

Femtosekundenlaser

Neue Anwendungsgebiete in der refraktiven Chirurgie

Die Laser-in-situ-Keratomileusis (LASIK) ist die populärste korneale refraktiv-chirurgische Operation. Ein kritischer Schritt während dieses Verfahrens ist das Anlegen eines etwa 100–150 µm dicken kornealen Deckelchens (Flap), wofür gegenwärtig mechanische Mikrokeratome weit verbreitet eingesetzt werden. Eine neue Qualität der Deckelausschneidung erreicht man mit Ultrakurzpulslasern (fs-Lasern), deren Pulsdauer in der Größenordnung von etwa einigen 100 fs = 10⁻¹³ s liegt. Bei fs-Laserbestrahlung kommt es zur Einkopplung der Strahlungsenergie in das Elektromagnetische und zu einer so starken elektromagnetischen Anregung, dass das Material unabhängig von seiner Zusammensetzung zerfällt, noch bevor sich die eingebrachte Energie als Wärme manifestieren und ausbreiten kann.

Die Femtosekundenlasermikrokeratome unterscheiden sich von den mechanischen Mikrokeratomplattformen im Schnittmechanismus in der Kornea.

Das mechanische Mikrokeratom übt über eine oszillierende Klinge Scherkräfte aus und fährt torsional oder translational über die Kornea. Der Femtosekundenlaser hingegen legt den kornealen Schnitt durch die Applikation von Laserpulsen in einer vorbestimmten Tiefe in der Kornea von etwa 1 µm Durchmesser an, welcher dann auf etwa 2–3 µm expandiert. Diese Pulse induzieren eine Mikrophotodisruption bzw. eine sich ausdehnende Gasblase (CO₂) und Wasser, welche das Gewebe auseinander drängt und eine Separationsebene schafft. Die Pulse werden in Spiral- oder Raster-

mustern abgegeben und jeweils nebeneinander angesetzt, um einen ebenen Deckel zu schaffen. Vorhergehende Studien berichten über die Vor- und Nachteile der Femtosekundenlaser- vs. mechanischer Mikrokeratome. Wichtige kritische Komponenten der LASIK-Chirurgie bleiben jedoch weiterhin zu klären: die Sicherheit, die Effizienz, die Vorhersagbarkeit und die biomechanische Wundheilung.

Das Ziel der nachfolgenden Artikel ist es u. a. die verschiedenen Komponenten des Femtosekundenlasers und ausgewählte neue Anwendungsbereiche im Bereich der refraktiven Chirurgie darzustellen. Offenbar optimierte Ergebnisse in Bezug auf den Visus, induzierten Astigmatismus, induzierte Aberrationen höherer Ordnung und verminderte Nachbehandlungsraten sprechen für eine verbesserte Vorhersagbarkeit der Femtosekundenlasertechnologie im Vergleich zu vielen mechanischen Mikrokeratomen. Interessanterweise scheint die Wundheilung nach Deckelpräparation durch einen Femtosekundenlaser im Vergleich zur klingengestützten Deckelanlegung verbessert zu sein.

Erhalt der epithelialen Integrität

Der Erhalt der epithelialen Integrität ist ein wichtiger Aspekt der Heilung und Vermeidung postoperativer Komplikationen. Neue mechanische Mikrokeratome reduzieren die Inzidenz epithelbedingter Komplikationen. Dennoch können auch mit den neuesten Mikrokeratomen Epithelverschiebungen bei bis zu 2,6% auftreten. Auch die iatrogene korneale Ektasie nach LASIK bleibt unverändert ein Problem, das offenbar auch durch das Belassen einer minima-

len Reststromdicke von 250–300 µm nicht restlos gelöst ist.

Mit einem mechanischen Mikrokeratom wird die korneale Schnittdicke durch die Qualität der Klingenkante, die Vorlaufgeschwindigkeit, die Oszillationsfrequenz, das Voranschreiten des Mikrokeratoms auf der Halterung des Saugrings und weiteren Faktoren beeinflusst. 4 verschiedene Studien widmeten sich der Genauigkeit und Schnittqualität verschiedener mechanischer Mikrokeratome. Besonders ein unerwartet dicker Deckel ist bedenklich, wobei Deckel nach mechanischem Mikrokeratomschnitt nicht selten im Zentrum dünner sind als in der Peripherie (s. unten). Durch Femtosekundenlaser angelegte Hornhautdeckel sind in der Regel von einheitlicher Dicke. Ein Knopfloch im Deckel nach Femtosekundenlasereinsatz darf als absolute Rarität angesehen werden.

