

3.2 Holographie

Licht kann oft durch eine harmonische ebene Welle beschrieben werden:

$$A(r, t) = A_0 e^{j(\omega t - kr + \varphi)}$$

Bei einem Foto wird nur die Intensität I gespeichert:

$$I \sim |A|^2 = A \cdot A^* \quad (* : \text{bedeutet konjugiert komplex})$$

$$|A|^2 = A_0^2 \cdot \underbrace{(e^{j(\omega t - kr + \varphi)} \cdot e^{-j(\omega t - kr + \varphi)})}_{e^0 = 1}$$

$$I \sim A_0^2$$

Die Phaseninformation geht verloren.

Aufnahme eines Hologramms:

1948 erste Ideen durch Gabor.

1962 erste Hologramme mit einem Laser.

1971 Gabor Nobelpreis.

An einem festen Ort r (z. B. beim aufzunehmenden Gegenstand) gilt:

$$A = A_0 e^{j(\omega t + \varphi)} \quad \text{mit} \quad \varphi = (kr + \varphi)$$

$\omega \approx 10^{14}$ Hz. Dies ist nicht beobachtbar, sondern nur der Mittelwert.

Also kann man zur Vereinfachung schreiben:

$$A = A_0 e^{j\varphi}$$

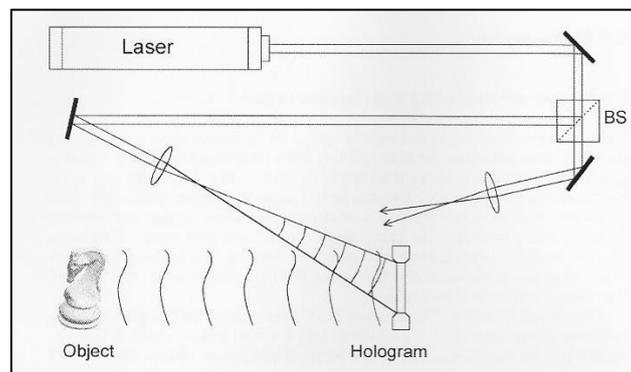


Abb. 3.1a Aufnahme eines Hologramms

Bei der Aufnahme eines Hologramms gibt es eine Objektwelle O und eine Referenzwelle R :

$$O = O_0 e^{j\varphi_o} \quad \text{und} \quad R = R_0 e^{j\varphi_R}$$

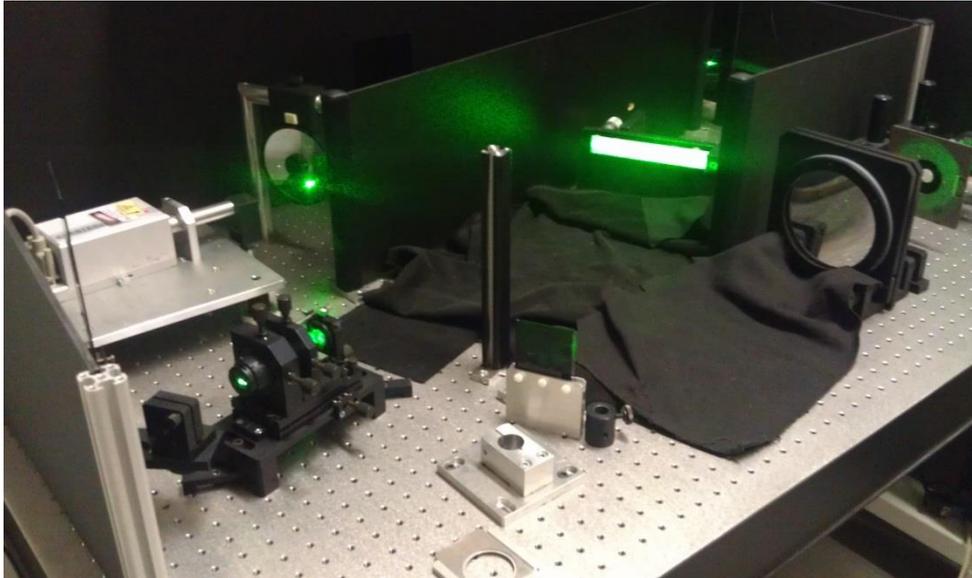


Abb. 3.1b Aufnahme eines Hologramms

Beide Wellen überlagern sich bei der Aufnahme (Interferenz):

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

$$I = OO^* + \underbrace{OR^*}_{\text{wichtig}} + RO^* + RR^* \quad (1)$$

$$I = |O|^2 + |R|^2 + O_0 e^{j\phi_o} \cdot R_0 e^{-j\phi_R} + R_0 e^{j\phi_R} \cdot O_0 e^{-j\phi_o}$$

$$I = O_0^2 + R_0^2 + R_0 O_0 (e^{j(\phi_o - \phi_R)} + e^{-j(\phi_o - \phi_R)})$$

$$I = O_0^2 + R_0^2 + 2 R_0 \underbrace{O_0}_{\uparrow} \cos(\underbrace{\phi_o}_{\uparrow} - \phi_R)$$

Amplitude und Phase der Objektwelle sind also gespeichert!

