

Andreas Böhm¹ · Markus Kohlhaas¹ · Ralf-Christian Lerche¹ · Jesper O. Hjortdal² · Niels Ehlers² · Jörg Draeger¹

¹ Universitäts-Augenklinik, Hamburg Eppendorf

² Universitäts-Augenklinik, Arhus

Biomechanische Untersuchung der Hornhautstabilität nach photorefraktiver Keratektomie*

Zusammenfassung

Hintergrund: Die PRK ist der heute am häufigsten durchgeführte refraktivchirurgische Eingriff. Um die Brechkraft der Hornhaut zu verändern, werden die vorderen Stromaannteile einschließlich der Bowman-Membran mit einem Laserstrahl verdampft. Diese Operation stellt einen erheblichen Eingriff in die Struktur der Hornhaut dar. Wie verändern sich die biomechanischen Eigenschaften einer so veränderten Hornhaut?

Material und Methode: Wir untersuchten 26 Patienten nach photorefraktiver Keratektomie und 25 unoperierte Probanden als Kontrollgruppe mit der von uns entwickelten druckinduzierten Hornhautstabilitätsmessung. Bei dieser Meßmethode werden die Probanden auf einer Kippliege um 180° gedreht, wodurch es zu einem intraokularen Druckanstieg von ca. 16 mmHg kommt. Vor und während des Kippmanövers wird der Hornhautkrümmungsradius mit dem Photokeratoskop bestimmt. Die Änderung des Hornhautkrümmungsradius unter Druckbelastung ist der Parameter für die Beurteilung der Hornhautstabilität.

Ergebnisse: Die zentrale Hornhaut flachte bei den PRK-Patienten um $0,038 \pm 0,056$ dpt (nicht signifikant) und bei den unoperierten Probanden um $0,187 \pm 0,045$ dpt ($p < 0,05$) ab. Bei Aufteilung der PRK-Patienten nach der Länge der postoperativen Zeit, zeigten die vor weniger als 1 Jahr operierten Hornhäute zentral eine geringe Versteilerung, wohingegen die vor 1 oder mehr Jahren operierten Hornhäute einen ähnlichen Verhalten im Druckversuche zeigten ($p < 0,05$).

Schlußfolgerung: Nach photorefraktiver Keratektomie ist die Stabilität der Hornhaut im Vergleich zu unoperierten Hornhäuten postoperativ verändert. Nach etwa 1 Jahr scheint es im Rahmen von stromalen Umbauvorgängen zu einer Normalisierung der Hornhautstabilität zu kommen.

Schlüsselwörter

PRK · Hornhautstabilität · Biomechanik

Die PRK ist der heute am häufigsten durchgeführte refraktivchirurgische Eingriff. Um die Brechkraft der Hornhaut zu verändern, werden die vorderen Stromaannteile einschließlich der Bowman-Membran mit einem Laserstrahl verdampft. Diese Operation stellt einen erheblichen Eingriff in die Struktur der Hornhaut dar. Es stellt sich die Frage, wie verändern sich die biomechanischen Eigenschaften einer solchen Hornhaut?

In der Literatur gibt es eine Reihe von Hinweisen auf eine veränderte Biomechanik nach PRK: Die Brechkraft bleibt postoperativ nicht stabil. Es kommt zu einer Regression des refraktiven Effekts (einer Verschiebung in Richtung Myopie), die bei hohen Myopiekorrekturen auch noch im 2. Jahr postoperativ zu beobachten ist [17, 19].

In einer experimentellen Arbeit von Litwin an Humanbulbi zeigte sich nach tiefen Laserablationen von 150 µm Hornhautstroma statt der erwarteten Abfla-

chung eine Versteilerung im Hornhautzentrum [8]. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf eine Strukturschwächung der Hornhaut bei hohen Ablationstiefen und macht die Notwendigkeit für ein Meßverfahren zur Beurteilung der Hornhautstabilität deutlich.

Material und Methode

Das von uns vorgestellte Meßverfahren der sog. druckinduzierten Hornhautstabilitätsmessung erlaubt eine Stabilitätsbeurteilung der Hornhaut in vivo.

