

Intraoperative Optische Kohärenztomographie – eine Übersicht

(Intraoperative optical coherence tomography – an overview)

Sebastian Siebelmann, Björn Bachmann, Mario Matthaei, Philipp Steven, Claus Cursiefen
Köln

Zusammenfassung: Die Mikroskop-integrierte Intraoperative Optische Kohärenztomographie (MI-OCT) kombiniert die Vorteile der stark vergrößernden chirurgischen Mikroskope mit der nahezu histologischen Auflösung der Optischen Kohärenztomographie und macht eine intraoperative Echtzeitbildgebung möglich. Insofern erschließt diese Technologie eine Vielzahl neuer Anwendungsbereiche und liefert während der chirurgischen Eingriffe ergänzende, wertvolle Informationen im Vergleich zum reinen Mikroskop. Ob die intraoperative OCT die jeweiligen Prozeduren allerdings letztendlich sicherer macht und sich gleichzeitig auf die postoperative Sehkraft auswirkt, muss noch in großen, randomisierten Studien beantwortet werden.

Z. prakt. Augenheilkd. 37: 462–466 (2016)

Summary: Microscope-integrated intraoperative optical coherence tomography (MI-OCT) combines the advantages of the high-magnifying surgical microscopes with the nearly histological resolution of Optical Coherence Tomography and allows for intraoperative real-time imaging. Insofar, this technique enables a large number of possible applications and adds important information to the microscope during surgical procedures. However, the question if intraoperative OCT finally makes procedures safer and has impact on the postoperative visual outcome has to be answered in larger, randomised studies.

Z. prakt. Augenheilkd. 37: 462–466 (2016)

OCT ist im klinischen Alltag etabliert und wird routinemäßig eingesetzt

Die optische Kohärenztomographie (OCT) ist ein nicht-invasives, kontaktloses bildgebendes Verfahren. Aufgrund der unterschiedlichen Lichtbrechung können die einzelnen Gewebestrukturen dargestellt werden. Im klinischen Alltag ist das Verfahren mittlerweile etabliert und wird routinemäßig für viele Fragestellungen eingesetzt.

Mittels OCT können zuverlässig und schnell sowohl Hornhaut, Vorderkammer, Kammerwinkel, aber auch Bindehaut- und Irisprozesse beurteilt und verfolgt werden. Am hinteren Augenabschnitt bietet die OCT insbesondere an der vitreoretinalen Grenzfläche sowie zur Evaluation von intra- und subretinalen Strukturen und bei der Sehnerven-

evaluation eine Vielzahl von Informationen. Besonders hervorzuheben ist dabei die Detektion von intra- oder subretinaler Flüssigkeit bei der Verlaufskontrolle der Therapie der altersbedingten Makuladegeneration (AMD).

OCT erobert Operationssaal

Im Operationssaal ist die OCT eine noch junge Methode, die in den letzten Jahren durch die technische Weiterentwicklung stark im Kommen ist. Die intraoperative Bildgebung beschränkte sich bisher nur auf die Ultraschallbiomikroskopie (UBM), sowie auf einzelne Fallberichte handgehaltener OCT-Geräte, die allerdings sehr schwer zu handhaben waren. Seitdem allerdings OCT-Geräte in kommerziell erhältliche Operationsmikroskope integriert wurden, steht diese Technologie nun auch während der Operation am

liegenden Patienten zur Verfügung (Abbildung 1).

Durch die Integration in das chirurgische Mikroskop werden dessen Bedienkomfort (Steuerung des Mikroskops mit einem Fußpedal) und das stark vergrößernde Auflichtbild mit der nahezu histologischen Bildgebung der OCT kombiniert (Abbildung 2).

Zurzeit sind drei unterschiedliche in ihrer Leistung vergleichbare Geräte kommerziell in Deutschland erhältlich (Tabelle 1):

- das iOCT (Haag Streit, OPMedT),
- das Rescan 700 (Carl Zeiss Meditec) und
- das EnFocus (Leica/Bioptigen)

Das neu auf den Markt gekommene EnFocus wartet mit einigen interessanten zusätzlichen Funktionen auf: Es bietet neben einer intraoperativen Dopplerfunktion hochauflösende (1000x1000)

Scaneinstellungen, intraoperative Messfunktionen und die Möglichkeit von Infra-rottaufnahmen. Zudem soll es auch an älteren Mikroskopen nachrüstbar sein. Es ist in zwei Varianten erhältlich, die als Ultra-HD-Variante hinsichtlich der Auflösung und als Ultra-Deep-Variante zu Gunsten der Eindringtiefe optimiert wurden.

