Die Bedeutung des Kapsulotomie-Kontaktglases beim Nd:YAG-Laser

Die Nd:YAG-Laser-Kapsulotomie ist seit Jahrzehnten das Standardverfahren zur Behandlung des Nachstars. Ein wesentlicher Faktor für Präzision, Effizienz und Sicherheit dieses Eingriffs ist das Kapsulotomie-Kontaktglas, das zwischen Hornhaut und Laser-Austrittsoptik positioniert wird. Es stabilisiert das Auge, ermöglicht eine exakte Zentrierung, reduziert optische Aberrationen und verbessert die Fokussierung des Laserstrahls auf die hintere Kapsel. Dr. Andreas F. Borkenstein (Graz) erläutert das Wirkprinzip des Kapsulotomie-Kontaktglases und gibt einen Leitfaden zur Nutzung in der Praxis.

Die Nachstarentwicklung, also die Eintrübung der hinteren Kapsel (PCO), ist die häufigste Spätkomplikation der Kataraktchirurgie und wird heute in aller Regel mittels Q-geswitchtem Nd:YAG Laser bei 1.064 nm behandelt. Moderne Systeme liefern Nanosekundenpulse mit einstellbarer Pulsenergie von zirka 0,3 bis 10 mJ, klinisch werden Kapsulotomien meist mit mehreren Einzelschussen bei Einzelpulsenergien um 1.5 bis 2,5 mJ erzeugt, woraus meist Gesamtenergien im Bereich von grob 20 bis 40 mJ resultieren, abhangig von PCO-Typ, Stadium der Fibrose, Öffnungsgröße, Offset und Strahlfuhrung.. Die Nd:YAG-Kapsulotomie beruht auf optischem Durchbruch (laserinduzierte Plasmabildung) im wässrigen Milieu: Überschreitet die Intensität am Fokus den sogenannten Breakdown Schwellenwert, entsteht ein Plasma, das eine Stoßwelle und Kavitationsblase erzeugt und die Kapsel somit mechanisch reißt.

Die Nd:YAG-Laser-Kapsulotomie ist seit Jahrzehnten das Standardverfahren zur Behandlung der sekundären Katarakt (PCO). Ein wesentlicher Faktor für Präzision, Effizienz und Sicherheit dieses Eingriffs ist das Kapsulotomie-Kontaktglas, das zwischen Hornhaut und Laser-Austrittsoptik positioniert wird. Es stabilisiert das Auge, ermöglicht eine exakte Zentrierung, reduziert optische Aberrationen und verbessert die Fokussierung des Laserstrahls auf die hintere Kapsel. Dadurch kann der Eingriff mit geringerer Energie und höherer Zielgenauigkeit durchgeführt werden.

Ursprünge und Entwicklung

Das Konzept eines speziellen Kontaktglases zur Nd:YAG-Kapsulotomie wurde Mitte der 1980er Jahre eingeführt. Als Pionier gilt G. A. Peyman, der 1986 gemeinsam mit C. R. Goldschmidt ein entsprechendes Glas im Canadian Journal of Ophthalmology beschrieb (Peyman und Goldschmidt 1986). Dieses Design vergrößerte gezielt den Konvergenzwinkel des Nd:YAG-Strahls und verkleinerte dadurch den Fokusdurchmesser, um die Photodisruption der hinteren Kapsel effizienter zu gestalten. Damit wurde erstmals systematisch der Einfluss einer Kontaktoptik auf die Wirksamkeit und Sicherheit der Kapsulotomie dokumentiert. In den folgenden Jahren wurden dann mehrere Varianten des ursprünglichen Prinzips entwickelt. Ziel blieb stets die Kombination aus Stabilisierung des Auges, optischer Vergrößerung und Verbesserung der Fokussierung. Zu den heute international etablierten Modellen zählen das klassische Peyman-Glas oder das Abraham-Kapsulotomieglas sowie diverse andere Varianten. Diese sind in den unterschiedlichsten Ausführungen (Mehrweg, sterilisierbar oder Einmalgebrauch) bei verschiedenen ophthalmologischen Herstellern erhältlich – darunter Ocular Instruments, Volk Optical, Haag-Streit/Keeler oder Katena/Corza Medical, um nur einige beispielhaft zu nennen.