1.) Sind die Wellen inkohärent, z.B. bei Verwendung von normalem Licht, dann schwanken die Phasen zeitlich statistisch. Daraus folgt:

$$\cos(\phi_o - \phi_R) = 0 \quad \text{und} \quad I = O_0^2 + R_0^2$$

2.) Bei einem Laser sind die Wellen über einen großen Raumbereich und Zeitbereich kohärent. Daraus folgt:

$$I_{max} = O_0^2 + R_0^2 + 2R_0O_0$$

$$I_{min} = O_0^2 + R_0^2 - 2R_0O_0$$

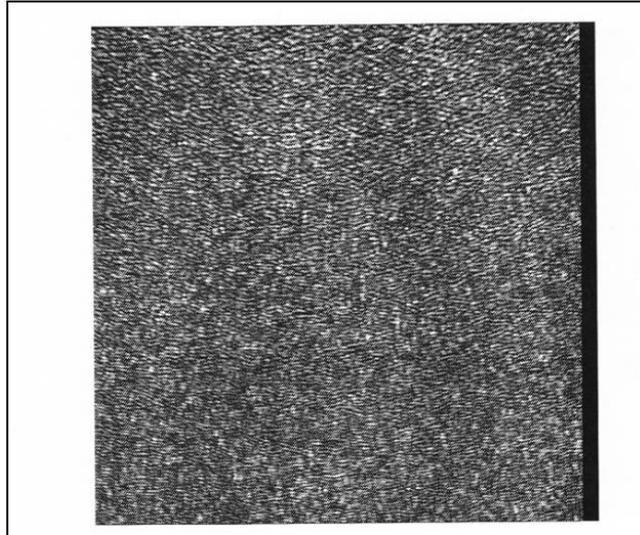


Abb. 3.2 Hologramm (Objekt: Würfel)

Wiedergabe eines Hologramms:

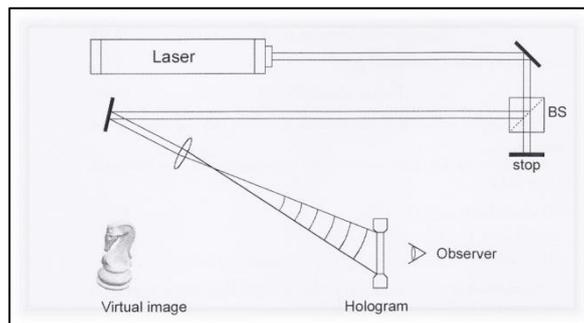


Abb. 3.3 Wiedergabe eines Hologramms

Das Hologramm wird mit der Referenzwelle beleuchtet. Das Hologramm wirkt wie ein Filter mit dem Filterfaktor I .

Die Welle U , direkt hinter dem Hologramm ergibt sich aus Gl. (1) zu:

$$U = R \cdot I = \underbrace{R \cdot (O_0^2 + R_0^2)}_a + \underbrace{R \cdot R \cdot O^*}_b + \underbrace{R_0^2 \cdot O}_c ,$$

mit $O \cdot O^* = O_0^2$ und $R \cdot R^* = R_0^2$.

Term a: Das ist die Referenzwelle, abgedunkelt durch den Faktor $(O_0^2 + R_0^2)$.

Term b: Gemisch aus Referenzwelle und konjugiert komplexer Objektwelle. (Reelles Bild).

Term c: Objektwelle O , multipliziert mit dem konstanten Faktor R_0^2 . (Virtuelles Bild).

Term a und Term b sind Störfaktoren.

Bei off-axis-Hologrammen fallen die Bilder nicht zusammen, sondern sind räumlich getrennt. Term a und Term b sind ausblendbar, wenn der Winkel zwischen Referenzwelle und Objektwelle bei der Aufnahme groß genug ist.

