

Aus der
Augenklinik Sulzbach
Knappschaftsklinikum Saar
Krankenhaus Sulzbach

**Analyse der Clear-Cornea-Inzisionen mit einem
niedrigenergetischen
Femtosekunden-Laser in der Kataraktchirurgie**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen**

vorgelegt von

Reipen, Lena Maria

2023

Dekan: Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter: Professor Dr. K. Januschowski

2. Berichterstatter: Professor Dr. O. Borst

Tag der Disputation: 12.07.2023

Für meine Eltern

Gender-Disclaimer

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einleitung	11
1.1 Anatomie des Auges	13
1.2 Die Katarakt	16
1.2.1 Symptome der Katarakt	17
1.2.2 Operative Methoden der Kataraktbehandlung	18
1.2.3 Komplikationen und mögliche Spätfolgen einer Kataraktoperation	25
1.3 Ziel der Arbeit	27
2 Material und Methoden	29
2.1 Der Femtosekundenlaser	29
2.2 Operationsablauf	30
2.3 Ein- und Ausschlusskriterien	32
2.4 Ethikvotum	33
2.5 Messungen und Messmethoden	33
2.5.1 Prä- und postoperative Messungen	33
2.5.2 Videoauswertung	34
2.5.3 Durchgängigkeit der Schnitte	36
2.5.4 Dokumentation des intraoperativen Situs	37
3 Ergebnisse	39
3.1 Patientenkollektiv	39
3.2 Analyse der Quantität und Qualität der Inzisionen pro Quadrant	39
3.2.1 Limbusdetektion	39
3.2.2 Limbale Gefäßeinsprossungen	42
3.2.3 Arcus lipoides	45

3.3	Die Durchgängigkeit der Schnitte _____	47
3.3.1	Der Einfluss der Limbusdetektion auf die Schnittdurchgängigkeit_	48
3.3.2	Einfluss der limbal einsprossenden Blutgefäße auf die Schnittdurchgängigkeit _____	54
3.3.3	Einfluss der Ausprägung des Arcus lipoides auf die Schnittdurchgängigkeit _____	58
4	Diskussion _____	63
5	Zusammenfassung _____	76
6	Literaturverzeichnis _____	78
7	Erklärung zum Eigenanteil _____	87
8	Veröffentlichungen _____	88
9	Danksagung _____	89
10	Lebenslauf _____	90

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 – Schematischer Schnitt durch Hornhaut, Linse und Halteapparat.....	14
Abbildung 2 – „Phakoemulsifikation und Shooter-Implantation einer flexiblen, monofokalen Acryl-IOL.....	20
Abbildung 3 - Graphic User Interface (GUI)	23
Abbildung 4 - FEMTO LDV Z8.....	29
Abbildung 5 - Handstück des FEMTO LDV Z8.....	30
Abbildung 6 - Beispiel Schnittsetzung rechtes Auge	31
Abbildung 7 - Schematische Darstellung der Einteilung der Quadranten der Augen	34
Abbildung 8 - Repräsentatives Patientenbild zur Darstellung der limbalen Vaskularisation und des Arcus lipoides.....	35
Abbildung 9 - Standardisierter OP-Begleitbogen für die Femtosekundenlaser-assistierte Kataraktoperationen der Augenambulanz.....	37
Abbildung 10 - Verteilung der quadrantenabhängigen Bewertung der Limbusdetektion	39
Abbildung 11 - Seiten- und quadrantenabhängige Bewertung der Limbusdetektion	40
Abbildung 12 - Linkes Patientenaugewährend des Docking-Prozesses	42
Abbildung 13 - Seitenunabhängige limbale Gefäßeinströmungen in den einzelnen Quadranten	43
Abbildung 14 - Seitenabhängige limbale Vaskularisation in den Quadranten...	43
Abbildung 15 - Seitenunabhängige Bewertung der Ausprägung des Arcus lipoides in den einzelnen Quadranten.....	45
Abbildung 16 - Seitenabhängige Bewertung der Ausprägung des Arcus lipoides in den einzelnen Quadranten	46
Abbildung 17 - Linkes Patientenaugevor und nach der Schnittplanungsanpassung durch den Operateur am GUI.....	48
Abbildung 18 - Gegenüberstellung der Durchgängigkeit der Main Incision und der Schnittlokalisierung, Limbusdetektion, sowie Schnittplanung	49
Abbildung 19 - Gegenüberstellung der Durchgängigkeit der Parazentesen und der Limbusdetektion, sowie Schnittplanung ebendieser	52

Abbildung 20 - Gegenüberstellende Zusammenfassung der absoluten Durchgängigkeit der Main Incision und der Bewertung der limbalen Gefäßeinsprossungen, sowie der Schnittlokalisierung und der Schnittplanung.....	54
Abbildung 21 - Gegenüberstellung der Durchgängigkeit der Parazentesen und der limbalen Gefäßeinsprossungen, sowie der Schnittplanungsänderungen.....	57
Abbildung 22 - Gegenüberstellung der Durchgängigkeit der Main Incision und der Schnittlokalisierung, der Ausprägung des Arcus lipoides, sowie der Schnittplanungsänderungen	59
Abbildung 23 - Gegenüberstellung der Durchgängigkeit der Parazentesen und der Ausprägung des Arcus lipoides, sowie der Schnittplanungsänderungen.....	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Absolute Verteilung der quadrantenabhängigen Bewertung der Limbusdetektion insgesamt und pro Seite	41
Tabelle 2 - Absolute Verteilung limbalen Gefäßeinsprossungen in den Quadranten, seitenabhängig sowie insgesamt	44
Tabelle 3 - Absolute Verteilung der Ausprägung des Arcus lipoides in den Quadranten, insgesamt und seitenabhängig.....	46
Tabelle 4 - Absolute Verteilung der Durchgängigkeit, abhängig von der Lokalisation der Main Incision	50
Tabelle 5 - Absolute Verteilung der Durchgängigkeit der Main Incision in Abhängigkeit zur Limbusdetektion	50
Tabelle 6 - Absolute Durchgängigkeit in Abhängigkeit einer möglichen Veränderung der Schnittplanung der Main Incision	51
Tabelle 7 - Absolute Verteilung der Durchgängigkeit abhängig von der Lokalisation der Parazentesen	52
Tabelle 8 - Absolute Verteilung der Durchgängigkeit der Parazentesen in Abhängigkeit zur Limbusdetektion	53
Tabelle 9 - Absolute Durchgängigkeit der Parazentesen in Abhängigkeit einer möglichen Veränderung der Schnittplanung	53
Tabelle 10 - Absolute Werte der Durchgängigkeitsbewertung der Main Incision in Abhängigkeit der limbalen Gefäßeinsprossungen.....	55
Tabelle 11 - Absolute Anzahl der Schnittplanungsanpassungen der Main Incision in Abhängigkeit von limbalen Gefäßeinsprossungen.....	55
Tabelle 12 - Absolute Werte der Durchgängigkeitsbewertung der Parazentesen in Abhängigkeit der limbalen Gefäßeinsprossungen.....	57
Tabelle 13 - Absolute Anzahl der Schnittplanungsanpassungen der Parazentesen in Abhängigkeit von limbalen Gefäßeinsprossungen	58
Tabelle 14 - Absolute Werte der Durchgängigkeitsbewertung der Main Incision in Abhängigkeit der Ausprägung des Arcus lipoides.....	59
Tabelle 15 - Absolute Anzahl der Schnittplanungsanpassungen der Main Incision in Abhängigkeit von der Ausprägung des Arcus lipoides	60
Tabelle 16 – Absolute Werte der Durchgängigkeitsbewertung der Parazentesen in Abhängigkeit der Ausprägung des Arcus lipoides.....	62
Tabelle 17 - Absolute Anzahl der Schnittplanungsanpassungen der Parazentesen in Abhängigkeit von der Ausprägung des Arcus lipoides....	62

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AT	Augentropfen
BCDVA	<i>Best corrected distance visual acuity</i> (Bestkorrigierter Fernvisus)
BSS	<i>Balanced Salt Solution</i> (isotone, gepufferte Salzlösung)
CCI	Clear corneal incision
ECCE	<i>extracapsular cataract extraction</i> (extrakapsuläre Kataraktextraktion)
Er:YAG-Laser	Erbium-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
FLACS	<i>Femtosecond laser assisted cataract surgery</i> (Femtosekundenlaser-assistierte Kataraktchirurgie)
FSL	Femtosekundenlaser
GUI	<i>graphic user interface</i> (Kontrollpanel des Femtosekundenlaser)
LASIK	Laser-in-situ-Keratomektomie
LOCS	<i>Lens-Opacity-Classification-System</i>
LPI	<i>liquid patient interface</i>
ICCE	<i>intracapsular cataract extraction</i> (intrakapsuläre Kataraktextraktion)
IOL	Intraokularlinse
IOP	<i>Intraocular pressure</i> (intraokularer Druck)
MI	<i>Main Incision</i> (Hauptschnitt)
Nd:YAG-Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
NCT	Non-Contact-Tonometer
OCT	<i>Optical Coherence Tomography</i> (optische Kohärenztomografie)
P	Parazentese
PI	<i>Patient Interface</i>
SIA	<i>surgical induced astigmatism</i> (chirurgisch induzierter Astigmatismus)

1 Einleitung

Die Kataraktchirurgie ist eine der häufigsten Operationen am Menschen überhaupt und wurde bereits vor über 2000 Jahren erstmalig beschrieben (Grzybowski and Ascaso, 2014). Die Operationstechnik hat sich insbesondere innerhalb der letzten 200 Jahre durch technische Errungenschaften weiterentwickelt. Durch dieses technische Refinement hat sich die Kataraktchirurgie in ein minimal-invasives Verfahren verwandelt, welches sowohl von Patienten als auch von Ärzten höchste Ansprüche an visuelle Resultate und Komplikationsraten fordert. Daher ist es eine logische Entwicklung, die Lasertechnologie, von der man sich schon in ihren Anfängen mehr Präzision und Perfektion im Rahmen der individuellen Patientenversorgung versprach, in der Kataraktchirurgie zu etablieren (Krasnov, 1975). Jedoch wurden bei den ersten Versuchen mit verschiedenen Laservarianten (Q-switched Laser, Er-/Nd-YAG, Excimer-Laser) keine zufriedenstellenden Resultate erzielt. Dies lag überwiegend daran, dass die hohe Energieabgabe ins Gewebe, sowie der vermehrte postoperative Entzündungszustand, wenig zu kontrollieren waren (Boden and Szurman, 2020). Mit der Minderung der Pulsdauer auf Femtosekundendauer (10^{-15}) und dem Einsatz der konfokalen Optiken konnte solch eine geringe Pulsenergie angewendet werden, die eine präzisere Gewebedissektion mit geringen kollateralen Gewebeschäden erlaubt (Lubatschowski et al., 2013, Loesel et al., 1996).

