

Holger Lubatschowski^{1,2} · Omid Kermani² · Herbert Welling¹

¹ Laser Zentrum Hannover

² LASERFORUM GmbH, Köln

Prinzip und Wirkungsweise eines ArF-Excimerlasersystems mit scannender und rotierender Schlitzeblende*

Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es, die Abtrageeigenschaften eines ArF-Excimerlasers mit einem scannenden und rotierenden Schlitzeblendensystem (NIDEK EC 5000) zu ermitteln. Dazu wurden die Ablationskrater an PMMA-Proben rasterelektronenmikroskopisch untersucht. Der Einfluß von Strahlhomogenitäten wurde numerisch auf einem Computer simuliert und mit den Einflüssen herkömmlicher großflächig abtragender Lasersysteme verglichen. Die Beeinträchtigung der Abtrage durch Strahlabsorption in der Ablationswolke wurde in Abhängigkeit von der Repetitionsrate des Lasers und hinsichtlich der Verwendung eines Fixationsrings untersucht. Das verwendete Lasersystem zeichnet sich durch eine besonders homogene Abtragung der bestrahlten Proben aus. Das Prinzip der rotierenden und scannenden Schlitzeblende erweist sich als sehr tolerant gegenüber kleinen Inhomogenitäten im Strahlprofil. Die Abtrage erwies sich als empfindlich gegenüber der Ausbreitungsdynamik der Ablationswolke. Obwohl die Operationszeit im klinischen Einsatz bei Lasern mit großflächigem Ablationsprofil kürzer ist, zeigte sich das hier verwendete Strahlführungssystem als besonders zuverlässig hinsichtlich der Strahlqualität und damit den Abtrageeigenschaften.

Schlüsselwörter

PRK · Excimerlaser · Strahlführungssystem · Abtrage rate · Abtragprofil

Auf dem europäischen Markt drängen sich derzeit über ein halbes Dutzend Anbieter für Excimerlasersysteme zur photorefraktiven Keratektomie (PRK). Alle Systeme arbeiten nach dem gleichen Prinzip: energiereiche ArF-Excimerlaserstrahlung der Wellenlänge 193 nm verdampft Puls für Puls sub- μm -dünne Schichten Hornhautgewebe von der Gewebeerfläche. Je nach Verteilung der Laserenergie lassen sich dadurch Myopie- und/oder Astigmatismuskorrekturen oder aber auch phototherapeutische Maßnahmen durchführen.

Grundsätzliche Unterschiede bei den verschiedenen Systemen gibt es lediglich in der Art der Strahlführung. Einige der Anbieter, insbesondere US-amerikanische, verwenden großflächige Strahlprofile. Die Spotgröße des Laserpulses entspricht der Größe der Bearbeitungszone auf der Hornhautoberfläche. Diese Methode stellt enorme technische Anforderungen an den Laserkopf und die nachfolgende Strahlführung, um das Strahlprofil über eine Fläche von bis zu 10 mm Durchmesser homogen und auf definierter Energiedichte zu halten.

Deutlich einfacher ist es, die hohen Anforderungen an ein homogenes Strahlprofil für eine sehr viel kleinere Fläche zu erfüllen. Das entsprechend kleinere Strahlprofil wird dann beispielsweise als Spalt über die zu bearbeitende Fläche geführt (Abb. 1a). Da mit dieser Methode mehr Laserpulse pro Behandlung erforderlich sind, arbeiten derartige Lasersysteme in der Regel mit einer höheren Pulswiederholrate, um die Operationszeit nicht entscheidend zu verlängern.

Ziel dieser Studie war es, die Abtrageeigenschaften eines ArF-Excimerlasers mit einem scannenden und rotierenden Schlitzeblendensystem (NIDEK EC-5000) zu untersuchen.

Material und Methode

Verwendet wurde ein Excimerlasersystem der Fa. Nidek (NIDEK EC-5000, Nidek Co., Ltd, Japan). Die Bearbeitungszone läßt sich auf eine Größe von bis zu 9 mm Durchmesser einstellen. Dabei fährt ein ca. $8 \times 2 \text{ mm}^2$ großer Strahl in 8 Pulsen über die Bearbeitungszone hinweg. Im Gegensatz zu den linear scannenden Systemen drehen sich der Strahl und die Scanrichtung nach jedem Scan um 60° (Abb. 1b). Die Repetitionsrate des Lasers läßt sich von 1–50 Hz variieren. Die Energiedichte auf der Probenoberfläche wurde auf 130 mJ/cm^2 konstant gehalten. Die Untersuchungen wurden jeweils mit und ohne Verwendung eines Fixationsrings durchgeführt.

