

Versuchsprotokoll

Optische Kohärenztomographie

Maximilian Obst, Thomas Adlmaier

Protokoll: 9. November 2016

Messung: 28.10.2016

Ort: Medizinische Fakultät Carl Gustav Carus

Betreuer: M.Sc. Jonas Golde

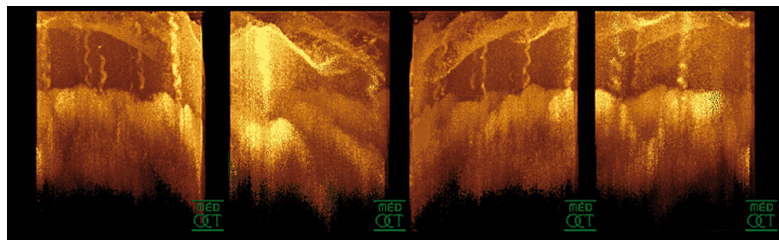


Abbildung 1: Fingerkuppe unter optische Kohärenztomographie [1]

Inhaltsverzeichnis

1	Physikalische Grundlagen	3	2.2	Frequency Domain OCT . .	5
1.1	Einführung	3	2.3	Doppler FD OCT	6
1.2	Time Domain OCT	3	3	Analyse	6
1.3	Frequency Domain OCT . .	4	3.1	Time Domain OCT	6
1.4	Doppler FD OCT	4	3.2	Frequency Domain OCT . .	8
1.5	Signalverarbeitung	5	4	Fazit	8
2	Durchführung	5	Literatur		8
2.1	Time Domain OCT	5			

1 Physikalische Grundlagen

Die Optische Kohärenztomographie ist ein bildgebendes Verfahren, welches vor allem in der Humanmedizin verwendet wird. Dort schließt es die Lücke zwischen Sonographie, welche sehr tief in den Körper eindringen kann, aber nur eine grobe Auflösung bietet, und Mikroskopie, die nur die Oberfläche abbilden kann. Die optische Kohärenztomographie bildet die ersten Millimeter des Gewebes mit hoher Auflösung ab. In diesem Versuch wird eine Einführung in die Arbeit mit OCT geboten. Es wird sowohl Time Domain OCT als auch Frequency Domain OCT durchgeführt.

1.1 Einführung

Bei der Optischen Tomographie wird ein Material mit Licht einer bestimmten Wellenlänge im Infrarotbereich beschienen. Besonders eignen sich die Wellenlängen um 800 nm, die eine besonders gute Auflösung der Bilder liefern, und die Wellenlängen um 1300 nm, welche besonders tief in menschliches Gewebe eindringen können. Das vom Gewebe reflektierte Licht wird in einem Michelson-Interferometer mit dem von einem Referenzarm reflektierten Licht überlagert. Aus dem Interferenzbild kann ein räumliches Bild des Materials gewonnen werden.

1.2 Time Domain OCT

Bei der Time Domain OCT (TD OCT) wird breitbandiges, kurzkohärentes Licht verwendet. Damit wird gewährleistet, dass Interferenz nur entsteht, wenn beide Arme annähernd gleich lang sind. Die Kohärenzlänge bestimmt damit direkt die axiale Auflösung. Durch Verschiebung des Referenzspiegels, sodass die Interferenz bestehen bleibt, kann die Tiefe der Reflexion bestimmt werden. Durch die nötige mechanische Arbeit können nur Wiederholungsraten von wenigen kHz erzeugt werden. Aufgezeichnet wird nur die Intensität der Interferenz.

Die normierte komplexe Selbstkohärenzfunktion stellt den Interferenzterm da:

$$\gamma(\tau) = e^{-i\Omega\tau} e^{-\frac{1}{16\ln 2}(\Delta\Omega\tau)^2} \quad (1)$$

Ω = Kreisfrequenz; τ = Laufzeitdifferenz

Kohärenzlänge und axiale Auflösung:

$$l_c = \frac{2\ln 2}{\pi} \frac{\lambda_c^2}{\Delta\lambda} \quad (2)$$

λ_c = Zentralwellenlänge des Laserspektrums

1.3 Frequency Domain OCT

Bei der Frequency Domain OCT (oder auch Fourier Domain OCT; FD OCT) wird im Unterschied zur TD OCT nicht nur die Intensität des Interferenzsignals, sondern des ganzen Interferenzspektrum aufgezeichnet, indem das Licht spektral zerlegt wird. Damit kann die gesamte Tiefeninformation gleichzeitig aufgenommen werden und das Signal-Rausch-Verhältnis ist wesentlich besser. Es gibt zwei Varianten: Die Spectral Domain OCT (SD OCT), bei der das Licht durch ein Spektrometer gefiltert wird, und die Swept Source OCT (SS OCT), bei der die Wellenlänge des Lichts durchgestimmt wird. Die Wiederholungsrate wird bei SD OCT durch die Auslesegeschwindigkeit der Fotochips bestimmt und liegt bei etwa 200 kHz.

Axiale Auflösung:

$$FWHM_z = \frac{\sqrt{2 \ln 2}}{n} \frac{\lambda_c^2}{2\pi\sigma_\lambda} = \frac{2 \ln 2}{\pi n} \frac{\lambda_c^2}{FWHM_\lambda} \quad (3)$$

σ_λ = Standardabweichung bezüglich der Wellenlänge; n = Brechungsindex der Probe;

$FWHM_\lambda$ = Halbwertsbreite des Laserspektrums

Maximale Eindringtiefe:

$$z_{max} = \frac{\pi}{2\delta k} = \frac{\lambda_c^2}{4\delta\lambda} \quad (4)$$

1.4 Doppler FD OCT

Mit Hilfe der Doppler FD OCT können schließlich auch Geschwindigkeiten quantitativ untersucht werden. Dafür muss nun neben der Intensität auch die Phase ϕ mit aufgenommen werden. Eine aufgenommene Phasenverschiebung deutet eine axiale Verschiebung an, also eine Geschwindigkeit des untersuchten Materials.

$$\Delta\phi = 2k\Delta z_s \quad (5)$$

Berechnet werden kann die Geschwindigkeit dann anhand dieser Formel:

$$v(z) = \frac{\lambda_0 \phi(z)}{4\pi n T_{A-Scan} \sin(\theta)} \quad (6)$$

Problematisch ist dabei der endliche Strahldurchmesser ω_0 , der zu einer Wichtung der aufgenommenen Amplituden und Phasen führt. Um mit dieser Wichtung umzugehen, werden zunächst dimensionslose Größen eingeführt:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{\omega_0} \quad (7)$$

Solange δx kleiner als 1 ist, beschreibt das klassische Dopplermodell das Problem hinreichend.

1.5 Signalverarbeitung

Um die Signale aus dem OCT zu verarbeiten, müssen verschiedene Umformungen vorgenommen werden: Zunächst muss ein Dechirp vorgenommen werden, der Verzerrungen ausgleicht, indem er reskaliert. Dann wird über das Spektrum ein Hanning-Fenster gelegt. Dieses schwächt das Rauschen ab, führt aber zu einer Auflösungsver schlechterung. Schließlich wird mit Fast Fourier Transformation das Tiefenprofil erstellt. Die Intensitätsdarstellung wird dabei in die logarithmische Skala überführt und als 8 bit Grauwert ausgegeben.

2 Durchführung

Der Versuch wird mit einem FD OCT-Gerät durchgeführt. Die verwendete Zentralwellenlänge λ_0 beträgt 845 nm bei einer Bandbreite von $\Delta\lambda = 35\text{ nm}$. Das Auslesen erfolgt mit einer Geschwindigkeit von $11888,2\text{ Hz}$.

2.1 Time Domain OCT

Zunächst soll TD OCT durchgeführt werden. Da das Gerät selbst auf FD OCT beruht, muss die TD OCT simuliert werden. Dafür wird auf einem Lautsprecher ein Spiegel angebracht. Somit tauschen der Referenzarm und der Probenarm ihre Funktion. Um die Messung durchzuführen, muss zunächst der Spiegel fokussiert werden. Dann wird der Lautsprecher bei einer Frequenz von 20 Hz zum Schwingen gebracht. Die Aufnahme erfolgt mit dem Programm TD_OCT.vi. Die Messdaten werden gespeichert.

Um die Geschwindigkeit des Lautsprechers zu bestimmen, muss danach noch mit FD OCT die Amplitude der Schwingung gemessen werden. Dafür wird das Programm OCT_MAXIMUS_Doppler.vi verwendet und die aufgenommenen Messdaten wieder gespeichert.

2.2 Frequency Domain OCT

Hier soll zunächst die axiale Auflösung des Geräts untersucht werden. Dafür wird eine aufgeraute, 5 mm dicke Glasplatte in den Strahlengang gehalten und fokussiert, sodass der Oberflächenreflex gut zu sehen ist. Die Daten werden gespeichert.

Als nächstes wird eine medizinische Messung durchgeführt. Dafür werden zwei Finger in den Strahlengang gehalten und fokussiert: Ein eingecremter Finger und ein uneingecremter. Nach der Messung an jeweils drei Stellen der Finger werden beide für 10 Minuten in ein

Wasserbad gehalten. Dann wird an den selben Stellen wieder ein Bild aufgenommen. Dies wird nach nochmals 10 Minuten im Wasserbad wiederholt.

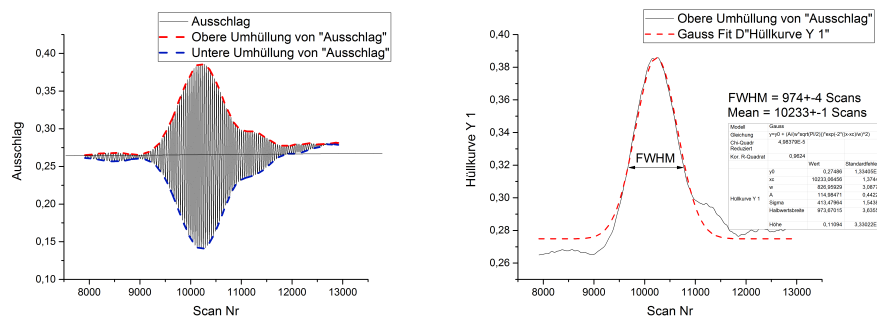
2.3 Doppler FD OCT

Als letztes soll in einer runden Glaskapillare mit einem Innendurchmesser von etwa $300\text{ }\mu\text{m}$ die Fließgeschwindigkeit quantitativ bestimmt werden. Dafür wird eine Lösung aus 2 ml Intralipid20 und 48 ml destilliertem Wasser hergestellt. Dann wird der tatsächliche Innendurchmesser an der untersuchten Stelle gemessen, indem dort ein Bild der leeren Kapillare nach der Fokussierung aufgenommen wird. Dann wird zur Bestimmung des Brechungsindex der Kapillare ein Bild der mit der Lösung durchsetzten Kapillare gemacht.

Zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit muss zunächst der korrekte Dopplerwinkel eingestellt werden. Danach wird ein Volumenstrom eingestellt, der zu einer maximalen Fließgeschwindigkeit unterhalb der Schwelle zum erweiterten Dopplermodell führt. Schließlich werden mit dem Programm OCT_MAXIMUS_Doppler.vi die Geschwindigkeitsprofile aufgenommen und gespeichert.

3 Analyse

3.1 Time Domain OCT



(a) Mit TD OCT gemessene Ausschlags- (b) Berechnete Einhüllende der Funktion des Lautsprechers

Abbildung 2: Einhüllende des Ausschlags

Die Frequenzfunktion wird mit der simulierten TD OCT aufgenommen. Aus der Einhüllenden, die in Bild 2 zu sehen ist, wird die Schwingungsdauer ermittelt. Als Fehler dient

die über 4 Werte ermittelte Standardabweichung.

$$T_{Schwingung} = (0.0253 \pm 0.0007)s$$

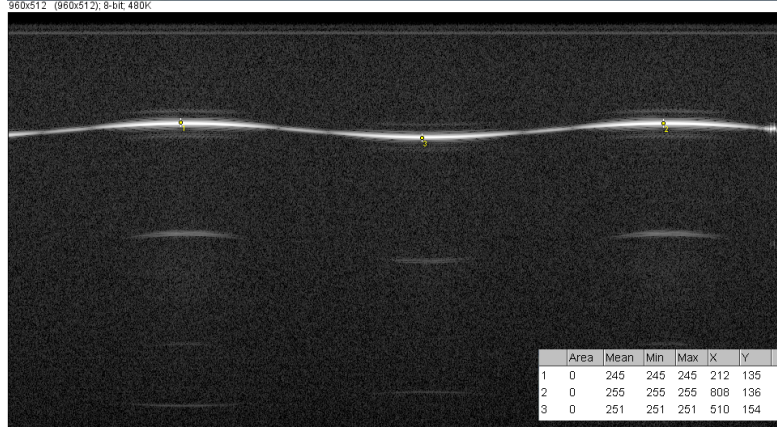


Abbildung 3: Auswertung der aufgenommenen Schwingungsamplitude des Lautsprechers

Die Schwingungsamplitude wird mit FD OCT aufgenommen. Das entstandene Bild kann in Bild 3 gesehen werden. Auch hier wird als Fehler die Standardabweichung über 4 Werte gewählt.

$$l_{Amplitude} = (49 \pm 4)\mu m$$

Die experimentelle Auflösung wird aus der Geschwindigkeit des Lautsprechers im Nulldurchgang bestimmt:

$$l_{c,TD OCT;exp.} = ??? \quad (8)$$

Diese wird ermittelt, indem das Bild 3 genauer ausgewertet wird: Ein Pixel in x-Richtung besteht aus einem Scan, wobei 12000 Scans pro Sekunde aufgezeichnet werden. Ein Pixel in y-Richtung entspricht $5\mu m$. Aus den Steigungen der Kurven ergibt sich nun folgende Geschwindigkeit im Nulldurchgang:

$$v_{Lautsprecher} = (43 \pm 3)mm/s$$

Der Fehler wird über das Anlegen von Ausgleichsgeraden ermittelt.

Damit ergeben sich die folgenden Werte:

$$v_{Lautsprecher} = (43 \pm 3)mm/s$$

Die theoretische Auflösung der TD OCT wird mit der Formel 2 berechnet.

$$l_{c,TD OCT;th.} = 9.0022\mu m$$

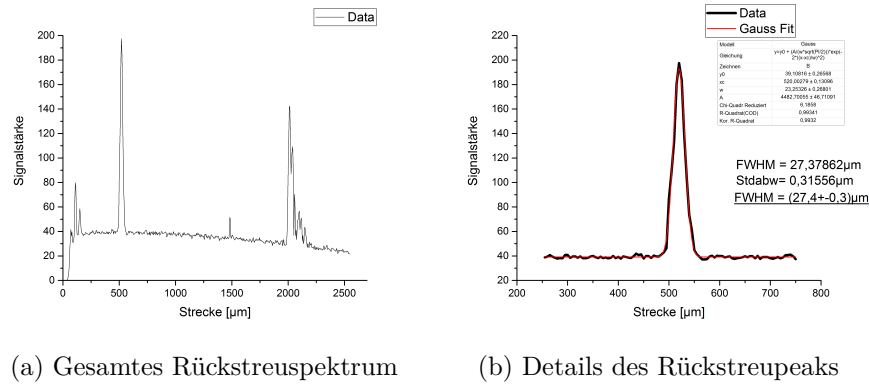


Abbildung 4: Rückstreupik der Glasplatte

3.2 Frequency Domain OCT

Eine raue Glasplatte reflektiert das eingestrahelte Licht zweifach. Die Halbwertsbreite des Rückstreupieks korrespondiert mit der axialen Auflösung. Der Peak kann in Bild 4 gesehen werden.

$$l_{c,FDOCT;exp.} = (27.4 \pm 0.3) \mu m$$

Die theoretische Auflösung der FD OCT lässt sich mithilfe der Formel 3 bestimmen. Dabei stellt die spektrale Bandbreite des Lasers $FWHM_y$ da:

$$l_{c,FDOCT;th.} = 6.0 \mu m$$

Damit ergibt sich für das Verhältnis der beiden Auflösungen folgendes:

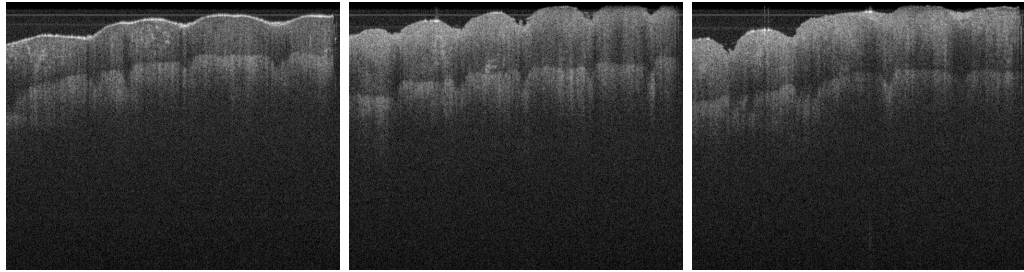
$$\frac{l_{c,FDOCT;exp.}}{l_{c,FDOCT;th.}} = 4.6$$

Die experimentelle Auflösung ist damit um ein vielfaches schlechter als die theoretisch mögliche.

4 Fazit

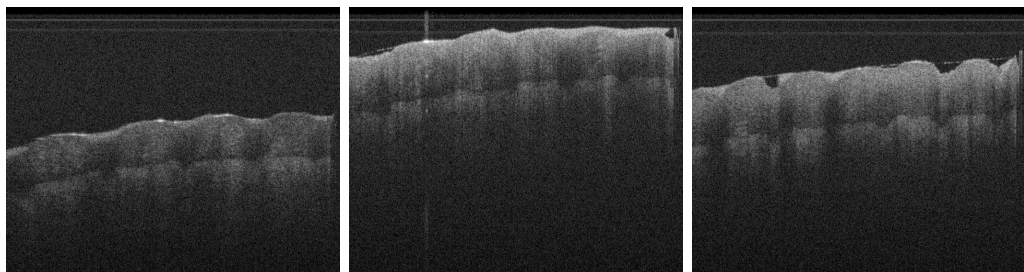
Literatur

- [1] <http://www.zwp-online.info/sites/default/files/users/kerstin/kohaerenz3.png>
05.11.2016 14:30 Uhr



(a) Ohne Einwirkung von Wasser (b) Nach 10 Minuten im Wasserbad (c) Nach 20 Minuten im Wasserbad

Abbildung 5: Uneingecremte Fingerspitze



(a) Ohne Einwirkung von Wasser (b) Nach 10 Minuten im Wasserbad (c) Nach 20 Minuten im Wasserbad

Abbildung 6: Eingecremte Fingerspitze