Alle Modelle basieren auf demselben optischen Grundprinzip: einem zentralen Vergrößerungsbereich mit hoher Sammelwirkung (zirka +66 dpt, Ø≈10 mm), der den Strahl steiler ins Auge lenkt, den Fokuspunkt dadurch verkleinert und somit die Energiedichte am posterioren Kapselhäutchen erhöht. Diese optische Modifikation verbessert die Sicht für den Anwender und damit die Präzision der Prozedur erheblich und verringert das Risiko eines Misfokus und IOL-Pittings.

Bedeutung in der heutigen Praxis

Das Kapsulotomie-Kontaktglas ist somit ein unverzichtbarer Bestandteil der modernen Nd:YAG-Kapsulotomie. Es gewährleistet eine stabile, reproduzierbare Arbeitsposition, unterstützt die präzise Platzierung des Fokus und trägt wesentlich dazu bei, den Eingriff mit minimaler Energie und maximaler Sicherheit durchzuführen. Damit hat es sich seit seiner Einführung durch Peyman

Abb. 1: Das Konzept des Kapsulotomie-Kontaktglases wurde in den 1980er Jahren von G. A. Peyman eingeführt. Ziel war es, die Fokussierung des Nd:YAG-Lasers zu verbessern. Das Kapsulotomieglas dient heute in erster Linie dazu, das Auge während der Nd:YAG-Laserkapsulotomie zu stabilisieren und eine präzise Fokussierung auf die hintere Kapsel zu ermöglichen.

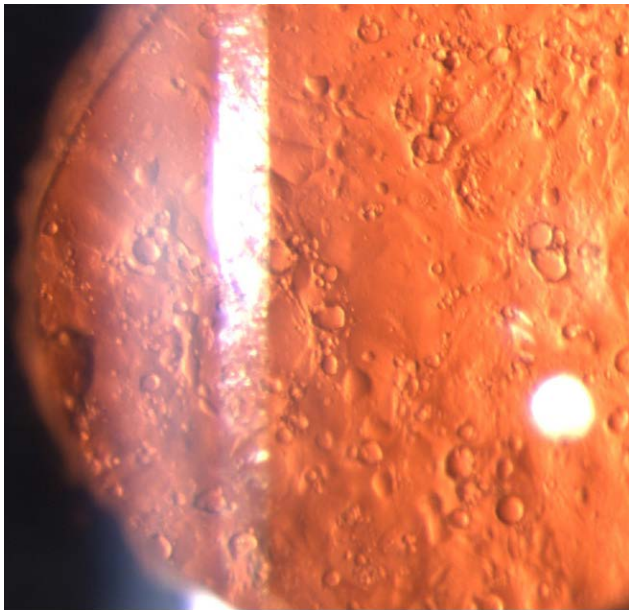

Abb. 2: Elschnig Perlen (beschrieben von dem österreichischen Augenarzt Anton Elschnig) sind eine Form des Nachstars, die als Ansammlung von proliferierten Linsenepithelzellen entstehen. Es kommt zu Clustern von perlenartigen Strukturen, die das Sehvermögen beeinträchtigen und auch zu mehr Blendung und Lichtempfindlichkeit führen können

zu einem weltweit standardisierten Instrument in der Ophthalmochirurgie entwickelt.