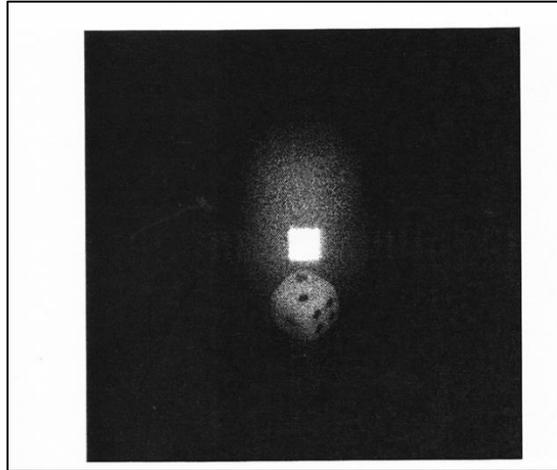


Abb. 3.4 Rekonstruiertes Bild

Jede Information über den Gegenstand ist im gesamten Hologramm gespeichert, so dass auch bei Verlust von Teilflächen des Hologramms, der Gegenstand noch vollständig rekonstruiert werden kann, s. Abbildungen 3.5 und 3.6.

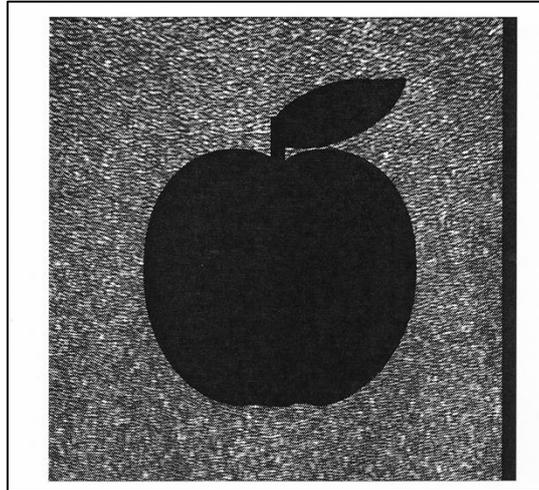


Abb. 3.5a Hologramm

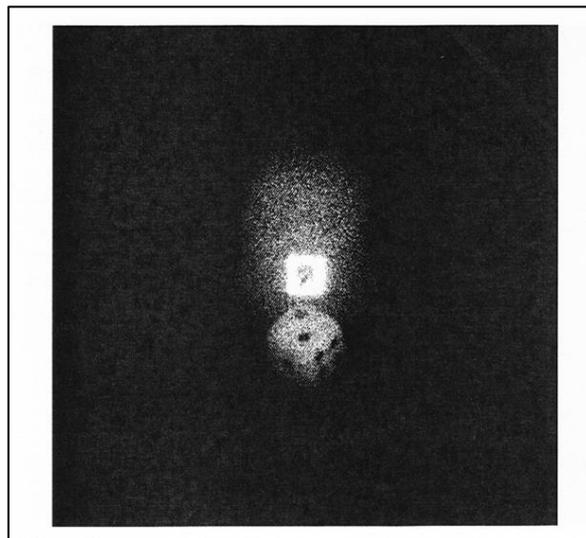


Abb.3.5b Rekonstruiertes Bild

oder

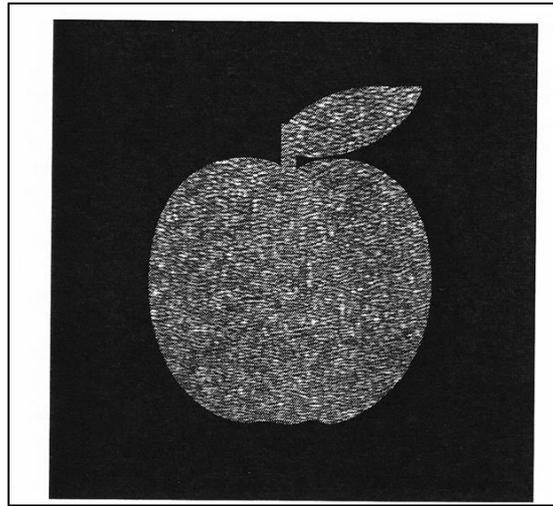


Abb. 3.6a Hologramm

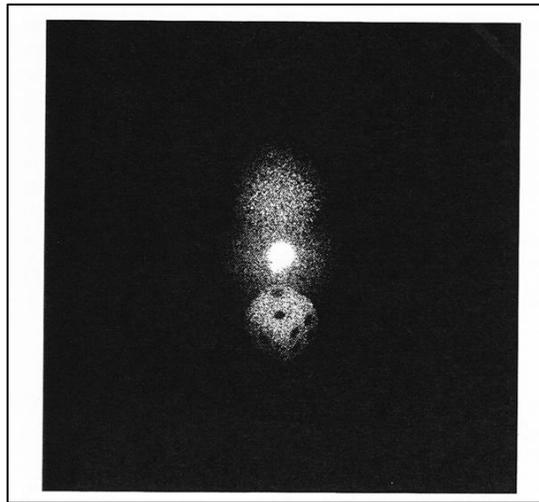


Abb. 3.6b Rekonstruiertes Bild

4.2 Faserlaser

Faserlaser sind Lichtleiter, die mit Atomen dotiert sind, die zum Laserbetrieb geeignet sind. Zum Beispiel Erbium.