Beim iOCT wird der Laserstrahl des OCT direkt durch die Optik des Mikroskops geführt, so dass sowohl der Fokus als auch die Vergrößerung des OCT fast stufenlos wie beim Mikroskop anpassbar sind.

Der Fokus wird hingegen beim Rescan 700 der Firma Carl Zeiss Meditec mittels einer Art Autofokus geführt. Auch sind bei diesem Gerät achsengeführte Scan-Aufnahmen in horizontaler und vertikaler Richtung möglich.

Studien belegen Nutzen bei vielen ophthalmologischen Eingriffen

Inzwischen konnte mit dem intraoperativen OCT ein großes Gebiet sowohl im Bereich des vorderen als auch im hinteren Augenabschnitt erschlossen werden. Wie sich in Studien zeigt, ist die Mikroskop-integrierte intraoperative OCT dem reinen Operationsmikroskop möglicherweise sogar überlegen [10]. Dabei konnte herausgestellt werden, dass die intraoperative OCT insbesondere bei der Darstellung von besonders feinen und transparenten Strukturen wie z. B. bei lamellären Keratoplastiken deutliche Vorteile gegenüber dem reinen Operationsmikroskop bietet. Das gilt ebenfalls beim intraoperativen Auffinden präoperativ dargestellter Strukturen oder bei Eingriffen mit reduziertem Einblick in die Augenvorderkammer [8].

Lamelläre Keratoplastik

Bei den lamellären Keratoplastiken wie der „Descemet's membrane endothelial keratoplasty“ (DMEK), der „Descemet's stripping automated keratoplasty“ (DSAEK) und der „Deep anterior lamellar keratoplasty“ (DALK) belegen mehrere Studien, dass mit der intraoperativen OCT während der Operation zusätzliche und hilfreiche Informationen gewonnen werden können [7, 14, 15]. Bei der DMEK können beispielsweise die korrekte intraoperative Orientierung des Transplantates sowie seine vollständige Anlage überprüft werden – ebenso bei der DSAEK. Auch bei der DALK können sowohl die Trepanationstiefe, die „Big-Bubble“-Formation als auch die Transplantatanlage dargestellt werden. Dabei korrelierte das am Ende der Operation vorhandene Flüssigkeitsvolumen zwischen Transplantat und Empfänger-



Abbildung 1: Beispiel eines intraoperativen OCT-Gerätes (Haag Streit Surgical/Optomical Technologies). Links: Der OCT-Scanner ist in das Mikroskop integriert. Mitte: Der mit dem Mikroskop verbundene Bildschirm ermöglicht eine direkte Beurteilung der Aufnahmen im großen Maßstab. Rechts: Das HS MIOS5 System ermöglicht eine gleichzeitige Aufnahme und Archivierung von mittels Mikroskop und OCT gewonnen Aufnahmen.

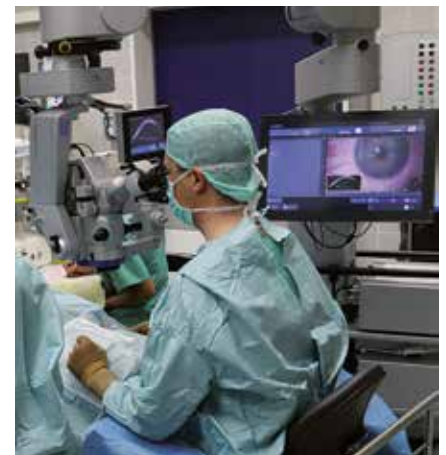


Abbildung 2: Intraoperativer Operationsaufbau, hier bei einer DMEK mit Mikroskop-integriertem OCT-Gerät. Sichtbar sind der kleine „Heads-Up“-Bildschirm, der dem Operateur neben den in das Okular eingespiegelten Bildern eine direkte Auswertung der Daten erlaubt. Der zweite Bildschirm (MIOS5) zeigt kombiniert das Mikroskop- und das OCT-Bild.

hornhaut mit dem später erreichten Visus sowie einer neu entstandenen Trübung (Haze) im Interface [1]. Mehr Flüssigkeit korrelierte dabei mit einem schlechteren Visus und einer erhöhten Inzidenz von Haze.