Der Fixationsring kann wahlweise im klinischen Einsatz zur mechanischen Fixation des Patientenauges benutzt werden. Er hat einen Innendurchmesser von 12 mm und eine Höhe von ca. 18 mm. Zum Absaugen der Ablationsprodukte während der Behandlung kann an der Innenseite des Ringes ein Aspirationsfluß von wahlweise 0–6 l Luft/min erzeugt werden.

Die Beeinträchtigung der Abtrage durch Strahlenabsorption in der Ablationswolke wurde in Abhängigkeit von der Repetitionsrate des Lasers jeweils mit und ohne

* Vortrag gehalten auf der 93. Tagung der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft

Holger Lubatschowski
Laser Zentrum Hannover, Hollerithallee 8,
D-30419 Hannover

A scanning and rotating slit ArF-Excimer laser delivery system for PRK: principles of operation and technical features

Summary

This study was designed to investigate the quality of a scanning and rotating slit delivery system of an ArF-Excimer laser (Nidek EC 5000). The ablation patterns on PMMA samples were examined by REM. The influence of inhomogeneities in the beam profile was simulated on a computer and compared with a conventional large-area ablation system. The impairment of the ablation rate by radiation absorption of the ablation plume was measured as a function of the repetition rate and the application of a fixation ring. The scanning and rotating slit delivery system creates extremely smooth ablation patterns. The delivery system is very tolerant of small-beam inhomogeneities. The ablation rate is very sensitive to the dynamics of the ablation plume. Although the operating procedure takes less time with a large-area ablation system, a scanning and rotating delivery system has the advantage of reliable and homogeneous removal of corneal tissue.

Key words

PRK · Excimer laser · Delivery system · Ablation rate · Ablation profile

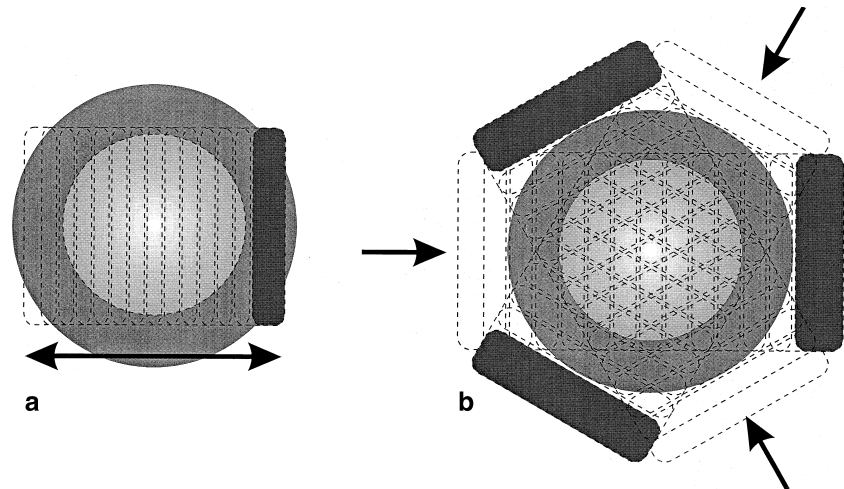


Abb. 1a, b ▲ Schematische Darstellung der linearen (a) und rotierenden (b) Scantechnik