Der Grundgedanke ist hierbei, durch die Erhöhung des intraokularen Drucks, eine Druckbelastung auf die Hornhaut auszuüben. Die Krümmungsradien der Hornhautvorderfläche vor und während der Druckerhöhung werden mit einem Photokeratoskop gemessen. Die gemessene Änderung des Hornhautkrümmungsradius unter der Druckbelastung ermöglicht die Beurteilung der Hornhautstabilität.

Bei dem Meßverfahren wird der Augeninnendruck durch Änderung der Körperlage erhöht. Der Proband wird mit einem Kippstisch um 180° in eine Kopf-unten-Position gedreht. Durch Flüssigkeitsverschiebung innerhalb des Körpers, dem sog. Fluid shift, kommt es dann zu der notwendigen Augeninnendruckerhöhung [5].

Sowohl in der Normalposition als auch in der Kippposition wurden von jedem Auge 4 Bilder erstellt. Die Messung der Hornhautto-

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

Dr. A. Böhm
Universitäts-Augenklinik Hamburg,
Martinistraße 52, D-20246 Hamburg

A. Böhm · M. Kohlhaas · R.-C. Lerche ·
J. O. Hjortdal · N. Ehlers · J. Draeger

Biomechanical investigation of corneal stability after PRK

Summary

Background: Photorefraktive keratectomy (PRK) is the most frequent refractive surgical procedure worldwide. The central corneal thickness is reduced due to removal of the anterior stroma, including Bowman's layer, with a laser beam. This procedure results in considerable alterations of the corneal structure. What does this mean for the mechanical properties of the cornea?

Methods: Intraocular pressure was increased via a 180° tilt. Before and during this procedure, corneal topography was measured by photokeratoscopy. We examined 26 patients after PRK and 25 controls who had not undergone any surgical procedure.

Results: The corneal center flattened by 0.038 ± 0.05 dpt ($P > 0.05$) in the PRK patients and by 0.187 ± 0.045 dpt ($P < 0.05$) in the control group. PRK patients within 1 year after operation showed a minimal central corneal steepening, whereas PRK patients after more than 1 year showed a reaction similar to that in normal corneas ($P < 0.05$).
Conclusion: Corneal stability is altered after PRK. After 1 year corneal stability seems to normalize due to stromal remodelling.

Key words

Corneal stability · PRK · Biomechanics

Originalien

pographie beider Augen (rechts vor links) erfolgte zwischen 1 und 3 min nach Erreichen der Kippposition. Der Augeninnendruck wurde mit dem Handapplanationsstomometer nach Draeger in der Normalposition und der Kippposition jeweils nach der letzten Topographiemessung bestimmt.

Die Originalvideobilder wurden, wie bei Bogan beschrieben, vor dem Prozessieren begutachtet und die Bilder mit den dünnsten regulären Ringen, als Zeichen für korrekte Fokussierung, ausgewählt [2]. Bilder mit inkompletten Ringen wurden nicht berücksichtigt. Meistens entsprachen pro Auge und Untersuchungszeitpunkt 2–3 Bilder diesen Kriterien und gingen in die Auswertung ein. Erfüllten 2 oder mehr Bilder diese Kriterien, wurden die Brechkraft und der Radius dieser Bilder gemittelt, um die beste Näherung der tatsächlichen Hornhauttopographie zu erhalten. Die topographische Dateninformation jedes Auges wurde anschließend mit einer neu entwickelten Software analysiert, die auf der harmonischen Fourier-Serienanalyse beruht [6].

In jeder Gruppe wurden 95% komplette topographische Daten von Ring 1 bis Ring 17 des Photokeratoskops (entsprechend einem 6-mm-Durchmesser) erhalten. Daten weiter peripher gelegener Ringe wurden nicht ausgewertet. Die durch den intraokularen Druckanstieg verursachten Veränderungen der Hornhauttopographie wurden mit einer Varianzanalyse (ANOVA) ausgewertet, wobei die durchgeführte Operation (keine, PRK) und die Ringnummer (3–17) die unabhängigen Variablen waren. Anschließend wurden multiple t-Tests ringweise durchgeführt. In beiden Gruppen wurde mittels Korrelations- und Regressionsanalyse überprüft, ob es einen Zusammenhang zwischen intraokularem Druckanstieg, zentraler Hornhautdicke, Alter, der axialen Bulbuslänge, der Hornhautbrechkraft in der Normalposition, Gewicht und Größe der Probanden und den durch den Druckanstieg hervorgerufenen Veränderungen der zentralen Hornhauttopographie (ermittelt aus den Ringen 3, 4 und 5) gab.