Die Abbildung 4.1 zeigt das Energieniveauschema von Erbium.

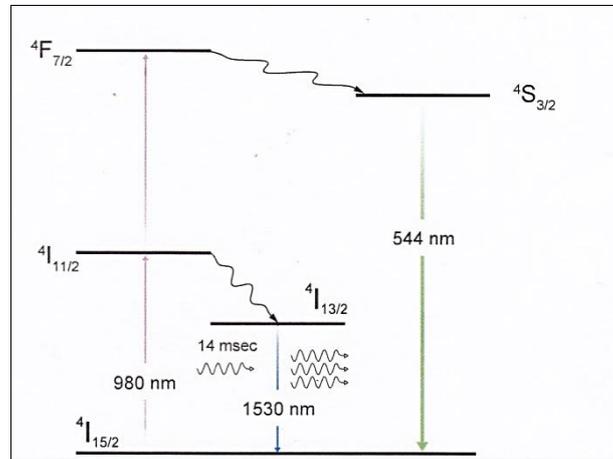


Abb. 4.1 Erbium Energieniveauschema

Das Schema zeigt eine geeignete Pumpwellenlänge von 980 nm. Die ist mit einer Laserdiode zu realisieren. Die Lebensdauer des metastabilen Niveaus liegt in der Größenordnung von 10 ms. Die Laserwellenlänge von 1530 nm liegt im infraroten Bereich.

Der Erbium-Faserlaser ist ein 3-Niveau-Laser.

Durch eine 2 Photonenabsorption in das F-Niveau kann eine grüne Fluoreszenzstrahlung mit einer Wellenlänge von 544 nm erzeugt werden (die eigentlich nicht erwünscht ist), dazu später mehr.

Die Abbildung 4.2 zeigt das Absorptionsspektrum von Erbium.

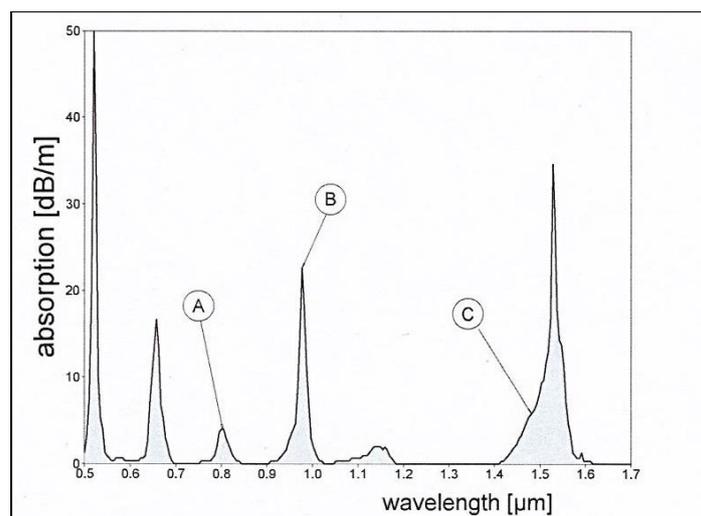


Abb. 4.2 Absorptionsspektrum von Erbium

A und B sind Wellenlängen, die einfach mit Laserdioden zum Pumpen erzeugt werden können. C ist die Wellenlänge der Laserstrahlung von Erbium.

In der Abb. 4.3 ist ein prinzipieller Aufbau eines Faserlasers zu sehen.

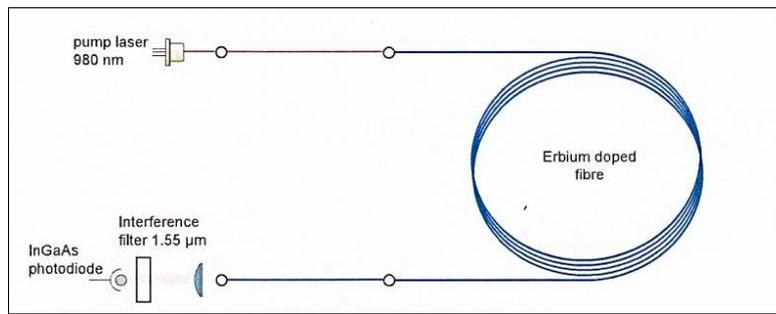


Abb. 4.3 Prinzipieller Aufbau eines Faserlasers

Am Eingang der aufgewickelten Glasfaser (Länge kann mehrere 10 m betragen) sieht man die Pumplaserdiode. Am Ausgang eine Linse, um einen parallelen Strahlengang zu erzeugen. Das Interferenzfilter sperrt die noch vorhandene Pumpstrahlung von 980 nm und läßt nur die Laserstrahlung von 1550 nm durch. Mit einer Photodiode kann man die Intensität der Laserstrahlung messen.