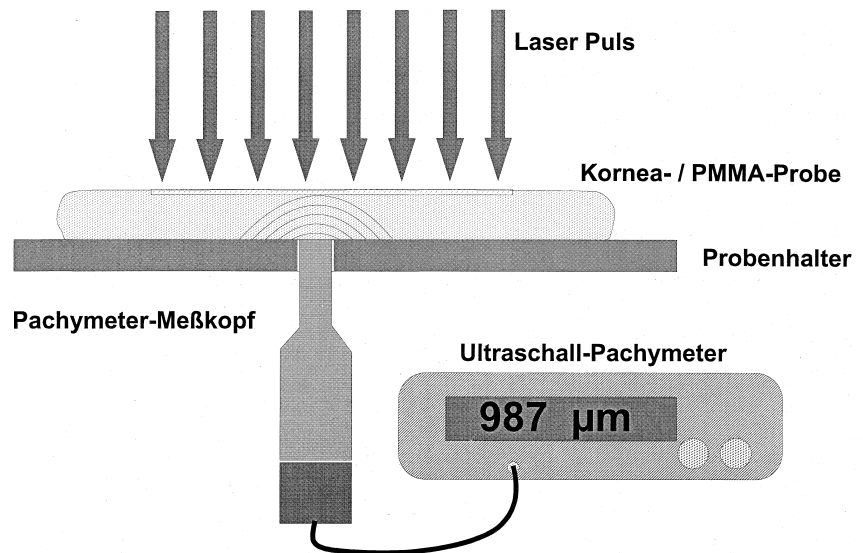


Abb. 2 ▲ Experimenteller Aufbau zur Bestimmung der Abtragtiefe während der Laserbestrahlung

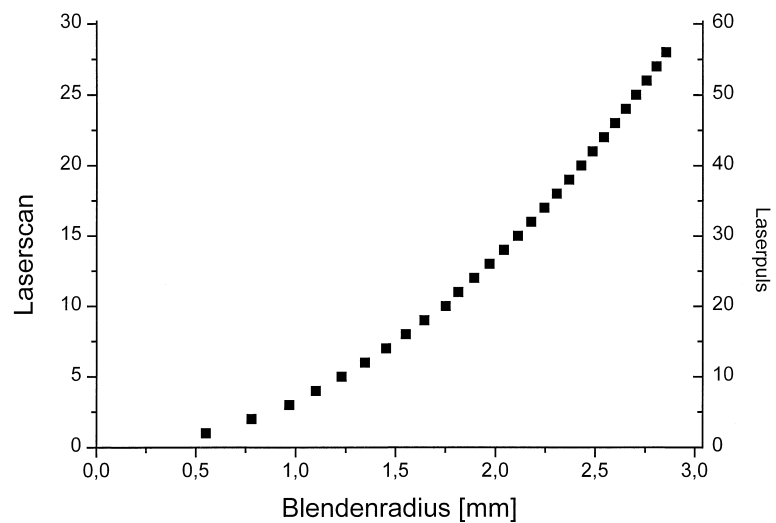


Abb. 3 ▲ Blendeneinstellung pro Laserscan (links) bzw. Laserpuls (für großflächige Strahlprofile, rechts) und der sich daraus ergebende Strahldurchmesser auf der Kornea für eine 3-dpt-Myopiebehandlung

Fixationsring untersucht. Die Bestimmung der Abtragtiefe erfolgte zum einen direkt durch ein unterhalb der Probe angebrachtes Pachymeter (Abb. 2), zum anderen indirekt über die Auswertung der vom Laser in die Probe hineinabbladierten Lentikel mit Hilfe eines Scheitelbrechwertmeßgeräts (Nidek LM 770).

Als Probematerial für die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen und die Bestimmung des Abtragverhaltens dienten 2 mm dicke PMMA-Plättchen.

Zur Beurteilung der optischen Qualität der bestrahlten Areale, insbesondere dem Einfluß von Strahlinhomogenitäten, sind rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen jedoch nicht geeignet. Denn bereits wenige µm Abtragdifferenz auf einigen mm² Ablationsfläche lassen sich nur sehr schwer auf den Aufnahmen entdecken. Sie können jedoch eine signifikante optische Wirkung auf die behandelte Oberfläche ausüben.

Deshalb wurde ein Computerprogramm entwickelt, welches die Ablationsmuster der bestrahlten Proben simuliert und das Abtragprofil, entsprechend überhöht, graphisch darstellt. Das Programm berechnet aus einer vorgegebenen Energiedichteverteilung eines Excimerlaserpulses und der Blendeneinstellung im Strahlführungsarm den entsprechenden Materialabtrag auf der Korneaprobe. Beispielfhaft wurde für alle Rechnungen eine Myopiebehandlung von -3 dpt und 6 mm Durchmesser durchgeführt. Die Blendeneinstellung/Laserpuls bzw. Laserscan und damit der jeweilige Strahldurchmesser auf der Kornea sind in Abb. 3 dargestellt. Als Abtragrate, in Abhängigkeit von der Laserenergiedichte, wurde der Mittelwert aus eigenen und bereits publizierten Daten [2-6, 8, 9] zugrunde gelegt.