In den Augen nach photorefraktiver Keratektomie wurde mittels Korrelations- und Regressionsanalyse überprüft, ob die Ablationstiefe, der frühe keratometrische Effekt der

Operation und der postoperative Zeitpunkt der Untersuchung einen Einfluß auf die durch den Druckanstieg hervorgerufenen Veränderungen der zentralen Hornhaut hatten.

Patienten

PRK-Patienten

26 Patienten hatten mit einem Meditec-Aesculap-MEL-60-Excimerlaser eine Myopiekorrektur erhalten. Die beabsichtigte Korrektur betrug zwischen 3 und 12 dpt, mit einer durchschnittlichen Korrektur von 7 dpt. Es wurden ca. $9 \mu\text{m}$ Hornhautgewebe pro 1 dpt gewünschter Brechkraftänderung abgetragen. Der Durchmesser der Ablation betrug 5,0 mm. Das Durchschnittsalter in dieser Gruppe betrug 31 Jahre (zwischen 21 und 55), 16 Patienten waren Frauen und 10 Männer.

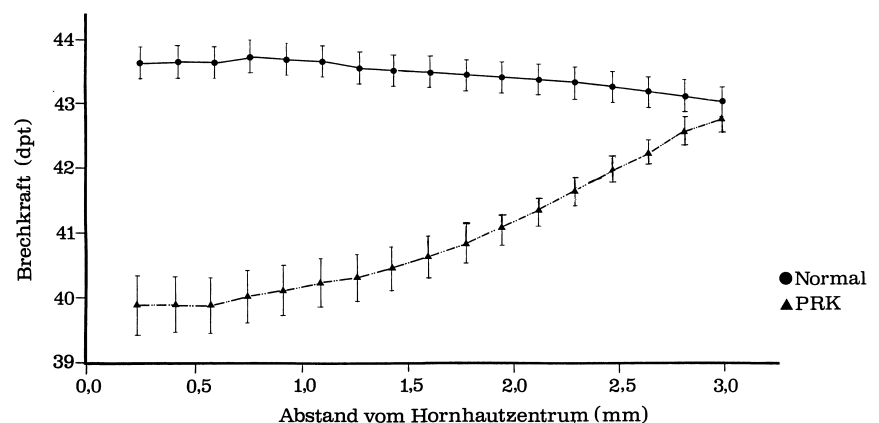
Normalprobanden (unoperiert)

Als Kontrollgruppe wurden 25 Probanden ohne refraktiven Eingriff untersucht. Das Durchschnittsalter betrug 32 Jahre (zwischen 19 und 49 Jahren), davon waren 9 Frauen und 16 Männer.

Ergebnisse

Es gab keine signifikanten Unterschiede im Druckanstieg zwischen den beiden Gruppen. Durch das Kippmanöver stieg der intraokulare Druck in der Gruppe der PRK-Patienten von $13,9 \pm 2,1$ auf $29,1 \pm 3,3$ mmHg und in der unoperierten Kontrollgruppe von $14,0 \pm 2,1$ auf $30,7 \pm 3,6$ mmHg. Die durchschnittlichen Hornhautbrechkraftwerte der einzelnen Keratopringe der unoperierten und operierten Hornhäute bei normalem intraokularem Druck zeigt Abb. 1. Hierbei zeigte sich, daß normale Hornhäute gering-

