

Digitale Holographische Spektroskopie

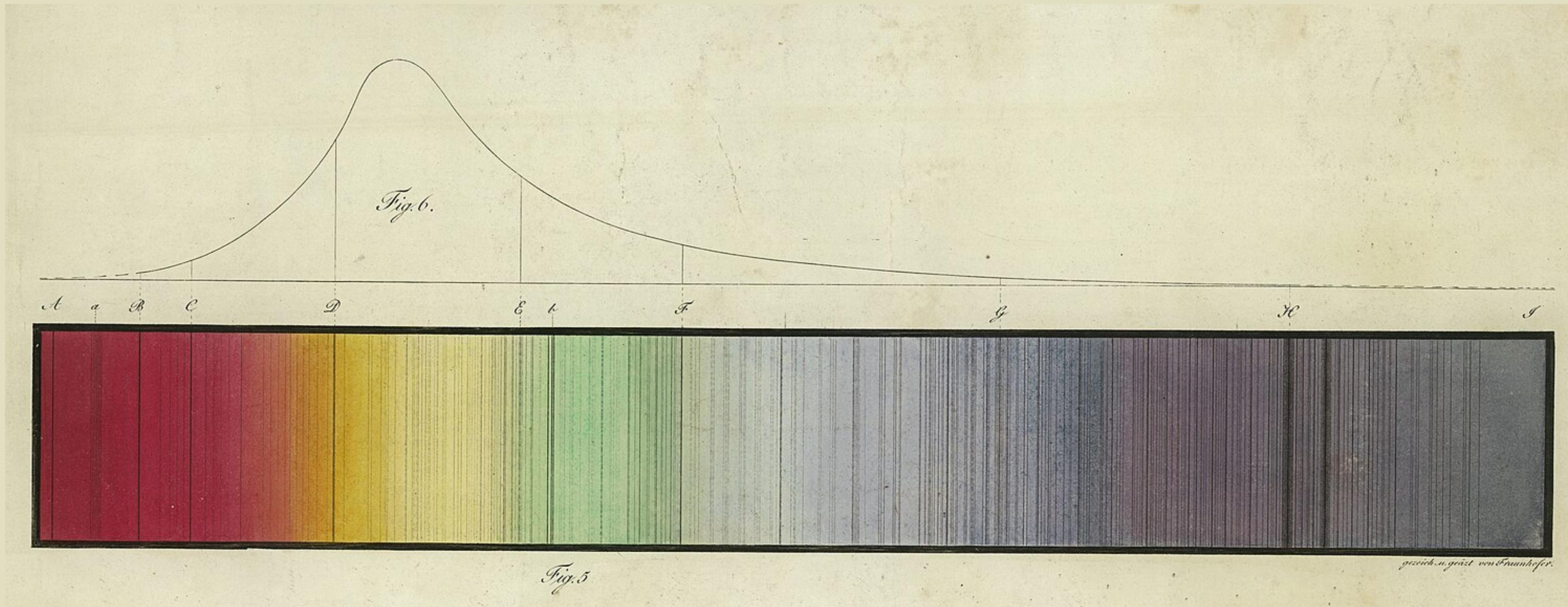
Spektroskopie SS 25 - PD Dr. Arash Rahimi-Iman, Dipl.-Ing.

