

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Messungen an Testkörpern

Sphärische Testkörper mit Durchmesser von etwa 15mm und Radien von 7,5mm, 7,943mm und 8,288mm wurden als Testkörper verwendet. Sie bestanden aus stark fluoreszierendem Bk7 Glas. Dadurch ist ein gutes Signal garantiert, das mit relativ niedrigem Rauschen und einer entsprechend hohen Meßsicherheit einhergeht. Auswertbar sind die zentralen 11mm, da zum Rand hin dem Algorithmus teilweise zu wenige Daten zur Verfügung stehen.

#### 4.1.1 Meßgenauigkeit

Zur Bestimmung der Meßgenauigkeit und Wiederholgenauigkeit wurden jeweils 10 Messungen der Linsen vorgenommen, ohne die Linsen zwischen den Messungen zu bewegen. Zunächst wurden Zernikefunktionen an die Meßdaten angefitet, um das Rauschen von den Daten zu entfernen. Dann wurden Sphären mit den nominalen Radien der Linsen an die Daten angefitet. Schließlich wurden die Zernikefits von den Sphärenfits subtrahiert. Die folgende Tabelle zeigt daher die Abweichung des Sphärenfits von den mittels Zernikefit geglätteten Meßdaten. Angegeben sind die PV-, RMS- und Mittelwerte innerhalb eines Durchmessers von 11mm. In den Klammern stehen die jeweiligen Standardabweichungen. Alle Größen sind in Mikrometern angegeben.

Tab. 4-1: Statistische Kenngrößen verschiedener Testlinsen

Linsenradius	<b>7,5mm</b>	<b>7,943mm</b>	<b>8,288mm</b>
Mittelwert [ $\mu\text{m}$ ]	0,56 (0,04)	0,15 (0,21)	0,37 (0,13)
PV [ $\mu\text{m}$ ]	8,04 (0,38)	6,25 (0,28)	5,71 (0,37)
RMS [ $\mu\text{m}$ ]	0,88 (0,03)	0,69 (0,07)	0,71 (0,02)

#### 4.1.2 Reproduzierbarkeit im Meßvolumen

Ein wesentliches Kriterium für die Zuverlässigkeit der Meßdaten ist ihre Reproduzierbarkeit an unterschiedlichen Orten im Meßvolumen. Bei der Vermessung von Augen läßt sich unter Beobachtung des Livebilds die Pupille zumeist recht gut von dem Meßsystem zentrieren. Schwieriger ist im Allgemeinen die Justage in z-Richtung, also die Einstellung des optimalen Abstands zwischen Meßsystem und Auge. Das hier verwendete Verfahren sollte weniger empfindlich gegen Fehleinstellungen in z-Richtung sein als andere topographische Meßprinzipien im Bereich der Augenoptik. Diese Aussage sollte anhand von Experimenten mit Testlinsen verifiziert werden.

Daher wurde die Lage der Linsen in z-Richtung variiert und die Differenz zwischen dem Sollwert und dem besten Fit an die Daten ermittelt. Die folgende Grafik zeigt die Abhängigkeit der Differenz aus diesen beiden Größen von der Lage des Körpers im Volumen. Dabei ist auf der x-

Achse der Abstand des Apex von der Oberkante des Kalibriervolumens abgetragen. Die Meßkörper erstrecken sich demnach in der Grafik zu größeren x-Werten.

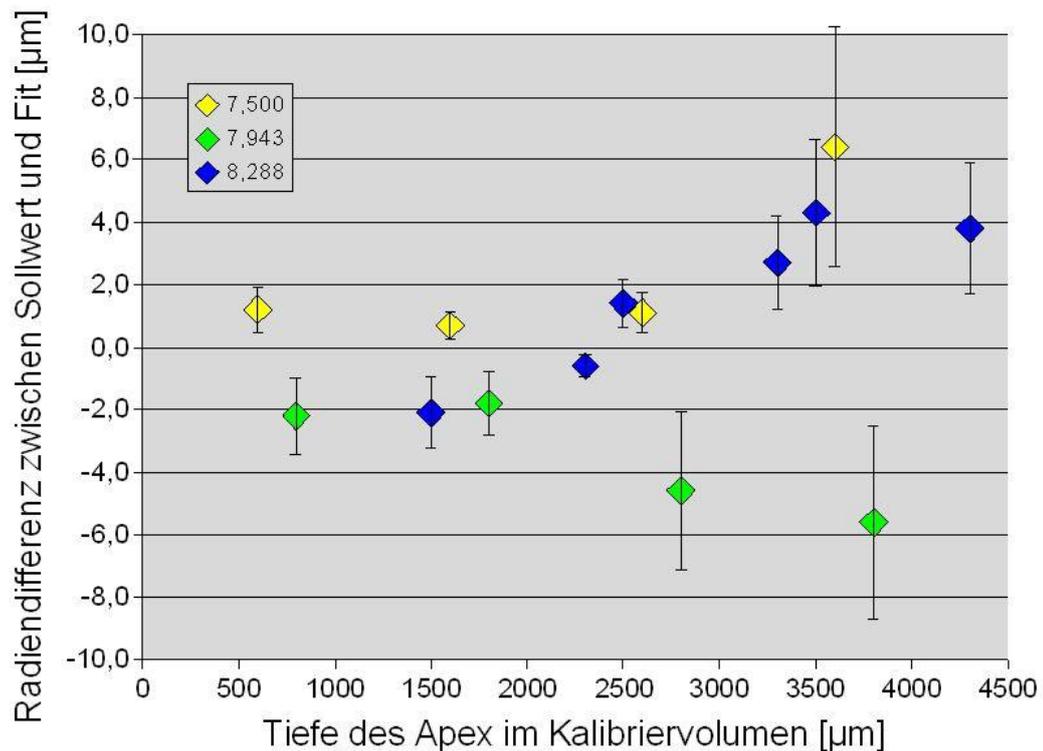


Abb. 4-1: Abhängigkeit der Radiendifferenz zwischen Soll- und Meßwert von der Lage im Volumen. Aufgetragen ist die Radiendifferenz zwischen Soll- und Istwert gegenüber der Tiefe des Apex im Meßvolumen.

Es scheint einen Bereich zwischen 1000 und 2000µm zu geben, bei dem die Messungen an allen drei Linsen recht gut mit dem Sollwert übereinstimmen. Je weiter die Linsen von der Kamera entfernt aufgenommen werden, desto größer werden die Abweichungen zwischen Sollwert und Fit an den Meßwert. Dennoch bleiben sie in diesen Beispielen stets deutlich unter 10 Mikrometer.

## 4.2 Messungen an Augen

Da es bei der Vermessung von in-vitro oder in-vivo Hornhäuten keine zuverlässig vertrauenswürdigen Kontrolldaten gibt, lag das Hauptaugenmerk auf der Wiederholgenauigkeit der Messungen. Die Abschnitte dieses Kapitels zeigen daher neben Krümmungskarten vor allem auch Differenzkarten nach Registrierung. Aus diesen Differenzkarten wird deutlich, wie genau zwei einzelne Messungen übereinstimmen. Im Mittelpunkt der Beobachtung stehen dabei vor allem lokale systematische Abweichungen sowie das globale Rauschen als Hinweis auf Einflüsse der Kalibrierung und der Bildqualität.

### 4.2.1 Schlachthofaugen

Das folgende Bild zeigt das Streifenmuster auf der Hornhaut eines Schweineauges, dessen Epithel mit einem Hockeemesser entfernt worden war. Am linken oberen Rand sind noch vereinzelt Epithelreste zu erkennen. Die Sklera ist vollständig vom Plastikdeckel der Halterung verdeckt, da der Hornhautdurchmesser dieses Auges größer als die Öffnung im Deckel ( $\varnothing$  13mm) war.

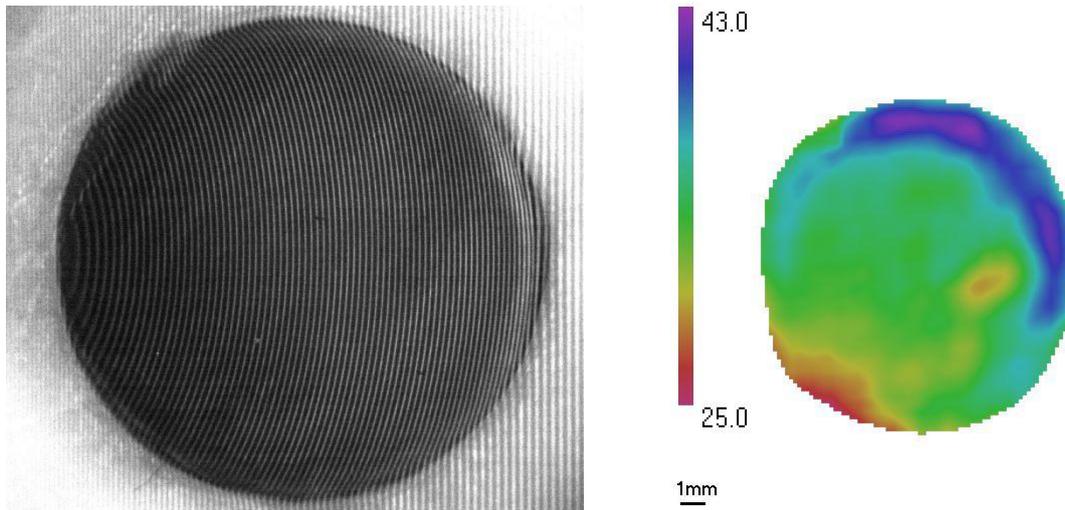


Abb. 4-2: Schweinehornhaut in Plastikhalterung Krümmungskarte (Skala in Dioptrien)

Das rechte Bild zeigt die zum Streifenbild gehörige Krümmungskarte. Die Farbskala gibt die Krümmungen in Dioptrien an. Die stärker gekrümmten Bereiche am Rand zwischen 12 Uhr und 3 Uhr sind auch im Streifenbild deutlich zu erkennen. In der Krümmungskarte wird deutlich, daß das Auge in der Halterung verkippt war, so daß der Druck des zugeschraubten Deckel eine asymmetrische Deformation der Hornhaut bewirkte. Dennoch ist der zentrale Bereich vergleichsweise homogen gekrümmt.

Die folgenden beiden Karten verdeutlichen die unter den gegebenen Aufnahmebedingungen erreichbare Meßgenauigkeit. Sie zeigen die Differenz aus zwei Höhenprofilen (links) und die Differenz aus den arithmetischen Mitteln von jeweils zwei Höhenkarten.

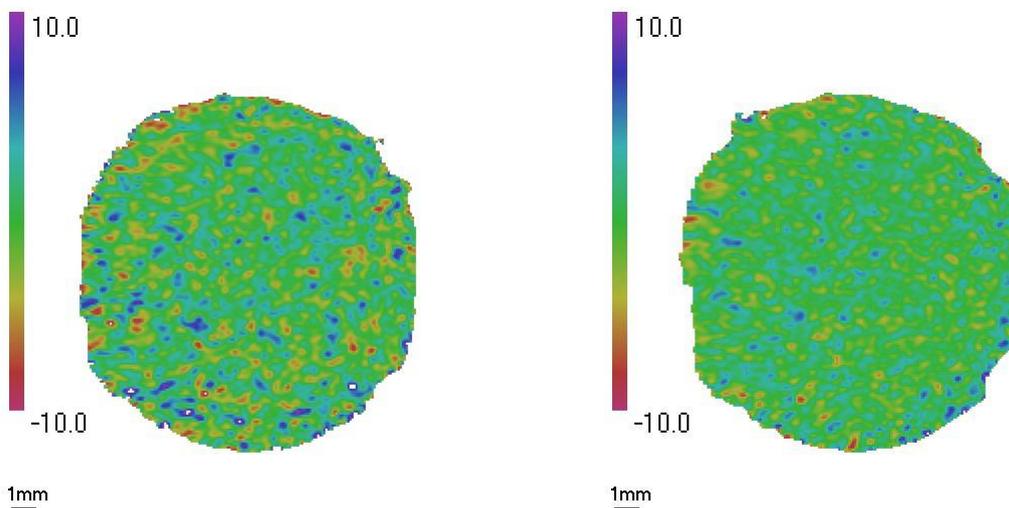


Abb. 4-3: Differenz aus zwei Höhenkarten und... den Mittelungen von je 2 Karten (Farbskalen in  $\mu\text{m}$ )

Die Farbskalen erstrecken sich jeweils über einen Bereich von 20 Mikrometer. Das Rauschen ist nach der Mittelung über zwei Messungen deutlich niedriger. Der RMS Wert verringert sich dabei um etwa 30%.

#### 4.2.2 Probandenaugen

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der TFH Berlin wurde eine kleine Studie an Studenten durchgeführt. Die Studenten hatten ihre Zustimmung zu den Untersuchungen erteilt, nachdem sie zuvor umfangreich über sämtliche Details der Messungen aufgeklärt worden waren. Alle Untersuchungen standen im Einklang mit der Deklaration von Helsinki.

Die folgenden Bilder zeigen exemplarisch einen Datensatz von beiden Augen eines Probanden. Hier sind zunächst die Streifenbilder:

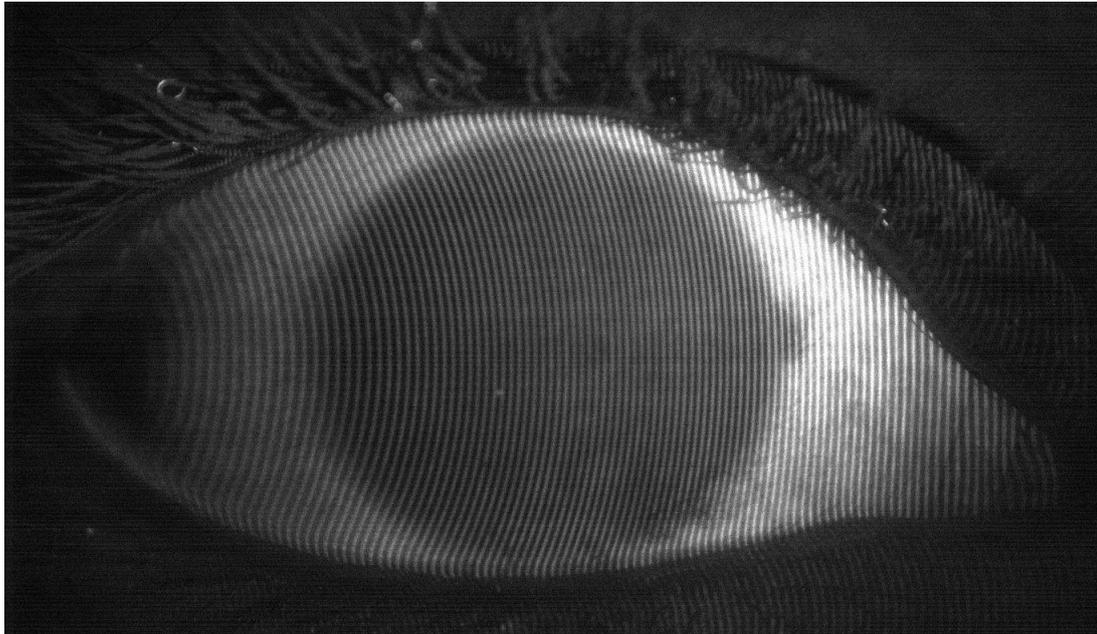


Abb. 4-4: Streifenbild eines rechten Auges

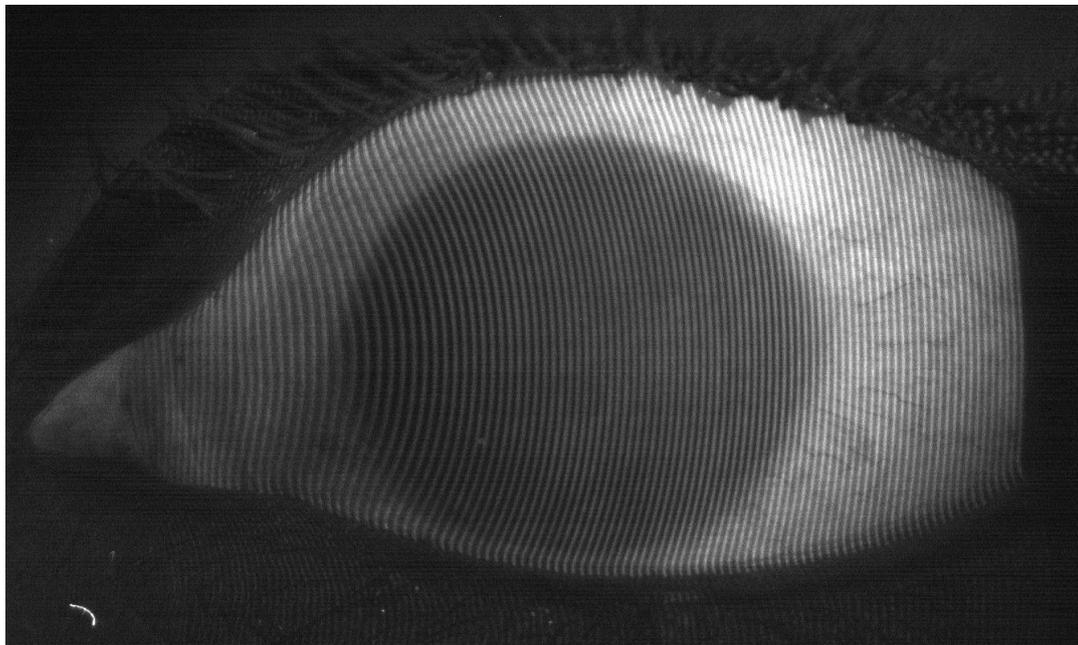


Abb. 4-5: Streifenbild eines linken Auges

Die folgenden Bilder zeigen die zugehörigen Höhenkarten der beiden Augen. Ihr Höhenbereich erstreckt sich beidseitig über eine Tiefe von 7mm. Der maximale Durchmesser der Daten beträgt horizontal etwa 20mm und vertikal um 13mm.