Ergebnisse

Abb. 4 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von einer PMMA-Probe, die mit dem Nidek-Lasersystem im PTK-Modus bestrahlt wurde. Der Krater hat eine Tiefe von etwa 25 µm und wurde mit 100 Scans bei einer Energiedichte von 150 mJ/cm² pro Puls erzeugt. Der Kraterboden zeichnet sich durch seine extrem glatte Oberfläche aus. Abdrücke einzelner Laserpulse sind nicht zu erkennen.

Der Einfluß der Ablationswolke (Debris) auf die Effizienz der Abtragung erwies sich als sehr empfindlich gegenüber einer Veränderung äußerer Parameter. Mit zunehmender Repetitionsrate zeigte sich trotz konstant gehaltener Laserenergiedichte eine starke Abnahme der Abtragtiefe. Die Ursache dafür liegt in einer bei steigender Repetitionsrate dichter werdenden Ablationswolke (Abb. 5). Durch einen schwachen laminaren Luftstrom (1 m/s) können jedoch

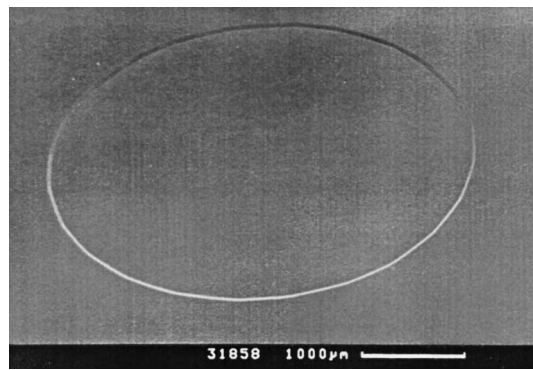


Abb. 4 ◀ Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von einer PMMA-Probe, die mit 100 Scans bei einer Energiedichte von 150 mJ/cm² pro Puls bestrahlt wurde. Der Krater hat eine Tiefe von etwa 25 µm

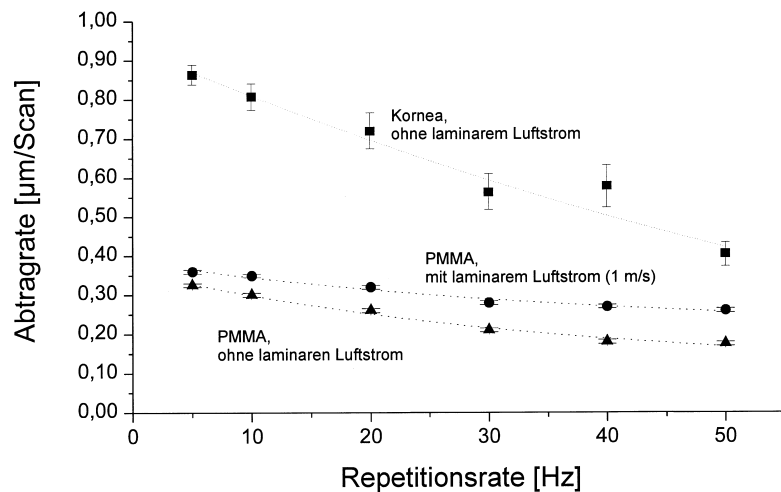


Abb. 5 ▲ Abhängigkeit des Abtragverhaltens von der Pulsfolgefrequenz an PMMA und Korneagewebe. An PMMA wurde zusätzlich der Einfluß eines laminaren Luftstroms (1 m/s) entlang der Probenoberfläche untersucht. Die Energiedichte wurde bei der gesamten Untersuchung konstant gehalten (130 mJ/cm²)