Lorenz Saalmann

14.07.25

1. Motivation
2. Grundlagen der Holographie
3. Digitale Holographie
4. Anwendung in der Spektroskopie
5. Zusammenfassung

Motivation



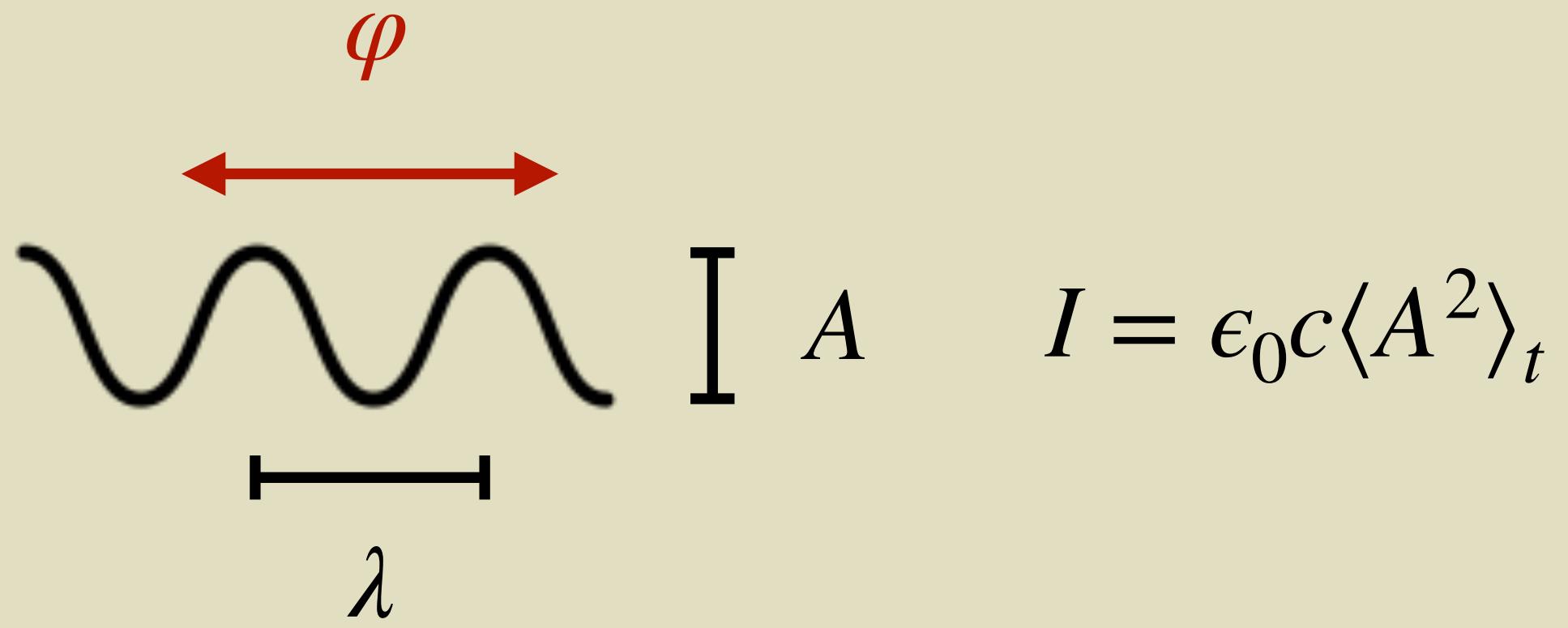
Joseph Fraunhofer - Deutsches Museum, Archiv, BN 43952

Motivation



Joseph Fraunhofer - Deutsches Museum, Archiv, BN 43952

Welleneigenschaften



Grenzen konventioneller spektroskopischer Verfahren

1. Nur Intensitätsinformation verfügbar
2. Verlust räumlicher Tiefe
3. Begrenzte Auflösung durch Beugung und Linsenqualität

Keine Rekonstruktion des Lichtfeldes möglich - Irreversibler Informationsverlust



Grundlagen der Holographie

Ziel der Holographie:

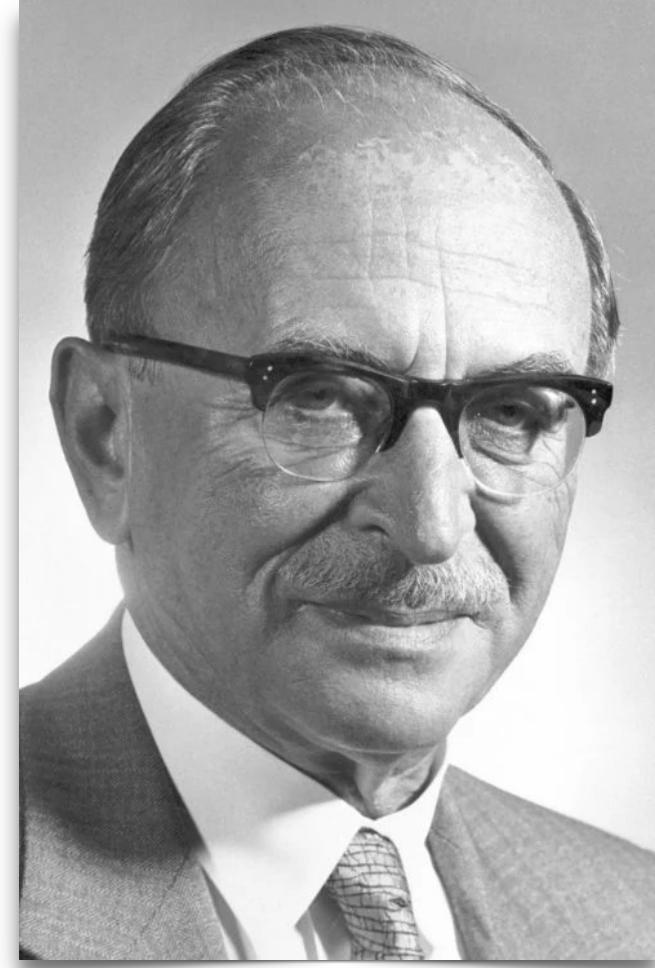
Erfassung des gesamten Lichtfelds eines Objekts

