

Zwei neue Anwendungen einer etablierten Technologie: Angio-OCT und intraoperatives OCT

Albert Augustin
Karlsruhe

→ Zusammenfassung: Die OCT-Angiographie (OCTA) ermöglicht eine nicht-invasive, rasche und dreidimensionale Darstellung des Mikrogefäßsystems von Netzhaut und Aderhaut ohne Verwendung von Kontrastmitteln und bietet zusätzliche Informationen zur etablierten Fluoreszein- und ICG-Angiographie (FAG). Sie erfasst das Mikrogefäßsystem in hoher Auflösung und stellt es tiefenspezifisch dar. Diese Technologie ist daher besonders zur Diagnose und Verlaufskontrolle von Erkrankungen einhergehend mit Gefäßneubildungen, Gefäßverschlüssen oder Gefäßanomalien geeignet. Klinische Evaluierungen haben schon erste, vielversprechende Ergebnisse gebracht, die hier dargestellt werden. Das intraoperative OCT (iOCT) erlaubt in komplizierten Situationen der Vorder- und Hinterabschnittschirurgie schon während des Eingriffs die Bewertung von Mikrostrukturen, und in kritischen Situationen erleichtert es die Entscheidung für oder gegen ein chirurgisches Manöver bzw. ermöglicht eine direkte Erfolgskontrolle.

OPHTHALMO-CHIRURGIE 28: 25–33 (2016)

Summary: OCT angiography (OCTA) allows for non-invasive, three dimensional microvascular visualizations of both the retina and choroid. This non-invasive technique offers supplementary information to fluorescein and ICG angiography. It provides detailed and precise three-dimensional information on the spatial expansion of the microvascular system of the eye and is thus particularly suited for diagnosing and monitoring many ocular diseases such as neovascularizations, microaneurysms, retinal vascular occlusions, and other retinal vascular anomalies. Several clinical evaluations have already shown promising results which will be discussed in this manuscript. Intraoperative OCT (iOCT) enables the immediate visualization and evaluation of microstructures and can be used in complicated cases of anterior and posterior eye surgery. It supports decision-making in difficult surgical situations and allows for direct monitoring the success of a surgical maneuver based on this immediate information.

OPHTHALMO-CHIRURGIE 28: 25–33 (2016)

→ Seit ihrer Einführung vor mehr als 20 Jahren hat die optische Kohärenztomographie (OCT) die Ophthalmologie revolutioniert. Dies gilt sowohl für unser Verständnis der Pathogenese verschiedener ophthalmologischer Erkrankungen als auch für deren Management, das sich durch die OCT ganz maßgeblich verbessert hat. Die Vorteile der OCT-Technologie sind offensichtlich: Das Verfahren ist nicht-invasiv und ermöglicht uns, Gewebe auch ohne Entnahme mit einer nahezu histopathologischen Auflösung zu untersuchen. Vor allem das hochauflösende Spectral-Domain-OCT (SD-OCT) stellt okuläre Strukturen sehr detailliert dar und empfiehlt sich daher zur Identifizierung individueller morphologischer Gegebenheiten. Schon heute liefert uns die OCT unverzichtbare Daten zur präzisen Diagnosestellung und Therapieplanung für das gesamte Spektrum der Augenheilkunde. Sie ist daher aus dem klinischen Alltag und der klinischen Forschung nicht mehr wegzudenken. Nun stehen mit der OCT-Angiographie (OCTA) und dem intraoperativen OCT (iOCT) zwei weitere, äußerst vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten zur Verfügung.

OCT-Angiographie

Insbesondere bei Erkrankungen des hinteren Augenabschnittes ist für eine präzise Diagnosestellung häufig gleichzeitig eine exakte Bewertung der Morphologie und des Funktionsstatus, wie z. B. der Durchblutungssituation, erforderlich. Bislang konnte dies ausschließlich durch eine Kombination von Fluoreszenzangiographie (FAG) und optischer Kohärenztomographie (OCT) erreicht werden. Denn bei OCT-Bildern handelt es sich immer um statische Momentaufnahmen, eine direkte Korrelation mit dem Funktionsstatus war bislang nicht möglich. Mit der Einführung der OCT-Angiographie hat sich dies nun geändert: Nun kann die Mikrodurchblutung von Netzhaut und Aderhaut auch ohne Kontrastmittelinjektion nicht-invasiv schnell erfasst und als dreidimensionales Bild des Mikrogefäßsystems dargestellt werden. Möglich wurde dies durch die Entwicklung noch schnellerer OCT-Scanverfahren und spezieller Algorithmen, mit denen die erhaltenen Signale vergleichend ausgewertet werden können.

Wie ist der Blutfluss mittels OCT darstellbar?

Im Prinzip wird bei der OCT-Angiographie der Blutfluss anhand von zeitlichen Kontrastunterschieden an ein und derselben Stelle detektiert. Diese werden dadurch hervorgerufen, dass Teilchen wie z. B. Erythrozyten sich zwischen zwei schnell aufeinanderfolgenden B-Scans an einem spezifischen Ort weiterbewegen. Um die durch den Blutfluss hervorgerufenen Kontrastunterschiede im OCT erfassen zu können, wird zunächst jeder B-Scan eines Volumenscans an der exakt gleichen Stelle mehrfach hintereinander wiederholt. Anschließend werden die Kontraste dieser zeitlich aufeinanderfolgenden B-Scans eines spezifischen Ortes verglichen. Werden anschließend alle B-Scans eines Volumenscans auf diese Weise ausgewertet, so ergeben sich Bereiche mit unveränderten Kontrasten und Bereiche, in denen im zeitlichen Verlauf Kontrastunterschiede detektiert werden. Diese sich zeitlich verändernden Kontraste eines Ortes können einer Bewegung der Erythrozyten und somit einem Blutfluss zugeordnet werden. Anhand dieser Daten können so Gefäße detektiert und deren Lage innerhalb des vom Volumenscan erfassten Bereiches dreidimensional dargestellt werden – sowohl in den verschiedenen Schichten der Retina als auch in tieferen Schichten über das retinale Pigmentepithel bis zur Aderhaut.