Abb. 1 ▼ Verteilung des sphärischen Äquivalents in der Normalposition



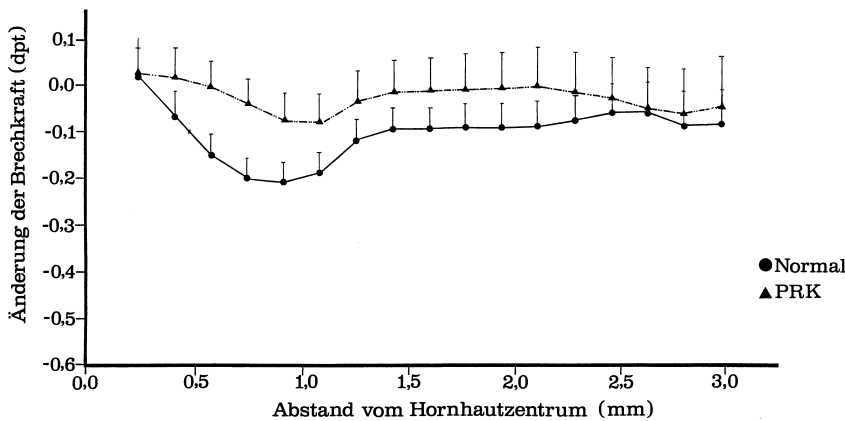


Abb. 2 ◀ Druckinduzierte Änderung der Hornhauttopographie dargestellt als Differenz der sphärischen Äquivalente in gekippter und in Normalposition

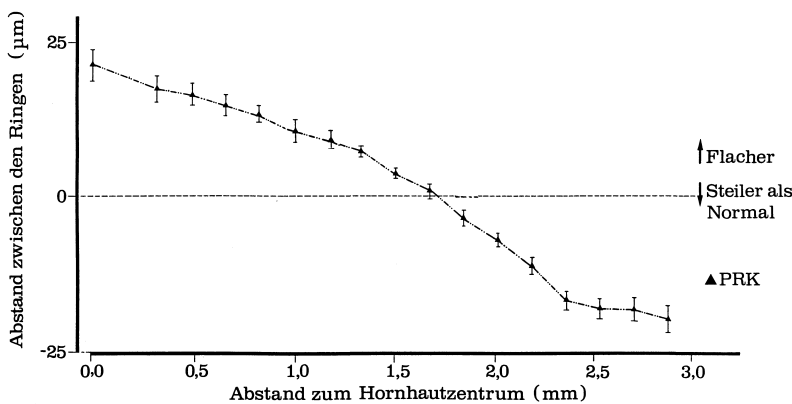


Abb. 3 ▲ Abstand zwischen benachbarten Ringen in operierten Augen in Normalposition, normalisiert durch Subtraktion des entsprechenden in Normalaugen gemessenen Ringabstands

gradig zur Peripherie hin abflachen. Augen nach PRK zeigten eine zentrale Abflachung, die zur Peripherie hin zwar geringer wurde, die Brechkräfte lagen aber innerhalb der gemessenen 6-mm-Zone noch unter den Werten der Normalaugen.

Die durch den Augeninnendruckanstieg hervorgerufene Brechkraftänderung des sphärischen Äquivalentes zeigt Abb. 2. Sowohl in normalen als auch in operierten Augen war die Brechkraftänderung im Hornhautzentrum (dieses entspricht in etwa Ring 1 und 2, einem Durchmesser von ca. 1,2 mm) am geringsten.

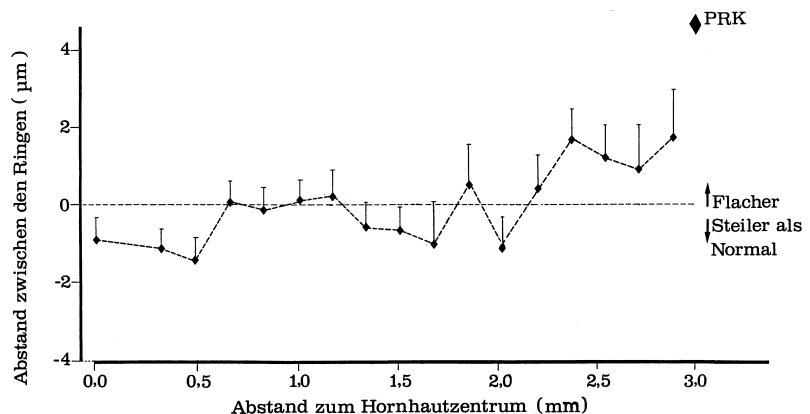
Bei der Berechnung der durchschnittlichen Brechkraftänderung aus den Ringen 3, 4 und 5 (Durchmesser 1,2–1,8 mm) zeigten beide Gruppen eine Abflachung. Die unoperierten Augen flachten um $0,187 \pm 0,045$ dpt ($p < 0,05$) ab. Die Augen nach photorefraktiver Keratektomie zeigten nur eine geringfügige

Abflachung von $0,038 \pm 0,056$ dpt ($p < 0,05$) und wurden somit unter Druckbelastung im Vergleich zu den Normalaugen steiler. In den weiter peripher gelegenen Regionen zeigten beide Gruppen eine Tendenz zur Abflachung, wobei die PRK-Hornhäute weniger als die unoperierten Hornhäute abflachten. Die Brechkraftänderungen waren insgesamt geringer als im Hornhautzentrum.

