

# Bildgebung in der refraktiven Hornhautchirurgie

Marcus Blum, Kathleen S. Kunert  
Erfurt

→ Zusammenfassung: Die Hornhaut ist der Teil des optischen Systems mit der höchsten Brechkraft. Dies macht sie zum Zielorgan in der refraktiven Chirurgie. Die genaue Darstellung ihrer Beschaffenheit ist vor wie auch nach einem chirurgischen Eingriff von grundlegender Bedeutung. Bei der Hornhauttopographie wird rechnergestützt eine dreidimensionale Karte der Hornhautoberfläche erzeugt, in der die Krümmung der Hornhautoberfläche und damit auch eventuelle Hornhautirregularitäten dargestellt werden. Dies kann nach dem Placidoprinzip als auch mit der Scheimpflugkamera geschehen. Das tomographische Verfahren der Scheimpflugfotografie erlaubt außerdem die Darstellung der hinteren Grenzfläche der Hornhaut. Diese Verfahren stellen ein unerlässliches Werkzeug zum präoperativen Ausschluss von krankhaften Hornhautveränderungen dar. Die korneale Pachymetrie bestimmt die Dicke der Hornhaut, die entscheidet, ob eine hornhautchirurgische Verfahren für die Korrektur der Ametropie überhaupt in Frage kommt. Im diesem Beitrag wird ein Überblick über die wesentlichen biometrischen, topografischen und bildgebenden Verfahren gegeben.

OPHTHALMO-CHIRURGIE 30: 191–194 (2018)

→ Summary: The cornea is part of the optical system and has the biggest refraction in the human eye. This makes it to the target of refractive surgery. The detailed analysis of the cornea is essential before and after surgery. One of the most important imaging techniques is the corneal topography which measures the curvature of the cornea. In addition, Scheimpflug tomography allows the visualisation of the anterior and posterior corneal surface. These techniques are crucial tools in preoperative screening for corneal pathologies. In addition, corneal pachymetry decides whether the patient is eligible for a corneal refractive procedure to correct the ametropia. This article gives an overview of the essential biometric and imaging equipment in screening of the refractive corneal patient.

OPHTHALMO-CHIRURGIE 30: 191–194 (2018)

→ Die Hornhaut ist der Teil des optischen Systems mit der höchsten Brechkraft. Dies macht sie zu einem wesentlichen Zielorgan in der refraktiven Chirurgie [1]. Bei einem refraktiv-chirurgischen Eingriff wird normalerweise völlig gesundes Gewebe behandelt. Aus diesem Grunde muss das Risiko eines refraktiven Eingriffs erheblich niedriger sein als das eines therapeutischen Eingriffs. Die präoperative Bildgebung dient zum Einen dazu, krankhafte Veränderungen sicher auszuschließen und damit mögliche Risiken zu identifizieren [2]. Zum Anderen sind ihre Ergebnisse die Basis für den Gewebeabtrag beim refraktivchirurgischen Vorgehen. Eine genaue Untersuchung mit bildgebenden Verfahren ist deshalb sowohl vor, als auch nach einem chirurgischen Eingriff von grundlegender Bedeutung [5].

## Anamnese und Visus

Bei der Anamneseerhebung kann sich der Chirurg nicht auf Krankheitssymptome beschränken, vielmehr ist eine genaue Befragung der sozialen Situation und der Motivation des Patienten unerlässlich, um die individuellen Erwartungen und Ansprüche zu erfassen. Stellen sich hierbei bereits „unerfüllbare“ Vorstellungen heraus (z. B. chirurgische „Heilung“ einer Amblyopie) muss der Arzt schonungslos aufklären und auf eine realistische Einschätzung der zu erreichenden Behandlungsergebnisse beim Patienten drängen [3]. Des Weiteren spielen berufliche Tätigkeiten und Perspektiven des Patienten eine wichtige Rolle. Spezifische Berufsgruppen, wie z. B. Polizei und Feuerwehrdienst, lassen zwar mittlerweile refraktive

Hornhauteingriffe zur Erlangung der Diensttauglichkeit zu. Diese Zulassungen sind jedoch oft an bestimmte Voraussetzungen geknüpft, wie z.B. präoperative Ausgangswerte von min. -5,0 dpt bis max. +3,0 dpt. Außerdem wird meistens eine postoperative Karenzphase von 12 Monaten bis zur Wiederherstellung der Tauglichkeit verlangt. Die Kenntnis dieser spezifischen Regelungen ist für den behandelnden Refraktivchirurgen unabdingbar. Trotz objektiv guten Behandlungserfolges drohen sonst weitreichende Konsequenzen bis hin zu juristischen Auseinandersetzungen.