TLS-Syndrom

Über bestimmte Komplikationen, die ausschließlich auf die Femtosekundenlaserbehandlung zurückzuführen sind, wurde berichtet wie beispielsweise das TLS-Syndrom, als noch höhere Laserpulsenergien zur Deckelanlegung eingesetzt wurden [12]. Typischerweise tritt das TLS-Syndrom bei Patienten mit gutem Visus durch spontanes Einsetzen von Photophobie auf, die vorübergehend ist und spontan wieder zurückgeht. An der Spaltlampe finden sich (wenn überhaupt) nur minimale Zeichen einer Inflammation.

Üblicherweise lässt sich das TLS-Syndrom gut mit steroidalen Antiphlogistika behandeln. Die Inzidenz des TLS-Syndroms nahm durch den Einsatz geringe-

rer Energien signifikant ab. In der 30-kHz-Version sind niedrige Energieeinstellungen mit engerer Spotseparation möglich als in den vorangegangenen 15- bzw. 10-kHz-Versionen. Mit der jüngsten Freigabe der 60-kHz-Plattform ist eine raschere Deckelpräparation mit geringerer Energie möglich. Höhere Repetitionsraten erlauben den Einsatz geringerer Energieparameter und engerer Spot- sowie Linienseparationen bei gleichzeitig schnellerem Operationsverfahren.

Der Deckelschnitt erfolgt nun in ca. 30 s, was in Hinblick auf die Ansaugdauer des Bulbus akzeptabler erscheint. Die enge Spot- und Linienseparation erlaubt eine erleichterte Separation der Schnittebene. Ein weiterer Effekt ist eine glatte Schnittkantengestaltung. Die Anwesenheit von Restadhäsionen, die nach Femtosekundenlaserschnitt eine manuelle Dissektion zur Deckelelevation notwendig machen, nährt Bedenken, dass die potentiell rauhere Oberfläche zu unerwünschten optischen und refraktiven Effekten führt.

Jüngste Berichte dokumentierten, dass die Femtosekundenlaserschnitte im 18-kHz-Modus eine stromale Oberfläche schaffen, die nicht von den Schnittflächen aktueller mechanischer Mikrokeratome bei Schnitttiefen von $\leq 130 \mu\text{m}$ zu unterscheiden sind [5, 13]. Der 30-kHz-Femtosekundenlaser erlaubt eine größere Spotlinienseparation und den Einsatz niedrigerer Energien pro Puls, was möglicherweise noch glattere korneale stromale Oberflächen kreiert.

Erste Ergebnisse

Erste Ergebnisse weisen auf eine bessere Vorhersagbarkeit der postoperativen manifesten Refraktion (im sphärischen Äquivalent) hin. Ein möglicher Erklärungsgrund könnte das trockene stromale Bett beim Femtosekundenlaser sein, wohingegen die Hornhaut vor dem mechanischen Mikrokeratomschnitt von vielen Operateuren routinemäßig befeuchtet wird mit der Folge einer Beeinflussung des Excimerlaserabtrags.

Eine weitere mögliche Erklärung ist in der Morphologie des Deckels begründet. Während der Deckel nach Femtosekundenlasereinsatz in der Regel einförmig planar ist, findet sich nach mechanischem Mikrokeratomschnitt oftmals ein meniskusförmiger Deckel. Dieser Umstand scheint be-

sondere Relevanz bei der Behandlung von Aberrationen zu haben [2].

Erste Berichte weisen auf eine geringere Nachbehandlungsrate nach LASIK durch Femtosekundenlaser im Vergleich zum mechanischen Mikrokeratom hin [11]. Bezüglich der Biomechanik heilt der Deckel nach Femtosekundenlaserschnitt zentral vergleichbar mit dem konventionellen Mikrokeratomschnitt, ist aber peripher offenbar fester angewachsen [6, 10]. Der Femtosekundenlaserdeckel weist somit potentiell eine stärkere biomechanische Stabilität auf [11].

Der Femtosekundenlaser scheint somit eine geringere Komplikationsrate aufzuweisen als mechanische Mikrokeratome.