Was kann die OCTA leisten?

Viele Vorteile ...

Den derzeitigen Goldstandard für die Bildgebung des (retinalen) Gefäßsystems im Auge stellt die Fluoreszenzangiographie dar. Allerdings erfordert sie die intravenöse Injektion von Kontrastmitteln, ist zeitaufwendig, muss von erfahrenem Fachpersonal durchgeführt werden und kann Nebenwirkungen wie Übelkeit, Erbrechen und – in seltenen Fällen – auch eine allergische Reaktion hervorrufen. Im Gegensatz dazu ist die OCTA nicht-invasiv, schnell und einfach durchführbar. Dies sind ganz erhebliche Vorteile im klinischen Praxisalltag, vor allem wenn man an die regelmäßig erforderlichen Untersuchungen zur Verlaufskontrolle verschiedener Erkrankungen des Hinterabschnittes wie diabetische Retinopathie (DR) oder die altersbedingte Makuladegeneration (AMD) denkt. Auch für die Patienten ist die OCTA aufgrund ihres nicht-invasiven Charakters das deutlich angenehmere Verfahren. Es werden keine Farbstoffe oder Kontrastmittel verwendet, so dass die für die FAG beschriebenen Nebenwirkungen vermieden werden können.

Ein besonderer Vorteil der OCTA besteht für den Untersucher zudem darin, dass das Gefäßsystem der Netzhaut und Aderhaut dreidimensional dargestellt werden kann. Dadurch

stehen uns nun erstmals auch Tiefeninformationen zur Verfügung, während bei der Fluoreszenz-Bildgebung alle erfassten Informationen in einer einzigen Bildebene vereint werden. Dabei werden in der OCT-Angiographie selbst kleinste Kapillaren außerordentlich deutlich dargestellt, wie die ersten klinischen Evaluierungen und Bilder belegen [9, 15]. Auch vaskuläre Anomalien wie ischämische Areale, Gefäßverwindungen, Mikroaneurysmata und Neovaskularisationen können äußerst präzise sichtbar gemacht werden, so dass sich die OCTA vor allem zur Beurteilung von Erkrankungen eignet, die mit diesen Veränderungen einhergehen. Zudem lassen sich gleichzeitig und mit nur einem Aufnahmevorgang anhand von Querschnitts- und En-face-Darstellungen auch morphologische Veränderungen wie eine erhöhte Retinadicke, subretinale Flüssigkeit oder ein zystoides Makulaödem erkennen und gemeinsam mit dem Perfusionsstatus bewerten.

... aber auch Grenzen

Allerdings hat die OCTA – zumindest bislang – auch gewisse Grenzen: So können Gefäßleckagen – die in der FAG sicher darstellbar sind – mit OCTA nicht erkannt werden. Denn der Blutfluss der Leckagen ist zu langsam, um eine ausreichende zeitliche Kontrastveränderung hervorzurufen, die mittels OCTA detektiert werden könnte. Auch ist es schwerlich vorstellbar, dass eine Leckage rechnerisch so evaluiert werden kann, dass sie sich klar darstellen lässt. In der OCTA können außerdem Arterien und Venen nicht sicher unterschieden werden, was wiederum bei der Fluoreszenzangiographie aufgrund des unterschiedlichen Einströmverhaltens der Farbstoffe sicher möglich ist. Auch eine zusammenhängende Darstellung des Gefäßsystems der gesamten Retina bis in die Peripherie ist derzeit (noch) nicht möglich, da mittels der OCT in der Regel 3 x 3 mm bzw. 6 x 6 mm Ausschnitte im Bereich der Makula erfasst werden.

Wie kann die OCTA in den Praxisalltag integriert werden?

Um diese vielversprechende, neue Technologie erfolgreich im Praxisalltag nutzen zu können, ist es wichtig, dass sie sich möglichst intuitiv anwenden und gut in bestehende Standardabläufe integrieren lässt. Eine sehr gute Möglichkeit bietet die erste von der FDA zugelassene OCT-Angiographie Technologie, das CIRRUS HD-OCT 5000 in Kombination mit der neuen AngioPlex Software von ZEISS. Da das CIRRUS HD-OCT 5000 mit Scangeschwindigkeiten von bis zu 68 KHz arbeitet und mit einem Zeilenscan-Ophthalmoskop (LSO) ausgestattet ist, wird ein kontrastreiches Live-Bild des Fundus erstellt – wesentliche Grundlage, um auch kleinste Augenbewegun-

gen präzise erfassen und mittels Eye-Tracking-System nachverfolgen zu können. Zudem wird so eine verbesserte Überlagerung verschiedener Scans desselben Auges erreicht, was entscheidend dazu beigetragen hat, Bewegungsartefakte zu vermeiden. Das AngioPlex-Software Paket basiert auf „Optical Micro Angiography“ (OMAG) Algorithmen, die sowohl Amplituden- als auch Phasensignale der OCT-Scans vergleichend auswerten, so dass Kontrastunterschiede zwischen B-Scans sehr präzise identifiziert werden. Dabei ist aufgrund der „Single-Scan-Simplicity“ des Gerätes nur ein zusätzlicher Scan für die OCTA-Aufnahmen nötig: So werden innerhalb von nur wenigen Sekunden hochaufgelöste, dreidimensionale Darstellungen des gesamten Mikrogefäßnetzwerkes von Netzhaut und Aderhaut generiert.