Präoperativ ist neben der sowohl subjektiv als auch objektiv zu untersuchenden Refraktion die Stabilität der Werte von Bedeutung. Grundsätzlich wird von einer Stabilität ausgegangen, wenn das sphärische Äquivalent innerhalb der letzten 12 Monate um nicht mehr als 0,5 dpt schwankt. Eine mehrmalige Bestimmung mit zeitlichem Abstand ist sinnvoll, dabei sollte auf eine KontaktlinsenKarenz von mindestens 2 Wochen geachtet werden. Bei Hyperopie und zur sorgfältigen Messung und Bestimmung der Achsenlage beim Vorliegen eines Astigmatismus ist eine Messung in Zykloplegie zwingend erforderlich [13].

## Untersuchung der anatomischen Struktur

### Spaltlampenmikroskopie

Die wichtigste Untersuchung nach der Anamnese und der Visusbestimmung ist die sorgfältige Spaltlampenmikroskopie. Diese Untersuchung umfasst auch die Lider (Meibom-Drüsen), die periokulare Region (enge Lidspalte!), den Tränenfilm und die Bindehaut. Die Hornhaut als Zielorgan der chirurgischen Intervention wird zunächst in Übersicht bei niedriger Vergrößerung und direkter fokaler Beleuchtung untersucht. Das Randschlingennetz zeigt nach längerem Tragen von Kontaktlinsen häufig Veränderungen, Epithelunregelmäßigkeiten weisen auf Sicca-Probleme oder Basalmembrandystrophien hin.

Im tangentialen optischen Schnitt sind an der Spaltlampe Trübungen oder stromale Narben zu erkennen. Diese Untersuchungstechnik ist auch in der frühen postoperativen Phase nach refraktiver Hornhautchirurgie sowohl bei LASIK als auch bei SMILE sehr wichtig, um das Interface zu beurteilen [10, 12]. Debris, Fremdkörper und Mikrofalteln bis hin zu Infiltraten und Haze lassen sich sehr gut im regredienten Licht beobachten. In der späteren postoperativen Nachsorge muss auf eine mögliche Epitheleinwachsung geachtet werden [11].

### Konfokale in-vivo-Mikroskopie

Während die Spaltlampenmikroskopie in der klinischen Praxis in der Regel ausreicht, kann in schwierigen Fällen und bei wissenschaftlichen Fragestellungen für die genaue Beurteilung

der einzelnen Hornhautschichten eine konfokale In-vivo-Mikroskopie nützlich sein. Hierbei werden in der Frontalebene des Hornhautstromas mit einem Scanningverfahren Schnittbilder erstellt. Mit dieser Methodik kann auch das Endothel untersucht werden. Die Endothelzellfotografie und -zählung hat ihren Schwerpunkt allerdings mehr bei intraokularen refraktivchirurgischen Verfahren.

### Optische Kohärenztomographie

Durch die optische Kohärenztomographie (kurz „OCT“) sind auf den hochauflösenden Schnitten die Tiefenausdehnung z.B. einer Hornhauttrübung und die Kammerwinkelverhältnisse sehr gut darstellbar. Dies gilt in gleicher Weise für ultraschallbasierte Technologien wie das Ultraschall-Biomikroskop.

### Scheimpflugfotografie

Ernsthafter Konkurrent beider Verfahren ist die Scheimpflugfotografie, die berührungsfrei optische Schnittbilder des vorderen Augenabschnitts liefert. Durch Verbesserungen der Aufnahmetechnik in Kombination mit Vermessungen kann eine hochaufgelöste dreidimensionale Rekonstruktion der Hornhaut erreicht werden, welche die anatomische Struktur nicht nur abbildet, sondern auch quantitative Auswertungen erlaubt.