Aufnahme der Phaseninformation ist erforderlich:

→ Interferenz

Eine Referenzwelle wird benötigt

Dénes Gábor



Nobel Foundation archive,
[https://www.nobelprize.org/prizes/physics/
1971/gabor/facts/](https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1971/gabor/facts/)

Nobelpreis Physik 1971

Grundlagen der Holographie

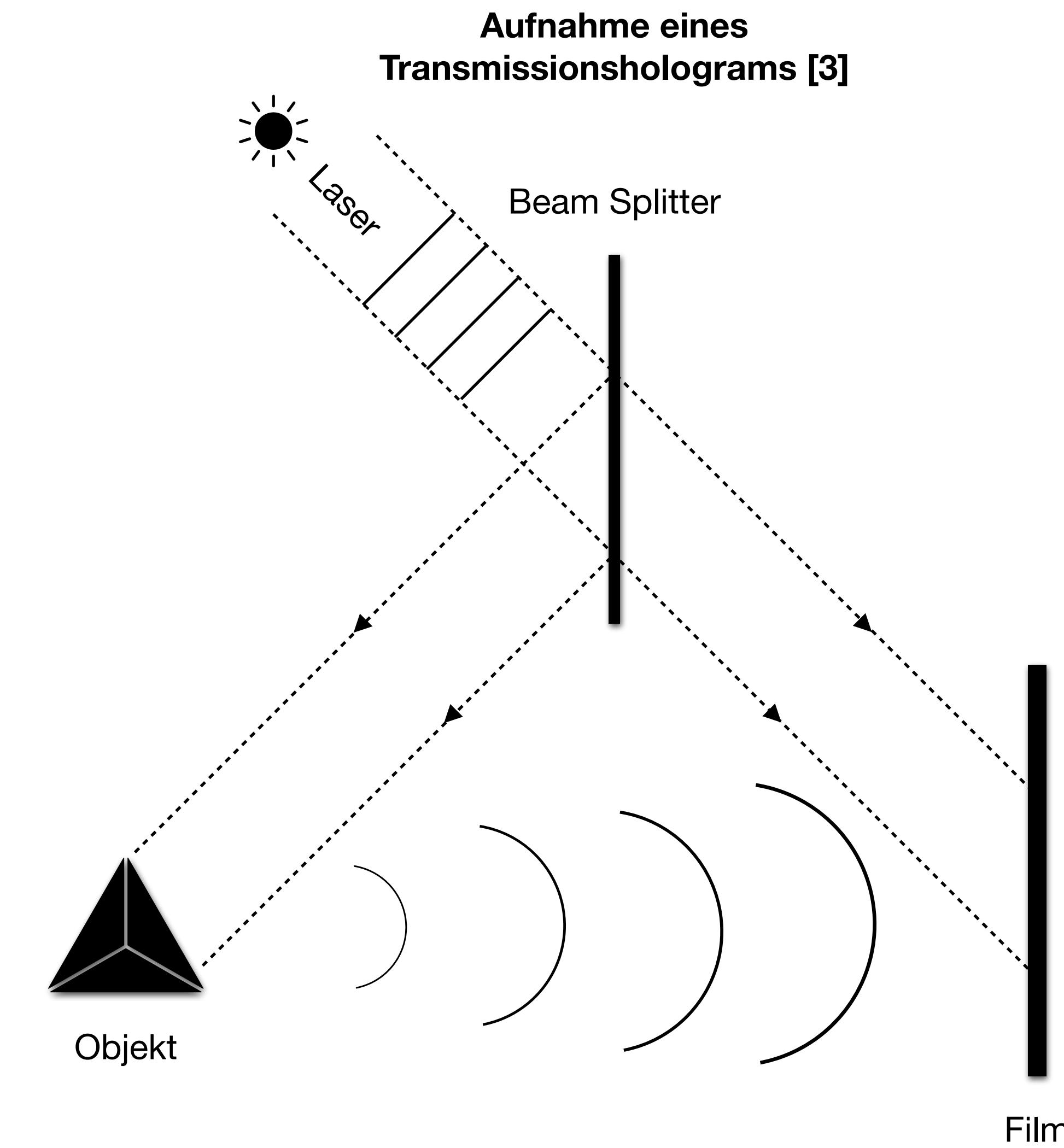
Ziel der Holographie:

