

Ablationsprofile in der kornealen refraktiven Laserchirurgie

Gegenwärtige und zukünftige Konzepte

Die Vorhersagbarkeit von Ergebnissen refraktiv-laserchirurgischer Eingriffe an der Hornhaut hängt neben physiologisch-optischen Parametern, wie der Refraktion und den optischen Elementen des Auges, Hornhaut und Linse, auch von einer Reihe technischer Faktoren ab. Hierzu gehören die Berechnung von Ablationsprofilen und Laserpositionen, die Messung und Zentrierung der Behandlung sowie die Effizienz der Eye-tracking-Systeme [4,5,6]. Dabei stellt die Berechnung und Wahl des Ablationsprofils ein zentrales Element dar. In den letzten Jahren sind eine Reihe verschiedener Ansätze entwickelt worden, die alle zum Ziel haben, optische Fehler des Auges effizient zu behandeln, ohne dabei die Qualität des Sehens zu beeinträchtigen.

Wir unterscheiden heute zwischen auf der Hornhautform basierenden Ablationsprofilen und solchen, welche die gesamte Optik des Auges berücksichtigen. Allen Ablationsprofilen (mit Ausnahme des „Ray tracing“) ist die Verwendung theoretischer Augenmodelle mit unterschiedlichen Annahmen und Messdaten gemein. Diese Augenmodelle unterliegen ständiger Weiterentwicklung und Verbesserung, werden im Rahmen dieser Übersichtsarbeit aber nicht gesondert behandelt (■ **Tabelle 1**).

Auf der gesamten Optik basierende Ablationsprofile

„Klassisches“ Ablationsprofil

Das auf der Munnerlyn-Formel basierende lentikelförmige Ablationsprofil stellt das erste und älteste in der refraktiven Laserchirurgie dar. Es wurde 1988 vorgeschlagen und bald bei der photorefraktiven Keratektomie (PRK) und auch bei der Laser-in-situ-Keratomileusis (LASIK) eingesetzt [21]. Hierbei wird allein die subjektive Refraktion des Patienten zugrundegelegt. Es handelt sich um ein seit Jahren etabliertes Ablationsprofil, welches für sphärozyklindrische Korrekturen einfach zu berechnen ist, jedoch die asphärische Form der Hornhaut nicht berücksichtigt und aufgrund der Natur der Näherung nur für den paraxialen Raum, also für kleine optische Zonen geeignet ist.

Wellenfrontoptimiertes Ablationsprofil

Seit längerem ist bekannt, dass Wellenfrontfehler höherer Ordnung nach refraktiv-chirurgischen Eingriffen zunehmen [10,17,22,23,26]. Kohnen et al. [14] untersuchten die optischen Aberrationen nach myopen und hyperopen LASIK-Behandlungen und zeigten, dass bei myopen Korrekturen primär positive sphärische Aberrationen und bei Hyperopenbehandlungen

gen primär negative sphärische Aberrationen induziert werden. Neben der sphärischen Aberration kommt es aber auch zu einer Zunahme des Astigmatismus höherer Ordnung (4. Zernike-Ordnung), wiederum mit einem negativen Vorzeichen bei der Myopiekorrektur und mit einem positiven bei der Hyperopiebehandlung. Beide Formen haben einen signifikanten Einfluss auf das Sehvermögen [2]. Wellenfrontoptimierte Ablationsprofile wurden eingeführt, um diese Zunahme zu kompensieren [20a]. Zielsetzung des wellenfrontoptimierten Ablationsprofils ist es, den natürlichen physiologischen Zustand des zu operierenden Auges zu erhalten und nicht durch einen refraktiven Eingriff zu verändern.

Bei einigen Laserherstellern hat dieses optimierte Ablationsprofil mittlerweile das „klassische“, auf der Munnerlyn-Formel basierende Profil abgelöst. Dabei liegen die Unterschiede vor allem dort, wo auch die sphärische Aberration zum Wirken kommt, nämlich in der Peripherie der behandelten Zone (■ **Abb. 1**). Gegenüber der wellenfrontgeführten Behandlung bietet die wellenfrontoptimierte Behandlung den Vorteil, dass die aufwändige Aberrometrie und die Interpretation der Wellenfrontmessung, welche dem weniger erfahrenen Chirurgen häufig schwerfällt, nicht notwendig sind. Die Autoren setzen dieses Ablationsprofil zurzeit routinemäßig am Nichtführungsau-