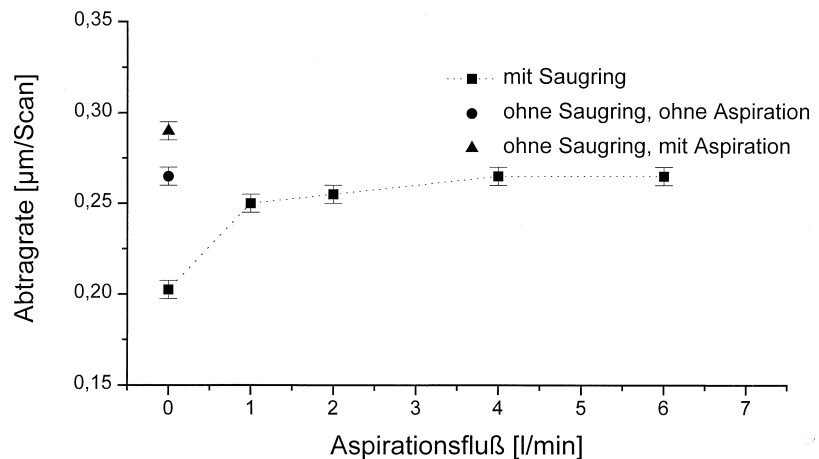
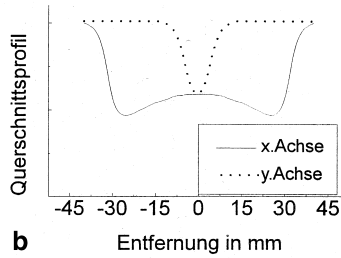
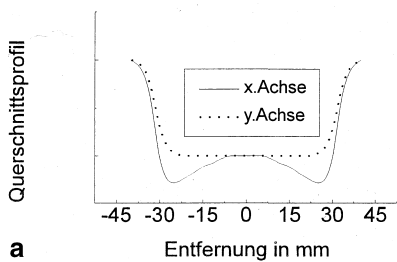
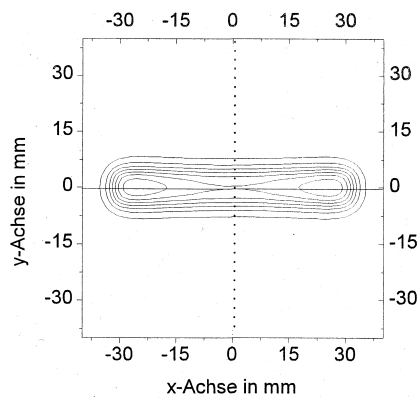
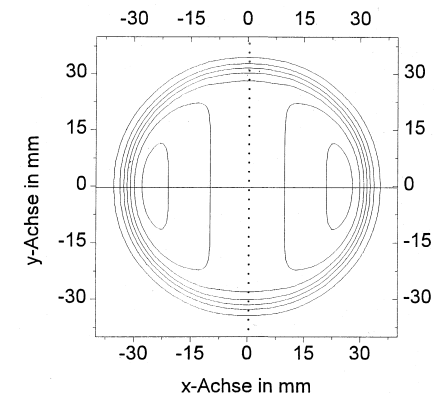
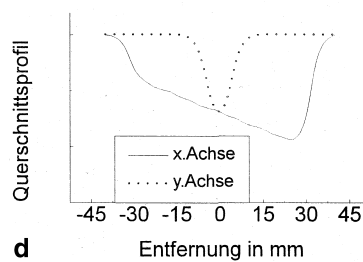
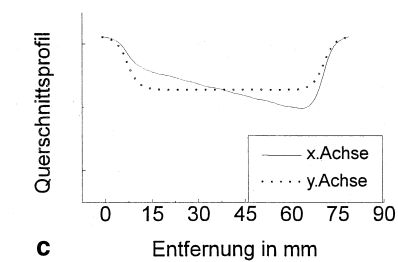
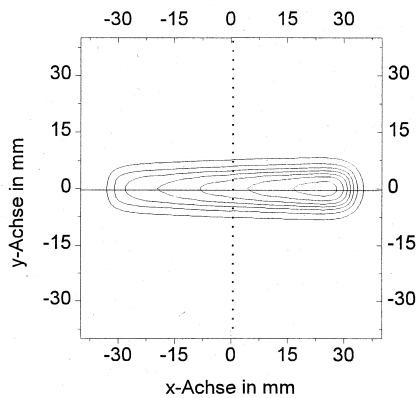
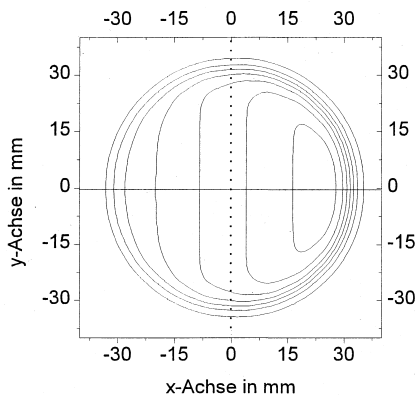