Zusätzlich zur Auswertung der mit der Photokeratoskopsoftware errechneten Brechkräfte wurden die Rohdaten von der RAD-Datei des TMS-1, die die Lage jedes reflektierten Rings beschreibt, untersucht. Diese Daten werden nur vom Abstand des Photokeratoskops zur Hornhautoberfläche beeinflusst. Abb. 3, 4 zeigen den durchschnittlichen Ringabstand benachbarter Ringe operierter Hornhäute nach Subtraktion des entsprechenden Ringabstands normaler Hornhäute, den sog. normalisierten Ringabstand. Ist dieser normalisierte Ringabstand positiv, ist die operierte Hornhaut flacher als die normale Hornhaut. Ist der normalisierte Abstand negativ, ist die operierte Hornhaut steiler.

Abb. 3 zeigt, daß die Hornhäute nach PRK zentral flacher sind als unoperierte Hornhäute. Zusätzlich sieht man, daß in der Peripherie ab einem Durchmesser von ca. 3,5 mm die PRK-Hornhäute steiler sind als die normalen Hornhäute. Analysiert man analog dazu die druckinduzierten Veränderungen des Ringabstands (Abb. 4), zeigt sich, daß Hornhäute nach PRK im Vergleich zu normalen Hornhäuten im Zentrum steiler und in der Peripherie ab einem Durchmesser von 4,2 mm geringfügig flacher werden.

Abb. 4 ▼ Änderung des Abstands zwischen benachbarten Ringen in operierten Augen, wobei der Ringabstand in der gekippten von dem Ringabstand in Normalposition subtrahiert wurde. Normalisiert durch Subtraktion der entsprechenden Änderung des in Normalaugen gemessenen Ringabstands



Diskussion

Mit der Zunahme refraktiver hornhautchirurgischer Eingriffe in den letzten Jahren wird auch in zunehmendem Maße postoperativ über eine mangelnde Stabilität der Hornhaut berichtet [3, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 21]. Vor diesem Hintergrund schien es zwingend notwendig, ein Verfahren zu entwickeln, das in der Lage ist, die Hornhautstabilität quantitativ zu messen.

Zahlreiche Autoren entwickelten in der Vergangenheit Meßverfahren zur Bestimmung der Hornhautstabilität, die sich jedoch meist nur *in vitro* durchführen ließen. So wurden anfänglich Hornhautstreifen einer Zugbelastung ausgesetzt und die resultierende Dehnung als Maß für die Stabilität gemessen [1, 12, 18]. Auch mit Bulbihälften, die in eine Metallkammer eingespannt wurden, wurde die Dehnung der Hornhaut in Abhängigkeit vom Augeninnendruck bestimmt [6, 22].

Normalprobanden

Von *In-vitro*-Experimenten ist bekannt, daß die intakte menschliche Hornhaut eine hohe Rigidität besitzt [1].

In der vorliegenden Studie wurden bei einem Druckanstieg von 13 auf 30 mmHg nur sehr geringe Brechkraftänderungen festgestellt. Im Zentrum flachte sich die Hornhaut meist um ca. 0,2 dpt ab. Auf den Krümmungsradius umgerechnet entspricht dies einer Zunahme des Radius um ca. 0,04 mm.

Frühere *In-vitro*-Studien an normalhydrierten Hornhäuten zeigten keine druckinduzierten Änderungen des zentralen Hornhautkrümmungsradius [9, 20], auch nicht bei einem Druckanstieg von 2 auf 100 mmHg [7].

Bei ähnlichen Kippliegenexperimenten mit rapider Drucksteigerung von 13 auf 25 mmHg konnten Feldman et al. 1989 keine signifikante Änderung des zentralen Hornhautkrümmungsradius an unoperierten Hornhäuten mit dem Keratometer nachweisen [4].