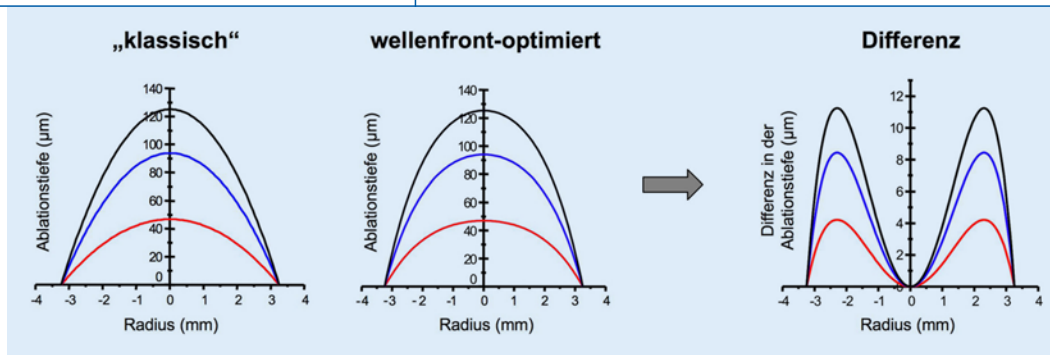


Abb. 1 Erstellung eines topographiegeführten Ablationsprofils

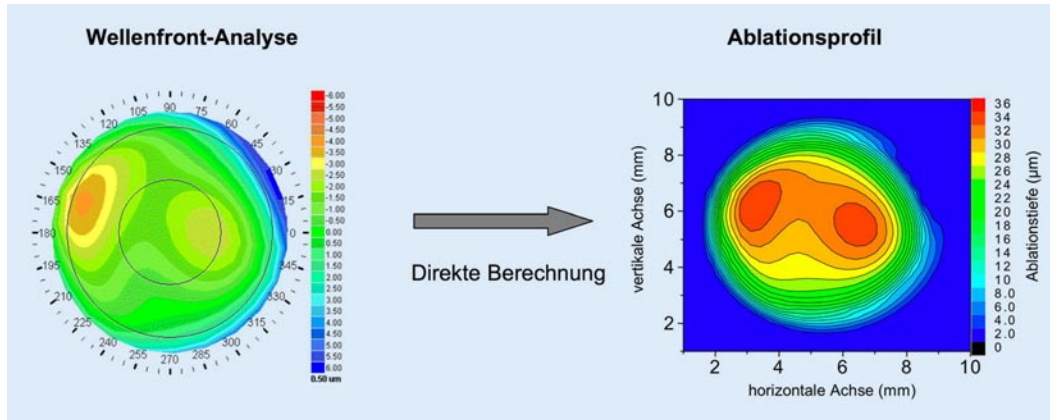


Abb. 2 Unterschied zwischen dem „klassischen“ Munnerlyn'schen und dem wellenfrontoptimierten Ablationsprofil

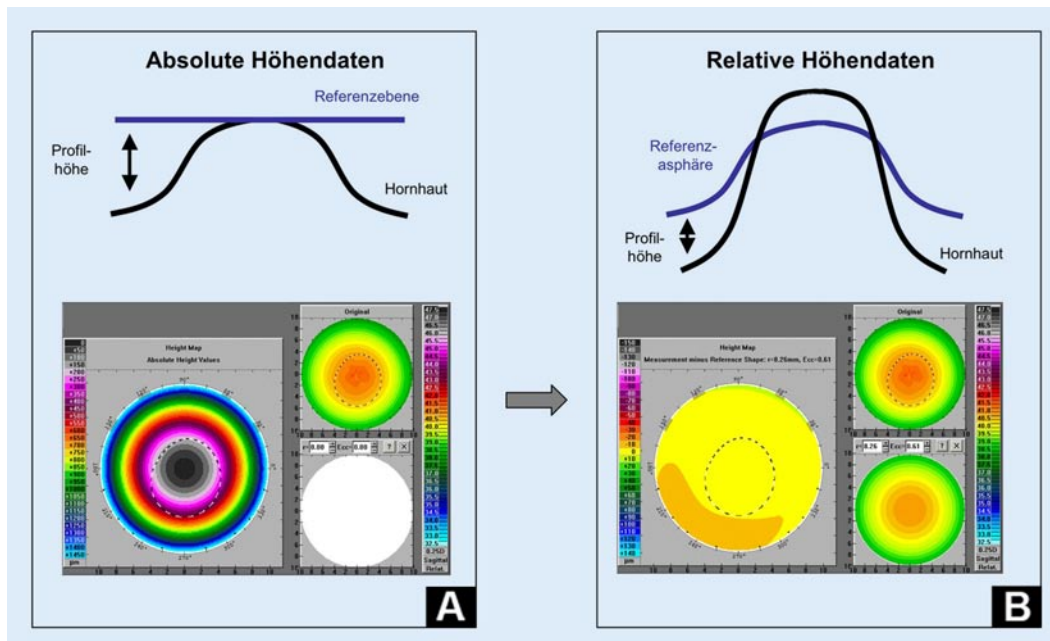


Abb. 3 Erstellung eines wellenfrontgeführten Ablationsprofils

ge ein. Die zugrundeliegende Überlegung ist, dass vor allem die induzierte sphärische Aberration maßgeblich für die verminderte Qualität der optischen Abbildung verantwortlich ist und dass die bei diesem Ablationsprofil nicht berücksichtigten übrigen Aberrationen in

ihrer Gesamtheit weniger ins Gewicht fallen als die sphärische Aberration alleine. Dies bedeutet, dass das Ziel der wellenfrontoptimierten Behandlung darin besteht, die präoperativ vorhandenen optischen Verhältnisse des zu operierenden Auges zu belassen.

Klinische Daten, die die Vorteile dieses Ablationsprofils bei der Myopiekorrektur dokumentieren, gehen auf eine von der FDA kontrollierte Studie zurück. Die refraktive Erfolgsrate, definiert über den Prozentsatz der operierten Augen, die sich 6 Monate nach der Operation im In-

tervall von $\pm 0,5$ dpt um die Zielrefraktion befinden, liegt bei über 80%. Dies wird heute als Standard angesehen. Bemerkenswert ist ein Anstieg des postoperativen Visus um eine Snellen-Linie oder mehr gegenüber dem präoperativen Visus in über 60% der operierten Augen. Auch das mesopische Sehen verbesserte sich signifikant, was über eine Patientenbefragung eruiert wurde.

Wellenfrontgeführte Ablationsprofile

Seit der ersten wellenfrontgeführten Behandlung 1999 durch Seiler rückt das wellenfrontgeführte Ablationsprofil zunehmend als „Goldstandard“ für die Erstbehandlung in den Vordergrund [13,18,19]. Die wellenfrontgeführte Behandlung ist, ähnlich wie die topographiegeführte, auf die individuellen Fehler des Auges zugeschnitten, berücksichtigt aber im Gegensatz zu letzterer die Fehler der gesamten Optik. Die zurzeit gebräuchlichsten Messsysteme sind der Hartmann-Shack-Sensor und das Tscherning-Aberrometer. Beiden ist gemein, dass Laserstrahlen durch die Optik des Auges geführt werden und deren durch die individuelle Optik bedingte Ablenkung gemessen wird. Im Falle des Hartmann-Shack-Sensors wird der von der Netzhaut gestreute Lichtstrahl über eine Mikrolinsenstruktur als Punktmuster abgebildet, beim Tscherning-Aberrometer wird ein Punktmuster auf die Netzhaut projiziert. Die entstandene Matrix wird jeweils von einer Kamera festgehalten. In einem nächsten Schritt wird die dadurch erhaltene individuelle Wellenfront mittels Zernike-Polynomen approximiert und daraus direkt das Ablationsprofil berechnet (■ **Abb. 2**). Es handelt sich also streng genommen auch hier um eine Näherung, welche aber aufgrund der hohen Anzahl der einbezogenen Polynome eine bisher unerreichte Präzision aufweist.