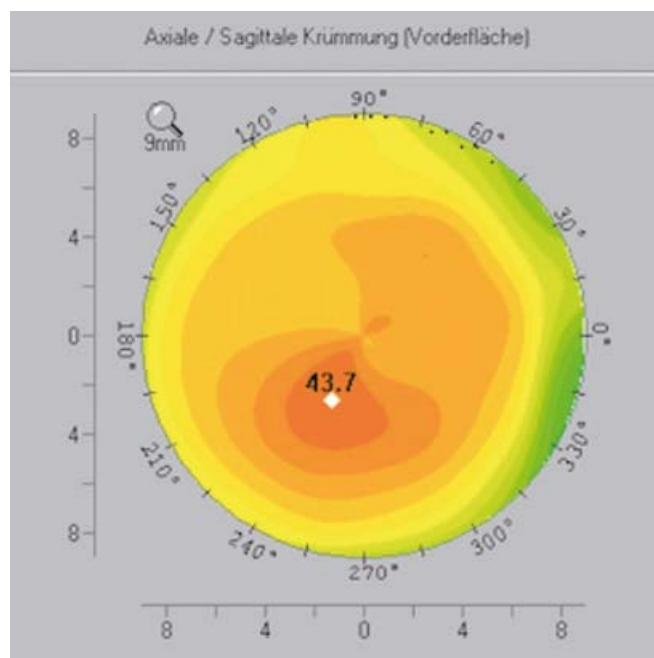


Abbildung 1: Hornhauttopographie mit asymmetrischem Sanduhrmuster und verkippten Achsen

## Biometrische Verfahren

### Pachymetrie

Zusätzlich zur rein anatomischen Bildgebung liefern viele Geräte biometrische Messwerte. Um Fehleinschätzungen und Messfehler zu vermeiden, muss der Untersucher die Fehlerquellen des jeweiligen Verfahrens kennen und Fluktuationen u.U. durch Mittelungen mehrerer Einzelmessungen ausgleichen. Deutlich wird dies am Beispiel der Hornhautdickenmessung (Pachymetrie), die sowohl mit Ultraschall, als auch mit laserbasierter Scanning-Technik und mit optischen Methoden wie Scheimpflugfotografie oder OCT durchgeführt werden kann [4]. Die Messergebnisse können je nach eingesetzter Technologie signifikant differieren und sind nicht beliebig untereinander austauschbar. Für den klinischen Alltag ist es daher notwendig, sich auf ein Messverfahren (z. B. Hornhauttomographie mittels Pentacam®) für präoperative Ausgangs- und Folgemessungen festzulegen.

### Korneale Topographieverfahren

Da die Hornhautoberfläche das am stärksten brechende Element des Auges ist, wurden schon sehr früh Geräte zur Messung der Hornhautkrümmung entwickelt (Keratometrie). Als korneale Topographieverfahren werden heute Methoden bezeichnet, welche die Hornhautkrümmung als Funktion des Hornhautortes darstellen. Die Messwerte werden typischerweise mit Falschfarbendarstellung als Karte ausgegeben. Das Spektrum reicht von blau („kalt“ = flacher Radius, geringere

Brechkraft) über grün („neutral“ = 43 dpt) bis rot („heiß“ = steiler Radius, höhere Brechkraft). Für den Untersucher ist die Kenntnis, wie die Umrechnung der Rohdaten in dieser Karte erfolgt, wichtig. Aus den gleichen Daten kann eine axiale (Standard) oder eine tangentielle Karte berechnet werden. Aus den Daten kann auch eine Berechnung der optischen Brechkraft der Hornhaut erfolgen und eine refraktive Karte erstellt werden [9, 14].

### Untersuchungsergebnisse unterschiedlicher Geräte nicht vergleichbar

Ähnlich wie bei der Pachymetrie können unterschiedliche Geräte von unterschiedlichen Herstellern mit unterschiedlicher Software durchaus unterschiedliche Ergebnisse liefern [7]. Der Untersucher sollte sich mit einem System vertraut machen, um eine konstante Entscheidungsfindung zu ermöglichen. Die Untersuchung am gleichen Gerät zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten erlaubt auch die Errechnung einer Differenzkarte z.B. vor und nach einem refraktiven Eingriff zur Messung des Behandlungseffekts.