In Untersuchungen des Hornhautkrümmungsradius vor und nach der Behandlung eines akuten Glaukoms konnten Poinosawmy u. Roth 1974 zeigen, daß es bei einer Drucksenkung von 27 auf 20 mmHg keratometrisch zu einer Abnahme des Krümmungsradius um 0,07 mm kommt [15].

Zusammenfassend scheint eine Erhöhung des Augeninnendrucks eine zentrale Abflachung der menschlichen Hornhaut zu bewirken. Für dieses Hornhautverhalten gibt es 2 mögliche Erklärungen:

1. Der Limbus ist weniger rigide als die Hornhaut. Eine durch den intraokularen Druckanstieg hervorgerufene Dehnung im Limbusbereich würde dementsprechend eine zentrale Abflachung der Hornhaut bewirken.
2. Die Hornhaut zeigt anisotrope mechanische Eigenschaften. Wenn die mittlere periphere Hornhaut in meridionaler Richtung rigider als in zirkulärer Richtung wäre, müßte eine Druckerhöhung eine zentrale Abflachung der Hornhaut bewirken. *In-vitro*-Untersuchungen regionaler Unterschiede im mechanischen Verhalten von Hornhautgewebe deuten auf solch einen Typ anisotroper mechanischer Eigenschaften der Hornhaut hin [7].

Photorefraktive Keratektomie

Bei der photorefraktiven Keratektomie werden die Bowman-Membran und das vordere Hornhautstroma mit einem Excimerlaser verdampft, und somit wird der Hornhautvorderfläche eine neue Form gegeben. Die induzierte zentrale Hornhautabflachung steht bei der PRK in direktem Zusammenhang zu der Entfernung von Hornhautgewebe.

In *In-vitro*-Experimenten an Excimerlaser-abladierten menschlichen Hornhäuten bewirkte die alleinige Entfernung der Bowman-Membran keine signifikante Änderung der mechanischen Eigenschaften [18].

Tiefe Ablationen zeigten *in vitro* jedoch eine verminderte Widerstandsfähigkeit unter Druckbelastung und eine zentrale Hornhautversteilerung mit steigendem intraokularem Druck. So kam es in einer experimentellen Studie mit Humanaugen bei Ablationstiefen von 50 und 100 μm zu einer Abflachung der Hornhaut. Bei einer Ablationstiefe von 150 μm kam es jedoch zu einer zentralen Hornhautversteilerung [8].

Innerhalb der ersten 6 postoperativen Monate wird eine signifikante Regression des initialen Effekts der Laserablation beobachtet [17]. Für die postoperative zentrale Versteilerung werden eine Verdickung des zentralen Epithels und ein Umbau des Hornhautstromas

verantwortlich gemacht. Die Regression scheint nach etwa 6 Monaten zum Stillstand zu kommen [17]. Es wird aber auch von Patienten berichtet, die noch nach 9 Monaten keine stabile Refraktion erreicht hatten [17].

Die biomechanischen Hornhauteigenschaften nach photorefraktiver Keratektomie waren in der vorliegenden Studie unter Druckbelastung verändert. Eine Zunahme des Augeninnendrucks bewirkte eine geringere Abflachung der zentralen Hornhautbrechkraft als in den unoperierten Hornhäuten.

Da die Abflachung nach photorefraktiver Keratektomie betragsmäßig geringer ausfiel als bei den unoperierten Augen, entspricht dies im Vergleich zu den unoperierten Augen einer zentralen Versteilerung. Die Differenz zwischen normalen und PRK-Hornhäuten variierte bei einem Druckanstieg von ca. 16 auf 30 mmHg um 0,1 dpt.

Die direkte Analyse der Lage der reflektierten Ringe bestätigte die Beobachtung, daß die Hornhäute nach photorefraktiver Keratektomie unter der Druckbelastung zentral steiler werden als unoperierte Hornhäute. Zusätzlich zeigte sich bei dieser Auswertung, daß die PRK-Hornhäute unter Druckbelastung außerhalb der Ablationszone flacher werden als die unoperierten Hornhäute. Die Auswertung der Ringabstände weist auf Ungenauigkeiten des TMS-1 bei der Berechnung des Algorithmus bei zentrifugalen Brechkraftänderungen hin.