Die Technik des Femtosekundenlasers konnten im Jahr 1999 erstmalig in der refraktiven Hornhautchirurgie etabliert werden (Ratkay-Traub et al., 2003). Die Vorteile der Femtosekundenlasertechnik, mit der hohen Genauigkeit und der besseren Reproduzierbarkeit, ließen auf mehr Sicherheit und schlussendlich ein besseres Ergebnis, auch in der Kataraktchirurgie, hoffen.

Zoltan Z. Nagy aus Budapest etablierte im Jahr 2008 erstmalig den Einsatz des Femtosekundenlasers in die Kataraktchirurgie (Nagy et al., 2009).

Nach zunächst anfänglichen Schwierigkeiten, den hohen Erwartungen an die neue Technologie gegenüber traditionellen Techniken gerecht zu werden,

konnten seit der Einführung 2008 viele Erfahrungen gesammelt und die Methodik und Technik weiter entwickelt werden.

Eine etablierte Methode, wie die konventionelle Kataraktchirurgie abzulösen bzw. eine zumindest gleichwertige Methode einzuführen, erfordert eine Gleichwertigkeit oder Überlegenheit hinsichtlich Effektivität, Sicherheit und Präzision.

Mit der Einführung des Femtosekundenlasers in die Kataraktchirurgie kam es zur Automatisierung einzelner Teilschritte. Die Laser sind in der Lage die kornealen Inzisionen, die Kapsulotomie und die Kernfragmentation, sowie antiastigmatische Keratotomien im Rahmen der Kataraktchirurgie durchzuführen. Der Vorteil dieser automatisierten Prozesse liegt in der geringen Abweichung des Ist- vom Sollwert bei der Schnitthanlage.

Die Laserplattformen arbeiten extrem präzise hinsichtlich ihrer voreingestellten Parameter, welche Schnittfehler nur in geringem Maße erwarten lassen. Die Schnittführung vieler Femtosekundenlaser ist jedoch limitiert, da nur im klaren Gewebe geschnitten werden kann. Auch in der Tiefe des zu schneidenden Gewebes bestehen Grenzen durch die konfokalen Optiken. Der Durchmesser des Behandlungsmusters ist durch die horizontale Dimension des Patienten-Interfaces, welches an das Auge andockt, limitiert. Diese Einschränkungen sind aber in der klinischen Routine nur bei extremen anatomischen Verhältnissen von Bedeutung.

Bei der konventionellen Kataraktchirurgie ist der Operateur in der Lage, die Inzisionen weiter peripher in das in-transparente, sklerale Gewebe zu legen und ist somit einerseits weitestgehend unabhängig von möglichen Störfaktoren, andererseits ist dies jedoch abhängig von der Erfahrung und Schulung des Operateurs (Popovic et al., 2016).

Besonderheiten des FEMTO LDV Z8

Der FEMTO LDV Z8 (Ziemer Ophthalmic Systems AG, Port, Schweiz) ist der erste niedrigerenergetische Femtosekundenlaser (10^{-9} Joule, nJ) mit hoher Pulsfrequenz (10^6 Hz) sowie einer Optik mit hoher numerischer Apertur. Die Kombination aus diesen Eigenschaften ermöglicht feinere Schnitte, sowie einen

insgesamt atraumatischeren kataraktchirurgischen Eingriff (Mariacher et al., 2016, Riau et al., 2014). Zudem ist der Laser durch die Geometrie des „patient interface“ in der Lage, Schnitte weiter peripherer zu setzen als andere Laserplattformen. Die Limitation hinsichtlich in-transparenter Gewebe bleiben jedoch bestehen. Aus diesem Grund ist es von Bedeutung zu analysieren, inwieweit individuelle anatomische Merkmale eines Patienten die Schnittführung des Lasers und die Durchgängigkeit der lasergestützten Inzisionen beeinflussen. Mögliche limitierende Faktoren stellen eine ausgeprägte Vaskularisation im Bereich des Limbus corneae, sowie ein Arcus lipoides dar.

Ziel der Studie ist es, eine fundierte Aussage über die Schnittqualität des Femtosekundenlasers und beeinflussende Faktoren zu treffen, die einen wichtigen Teil zur Standardisierbarkeit der FLACS beitragen.

1.1 Anatomie des Auges

Der Augapfel, in der Orbita liegend, besteht aus mehreren Wandschichten: der Sklera (Lederhaut), Choroidea (Aderhaut) und Retina (Netzhaut). Die Binnenstrukturen wie z.B. die Iris, der Corpus ciliaris, die Linse und der Glaskörper sind nur mit einer Eröffnung des Augapfels zugänglich. Der Bulbus lässt sich nach morphologischer Beschaffenheit in einen vorderen und einen hinteren Augenabschnitt unterteilen. Der vordere Augenabschnitt, auf dem hier das Hauptaugenmerk liegt, schließt Sklera, Konjunktiva (Bindehaut), Kornea (Hornhaut), Iris, Ziliarkörper, Linse sowie die, mit Kammerwasser gefüllte, Vorder- und Hinterkammer ein. Der hintere Augenabschnitt umfasst Glaskörper, Aderhaut und Netzhaut, sowie die Papille des Nervi optici.

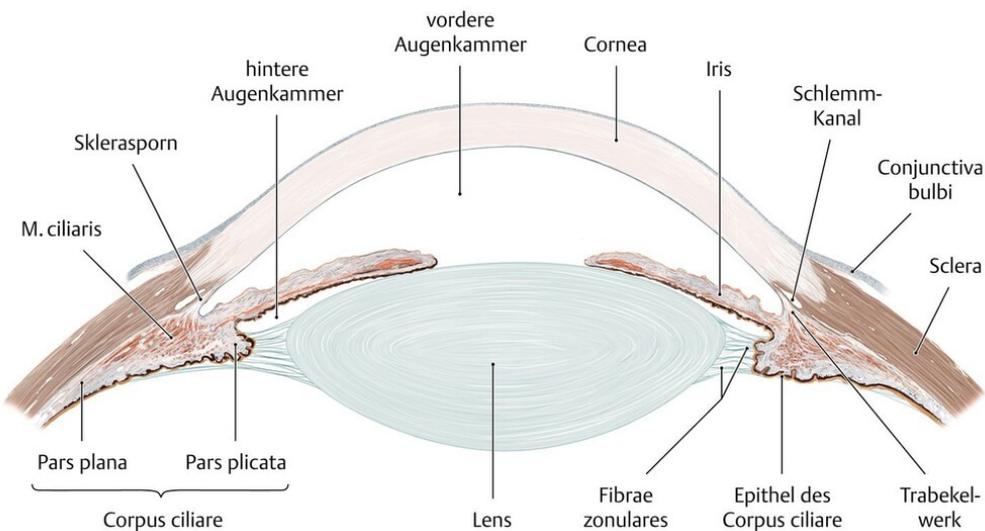


Abbildung 1 – Schematischer Schnitt durch Hornhaut, Linse und Halteapparat (Schünke et al., 2015)

Der Vorderabschnitt besitzt eine Vorder- und eine Hinterkammer, die mit Kammerwasser gefüllt sind. Die Vorderkammer wird begrenzt von der Hornhaurückfläche, dem Kammerwinkel, der Vorderfläche der Iris, sowie der Linsenvorderfläche im Bereich der Pupille. Die Iris, der Sulcus ciliaris, der Zonulaapparat, die Ziliarfortsätze, die Vorderfläche des peripheren Glaskörpers und die periphere Rückseite der Linse bilden die Begrenzung der hinteren Augenkammer (Abbildung 1). Das Kammerwasser, das vom Ziliarepithel gebildet wird, ernährt Linse und Hornhaut (Grehn, 2012: S.5f).

Zentrale Strukturen des vorderen Augenabschnittes stellen für diese Arbeit die Hornhaut, der Limbus corneae und die Linse dar. Die Hornhaut (Kornea) ist, wie die Linse, Teil des optischen Apparats und dient im Wesentlichen der Lichtbrechung. Sie hat eine Brechkraft von durchschnittlich 43 dpt und besteht aus mehreren Schichten: dem vorderen Korneaepithel, der Bowman-Membran, der Substantia propria, der Descemet-Membran (Lamina limitans posterior), und dem Korneaendothel. Die zentrale Hornhautdicke beträgt durchschnittlich ca. 550 μm , die periphere ca. 700-800 μm . Zusammen mit der Sklera bildet die Hornhaut die vordere Begrenzung des Auges.

Als Limbus corneae wird der Übergang zwischen der undurchsichtigen Sklera (Lederhaut) und der klaren Kornea bezeichnet. Er gilt zum einen als chirurgische

Landmarke für Operationen im vorderen Augenabschnitt und besteht zum anderen aus multipotenten Zellen, die für die Differenzierung spezieller Korneazelltypen und deren Regeneration von Bedeutung sind. Der Limbus beinhaltet weiterhin wichtige Zirkulationswege für das Kammerwasser, sowie das Randschlingennetz zur Versorgung der peripheren Kornea.

Der chirurgische Limbus imponiert als grau-blaue Zone zwischen der weißen Sklera posterior und der transparenten Kornea nach anterior aufgrund der Lichtstreuung auf der schrägen Grenzfläche zwischen Sklera und Hornhaut. Die hintere limbale Grenze markiert für den Chirurgen einen sicheren Zugang in den vorderen Augenabschnitt vor dem trabekulären Maschenwerk (Van Buskirk, 1989).