Abb. 6 ▲ Auswirkungen bei der Verwendung eines Fixationsrings mit unterschiedlichem Aspirationsfluß auf die Abtragrate



a

b



c

d

Abb. 7a–d ◀ **Topographie und Schnittbild von Excimerlaserstrahlprofilen, wie sie typischerweise nach längerem Gebrauch auftreten können. Oben: konkav-zylindrische Intensitätsverteilung für großflächiges (a) und spaltförmiges (b) Strahlprofil. Unten: dezentrierte Intensitätsverteilung für großflächiges (c) und spaltförmiges (d) Strahlprofil**

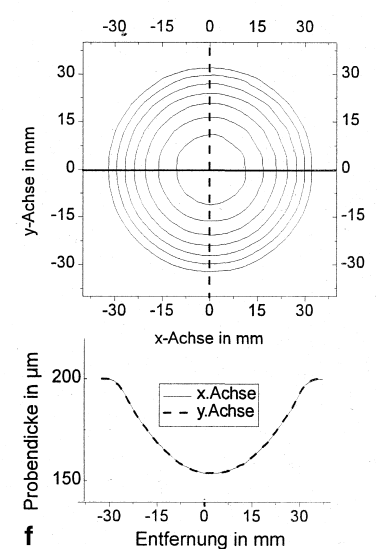
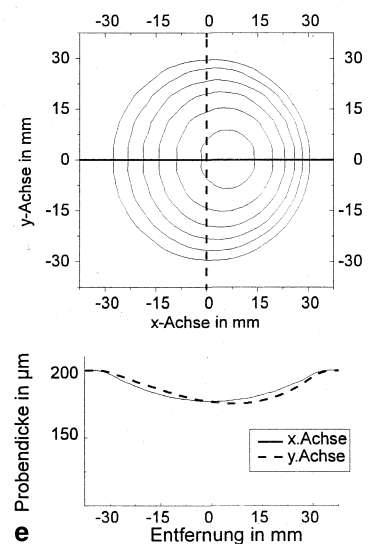
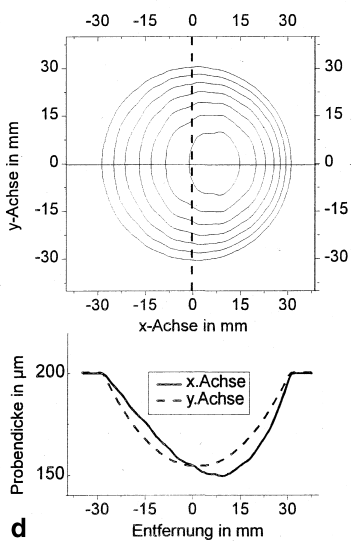
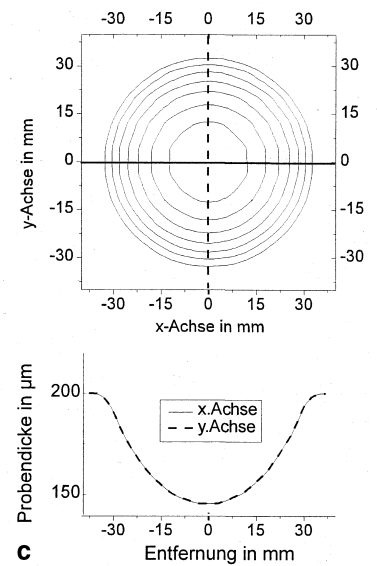
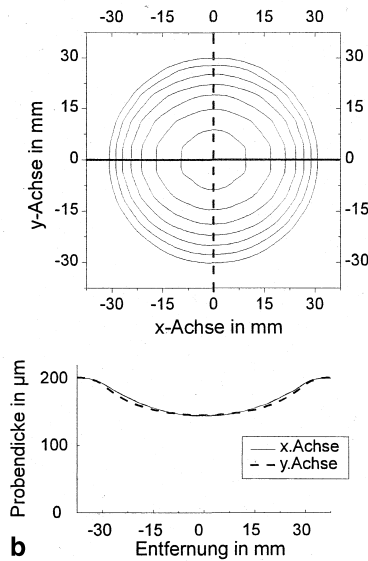
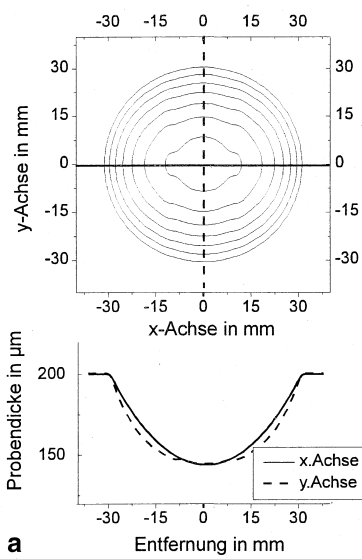
die Ablationsprodukte schneller aus der Strahlachse entfernt und die Abtrageeffizienz damit erhöht werden, wie dies in Abb. 5 am Beispiel von PMMA demonstriert wurde.

