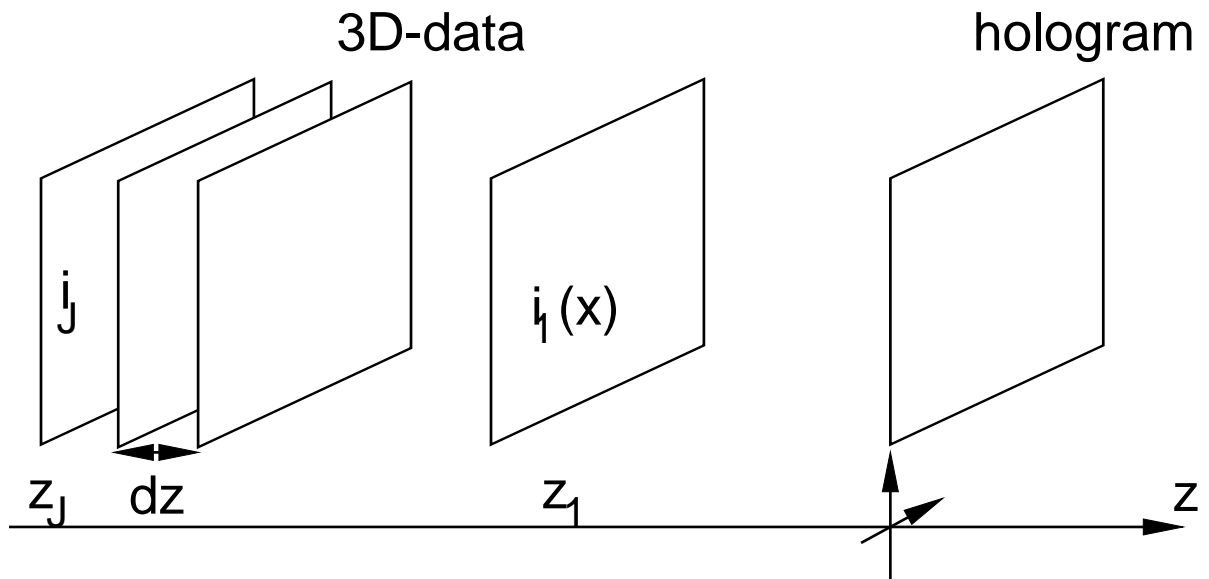
also

$$E(x, y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \int \int_{-\infty}^{\infty} E(x', y') \exp\left[-2\pi i\left(\frac{x}{\lambda z}x' + \frac{y}{\lambda z}y'\right)\right] dx' dy'$$

Berechnung im Diskreten: $FFT(E)$

Synthetische Holographie: Methoden

- 3D Objekt in Ebenen



Zerlegung des 3D-Objektes in 2D-Schichten

$$i(x, y, z) = \sum_{j=1}^J i_j(x, y)$$

Berechnung von

$$E(x, y) = \sum_{j=1}^J f_j(x, y)$$

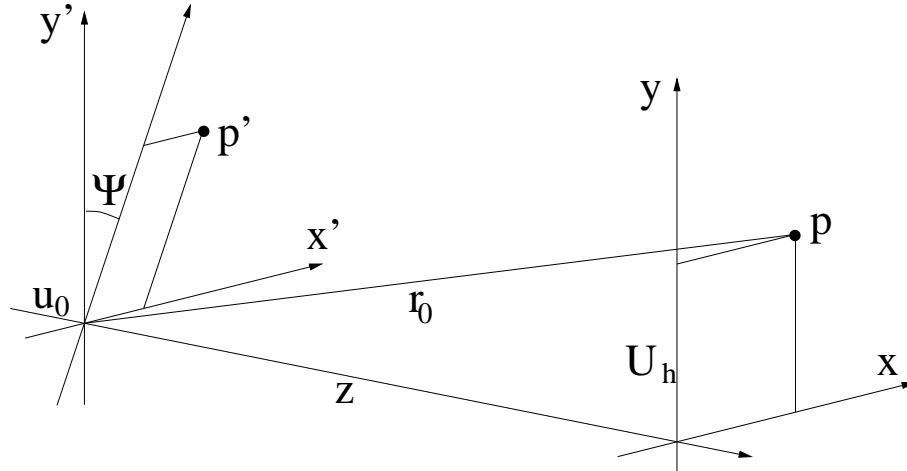
mit

$$f_j(x, y) = \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda z_j}(x^2 + y^2)\right] FFT(\sqrt{i_j(x)} \exp[i\phi_j(x, y)])$$