Die wellenfrontgeführte Behandlung ist zurzeit eines der am häufigsten benutzten Ablationsprofile und wird von allen großen Laserherstellern angeboten.

Obwohl in den ersten Jahren der Einführung dieses Ablationsprofils die Qualität des retinalen Bilds insbesondere unter mesopischen Bedingungen im Vorder-

Zusammenfassung · Abstract

Ophthalmologie 2006 · 103:175–183
DOI 10.1007/s00347-006-1316-9
© Springer Medizin Verlag 2006

M. Mrochen · F. Hafezi · M. Jankov · T. Seiler

Ablationsprofile in der kornealen refraktiven Laserchirurgie. Gegenwärtige und zukünftige Konzepte

Zusammenfassung

Die Vorhersagbarkeit und Qualität der Ergebnisse nach kornealer refraktiver Laserchirurgie wird von einer Reihe von Faktoren bestimmt, unter denen die Berechnung und Wahl des Ablationsprofils einen zentralen Stellenwert einnimmt. Unser in den letzten Jahren stetig wachsendes Verständnis der physiologisch-optischen Eigenschaften des Auges hat zur Entwicklung verschiedener Strategien bei der Erstellung von Ablationsprofilen geführt. In dieser

Übersichtsarbeit werden die gängigen und gegenwärtig gebrauchten Ablationsprofile mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen erläutert sowie ein Ausblick auf zukünftige Methoden zur Berechnung des optimalen Ablationsprofils gegeben.

Schlüsselwörter

Refraktive Laserchirurgie · LASIK · Ablationsprofile · Wellenfrontprofile · Q-Faktor · Ray tracing

Ablation profiles in corneal laser surgery. Current and future concepts

Abstract

The predictability and quality of results in corneal refractive laser surgery are determined by a number of factors. Here, the calculation and choice of the ablation profile represent central elements. Our growing knowledge about the physical and optical properties of the eye in recent years has led to the development of different strategies in the generation of ablation profiles. This review describes the currently used ab-

lation profiles with their advantages and disadvantages and provides an outlook on future methods for the calculation of ablation profiles.

Keywords

Refractive laser surgery · LASIK · Ablation profiles · Wavefront profiles · Q value · Ray tracing

Tabelle 1

Übersicht Ablationsprofile

Auf der Hornhaut basierend	Vorteile	Nachteile
Q-Faktor	Verwendet HH-Krümmung und -Asphärizität, erhält die prolate HH-Form, große optische Zonen, spezifisch für induzierte Aberrationen	Keine intraokularen Strukturen
Topographiegeführt	Individuelle HH-Form, HH-Irregularitäten berücksichtigt, prolate HH-Form möglich, vor allem bei starken Irregularitäten eingesetzt	Keine intraokularen Strukturen, Ungenauigkeit der aktuellen Systeme
Auf der gesamten Optik basierend		
Klassisches Ablationsprofil	Einfache Berechnung, paraxiale Optik, etablierte Methode	Gilt nur für kleine optische Zonen, HH-Krümmung und -Asphärizität nicht berücksichtigt, nur sphärozyklindrische Korrekturen, keine intraokularen Strukturen
Wellenfrontoptimiert	Präkompensation systematischer Wellenfrontfehler, Erhalten des physiologischen Zustands	Annahme von nur einer optisch brechenden Fläche, Ungenauigkeit der Messung, keine intraokularen Strukturen, nur rotationssymmetrische Aberrationen
Wellenfrontgeführt	Alle optischen Aberrationen des gesamten Auges	Annahme von nur einer optisch brechenden Fläche, keine intraokularen Strukturen, HH-Form nicht berücksichtigt
„Ray tracing“	Berücksichtigt alle optischen Aberrationen des gesamten Auges, korneale Topographie und Biometrie	Zurzeit noch höheres Risiko von Messfehlern
HH Hornhaut.		

grund stand, wurde von verschiedener Seite propagiert, nun einen Weg gefunden zu haben, die Optik des Auges so zu verfeinern, dass das Auflösungsvermögen des Auges nahe an die Schwelle geführt werden kann, die die Natur über den Photorezeptorabstand definiert hatte („Adlerauge“). In den folgenden Jahren jedoch wurde erkannt, dass dieser Zustand nur bei einem Bruchteil der Patienten (etwa 5–20%) eintrat. Die Gründe hierfür sind vielfältiger Natur und liegen unter anderem in der Laser-Gewebe-Wechselwirkung, im individuellen Heilungsverlauf der Hornhaut, in den durch den LASIK-Schnitt induzierten Aberrationen und in Mikrodezentrierungen bei der Ablation von Sphäre und Zylinder (z. B. Zyklorotation) begründet. Auch ist einfach die Tatsache verantwortlich, dass der Vorgang des „Sehens“ das Verarbeitungsergebnis höherer Zentren ist.

Ungeachtet dieser Unwägbarkeiten bietet die wellenfrontgeführte Behandlung heute einen deutlichen Vorteil: die in den frühen 1990er Jahren häufig beobachteten unerwünschten Nebenwirkungen in Form von „Halos“ und Blendung unter mesopischen Bedingungen können heute

zumindest auf dem präoperativen Niveau gehalten und in vielen Fällen sogar verbessert werden [1].