Physikalische Grundlagen: Was das Kapsulotomie-Kontaktglas bewirkt

Die Nd:YAG-Kapsulotomie beruht auf Photodisruption, also einer laserinduzierten Plasmabildung im wässrigen Milieu der Hinterkapsel. Wird die materialspezifische Schwellenirradianz (die Bestrahlungsstärke oder auch Strahlungsflussdichte für die gesamte Menge der eingehenden elektromagnetischen Energie, die auf eine Flächeneinheit trifft) überschritten, entstehen freie Elektronen, ein lokales Plasma und eine nachfolgende Stoßwelle mit Kavitation, die die opake Kapsel mechanisch rupturiert. Entscheidend ist dabei die Spitzenirradianz am Fokus. Sie steigt mit zunehmender numerischer Apertur (NA) quadratisch an. Dies bedeutet, je kleiner der Fokusdurchmesser, desto höher ist die Intensität am Zielpunkt bei gleicher Pulsenergie. Mit steigender NA sinkt daher die Breakdown-Schwelle, während optische Aberrationen diese deutlich erhöhen. Ein Kontaktglas modifiziert den Strahlengang des Lasers gezielt zugunsten dieser Bedingungen. Durch seine aplanatische Geometrie vergrößert es den sogenannten Konvergenzwinkel (cone angle) des Nd:YAG-Strahls und steigert damit die effektive NA. Ohne Kontaktglas beträgt der Konvergenzwinkel typischerweise etwa 15°, mit Kontaktglas aber etwa 25°, wodurch der Brennfleck deutlich kleiner und die Energieverteilung kompakter wird. Herstellerangaben beschreiben eine Laser-Spot-Magnifikation von etwa 0,56× bei einer Bildvergrößerung von zirka 1,8× (zum Beispiel Abraham-, Peyman-Gläser). Die bestrahlte Fläche reduziert sich somit auf rund 30 Prozent des Ausgangswerts, was einer theoretischen Erhöhung der Fluence um etwa das 3,2-fache entspricht. Die Fluence beschreibt, wie viel Energie auf eine bestimmte Fläche trifft, unabhängig von der Pulsdauer – also die Energiedichte eines Laserpulses. Klinisch für uns Augenärzte bedeutet dies, dass für denselben Disruptionseffekt eine deutlich geringere Pulsenergie erforderlich ist.

Zusätzlich wirkt das Kontaktglas optisch neutralisierend auf die Hornhaut: Durch das aufgebrachte Koppelmedium (zum Beispiel Methylcellulose) wird ein Großteil der kornealen Brechkraft und ihrer Aberrationen kompensiert. Die Hornhaut hat eine hohe Brechkraft (~43 dpt) und durch den Übergang von Luft (n≈1,0) zu Hornhaut (n≈1,376) besteht ein Brechungsindexsprung. Wenn nun ein Koppelmedium mit einem ähnlichen Brechungsindex (zum Beispiel Methylcellulose, n≈1,335 bis 1,340) zwischen Kornea und Kontaktglas aufgetragen wird, fällt der Brechungsindexsprung stark ab. Die refraktive Wirkung der vorderen Hornhautoberfläche wird stark reduziert, weil der große Indexsprung Luft→Kornea durch ein Medium mit ähnlichem Brechungsindex ersetzt wird. Das Kontaktglas bildet dann die dominante vordere

Verwendungshäufigkeit des Kapsulotomie-Kontaktglases im Klinikalltag

Im Rahmen einer kleinen informellen Umfrage per E-Mail unter Kolleginnen und Kollegen und über soziale Medien wurde untersucht, wie häufig bei der Standard-Nd:YAG-Kapsulotomie tatsächlich ein Kapsulotomie-Kontaktglas zum Einsatz kommt, ohne weitere Hintergrundinformation zu geben, warum man dies wissen wolle.

Von den insgesamt 30 befragten Augenärztinnen und Augenärzten (21 Europa, 9 USA) gaben nur 7 (23 %) an, bei jeder Kapsulotomie routinemäßig ein Kontaktglas zu verwenden. Die Mehrheit, also 23 Teilnehmende (77 %) verzichtet dagegen im Regelfall darauf und nutzt das Glas nur sporadisch und selektiv, beispielsweise bei dichter fibrotischer PCO oder bei erschwerter Fokussierung und sehr unruhigen Patienten.

Als Hauptgründe für die Nichtverwendung wurden in der Mehrzahl der Rückmeldungen >80 % Zeitersparnis und eine vermeintlich höhere Effizienz im Praxisablauf genannt. Viele gaben an, dass sich die Kapsulotomie auch ohne Glas „ausreichend gut" durchführen lasse und das zusätzliche Aufsetzen als verzögernd empfunden werde. Weitere genannte Aspekte waren der zusätzliche Aufwand für Auftragen von Methylcellulose, Eintropfen, Desinfektionsmaßnahmen des Glases sowie gelegentliche Eigenblendungsphänomene durch das Glas sowie ein geringerer Patientenkomfort/Druck beim Aufsetzen des Glases.