Implantation einer Boston-Keratoprothese

Auch bei der Implantation der Boston-Keratoprothese konnte die intraoperative OCT Abstände zwischen Implantat und Spenderhornhaut bzw. zwischen Implantat und Empfängerbett aufzeigen, die mit einem Operationsmikroskop nicht sichtbar waren (Abbildung 3) [11]. Bislang gibt es allerdings keine prospektiven Studien, die z. B. das Komplikationsprofil von lamellären Keratoplastiken bei Keratoprothesen mit und ohne intraoperativer OCT vergleichen.

Antiglaukomatöse Eingriffe

Bei antiglaukomatösen Eingriffen kann bei der Trabekulektomie, bei der Operation mittels Trabektom als auch bei der Kanalooplastik ein intraoperatives Monitoring mittels OCT erfolgen (Abbildung

4). Bei der Kanalooplastik können so intraoperative Veränderungen der Konfiguration des Schlemm'schen Kanals nach Anziehen des implantierten Fadens dokumentiert werden (Abbildung 3) [6, 12]. Bisher ist allerdings unklar, ob diese Konfiguration einen Einfluss auf die postoperative Drucksenkung hat. Darüber hinaus existieren Daten, die zeigen, dass mittels OCT ebenfalls Routineeingriffe wie die Kataraktoperation verfolgt werden können. Hier ist allerdings unklar, ob dies die Operation wirklich sicherer macht oder zu einer besseren Standardisierung beiträgt.

Hinterer Augenabschnitt

Auch hinsichtlich des hinteren Augenabschnitts gibt es Studien, die für einen Vorteil der intraoperativen OCT z. B. bei der Netzhaut- oder Glaskörperchirurgie sprechen. Die umfangreichsten Studien auf diesem Gebiet sind die beiden Studien PIONEER* und DISCOVER**, in denen u. a. eine Vielzahl von Patienten während Netzhautoperationen mittels intraoperativer OCT untersucht wurde [3, 4].

Insbesondere bei der Operation von Netzhautablösungen oder beim Membrane Peeling waren entweder die vollständige Anlage der Netzhaut oder auch residuale Fragmente der verdickten Membrana limitans interna sichtbar, die mit einem reinen Operationsmikroskop nicht detektierbar waren. Darüber hinaus konnte der intraoperative Verschluss von Löchern in der Makula verfolgt und kontrolliert werden. Auch bei moderater Glaskörperblutung, bei der der intraokulare Einblick mittels Mikroskop reduziert war, konnte das intraoperative OCT zusätzliche Informationen liefern. Das intraoperative OCT war zudem in der Lage detaillierter Informationen bei der Frühgeborenenretinopathie insbesondere hinsichtlich eines bestehenden Makulaödems, aber auch über präretinale Membranen oder Stränge oder eine bestehende Retinoschisis zu geben.

Großer Vorteil bei Untersuchungen von Säuglingen und Kleinkindern

Einen herausragenden Stellenwert hat die intraoperative OCT bei der Untersuchung von Säuglingen und Kleinkindern in Narkose [9]. Dabei konnte herausgestellt werden, dass die OCT-Technik insbesondere dann Vorteile gegenüber dem normalen Operationsmikroskop schafft, wenn der Einblick in die Augenvorderkammer z. B. aufgrund einer kongenitalen Hornhauttrübung reduziert ist [2, 13]. Hier konnte an der Kölner Universitätsaugenklinik in mehreren Fällen mittels OCT trotz trüber Hornhaut eine physiologische Kammerwinkelkonfiguration festgestellt

Tabelle 1: Übersicht über die in Deutschland zugelassenen und kommerziell erhältlichen intraoperativen OCT-Geräte. Alle Geräte sind in den USA FDA-zugelassen.