Die kritische Frage des wellenfrontgeführten Ablationsprofils besteht darin herauszufinden, welche Augen vorhersehbar von dieser Behandlung profitieren. Bisherige Studien weisen darauf hin, dass Augen, die einen mittleren Wellenfrontfehler höherer Ordnung von mehr als $0,3 \mu\text{m}$ aufweisen (rmsh = „root mean square of higher order aberrations“, OSA-Notation, 7-mm-Pupille) bei Verwendung des wellenfrontgeführten Profils am ehesten mit einer Verbesserung der Optik rechnen können. Bessere visusrelevante Metriken sind in der Entwicklung und müssen in prospektiven Studien erprobt werden.

Die optischen Aberrationen nehmen stark mit dem Durchmesser des Strahlengangs durch das Auge zu und spielen erst ab Durchmessern von 4 bis 5 mm eine wesentliche Rolle. Im zentralen Bereich wird, basierend auf dem „klassischen“ Profil, auch bei wellenfrontgeführten Profilen nur der sphärisch-zyklindrische Refraktionsfehler korrigiert. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass die Behandlung

der zentralen Hornhaut die postoperative Refraktion festlegt, während die Behandlung der mittleren Peripherie der Hornhaut die Qualität des postoperativen Sehens bestimmt. Hier liegt der wesentliche Vorteil asphärischer Profile.

Auf der Hornhaut basierende Ablationsprofile

Topographiegeführtes Ablationsprofil

Topographiegeführte Ablationsprofile werden bereits seit mehreren Jahren von verschiedenen Laserherstellern angeboten und mit wechselndem Erfolg angewendet [11,12,15]. Basierend auf einer topographischen Messung der Hornhaut wird eine Höhenkarte berechnet, und die relativen Höhendaten werden – bezogen auf eine Referenzasphäre – bestimmt. Diese Differenzkarte wird mittels Polynomen approximiert und daraus oder auch direkt aus der Differenzkarte das Ablationsprofil berechnet, welches zusammen mit Refraktionsdaten angewendet wird (■ Abb. 3). Es handelt sich also um ein der individuellen Hornhautkontur angepasstes Profil, wel-



Aus ACRIMED wird WaveLight



Eine neue Zukunft für bewährte Qualität!

Das Berliner Unternehmen ACRIMED steht seit mehr als 10 Jahren für qualitativ hochwertige Produkte und einen ausgezeichneten Kundenservice.

Nun wird ACRIMED Teil der WaveLight AG und gemeinsam garantieren wir diesen Qualitätsstandard auch für die Zukunft.

Die Verschmelzung der beiden Unternehmen ermöglicht eine anwender- und patientenorientierte Zusammenarbeit für eine erfolgreiche Zukunft.

Nähere Informationen erhalten Sie unter: www.wavelight-laser.com oder an unserem Messestand auf der AAD, Stand Nr. 212.

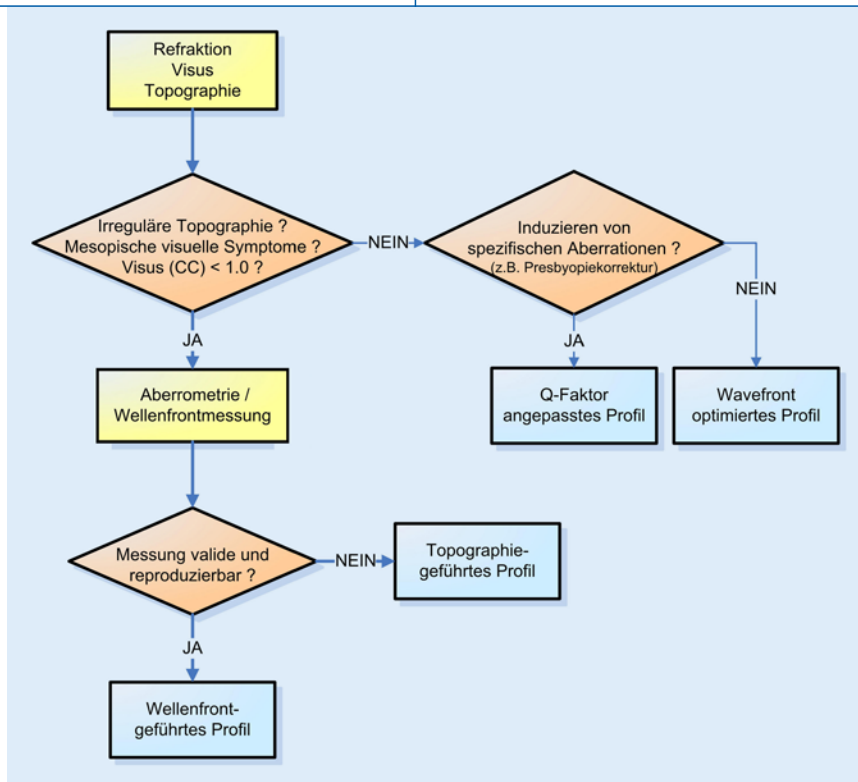


Abb. 4 ▲ Entscheidungsprozess für die Auswahl des Ablationsprofils

ches auch die Wellenfrontfehler, die von der Hornhautvorderfläche herrühren, mit einbezieht. Vereinzelt wird auch von „kornealer Wellenfront“ gesprochen, was eher irreführend ist und nur die Informationen der Höhenkarte beinhaltet. Das topographiegeführte Profil ist bei der Reduktion starker Irregularitäten der Hornhautvorderfläche von Vorteil, z. B. bei Narbenzuständen, irregulärem Astigmatismus nach Keratoplastiken und Kataraktoperationen (Hafezi et al., persönliche Mitteilung), bei dezentrierter Ablation, kleiner optischer Zone oder „Central steep islands“ nach refraktiver Chirurgie, aber auch bei einfachem asymmetrischem Astigmatismus [7,8]. Hier reduziert es die zum Teil massiven Irregularitäten und Aberrationen. Für primäre Behandlungen ist ein topographiegeführtes Ablationsprofil nur in Ausnahmefällen geeignet, da die ideale Form der Hornhaut im Einzelfall eben nicht nur von den Aberrationen und Irregularitäten der Hornhautvorderfläche abhängt, sondern oft ein Gleichgewicht von Hornhaut und Linse vorliegt, bei dem sich die jeweiligen Aberrationen ausgleichen. Die einseitige Reduktion kornealer Aberrationen kann manchmal also zur Zunahme der Gesamtaberrationen führen [25].