Erfassung des gesamten Lichtfelds eines Objekts

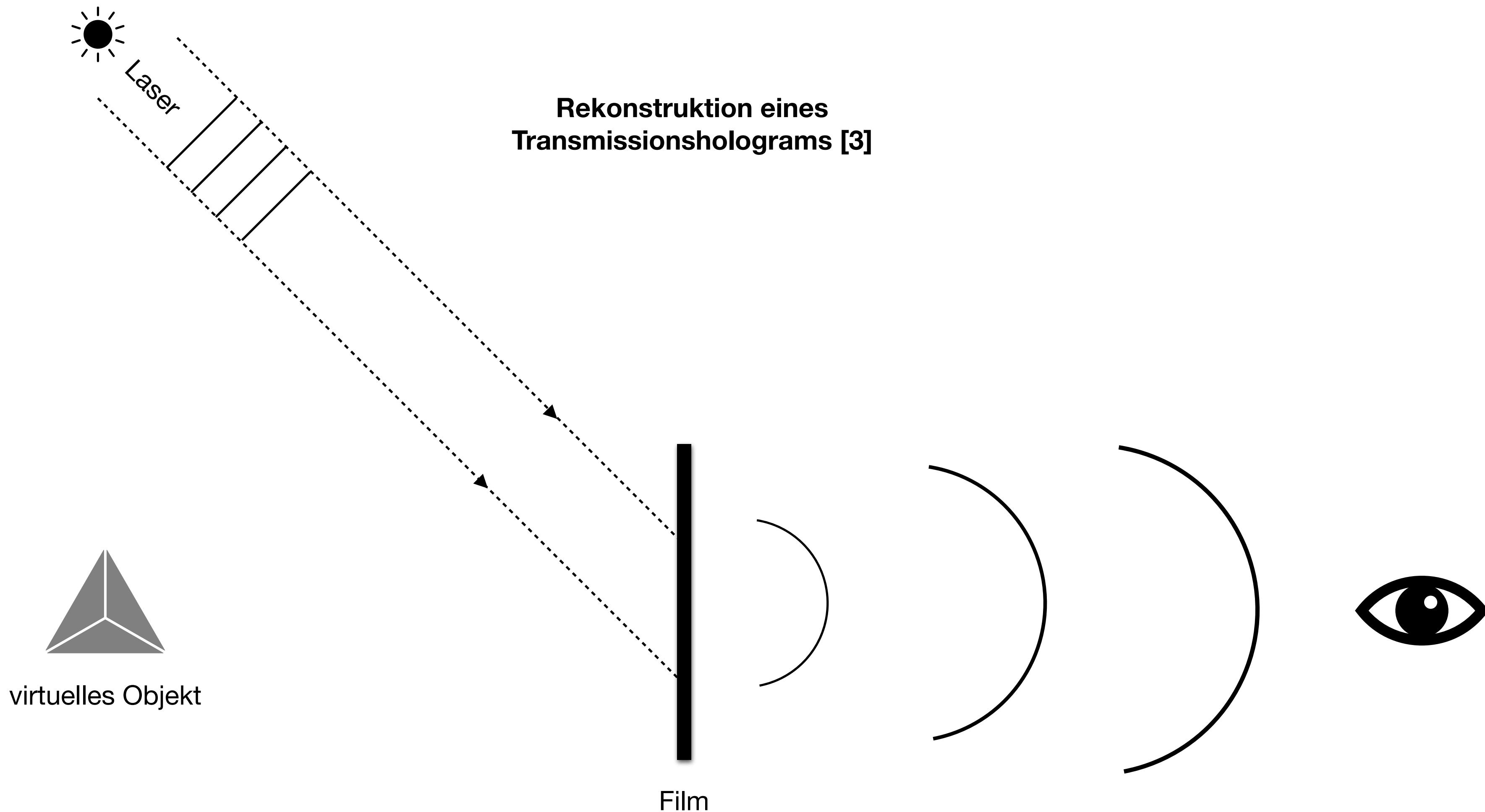
Aufnahme der Phaseninformation ist erforderlich:

→ Interferenz

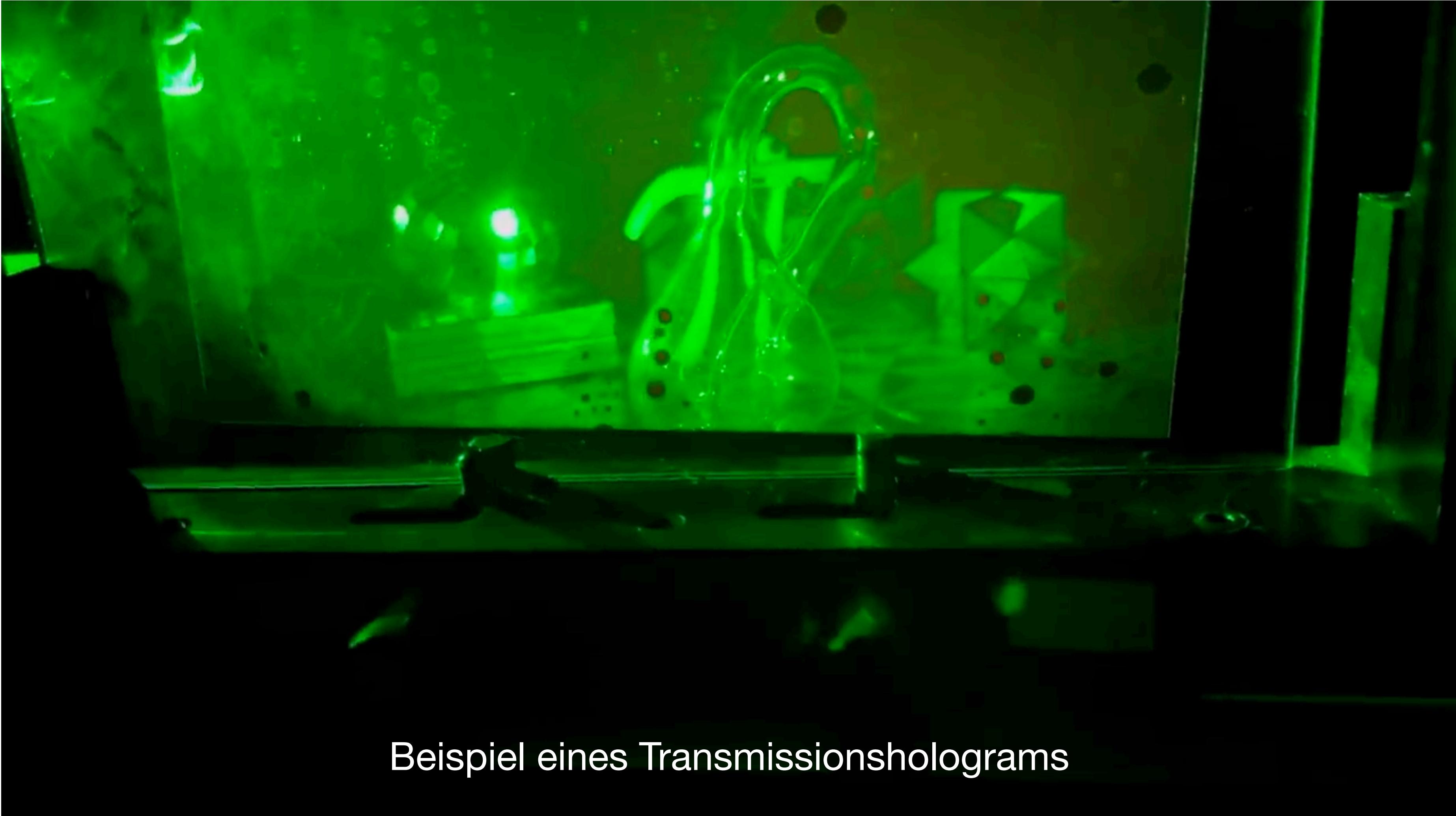
Eine Referenzwelle wird benötigt



Grundlagen der Holographie



Grundlagen der Holographie



Beispiel eines Transmissionsholograms

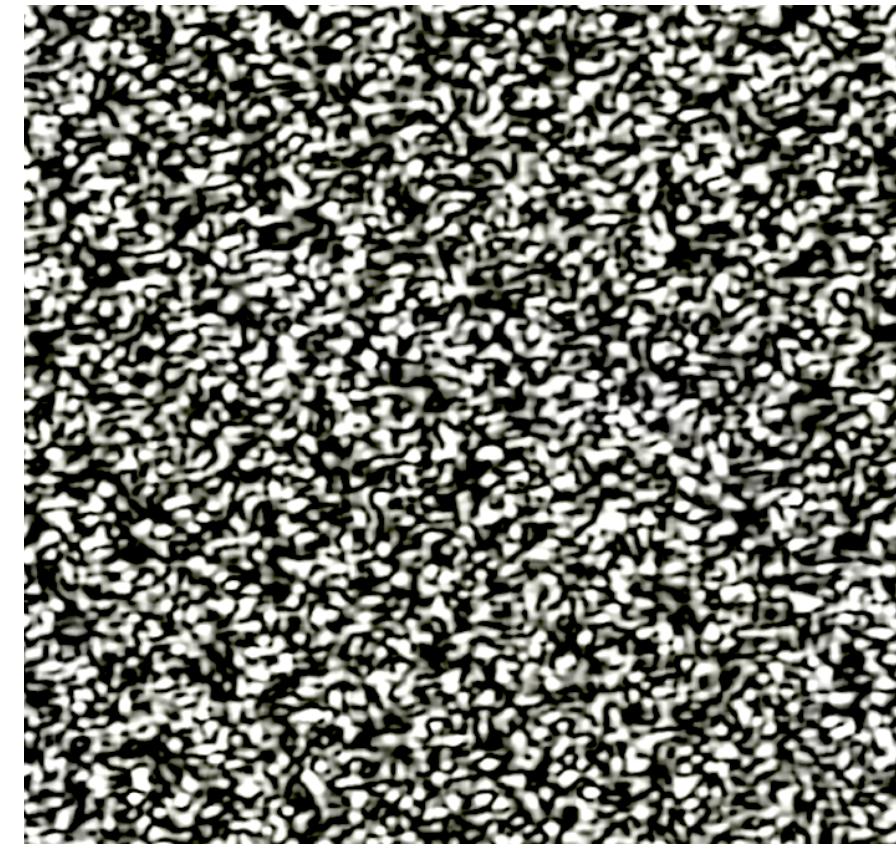
How are holograms possible? - 3Blue1Brown: <https://www.youtube.com/watch?v=EmKQsSDlaa4>

Grundlagen der Holographie

Bemerkungen:

In einem Hologram wird eine große Menge an Information gespeichert!

Teilt man ein Hologram, kann die gesamte Szene in beiden Objekten gesehen werden



Mikroskopisches Muster auf dem Film

Wie funktioniert die Rekonstruktion?

Im Interferenzmuster ist die gesamte Informationen erhalten [1]:

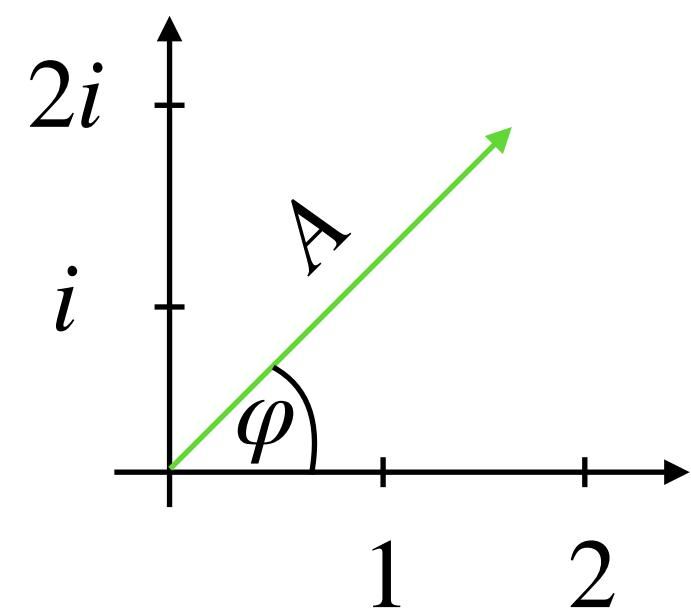
Bei Bestrahlung mit der Referenzwelle wirkt es als Beugungsgitter