Gerätebezeichnung	iOCT (Haag Streit)	Rescan 700 (Carl Zeiss Meditec)	EnFocus Ultra-HD/ Ultra-Deep (Leica)
Auflösung	zirka 10µm	5,5µm	zirka 4 µm / 9 µm
Eindringtiefe	4,2 mm	2 mm	2,5 mm / 11mm
Wellenlänge / OCT	840nm / Spectral Domain	840nm / Spectral Domain	860/880nm / Spectral Domain
Geschwindigkeit (A-Scans/s)	10 000	27 000	32 000 / 18 000
Achsen	1	2	w ählbar
Fokus	mittels Mikroskop	Autofokus	mittels Mikroskop
Okulareinspiegelung	ja	ja	—
Steuerung	Fußpedal / Bildschirm	Fußpedal / Bildschirm	Fußpedal / Bildschirm
nachrüstbar	bedingt	bedingt	bedingt

PIONEER*-Studie = Prospective intraoperative and perioperative ophthalmic imaging with optical coherence tomography
DISCOVER**-Studie = Determination of feasibility of intraoperative spectral domain microscope combined/ integrated OCT visualization during en face retinal and ophthalmic surgery

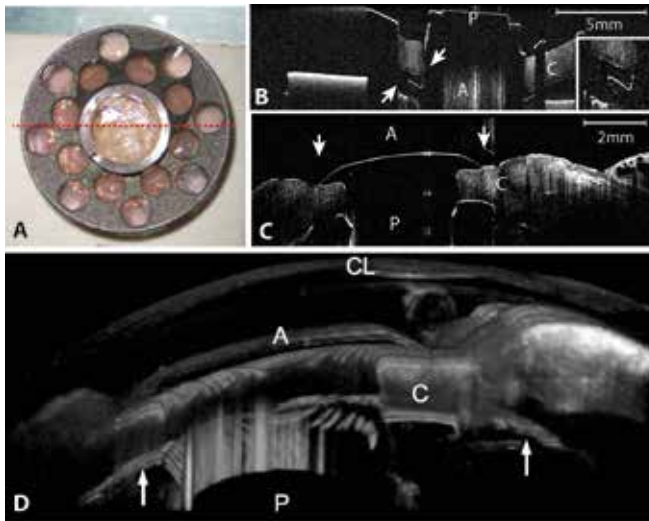


Abbildung 3 A–D: Intraoperative OCT während der Implantation einer Boston-Keratoprothese (A). B) Das intraoperative OCT zeigt eine mit dem Mikroskop nicht sichtbare Lücke zwischen Transplantat und Prothese (Pfeile + Vergrößerung). C) zeigt ein vollständig anliegendes Transplantat nach Reposition. D) 3D-Rekonstruktion der implantierten Prothese und weiterer Abstand von Transplantat und Keratoprothese (Pfeile), der mittels Mikroskop unsichtbar ist.