„Angiographie-Maps“ liefern tiefspezifische Informationen

Direkt nach der Messung werden auf dem Display des Gerätes übersichtlich und automatisch verschiedene voreingestellte „OCT-Angiographie-Maps“ sowie ein korrespondierender B-Scan angezeigt. Die Angiographie-Maps stellen En-face-Bilder des gescannten Netzhautabschnittes in spezifischen Schichten der Netzhaut bzw. Aderhaut dar. Da einige dieser Maps farbkodiert sind, ist eine schnelle Orientierung in der Netzhauttiefe von der vitreoretinalen Grenzschicht bis hin zur Aderhaut möglich. So zeigen z. B. die „Superficial Retina Map“ (in rot) bzw. die „Deep Retina Map“ (in grün) das oberflächliche bzw. das tiefe Mikrogefäßsystem der Netzhaut, während in der „Avascular Retina Map“ (in blau) der Bereich abgebildet wird, der sich bei gesunden Augen avaskulär darstellt. Die „Color Depth Map“ stellt die Informationen der drei beschriebenen Ebenen kombiniert und farbkodiert dar, so dass das gesamte retinale Gefäßsystem auf einen Blick erfasst und bewertet werden kann (Abbildungen 1 a–d). Sehr hilfreich ist auch die „Movie-Option“, mit der die gescannten Bereiche in ihrer gesamten Tiefe „abgefahren“ werden können. Dabei können klinisch interessante Schichten auch spezifisch ausgewählt und von diesen „customized

Maps“ erstellt werden. Insgesamt ist so eine schnelle und komfortable Visualisierung der Mikrogefäßsysteme von Retina und Aderhaut in beliebiger Tiefe möglich.

OCTA: Erste klinische Erkenntnisse von gesunden Augen

Derzeit schreitet die klinische Evaluierung der OCTA-Technologie rasant voran und hat schon erste, äußerst eindrucksvolle und vielversprechende Ergebnisse hervorgebracht. Untersuchungen an gesunden Augen haben gezeigt, dass das Verfahren gut geeignet ist, um retinale Gefäßnetzwerke bis hin zu den feinsten Kapillaren in unterschiedlichen Retinaschichten und in der Aderhaut äußerst präzise und dreidimensional darzustellen [9, 15, 22]. Dabei waren in allen Studien mittels OCTA anatomische Details des Gefäßsystems in gesunden Augen darstellbar, wie sie aus histologischen Studien bereits bekannt sind. Auch regionenspezifische Gefäßmuster konnten mittels OCTA zuverlässig detektiert