Einen ähnlich starken Einfluß übt die Verwendung des Fixationsrings auf die Abtrageeffizienz aus. Erst bei einem Aspi-

rationsfluß von mehr als 3 l/min können die Ablationsprodukte genügend rasch abgesaugt werden, so daß sich die gleiche Abtrageeffizienz einstellt wie bei der freien Probenoberfläche. Abtrageeffizienzen, wie sie bei freier Probenoberfläche und laminarem Luftstrom erreicht werden, können beim Einsatz des Fixationsrings selbst

bei maximalem Aspirationsfluß (6 l/m) nicht erzielt werden (Abb. 6).

Abb. 7 zeigt eine Auswahl von simulierten Strahlprofilen von Excimerlaserpulsen mit großflächigem, runden (Abb. 7a, c) bzw. spaltförmigem Strahlprofil (Abb. 7b, d), wie sie typischerweise nach längerem Gebrauch des Lasersys-



stems auftreten können. In Abb. 7 a, b sind die Auswirkungen auf das Strahlprofil dargestellt, wie sie sich bei einer Abnutzung der Laseroptik (Spiegel, Linsen, Fenster) oder auch zu starkem Abbrand der Anregungselektroden im Laserkopf ergeben können. Abb. 7 c, d zeigen die Auswirkung einer Dejustage der Strahlformungsblende bzw. der Strahlachse des Laserstrahls.

Die Auswirkungen auf die bearbeitete Oberfläche zeigt Abb. 8. Das zylindrische großflächige Strahlprofil erzeugt in der Probe ein ebenso zylindrisches Lentikel (Abb. 8 a). Durch das Scannen des spaltförmigen Strahlprofils wird die Zylinderstruktur zu einem großen Teil herausgemittelt (b). Eine zusätzliche Rotation des Laserstrahlprofils führt schließlich wieder zu einem radialsymmetrischen Abtrag (c). Analog sind die Auswirkungen der dezentrierten Strahlprofile. Das großflächige Strahlprofil abliert ein stark asymmetrisches Lentikel in die Probe hinein (d). Beim spaltförmigen Strahl wird auch hier die ursprüngliche Asymmetrie durch das Scannen teilweise (e) und durch die zusätzliche Rotation vollständig (f) aufgehoben.

die Zylinderstruktur jedoch zu einem großen Teil herausgemittelt (Abb. 8 b). Eine zusätzliche Rotation des Laserstrahlprofils führt schließlich wieder zu einem radialsymmetrischen Abtrag (Abb. 8 c). Analog sind die Auswirkungen der dezentrierten Strahlprofile. Das großflächige Strahlprofil abliert ein stark asymmetrisches Lentikel in die Probe hinein (Abb. 8 d). Beim spaltförmigen Strahl wird auch hier die ursprüngliche Asymmetrie durch das Scannen teilweise (Abb. 8 e) und durch die zusätzliche Rotation vollständig (Abb. 8 f) aufgehoben. Das Resultat ist ein symmetrisches, sphärisches Lentikel in der Probenoberfläche.

Abb. 8 a–f ▲ Auswirkungen der in Abb. 6 gezeigten Laserstrahlprofile auf die bearbeitete Oberfläche. Das zylindrische großflächige Strahlprofil erzeugt in der Probe ein ebenso zylindrisches Lentikel (a). Durch das Scannen des spaltförmigen Strahlprofils wird die Zylinderstruktur zu einem großen Teil herausgemittelt (b). Eine zusätzliche Rotation des Laserstrahlprofils führt schließlich wieder zu einem radialsymmetrischen Abtrag (c). Analog sind die Auswirkungen der dezentrierten Strahlprofile. Das großflächige Strahlprofil abliert ein stark asymmetrisches Lentikel in die Probe hinein (d). Beim spaltförmigen Strahl wird auch hier die ursprüngliche Asymmetrie durch das Scannen teilweise (e) und durch die zusätzliche Rotation vollständig (f) aufgehoben

Diskussion

Das hier vorgestellte Lasersystem zeichnet sich durch eine besonders homogene Abtragung der bestrahlten Proben aus. Darüber hinaus erweist sich das Strahlführungsprinzip gegenüber der Verwendung großflächiger Strahlprofile als überaus tolerant gegenüber Inhomogenitäten in der Intensitätsverteilung im Laserstrahl.