- Vorteil: Verdeckte Flächen werden berücksichtigt

Synthetische Holographie: Methoden

- Rotierte Flächen:



$$U_h(x, y) = \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}r_0(x, y, z_0)\right)U(\nu(x, y), \mu(x, y)),$$

$$U(\nu_{x,y}, \mu_{x,y}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x', y') \exp(-i2\pi(\nu x' + \mu y')) dx' dy',$$

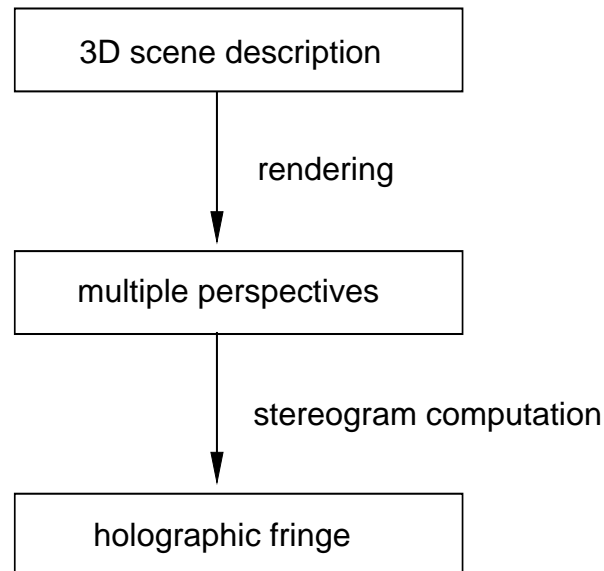
$$u(x', y') = u_0(x', y') \exp\left(i\frac{\pi}{\lambda z_0}(x'^2 + y'^2)\right),$$

$$\nu_{x,y} = \frac{x}{\lambda r_0},$$

$$\mu_{x,y} = \frac{y \cos(\psi)}{\lambda r_0} + \frac{(z_0 - r_0) \sin(\psi)}{\lambda r_0}.$$

Synthetische Holographie: Methoden

- Stereogramme



- Berechnung von Blickpunkt abhängiger Bildsequenz
- Blickpunkt ergibt sich aus (meist horizontaler) Kamerabewegung
- Nachteil: Nur eine Parallaxe (meistens horizontal)

Synthetische Holographie: Methoden

Herstellung von Hologrammen mit speziellen Eigenschaften

- zur Verbesserung der Beugungseffizienz und
- zur Verringerung des Rekonstruktionsfehler

gibt es z.B. die folgenden Verfahren:

- Iterative Algorithmen (IFTA)