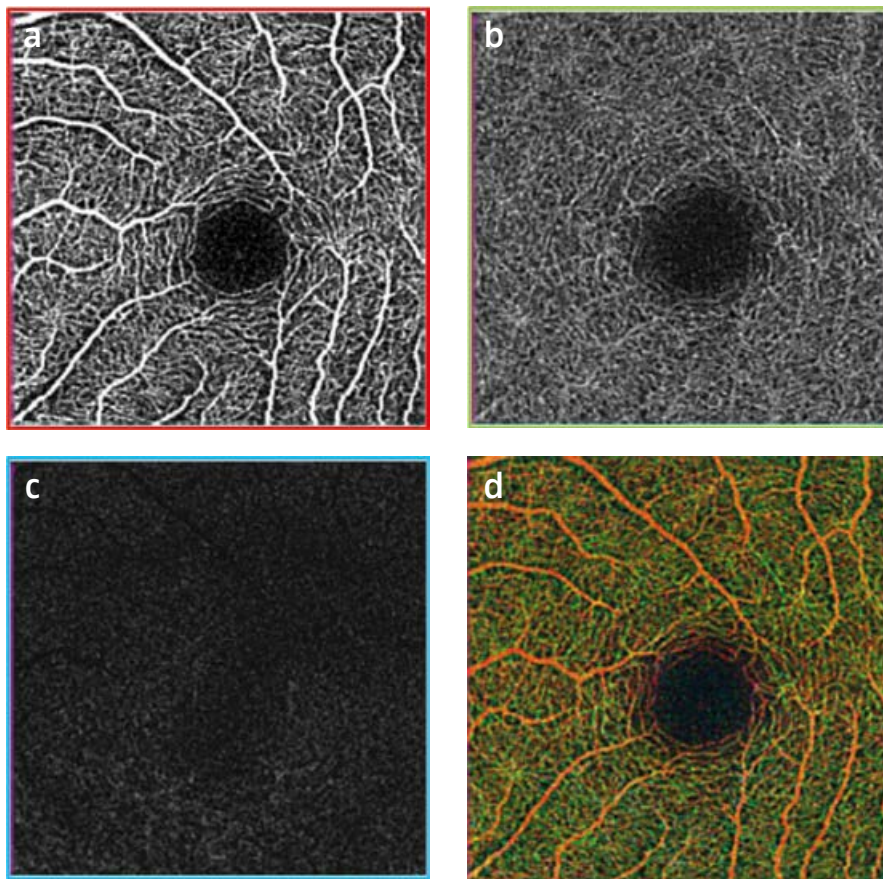


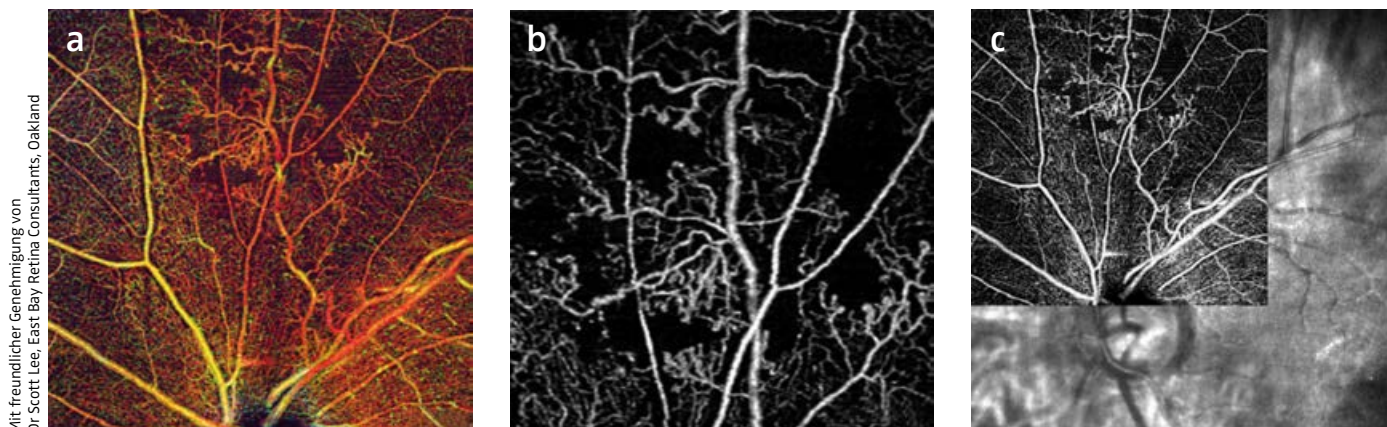
Abbildung 1a–d: OCTA-Aufnahmen einer gesunden Makula. a) Superficial Retina Map; b) Deep Retina Map; c) Avascular Retina Map; d) Color Depth Retina Map

werden: So zeigte sich in OCTA-Aufnahmen, dass die an der Netzhautoberfläche liegenden Gefäße mit nach außen hin zunehmender Kapillardichte radiär um die foveoläre avaskuläre Zone (FAZ) angeordnet sind. In den mittleren und inneren Netzhautschichten konnte nun mittels OCTA erstmals ein Kapillarnetzwerk mit einer eher gitterartigen Struktur identifiziert werden, das auch in aktuellen, histologischen Untersuchungen so beschrieben wird [15]. Mit der Fluoreszenzangiographie hingegen, die keine tiefenselektive Beurteilung ermöglicht, da alle Informationen zum Gefäßsystem in einer Ebene zusammengefasst werden, wurde dies bislang noch nicht beschrieben. Gerade weil die OCTA das Mikrogefäßsystem sehr hochaufgelöst und tiefenspezifisch darstellt und es sich zudem um eine rasch durchführbare und nicht-invasive Diagnose-Technologie handelt, ist davon auszugehen, dass diese Technologie insbesondere zur Diagnose und Verlaufskontrolle von Erkrankungen geeignet ist, die mit Gefäßneubildungen, Gefäßverschlüssen oder Gefäßanomalien einhergehen.

OCTA zur Detektion von Gefäßanomalien und Neovaskularisationen

So ist die OCTA zur Erkennung und Charakterisierung von Neovaskularisationen prädestiniert. Erste, vielversprechende Ergebnisse zweier Fallserien mit insgesamt 25 AMD-Patienten und fünf Kontrollpersonen ergaben eine gute Übereinstimmung von FAG und OCTA hinsichtlich ihrer Erkennung von CNV [12, 25]. Darüber hinaus belegen sie, dass Neovaskularisationen im Rahmen einer AMD in der OCTA äußerst hochaufgelöst und präzise dargestellt werden können. Sogar fä-

cherförmige „Feeder vessel“-Strukturen waren mittels OCTA zwischen Aderhaut und der CNV darstellbar, was mittels FAG nur selten gelingt [12, 25]. Da in der OCTA die exakte Lage einer CNV in Bezug zur Bruch'schen Membran bzw. zum retinalen Pigmentepithel bestimmt werden kann, könnte die OCTA zukünftig möglicherweise auch die Klassifizierung der CNV erleichtern bzw. dazu beitragen, den Übergang von der trockenen zur feuchten Form der Erkrankung bereits frühzeitig zu diagnostizieren. Denn sie ermöglicht eine Differenzierung zwischen Drusen-bedingten und mit Gefäßneubildung assoziierten Pigmentepithelabhebungen. Dies ist klinisch von großer Bedeutung, da die Vaskularisierung einer Pigmentepithelabhebung der Vorbote eines Übergangs von der trockenen AMD zur feuchten Form sein kann. Gerade aufgrund ihres nicht-invasiven Charakters und ihrer – im Vergleich zur FAG – einfacheren und schnelleren Durchführung könnte die OCTA bei AMD-Patienten daher bereits zu einem frühen Zeitpunkt zu regelmäßigen Kontrolluntersuchungen eingesetzt werden, um möglichst rechtzeitig Warnzeichen einer Krankheitsprogression wie Neovaskularisationen zu entdecken und Therapieanpassungen vorzunehmen. Selbstverständlich müssen dazu zunächst einheitliche Analysestrategien zur AMD-Klassifizierung, basierend auf OCTA-Untersuchungen, evaluiert werden. Auch bei Patienten mit einer Retinopathia centralis serosa (RCS), einer serösen Abhebung der Neuroretina, und Patienten mit makulären Telangiectasien Typ 2 (MacTel 2), einer im fortgeschrittenen Stadium mit Gefäßveränderungen und Gefäßneubildungen einhergehenden Netzhauterkrankung, zeigt die OCTA eine gute Übereinstimmung zu den Ergebnissen der FAG und lieferte zusätzliche morphologische Informationen [2, 4, 24].



Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Scott Lee, East Bay Retina Consultants, Oakland

Abbildung 2 a–c: OCTA-Aufnahmen bei Venenastverschluss. Darstellung der gesamten Gefäßsituation in der Color Depth Retina Map (a); in der Superficial Retina Map sind nicht perfundierte Areale (NPA) sowie Shuntgefäße sichtbar (b); Darstellung der Superficial Retina Map mit Fundus-Overlay (c).

OCTA bei diabetischer Retinopathie und retinalen Venenverschlüssen

Zudem können mit der OCTA auch Bereiche identifiziert werden, in denen die Blutzirkulation verschlechtert oder gar unterbrochen ist. Da sich in gesunden Augen die foveoläre avaskuläre Zone (FAZ) in der OCTA klar abgegrenzt darstellt, ist davon auszugehen, dass sich auch Areale mit einer verschlechterten oder gar fehlenden Durchblutung, d.h. ischämische Bereiche, Gefäßverschlüsse und Kapillarokklusionen, in der OCTA zuverlässig darstellen lassen. Erste Ergebnisse bestätigen dies. So lassen sich bei retinalen Venenverschlüssen Gefäßveränderungen wie Kapillarokklusionen und Mikroaneurysmata in der Regel in der inneren Netzhautschicht finden [16]. Abbildung 2 zeigt OCTA-Aufnahmen bei Venenastverschluss.

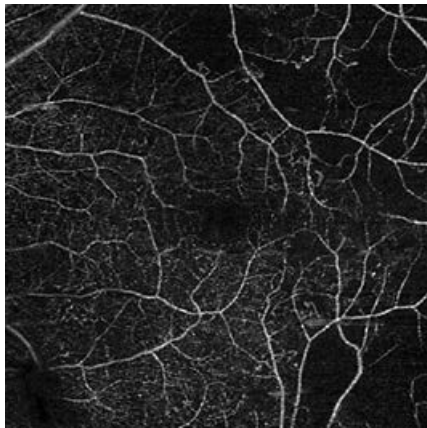


Abbildung 3: OCTA bei diabetischer Retinopathie mit peripheren, nicht perfundierten Arealen (NPA), aber noch voller Sehschärfe. Die foveoläre avaskuläre Zone ist vergrößert, zeigt jedoch kaum Irregularitäten.

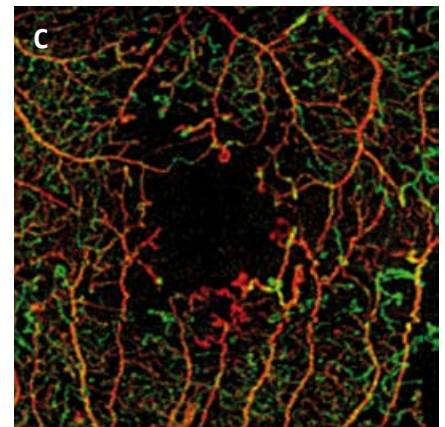
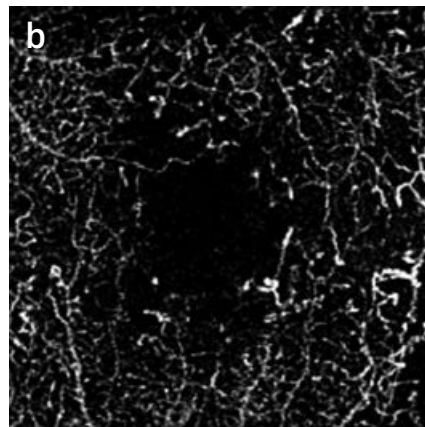
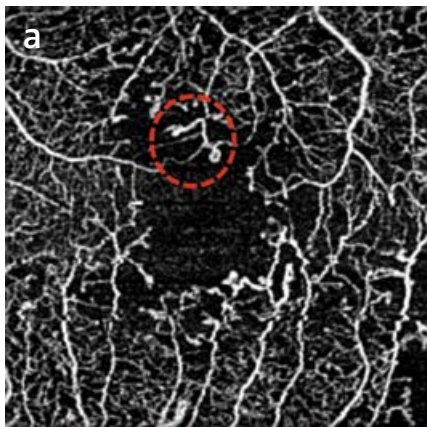
Auch bei Patienten mit diabetischer Retinopathie lassen sich ischämische Bereiche, Gefäßveränderungen wie Mikroaneurysmata in den inneren oder mittleren Netzhautschichten und – im Falle der proliferativen diabetischen Retinopathie – auch Neovaskularisationen mittels OCTA verlässlich darstellen [16, 20]. Besonders interessant sind aktuelle Untersuchungen, die zeigen, dass die FAZ bei Patienten mit DR signifikant größer ist als bei gesunden Probanden – und dies bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt der Erkrankung und einem noch unbeeinträchtigten Visus [8, 19, 23] (Abbildung 3).

Zusätzlich ist im fortgeschrittenen Stadium der Erkrankung das Ausmaß der Irregularität der FAZ hervorragend darstellbar. Abbildung 4 zeigt solche OCTA-Aufnahmen bei proliferativer DR.

Dementsprechend ist davon auszugehen, dass die OCTA sowohl uns neue Erkenntnisse zur Pathologie der DR bringen als auch wichtige Beiträge zu deren Diagnose und Verlaufskontrolle liefern wird.