Zukunft des Femtosekundenlasers

Die freie Wahl der Lokalisation von Deckel, Scharnier, Durchmesser und Deckelrandgestaltung, die hohe Effizienz und Vorhersagbarkeit bei potentiell reduzierter Inzidenz von Komplikationen, geringerem chirurgisch-induziertem Astigmatismus und weniger induzierte Aberrationen höherer Ordnung machen die Femtosekundenlaserbehandlung zur einer interessanten Alternative zu den mechanischen Mikrokeratomen in der refraktiven Chirurgie [6, 8]. Es ergeben sich durch den Lasereinsatz diverse neue Einsatzmöglichkeiten wie beispielsweise das Anlegen von kornealen Taschen für die Implantation von PMMA-Segmenten zur Keratokonusbehandlung oder das Anlegen von Relaxationsinzisionen zur Astigmatismuskorrektur [1, 3].

Auf neue interessante Arbeiten im Bereich der Presbyopiebehandlung durch den Femtosekundenlaser wird in dem Artikel von Herrn M. Blum näher eingegangen. Aufgrund der diversen aktuellen und noch anstehenden Möglichkeiten im Bereich der refraktiven Chirurgie sowie der therapeutischen Behandlungsoptionen (z. B. Keratoplastik) wird die Akzeptanz des Femtosekundenlasers in der Ophthalmologie weiter zunehmen [9].

Burkhard Dick

Burkhard Dick

Korrespondierender Autor

Prof. Dr. H. B. Dick



Universitäts-Augenklinik
In der Schornau 23-25,
44892 Bochum

Literatur

1. Colin J, Cochener B, Savary G et al. (2001) INTACS inserts for treating keratoconus: one-year results. *Ophthalmology* 108: 1409–1414
2. Durrie DS, Kezirian GM (2005) Femtosecond laser versus mechanical keratome flaps in wavefront-guided laser in situ keratomileusis: prospective contralateral eye study. *J Cataract Refract Surg* 31:120–126
3. Ghanem RC, Azar DT (2006) Femtosecond-laser arcuate wedge-shaped resection to correct high residual astigmatism after penetration keratoplasty. *J Cataract Refract Surg* 32: 1415–1419
4. Hoffmann S, Krummenauer F, Tehrani, Dick HB (2003) Impact of head advance and oscillation rate on the flap parameter: a comparison of two microkeratomes. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 241: 149–153
5. Holzer MP, Rabsilber TM, Auffarth GU (2006) Femtosecond laser-assisted corneal flap cuts: morphology, accuracy, and histopathology. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 47: 2828–2831
6. Kezirian GM, Stonecipher KG (2004) Comparison of the Intralase femtosecond laser and mechanical keratomes for laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 30: 804–811
7. Krueger RR, Kuszak J, Lubatschowski H et al. (2005) First safety study of femtosecond laser photodisruption in animal lenses: tissue morphology and cataractogenesis. *J Cataract Refract Surg* 31: 2386–2394
8. Lim T, Yang S, Kim M et al. (2006) Comparison of the Intralase femtosecond laser and mechanical microkeratome for laser in situ keratomileusis. *AM J Ophthalmol* 141: 833–839
9. Seitz B, Brunner H, Viestenz A et al. (2005) Inverse mushroom-shaped nonmechanical penetrating keratoplasty using a femtosecond laser. *Am J Ophthalmol* 139: 941–944
10. Songio B, Iordanidou V, Chong-Sit D et al. (2006) In vivo corneal confocal microscopy comparison of Intralase femtosecond laser and mechanical microkeratome for laser in situ keratomileusis. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 47: 2803–2811
11. Stonecipher K, Ignacio TS, Stonecipher M (2006) Advances in refractive surgery: microkeratome and femtosecond laser flap creation in relation to safety, efficacy, predictability, and biomechanical stability. *Curr Opin Ophthalmol* 17: 368–372
12. Stonecipher K, Dishler JG, Ignacio TS, Binder PS (2006) Transient light sensitivity after femtosecond laser flap creation: clinical findings and management. *J Cataract Refract Surg* 32: 91–94
13. Tehrani M, Schäfer S, Dick HB (2004) Evaluation of cut quality using the Amadeus microkeratome with different settings. *J Cataract Refract Surg* 30: 2415–2419