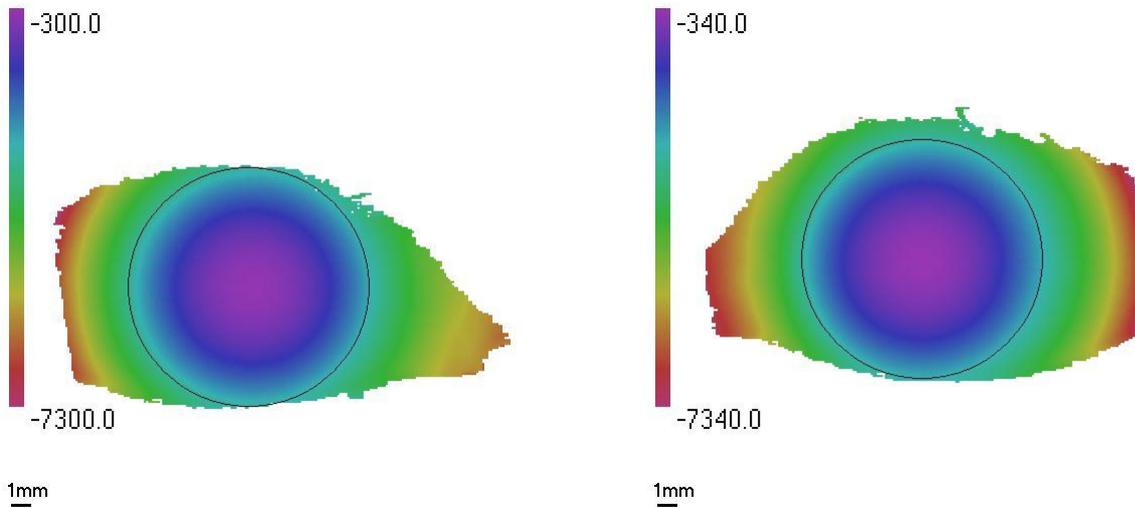
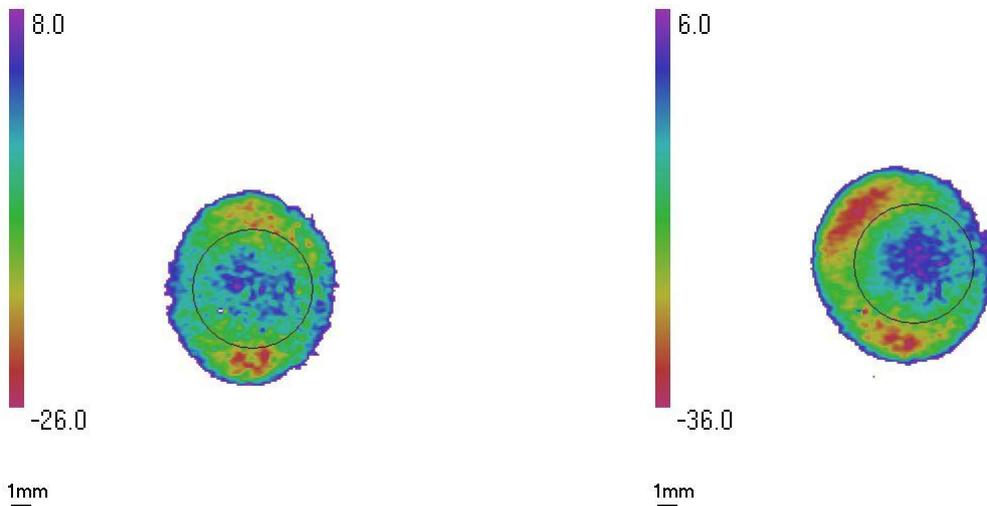
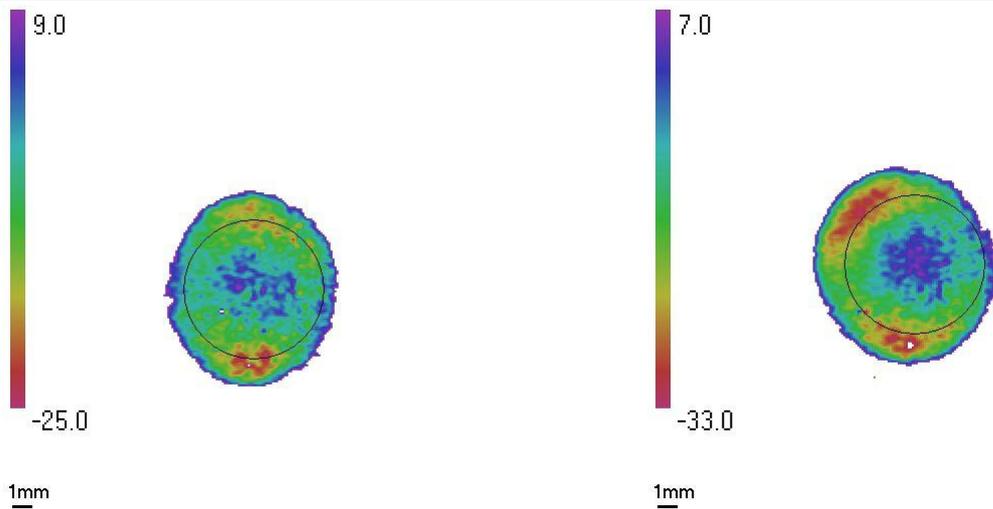
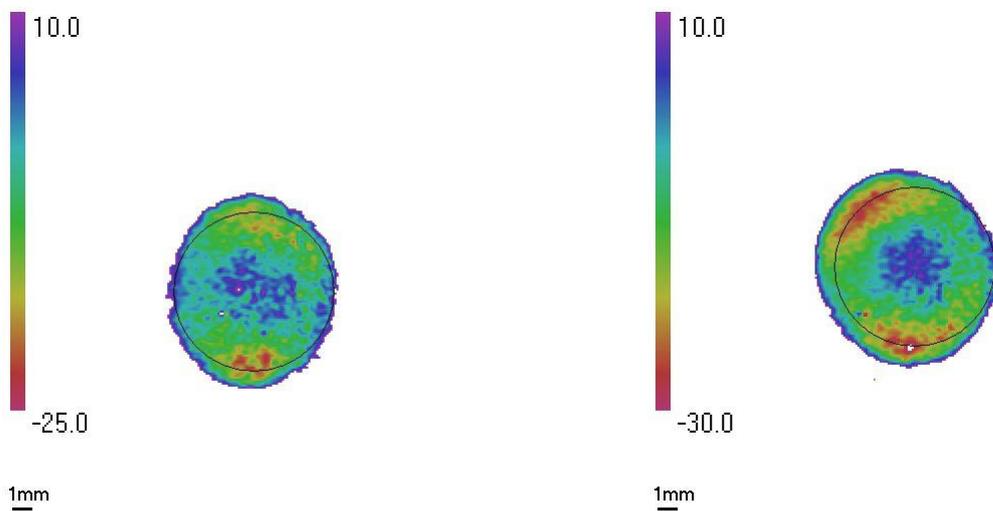
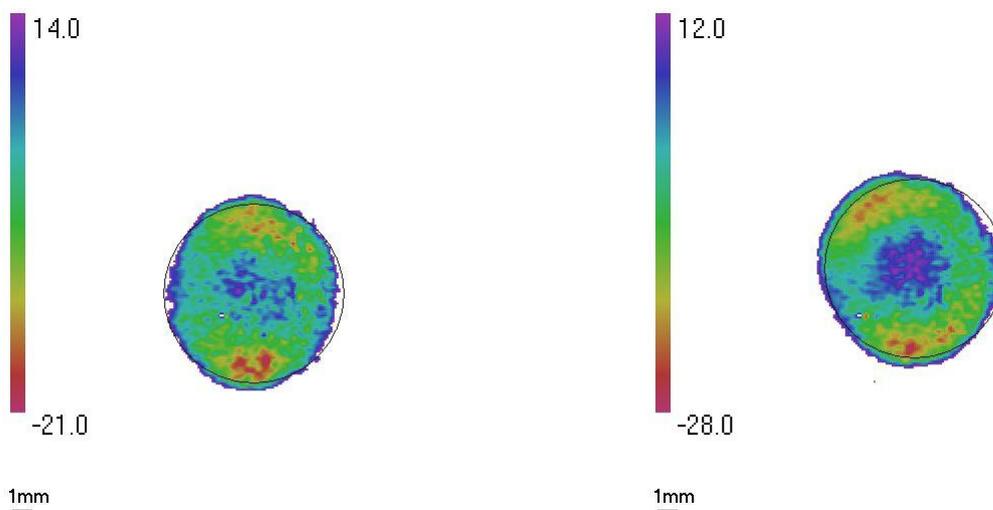


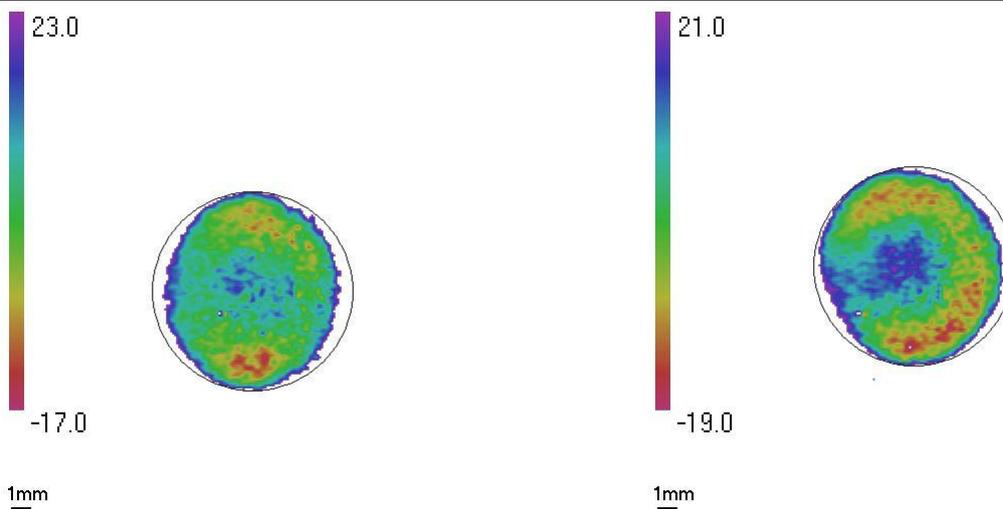
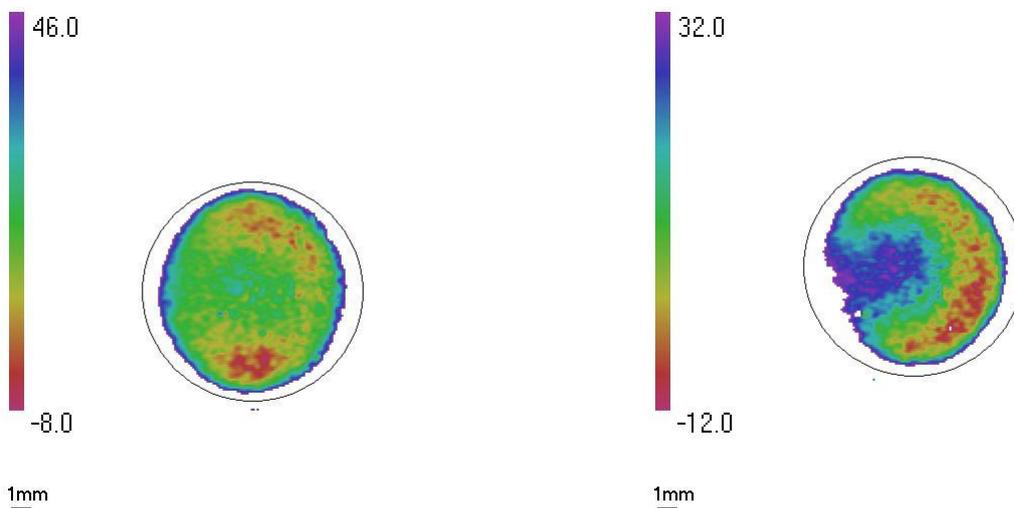
Abb. 4-6: Höhenkarte des rechten...

... und des linken Auges

Zur Beurteilung der Oberflächenform wurden sphärische Fits mit unterschiedlichen Durchmessern an den Apex der Meßdaten angepaßt. Die verwendeten Datenbereiche erstreckten sich von 6 bis 11mm Durchmesser. Die folgenden Bilder zeigen die Abweichungen der Höhenkarten von den Fits mit aufsteigenden Durchmessern der für die Fits verwendeten Daten. Der schwarze Kreis entspricht jeweils dem für den Fit genutzten Datenbereich an.

Abb. 4-7: Differenz zwischen Höhendaten und Fit mit Datenbereich  $\varnothing 6\text{mm}$

Abb. 4-8: Differenz zwischen Höhendaten und Fit mit Datenbereich  $\varnothing 7\text{mm}$ Abb. 4-9: Differenz zwischen Höhendaten und Fit mit Datenbereich  $\varnothing 8\text{mm}$ Abb. 4-10: Differenz zwischen Höhendaten und Fit mit Datenbereich  $\varnothing 9\text{mm}$

Abb. 4-11: Differenz zwischen Höhendaten und Fit mit Datenbereich  $\varnothing 10\text{mm}$ Abb. 4-12: Differenz zwischen Höhendaten und Fit mit Datenbereich  $\varnothing 11\text{mm}$ 

Die Gestalt der Abweichungen von den Sphären ist bei beiden Augen relativ ähnlich. Beim linken Auge sind die Abweichungen jedoch etwas stärker ausgeprägt. Dieser Befund zeigt sich auch in den ermittelten Fitradien, die in der folgenden Tabelle aufgeführt sind.

Tab. 4-2: Fitradien in Abhängigkeit vom Durchmesser

$\varnothing$ [mm]	6	7	8	9	10	11
OD	7,81	7,84	7,88	7,93	8,02	8,13
OS	7,72	7,77	7,82	7,89	7,98	8,11

Um die Form anschaulicher darzustellen und damit vor allem auch die peripheren Bereiche zugänglich zu machen, wurden Karten mit mittleren Krümmungen der Höhenkarten berechnet. Die folgenden Abbildungen zeigen diese Krümmungskarten, wobei die Farbskalen so gewählt wurden, daß entweder das Zentrum, die Peripherie oder die gesamte Oberfläche dargestellt sind.