Q-Faktor-angepasstes Ablationsprofil

Die wellenfrontgeführte Behandlung führt nur bei Vorliegen stärkerer Gesamtaberrationen des zu operierenden Auges zu einer signifikanten Reduktion – oder anders ausgedrückt – zur Verbesserung der Optik. Diese Konstellation findet sich aber nur in etwa 20% der Fälle. In allen anderen Fällen stellt sich also eher die Frage nach einer optimalen Erhaltung der bestehenden Optik (mit Ausnahme des refraktiven Fehlers), bedenkt man insbesondere die bestehende neuronale Verarbeitung in den höheren Zentren, die auf diese Optik ausgelegt ist. Das Korrelat der refraktiven Änderung ist die Krümmung der Hornhaut, während die Asphärizität die Qualität der Abbildung ausmacht. Damit ist auch schon das strategische Ziel der Q-Faktor-optimierten Ablation definiert: Erhaltung der präoperativen Asphärizität und die beabsichtigte Induktion von speziellen Aberrationen z. B. bei der Astigmatismus- und Presbyopiebehandlung.

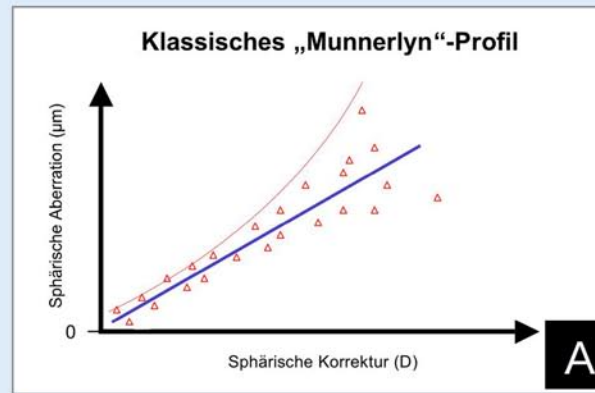
Der Q-Faktor determiniert als Messgröße die Asphärizität der Hornhaut. Diese liegt in der Normalbevölkerung zwi-

schen $-0,8$ und $0,4$, mit einer deutlichen Häufung bei $-0,2$ [3]. Die menschliche Hornhaut zeigt also natürlicherweise eine leicht prolate Form, das heißt, sie flacht sich vom Zentrum zur Peripherie hin leicht ab ($Q < 0$). Jedoch werden in der Normalbevölkerung auch oblate Hornhautformen gemessen, bei denen sich die Hornhaut zur Peripherie hin aufsteilt ($Q > 0$). Es konnte in der Vergangenheit gezeigt werden, dass der refraktiv-laserchirurgische Eingriff zur Korrektur der Myopie die Asphärizität in Richtung der oblaten Hornhaut verschiebt. Die Verschiebung des Q-Faktors ist hierbei streng mit der Korrekturhöhe korreliert und kann Werte von über $1,0$ annehmen [9,10]. Mehrere wissenschaftliche Arbeitsgruppen haben die ideale postoperative Asphärizität der Hornhaut im Modell berechnet und sind zu dem Schluss gekommen, dass ein Q-Faktor von etwa $-0,4$ angestrebt werden sollte [16,24]. Diese am Modell gewonnene Empfehlung ist zwar für den „Durchschnittsfall“ richtig, im Einzelfall jedoch eher in Frage zu stellen. Dabei ist wiederum zu berücksichtigen, dass Aberrationen, die in der Linse entstehen, oft von denen der Hornhaut teilweise kompensiert werden. Dieser Kompensationsmechanismus ist allerdings vom Alter abhängig. So muss mit einer deutlichen Reduktion ab einem Alter von etwa 45–50 Jahren gerechnet werden [20,28].