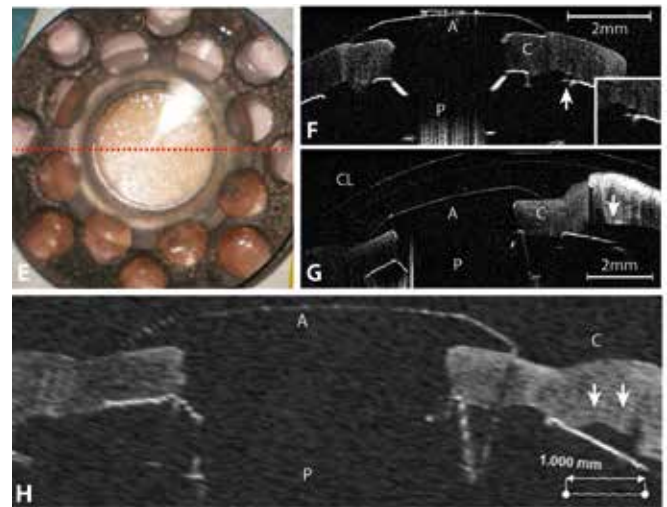


Abbildung 3 E–H: E) Mikroskopbild beim Zusammenbau der Boston-Keratoprothese. F) Die OCT zeigt eine Lücke zwischen Implantat und Empfängergerewebe (Pfeile). G) Auch nach Reposition und anschließender Implantation ist diese Lücke sichtbar (Pfeile). Von einer weiteren Korrektur wird abgesehen, da die hier sichtbare Lücke aufgrund ihrer intraokularen Lage vermutlich keinen Einfluss auf das postoperative Ergebnis hat. H) Auch im postoperativen Follow-up zeigte sich die vorbeschriebene Lücke (Pfeile). Abkürzungen: A = Anterior, C = Kornea, CL = Kontaktlinse, P = Posterior.

Mit freundlicher Genehmigung von SPIE aus [6]

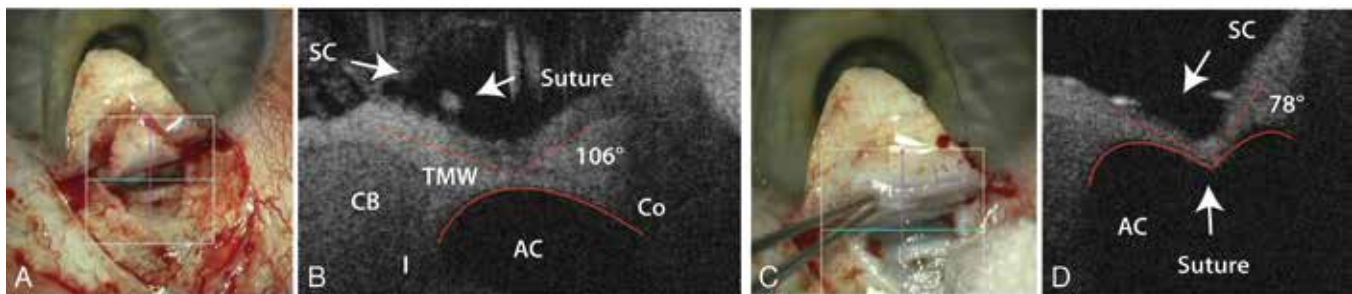


Abbildung 4: Intraoperative OCT während einer Kanalooplastik. A) Mikroskopbild vor Anziehen des Fadens. B) Korrespondierendes intraoperatives OCT-Bild: Iris (I), Ziliarkörper (CB), der Schlemm'sche Kanal (SC), das Trabekelmaschenwerk (TMW), der Faden (Suture), Hornhaut (Co) und Vorderkammer sind klar sichtbar. C) Mikroskopbild nach Anziehen des implantierten Fadens. D) Im korrespondierenden OCT-Bild zeigt sich eine deutliche Aufteilung des Winkels (Angabe in Grad) des Kammerwinkels. Zudem stellt sich der Kammerwinkel nun eher M-förmig dar.

Mit freundlicher Genehmigung von Wolters Kluwer aus [8]

und eine Peters-Anomalie ausgeschlossen werden. Es zeigten sich teilweise lediglich dichte, oberflächliche Hornhautnarben. Diese konnten mittels lamellärer Keratektomie und Excimer-Laser-PTK erfolgreich entfernt werden, ohne dass eine perforierende Keratoplastik notwendig wurde. Darüber hinaus ermöglicht die intraoperative OCT von Kindern neben der Beurteilung des vorderen Augenabschnittes während der Untersuchung in Narkose (inkl. Hornhaut, Kammerwinkel, Vorderkammer, Iris, Linse), die erweiterte Untersuchung des hinteren Augenabschnittes, inklusive Netzhaut- und Makula sowie Papille. Dies könnte in Zukunft erstmalig den Ausschluss von Makulaödemem z.B. bei Kindern mit Frühgeborenenretinopathie oder Uveitis

ermöglichen, aber auch eine wesentlich genauere Verlaufskontrolle des Papillenstatus von beispielsweise Kindern mit kongenitalem Glaukom erlauben.