Will man auch die Pumpstrahlung messen (ohne Interferenzfilter) braucht man eine Si-Photodiode. Die Abbildung 4.4 zeigt die Absorptionsspektren der einsetzbaren Photodioden.

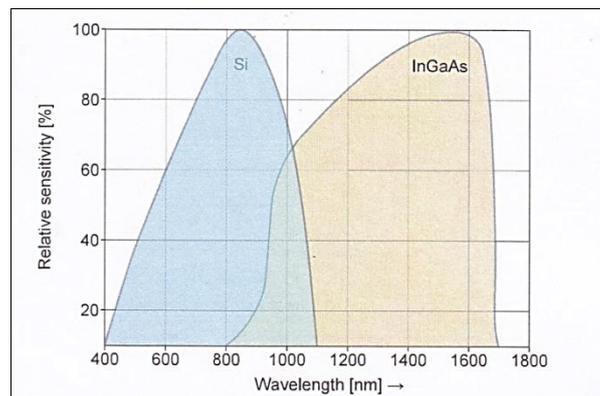


Abb. 4.4 Absorptionsspektren von Si und InGaAs

Die Abbildung 4.5 zeigt eine 17 m lange aufgewickelte Erbium-dotierte Glasfaser, wie sie in einem Laserlabor benutzt wird. 1: Glasfaser, 2 und 3 ist der optische Eingang und der optische Ausgang der Faser. Der Faserkerndurchmesser beträgt 2,2 μm, Manteldurchmesser: 125 μm.

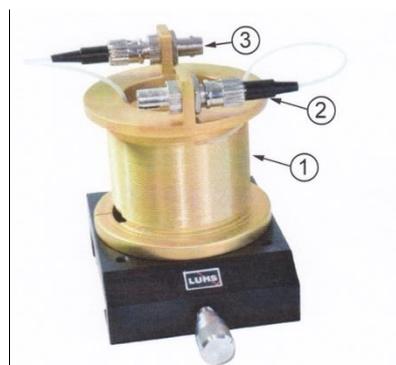


Abb. 4.5

Die Abbildung 4.6 zeigt einen typischen Laboraufbau zur Untersuchung eines Faserlasers.

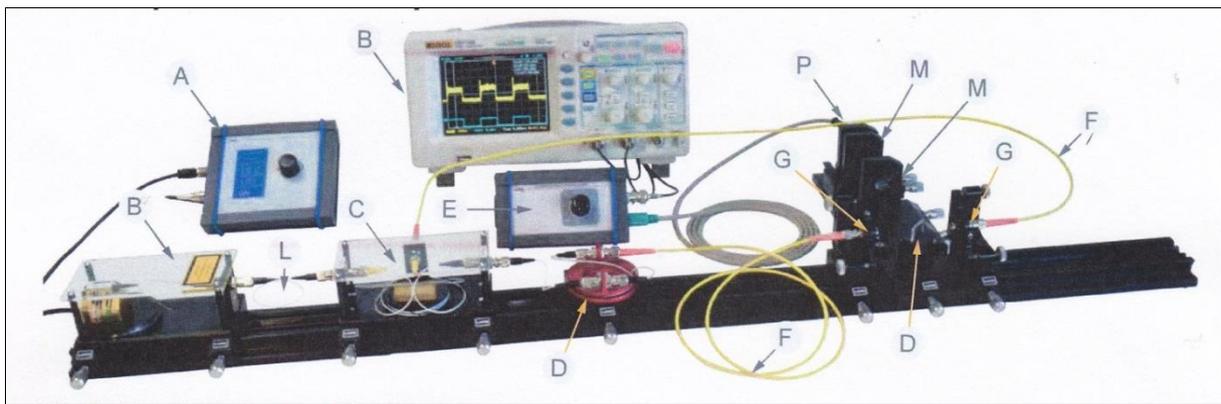


Abb. 4.6

- A,B: Pumplaserdiode mit Controller für Strom und Temperatur.
- C: Wavelength Division Multiplexer zum Mischen verschiedener Lichtwellen.
- D: Faserlaser (3m).
- F: Lichtleiter zum Verbinden der verschiedenen Komponenten.
- G bis P: Beamsplitter, Interferenzfilter, Photodiode, ...