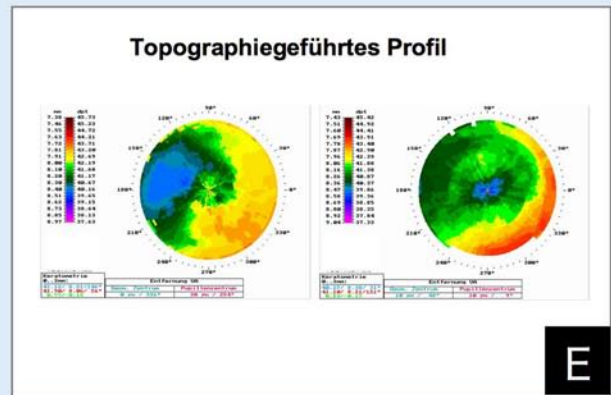
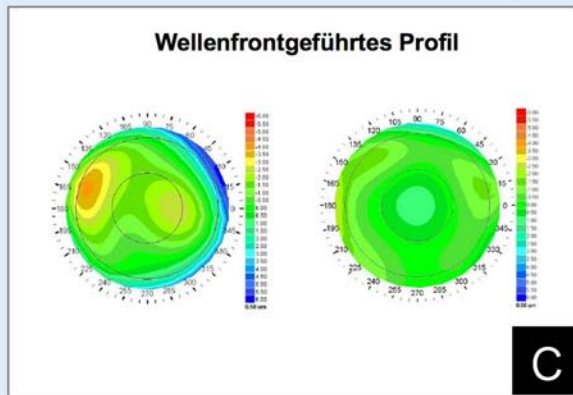
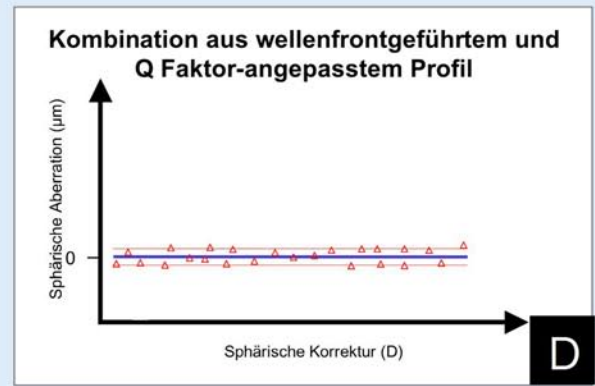
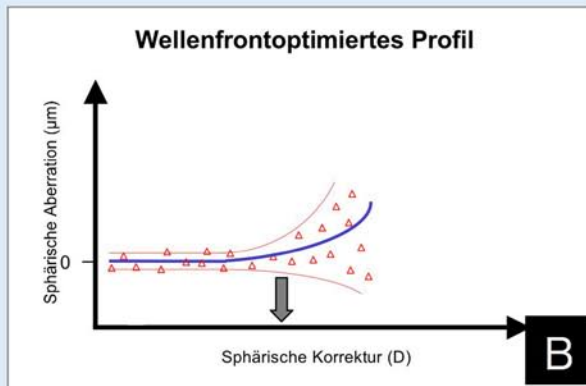
Für die Praxis bedeutet dies, dass eine präoperativ prolate Hornhaut zumindest erhalten und die durch die Operation induzierte Verschiebung in Richtung oblate Hornhaut bei der Myopiekorrektur verhindert werden sollte. Falls eine Optimierung jedoch angestrebt wird (z. B. bei Vorliegen einer präoperativen starken Nachtmyopie), dann sicherlich eher in Richtung einer prolaten Hornhautform. Andererseits konnten Somani et al. kürzlich zeigen, dass eine negative korneale Asphärizität als singulärer Faktor postoperativ weder das Kontrastsehen noch den bestkorrigierten Visus signifikant verbessern konnte [27]. Dies mag dadurch bedingt sein, dass die Hornhautasphärizität z. B. durch die Asphärizität der Linse kompensiert wird.

In einer ersten Studie verglichen Koller et al. die Q-Faktor-optimierte mit der wellenfrontgeführten Behandlung an paa-

Vergangenheit



Gegenwart



Zukunft

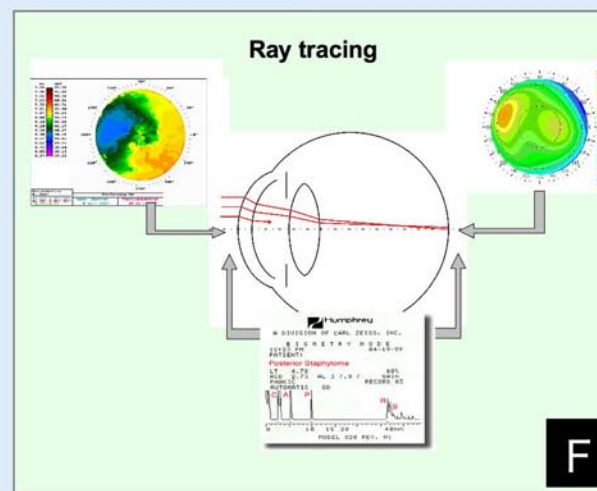


Abb.5 ▲ Übersicht über frühere, heute eingesetzte und zukünftige Ablationsprofile und deren klinischen Einsatz

rigen Augen (Koller et al., private Mitteilung 2005). Sowohl was die refraktiven als auch die visuellen Ergebnisse anbetrifft, fanden sie keinen signifikanten oder klinisch relevanten Unterschied. Lediglich die comaartigen Aberrationen wurden wellenfrontgeführt besser behandelt. Die durch die Operation induzierte Veränderung des kornealen Q-Faktors war zwar bei der Q-Faktor-optimierten Behandlung wesentlich weniger ausgeprägt als bei der wellenfrontgeführten, jedoch wurde das Ziel der Erhaltung des präoperativen Q-Faktors nur bei Korrekturen bis zu -5 dpt erreicht.

Ein anderer Aspekt der kornealen Asphärizität betrifft die Astigmatismuskorrektur. Die Asphärizität ist nämlich nicht in allen Meridianen gleich und kann einen kornealen Astigmatismus verstärken oder aber auch abschwächen. Daraus folgt zwangsläufig, dass es zur Erzielung einer idealen asphärischen Hornhautform nicht genügt, nur den zentralen Astigmatismus mit dem Laser zu korrigieren, sondern dass eben auch die meridionale Differenz der Asphärizität berücksichtigt werden muss.

Zukünftige Ablationsprofile

„Ray tracing“

Beim „Ray-tracing-Profil“ handelt es sich um ein Ablationsprofil, welches sowohl hornhauttopographische Daten als auch Aberrometrie- und Biometriemesswerte berücksichtigt. Unter „Ray tracing“ versteht man die Verfolgung (Berechnung) von Lichtstrahlen durch ein optisches System wie das Auge. Basierend auf dem „Ray tracing“ lassen sich bestimmte optische Anordnungen optimieren, um eine bessere Qualität im gesamten optischen System zu erzielen. Die Besonderheit dieser Methode liegt vor allem darin begründet, dass im Gegensatz zu allen bisher verwendeten Ablationsprofilen kein „allgemeines“ Augenmodell als Grundlage für die Berechnung des Ablationsprofils verwendet wird, sondern dass die individuellen biometrischen und topographischen Daten herangezogen werden, um ein „individualisiertes“ Augenmodell zu erstellen, welches auf den jeweiligen Patienten zugeschnitten ist. Unter Berücksichtigung

aller dieser individuellen Daten wird nun ein Ablationsprofil erstellt, welches helfen soll, die Streuung der refraktiven Ergebnisse und die Qualität des retinalen Bilds für alle Pupillendurchmesser zu verbessern (■ Abb. 5f).