Die Linse stellt den Übergang zwischen dem vorderen und hinteren Augenabschnitt dar und fokussiert einfallendes Licht auf die Netzhaut. Durch Wölbung und Abflachung kann sie die Brechkraft so verändern, dass Gegenstände in verschiedenen Distanzen scharf abgebildet werden können. Dieser Mechanismus wird Akkommodation genannt. Durch Kontraktion des Ziliarmuskels erschlaffen die Zonulafasern und die Linse nimmt aufgrund ihrer Eigenelastizität eine stärkere Wölbung an. Erschlafft der Ziliarmuskel hingegen, werden die Zonulafasern gestrafft und die Linse wird flacher. Der Durchmesser der Linse beläuft sich auf ungefähr 8-10 mm, ihre Dicke variiert zwischen 2 und 5 mm. Die Linse hat eine bikonvexe Form, wobei die hintere Krümmung stärker ausgeprägt ist als die vordere.

Hauptbestandteil der Linse sind Proteine (60%), vor allem sehr stabile Kristalline (α , β , γ). Diese sind für die Stressresistenz und Stabilität der Linse verantwortlich. Sie werden stetig der Linse ergänzt aber nicht ausgetauscht (appositionelles Wachstum). Aufgrund ihrer dichten und regelmäßigen Lagerung tragen die Kristalline zur Transparenz der Linse bei. Auch enthält die Linse weder Gefäße noch Nerven. Die Ernährung erfolgt durch aktiven Transport aus dem Kammerwasser (Hejtmancik et al., 2015).

Die Linse wird außen von einer Kapsel umgeben (Dicke 5-20 μm). Diese ist histologisch gesehen die Basalmembran der Linse. Ihre Funktion ist die

Sicherung der Stabilität und Akkommodationsfähigkeit der Linse, zudem übernimmt sie eine wichtige Rolle im Rahmen des Metabolismus und Zellentwicklung/-differenzierung der Linsenzellen (Danysh and Duncan, 2009). In Bezug auf die Kataraktoperation wird die Linsenkapsel zur Verankerung der Kunstlinse genutzt und ist somit von besonderer Bedeutung hinsichtlich ihrer Stabilität.

An die Linsenkapsel lagert sich ein einreihiges Linsenepithel im Bereich der vorderen Kapselinnenseite und Linsenäquator (transitionale Zone). Dieses Linsenepithel bildet laufend Linsenfasern, die sich schalenartig an die bestehende Linse anlagern (Zuberbuehler et al., 2008: S.2). Durch Wasserverlust werden die Fasern mit der Zeit immer dünner, und bilden so schlussendlich den dickeren Linsenkern, der fortwährend an Dicke zunimmt. Dies beeinträchtigt zunehmend die Elastizität der Linse, wodurch die Akkommodationskraft abnimmt. Zudem führen Trübungen, wie eine Katarakt, und unregelmäßige Bruchkanten zu Visusverschlechterung und Blendung (Grehn, 2012: S.150f).

1.2 Die Katarakt

Das Wort Katarakt ist griechisch und bedeutet „Wasserfall“. Im allgemeinen medizinischen Sprachgebrauch wird die Eintrübung der Linse zu deutsch „Grauer Star“ bezeichnet. Das Wort „Star“ leitet sich vom starren Blick der Betroffenen bei vollständiger Erblindung ab.

Die Katarakt kann nach verschiedenen Kriterien ein- und unterteilt werden: Ätiologie, Lokalisation der Trübung (Morphologie), Entwicklungs-/Reifestadium sind hier die entscheidenden Faktoren zur Einteilung.

Ätiologisch gibt es, neben der häufigsten Ursache, dem Alter, noch die Katarakt bei Allgemeinerkrankungen, wie beispielsweise Diabetes mellitus und rheumatischen Grunderkrankungen oder okulären Vorerkrankungen wie Uveitis. Zudem können Traumata, ophthalmologische Operationen, physikalische oder chemische Einflüsse eine verfrühte Linseneintrübung nach sich ziehen.

Kongenitale Katarakte sind selten, führen unbehandelt jedoch früh zur schweren teils irreversiblen Seheinschränkungen.

Des Weiteren kann die Katarakt je nach Morphologie und Lokalisation der Trübung unterteilt werden in Rindenstar (*Cataracta corticalis*), subkapsuläre hintere Linsentrübung (*Cataracta subcapsularis posterior*), Kernstar (*Cataracta nuclearis*), Schichtstar (*Cataracta zonularis*) und Kranzstar (*Cataracta coronaria*). Der Rindenstar als auch die subkapsuläre Linsentrübung treten v.a. bei der senilen Katarakt auf, der Kernstar hingegen eher bei Myopie, kann aber auch beim senilen Altersstar vorliegen.

Das Reifestadium gibt Aufschluss über den Fortschritt der Katarakt und ist Bestandteil der Beurteilung der Operationsindikation. Bei der *Cataracta incipiens* besteht meist noch keine OP-Indikation, die Trübung ist erst in einem sehr frühen Stadium. Die fortgeschrittene Linsentrübung, *Cataracta provecta*, stellt zumeist eine OP-Indikation dar. Auch bei der *Cataracta praematura* handelt es sich um eine weit fortgeschrittene Katarakt. Hier wird zusätzlich noch angegeben, dass bei der Augenspiegelung nur noch vage die Netzhautgefäße und ein Fundusreflex zu erkennen sind. Eine Operationsindikation ist deutlich gegeben. Dem folgen die *Cataracta matura/hypermatura*, mit einer komplett eingetrübten Linse, fehlendem Fundusreflex und im Falle der *Cataracta hypermatura*, einem intrakapsulär abgesackten braunen Linsenkern (Morgagni Katarakt). Bei beiden Formen ist eine operative Entfernung der Linse indiziert. Eine dringliche OP-Indikation stellt die *Cataracta intumescens* dar, bei der, aufgrund von Wasseraufnahme in die Linse, die Gefahr des Platzen des Kapselsackes und daraus resultierend ein phakolytischen Glaukoms besteht. Bei dieser Komplikation handelt es sich um einen Verschluss des Trabekelwerks durch Linsenpartikel, die aufgrund einer Beschädigung der Linsenkapsel austreten und den Kammerwasserabfluss behindern können (Augustin, 2001, Epstein, 1982).

1.2.1 Symptome der Katarakt

Typische Symptome einer Katarakt sind unscharfes und erschwertes Sehen bei kontrastarmer Umgebung (z.B. bei Dämmerung), erhöhte Blendung durch

unregelmäßige Brechung und Streuung des Lichtes, vermindertes Farbsehen und „Nebelsehen“, Schwierigkeiten beim Lesen und monokuläre Doppelbilder. Zur Beurteilung der Sehbeeinträchtigung wird der Visus bei optimalem Kontrast und bei Gegenlichtblendung bestimmt und die Nahsehschärfe und Lesefähigkeit überprüft (Grehn, 2012: S.157, Zuberbuehler et al., 2008: S.6).

Die Cataracta senilis ist die häufigste Kataraktform bei der anzunehmen ist, dass es sich um einen physiologischen Alterungsprozess handelt mit nicht unerheblichem Einfluss genetischer Disposition. Die Inzidenz ist weltweit zunehmend, aufgrund des demographischen Wandels, durch den mehr Menschen das typische Alter für Katarakterkrankungen erreichen (Pfau et al., 2017: S.9).

Laut WHO ist die Katarakt die führende Ursache für Erblindung weltweit. Dort nimmt die Katarakt zusammen mit der unkorrigierten Fehlsichtigkeit im Jahr 2020 die häufigste Erblindungsursache mit >50% ein. Der Grund liegt in der geringen Bereitstellung von operativen Entfernungsmöglichkeiten der trüben Linse, besonders in Ländern mit mangelhafter Versorgungssituation (Steinmetz et al., 2021). In Deutschland selbst ist die Erblindungsrate aufgrund von Grauem Star selten, da die Kataraktchirurgie weit verbreitet ist. Eine regionale Hochrechnung ergab 460 Erblindungsfälle pro Jahr durch die Katarakt (Trautner et al., 2003).

1.2.2 Operative Methoden der Kataraktbehandlung

Die Kataraktoperation ist eine, der am häufigsten durchgeführten ophthalmologischen Operationen (Wang et al., 2016). Ihre Geschichte geht bis weit in die vorchristliche Zeit zurück. Damals wurde die Linse nicht aus dem Auge entfernt, sondern mithilfe einer Nadel disloziert und bis auf den Boden des Glaskörpers gedrückt (Starstich). So konnte das Licht wieder ungehindert durch die Pupille auf die Netzhaut fallen. Diese Methode war jedoch mit schweren Komplikationen verbunden, da sich das Auge häufig infizierte und vollends in Blindheit endete. Bis heute wird der Starstich noch in einigen Entwicklungsländern, aufgrund mangelnder chirurgischer Versorgung, praktiziert (Davis, 2016: S.58, Nieves-Moreno et al., 2015).

Die erste extrakapsuläre Kataraktoperation („ECCE“ = extracapsular cataract extraction) wurde Mitte des 18. Jahrhunderts von Jacques Daviel, einem französischen Chirurgen, durchgeführt (Rucker, 1965). Dabei punktierte er, über einen 10mm großen kornealen Schnitt, die Linsenkapsel, exprimierte den Linsenkern und kürettierte den Linsenkortex (Davis, 2016, Nieves-Moreno et al., 2015). Bei der Methode der ECCE bleibt die Hinterwand der Linsenkapsel erhalten.

Neben der extrakapsulären Entfernung der Linse, wurde im 19. Jahrhundert die intrakapsuläre Extraktion („ICCE“ = intracapsular cataract extraction) der Linse populär. Erstmals dokumentiert wurde sie Mitte des 18. Jahrhunderts, durchgeführt von Samuel Sharp. Durch einen großen limbalen Schnitt entfernte er, unter Zuhilfenahme seines Daumens, mit dem er die Zonulafasern abriss, die komplette Linse mitsamt Kapselsack aus dem vorderen Augenabschnitt (Sharp, 1753). In den fünfziger Jahren wurden die Zonulafasern erstmals mithilfe des Enzyms α -Chymotrypsin durch J. Barraquer aufgelöst (Barraquer and Rutllán, 1964). Auch die Kryoextraktion stellte sich als eine erfolgreiche Methode der Linsenentfernung dar. Aufgrund der gravierenderen Komplikationen, wie Netzhautablösung, Makulaödem oder korneale Dekompensation, die mit einer ICCE häufiger in Verbindung standen als mit einer ECCE, aber auch aufgrund der größeren Schnitte und des langsameren Heilungsprozesses bei einer ICCE, konstituierte sich die ECCE zunächst als Standardmethode der Kataraktbehandlung (Davis, 2016).