Fazit: Bisher fehlen große randomisierte, kontrollierte Studien

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Vielzahl chirurgischer Indikationen besteht, bei der die intraoperative OCT generell die Operation sicherer und effizienter machen könnte. Bisher mangelt es aber an prospektiven, randomisierten, kontrollierten Studien, die letztendlich klarstellen könnten, ob überhaupt und wenn ja welche Operation von der intraoperativen OCT profitiert. Davon abgesehen gibt es einige limitie-

rende Faktoren bei den intraoperativen OCT-Geräten:

- die Abschattung des Lasers in Folge einer Totalreflektion der Strahlen durch metallische Instrumente

- das Fehlen von im klinischen Alltag standardmäßig bereits verwendeten Bildgebungswerkzeugen wie die exakte Dickenmessung, die Autofluoreszenz- bzw. Infrarotaufnahmen.

In Zukunft könnte zudem der Einsatz der sogenannten „Swept-Source“-OCT-Technik, einer wesentlich schnelleren und hochauflösenderen OCT Technik der intraoperativen 3D-OCT sowie des intraoperativen Instrumententrackings mittels OCT diese Technik noch deutlich verbessern [5].

Literatur

1. Au J et al (2015) Intraoperative optical coherence tomography for enhanced depth visualization in deep anterior lamellar keratoplasty from the PIONEER study. *Cornea* 34: 1039–1043
2. Bachmann B et al (2015) Hornhautchirurgie und Hornhauttransplantation bei Kindern. *Ophthalmologe* 112: 110–117
3. Ehlers JP et al (2014) The prospective intraoperative and perioperative ophthalmic imaging with optical coherence tomography (PIONEER) study: 2-year results. *Am J Ophthalmol* 158: 999–1007
4. Ehlers JP, Kaiser PK, Srivastava SK (2014) Intraoperative optical coherence tomography using the RESCAN 700: preliminary results from the DISCOVER study. *Br J Ophthalmol* 98: 1329–1332
5. El-Haddad MT, Tao YK (2015) Automated stereo vision instrument tracking for intraoperative OCT guided anterior segment ophthalmic surgical maneuvers. *Biomed Opt Express* 6: 3014–3031
6. Kumar RS et al (2015) A pilot study on feasibility and effectiveness of intraoperative spectral-domain optical coherence tomography in glaucoma procedures. *Transl Vis Sci Technol* 4: 2
7. Pasricha ND et al (2015) Real-time microscope-integrated OCT to improve visualization in DSAEK for advanced bullous keratopathy. *Cornea* 34: 1606–1610
8. Siebelmann S, Steven P, Cursiefen C (2015) Intraoperative optical coherence tomography: Ocular surgery on a higher level or just nice pictures? *JAMA ophthalmol* 133: 1133–1134
9. Siebelmann S et al (2015) Intraoperative optical coherence tomography in children with anterior segment anomalies. *Ophthalmology* 122: 2582–2584
10. Siebelmann S et al (2016) Intraoperative optische Kohärenztomographie bei Hornhaut- und Glaukom-chirurgischen Eingriffen. *Ophthalmologe* (im Druck)
11. Siebelmann S et al (2016) Advantages of microscope-integrated intraoperative online optical coherence tomography: usage in Boston keratoprosthesis type I surgery. *J Biomed Opt* 21: 16005; Errata 21: 29801
12. Siebelmann S et al (2016) Intraoperative optical coherence tomography enables noncontact imaging during canaloplasty. *J Glaucoma* 25: 236–238
13. Siebelmann S et al (2016) Intraoperative optische Kohärenztomographie bei Narkoseuntersuchungen von Säuglingen und Kleinkindern. *Ophthalmologe*: online 20. Juni (im Druck)
14. Steven P et al (2014) Optimising deep anterior lamellar keratoplasty (DALK) using intraoperative online optical coherence tomography (iOCT). *Br J Ophthalmol* 98: 900–904
15. Steven P et al (2013) Optimizing descemet membrane endothelial keratoplasty using intraoperative optical coherence tomography. *JAMA ophthalmol* 131: 1135–1142

Korrespondenzadresse:

Dr. med. Sebastian Siebelmann
Zentrum für Augenheilkunde,
Universitätsklinik Köln
Kerpener Straße 62
50924 Köln

E-Mail: Sebastian.Siebelmann@uk-koeln.de