Bei großer Länge der Lichtleitfaser und starkem Pumpen werden zum Laserbetrieb nicht unbedingt Resonatorspiegel benötigt.

Der Brechungsindexübergang an den Enden der Lichtleitfaser verursacht Reflektion, und es kann sich eine stehende Welle genügender Stärke in der Faser ausbilden. Diese Reflektion wird von den Fresnel'schen Gleichungen beschrieben, siehe Abb. 4.7.

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass der Amplitudenreflektionsgrad etwa 20% beträgt. Mit Resonatorspiegeln ist die Intensität der Laserstrahlung natürlich größer.

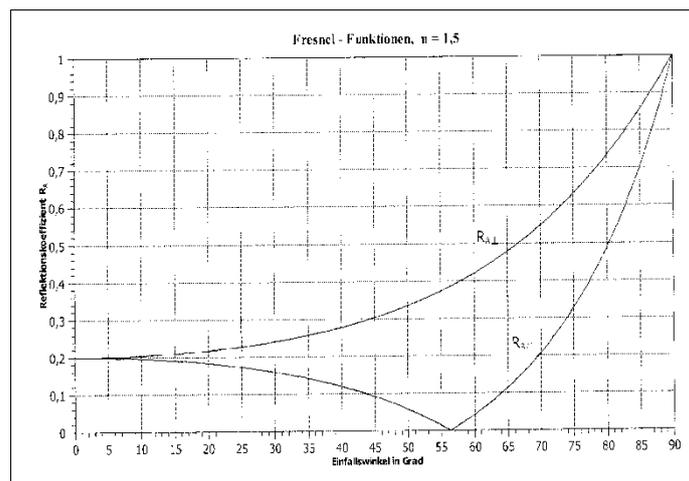
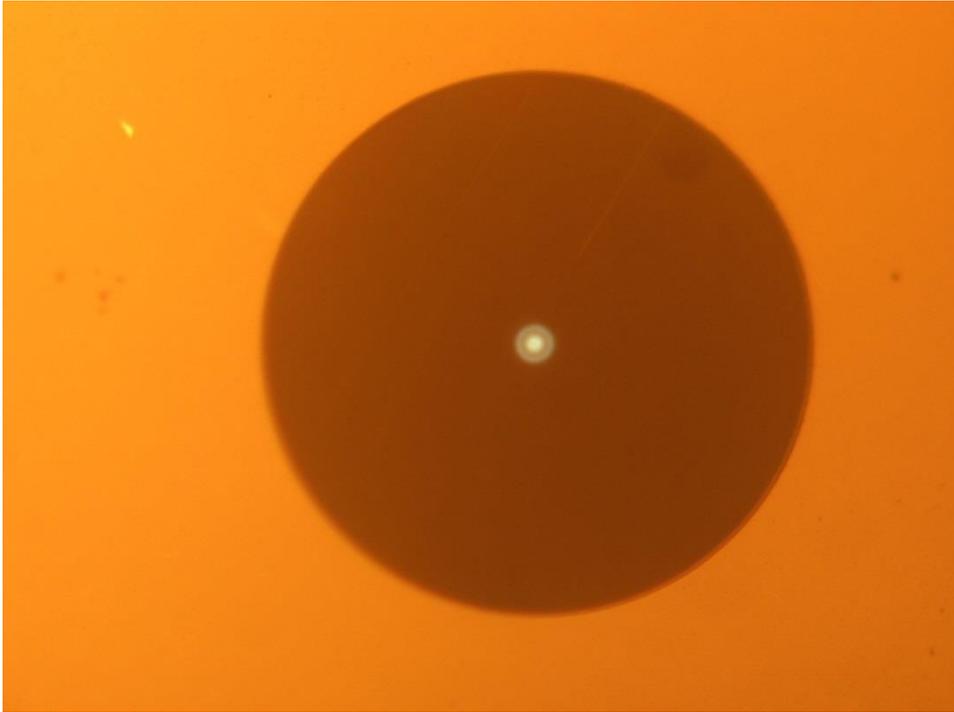
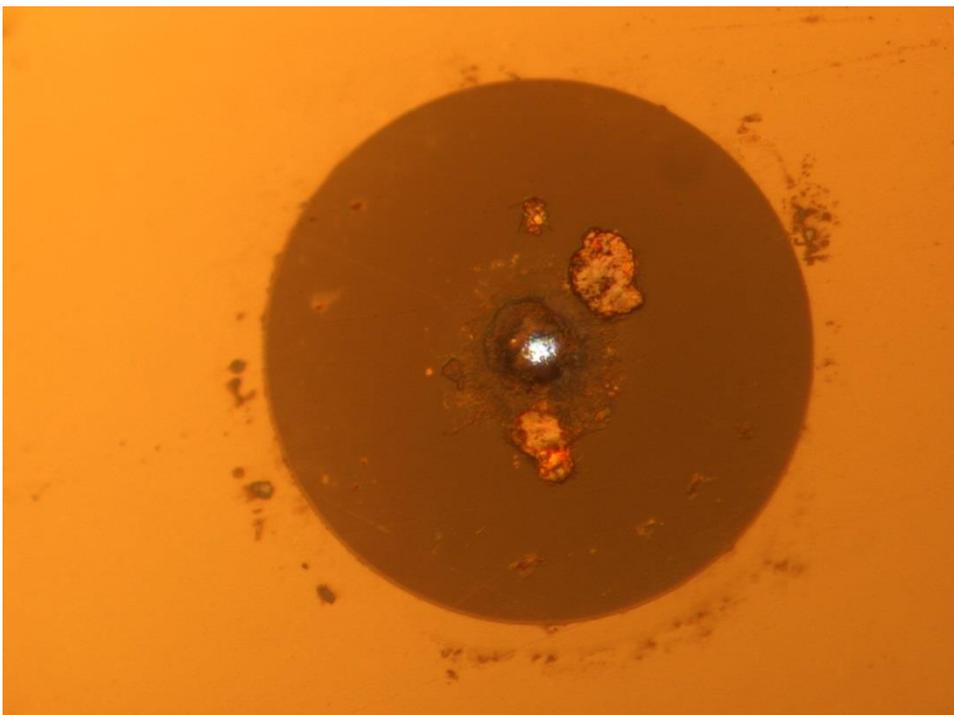