1.2.2.1 Die konventionelle Technik - Phakoemulsifikation

In der zweiten Hälfte der 60er Jahre etablierte der amerikanische Ophthalmologe, Charles Kelman, die Phakoemulsifikation. Im Rahmen einer ECCE wird durch eine 3-4 mm große Inzision eine ultraschallbetriebene Hohlzahn über die eröffnete Vorderkapsel in den vorderen Augenabschnitt eingeführt. Die ultraschallbetriebene Hohlzahn zerkleinert die Linse und aspiriert zeitgleich die Fragmente der eingetrübten Linse (Kelman, 1967). Diese Methode ermöglicht eine kleinere Schnittführung mit einer stabileren Vorderkammer, eine kürzere Heilungszeit und einen geringeren chirurgisch-induzierten Astigmatismus. Die

Technik der Phakoemulsifikation wurde seither immer wieder weiterentwickelt und perfektioniert.

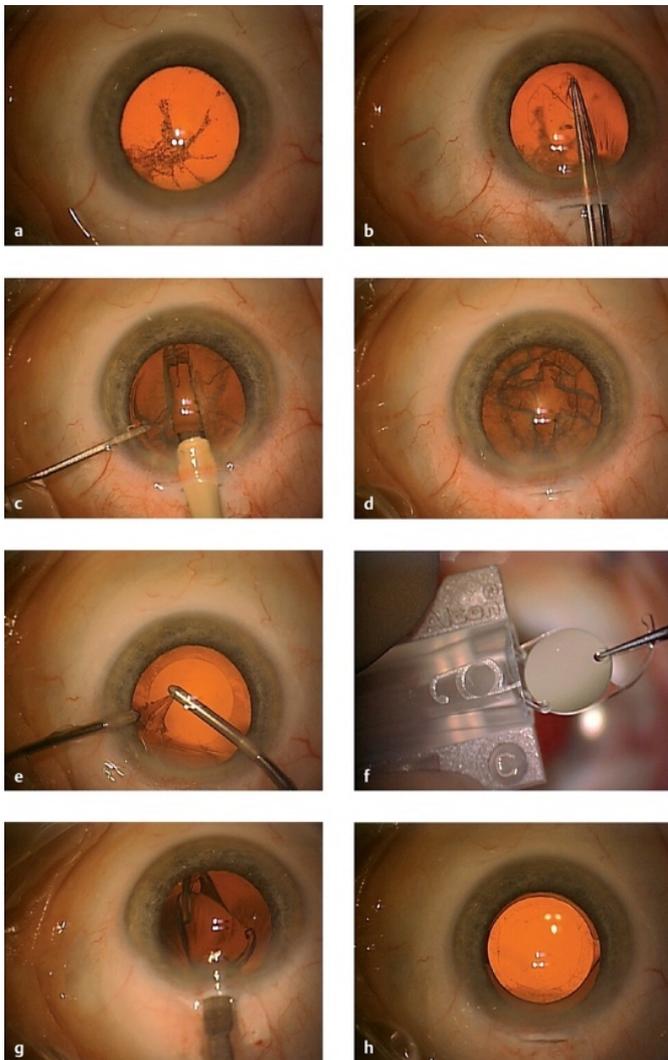


Abbildung 2 – „Phakoemulsifikation und Shooter-Implantation einer flexiblen, monofokalen Acryl-IOL (Operateursperspektive durch das Operationsmikroskop)“ (Lang, 2019): Nach Setzen der Tunnelschnitte und Hilfszugänge mit Zugang zur Vorderkammer (a) erfolgt mittels Phakoemulsifikation und Chop-Technik die Entfernung der Linse aus dem Kapselsack (b-e). Im Anschluss wird mithilfe eines Injektors (Shooter), der zuvor mit der gefalteten Kunstlinse (f) beladen wurde, die neue Linse in den nun leeren Kapselsack eingesetzt (g), wo sie sich mithilfe ihrer Haptiken aufspannt (h).

Unter Phakoemulsifikation ist hier im Folgenden die konventionelle Behandlung der Katarakt zu verstehen, wie sie heutzutage standardmäßig durchgeführt wird. Hierbei werden die Schnitte, die Kapsulorhexis, als auch die Fragmentierung der Linse mit entsprechenden Werkzeugen durch den Chirurgen durchgeführt.

Zur Durchführung der „Phako“ erfolgt der Zugang zur Vorderkammer des Auges über schmale korneale Tunnelschnitte und Parazentesen, durch die die Operationsinstrumente ins Auge eingeführt werden. Der Unterschied zur ICCE besteht im Erhalt des Linsenkapselsacks. Die eingetrübte Linse wird über eine partielle Eröffnung der Vorderkapsel (Kapsulorhexis) mithilfe von Phakoemulsifikation und Chop-Technik aus dem Kapselsack zerkleinert und abgesaugt und durch eine Hinterkammerlinse ersetzt, die sich in die noch teils bestehende Kapsel aufspannt (Abbildung 2).

Gewöhnlich werden die Kataraktoperationen in Lokalanästhesie, als Tropf-, Retrobulbär- oder Peribulbäranästhesie oder Sub-Tenon-Block, durchgeführt. Nur in bestimmten Situationen, wie mangelnde Compliance des Patienten, hohe Myopie oder bei komplizierten Voroperationen, wird eine Vollnarkose bevorzugt. Nach Desinfektion mit anschließender steriler Abdeckung des Operationsgebiets und Einsetzen des Lidsperrers wird die Vorderkammer mithilfe der Phakolanze meist von temporal durch den klaren Anteil der Hornhaut („Clear-Cornea-Inzision“) über 1,8 bis 2,75 mm eröffnet. Die Schnitfführung erfolgt biplanar, so dass die Wunde sich am Ende der Operation ohne Naht selbst verschließt. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine schnelle Heilung und einen geringeren chirurgischen Astigmatismus. Eine andere mögliche Schnitfführung ist ein, meist von posterior angelegter skleraler Tunnelschnitt, der z.B. zur Implantation nicht faltbarer Linsen bevorzugt wird. Neben der Hauptinzision werden kleinere Parazentesen angelegt, um zusätzlich benötigte Instrumente für die bimanuelle Manipulation ins Auge einzuführen. Die Injektion eines Gels als ein raumtaktisches Instrument (Viskoelastikum) in die Vorderkammer entspannt die Zonulafasern der Kapsel, bevor diese mit der Kapsulorhexis eröffnet wird. Bei dieser Methode wird mithilfe einer Mikropinzette oder Kanüle ein kreisrunder Lentikel aus der Vorderwand der Kapsel entfernt. Der Durchmesser dieses Lochs sollte kleiner sein als der Durchmesser der verwendeten Linsenoptik (5,0 - 5,5 mm). Die eingetrübte Linse wird zunächst von der Kapsel mit einem Wasserstrahl, der sogenannten Hydrodissektion, gelöst und daraufhin mittels Phakoemulsifikation zerkleinert und abgesaugt. Übriggebliebene Rindenreste an der Innenseite der Kapsel werden mit einem Saugspülgerät entfernt.

Zum Schluss wird bei regulärem Verlauf eine Hinterkammerlinse in den nun gesäuberten, mit Visokoelastikum gefüllten Kapselsack implantiert. Nach Entfernung des Visokoelastikums werden die Zugänge der Hornhaut hydriert, und Antibiotikum intrakameral appliziert (Grehn, 2012: S. 164-167, Zuberbuehler et al., 2008: S.52ff).

1.2.2.2 Die Laser-assistierte Kataraktchirurgie mit dem Femtosekundenlaser

Im Jahr 2008 wurde in Budapest erstmals eine Kataraktchirurgie mit einem Femtosekundenlaser begleitet. Die Vorteile, die sich durch den Einsatz des Femtosekundenlasers ergeben, sind in der Reduktion der Phakoenergie, der höheren Präzision, besseren Vorhersehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Schnitte, der Kapsulotomie (Nagy et al., 2011) und der Fragmentierung der Linse zu sehen (Palanker et al., 2010).

Der erste Schritt einer FLACS ist die adäquate Patientenselektion. Prinzipiell ist anzunehmen, dass jeder Patient von einer laserunterstützten Operation profitiert, bestimmte Krankheitsformen und individuelle Komorbiditäten erschweren jedoch die Laserapplikation. Hierzu zählen zum einen enge Lidspalten, besonders tiefliegende Augen, oder weit fortgeschrittene Keratokoni, die das Andocken des Patient Interface (PI) erschweren, oder gar unmöglich machen können. Zum anderen können Hornhautnarben, Kalzifikationen, oder Hornhautimplantate, die die Laserapplikation behindern, zum Ausschluss für die Behandlung mit dem Laser führen. Relative Kontraindikationen stellen Voroperationen (z.B. fistulierende Glaukomoperation) unzureichende Mydriasis und/oder hintere Synechien dar, die patientenindividuell evaluiert werden müssen (Boden and Szurman, 2020). Patienten mit Komorbiditäten wie ausgeprägter Zonulainsuffizienz, einem hinteren Polstar oder fortgeschrittenen Kataraktformen mit sehr harten Kernen hingegen können von der Anwendung des Femtosekundenlasers durch geringere Manipulation (Teshigawara et al., 2019) und reduzierte Phakozeiten (Taravella et al., 2016) profitieren. Die Voruntersuchungen zur FLACS sind identisch mit denen der konventionellen Kataraktoperation.