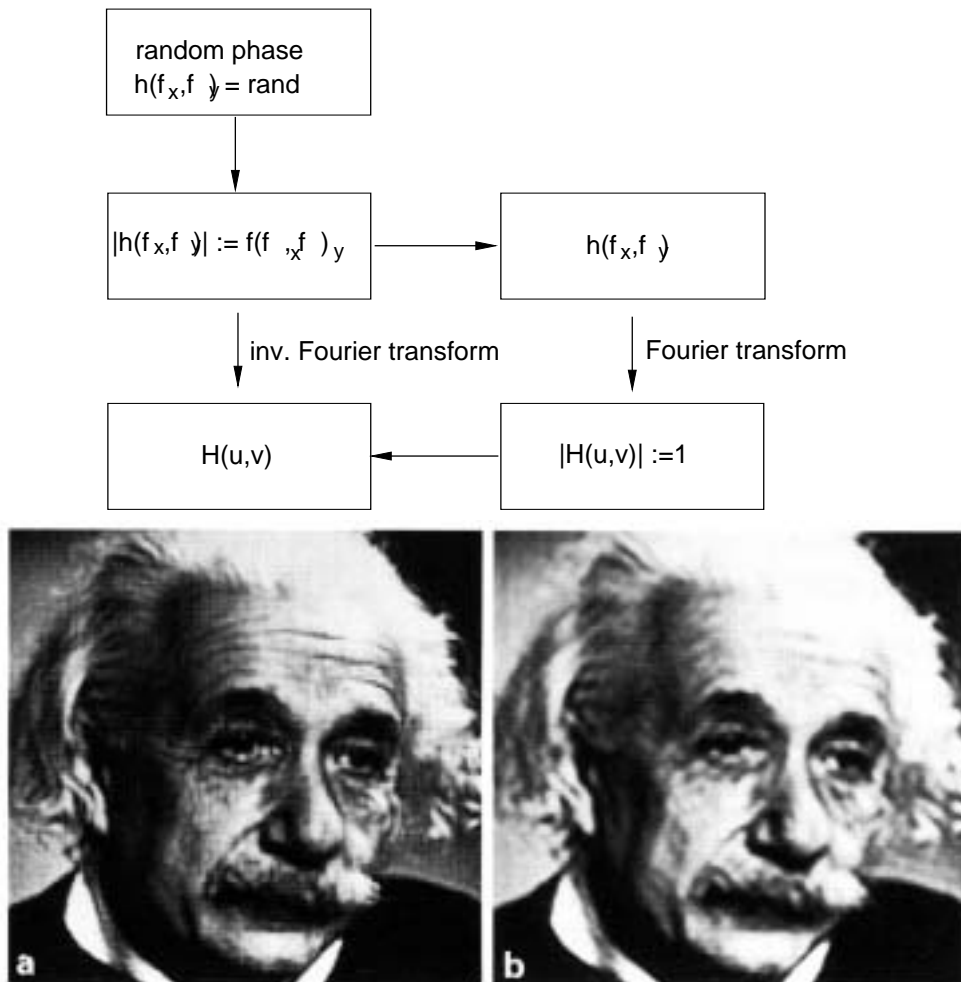
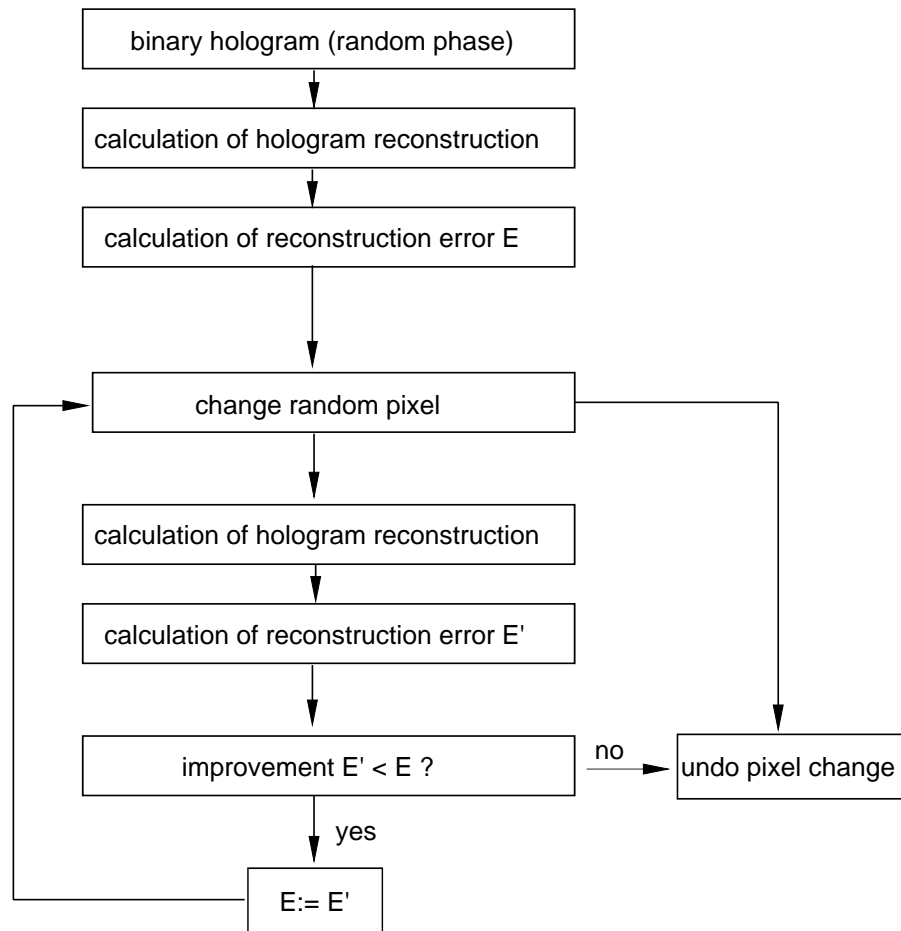