### Verdächtige Muster

Die Bestimmung der Hornhauttopographie ist präoperativ ein essentielles Verfahren zum Erkennen von Kontraindikationen wie Keratokonus oder pelluzide marginale Hornhautdegeneration. Auch für die Abschätzung von Risiken wie extrem steile oder flache Hornhautreidien ist sie ein unerlässliches Werkzeug. Als „verdächtige Muster“ in der Topographie werden

asymmetrische Sanduhrmuster, eine inferiore Aufsteilung, verkippte radiale Achsen und auch ein Astigmatismus gegen die Regel benannt (Abbildung 1). Die Darstellung der Hornhautoberfläche verwendet keine Daten, die gleichzeitig die Hornhautdicke und damit die Wirkung auch der Rückfläche der Hornhaut berücksichtigen. Mit dem bereits oben genannten Prinzip der Scheimpflug-Fotografie ist dies hingegen möglich. Aus der großen Menge an Daten können sowohl eine dreidimensionale Rekonstruktion der Hornhaut als auch unterschiedliche Indices berechnet werden. Die Darstellung nach Belin-Ambrósio beschreibt dabei eine Kombination der Höhenkarten und der pachymetrischen Daten (keine HH-Krümmungskarten!).

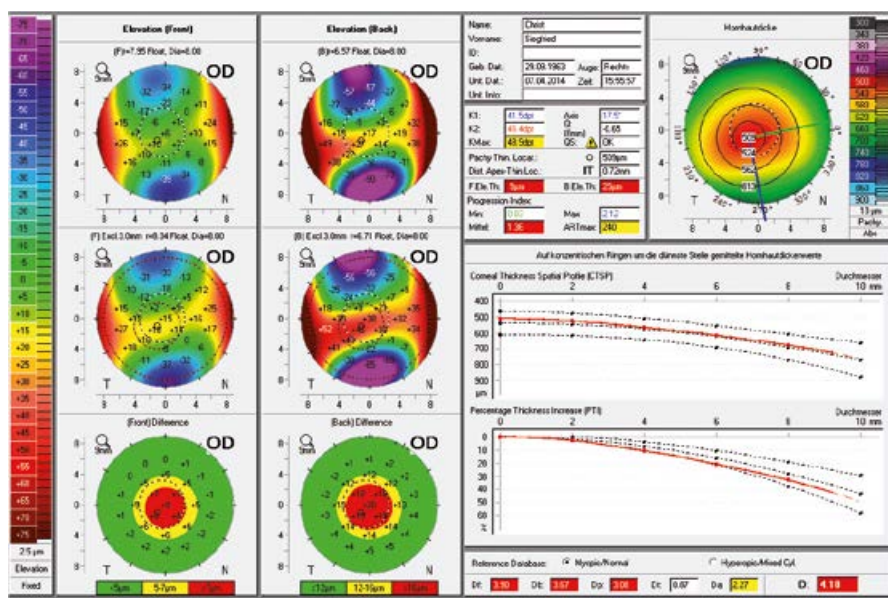


Abbildung 2: Belin-Ambrósio-Darstellung eines Keratokonusauges mit pathologischer Hornhautvorder- und -rückfläche bzw. Pachymetrie

Fünf Parameter wurden definiert:

- Df: deviation front elevation
- Db: deviation back elevation
- Dp: pachymetric progression
- Dt: thinnest point
- Dy: thinnest point placement

Aus diesen einzelnen Parametern wird über eine Regressionsanalyse ein finaler Parameter errechnet, der die wohl derzeit genaueste präoperative Vorhersage eines Forme-fruste-Keratokonius ermöglicht (Abbildung 2).

### Wellenfrontanalyse

Ein weiteres Verfahren mit einer ebenfalls farbkodierten Darstellung stellt die Wellenfrontanalyse dar. Die Messung der Wellenfront erfolgt in den meisten Fällen durch einen Hartmann-Shack-Sensor, der die Deformierung der Wellenfront als Funktion des Ortes innerhalb der Pupille darstellt [6]. Es ist wichtig zu verstehen, dass damit die Wellenfrontmessung nur für den jeweiligen Pupillendurchmesser gültig ist. Diese Eintrittspupille des Auges muss immer mit angegeben werden und im Gegensatz zur vorher beschriebenen

kornealen Topographie, die einen Durchmesser von bis zu 10 mm zeigt, zeigt die Wellenfrontkarte immer nur den Durchmesser der Pupille.