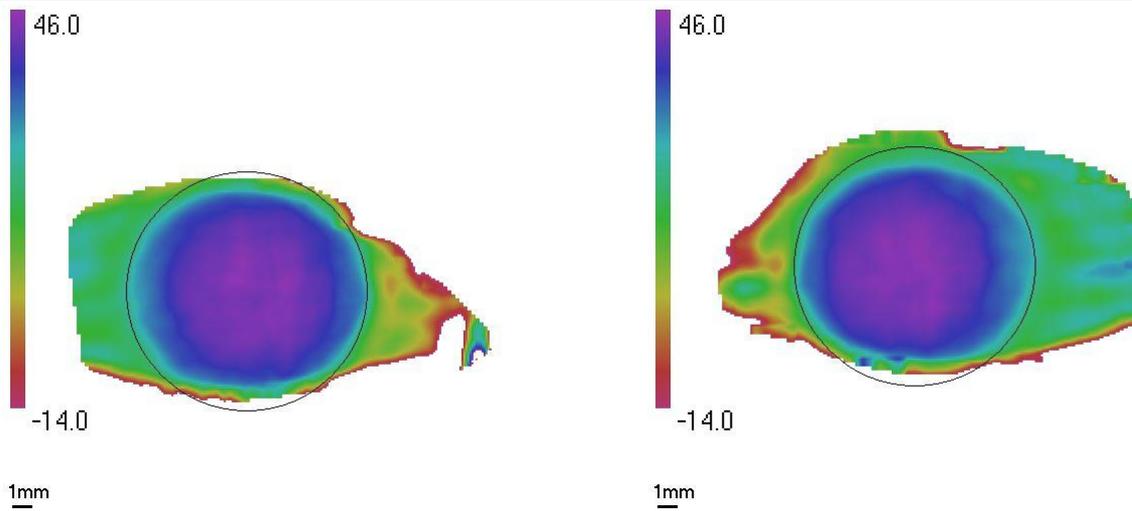


Abb. 4-13: Krümmungskarten der gesamten Oberflächen

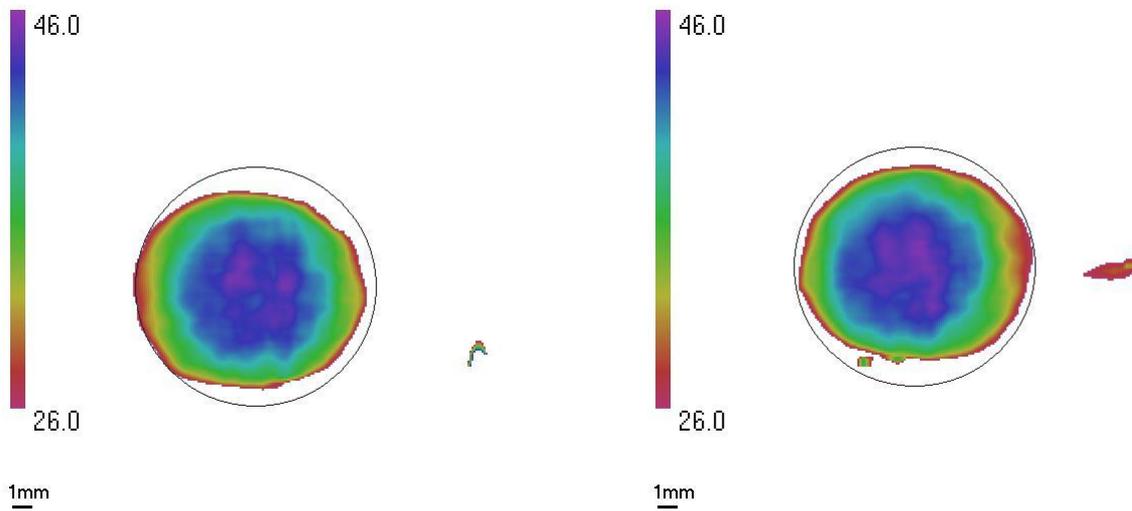


Abb. 4-14: Krümmungskarten innerhalb der zentralen 12mm Durchmesser

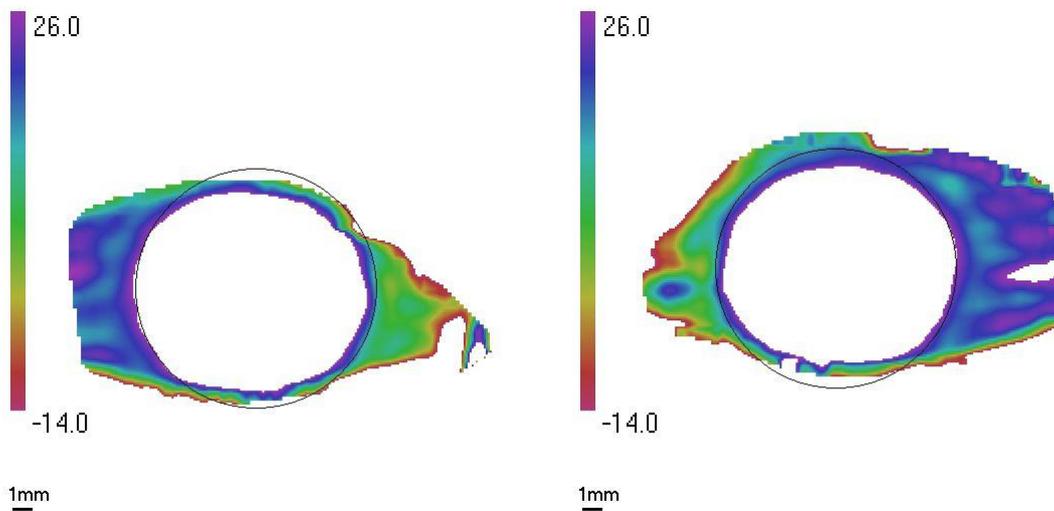


Abb. 4-15: Krümmungskarten außerhalb der zentralen 12mm Durchmesser

Die bei den sphärischen Fits beobachtete Symmetrie beider Augen findet sich auch in den Krümmungskarten wieder. Im peripheren Bereich treten auch negative Krümmungswerte auf, da sich dort entweder der Tränenfilm an die Lidkanten schmiegt oder die Skleraform sich stetig weiter abflacht.

#### 4.2.3 Skleralprofil

Bei normalem Geradeausblick sind große Bereiche der Sklera von den Augenlidern überdeckt und daher einer Vermessung nicht zugänglich. Für manche Anwendungen, beispielsweise für die Anpassung von Skleralschalen, ist dieser Bereich jedoch von besonderem Interesse. Daher wurde ein Proband gebeten, seine Blickrichtungen bewußt während der Messungen so zu ändern, daß möglichst große Areale der Sklera erfaßt werden konnten. Hier sind die entsprechenden Streifenbilder.

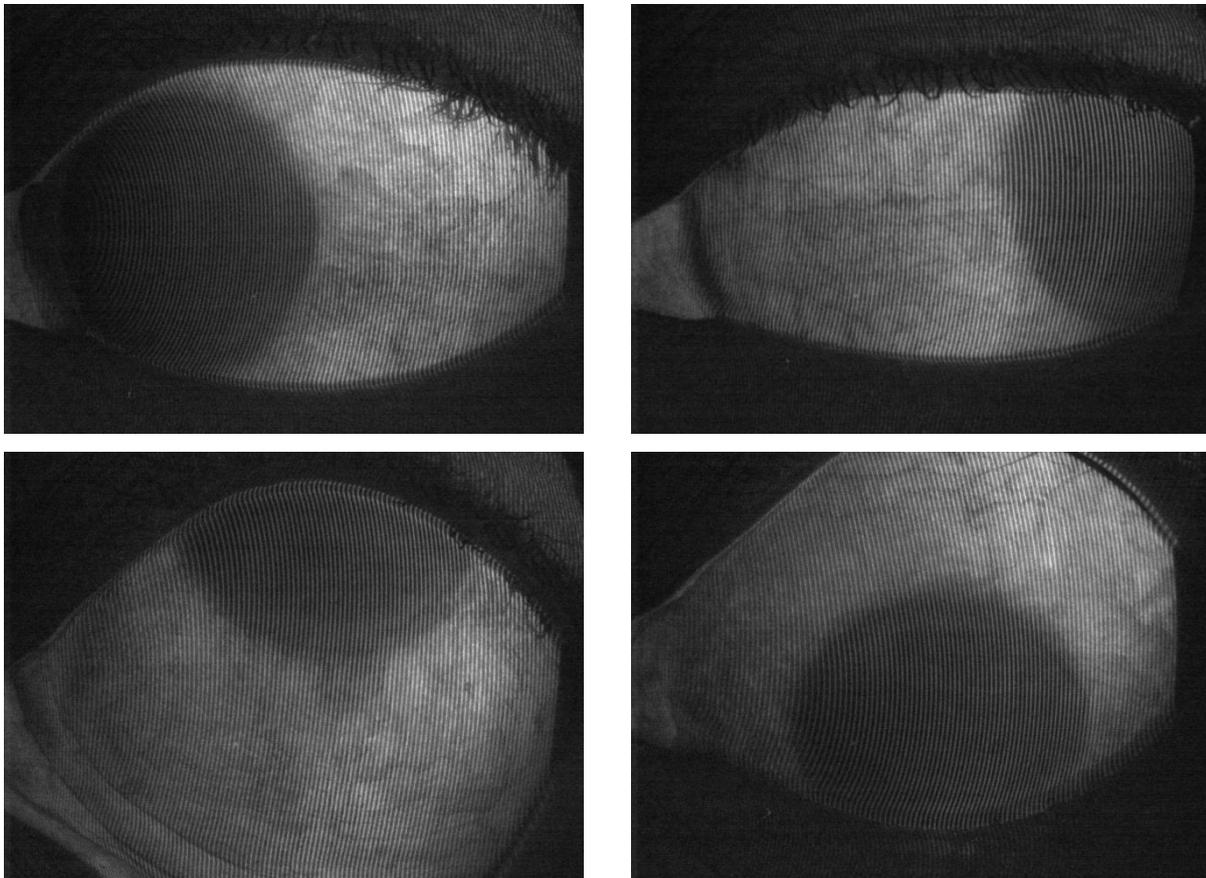


Abb. 4-16: Streifenbilder eines Auges, das in verschiedene Richtungen blickt

Für die unteren beiden Aufnahmen, in denen das Auge nach oben und nach unten blickt, war es erforderlich, die Augenlider herunter- bzw. heraufzuziehen, da sie sonst die exponierte Sklera überdeckt hätten.

Die folgenden Höhenkarten gehören zu den oben abgebildeten Streifenbildern. Der schwarze Kreis hat stets einen Durchmesser von 10mm.

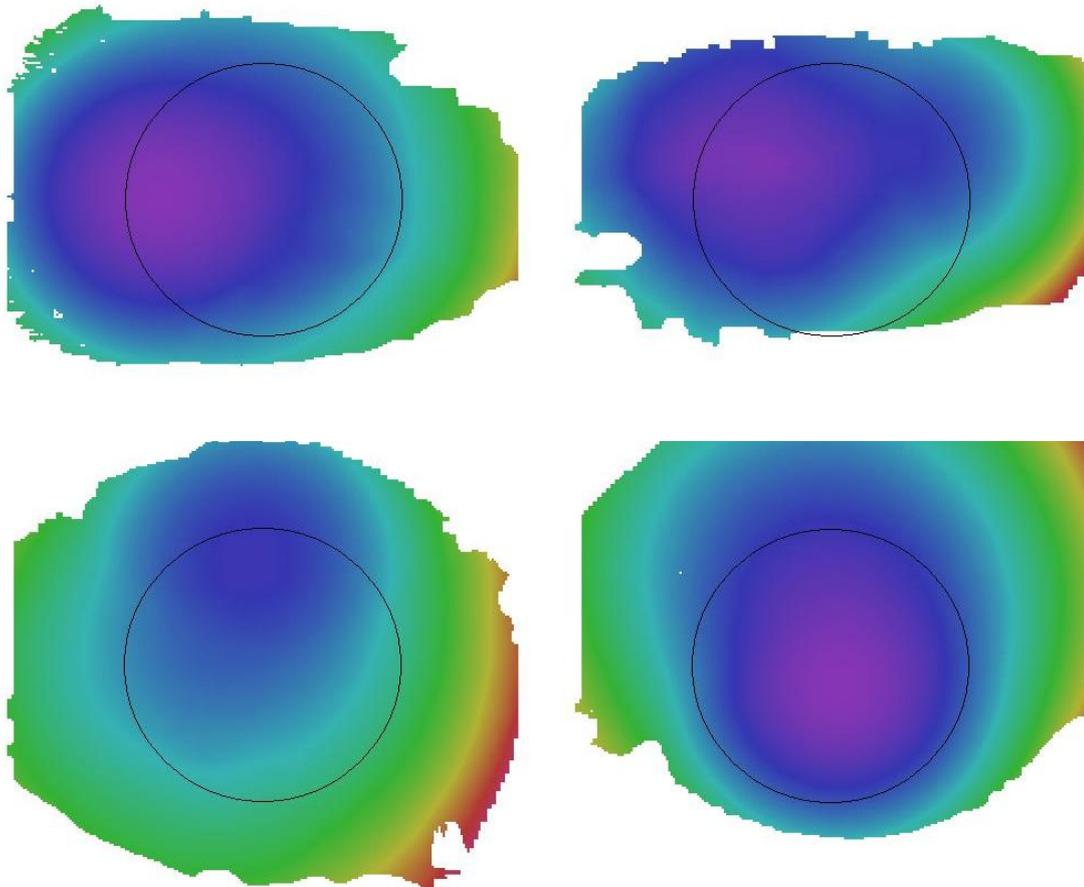


Abb. 4-17: Höhenkarten des peripher blickenden Auges (Kreisdurchmesser 10cm)

Die Höhenkarten wurden anhand von Registrieralgorithmen zu einer Gesamtkarte mit einem Durchmesser von über 24mm zusammengefügt. Neben der Höhenkarte ist das entsprechende 3D Modell mit Schattenwurf abgebildet. (Schwarzer Kreis: Ø10mm )

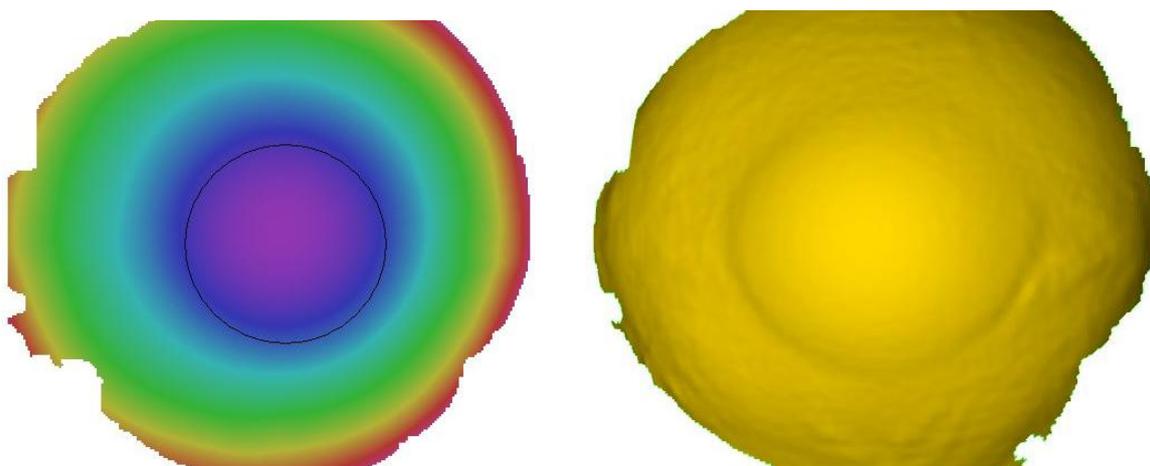


Abb. 4-18: Gesamtkarte nach Registrierung

3D Modell nach Registrierung

Aus den Höhenkarten wurden Krümmungskarten errechnet, die in den folgenden Abbildungen gezeigt sind. Die Farbskalen erstrecken sich stets über einen Bereich von 0-50 Dioptrien. Weiße Flecken in den Bildern entsprechen Krümmungswerten außerhalb dieses Bereichs. Strukturen auf der Sklera sind deutlich erkennbar.

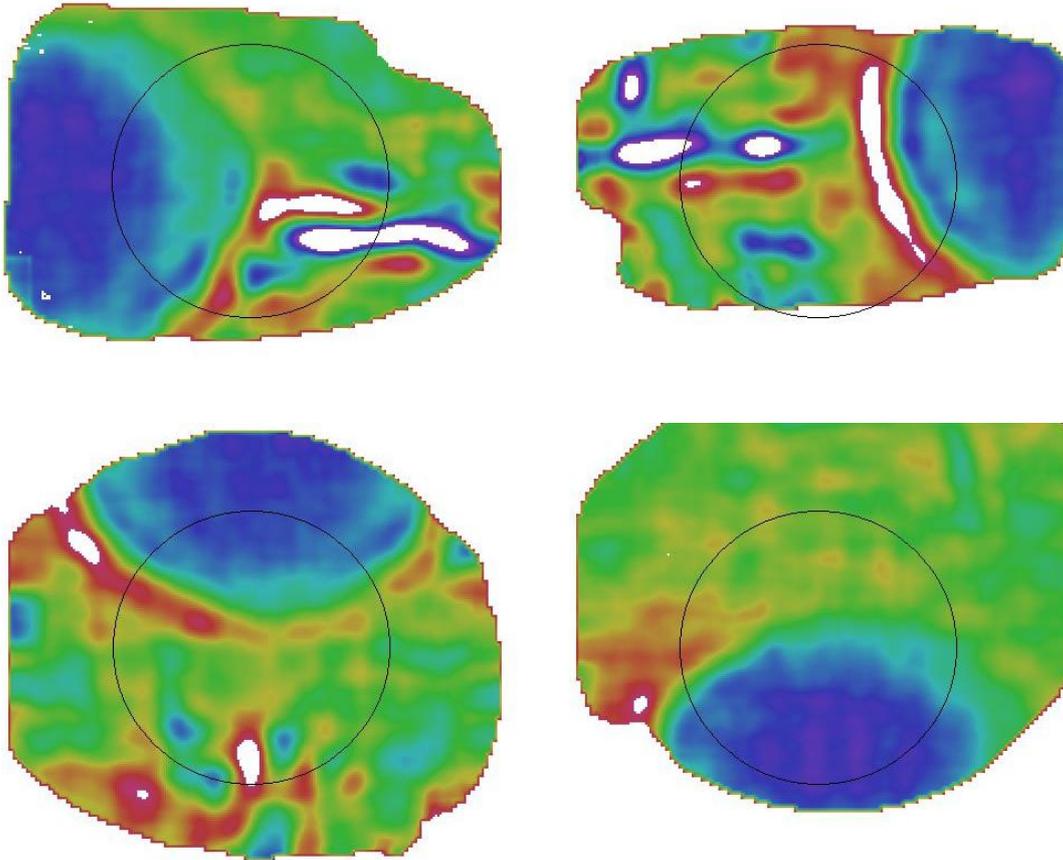


Abb. 4-19: Krümmungskarten des peripher blickenden Auges (Kreisdurchmesser 10cm)

Die folgende Karte zeigt die Krümmungen der zusammengesetzten Oberfläche. Die in den einzelnen Karten gefundenen Strukturen sind wieder deutlich erkennbar.