Die im Vergleich zu den unoperierten Hornhäuten geringere Abflachung bzw. relative Versteilerung nach photorefraktiver Keratektomie im Druckversuch läßt sich durch 2 Mechanismen erklären:

1. Durch die verminderte Hornhautdicke und die dadurch erhöhte Tangentialspannung sind die Hornhäute nach photorefraktiver Keratektomie stärker als die unoperierten Hornhäute vorgedehnt. Entsprechend der Hornhaut-Spannungs-Dehnungskurve ist bei einer höheren Vorspannung eine größere Spannungsänderung für die gleiche Dehnung als bei einer niedrigeren Vorspannung notwendig. Daraus resultiert eine geringere Abflachung der PRK-Hornhäute im Vergleich zu den unoperierten Hornhäuten bei gleichem Druckanstieg.

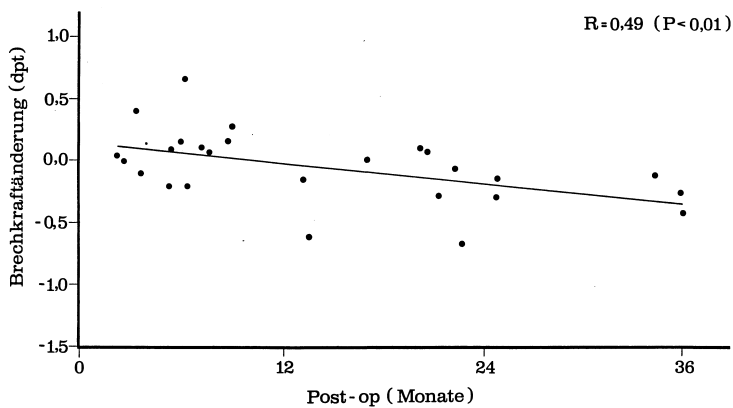


Abb. 5 ▲ Zusammenhang zwischen druckinduzierter Änderung der Brechkraft des sphärischen Äquivalents (Mittelwert der Ringe 3, 4 und 5) und der postoperativen Zeit bei photorefraktiver Keratektomie

2. Der Rand der ablatierten Fläche, insbesondere der restlichen Bowman-Membran, wirkt wie ein fester Ring, durch den sich der zentrale Teil der Hornhaut vorwölbt. Der Hornhautkrümmungsradius wird kleiner, d.h. die Hornhaut wird steiler. Durch diese Ausdehnung der zentralen Hornhaut nimmt der Druck auf die nicht ablatierten Areale ab, es kommt daher in der Peripherie zu einer stärkeren Abflachung.

Dieser Vorstellung entsprechend müsste es bei tieferen Ablationstiefen zu einer stärkeren Verteilerung im Hornhautzentrum kommen als bei geringeren Ablationstiefen. In der vorliegenden Studie zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen Ablationstiefe und druckinduzierter zentraler Brechkraftänderung.

Zwischen der druckinduzierten Veränderung der zentralen Brechkraft und der postoperativen Zeit konnte in dieser Studie ein signifikanter Zusammenhang gefunden werden ($p < 0,05$) (Abb. 5). Die innerhalb der ersten postoperativen Monate untersuchten Patienten zeigten eine größere zentrale Verteilerung als Patienten 1 Jahr oder mehr nach der Excimerlaserablation. So scheint es, daß die Wundheilungsantwort der Hornhaut die Hornhautstabilität in den PRK-Patienten wieder normalisiert.

Zusammengefaßt zeigten die Hornhäute nach photorefraktiver Keratektomie deutliche Veränderungen unter der Druckbelastung. Die zentrale Verteilerung

im Hornhautzentrum im Vergleich zu Normalhornhäuten spricht dafür, daß die Stabilität einer Hornhaut nach Verlust des zentralen Anteils der Bowman-Membran vermindert ist. Ob es wirklich im zeitlichen Verlauf zu einer Wiedererlangung der Hornhautstabilität kommt, was die Ergebnisse nach längeren postoperativen Abständen andeuten, bleibt abzuwarten. Langzeitstudien über die Hornhautstabilität müssen zeigen, inwieweit die reduzierte Gewebeelastizität dem intraokularen Druck genügend Widerstand entgegenbringen kann, um eine stabile postoperative Refraktion zu gewährleisten, oder ob es doch langfristig zu einer Instabilität der Hornhaut kommt.