Fig. 5. Simulations of reconstructed intensities. In (a) an iterated phase and in (b) a constant phase was applied. Although the bandlimit is the same in (a) and (b), the resolution in (a) is higher because there the phase is also used to carry information.

Synthetische Holographie: Methoden

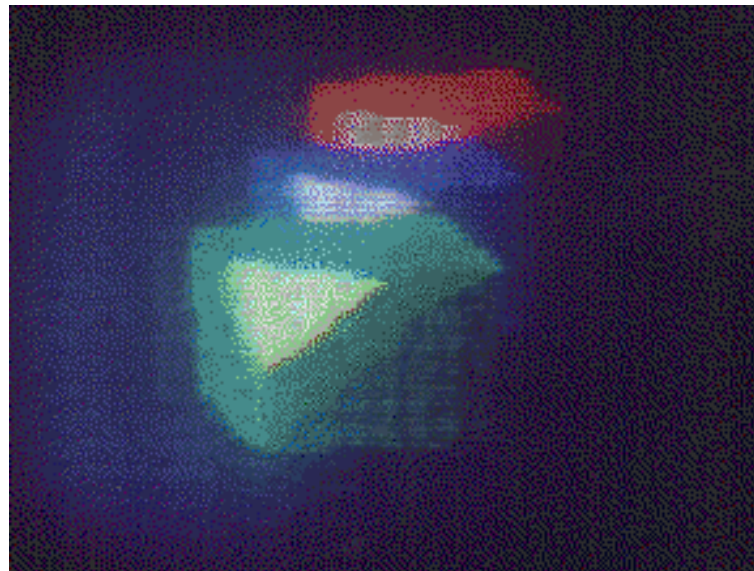
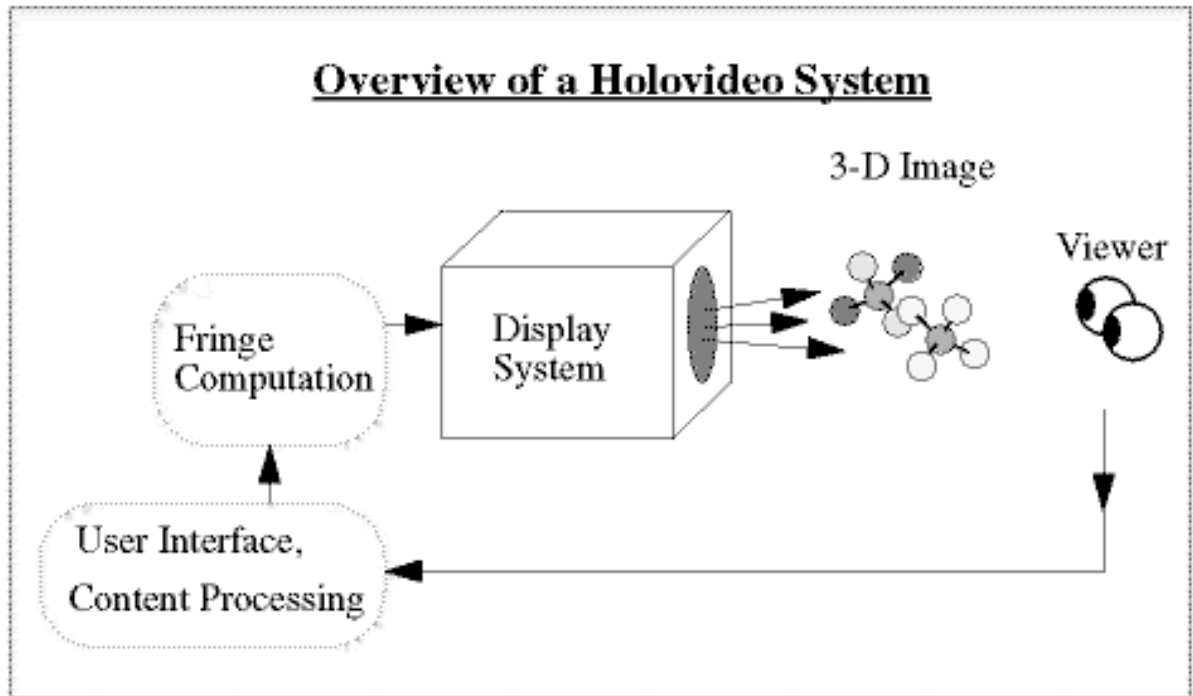
Herstellung von Hologrammen mit speziellen Eigenschaften