Abb. 4.7 Fresnel Funktionen für $n = 1,5$



Single-Mode-Faser mit Kern und Mantel



Verschmutzte Faser

Die Abbildungen 4.8 – 4.10 zeigen deutlich das Spiking im Pulsbetrieb des Faserlasers, das etwa 300 μs anhält.

Die Periodendauer ist von der Pumpintensität abhängig, s. Abb. 4.9 und 4.10, und wird mit steigender Pumpintensität kleiner.

Die Abbildung 4.11 stellt dies mit mehreren Messpunkten dar.

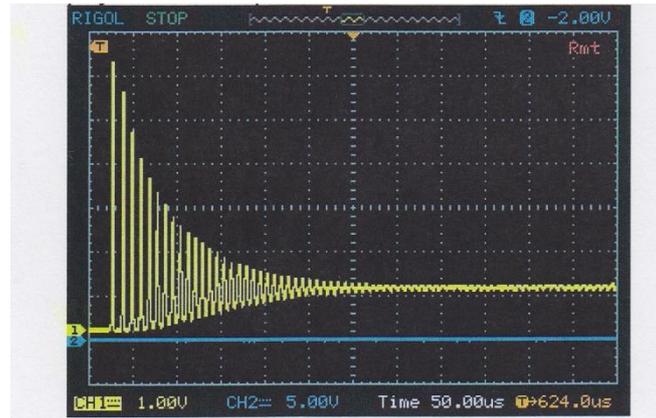


Abb. 4.8

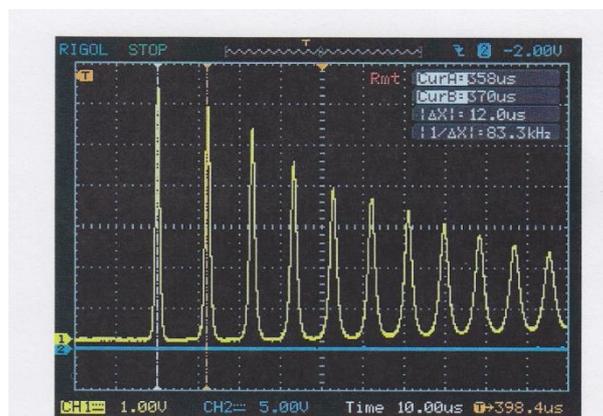


Fig. 60: Spiking at 600 mA injection current