Diskussion

Die refraktive Laserchirurgie der Hornhaut hat in den letzten Jahren große Änderungen und Fortschritte erlebt. Zum Einen wurde das Umsetzen von Ablationsprofilen auf die Hornhaut mittels des Excimerlasers von den Ganzfeldlasern der ersten Generation über die „Scanning-slit“-Laser der zweiten Generation bis hin zu den heute gebräuchlichen „Flying-spot“-Lasern stetig präziser, zum Anderen sind die Ablationsprofile selber einer permanenten Verbesserung unterworfen. In ■ Abb. 4 ist ein Entscheidungsbaum dargestellt, der es dem refraktiven Chirurgen erleichtern soll, das jeweils bestgeeignete Ablationsprofil zu wählen. Das von dem „klassischen“ Ablationsprofil (■ Abb. 5a) ausgehende wellenfrontoptimierte Profil präkompensiert für die sphärische Aberration, welche einerseits durch den chirurgischen Eingriff selber induziert wird, andererseits aber auch in der Normalbevölkerung eine große Varianz zeigt (■ Abb. 5b). Wie ersichtlich wird, ist die Streuung der refraktiven Ergebnisse für geringe Korrekturen zunächst gering, nimmt dann aber deutlich mit Höhe der Myopie zu. Mit anderen Worten: das wellenfrontoptimierte Profil ermöglicht gute Resultate für die Gesamtheit des Patientenkollektivs, kann jedoch aufgrund der relativ großen Streuung gerade bei Myopiekorrekturen von mehr als -7 dpt zu unpräzisen Ergebnissen führen. In der Folge wurden daher weitere Ablationsprofile und Messtechniken etabliert, um dieser Streuung besser Herr zu werden: das wellenfrontgeführte Ablationsprofil (■ Abb. 5c) sowie das Q-Faktor-angepasste Profil (■ Abb. 5d). Jüngste Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei Patienten mit einem rmsh-OSA-Wert von mehr als $0,3 \mu\text{m}$ ($7,0\text{-mm}$ -Pupille) das wellenfrontgeführte Ablationsprofil eine geringere postoperative Streuung erzeugt (G. Kezirian, persönliche Mitteilung). Bei Patienten mit einem rmsh-OSA von weniger als $0,3 \mu\text{m}$ hingegen

ist eine Kombination aus wellenfrontoptimiertem oder Q-Faktor-angepasstem Ablationsprofil ausreichend (Seiler et al., persönliche Mitteilung). Ist eine Wellenfrontmessung aus technischen Gründen nicht möglich (Glaskörpertrübungen, Reflexionen einer intraokularen Linse, zu starke korneale Aberrationen), oder liegt ein Zustand nach komplizierter Viroperation (penetrierende Keratoplastik, Kataraktoperation, etc.) mit stark irregulärer Hornhaut vor, so sollte das topographiegeführte Ablationsprofil (■ Abb. 5e) eingesetzt werden.

Als zukunftsweisend kann sich die „Ray-tracing“-Methode erweisen (■ Abb. 5f). Während alle bisher vorgestellten Ablationsprofile zur Berechnung der gesammelten Daten auf standardisierte Augenmodelle zurückgreifen, soll es die „Ray-tracing“-Methode mittels Zusammenschluss der Aberrometriedaten, der topographischen Höhendaten und der biometrischen Daten erlauben, für den jeweiligen Patienten ein individualisiertes Augenmodell als Grundlage zur Berechnung des Ablationsprofils zu erstellen. Damit wäre eine weitere Quelle der Ungenauigkeit auf dem langen Weg zum perfektionierten Ablationsprofil ausgeschaltet.

Fazit für die Praxis

In den letzten Jahren wurden Ablationsprofile in der refraktiven Laserchirurgie bedeutend weiterentwickelt. Ausgehend vom „klassischen“, auf der Munnerlyn-Formel basierenden Ablationsprofil der ersten Jahre, kommen heute verschiedene, auf die individuelle Situation zugeschnittene Ablationsprofile zum Zuge: wellenfrontgeführte und wellenfrontoptimierte Ablationsprofile stellen mittlerweile Standards bei der Erstbehandlung dar, während topographiegeführte Ablationsprofile vorwiegend bei irregulärem Astigmatismus verschiedenster Ursache eingesetzt werden. In jüngster Zeit wurden Ablationsprofile entwickelt, welche die Asphärizität der Hornhaut stärker berücksichtigen (Q-Faktor-basiert), wobei sich diese noch in der klinischen Erprobung befinden. Als zukunftsweisend kann sich ein „Ray tracing“ der Optik erweisen.

Korrespondierender Autor

Dr. rer. nat. medic. Dipl. Ing. M. Mrochen



IROC, Institut für Refraktive und Ophthalmo-Chirurgie, Stockerstraße 37, 8002 Zürich, Schweiz
E-Mail: info@iroc.ch

Interessenkonflikt: F.H. hat keine finanziellen Interessen. T.S., M.J. und M.M. sind Berater der Firma Wavelight Laser Technologie, Erlangen, Deutschland. Trotz des möglichen Interessenkonflikts ist der Beitrag unabhängig und produktneutral.