- Direct-Binary-Search (DBS)



Anwendungen

- 3D-Visualisierung



Anwendungen

- Optische Elemente (Scanner)
- Fälschungssicherung
- Optische Computer
- Bildverarbeitung (-erkennung, -verbesserung)

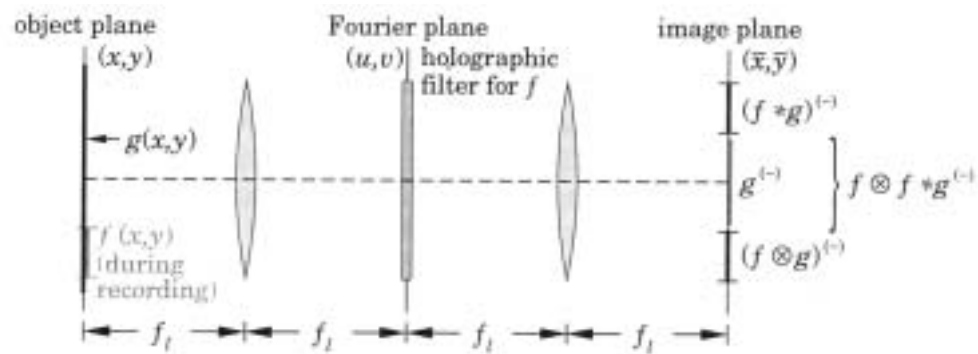


Fig. 9.24. Location of the images upon holographic filtering for pattern recognition.

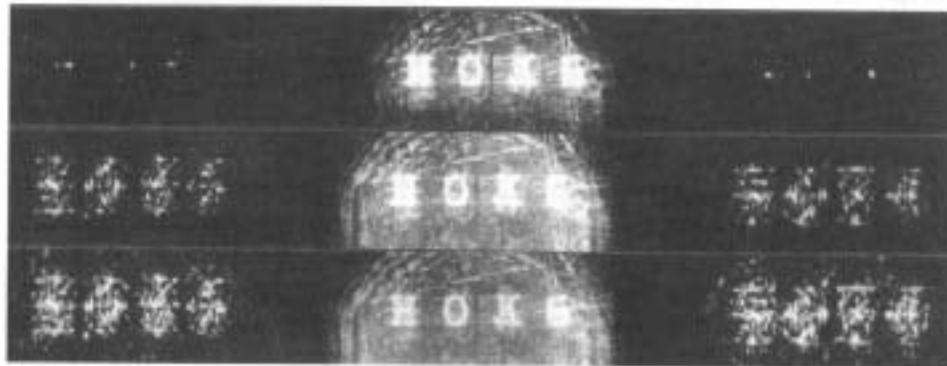


Fig. 9.26. Holographic filtering for pattern recognition. The letters **HOKG** are filtered with the letter **K**. Correlation to the right, convolution to the left. Three differently exposed photographs, to cover the strongly different intensities in the image, are shown.