Der Einfluß der Ablationswolke auf das Abtragverhalten des Laserstrahls hat sich als außerordentlich stark herausgestellt. Ausführlichere Messungen haben gezeigt [1], daß die Ablationswolke eines Laserpulses bis zu 1 s nach dem Pulsende noch signifikante Abschwächungen für den nachfolgenden Laserpuls zeigt. Bei höheren Repetitionsraten entsteht somit eine dichtere Wolke oberhalb der Probe, die den Laserpuls entsprechend stärker abschwächt. Im klinischen Einsatz ist es daher unbedingt erforderlich, die Kalibrierung des Lasergeräts sorgfältig auf alle Parameter abzustimmen, welche die Ausbreitungsdynamik der Ablations-

fragmente beeinflussen können. Neben der Repetitionsrate und der Verwendung eines Fixationsrings gehört dazu auch das Vorhandensein von Luftströmungen an der Probenoberfläche. Bei hohen Repetitionsraten erhöht ein laminarer Luftstrom von 1 m/s die Effizienz der Abtragung um fast 100%. Es ist daher nicht auszuschließen, daß auch kleinere Luftströmungen oder Verwirbelungen, etwa durch offen stehende Türen oder Klimaanlageanlagen, zu einer signifikanten Beeinflussung des refraktiven Ergebnisses beitragen können, wenn etwa die Kalibrierung unter anderen Umgebungsparametern durchgeführt wird als die anschließende Behandlung der Patienten. Es ist zu erwarten, daß die Beeinflussung der Ablationswolke auf das Abtragverhalten bei großflächigen Strahlprofilen sicher noch stärker sein wird als bei scannenden Systemen, da pro Laserpuls deutlich mehr Gewebe abgetragen wird und jeder nachfolgende Laserstrahl sich nicht aus der Strahlachse seines Vorgängers heraus bewegt.

Detaillierte Untersuchungen zur Ausbreitungsdynamik der Ablationswolke müssen zeigen, ob die Unterkorrektur im zentralen Bereich der Kornea (Central island formation), wie sie im klinischen Einsatz von Lasersystemen mit großflächigem Strahlprofil beobachtet wurde [7], auf die Absorption der Laserstrahlung durch die Ablationsfragmente zurückzuführen ist.

Literatur

1. Dörbecker Ch, Lubatschowski H, Lohmann S, Ruff C, Kermani O, Ertmer W (1994) **Influence of the ablation plume on the removal process during ArF-excimer laser photoablation.** Proc SPIE 2632:2–9
2. Fantès F, Waring III GO (1989) **Effect of excimer laser radiant exposure on uniformity of ablated corneal surface.** Lasers Surg Med 9:533–542
3. Fuxbrunner A, Hemo I, Lewis A, Zauberman H, Blau D, Polotsky D (1990) **Controlled lens formation with unapertured excimer lasers: use with organic polymers and corneal tissues.** Appl Opt 29:5380–5386
4. Kitai MS, Popkov VL, Semchishen A, Kharizov AA (1991) **The physics of uv laser cornea ablation.** IEEE J Quant Electron QE-27: 302–307
5. Kriegerowski M, Bende T, Seiler T, Wollensak J (1990) **Ablationsverhalten verschiedener Hornhautschichten.** Fortschr Ophthalmol 87:11–13
6. Krueger RR, Trokel SL (1985) **Quantitation of corneal ablation by ultraviolet laser light.** Arch Ophthalmol 103:1741–1742
7. Lin D (1994) **Corneal topographic analysis after excimer photorefractive keratectomy.** Ophthalmology 101:1432–1439
8. Puliafito CA, Wong K, Steinert RF (1987) **Quantitative and ultrastructural studies of excimer laser ablation of the cornea at 193 and 248 nanometers.** Lasers Surg Med 7:155–159
9. Shimmick JK, Minnerlyn CR, Clapham TN (1991) **Axial and transverse displacement tolerances during excimer laser surgery for myopia.** Proc SPIE 1423:140–153