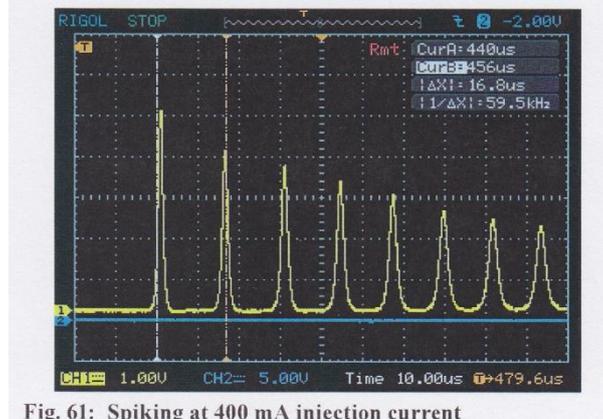


Fig. 61: Spiking at 400 mA injection current

Abb. 4.9 und 4.10

Die Abbildung 4.12 ist das Ergebnis des Ratenbilanzmodells.

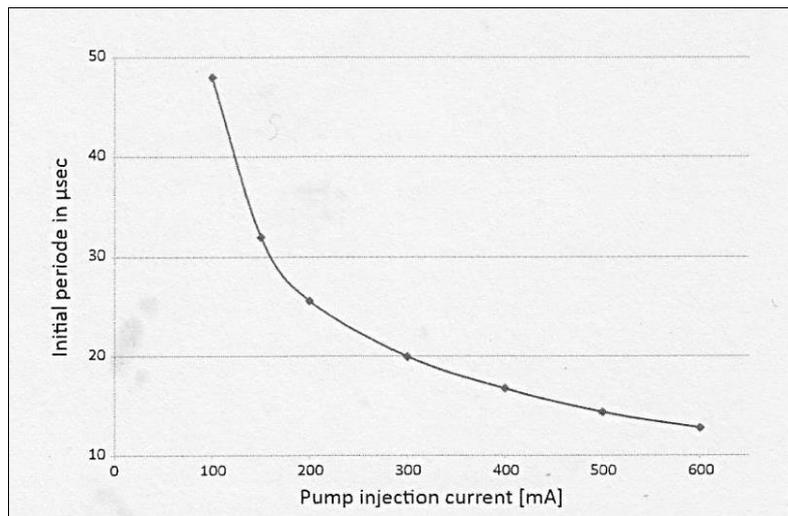


Abb. 4.11

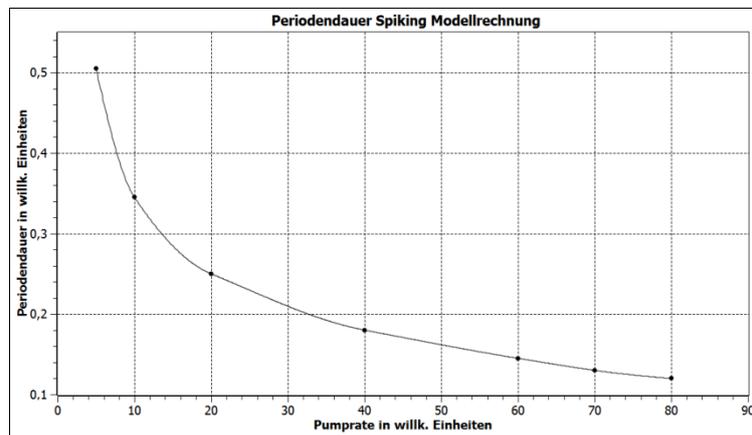


Abb. 4.12

Pumpt man den Faserlaser mit der maximal möglichen Pumpleistung, so erzeugt man die vorher erwähnte 2-Photonen-Absorption, und es entsteht die grüne Fluoreszenzstrahlung von 544 nm, siehe Abbildung 4.13.

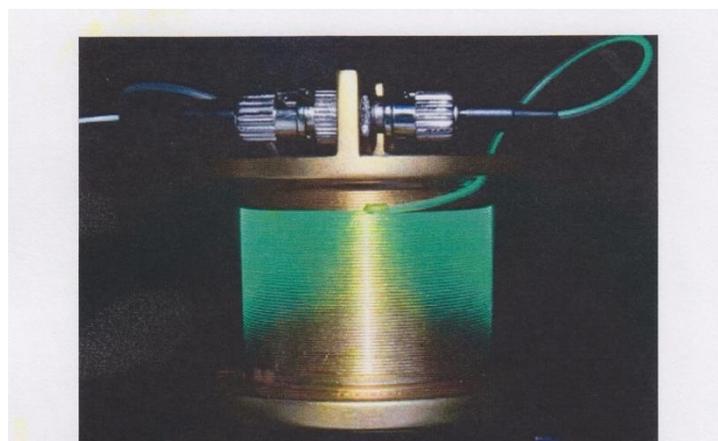


Abb. 4.13