Brechflache des optischen Systems. Außerdem hat ein Kontaktglas eine mehrteilige aplanatische Optik, bestehend aus einer vorderen konvexen Fläche (button lens), um den Strahl zu bündeln, und einer konkaven peripheren Auflagefläche, angepasst an die Korneakrümmung mit zirka 7,8 mm Radius. Dadurch bleibt der Strahl im Auge nahezu aberrationsfrei, was die Präzision des Fokuspunktes erhöht.

Durch das Kontaktglas kommt es zu einer Verkleinerung des Fokusradius und es verkürzt sich die sogenannte Rayleigh-Länge, also der Bereich entlang der optischen Achse, in dem die Laserintensität nahezu maximal bleibt. Man könnte sagen, die Rayleigh-Länge ist ein Maß dafür, wie gut ein Laserstrahl fokussiert werden kann. Diese Verkürzung führt damit zu einer kompakteren, räumlich enger begrenzten Hochintensitätszone. Dadurch konzentriert sich die Photodisruption präziser auf die gewünschte Ebene der hinteren Kapsel, und die Wahrscheinlichkeit eines präfokalen oder postfokalen Plasmaaufbruchs, mit entsprechendem Energieverlust und unkontrollierten Stoßwellen, wird deutlich verringert.

Neben diesen physikalischen Vorteilen erfüllt das Kontaktglas aber auch mehrere praktisch-klinische Funktionen: Es stabilisiert den Bulbus und reduziert Mikrobewegungen. Außerdem werden bei möglicher Incompliance oder Unruhe des Patienten die Bewegungen des Auges oder Kopfes direkt auf die Hand des Anwenders übertragen und damit sofort registriert.

Das Kontaktglas ermöglicht durch die optische Vergrößerung auch eine exaktere visuelle Kontrolle der Zielstruktur und führt gleichzeitig zu einer Verbreiterung des Strahldurchmessers an nichtzielgerichteten Strukturen vor und hinter dem Zielgebiet, also Hornhaut, Intraokularlinse und Glaskörper sowie Netzhaut. Dadurch sinkt die lokale Leistungsdichte an diesen nichtzielgerichteten Strukturen. Dies ist ein weiterer wesentlicher Sicherheitsgewinn, der insbesondere das Risiko von IOL-Pitting oder Netzhautschäden verringert.

Optisch physikalische Wirkung des Kontaktglases

Der Eindruck, den viele Augenärzte haben, dass bei exakt gleichen Lasereinstellungen am gleichen Auge bei der Kapsulotomie ohne Verwendung eines Kontaktglases weniger passiert als mit Kontaktglas ist somit physikalisch exakt erklärbar. Das ist kein subjektiver Eindruck, sondern hat solide optisch physikalische Gründe: Ein Kontaktglas verändert die Fokussierungsgeometrie (größere numerische Apertur/cone angle), verkleinert den Laserfleck an der Zielstruktur (hintere Kapsel), verkürzt die Rayleigh-Länge (präzisere Lokalisation der hohen Intensität), neutralisiert korneale Brechkraft/Abbildungsfehler (weniger sphärische Aberration) und stabilisiert den gesamten Bulbus. Diese Effekte erhöhen die Intensität am Fokus und senken die für den Plasmadurchbruch benötigte Pulsenergie. Gleichzeitig verbreitert das Glas den Strahl auf andere Strukturen, die Hornhaut, Intraokularlinse, Glaskörper und Netzhaut (geringere Flächenleistungsdichte dort), was wiederum die Sicherheitsmarge erhöht. Klinisch und mit Studien belegt korreliert eine niedrigere Lasergesamtenergie mit geringerer Komplikationslast (insbesondere postoperative IOD Spikes, IOL Pitting, Makulaödem). Ohne Kontaktglas ist die Irradianz am Ziel oft zu niedrig beziehungsweise im Raum diffuser verteilt, sodass der klinisch sichtbare Effekt geringer ist und man mehr Energie „pro Schuss" benötigt um den gleichen Effekt zu erzielen.