In der Regel werden alle kataraktchirurgischen Eingriffe mit dem

Femtosekundenlaser unter lokaler Anästhesie und in Mydriasis durchgeführt. Nach Desinfektion, steriler Abdeckung des Operationsgebiets und Einsetzen des Lidsperrers erfolgt das Docking des Patienten mit dem Laser über das nicht applanierende, vakuumfixierte Liquid-Patient-Interface (LPI). Dieses wird nach erfolgreicher Applikation mit einer isotonen Lösung gefüllt, die eine hochauflösende Bildqualität, sowie einen ungestörten Durchtritt der Laserstrahls ermöglicht (Kohnen, 2013). An das LPI wird nun das zweite Teil des Laserhandstücks gekoppelt, das am mobilen Laserarm fixiert ist. Es beinhaltet eine Kamera und ein integriertes OCT-System (optische Kohärenztomographie).

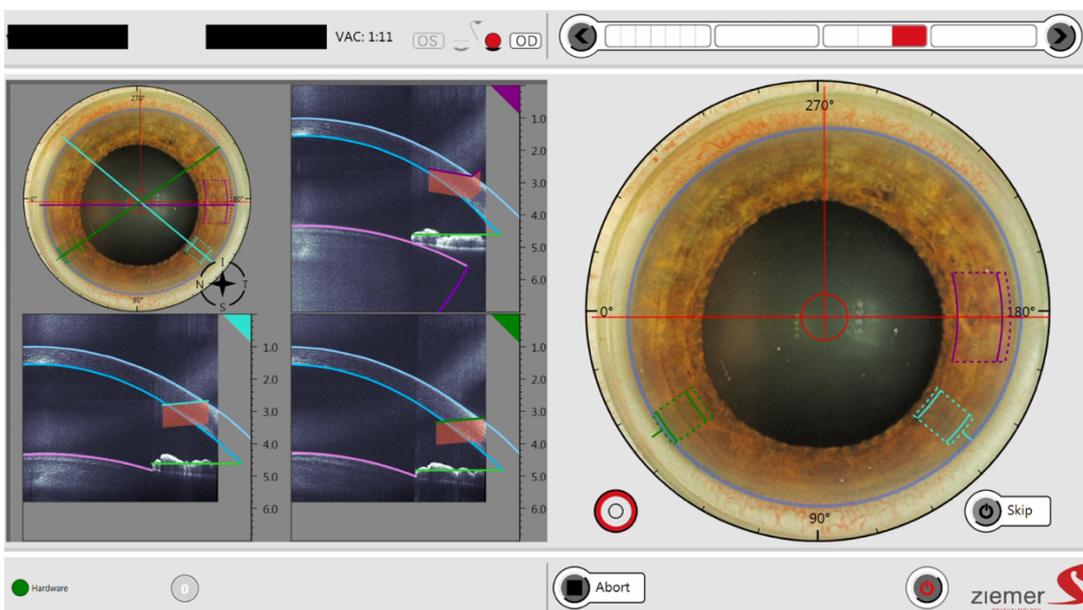


Abbildung 3 - Graphic User Interface (GUI) während der Planungsphase der biplanaren Main Incision (lila) und uniplanaren Parazentesen (türkis und grün).

Sobald beide Teile miteinander verbunden sind, startet die Vermessung und Bildgebung (je nach Laserplattform entweder mit OCT oder mit der Scheimpflugtechnik). Der Operateur hat die Möglichkeit, über einen Bildschirm, dem Graphic User Interface (GUI), die Behandlungsparameter des Patienten einzugeben, zu ändern, sowie Schnittplanungen und Prozeduren anhand der OCT-Bildgebung und Messungen individuell anzupassen (Pajic et al., 2017) (Abbildung 3). Außerdem legt er Schnittparameter wie beispielsweise Kapsulotomieweite, Fragmentationsmuster der Linse, sowie Länge, Winkel und Limbusabstand der kornealen Inzisionen fest (Boden et al., 2021).

Während der Laseranwendung hat der Chirurg zu jeder Zeit die Möglichkeit, über das GUI zu intervenieren, Schritte zu überspringen oder den Vorgang abubrechen. Jede Aktion des Lasers ist somit genau kontrollierbar und liefert somit höchste Präzision.

Der Ziemer FEMTO LDV Z8 beginnt, aufgrund der niederenergetischen Arbeitsweise und der damit einhergehenden geringen Gasproduktion, mit der tortenähnlichen Fragmentierung des Linsenkerns in 4, 8, 12 oder 16 Stücke. Die Gasblasenentstehung ist so gering, dass eine Zugbelastung des Kapselsackes und damit mögliche Komplikationen, wie Kapselsackrupturen durch einen Gasdurchbruch, nicht zu erwarten sind. Zudem werden durch die Vorbereitung des Linsenkerns dessen Aspiration vereinfacht und besonders harte Katarakte aufgeweicht (Conrad-Hengerer et al., 2012a). Es folgt die Kapselsackeröffnung, die Kapsulotomie, in genau definiertem, kreisrundem Durchmesser (Friedman et al., 2011). Anschließend werden die kornealen Inzisionen angelegt. Der Femtosekundenlaser ist in der Lage die Schnittarchitektur und Ausrichtung der Schnitte vielfältig zu konfigurieren. Die Hauptinzision erfolgt meist als Stufenschnitt, indem der Eingang des Tunnels steil und der mittlere Abschnitt parallel bzw. flach abfallend zur Hornhautoberfläche angelegt wird. Die Parazentesen werden uniplanar parallel zur Hornhaut vorgenommen.

Nach erfolgreicher Durchführung der Laserapplikation wird der Patient von beiden Handstückteilen entkoppelt, und der Chirurg setzt den Eingriff ähnlich zur konventionellen Methode fort. Die Eröffnung der vorgeschrittenen kornealen Inzisionen erfolgt stumpf. Über die Inzisionen werden dann die Instrumente in die Vorderkammer eingeführt, das Kapsulotomieläppchen mittels „dimple down“-Technik (Arbisser et al., 2013) gelöst und mithilfe einer Pinzette entfernt. Durch die Kapselsacköffnung kann nun die vorfragmentierte Linse mithilfe von Irrigation und Aspiration energiearm und endothelschonend entfernt werden. Nach vollständiger Entfernung der eingetrübten Linse folgt der Einsatz einer IOL nach gleichem Prozedere wie oben bereits beschrieben.

Frühere Studien in anderen ophthalmochirurgischen Gebieten, wie der LASIK (laser in situ keratomileusis), zeigten bisher, dass mithilfe des Femtosekundenlasers sowohl die Präzision, als auch die Sicherheit der Schnittführung zunahm (Issa and Al Hassany, 2011, Holzer et al., 2006, Kezirian and Stonecipher, 2004). Aufgrund dessen stellt der Femtosekundenlaser ein ideales Tool für die ophthalmologische Mikrochirurgie dar. Zwischen den Techniken der konventionellen und lasergestützten Kataraktoperation zeigen sich bis dato weder Sicherheits- noch Zeitunterschiede (Boden and Szurman, 2020). Zusätzlich erhofft man sich durch die Automatisierung einiger Teilschritte der Kataraktchirurgie mithilfe des Femtosekundenlasers, eine Optimierung der Operationstechnik, eine höhere Präzision und Reproduzierbarkeit. Der Femtosekundenlaser bietet die Möglichkeit der Einbindung verschiedenster patientenspezifischer Parameter, wie beispielsweise Linsenposition, Pupillenachse oder Abbildungsfehler höherer Ordnung und ermöglicht somit eine patientenindividuelle und -optimierte Kataraktchirurgie. Dies ist aber erst mit einer Anbindung der präoperativen Diagnostik im vollen Umfang erreichbar.

1.2.3 Komplikationen und mögliche Spätfolgen einer Kataraktoperation

Im Rahmen der Kataraktoperation kann es zu intra- sowie auch postoperativen Komplikationen kommen, die einer weiteren Intervention bedürfen. Eine der häufigsten intraoperativen Komplikationen stellt die Ruptur der hinteren Kapsel dar. Sie kann in jedem Stadium des Eingriffs auftreten und verschiedene Ursachen haben. Hierzu zählen beispielsweise eine Verletzung der Kapsel durch Instrumente oder während der Linsenimplantation, Einriss der Vorderkapsel und Ausdehnung des Risses auf die Rückseite der Kapsel oder Kapselblockade durch übermäßige Hydrodissektion (Chan et al., 2010). Eine hintere Kapselruptur birgt multiple Gefahren wie z.B. einen Glaskörpervorfall, ein erhöhtes Risiko des Verschiebens der IOL, Endophthalmitis, sowie eine Amotio retinae oder ein zystoides Makulaödem. Aufgrund dieser Risiken sollte eine Vitrektomie durchgeführt werden, im Zuge dieser der Glaskörper, zumindest im vorderen Anteil, entfernt wird.

Bei Beeinträchtigung oder gar Verlust der Hinterkapsel ist die Stabilität des Kapselsackes, um eine ausreichende Verankerung einer Hinterkammerlinse zu gewährleisten, nicht mehr gegeben. Es erfolgt eine Linsenimplantation entweder als sulcusgestützte IOL, Vorderkammerlinse, retropupilläre Irisklauenlinse, skleral- oder intraskleralfixierte IOL. Die Entscheidung ist abhängig von der Größe des Kapselsackdefektes (Gimbel et al., 2001), den Vorlieben des Operateurs und den patientenspezifischen Gegebenheiten (Gekeler and Gekeler, 2015).

Die postoperative Endophthalmitis gehört zu den ernsteren Komplikationen der Kataraktchirurgie, die bis zur Erblindung führen kann. Risiken im Rahmen der Kataraktchirurgie stellen insuffiziente Schnitte, „phakoburn“ (thermische Schädigung der Kornea und Sklera während der Phakoemulsifikation) und Keimkontamination bei Manipulation dar. Besonders die Inzisionen von temporal weisen ein erhöhtes Risiko für postoperative Endophthalmitis auf (Nagaki et al., 2003), da durch Reiben des Patienten am Auge postoperativ Keime leichter in die Wunde verschleppt werden können, als das bei einem superioren Zugang der Fall ist. Aufgrund sich ständig verbessernder Operationstechniken wurde die Prävalenz einer Endophthalmitis zunächst immer kleiner. Mit Einführung der nahtlosen kornealen Inzisionen nahm ihr Auftreten erst wieder zu, ist aber in den letzten Jahren wieder rückläufig. Typischerweise berichten von Endophthalmitis betroffene Patienten von Schmerzen, Visusverschlechterung, sowie Lichtüberempfindlichkeit und können mit Lidödem, Vorderkammerinfiltration mit Hypopion und ggf. Glaskörperinfiltration vorstellig werden. Eine frühe Erkennung und schnelle angemessene Behandlung mittels sofortiger Antibiotikagabe intravitreal in Kombination mit Steroiden ist von essenzieller Bedeutung. Führt dies zu keiner Besserung oder ist die Entzündung schon weit fortgeschritten, sollte eine invasive Therapie bzw. Diagnostik mit Pars-plana-Vitrektomie in Betracht gezogen werden (Pham and Pleyer, 2017). Zur Vermeidung einer Endophthalmitis sollte prophylaktisch eine Desinfektion der Lider, sowie der Augenoberfläche mit Jodlösung erfolgen, ein intrakamerales Antibiotikum (Li et al., 2019) (z.B. Cefuroxim) (Barry et al., 2006) appliziert und ein dichter

Wundverschluss gewährleistet werden (Zuberbuehler et al., 2008: S.110-111, Endophthalmitis-Vitrectomy-Study-Group, 1995).

Während der Kataraktoperation kann es intraoperativ zu minimalen mechanischen Traumata der Hornhaut vor allem durch Ultraschall-, aber auch thermischer und disruptiver Energie, sowie Flüssigkeitsturbulenzen während des Absaugprozesses kommen (Menapace and Dick, 2014). Diese perioperative mechanische Belastung führt zur Schädigung des kornealen Endothels mit Endothelzellverlust und transienter Hornhautschwellung. Risikofaktoren für eine Hornhautschädigung sind eine kurze Achsenlänge, lange Phakoemulsifikationszeit, sowie bestehende korneale Dysfunktion, wie bspw. Fuchs-Endotheldystrophie (Chan et al., 2010). Durch Zunahme der Hornhautdicke kann es im Verlauf zu Visusminderung und Halos kommen. Mehrere Untersuchungen zeigten bisher, dass in bis zu 4 Wochen postoperativ wieder präoperative Verhältnisse erreicht werden können (Ventura et al., 2001).

Eine weitere häufige Komplikation und Spätfolge bildet die Trübung der hinteren Linsenkapsel (Nachstar), die aufgrund von Fibrosierung oder durch zurückgebliebene Epithelzellen der Linse entstehen. Prophylaktisch stellt die richtige Auswahl des Designs (Linse mit hinterer scharfer Kante) der zu implantierenden IOL eine zentrale Rolle dar. Therapeutisch kann eine hintere Kapsulotomie mittels Nd:YAG-Laser durchgeführt werden (Fisus and Findl, 2020, Awasthi et al., 2009).

1.3 Ziel der Arbeit

Jedes Jahr finden allein in Deutschland ca. 800.000 Kataraktoperationen statt, weltweit liegt der Wert bei ungefähr 19 Millionen, mit steigender Tendenz (Boden and Szurman, 2020). Schon allein dieser Aspekt erfordert eine fortwährende Weiterentwicklung der Effizienz, Sicherheit und Reproduzierbarkeit des chirurgischen Ergebnisses. Mit Einführung der minimalinvasiven Chirurgie und der damit einhergehenden Umstellung von großen skleralen Schnitten mit Nahtverschluss auf kleine, selbstverschließende Korneaschnitte wurde die Kataraktchirurgie hinsichtlich des SIA und postoperativen Komplikationen

sicherer. Die Femtosekundenlaser-assistierte Kataraktchirurgie (FLACS) ist nun in der Lage diesen hohen Standard noch weiter zu verbessern. Der Femtosekundenlaser ist in der Lage Teilaufgaben des Eingriffs, wie Schnittdurchführung, Kapsulotomie und Linsenfragmentation, zu übernehmen (Menapace and Dick, 2014, Pajic et al., 2014) und eine Operation ohne den Einsatz einer Messerklinge durchzuführen (Boden et al., 2021).

Diese Arbeit beschäftigt sich genauer mit den Clear cornealen Inzisionen (CCI) im Rahmen der FLACS. Ziel ist es darzulegen, welche Faktoren die Schnittführung, sowie die Durchgängigkeit der Schnitte beeinflussen und eine Grundlage zur technischen, als auch chirurgischen Anwendung und Optimierung zu schaffen.

2 Material und Methoden

2.1 Der Femtosekundenlaser

Der Femtosekundenlaser, der in dieser Arbeit verwendet wurde, ist der FEMTO LDV Z8 der Ziemer Ophthalmic Systems AG (Port, Schweiz) (Abbildung 4). Das Gerät ist eine mobile, kompakte Laserplattform mit beweglichem Laserarm, an dessen Ende ein Handstück (Abbildung 5) liegt, welches das zweiteilige liquid patient interface (LPI) aufnimmt.



Abbildung 4 - FEMTO LDV Z8, Ziemer Ophthalmic Systems AG, Port, Schweiz (Foto: Freundlich zur Verfügung gestellt von Ziemer Ophthalmic Systems)



Abbildung 5 - Handstück des FEMTO LDV Z8 bestehend aus Laserarm und mit zweigeteiltem liquid patient interface (LPI) (Foto: Freundlich zur Verfügung gestellt von Ziemer Ophthalmic Systems)

Dieses LPI setzt sich aus einem großen Teilstück, mit Kamera und integriertem OCT-System, an das der Laserarm gekoppelt wird, und dem zweiten, kleinen Teilstück, dem Vakuum-Ring, über den die Kopplung mit dem Patienten erfolgt. Der Laser arbeitet mit einer geringen Pulsenergie ($<1 \mu\text{J}$), und Pulsrate ($<10000 \text{ kHz}$). Die Pulsdauer liegt bei ca. 250 fs, mit einer Wellenlänge von 1020–1060 nm.

2.2 Operationsablauf

Die operativen Eingriffe zur Behandlung der Katarakt mit dem Femtosekundenlaser wurden, nach Erteilung des Einverständnisses durch die Patienten, vom Chefarzt, Prof. Dr. med. Peter Szurman, oder vom Leitenden Oberarzt der Augenklinik Sulzbach, Dr. med. Karl Boden, durchgeführt.

Das zu operierende Auge wurde lokal mittels Proparacain AT anästhesiert, das OP-Feld gereinigt, der Bindehautsack mit 5%-Jodlösung unter dreiminütiger Einwirkzeit gespült, und steril abgedeckt.

Der Laser wurde über das Graphic User Interface (GUI) bedient und vorbereitet. Die Patientendaten inklusive Seitenlokalisierung wurden über diesen Touchscreen eingegeben und die Programme zum entsprechenden Behandlungsmuster

konnten auf diese Weise ausgewählt werden. Um Standardisierung für einen Vergleich zu gewährleisten wurden folgende Grundeinstellungen vor dem Eingriff programmiert: Kapsulotomieweite (5,3 mm) und die dafür benötigte Energie (95%), Fragmentationsdurchmesser der Linse (5,6 mm), mit prozentualer Laserpower (95%) und Anzahl der Segmente (4-/8- oder 16-teilig), sowie letztendlich die Lokalisation der Inzisionen (LA: MI: 0°/90°; P1: 135°/15°; P2: 315°/140° und RA: MI: 180°; P1: 35°/45°; P2: 140°/135°), Größe (MI: 2,75 mm; P1/P2: 1,1 mm) (Abbildung 6), Eintrittswinkel und Limbusdistanz (0,1 mm) der kornealen Inzisionen. Der Operateur konnte lediglich die Lage der, durch den FEMTO LDV Z8 vorgeplanten, Schnitte in eine zentralere oder peripherere Position verschieben um ein subjektiv besseres Ergebnis zu erzielen.

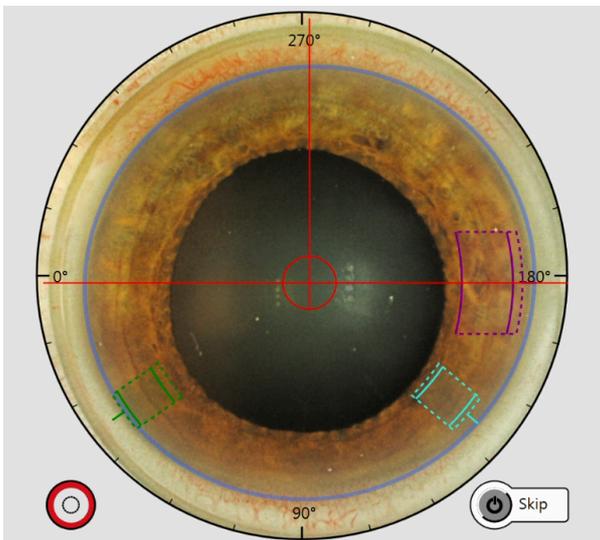


Abbildung 6 - Beispiel Schnittsetzung rechtes Auge: MI (lila) bei 180°, P1 (grün) bei 35°, P2 (türkis) bei 140°

Nach Einsetzen des Lidsperrers, wurde der erste Teil des Laserhandstücks, mittels Vakuum angedockt. Ab hier beginnt die Vakuumzeit. Das erste Handstückteil wurde dann mit Balanced Salt Solution (BSS) gefüllt und mit dem Laserkopf, der den zweiten Teil des Handstücks bildet, gekoppelt. Sobald beide Teile des Handstücks angedockt wurden, begann die Durchführung des OCT. Anhand dessen war es dem Operateur möglich, Schnittebene, Kapsulotomie, sowie die Art der Kernfragmentierung und die Inzisionen noch einmal zu verändern.

Nach Bestätigung durch den Chirurgen begann der Laser zunächst mit der Kernfragmentierung, anschließend führte er die Kapsulotomie durch. Zum Schluss wurden die kornealen Inzisionen geschnitten. Nach Beendigung des Programmes wurde das Vakuum automatisch gelöst und der Laserkopf konnte vom Auge gelöst werden.

Im Anschluss folgte der manuell-chirurgische Teil der Kataraktoperation. Die Inzisionen wurden mit stumpfem Spatel oder einer speziellen Kanüle (BVI®, Beaver-Visitec, Waltham, MA, USA) eröffnet. Bei undurchgängigen Schnitten wurde manuell mit Phako- oder Parazenteselanze (MANI®, Tochigi, Japan) nachgeschnitten. Die Vorderkammer wurde mit Viskoelastikum (microvisc®, Bohus BioTech AB, Strömstad, Schweden) aufgestellt. Mithilfe einer Pinzette wurde nach dimple-down-Technik die Vorderkapsel entfernt. Es folgte die Hydrodissektion und Hydrodelineation, bei der Flüssigkeit zwischen Kapsel und Linse eingespritzt und die Linse vollends von der Kapsel gelöst wurde. Der Nukleus und Epinukleus der Linse wurde durch Aspiration und falls notwendig mit Phakoemulsifikation in Chop-Technik entfernt. Im Anschluss wurden mittels Irrigation und Aspiration nach Brauweiler die Rindenreste abgesaugt, und die Hinterkapsel poliert.

Nach erneutem Auffüllen des Kapselsacks mit Viskoelastikum wurde eine Kunstlinse endokapsulär eingesetzt und zentriert. Anschließend wurde das Viskoelastikum abgesaugt, die CCI durch Injektion von BSS hydriert. Intraoperativ wurde 1mg Dexamethasondihydrogenphosphat-Dinatrium und 1mg/0,1ml Cefuroxim intrakameral appliziert, ISOPTO-MAX® Augensalbe (Novartis AG, Basel, Schweiz) aufgetragen, das Auge verbunden und postoperativ 250mg Acetazolamid (Glaupax®, OmniVision® GmbH, Puchheim, Deutschland) oral verordnet.

2.3 Ein- und Ausschlusskriterien

Eingeschlossen wurden alle Patienten mit operationsbedürftiger Katarakt, die sich an der Augenklinik Sulzbach im Zeitraum von August 2017 bis November 2018 einer Femtosekundenlaser-assistierten Kataraktoperation mit dem FEMTO LDV Z8 unterzogen haben. Voraussetzung für die Teilnahme war ein

Patientenalter >18 Jahre. Zudem mussten die Patienten rechtlich und psychisch befähigt sein der Datenerhebung einzuwilligen.

Ausgeschlossen wurden Patienten mit Limbusstammzellinsuffizienz, Zustand nach (Z.n.) Keratoplastik, Z.n. Trauma mit kornealen Narben, Hornhautdystrophie, kongenitalem Glaukom oder psychischen Erkrankungen, die keine rechtsgültige Aufklärung ermöglichen, sowie Patienten in Schwangerschaft und Stillzeit.

2.4 Ethikvotum

Votum: 175/14, Ethikkommission der Ärztekammer des Saarlandes

Studien ID: DRKS00025349

2.5 Messungen und Messmethoden

2.5.1 Prä- und postoperative Messungen

Zur Eingriffsplanung wurden präoperativ und im postoperativen Verlauf (1 Tag, 1 Woche, 1 Monat und 3 Monate nach OP) folgende Messungen am Patienten durchgeführt:

- Autorefraktometrie (Auto Ref/Keratometer ARK-560A, NIDEK, CO., Ltd., Aichi, Japan): Sphäre, Zylinder und Achse (objektive Refraktionsparameter)
- Augeninnendruck applanatorisch oder mittels Non-Contact-Tonometrie (NCT) (Non-Contact-Tonometer/Pachymeter NT-530P, NIDEK, CO., Ltd., Aichi, Japan)
- IOL-Master (IOLMaster 700, Carl Zeiss Meditec AG, Oberkochen, Deutschland) (Achsenlängen, Hornhautradien und Vorderkammertiefe)
- Pentacam® (OCULUS Optikgeräte GmbH, Wetzlar, Deutschland) (Hornhautradien, sowie Linsenabmessung (Kataraktstärke))
- Subjektive Refraktion
- BCDVA (bestkorrigierter Fernvisus)

2.5.2 Videoauswertung

Zur Beurteilung der Planung der Schnitte und der Erkennungsfunktion des Lasers wurden, mithilfe der Aufnahmefunktion des Lasers, das GUI, als auch das OP-Mikroskop per Video mitgeschnitten. Diese Mitschnitte wurden anschließend am Computer ausgewertet.

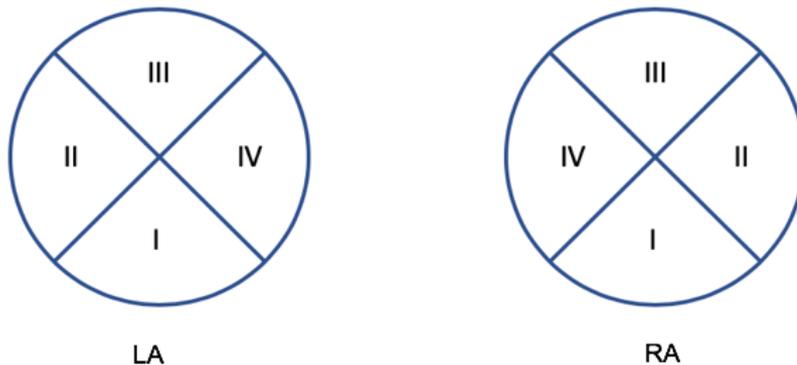


Abbildung 7 - Schematische Darstellung der Einteilung der Quadranten der Augen – Linkes Auge (LA) und Rechtes Auge (RA)

Dabei wurden die Limbusdetektion, die Blutgefäße innerhalb der Limbusdetektion und die Ausprägung des Arcus lipoides beurteilt. Zur Beurteilung der einzelnen Parameter wurde das Auge in 4 gleichgroße Quadranten (Abbildung 7) geteilt und diese nummeriert. Dabei wurde der temporale Quadrant im rechten, als auch im linken Auge immer mit II bezeichnet, der nasale Quadrant immer mit IV. So kann sichergestellt werden, dass alle nasalen sowie alle temporalen Quadranten zwischen den beiden Augen vergleichbar sind. Die inferioren (Quadrant III) als auch superioren (Quadrant I) Quadranten, können ohne Anpassung verglichen werden.

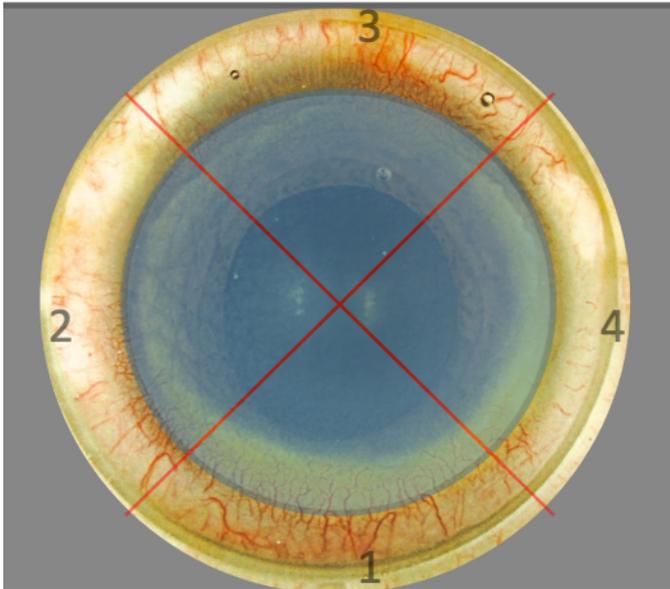


Abbildung 8 - Repräsentatives Patientenbild zur Darstellung der limbalen Vaskularisation und des Arcus lipoides (Boden et al., 2021). Das rote Fadenkreuz markiert die 4 Quadranten. Nach o.g. Schemata wurde dieses Patientenauge wie folgt bewertet: 1. Quadrant: superiorer Quadrant mit stark ausgeprägtem Arcus lipoides und starker Vaskularisation über 3 Zeitstunden. 2. Quadrant: temporaler Quadrant mit leichter Ausprägung eines Arcus lipoides und limbalen Vaskularisation in 2 Zeitstunden, 3. Quadrant: inferiorer Quadrant ohne Arcus lipoides und limbalen Gefäßinsprossung, 4. Quadrant: nasaler Quadrant mit milder Ausprägung der Gefäßinsprossungen und Lipideinlagerungen in 2 Zeitstunden.

2.5.2.1 Limbusdetektion

Die Limbusdetektion des Lasers wurde durch eine blaue Linie dargestellt (Abbildung 8). Zur Beurteilung der Detektion wurde jeder der 4 Quadranten einzeln beurteilt, inwiefern der chirurgische Limbus korrekt detektiert wurde. Folgendes Schema wurde zur Bewertung verwendet:

- | | |
|------------------------------|--|
| 1 = gute Detektion: | blaue Linie liegt genau auf dem Limbus |
| 2 = mäßige Detektion: | blaue Linie weicht in 1 - 2 h vom eigentlichen Limbus ab |
| 3 = unzureichende Detektion: | blaue Linie weicht in > 2 h vom eigentlichen Limbus ab |

2.5.2.2 Einfluss der Blutgefäße auf die Inzisionen

Auch hier wurde das Auge in 4 Quadranten eingeteilt. Jeder Quadrant wurde separat nach folgendem Schema beurteilt:

0 – 1 h =	Blutgefäße in 1 Zeitstunde
1 – 2 h =	Blutgefäße in 2 Zeitstunden
2 – 3 h =	Blutgefäße in 3 Zeitstunden
0 =	keine Blutgefäße im Quadranten sichtbar

2.5.2.3 Einfluss des Arcus lipoides corneae

Ebenfalls mit der 4-Quadranten-Einteilung wurde die Ausprägung des Arcus lipoides corneae nach folgendem Schema bewertet:

0 =	kein Arcus lipoides vorhanden
1 =	schwach ausgeprägt
2 =	mäßig ausgeprägt
3 =	stark ausgeprägt

2.5.3 Durchgängigkeit der Schnitte

Die Inzisionen wurden intraoperativ vom Operateur mit einer Kanüle (BVI Medical, Waltham, Massachusetts, USA) subjektiv auf ihre Durchgängigkeit überprüft. Dies wurde dann mit „ja“, „nein“ oder „mit Brücken“ bewertet. Zusätzlich wurde die Durchgängigkeit in Abhängigkeit verschiedener Faktoren evaluiert. Zum einen wurde erhoben, ob die Main Incision (MI) von temporal oder superior angelegt wurde und welchen Einfluss dies auf die Durchgängigkeit des Schnittes hatte.