Literatur

1. Alio JL, Montes-Mico R (2005) Wavefront-Guided versus Standard LASIK Enhancement for Residual Refractive Errors. *Ophthalmology* 112(2): 200–207
2. Applegate RA, Marsack JD, Ramos R, Sarver EJ (2003) Interaction between aberrations to improve or reduce visual performance. *J Cataract Refract Surg* 29(8): 1487–1495
3. Atchison DA, Smith G (2000) The optics of the human eye. Butterworth-Heinemann, Oxford, pp 13–16
4. Bueeler M, Mrochen M (2005) Simulation of eye-tracker latency, spot size, and ablation pulse depth on the correction of higher order wavefront aberrations with scanning spot laser systems. *J Refract Surg* 21(1): 28–36
5. Bueeler M, Mrochen M, Seiler T (2003) Maximum permissible lateral decentration in aberration-sensing and wavefront-guided corneal ablation. *J Cataract Refract Surg* 29(2): 257–263
6. Bueeler M, Mrochen M, Seiler T (2004) Maximum permissible torsional misalignment in aberration-sensing and wavefront-guided corneal ablation. *J Cataract Refract Surg* 30(1): 17–25
7. Hafezi F, Jankov M, Mrochen M, Wüllner C, Seiler T (2005) A new customized ablation algorithm for the treatment of central steep islands after refractive laser surgery. *J Cataract Refract Surg* (in press)
8. Hafezi F, Mrochen M, Iseli HP, Seiler T (2005) A 2-step procedure to enlarge small optical zones after photorefractive keratectomy for high myopia. *J Cataract Refract Surg* (in press)
9. Hersh PS, Shah SI, Holladay JT (1996) Corneal asphericity following excimer laser photorefractive keratectomy. Summit PRK Topography Study Group. *Ophthalmic Surg Lasers* 27(5 Suppl): S421–428
10. Holladay JT, Dudeja DR, Chang J (1999) Functional vision and corneal changes after laser in situ keratomileusis determined by contrast sensitivity, glare testing, and corneal topography. *J Cataract Refract Surg* 25(5): 663–669
11. Kanellopoulos AJ (2005) Topography-guided custom retreatments in 27 symptomatic eyes. *J Refract Surg* 21(5): 513–518
12. Knorz MC, Jendritza B (2000) Topographically-guided laser in situ keratomileusis to treat corneal irregularities. *Ophthalmology* 107(6): 1138–1143
13. Kohnen T, Bühren J (2004) [Current state of wavefront guided corneal surgery to correct refraction disorders]. *Ophthalmologie* 101(6): 631–645; quiz 646–647
14. Kohnen T, Mahmoud K, Bühren J (2005) Comparison of Corneal Higher-Order Aberrations Induced by Myopic and Hyperopic LASIK. *Ophthalmology* 112: 1692–1698
15. Kymionis GD, Panagopoulou SI, Aslanides IM, Platinis S, Astyrakakis N, Pallikaris IG (2004) Topographically supported customized ablation for the management of decentered laser in situ keratomileusis. *Am J Ophthalmol* 137(5): 806–811
16. MacRae S, Schwiegerling J, Snyder RW (1999) Customized and low spherical aberration corneal ablation design. *J Refract Surg* 15(2 Suppl): S246–248
17. Moreno-Barriuso E, Lloves JM, Marcos S, Navarro R, Llorente L, Barbero S (2001) Ocular aberrations before and after myopic corneal refractive surgery: LASIK-induced changes measured with laser ray tracing. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 42(6): 1396–1403
18. Mrochen M, Seiler T (2001) Grundlagen der wellenfrontgeführten refraktiven Hornhautchirurgie. *Ophthalmologie* 98(8): 703–714
19. Mrochen M, Krueger RR, Bueeler M, Seiler T (2002) Aberration-sensing and wavefront-guided laser in situ keratomileusis: management of decentered ablation. *J Refract Surg* 18(4): 418–429
20. Mrochen M, Iseli HP, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke HE, Seiler T (2004) Relevance of Wavefront Aberrations of the Human Eye in Corneal Laser Surgery. *Medical Laser Application* 19(3): 126–135
- 20a. Mrochen M, Donitzky C, Wuellner C, Loeffler J (2004) Wavefront optimized ablation profiles: theoretical background. *J Cataract Refract Surg* 30: 775–785
21. Munnerlyn CR, Koons SJ, Marshall J (1988) Photorefractive keratectomy: a technique for laser refractive surgery. *J Cataract Refract Surg* 14(1): 46–52
22. Oliver KM, Hemenger RP, Corbett MC, O'Brart DP, Verma S, Marshall J, Tomlinson A (1997) Corneal optical aberrations induced by photorefractive keratectomy. *J Refract Surg* 13(3): 246–254
23. Oshika T, Miyata K, Tokunaga T et al. (2002) Higher order wavefront aberrations of cornea and magnitude of refractive correction in laser in situ keratomileusis. *Ophthalmology* 109(6): 1154–1158
24. Schwiegerling J, Snyder RW (2000) Corneal ablation patterns to correct for spherical aberration in photorefractive keratectomy. *J Cataract Refract Surg* 26(2): 214–221
25. Seiler T, Dastjerdi MH (2002) Customized corneal ablation. *Curr Opin Ophthalmol* 13(4): 256–260
26. Seiler T, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke HE (2000) Ocular optical aberrations after photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism. *Arch Ophthalmol* 118(1): 17–21
27. Somani S, Tuan KA, Chernyak D (2004) Corneal asphericity and retinal image quality: a case study and simulations. *J Refract Surg* 20(5): 581–585
28. Wang Li, Santaella RM, Booth M, Koch DD (2005) Higher-order aberrations from the internal optics of the eye. *J Cataract Refract Surg* 31: 1512–1519

Glaukom-Forschungspreis

Der Glaukomforschungspreis wird ausgeschrieben durch die Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft e.V., gestiftet durch die Firma Pharm Allergan GmbH, Ettlingen, Dotation: 5.000 €. Der Preis, der auch geteilt werden kann, wird ausgelobt zur Würdigung wissenschaftlicher Arbeiten auf dem Gebiet der experimentellen und klinischen Glaukomatologie. Die Bewerbungen sind bis 15. Mai 2006 dem Schriftführer der DOG, c/o Univ.-Augenklinik, Mathildenstr. 8, 80336 München vorzulegen, Details: <http://www.dog.org/dog/preise.html>

Quelle:

Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft