

## ■ Tief ins Auge geschaut

Veränderungen an der Netzhaut weisen bereits in einem frühen Stadium auf Krankheiten hin. Mit der Optischen Kohärenztomografie lassen sie sich berührungslos und hochauflösend erfassen.

#) Physik Journal,  
Dezember 2012, S. 48

Die Netzhaut ist der Bildsensor des Auges. Sie dient als Projektionsfläche des durch Pupille und Linse erzeugten Abbildes der Umwelt und wandelt die Lichtreize in elektrische Signale um, die schließlich das Gehirn erreichen. Die Netzhaut ist nur 0,2 bis 0,5 Millimeter dick und aus mehr als zehn Schichten aufgebaut – Komplexität auf minimalem Raum also. Am Aussehen der Netzhaut kann der Augenarzt verschiedene Krankheiten erkennen, die das Sehvermögen des Betroffenen zum Teil massiv beeinträchtigen. Bei Erkrankungen des Augenhintergrunds verändern sich bereits im Anfangsstadium Dicke und Aussehen der Netzhaut, lange bevor es zu spürbaren Sehbeeinträchtigungen kommt. Beispiele dafür sind der Grüne Star, entzündliche Veränderungen und Tumore, diabetesbedingte Durchblutungsstörungen und Flüssigkeitseinlagerungen in der Netzhaut sowie die altersbedingte Makuladegeneration.

Um Veränderungen früh zu erkennen, leuchten Augenärzte routinemäßig die Netzhaut des Patienten mit einer Spaltlampe aus. Besteht der konkrete Verdacht einer Netzhauterkrankung, greifen Ärzte zur Optischen Kohärenztomografie (OCT) als Untersuchungsverfahren



Carl Zeiss Meditec

Mithilfe der Optischen Kohärenztomografie können Ärzte die Dicke der Netz-

oder Hornhaut messen und Krankheiten frühzeitig erkennen.

ren. Denn mit ihrer Hilfe lässt sich die Netzhaut nicht nur an der Oberfläche, sondern auch in der Tiefe detailliert analysieren. Darüber hinaus nutzen Ärzte die OCT, um zum Beispiel die Dicke der Hornhaut zu messen. Diese Information hilft bei der Vorbereitung einer LASIK<sup>®</sup> (Laser-in-situ-Keratomileusis), mit der sich Fehlsichtigkeiten korrigieren lassen, oder bei der Diagnose von Ödemen in der Hornhaut.

Die OCT arbeitet berührungslos und beruht auf der Interferometrie mit zeitlich kurzkohärentem Licht. Als Strahlungsquelle dient eine Superlumineszenzdiode, also

eine Laserdiode ohne Resonator. Ihre Funktionsweise beruht auf der optischen Verstärkung spontan emittierten Lichts – Superlumineszenzdioden sind günstiger als Laser und liefern für die OCT ausreichend kohärentes Licht. Bei der Untersuchung fällt die Strahlung der Lichtquelle auf den Augenhintergrund und dringt bis zu einer gewissen Tiefe in die Netzhaut ein. Der in unterschiedlichen Tiefen gestreute Lichtanteil wird jeweils mit dem Referenzstrahl zur Interferenz gebracht, indem das OCT-Gerät die optische Länge des Referenzarms verändert (Abb. 1a). So lässt sich die Rückstreuamplitude der zugehörigen Tiefenposition in der Netzhaut zuordnen. Ein 2D-Scanner erlaubt es, den interessanten Netzhautbereich abzurastern und ein Datenvolumen aufzunehmen, aus dem sich Tiefenprofile extrahieren lassen.

OCT-Geräte funktionieren nur bei Wellenlängen, bei denen das untersuchte Gewebe Licht streut und wenig absorbiert. Aufgrund der verschiedenen optischen Eigenschaften der Bestandteile des Auges bieten sich für die Vermessung des hinteren Augenabschnitts vor allem Wellenlängen zwischen 820 und 850 Nanometer an. Die meisten kommerziell erhältlichen OCT-Geräte nutzen solche Lichtquellen.

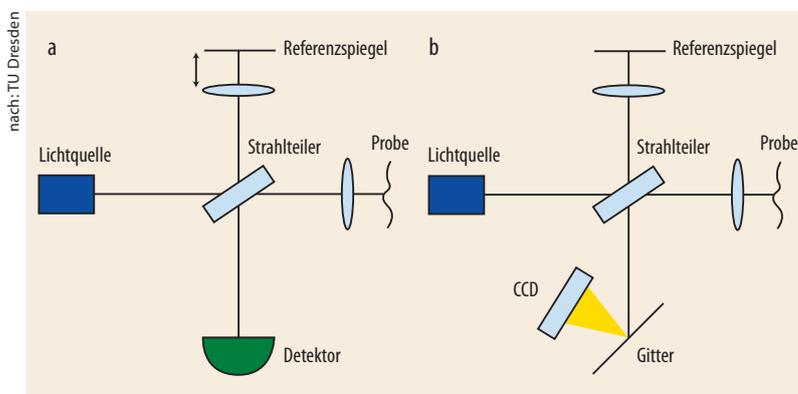


Abb. 1 Bei der Time-Domain-OCT (a) spaltet der Strahlteiler das Licht in einen Referenz- und einen Probenstrahl auf. Interferenzen treten dann auf, wenn die optischen Wege von Referenz- und Probenarm innerhalb der Kohärenzlänge übereinstimmen. Durch die Bewegung

des Referenzspiegels nimmt der Detektor direkt das Tiefenprofil der Probe auf. Bei der Fourier-Domain-OCT (b) wird das Licht vom Gitter spektral zerlegt und das Spektrum mit einem Zeilendetektor aufgenommen. Der Referenzspiegel bleibt fix.

Ist ein Gerät ausschließlich auf die Untersuchung des vorderen Augenabschnitts ausgelegt, kommen Lichtquellen mit Wellenlängen um 1300 Nanometer infrage. Diese sind günstig und zuverlässig, weil sie in der Telekommunikation eine große Rolle spielen.

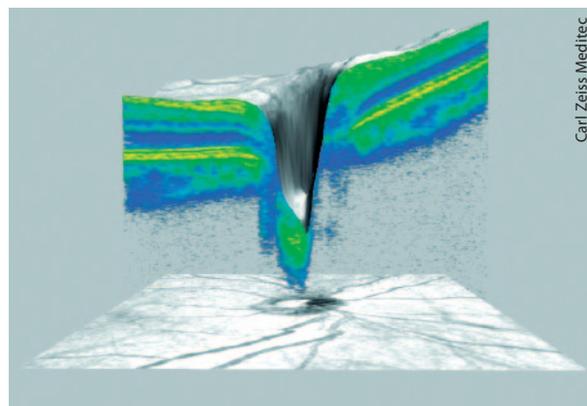
Tiefen- und Lateralauflösung sind bei der OCT unabhängig voneinander. Gewöhnlich hängt bei optischen Verfahren die Auflösung von der numerischen Apertur ab. Der erreichbare Öffnungswinkel aber ist aufgrund der Anatomie des Auges und dessen optischer Aberrationen relativ klein, was sich besonders bei der axialen Auflösung negativ bemerkbar macht. Marktübliche OCT-Geräte haben dieses Problem nicht und erreichen eine axiale Auflösung von wenigen Mikrometern und eine laterale von etwa 20 Mikrometern. Die Scantiefe beträgt einige Millimeter. Damit eignet sich die OCT auch für weitere Untersuchungen, zum Beispiel der Haut. Diese sind allerdings noch Gegenstand der Forschung.

#### Zeit versus Frequenz

Bei dem bislang geschilderten Verfahren handelt es sich um die Time-Domain-OCT, weil die Messung im Zeitbereich erfolgt. Sie hat den Nachteil, dass die relativ langsame mechanische Bewegung des Scannerspiegels die maximale Wiederholrate für die axiale Richtung auf

etwa ein Kilohertz beschränkt. Volumenscans dauern dadurch relativ lange. Die Mehrzahl der inzwischen verkauften Geräte beruht daher auf der Frequency-Domain-OCT. Diese Geräte zerlegen das Licht in seine spektralen Anteile und nehmen das Interferenzspektrum auf, das durch die Frequenzen moduliert ist, die den Wegdifferenzen zwischen Mess- und Referenzstrahl entsprechen (Abb. 1b). Das Tiefenprofil ergibt sich aus einer Fourier-Transformation des Signals. Da das Verfahren parallel arbeitet, also alle Tiefeninformationen gleichzeitig aufnimmt, ist es sehr viel schneller: Wiederholraten bis zu hundert Kilohertz sind derzeit möglich.

Allerdings hängt die Qualität der 3D-Bilder stark vom Signal-zu-Rausch-Verhältnis ab. Bei der Untersuchung des Augenhintergrunds ist die eingebrachte Lichtleistung aus medizinisch-biologischen Gründen beschränkt. Daher führt eine höhere Repetitionsrate bei der Frequency-Domain-OCT zwangsläufig zu einer niedrigeren Lichtmenge, die in einem einzelnen Volumenelement gestreut wird. Das verschlechtert das Signal-zu-Rausch-Verhältnis und damit die Bildinformation. Mehrfachmessungen des gleichen Augenbereichs wären ein gängiges Mittel, um das Rauschen zu verringern. Sie sind aber kaum möglich, da sie die Messzeit verlängern. Diese ist durch



Carl Zeiss Meditec

Abb. 2 Der hochauflösende 3D-OCT-Linien-Scan durch den Nervenfaserkopf (Falschfarbendarstellung, stark überhöht) zeigt deutlich den mehrschichtigen Aufbau der menschlichen Netzhaut. Durch den Nervenfaserkopf in der Mitte werden die Sehnerven in Richtung Gehirn abgeleitet und das Netzhautgewebe durch Blutgefäße versorgt. Die 2D-Ansicht der Netzhaut (unten im Bild) wurde aus den OCT-Daten berechnet.

die Zeit begrenzt, die ein Mensch das Auge offen halten kann. Meist schließt sich nach 1,5 bis 2,5 Sekunden kurz das Lid. Diese Zeitspanne reicht aus, um zum Beispiel die Makula, also den Ort des schärfsten Sehens, oder den Nervenfaserkopf in drei Dimensionen mit ausreichender Auflösung zu erfassen (Abb. 2).

Für den Hersteller allerdings ist die Untersuchungsdauer nicht der entscheidende Faktor, um die Wirtschaftlichkeit eines Geräts zu beurteilen. Viel länger als die reine Messung dauert es, den Patienten am Gerät zu positionieren.

Michael Vogel

+) Ich danke Dietrich Martin von der Carl Zeiss Meditec AG, Jena, für hilfreiche Erläuterungen.