Posteriorer Fokus-Offset: Warum es mit Glas sicherer ist

Klinisch wird häufig empfohlen zusätzlich mit posteriorem Offset von zirka 100 bis 200 µm zu arbeiten, um ein IOL-Pitting (YAG-Shots) zu vermeiden, weil der Plasmajet/Kavitationskollaps tendenziell nach anterior gerichtet ist. Mit dem Kontaktglas ist der Fokus schärfer lokalisiert; derselbe Offset erzielt verlässlicher eine Kapselruptur, ohne gleichzeitig auch die anterior positionierte IOL zu „treffen" und damit irreversible Schäden zu verursachen.

Praxisleitfaden

Die Nd:YAG-Kapsulotomie ist ein sicheres und effektives Verfahren zur Behandlung des Nachstars, welches weltweit millionenfach durchgeführt wird. Die Wirksamkeit der Nd:YAG-Kapsulotomie wird aber nicht allein durch höhere Energie, sondern vor allem durch präzise Fokussierung und kontrollierte Strahlführung bestimmt. Entscheidend ist, die Schwellenirradianz am Zielgewebe (hintere Kapsel) gezielt zu erreichen, ohne übermäßige und unnötige Energieeinträge und mechanische Nebenwirkungen zu erzeugen. Jenseits dieser Schwelle führt ein Mehr an Energie nicht zu einem besseren Schnitt, sondern vor allem zu einer stärkeren Belastung des Auges durch größere Stoßwellen und Kavitationsblasen und kann Komplikationen bedingen.

Die Morphologie der PCO bleibt der wichtigste Einflussfaktor: fibrotische oder dicht adhärente Formen erfordern generell mehr Gesamtenergie. Ein Kontaktglas kann diese anatomisch-optischen Grenzen zwar nicht aufheben, aber durch die Steigerung der numerischen Apertur und die Reduktion von Aberrationen die Energieeffizienz signifikant verbessern.

Auch wenn gut designte und randomisierte Vergleichsstudien zwischen Kapsulotomie mit und ohne Kontaktglas naturgemäß leider limitiert sind, ist die physikalische Plausibilität klar und die klinische Evidenz konsistent: In Kohortenstudien und klinischen Evaluierungen zeigt sich ein geringerer Energieverbrauch, weniger IOL-Pitting und ein niedrigeres Risiko energieabhängiger Komplikationen.

In der täglichen Praxis sollte daher auch in Einrichtungen, welche unter Zeitdruck eine hohe Fallzahl zu behandeln haben, die Kapsulotomie stets unter Verwendung eines Kontaktglases erfolgen. Dieses ermöglicht eine präzise Fokussierung, verkürzt die Rayleigh-Länge und reduziert die benötigte Pulsenergie. Empfehlenswert sind Startenergien um 1.5 bis 2 mJ mit einem posterioren Fokus-Offset von etwa 100 bis 200 µm und einer auf das PCO-Muster und die IOL abgestimmten Öffnung. Bei fibrotischen PCO-Typen ist eine langsame, schrittweise Titration mit mehreren gezielten Schüssen einer hohen Einzelpulsenergie vorzuziehen. Iatrogene Defekte (YAG-Shots) an der Intraokularlinse, vor allem im zentralen Bereich der IOL, welcher wesentlich zur Gesamtqualität des Seheindruckes beiträgt, sind zu vermeiden.

Insgesamt gilt: Das Motto: „weniger ist mehr“ ist richtig. Gezielt fokussiert, optisch optimiert, energetisch maßvoll. Andererseits ist „Oben-Ohne“ bei der Kapsulotomie so gar nicht sexy! Mit Kontaktglas, korrektem Offset und angepasster Energie lässt sich die Nd:YAG-Kapsulotomie heute präzise, sicher und gewebeschonend durchführen – bei maximaler Effizienz und minimalem Komplikationsrisiko.

Zusammenfassend sollte festgehalten werden, dass das Kapsulotomie-Kontaktglas tatsächlich kein Zubehör darstellt, sondern ein optisches Gestaltungselement der Photodisruption ist und somit bei keiner Anwendung fehlen sollte.

Literatur auf Anfrage in der Redaktion und per AUGENSPIEGEL-App direkt abrufbar.

Dr. Andreas F. Borkenstein
Operative und Konservative Augenheilkunde, Praxis für Augenheilkunde an der Privatklinik der Kreuzschwestern, Graz;
Borkenstein & Borkenstein Research & Laboratory Gmbh, Graz
E-Mail: ordination@borkenstein.at

ANZEIGE