Literatur

1. Andreassen TT, Simonsen AH, Oxlund H (1980) **Biomechanical properties of keratoconus and normal corneas.** Exp Eye Res 31:435–441
2. Bogan SJ, Waring GO, Ibrahim O, Drews C, Curtis L (1990) **Classification of normal corneal topography based on computer-assisted videokeratography.** Arch Ophthalmol 108:945–949
3. Deitz MR, Sanders DR, Raanan MG (1986) **Progressive hyperopia in radial keratotomy. Long-term follow-up of diamond-knife and metal-blade series.** Ophthalmology 93:1284–1289
4. Feldman ST, Frucht-Perry J, Weinreb RN, Chayet A, Dreher AW, Brown SI (1989) **The effect of increased intraocular pressure on visual acuity and corneal curvature after radial keratotomy.** Am J Ophthalmol 108:126–129
5. Hanke K, Draeger J, Kirsch K (1984) **Untersuchungen des Augeninnendruckes in Abhängigkeit von der Körperhaltung und Hydratation.** Fortschr Ophthalmol 81:596–600
6. Hjortdal JO, Erdmann L, Bek T (1995) **Fourier analysis of video-keratographic data. A tool for separation of spherical, regular astigmatic, irregular astigmatic corneal power components.** Ophthalmol Vis Opt (in press)
7. Hjortdal JO (1995) **Regional mechanical performance of the human cornea.** J Biomech (in press)
8. Litwin KL, Moreira H, Ohadi C, McDonnell PJ (1991) **Changes in corneal curvature at different excimer laser ablation depths.** Am J Ophthalmol 109:382–384
9. Maloney RK (1990) **Effect of corneal hydration and intraocular pressure on keratometric power after experimental radial keratotomy.** Ophthalmology 97:927–933
10. McDonnell PJ, McLusky DJ, Garbus JJ (1989b) **Corneal topography and fluctuating visual acuity after radial keratotomy.** Ophthalmology 96:665–670
11. McDonnell PJ, Fish LA, Garbus J (1988c) **Persistence of diurnal fluctuation after radial keratotomy.** Refract Corneal Surg 5:89–93
12. Nash IS, Greene PR, Foster CS (1982) **Comparison of mechanical properties of keratoconus and normal corneas.** Exp Eye Res 35:413–423
13. Nolan BT (1991) **Clinical report: perforation by a foreign body through a pre-existing radial keratotomy wound.** Mil Med 156:151–154
14. Pearlstein ES, Agapitos PJ, Cantrill HL, Holland EJ, Williams P, Lindstrom RL (1988) **Ruptured globe after radial keratotomy.** Am J Ophthalmol 106:755–756
15. Poinoosawmy D, Roth JA (1974) **Variations in visual acuity, refraction, and corneal curvature with changes in applanation tension.** Br J Ophthalmol 58:523–528
16. Schanzlin DJ, Santos VR, Waring GO, Lynn M, Bourque L, Cantillo N, Edwards MA, Justin N, Reinig J, Roszka-Duggan V (1986) **Diurnal change in refraction, corneal curvature, visual acuity, and intraocular pressure after radial keratotomy in the PERK study.** Ophthalmology 93:167–175
17. Seiler T, Wollensak J (1991) **Myopic photorefractive keratectomy with the excimer laser.** Ophthalmology 98:1156–1163
18. Seiler T, Matallana M, Sessler S, Bende T (1992c) **Does Bowman's layer determine the biomechanical properties of the cornea?** Refract Corneal Surg 8:139–142
19. Seiler T, Wollensak J (1993) **Results of a prospective evaluation of photorefractive keratectomy at 1 year after surgery.** Ger J Ophthalmol 2:135–142
20. Simon G, Ren Q (1994) **Biomechanical behaviour of the cornea and its response to radial keratotomy.** Refract Corneal Surg 10:343–356
21. Waring GO, Lynn M, Nizam A, Kutner MH, Cowden JW, Culbertson W, Laibson PR, McDonald MB, Nelson JD, Obstbaum SA, Rowsey JJ, Salz JJ, Bourque LB, the PERK study group (1991) **Results of the prospective evaluation of radial keratotomy. (PERK) study five years after surgery.** Ophthalmology 98:1164–1176
22. Woo SLY, Kobayashi AS, Schlegel WA, Lawrence C (1972) **Nonlinear material properties of intact cornea and sclera.** Exp Eye Res 14:29–39