Bei der Darstellung der Wellenfrontanalyse werden alle Abbildungsfehler vom Tränenfilm bis zur Netzhaut zusammen erfasst und dann mit den nach Fritz Zernike benannten Polynomen mathematisch beschrieben. Klinisch werden Aberrationen niedriger und höherer Ordnung unterschieden, die durch einzelne Koeffizienten ausgedrückt werden können. Der mit der Wellenfront erfasste Fehler ist aber aufgrund der Interaktion der Aberrationen als eine Einheit aufzufassen, deren Interpretation Erfahrung benötigt. Auch sind Fluktuationen der Messung häufig und die kommerziell erhältlichen Geräte führen daher mehrere Messungen und deren Mittelung automatisch durch [8].

Werden die Daten einer Wellenfrontanalyse mit den topographischen Daten abgeglichen und kombiniert ausgewertet, können die kornealen und lentikulären Einzelkomponenten separiert werden. Die korneale Topographie und Pachymetrie sowie die wellenfrontgestützte Aberrometrie stellen die für die refraktive Chirurgie derzeit essentiellen Untersuchungsverfahren dar.

## Literatur

1. Barraquer JI (1996) The history and evolution of keratomileusis. *Int Ophthalmol Clin* 36: 1–7
2. Bühren J, Kook D, Yoon G et al (2010) Detection of subclinical keratomileusis by using corneal anterior and posterior surface aberrations and thickness spatial profiles. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 51: 3424–3432
3. Bühren J, Kohnen T (2011) Diagnostik in der refraktiven Chirurgie. In: *Refraktive Chirurgie* (Hrsg: Kohnen T) S 35–53. Springer, Berlin
4. Ho T, Cheng AC, Rao SK, Lau S, Leung CK, Lam DS (2007) Central corneal thickness measurements using OrbscanII, Visante, ultrasound and Pentacam pachymetry after laser in situ keratomileusis for myopia. *J Cat Refract Surg* 33: 1177–1182
5. Ibrahim O, Waring GO, Salah T, el Maghraby A (1995) Automated in situ Keratomileusis for myopia. *J Refract Surg* 11: 431–441
6. Liang J, Grimm B, Goelz S, Bille JF (1994) Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor. *J Opt Soc Am* 11: 1949–1957
7. Llorente L, Barbero S, Cano D, Dorronsoro C, Marcos S (2004) Myopic versus hyperopic eyes: axial length, corneal shape and optical aberrations. *Journal of Vision* 4: 288–298
8. Mirshahi A, Bühren J, Gerhardt D, Kohnen T (2003) In vivo and in vitro repeatability of Hartmann-Shack aberometry. *J Cat Refract Surg* 29: 2295–2301
9. Sandoval HP, de Castro LE, Vroman DT, Solomon KD (2005) Refractive Surgery Survey 2004. *J Cat Refract Surg* 31: 221–233
10. Sekundo W, Dick HB, Meyer CH (2005) Benefits and side-effects of bandage soft contact lens application after laser in situ keratomileusis: a prospective randomized study. *Ophthalmology* 112: 2180–2183
11. Sekundo W, Kunert K, Blum M (2011) Small incision femtosecond lenticule extraction (SMILE) for the correction of myopia and myopic astigmatism: Results of a 6 months prospective study. *Br J Ophthalmol* 95: 335–339
12. Sugar A, Rapuano CJ, Culbertson WW et al (2002) Laser in situ keratomileusis for myopia and astigmatism: safety and efficacy. A report by the American Academy of Ophthalmology. *Ophthalmology* 109: 175–187
13. Uthoff D (2017) Präoperative Diagnostik. In: *Praxis der refraktiven Chirurgie* (Hrsg: Uthoff D) S 34–66. Thieme, Stuttgart
14. Varley GA, Huang D, Rapuano CJ, Schallhorn S, Boxer Wachler BS, Sugar A (2004) LASIK for hyperopia, hyperopic astigmatism, and mixed astigmatism: a report by the American Academy of Ophthalmology. *Ophthalmic Technology Assessment Committee Refractive Surgery Panel, American Academy of Ophthalmology. Ophthalmology* 111: 1604–1617



### Korrespondenzadresse

Prof. Dr. med. Marcus Blum  
Augenklinik, Helios Klinikum Erfurt  
Nordhäuser Straße 74  
99089 Erfurt  
marcus.blum@helios-klinikum.de