OCTA als Quelle wichtiger Zusatzinformationen

Auch bei Krankheitsbildern, die zunächst nicht primär als Einsatzgebiet der OCTA gelten, kann diese Technologie ganz wesentliche Zusatzinformationen liefern. So wird bei epiretinalen Gliosen präoperativ immer eine OCT-Aufnahme durchgeführt. Das mithilfe der OCTA-Software „mitgelieferte“ OCT kann durch die Gliose verursachte Gefäßveränderungen darstellen und so beispielsweise wichtige Informationen zur Prognose liefern (Abbildung 5).



Abbildungen 4 a – c: OCTA-Aufnahmen bei proliferativer diabetischer Retinopathie. a) In der Superficial Retina Map sind Mikroaneurysmata sowie eine irreguläre foveoläre avaskuläre Zone sichtbar; b) in der Deep Retina Map sind die ischämischen Bezirke besser definiert; c) Darstellung der gesamten Gefäßsituation in der Color Depth Retina Map

Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Scott Lee, East Bay Retina Consultants, Oakland

Auch bei Tumoren wie z.B. einem Aderhauthämangiom hilft das OCTA bei der Abschätzung des Tumorausmaßes, der Therapieplanung und auch bei der Beurteilung korrespondierender retinaler Veränderungen (Abbildung 6).

OCTA zur Darstellung der Papillengefäße bei Glaukompatienten

Auch die Darstellung der Papillengefäße bei Glaukompatienten stellt einen äußerst interessanten Anwendungsbereich für die OCTA dar. Denn auch wenn ein erhöhter Augeninnendruck ein wesentlicher Risikofaktor für Glaukom ist, so weist dennoch immerhin etwa die Hälfte aller Glaukompatienten

bei ihrer Erstuntersuchung einen normalen Augeninnendruck auf [21]. Zudem werden auch zunehmend vaskuläre Störungen mit der Glaukopathogenese in Zusammenhang gebracht [13, 14]. Und auch in der FAG wurden bei Patienten mit primärem Offenwinkelglaukom bzw. mit Normaldruckglaukom bereits verlängerte arteriovenöse Passagezeiten beschrieben [1, 10]. Nun zeigt eine erste Studie, dass die OCTA auch geeignet sein könnte, um den Erkrankungsstatus und das Progressionsrisiko bei Glaukom anhand der Durchblutungssituation zu evaluieren. Während die OCTA in gesunden Augen ein dichtes Mikrogefäßnetzwerk im Sehnervenkopf zeigte, war dies in Augen von Glaukompatienten deutlich „ausgedünnt“ [11].

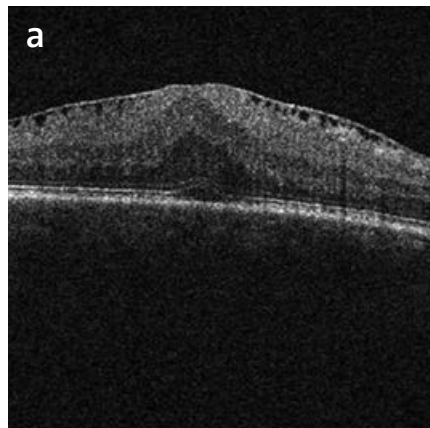


Abbildung 5 a: SD-OCT bei epiretinale Gliose

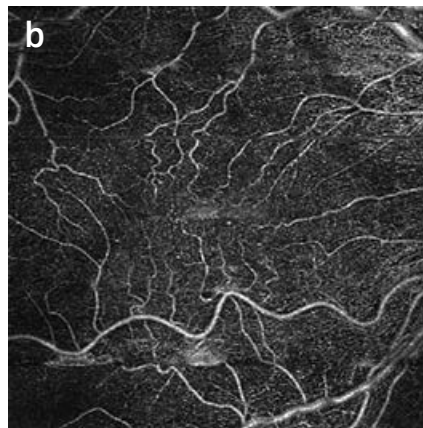


Abbildung 5 b: Das korrespondierende OCTA zeigt Mikroaneurysmata und eine deutliche Gefäßverziehung.

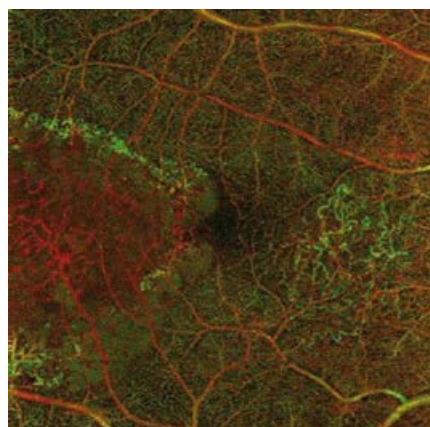


Abbildung 6: OCTA bei kapillärem Hämangiom der Aderhaut mit korrespondierenden retinalen Veränderungen. Auch die oberflächige Schicht des Tumors ist dargestellt.

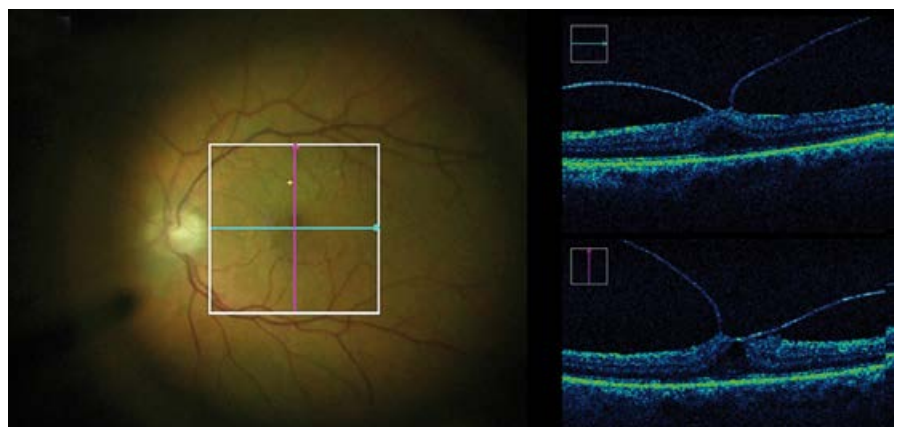


Abbildung 7: iOCT bei vitreomakulären Traktionen

Intraoperative OCT

Neben den außerordentlichen Entwicklungen in der OCT-Angiographie wurden in den letzten Jahren auch intraoperative OCT-Technologien (iOCT) sehr intensiv entwickelt und erforscht. Während prä- und postoperative OCT-Untersuchungen heute schon ein fester Bestandteil des klinischen Alltags sind, fehlte bisher die Möglichkeit, auch intraoperativ und in Echtzeit OCT-Untersuchungen zur direkten Erfolgskontrolle chirurgischer Manöver durchzuführen. Zwar ermöglichten handgehaltene oder auf das Mikroskop aufmontierte OCT-Systeme schon sehr gute intraoperative

Mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. med. Oliver Findl, Wien

OCT-Aufnahmen. Allerdings mussten meist Arbeitsumfeld und Arbeitsabläufe geändert werden, um zusätzlich erforderliche Geräte bzw. Kabel auch noch im OP-Bereich unterbringen zu können. Außerdem war zur Positionierung und Erstellung des Scans eine Unterbrechung der Operation erforderlich – eine intraoperative OCT-Visualisierung in Echtzeit war also nicht möglich [5, 6, 17]. Mit der Einführung des ersten vollständig integrierten Systems (Fa. Zeiss) hat sich dies geändert. Bei diesem bereits von der FDA zugelassenen System ist die OCT-Einheit nun vollständig in das Operationsmikroskop integriert. Eine Deckenmontage ist noch nicht möglich. So werden bei quasi unverändertem Arbeitsumfeld während der Operation jederzeit hochaufgelöste, horizontale und vertikale OCT-Schnittbilder in Echtzeit im Okular angezeigt und bieten Informationen der dritten Dimension, d. h. zu Mikrostrukturen von z. B. Netzhaut oder Kornea.

Aufnahmen in Echtzeit

Die Bedienerfreundlichkeit und Zuverlässigkeit des Systems während unterschiedlicher Anwendungen im Vorder- und Hinterabschnitt wurde in einer umfassenden Machbarkeitsstudie belegt [7]. Auch wenn das iOCT – im Gegensatz zur OCT-Angiographie – sicherlich nicht als Routineverfahren in den klinischen Alltag Einzug finden wird, so kann es dennoch, insbesondere in komplizierten Situationen der Vorder- und Hinterabschnittschirurgie, äußerst hilfreich sein. So wurde gezeigt, dass bei lamellären Keratoplastiken der Sitz des Transplantates bereits intraoperativ gut kontrollierbar ist und sich das Transplantat unter Verwendung von iOCT-Einsatz möglicherweise schneller und mit weniger Manipulationen positionieren lässt [3, 18]. Auch bei ausgewählten Hinterabschnittseingriffen, wie z. B. bei einer komplizierten Entfernung von vitreomakulären Traktionen (VMT) oder ausgeprägten Membranen (ERM/ILM-Peeling) kann das iOCT hilfreich sein, da schon während des Eingriffs retinale Mikrostrukturen bewertet werden können. Außerdem wird in kritischen Situationen die Entscheidung für oder gegen ein chirurgisches Manöver

erleichtert bzw. eine direkte Erfolgskontrolle ermöglicht. Abbildung 7 zeigt die ins Okular des OP-Mikroskops eingespielten iOCT Aufnahmen bei VMT. Auch eine sehr sorgfältige intraoperative Überprüfung der Peripherie ist ohne Veränderung des OP-Feldes möglich, da der OCT-Scanner auch unabhängig vom Fokus des Mikroskops bewegt werden kann.

Fazit

Die OCT-Angiographie stellt ein äußerst vielversprechendes Verfahren dar. Erstmals kann nicht-invasiv und ohne Verwendung von Farbstoffen oder Kontrastmitteln in nur wenigen Sekunden ein dreidimensionales Bild des gesamten Mikrogefäßsystems von Netzhaut und Aderhaut dargestellt werden. Von besonderer Bedeutung ist dabei die äußerst präzise, tiefenselektive Darstellung von Gefäßstrukturen, die so in der Fluoreszenzangiographie (FAG) nicht möglich ist. Da die Visualisierung mittels OCTA – im Gegensatz zur FAG- derzeit (noch) auf einen (zentralen) Ausschnitt beschränkt ist und Leckagen mittels OCTA nicht nachweisbar sind, wird die OCTA die FAG zwar nicht vollständig, möglicherweise aber doch in einigen Anwendungsbereichen ersetzen bzw. ergänzen. Schon heute kann der OCTA ein ganz erhebliches Potential in der Routinediagnostik und im Monitoring von Erkrankungen mit Gefäßpathologien – vor allem im Bereich der Makula und des Sehnervkopfes – bescheinigt werden.

Auch das intraoperative OCT mit dem neuen, vollständig in das Operationsmikroskop integrierten OCT-System stellt eine neue Technologie dar, die uns erstmals in Echtzeit und ohne Änderung des Arbeitsumfeldes schon intraoperativ Einblicke in OCT-Qualität ermöglicht und in komplizierten Fällen oder kritischen Situationen zu mehr Sicherheit und Kontrolle beitragen kann.

Beide Verfahren werden zukünftig sicherlich dazu beitragen, die Pathologie und den Verlauf verschiedener ophthalmologischer Erkrankungen noch besser zu verstehen und die Therapie weiter zu optimieren.

Literatur

1. *Arend O et al (2004)* Pathogenetic aspects of the glaucomatous optic neuropathy: fluorescein angiographic findings in patients with primary open angle glaucoma. *Brain Res Bull* 62: 517–524
2. *Bonini MA et al (2015)* Association of choroidal neovascularization and central serous chorioretinopathy with optical coherence tomography angiography. *JAMA Ophthalmol* 133: 899–906
3. *Cost B et al (2015)* Intraoperative optical coherence tomography-assisted descemet membrane endothelial keratoplasty in the DISCOVER study. *Am J Ophthalmol* 160: 430–437; doi: 10.1016/j.ajo.2015.05.020
4. *Costanzo E et al (2015)* Optical coherence tomography angiography in central serous chorioretinopathy. *J Ophthalmol* 2015: 134783; Epub 2015 Nov 8
5. *Dayani PN et al (2009)* Intraoperative use of handheld spectral domain optical coherence tomography imaging in macular surgery. *Retina* 29: 1457–1468
6. *Ehlers JP et al (2014)* The value of intraoperative optical coherence tomography imaging in vitreoretinal surgery. *Curr Opin Ophthalmol* 25: 221–227
7. *Ehlers JP et al (2014)* Intraoperative optical coherence tomography using the RESCAN 700: preliminary results from the DISCOVER study. *Br J Ophthalmol* 98: 1329–1332

8. *Freiberg FJ et al (2015)* Optical coherence tomography angiography of the foveal avascular zone in diabetic retinopathy. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* Sep 4. [Epub ahead of print]
9. *Huang Y et al (2014)* Swept-source OCT angiography of the retinal vasculature using intensity differentiation-based optical microangiography algorithms *Ophthalmic Surg Lasers Imaging. Retina* 45: 382–389
10. *Huber K et al (2004)* Comparison of colour Doppler imaging and retinal scanning laser fluorescein angiography in healthy volunteers and normal pressure glaucoma patients. *Acta Ophthalmol Scand* 82: 426–431
11. *Jia Y et al (2014)* Optical coherence tomography angiography of optic disc perfusion in glaucoma. *Ophthalmology* 121: 1322–1332
12. *Jia Y et al (2014)* Quantitative optical coherence tomography angiography of choroidal neovascularization in age-related macular degeneration. *Ophthalmology* 121: 1435–1444
13. *Leske MC (2007)* Open-angle glaucoma – an epidemiologic overview. *Ophthalmic Epidemiol* 14: 166–172
14. *Leske MC et al (2007)* Predictors of long-term progression in the early manifest glaucoma trial. *Ophthalmology* 114: 1965–1972
15. *Matsunaga D et al (2014)* OCT angiography in healthy human subject. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina* 45: 510–515
16. *Pauleikoff D et al (2015)* OCT-Angiografie – ist dies die Zukunft der makulären Diagnostik? *Klin Monatsbl Augenheilkd* 232: 1069–1076
17. *Ray R et al (2011)* Intraoperative microscope-mounted spectral domain optical coherence tomography for evaluation of retinal anatomy during macular surgery. *Ophthalmology* 118: 2212–2217
18. *Saad A et al (2015)* Intraoperative OCT-assisted DMEK: 14 consecutive cases. *Cornea* 34: 802–807
19. *Sambhav K et al (2015)* OCT Angiography confirms attenuation of deep capillary macular vascular flow in NPDR. *Retinal Physician*. October 2015. <http://www.retinalphysician.com/newsletter/oct-angiography/october-2015.aspx>
20. *Schwartz DM et al (2014)* Phase-variance optical coherence tomography: a technique for noninvasive angiography. *Ophthalmology* 121: 180–187
21. *Sommer A et al (1991)* Relationship between intraocular pressure and primary open angle glaucoma among white and black Americans. The Baltimore Eye Survey. *Arch Ophthalmol* 109: 1090–1095
22. *Spaide RF et al (2015)* Retinal vascular layers imaged by fluorescein angiography and optical coherence tomography angiography. *JAMA Ophthalmol* 133: 45–50
23. *Takase N et al (2015)* Enlargement of foveal avascular zone in diabetic eyes evaluated by en face optical coherence tomography angiography *Retina* 11: 2377–2383; doi:10.1097/IAE.0000000000000849.
24. *Thorell MR et al (2014)* Swept-source OCT angiography of macular telangiectasia type 2 *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina* 45: 369–380
25. *Wang RK et al (2015)* Evaluation of age-related macular degeneration and polypoidal choroidal vasculopathy using OCT-based microangiography. *ARVO Annual Meeting*. Abstract Number: 3355 - B0138



Korrespondenzadresse:
 Prof. Dr. med. Albert J. Augustin
 Städtisches Klinikum Karlsruhe gGmbH
 Augenklinik
 Moltkestr. 90, 76133 Karlsruhe
 albertjaugustin@googlemail.com



**IX. Wissenschaftliche Sitzung:
 Neue Techniken
 Samstag, 13. Februar 2016
 11.00–13.00 Uhr, Rosengarten
 Arnold Schönberg Hörsaal**