Das resultierende Lichtfeld enthält das originale Lichtfeld:

$$|R + O|^2 = |R|^2 + |O|^2 + R^*O + RO^*$$

$$R|R + O|^2 = R(|R|^2 + |O|^2) + |R|^2O + |R|^2O^*$$

$$O(x, y, z, t)$$



Digitale Holographie

Veränderung:

Aufnahme mit CCD Sensoren → höhere Auflösung und Empfindlichkeit möglich

Es ist möglich die Rekonstruktion des Holograms rein numerisch zu simulieren

Invers kann ein Interferenzmuster eines beliebigen Objekts iterativ berechnet werden

Numerische Rekonstruktion des Lichtfelds aus dem Interferenzmuster [4]:

Huygenssches Prinzip:
Jeder Punkt der Wellenfront ist Ausgangspunkt sphärischer Elementarwellen

Rayleigh-Sommerfeld-Integral:
Exakte Lösung der Wellengleichung, aber rechenaufwendig im Ortsraum



Propagation (Ausbreitung):
Multiplikation mit einer Transferfunktion



2D-Fourier-Transformation:
Das Interferenzmuster wird aus dem Ortsraum in den Frequenzraum transformiert

$$H_{\text{Fresnel}}(f_x, f_y) = \exp \left(-i\pi\lambda z \left(f_x^2 + f_y^2 \right) \right)$$

Inverse-Fourier-Transformation:
Das resultierende Feld wird zurücktransformiert

Anwendung in der Spektroskopie

Typische Anwendungen [5]:

Biologie: Zellstrukturen ohne Marker sichtbar machen

Materialforschung: Oberflächenanalyse, Kontaktflächen

Phase ist sensitiv gegenüber dem Brechungsindex des Materials → Gradienten und Strukturen im Inneren von transparenten Objekten können erfasst werden

Digitale Mikroskopie: hohe Empfindlichkeit für kleinste Veränderungen

Linsenlos: keine optischen Abbildungsfehler, Fokus frei wählbar

Spektrale Information zusätzlich zur räumlichen:

Für jede Wellenlänge entsteht ein eigenes Interferenzmuster

Zwei Ansätze zur Erfassung:

Sequentiell: nacheinander bei verschiedenen Wellenlängen

Parallel: spektrale Zerlegung auf dem Sensor

Zusammenfassung

Wesentlich ist:

Die Phase macht den Unterschied

Konventionelle Spektroskopie misst nur Intensität

DHS erfasst zusätzlich die Phase → strukturelle und materialspezifische Information

Brechungsindex, innere Gradienten, Deformationen: direkt sichtbar

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Digitale Holographische Spektroskopie

Spektroskopie WS 25 - PD Dr. Arash Rahimi-Iman, Dipl.-Ing.

Lorenz Saalmann

14.07.25

Referenzen

[1] C. Buitrago-Duque und J. Garcia-Sucerquia. “Digital holographic microscopy”.
In: Óptica Pura y Aplicada 55.1 (2022). DOI: 10.7149OPA.55.1.51106.

[2] ChatGPT. Chat Log with GPT-3.5. 2025.
URL: <https://chatgpt.com/share/683463c3-4b48-8001-93b7-8e7ff1298efb>.

[3] Dennis Gábor. Holography, 1948–1971. Nobel Lecture, Physics. Dez. 1971.
URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/gabor-lecture.pdf>.

[4] Ulf Schnars und Werner Jüptner. Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. DOI: 10.1007/978-3-662-44693-5.

[5] Huangcheng Shangguan, H. Paul Urbach und Jeroen Kalkman. “Lensless single-shot dual-wavelength digital holography for industrial metrology”. In: Applied Optics 63.16 (Juni 2024), S. 4427–4434. DOI: 10.1364/AO.519491.