Anwendungen

- Datenspeicher (Nutzung der Redundanz)

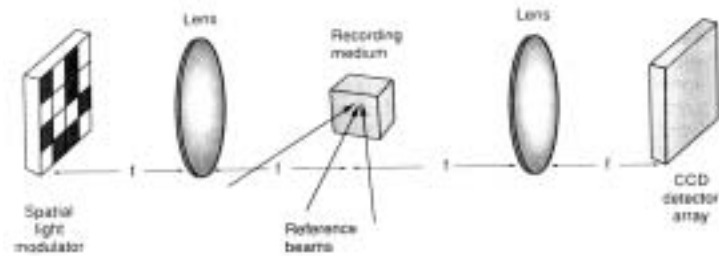


FIGURE 9.57
A volume holographic storage system. The case of angle multiplexing is illustrated.

- Interferometrie

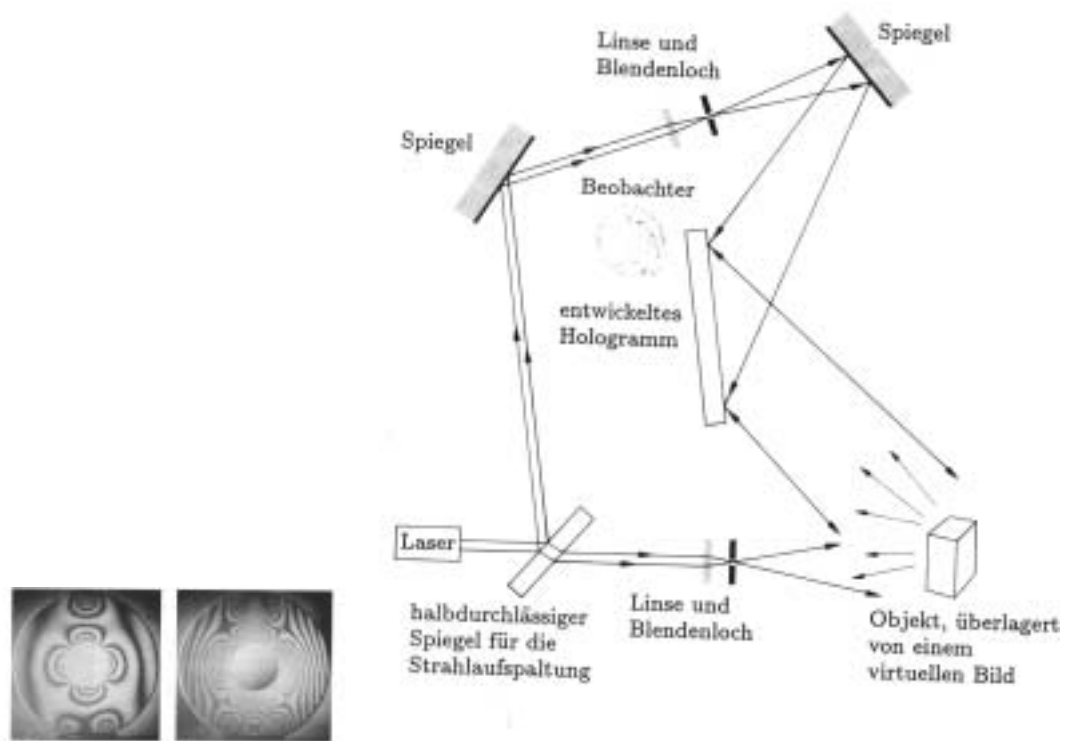


Fig. 8.6. The state of a stored PMMA map. Interference fringes made visible with real-time holographic interferometry.

Abbildung 14.54 Holographische Realzeit-Interferometrie.