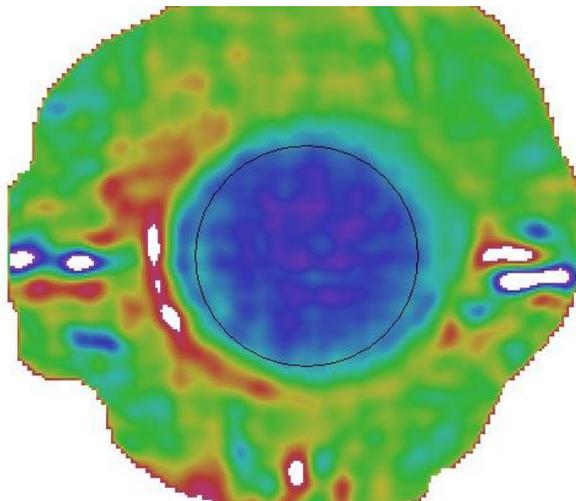


Abb. 4-20: Krümmungskarte der zusammengesetzten Karten nach Registrierung

#### 4.2.4 Keratokonus

Eine Patientin mit Keratokonus wurde mit dem UV Streifenprojektionssystem vermessen. Zur Erhöhung des Streifenkontrasts wurde zuvor ihr Tränenfilm mit Fluoreszein angefärbt. Die folgenden Bilder zeigen die Ergebnisse beider Augen.

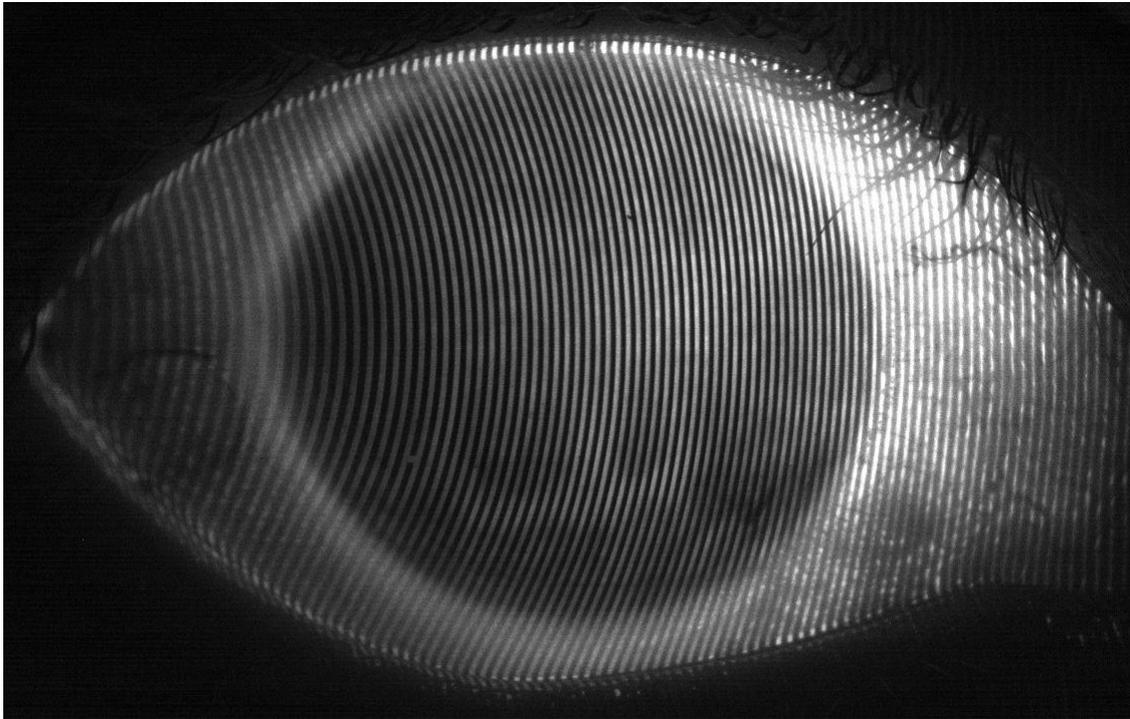


Abb. 4-21: Rechtes Keratokonus Auge

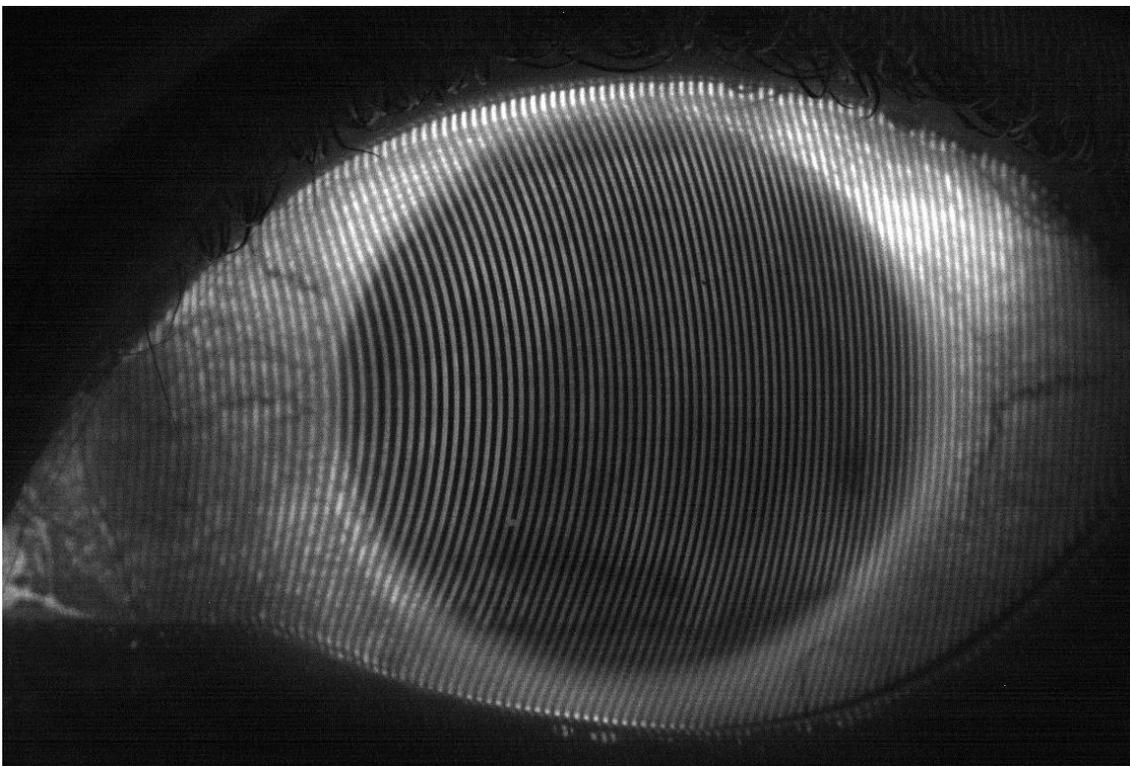


Abb. 4-22: Linkes Keratokonus Auge

Die folgenden Bilder zeigen Krümmungskarten der Augenoberflächen (Kreis: Ø10mm).

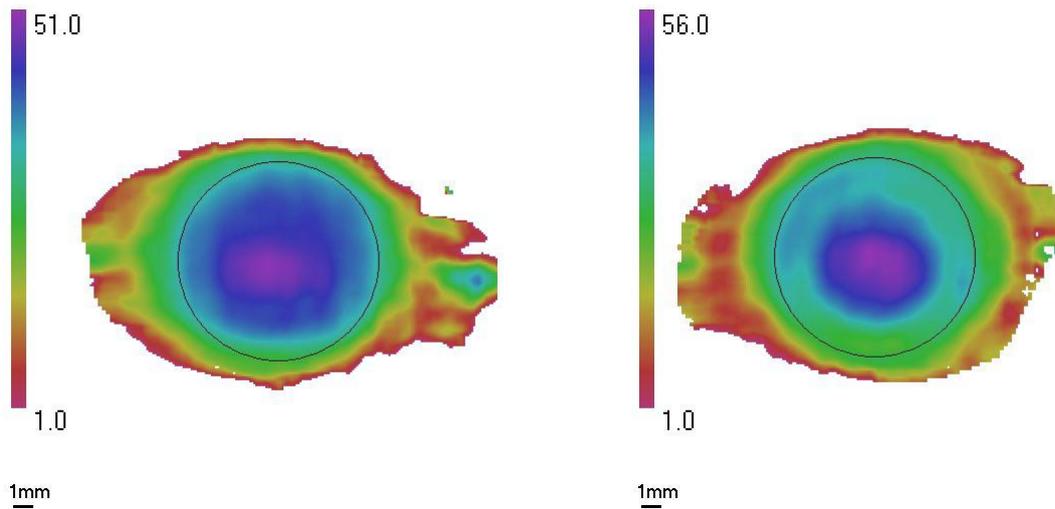


Abb. 4-23: Krümmungskarten von Hornhaut und Sklera des linken und rechten Auges

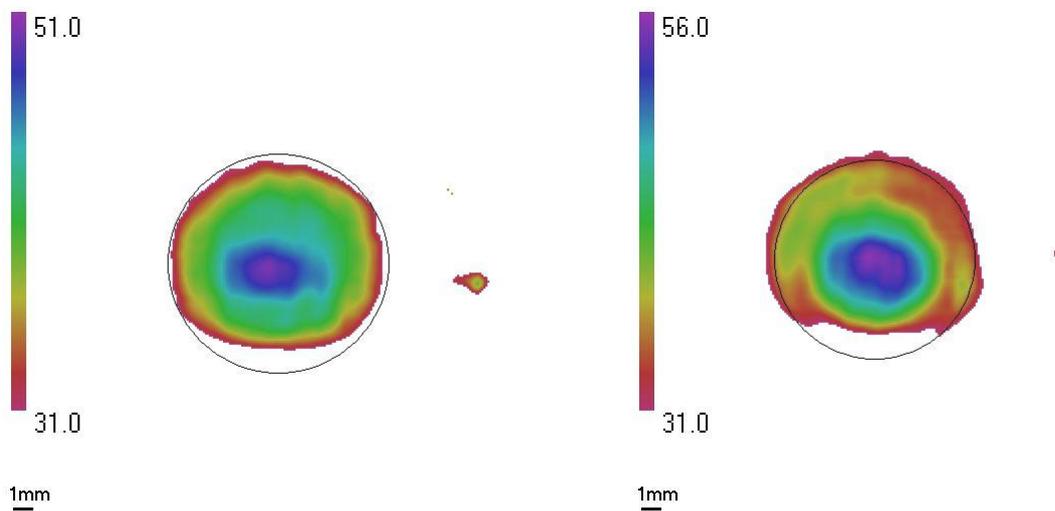


Abb. 4-24: Krümmungskarten der Hornhaut des linken und rechten Auges

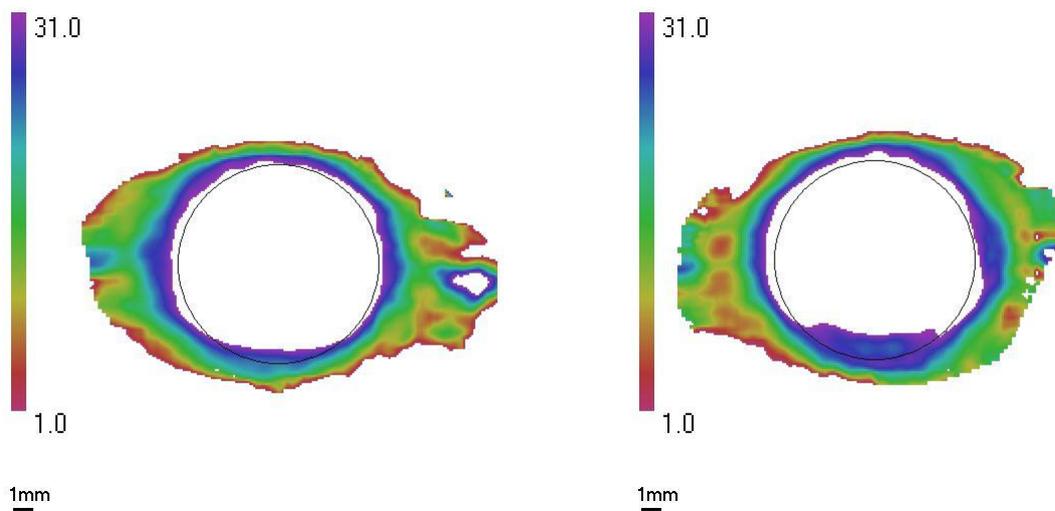


Abb. 4-25: Krümmungskarten der Sklera des linken und rechten Auges

Der Konus des linken Auges ist stärker ausgeprägt als der des rechten Auges. Seine Krümmungskarte zeigt im Bereich des Konus um 5 Dioptrien höhere Werte an. Die Sklera und die inferiore Hornhaut sind dafür stärker abgeflacht.

Dieser Befund zeigt sich auch in den Differenzen aus sphärischen Fits an die Oberflächen und den eigentlichen Höhenkarten, die in den folgenden Abbildungen dargestellt sind. Die Mittelpunkte der Fits wurden dabei auf den Konus zentriert. Es wurden Daten innerhalb eines Durchmessers von 5mm verwendet.

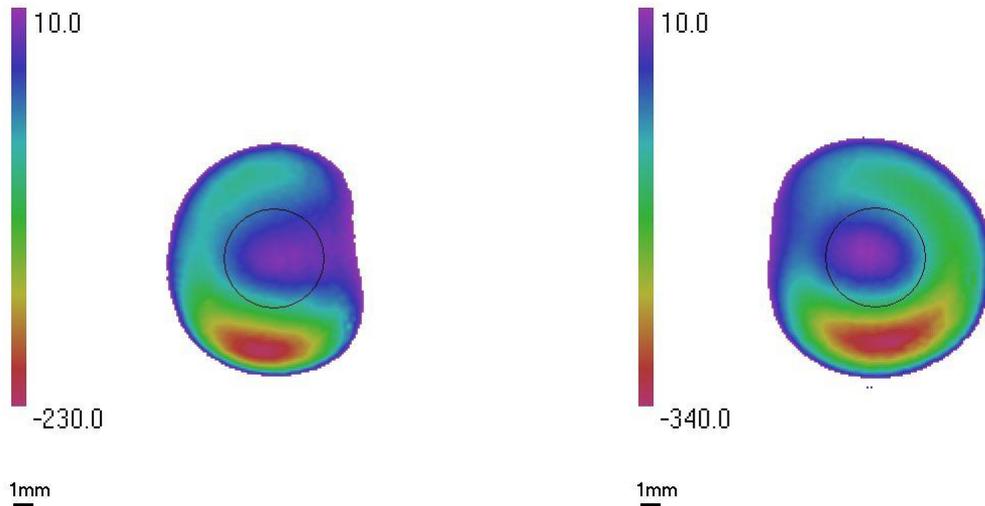


Abb. 4-26: Abweichung vom sphärischen Fit

Der Radius des am besten angepaßten sphärischen Fits betrug 7,11mm beim rechten und 6,41mm beim linken Auge. Offenbar fällt die unmittelbare Umgebung des Konus stark gegenüber dem Fit ab, so daß die Differenz bis zu einem Durchmesser von 10mm teilweise recht hohe negative Werte liefert. Außerhalb der 10mm verläuft die Hornhaut jedoch wesentlich flacher als der jeweilige Fitradius, so daß dieser Bereich in der Differenzkarte nicht mehr angezeigt werden. Er liegt über 10 Mikrometer und erscheint daher weiß.

Die folgenden beiden Bilder zeigen 3D Ansichten von den Differenzen, auf denen die vergleichsweise hohen Abweichungen vom Fit außerhalb des Konusbereichs sehr gut verdeutlicht werden.

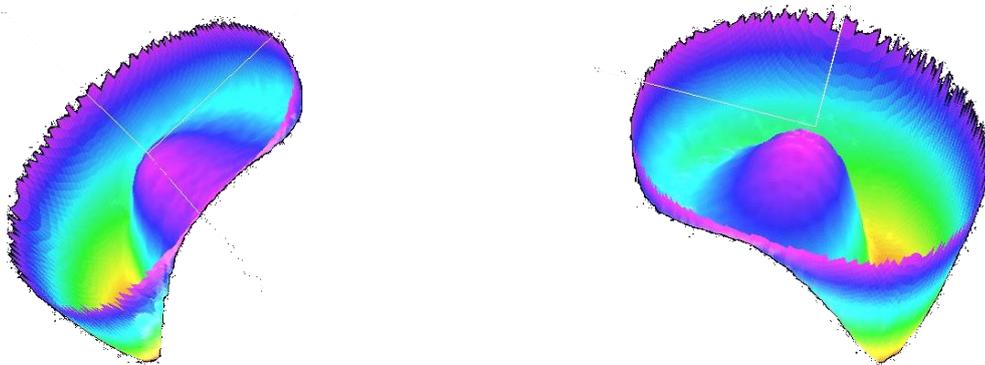


Abb. 4-27: 3D Ansichten der Differenzen zwischen Fit und Höhenprofil

## 4.2.5 Keratoplastik

Bereits auf dem Streifenbild eines Keratoplastik Auges ist der Übergang zwischen Spenderhornhaut und peripherer Hornhaut des Patienten deutlich zu erkennen.

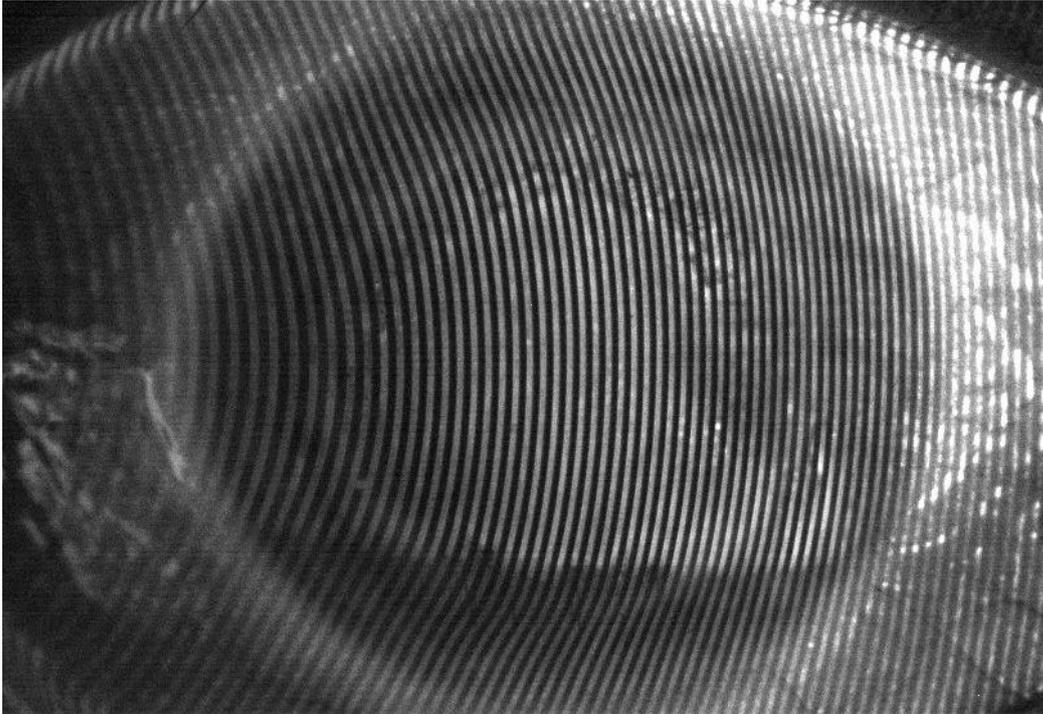


Abb. 4-28: Streifenbild eines Auges nach Keratoplastik mit Irregularitäten am Rand des Transplantats  
 Dem Tränenfilm des Auges wurde ebenfalls Fluoreszein vor der Messung beigegeben, um einen höheren Streifenkontrast zu erzielen. Der Verlauf der Lidkanten wird dadurch deutlich sichtbar. Etwa 1mm unter dieser Kante ist eine abrupte Verlaufsänderung der Streifen erkennbar. Dort scheint sich die Kante des Transplantats zu befinden. Diese Kante wird in der Krümmungskarte besonders deutlich.

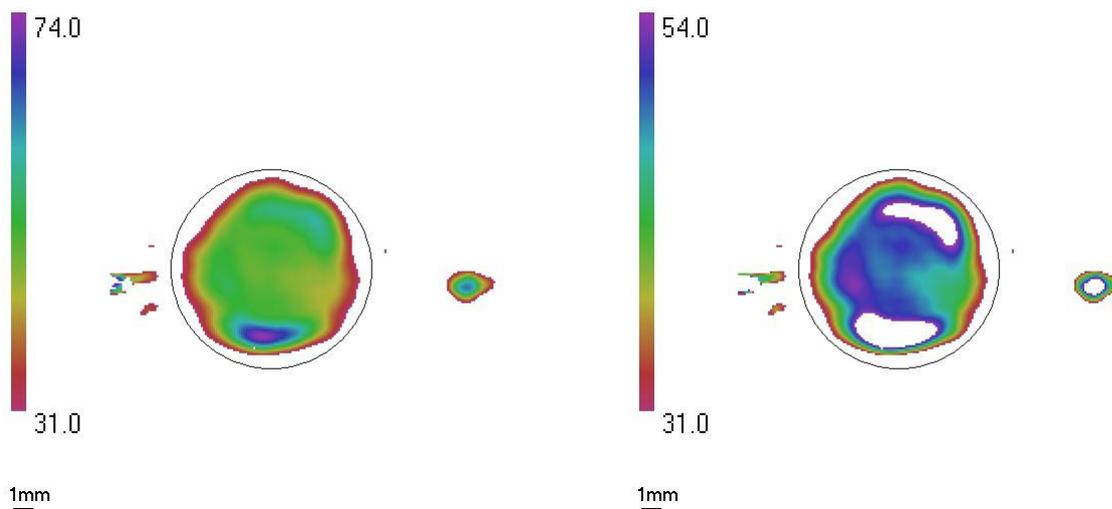


Abb. 4-29: Krümmungskarte des Auges nach Keratoplastik

Die rechte Krümmungskarte, in der ein Dioptrien Bereich von 31D bis 54D dargestellt ist, offenbart eine relativ kleine Zone mit etwa 5mm Durchmesser, in der die Krümmung fast konstant ist.

Das folgende Bild zeigt noch die Abweichung vom sphärischen Fit (Radius 6,93mm ).

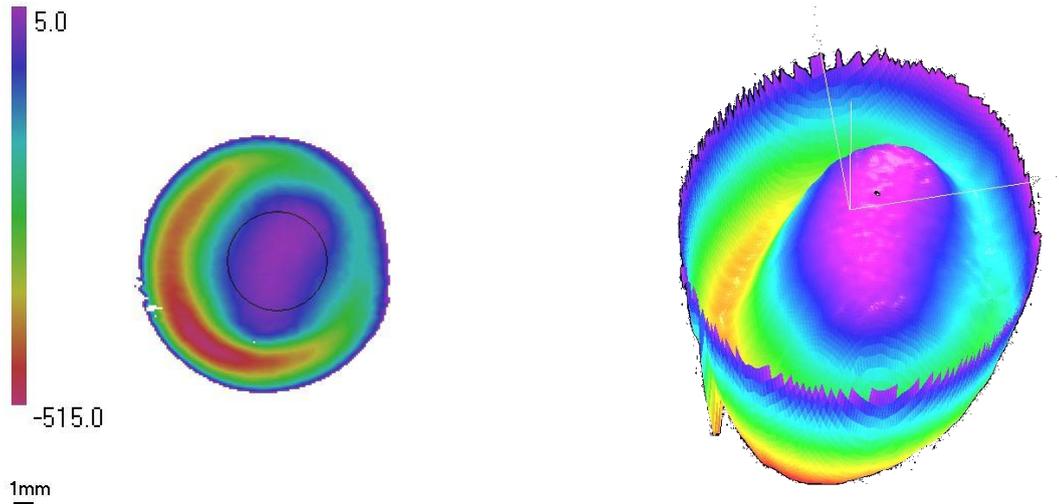


Abb. 4-30: Differenz zum sphärischen Fit, links als Karte, rechts als 3D Profil

Auch hier ist die Abweichung vom sphärischen Fit ähnlich wie bei den Keratokonus Augen. Die periphere Hornhaut fällt gegenüber dem Fit extrem weit ab.

#### 4.2.6 Photorefraktive Keratektomie (PRK)

Im Rahmen einer klinischen Studie wurden einige wenige Patientenaugen unmittelbar vor und nach einer PRK vermessen. Im Mittelpunkt des Interesses stand dabei die meßtechnische Erfassung des vom Laser abgetragenen Gewebevolumens.

##### 4.2.6.1 Streifenbilder

Auf den folgenden beiden Bildern sind die Streifenbilder unmittelbar vor und nach der Behandlung dargestellt. Die Lidkanten befinden sich außerhalb des dargestellten Bereichs, da sie durch ein Spekulum weiter außen festgehalten werden.

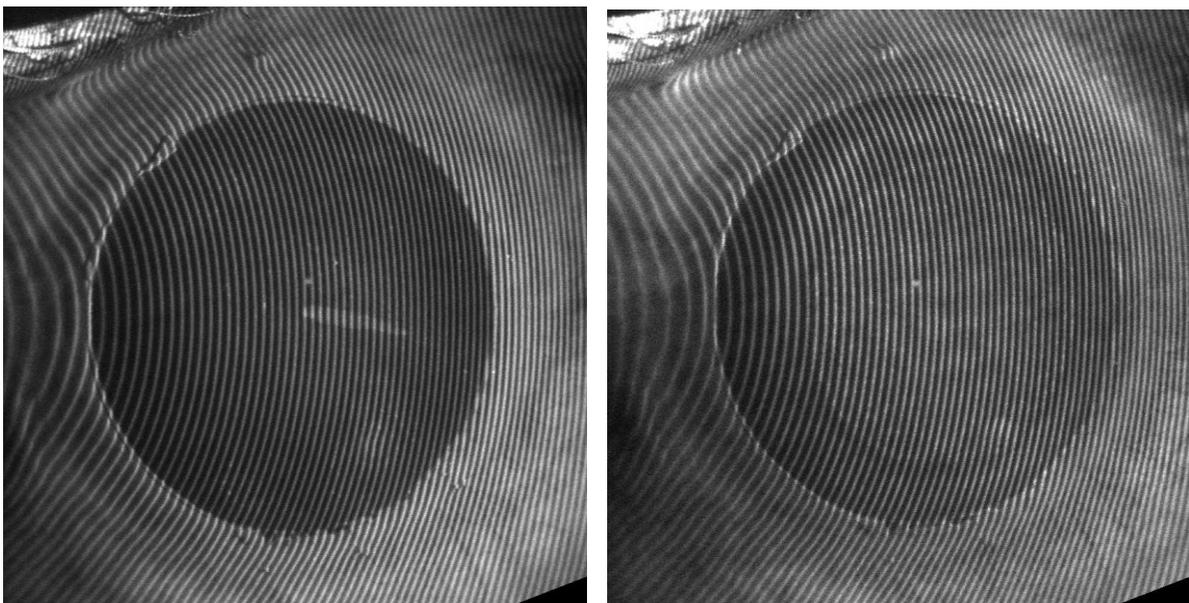


Abb. 4-31: Auge vor PRK Behandlung  
wurde das Epithel entfernt. Das Epithel fluoresziert heller als das Stromagewebe. Rechts ist der Laserabtrag erkennbar.

Auge nach PRK Behandlung. Innerhalb der Kante

Das linke Bild zeigt das Auge, nachdem die Epithelschicht entfernt wurde. Die mit einem Trepan erzeugte Kante des verbleibenden Epithels ist deutlich zu erkennen. Die Fluoreszenzcharakteristik von Epithel und Stroma unterscheiden sich stark voneinander. Stromales Gewebe erscheint wesentlich dunkler als das Epithel. Im Zentrum der Hornhaut ist nach dem Entfernen des Epithels ein kleiner Rest verblieben.

Das rechte Bild offenbart deutlich den Bereich auf der Hornhaut, der vom Laser bearbeitet wurde. Einzelne Laserpulse scheinen durch die variable Helligkeitsstruktur der Oberfläche erkennbar. Auch die sich an die Behandlungszone anschließenden Bereiche weisen nach der Behandlung andere Leuchtintensitäten auf als vorher. Die Behandlung wurde nicht in den vom Epithel befreiten Bereich zentriert sondern über der Pupille, die in diesen Aufnahmen nicht sichtbar ist. Zum Vergleich des intraoperativen Laserabtrags mit dem Behandlungseffekt nach Abschluß der Heilung wurden auch Bilder einen Monat nach der Behandlung zur Kontrolle aufgenommen. Diese wurden ausgewertet und von den Meßdaten von vor der Behandlung subtrahiert.

#### 4.2.6.2 Laserabtrag

Im Beispiel wurde eine sphärische Behandlung mit dem Ziel einer Korrektur um -2.5 Dioptrien vorgenommen. Zur Berechnung des gemessenen Laserabtrags wurden die beiden Messungen miteinander registriert und dann voneinander subtrahiert. Hier sind die Differenzkarten.

Die Skalenbereiche der beiden Differenzkarten sind identisch gewählt. Zwischen der intraoperativen Messung und der Kontrollmessung nach einem Monat bestehen nur geringe Unterschiede.

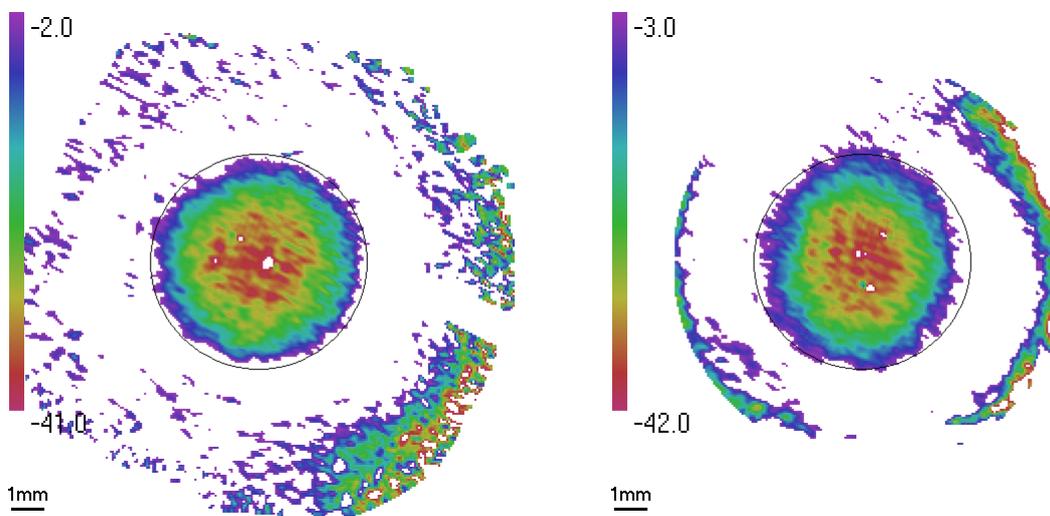


Abb. 4-32: Differenz während der Behandlung      Differenz 1 Monat postoperativ

Auch die Krümmungskarten geben Aufschluß über die induzierten Veränderungen:

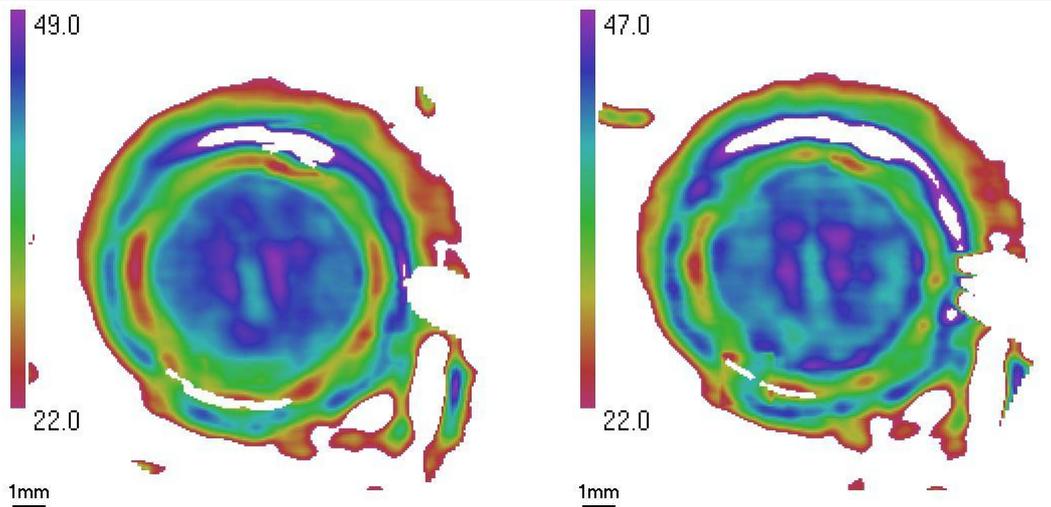


Abb. 4-33: Krümmung vor...

... und nach Laserabtrag

Diese beiden Krümmungskarten der intraoperativen Messungen sind peripher durch ringförmige Strukturen geprägt, die durch das Entfernen des Epithels entstehen. Im zentralen Bereich sind untereinander ähnliche Merkmale erkennbar, da die Farbskalen der Karten auf die angestrebte Behandlung angepasst wurden. Daher sollten die Unterschiede in der zentralen optischen Zone relativ klein sein. Peripher sind jedoch Abweichungen zu sehen.

In den folgenden beiden Bildern ist die ursprüngliche Krümmung der nach einem Monat gemessenen gegenübergestellt, wobei wiederum die oberen Grenzen der Skalen unter Berücksichtigung des angestrebten Abtrags angepasst wurden (Abb. 4-34).

Der zentrale Bereich weist aufgrund der Skalenanpassung ähnliche Werte auf. In der Peripherie treten auch hier deutliche Unterschiede hervor, die offenbar dem Laserabtrag zuzuschreiben sind.

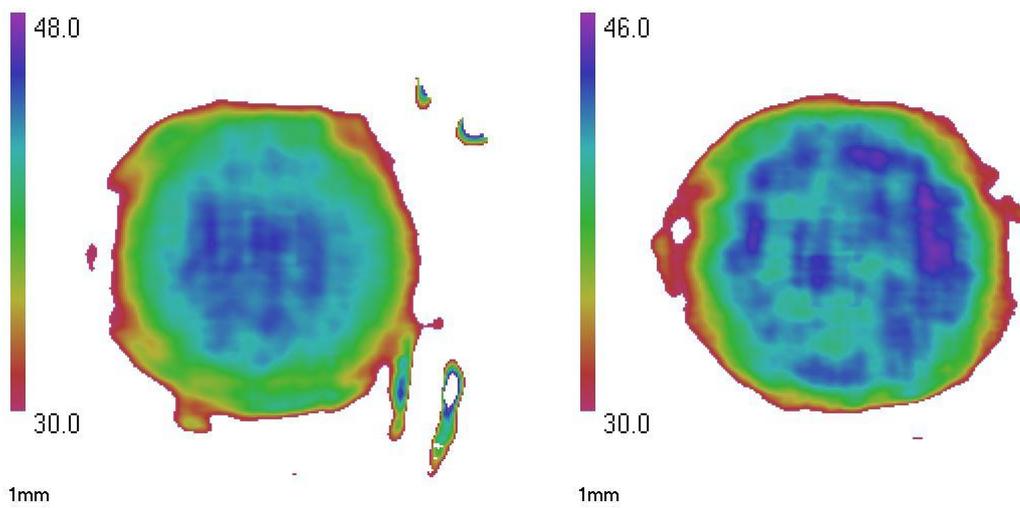


Abb. 4-34: Krümmung vor...

und 1 Monat nach der Behandlung

In der Studie wurden drei Größen mit der gemessenen Refraktionsänderung verglichen.

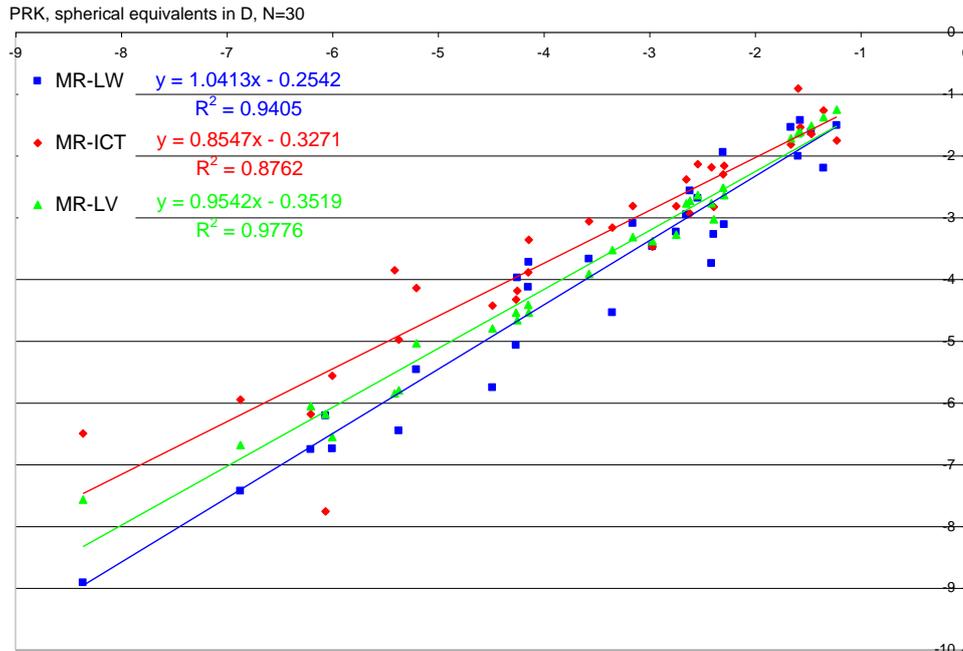


Abb. 4-35: Vergleich sphärischer Äquivalente von PRK Augen (N=30). Rot ist der Vergleich zwischen Refraktion und ICT Messung, blau zwischen Refraktion und Aberrationsmessung und grün zwischen Refraktion und Laserabtrag.

Die Augen wurden mit dem Aberrometer „LadarWave“ vor und nach der Behandlung gemessen. Die dabei festgestellte Refraktionsänderung ist in der Grafik mit LW bezeichnet und entspricht den blauen Punkten. Analog dazu stellen die grünen Punkte die in den Laser eingegebenen Refraktionsänderungen dar (LV für „LadarVision“). Schließlich sind die vom Meßsystem intraoperativ erfaßten Änderungen mit ICT („intraoperative corneal topography“) bezeichnet und in rot dargestellt.

Die Vertrauensintervalle liegen bei den Aberrometer Messungen und beim eingegebenen Laserabtrag bei über 90%. Die intraoperativen Messungen liegen mit 87% geringfügig niedriger. Der Verlauf der roten Linie ist geringfügig flacher als der der beiden anderen Linien.

#### 4.2.7 Laser in Situ Keratomileusis (LASIK)

Bei LASIK Behandlungen wird mit einem Mikrokeratom vor dem eigentlichen Laserabtrag eine Lamelle (Flap) erzeugt. Damit das Behandlungsareal in der Hornhaut frei zugänglich wird, klappt der Operateur diesen Flap auf. Da er über einen Steg mit der Hornhaut verbunden bleibt, kann er nach der Behandlung wieder an seine ursprüngliche Stelle zurückgeklappt werden. Neben der Vermessung des Abtragsvolumens stand der Einfluß des Flaps und im Vordergrund der Untersuchungen. Der Vergleich zwischen den intraoperativen Abtragsmessungen und den Unterschieden zwischen den Oberflächenformen vor und einen Monat nach der Behandlung standen im Mittelpunkt des Interesses.

##### 4.2.7.1 Streifenbilder

Zunächst sind typische, intraoperativ aufgenommene Streifenbilder dargestellt.

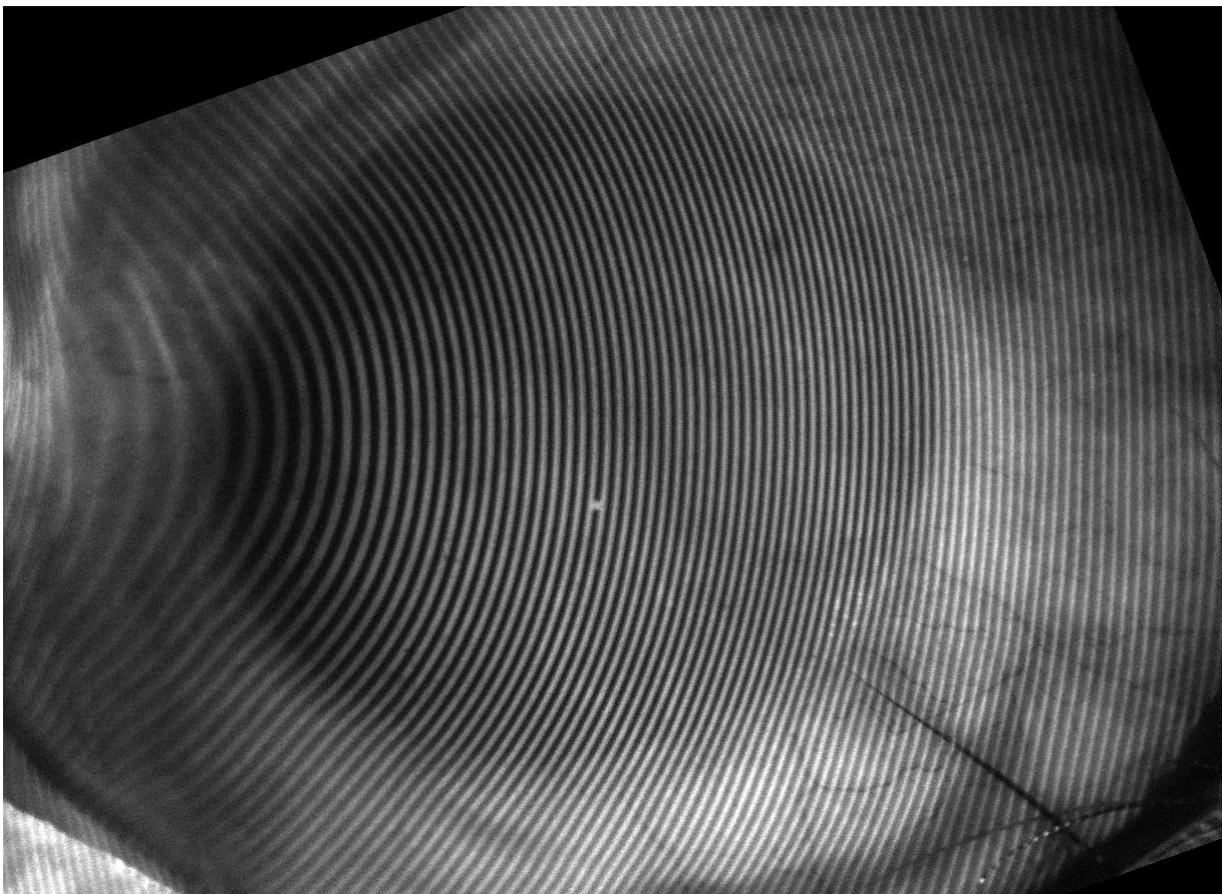


Abb. 4-36: Streifenbild eines Auges vor einer LASIK Behandlung

In diesem Bild ist ein Auge unmittelbar vor Aufsetzen des Mikrokeratoms dargestellt. Die Augenlider werden von einem Spekulum beiseite gehalten. Dennoch ist rechts unten im Bild eine Wimper zu erkennen, die vor dem Schnitt noch beseitigt wurde.

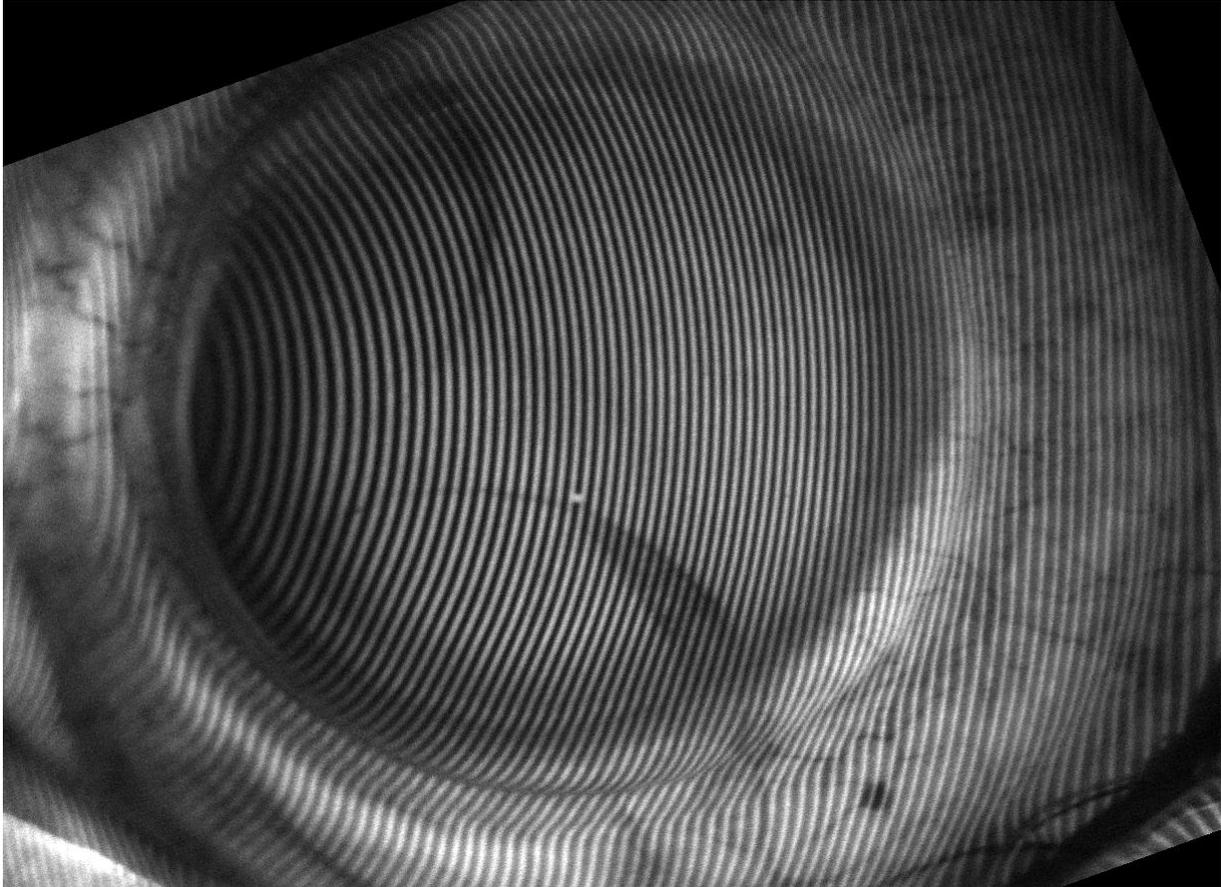


Abb. 4-37: Streifenbild des Auges nach dem Schnitt des Flaps. Die schwarzen Kreisabschnitte sind mit Tinte aufgetragen. Sie dienen zur Lagebestimmung des Flaps, falls er vollständig abgeschnitten werden sollte. Außerhalb des Limbus erscheint das Streifenmuster extrem wellig.

Dies Bild ist unmittelbar nach Abnehmen des Mikrokeratomkopfs vom Auge aufgenommen worden. Im Zentrum sind Ausschnitte von zwei kreisförmigen Linien zu sehen, die der Operateur vor dem Schnitt auf die Hornhaut aufgebracht hat. Anhand des Verlaufs der Linien kann er im Fall einer unbeabsichtigten Abtrennung des Flaps diesen wieder lagerecht positionieren und ggf. annähen. Deutlich sind die starken Verwerfungen im Bereich des Limbus und auf der Sklera zu erkennen. Dort ist das Gewebe durch die Ansaugvorrichtung des Mikrokeratoms stark deformiert worden. Die auf dem vorigen Bild bis an die Hornhaut reichende Wimper ist hier an den Rand gedrückt worden.

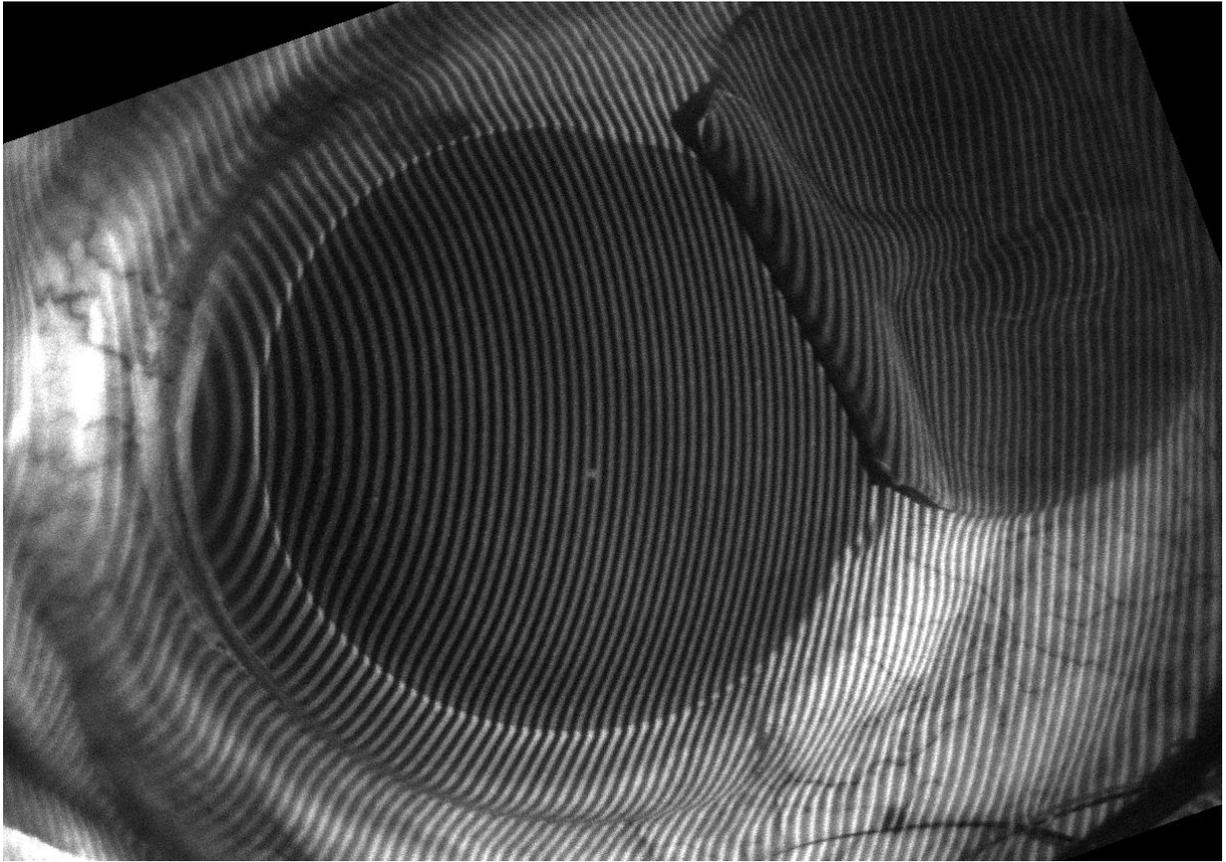


Abb. 4-38: Streifenbild des Auges nach Öffnen des Flaps vor der Laserbehandlung. Der Kontrastunterschied zwischen Epithel, Stroma und Sklera ist deutlich erkennbar.

Hier ist der Flap nach rechts geöffnet und auf der Bindehaut abgelegt worden. Wie bei dem PRK Auge erscheint das Stromagewebe dunkler als das Epithel und auch als das Skleragewebe. Die durch die Ansaugung des Mikrokeratomkopfs verursachten Verwerfungen der Peripherie sind unverändert vorhanden. Der Streifenverlauf unter dem Flap scheint zum Rand hin stärker gebogen als im Zentrum.

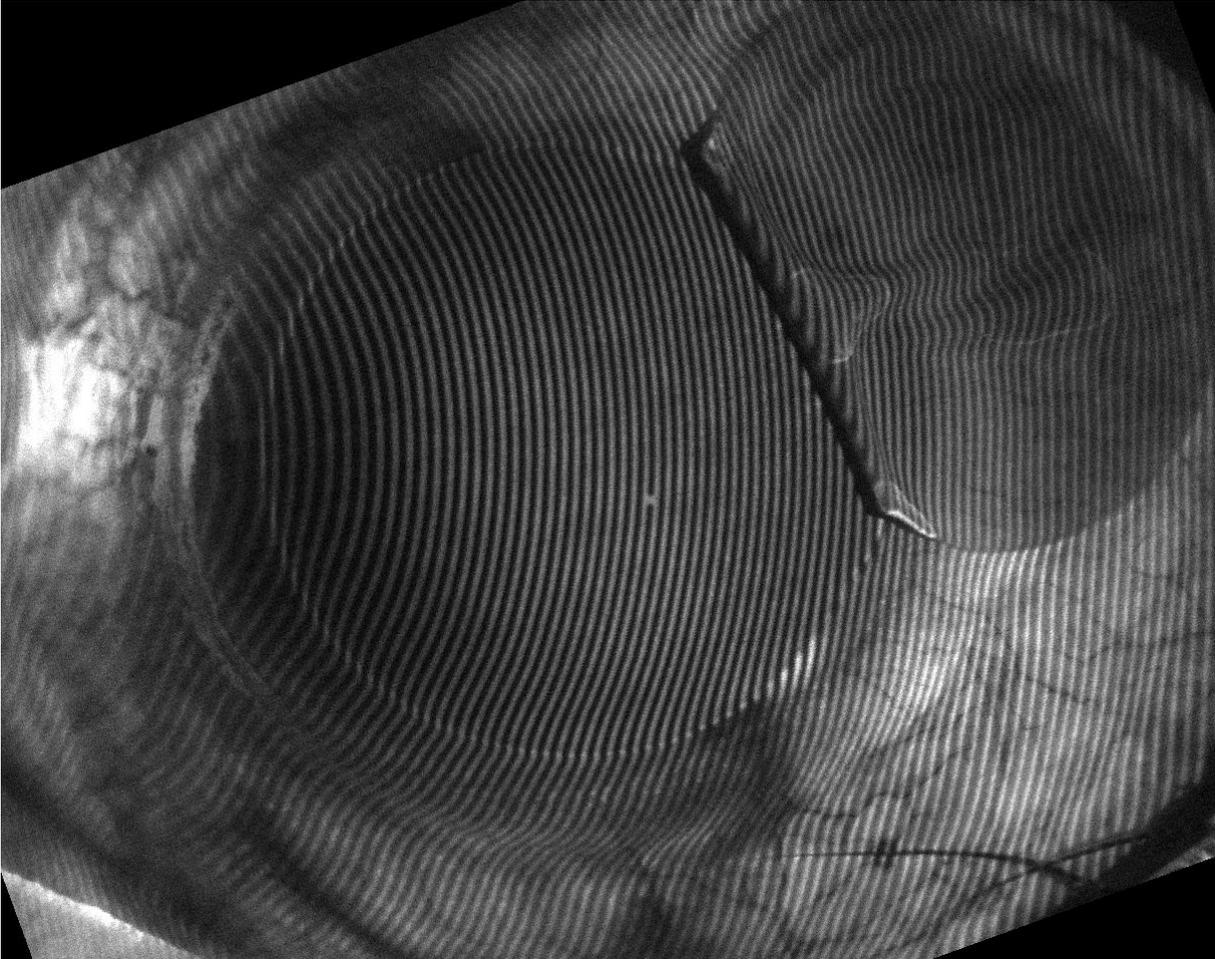


Abb. 4-39: Streifenbild des Auges nach Abschluß der Laserbehandlung. Der Abtrag einzelner Laserpulse ist erkennbar.

Hier ist das Auge nach dem Ende der Behandlung abgebildet. Der Kontrastunterschied zwischen den Streifen auf dem Stroma und den Streifen auf dem angrenzenden Epithel und der Sklera hat sich deutlich verringert. Dies kann mit der unter der Behandlung einsetzenden Austrocknung der Oberflächen oder mit der Ablagerung der von Laserpulsen herausgeworfenen Gewebepartikeln zusammenhängen. Wie beim PRK Auge sind auch hier die Auftreffpunkte der einzelnen Laserpulse noch zu erahnen. Der Flap scheint etwas näher an die Bindehaut gedrückt worden zu sein, um das Behandlungsareal nicht zu bedecken. Die Wimper hat sich inzwischen wieder etwas gelöst, vermutlich weil sich das Auge unter der Behandlung bewegt hat.

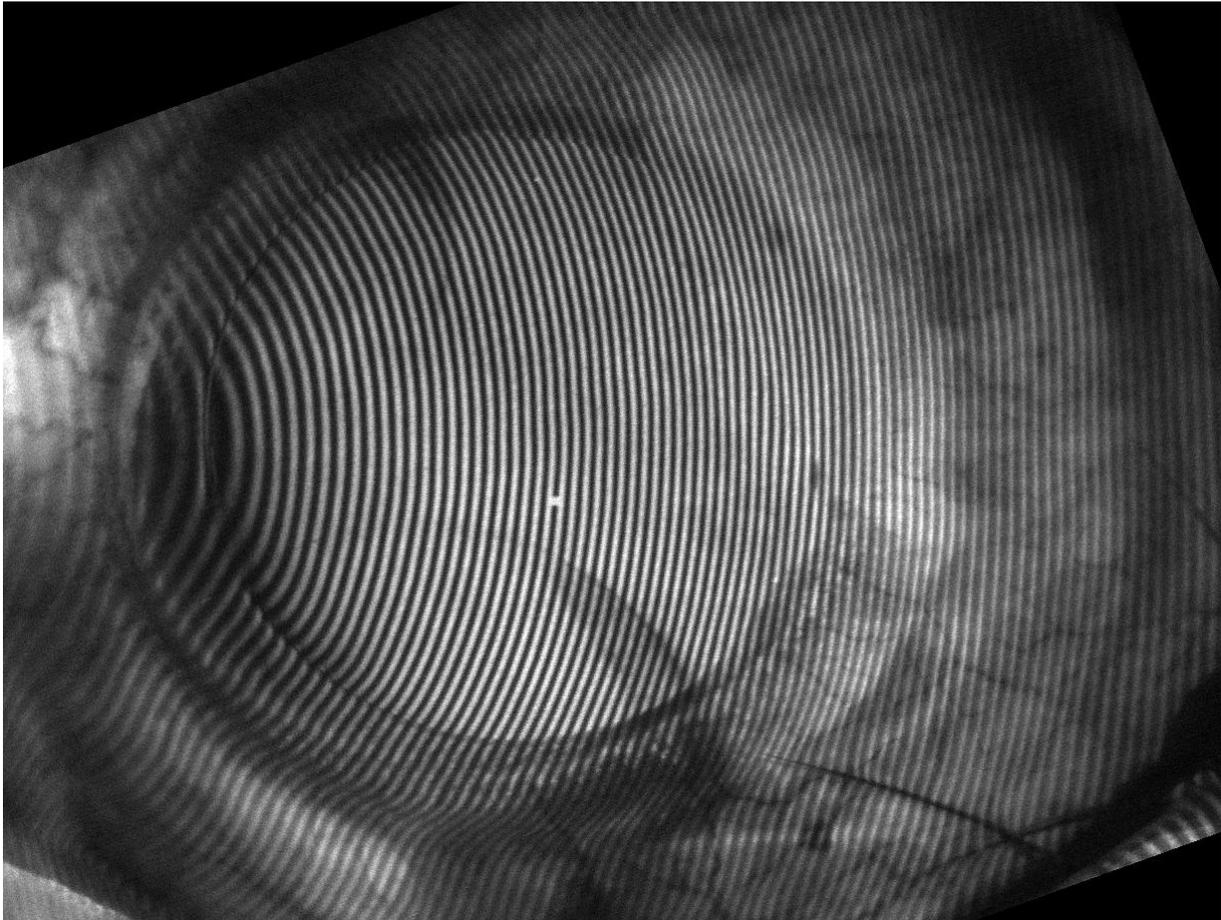


Abb. 4-40: Streifenbild des Auges nach dem Schließen des Flaps

Dieses Bild zeigt das Auge nachdem die Behandlung abgeschlossen war und der Flap wieder geschlossen wurde. Zunächst fällt auf, daß der Streifenkontrast wieder seine ursprüngliche Höhe erreicht hat. Allerdings hat der Operateur die Hornhaut vor dem Schließen gründlich gespült und gereinigt. Der Flap hat sich noch nicht wieder optimal in sein „Bett“ gelegt. Am linken Rand ist noch eine Spalte zu erkennen. Auf der gegenüberliegenden Seite erkennt man am Streifenverlauf eine Wulst, die auf der Rückseite des umgefalteten Flaps entstanden ist. Außerdem hat der umgelegte Flap einen hellen Abdruck auf der Sklera hinterlassen. Die Verwerfungen am Rand sind in ihrer Ausprägung kleiner geworden, bestehen aber nach wie vor.

#### 4.2.7.2 Gewebeaufwerfungen

Die in den Streifenbildern schon erkennbaren peripheren Aufwölbungen sind besonders deutlich in Krümmungskarten zu erkennen. Hier sind entsprechende Bilder:

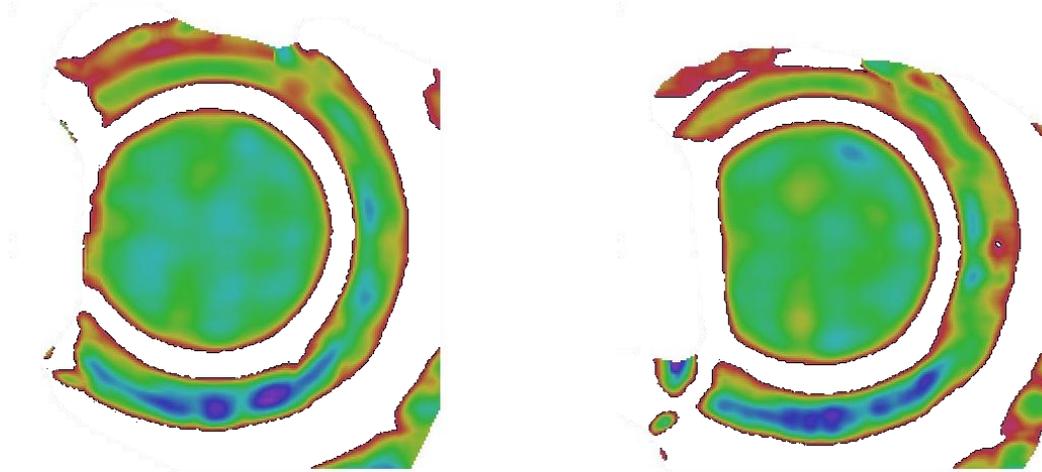


Abb. 4-41: Krümmungskarte vor... ... und nach der Laserabtrag

Zwischen den beiden Aufnahmen liegen ca. zwei Minuten. Die beiden Krümmungskarten verdeutlichen, wie die Aufwölbung des Gewebes im Verlauf dieser Zeit sich langsam zurückbildet, da sich die Farben in Richtung niedrigerer Krümmungen verändert haben.

#### 4.2.7.3 Flapdicke

Die Differenz aus den Oberflächenkarten vor dem Mikrokeratomschnitt und nach Öffnen des Flaps gibt Aufschluß über die dreidimensionale Flapform. Diese kann eine Rolle spielen, wenn bei einer hohen Korrektur der Laserabtrag im Zentrum zusammen mit dem Flap die verbleibende Hornhautdicke so stark reduziert, daß sie unter das allgemein anerkannte Minimum von 250 Mikrometern sinkt.

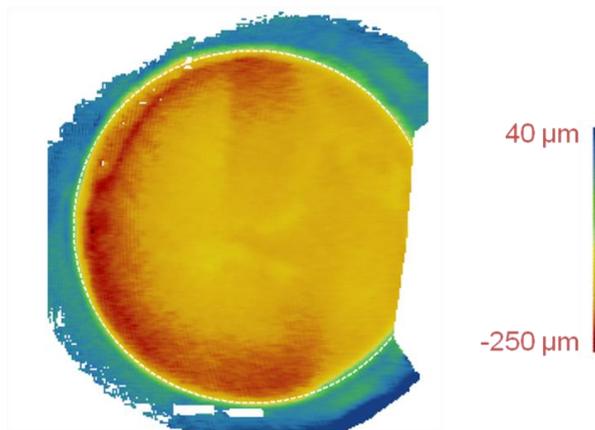


Abb. 4-42: 3D Flap Profil. In der Peripherie wurde zunächst tiefer geschnitten als im Zentrum.

Die Karte zeigt, daß die Schnitttiefe am Rand höher ist als im Zentrum. Dies ist vorteilhaft, weil die Hornhaut im Zentrum ebenfalls dünner ist. Bei dem Schnitt scheint es auf halbem Weg über dem Zentrum der Pupille eine Stufe zu geben, die auf eine Unterbrechung der Schnittführung hindeuten könnte.

#### 4.2.7.4 Laserabtrag

Die Meßergebnisse des Laserabtrags bezogen sich zumeist auf stärker fehlsichtige Augen. Hier ist ein Beispiel der Behandlung einer Fehlsichtigkeit von -8 Dioptrien. Der behandelte Bereich hatte einen Durchmesser von 6mm, der in den Karten als schwarzer Kreis eingezeichnet ist. Die beiden folgenden Karten zeigen die Differenz der Messungen nach Registrierung. Links wurden die beiden Oberflächen vor und nach der Behandlung voneinander subtrahiert, rechts ist die Differenz zwischen präoperativer Messung und Kontrollmessung einen Monat nach der Behandlung dargestellt.

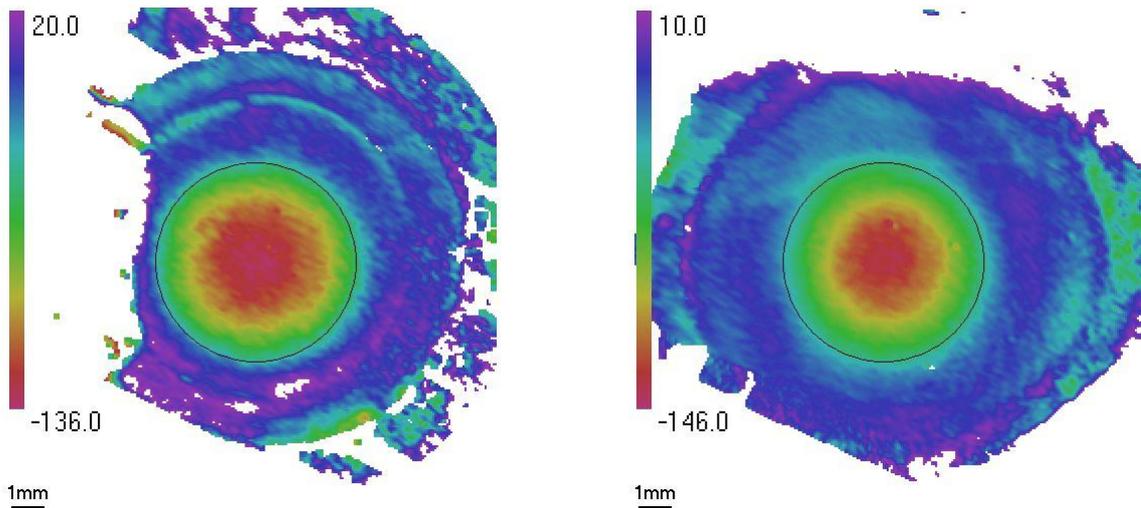


Abb. 4-43: intraoperativ gemessener Abtrag                      1 Monat postoperativ

Die Registrierung der intraoperativ erfaßten Daten ist aufgrund der starken peripheren Verwerfungen mitunter schwierig. In diesem Beispiel hat sich auch die Form des Kraters geringfügig verändert. Dies ist ein Beispiel dafür, daß die intraoperativen Messungen nicht immer optimal mit den Kontrollmessungen übereinstimmen.

Krümmungskarten geben weiteren Aufschluß über die induzierten Veränderungen.

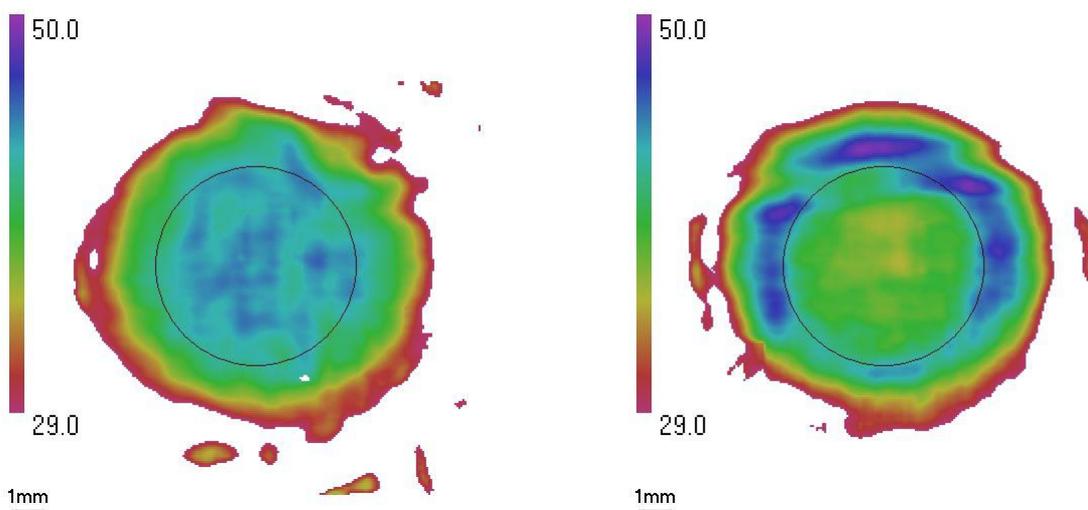


Abb. 4-44: Krümmung präoperativ

Krümmung 1 Monat postoperativ

Zur besseren Veranschaulichung des Sachverhalts sind hier zwei horizontale Schnittlinien durch die Profile gezeigt. Die x-Achsen decken dabei jeweils den Bereich von 29D bis 50D ab. In y-Richtung sind 11mm dargestellt.

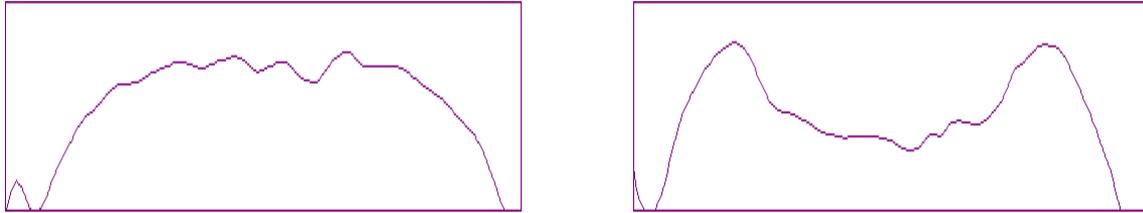


Abb. 4-45: Schnitt durch das präoperative und durchs postoperative Krümmungsprofil. Innerhalb der zentralen 6mm ist eine deutliche Reduktion der Krümmung bewirkt worden. Außerhalb der 6mm bis etwa 9mm Breite ist eine starke Erhöhung der Krümmung entstanden. Diese Grafiken sind so zu verstehen, daß im Zentrum die Krümmung abgenommen hat, da durch die Behandlung die Hornhaut abgeflacht wurde. Am Rand der Behandlungszone ist hingegen eine deutliche Aufsteilung der Hornhaut zu beobachten, da dort der Übergang von der inzwischen abgeflachten auf die unbehandelte Hornhaut liegt.

Im Rahmen der Studie wurden drei Größen mit der gemessene Refraktionsänderung verglichen. Die Augen wurden mit einem Aberrometer vor und nach der Behandlung gemessen. Die dabei festgestellte Refraktionsänderung ist in der Grafik mit LW (für „LadarWave“, der Name des Aberrometers) bezeichnet und entspricht den blauen Punkten. Analog dazu stellen die grünen Punkte die in den Laser eingegebenen Refraktionsänderungen dar (LV für „LadarVision“). Schließlich sind die vom Meßsystem intraoperativ erfaßten Änderungen mit ICT („intraoperative corneal topography“) bezeichnet und in rot dargestellt.

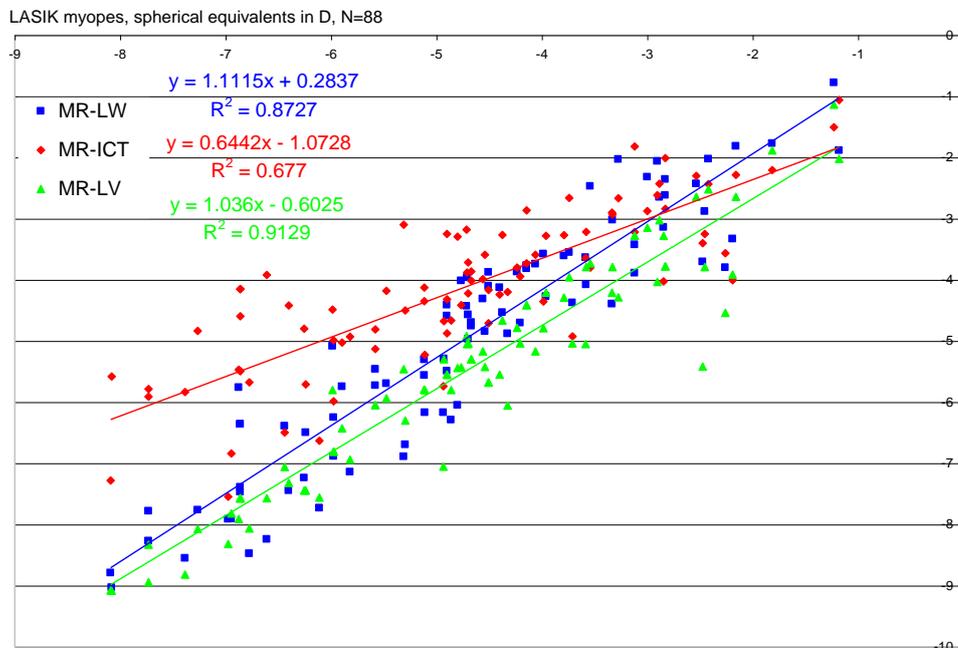


Abb. 4-46: Vergleich sphärischer Äquivalente von LASIK Augen (N=88). Rot ist der Vergleich zwischen Refraktion und ICT Messung, blau zwischen Refraktion und Aberrationsmessung und grün zwischen Refraktion und Laserabtrag.

Die Streuung der roten Werte ist am höchsten, die Steigung der roten Ausgleichsgerade am kleinsten. Die beiden anderen Wertegruppen sind relativ ähnlich.

#### 4.2.7.5 Flapfalte

Auf den Streifenbildern, die zu den einzelnen Etappen der Behandlung aufgenommen wurden, ist deutlich zu sehen, wie der Flap erst gefaltet und später wieder zurückgelegt wird. Hier ist noch ein Beispiel für eine Aufnahme eines Auges nach der Behandlung:

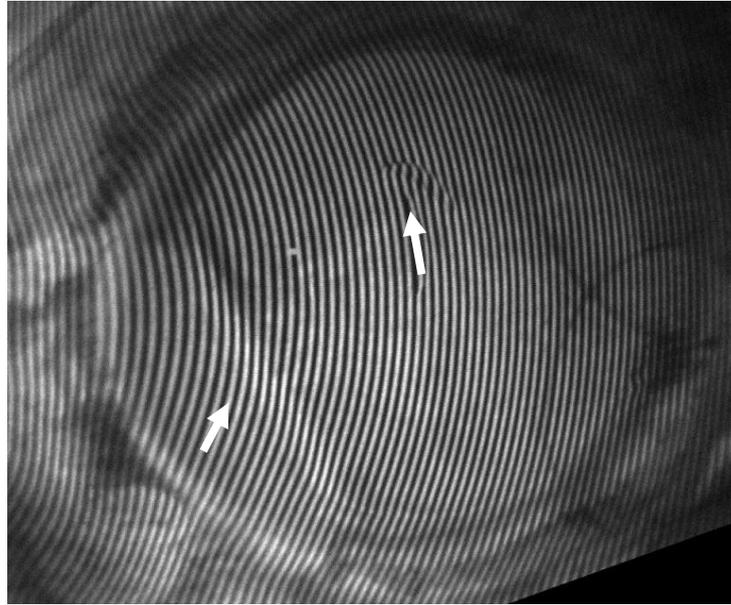


Abb. 4-47: Flapfalte und Epitheldefekt nach Beendigung der Behandlung

Eine solche Wulst wurde bei einigen Augen auch noch bei den Kontrollaufnahmen einen Monat nach der Behandlung beobachtet. Hier sind beispielhafte Krümmungskarten:

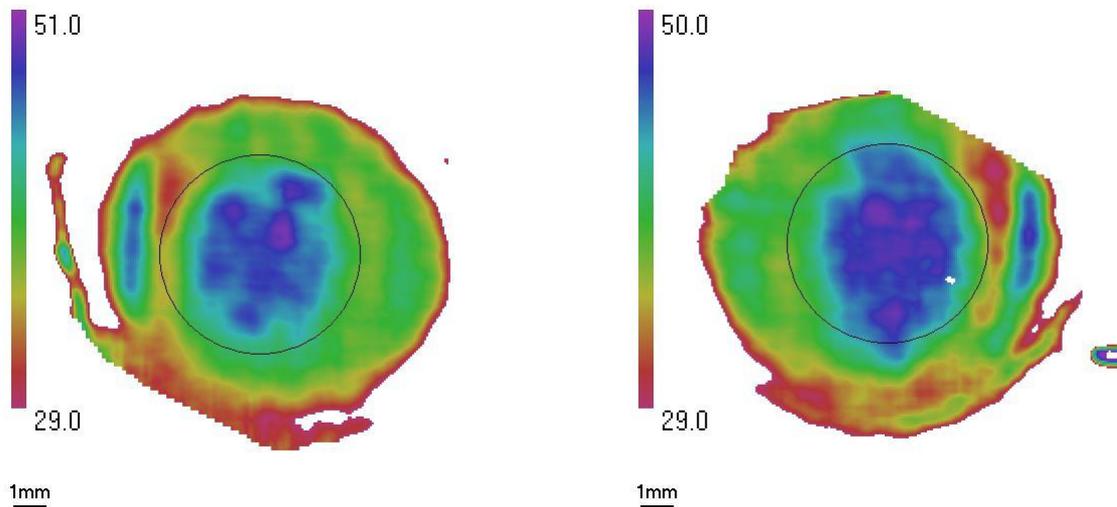


Abb. 4-48: Krümmung 1 Monat postop. OD

Krümmung 1 Monat postop. OS

Die Durchmesser der schwarzen Kreise entsprechen dem Behandlungsdurchmesser von 6mm. Deutlich ist zu sehen, daß die Bereiche konstanter Krümmung kaum mehr als 4mm Durchmesser haben.

Dies wird in den folgenden Profilschnitten mit 1mm Länge noch offensichtlicher:

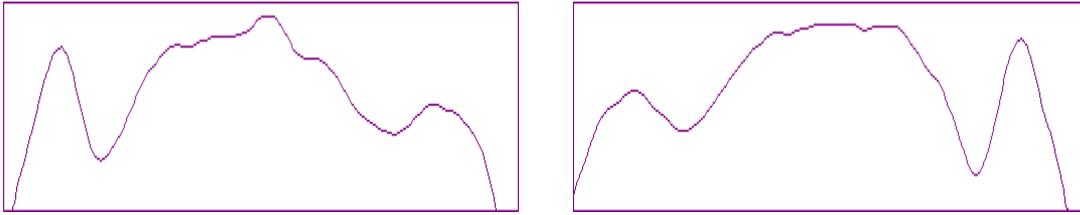


Abb. 4-49: Profilschnitt OD

Profilschnitt OS

Im Bereich des „Flapscharniers“ ergibt sich ein Abfall und Anstieg der Krümmung um jeweils 10 Dioptrien. Diese Welle reicht mit ihren Ausläufern bis in die zentralen 5-6mm Durchmesser, was bei manchen Augen deutlich weniger als der skotopische Pupillendurchmesser ist.

#### 4.2.7.6 Epitheleinwachsungen

Die Epithelschicht ist bei Verletzungen bestrebt, vom Limbus kommend Richtung Zentrum der Hornhaut sich zu regenerieren. Dieser Mechanismus kann dazu führen, daß Epithelzellen unter den Flap wandern (migrieren), wenn der Flap nicht vollständig an der Hornhaut anliegt oder eine Spalte nach der Behandlung zurückbleibt<sup>86</sup>. Die eingewanderten Zellen verändern die Oberflächenform und verringern das Kontrastsehvermögen, da an ihnen das einfallende Licht gestreut wird. Im Fall einer Epithelmigration hebt der Operateur den Flap an und reinigt den Zwischenraum (das sogenannte „Interface“) unter Beobachtung am Mikroskop des Lasers.

Das folgende Streifenbild zeigt ein Auge mit Epithelmigration nach Öffnen des Flaps.

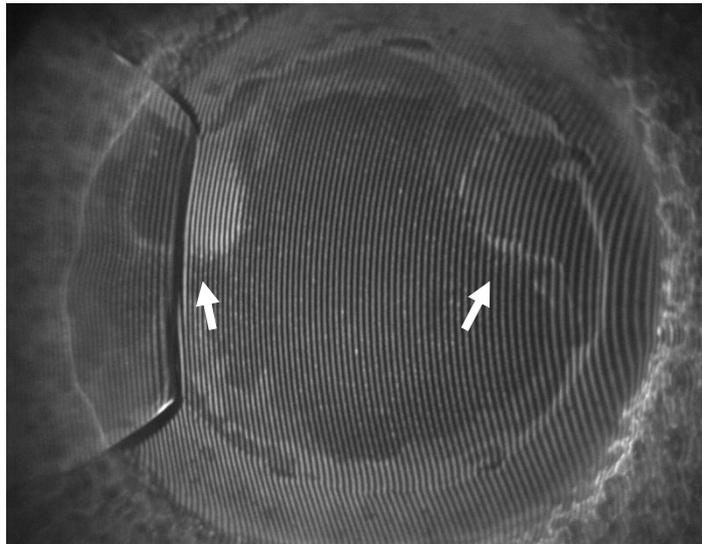


Abb. 4-50: Streifenbild einer Hornhaut mit Epithelmigration unter den Flap (Pfeile)

Der Flap ist zur linken Seite hin aufgeklappt. Bei 10 Uhr ist ein prominenter opaker Bereich von Zellen zu erkennen. Zwischen halb zwei und drei Uhr befindet sich eine relativ transparente Scholle, die weit in die optische Zone hineinreicht. Die Kante des „Betts“ ist relativ unregelmäßig und weist ein Fluoreszenzverhalten auf, das dem des umgebenden Epithels mehr ähnelt als dem des zentralen Stromas.

Hier ist dieselbe Hornhaut nach manuellem Entfernen der Einwachsungen:

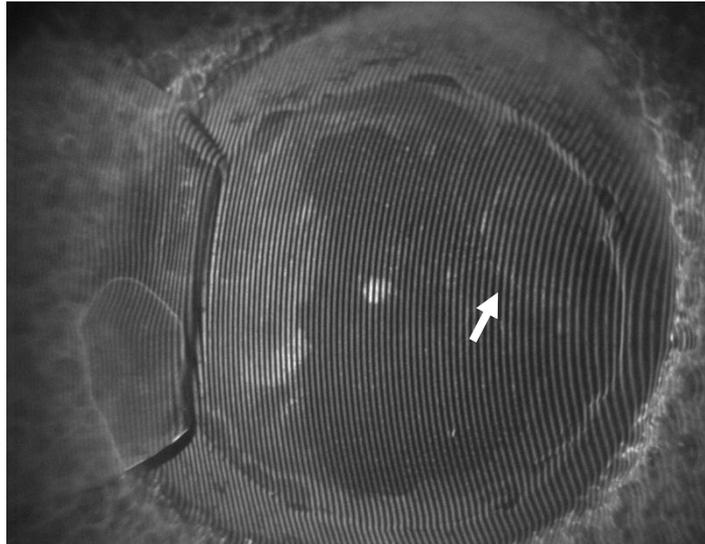


Abb. 4-51: Streifenbild der Hornhaut nach Entfernen der Epitheleinwachsung. Rechts sind die Zellen nur unvollständig entfernt worden (Pfeil).

Der Operateur verwendet für die Beseitigung der Einwachsungen ein Hockeymesser oder einen anderen scharfkantigen Gegenstand, mit dem er die Zellen beiseite schiebt und falls erforderlich auch abkratzt. Hier ist der opake Bereich deutlich verändert. Der Streifenverlauf ist wesentlich glatter als zuvor. Die Peripherie hingegen erscheint relativ unverändert. Vor allem die zuvor beschriebene Scholle um 2 Uhr wurde kaum bearbeitet.

Genaueren Aufschluß über die vorgenommenen Veränderungen kann die folgende Differenzkarte geben.

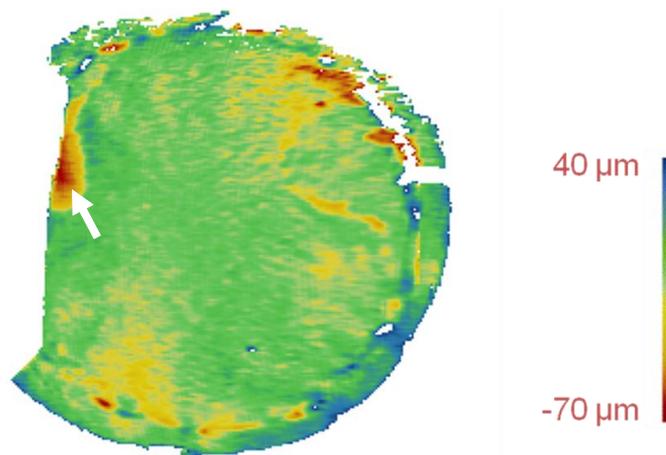


Abb. 4-52: Differenzkarte zwischen vor und nach Entfernen der Epitheleinwachsung. Links wurden bis zu  $70\mu\text{m}$  weggekratzt (Pfeil).

Die roten und gelben zeigen die Bereiche an, in denen der Operateur Gewebe entfernt hat. Grüne Bereiche sind relativ unverändert geblieben. Der oben beschriebene Befund aus dem Streifenbild wird damit bestätigt.

Ob das Sehen dieses Auges von der verbleibenden Epitheleinwachsung weiterhin beeinträchtigt war, konnte nicht in Erfahrung gebracht werden.