Zum anderen wurde überprüft, welche Auswirkungen die Qualität der Limbusdetektion oder die Ausprägung der Vaskularisation oder des Arcus lipoides im Limbusbereich auf die Schnittdurchgängigkeit haben.

Des Weiteren wurde dokumentiert, ob der Chirurg intraoperativ die Schnittposition angepasst, in welche Richtung, zentral oder peripher, er sie verschoben und welchen Einfluss das auf die Durchgängigkeit des Schnittes hatte.

und Fragmentation, zu den clear cornealen (CCI) und Arcuate Incisions und während der OP gewonnene Informationen.

Unter die Überschrift „Rhexis und Fragmentation“ fielen die Größe der Kapsulotomie, die dafür anzuwendende Energie, die Kernteilungsgröße, die dafür vorgesehene Fragmentationsenergie und das Fragmentierungsmuster.

Unter dem Punkt „Inzisionen“ wurden die Inzisionsachse, die Limbusdistanz und die Inzisionsbreite der Main Incision (MI), der Parazentese 1 (P1) und der Parazentese 2 (P2) eingetragen. Nach der Operation beurteilte der Chirurg, ob die Inzisionen durchgängig waren, ob leichte Brücken vorhanden waren oder sogar nachgeschnitten werden musste.

Beim letzten Abschnitt „OP-Daten“ wurden neben Vakuumzeit, Phakoemulsifikationszeit (gesamt und effektiv) und der Kernhärte der Linse nach LOCS III, weitere Gegebenheiten während der Operation in dafür vorgesehenen Spalten schriftlich festgehalten. Dazu zählten die Qualität der Kapsulotomie, Adhäsionen oder Kapselrisse, Black-out (temporärer Sehverlust), Auftreten und Stärke von Bindehautblutungen, sowie Besonderheiten während der OP oder sonstige Anmerkungen.

3 Ergebnisse

3.1 Patientenkollektiv

Im Rahmen der Videoanalyse wurden 159 Videomitschnitte der Kataraktoperationen von 122 Patienten ausgewertet, die im Zeitraum von August 2017 bis November 2018 operiert wurden. Dabei handelte es sich um 78 Eingriffe am linken und 81 am rechten Auge. 80 Patienten waren männlich, 43 weiblich. Das Durchschnittsalter aller Patienten lag bei 70,6 Jahren zum Zeitpunkt der Operation.

3.2 Analyse der Quantität und Qualität der Inzisionen pro Quadrant

Es wurde die Erkennungsfunktion des Lasers hinsichtlich der Detektion des Limbus corneae, der Berücksichtigung der Blutgefäße, sowie des Arcus lipoides corneae nach den oben beschriebenen Schemata evaluiert. Bei keiner Operation bestanden Schwierigkeiten hinsichtlich des Dockingvorgangs, wie z.B. multiple Dockingversuche oder Re-Docking wegen Vakuumverlust.

3.2.1 Limbusdetektion

Bei der Limbusdetektion wurden 155 Videomitschnitte beurteilt und ausgewertet. 4 der 159 Mitschnitte konnten, aufgrund der Problematik, dass die Videos zu spät gestartet wurden, um die Detektion ordnungsgemäß zu bewerten, nicht in die Auswertung mit einbezogen werden.

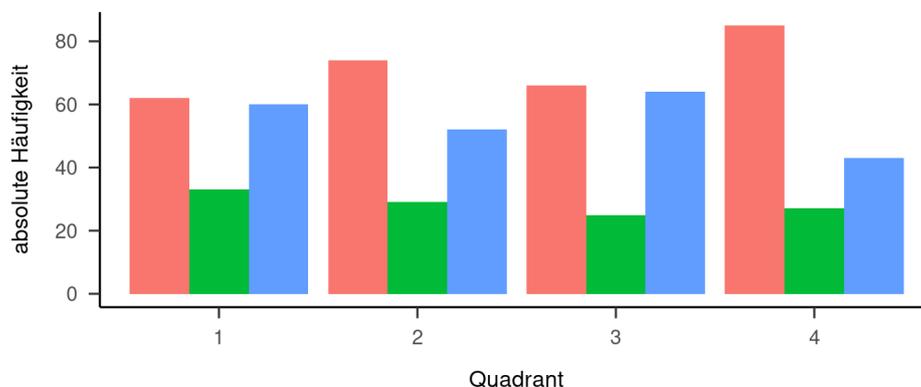


Abbildung 10 - Verteilung der quadrantenabhängigen Bewertung der Limbusdetektion (rot = unzureichend, grün = mäßig, blau = gut)

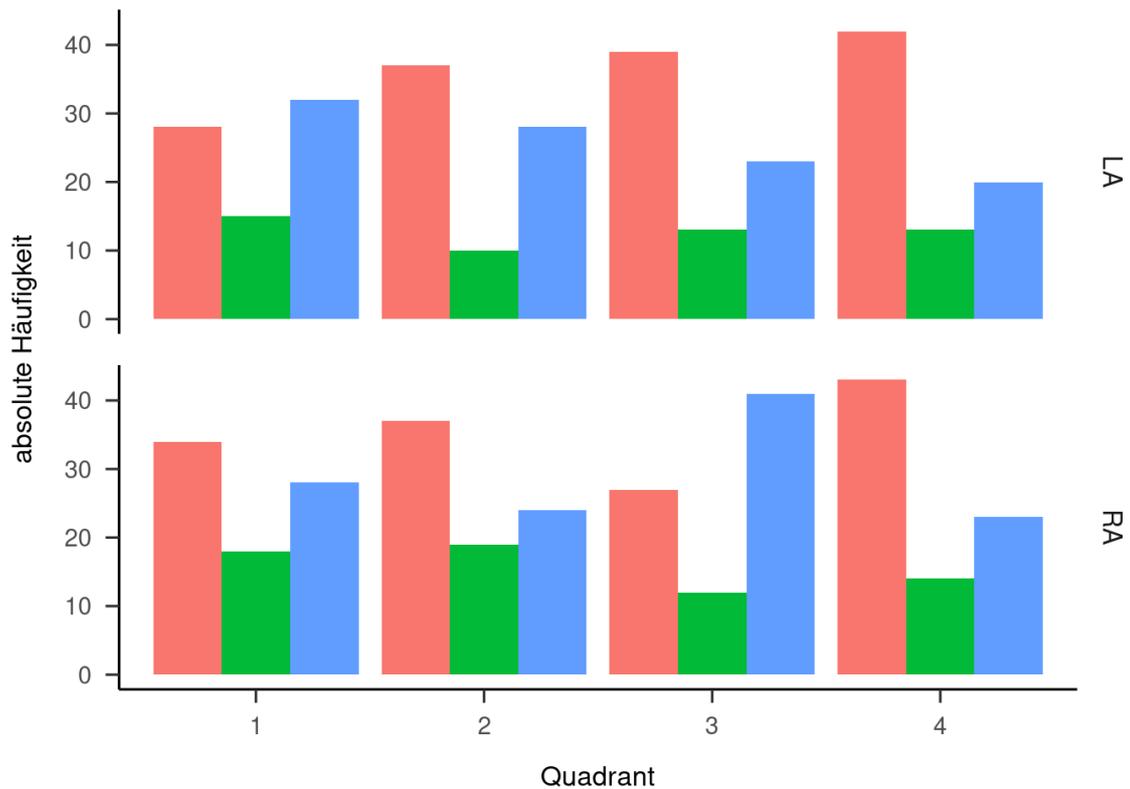


Abbildung 11 - Seiten- und quadrantenabhängige Bewertung der Limbusdetektion (rot = unzureichend, grün = mässig, blau = gut)

Abbildung 10 veranschaulicht die augenunabhängige Bewertung der Limbusdetektion in den einzelnen Quadranten. Abbildung 11 zeigt die Verteilung in Abhängigkeit des Auges.

In beiden Diagrammen wird auf der x-Achse der jeweilige Quadrant dargestellt, wobei es sich bei 1 um den superioren Quadranten, 2 den nasalen Quadranten, 3 den inferioren Quadranten und 4 den temporalen Quadranten handelt. Die y-Achse zeigt die absolute Anzahl der Detektionen. Für die Darstellungen wurden Säulendiagramme gewählt. In der farblichen Codierung der Balken steht rot für eine „unzureichende“, grün für eine „mäßige“ und blau für eine „gute“ Detektion.

Tabelle 1 - Absolute Verteilung der quadrantenabhängigen Bewertung der Limbusdetektion insgesamt und pro Seite

Limbusdetektion	Insgesamt			Linkes Auge			Rechtes Auge		
	Gut	Mäßig	Unzureichend	Gut	Mäßig	Unzureichend	Gut	Mäßig	Unzureichend
Quadrant 1	60 (38,7%)	33 (21,3%)	62 (40,0%)	32 (42,7%)	15 (20,0%)	28 (37,3%)	28 (35,0%)	18 (22,5%)	34 (42,5%)
Quadrant 2	52 (33,5%)	29 (18,7%)	74 (47,7%)	28 (37,3%)	10 (13,3%)	37 (49,3%)	24 (30,0%)	19 (23,8%)	37 (46,2%)
Quadrant 3	64 (41,3%)	25 (16,1%)	66 (42,6%)	23 (30,7%)	13 (17,3%)	39 (52,0%)	41 (51,2%)	12 (15,0%)	27 (33,8%)
Quadrant 4	43 (27,7%)	27 (17,4%)	85 (54,8%)	20 (26,7%)	13 (17,3%)	42 (56,0%)	23 (28,7%)	14 (17,5%)	43 (53,8%)

Abhängig des Quadranten war die Limbusdetektion in nur 27,7 - 41,3% der Fälle präzise, 40,0 - 54,8% der Fälle zeigten eine ungenaue Detektion (Tabelle 1). In Abbildung 10, dass die augenunabhängige Limbusdetektion in den 4 verschiedenen Quadranten darstellt, ist ersichtlich, dass in jedem Quadranten die Limbusdetektion am häufigsten mit „unzureichend“ bewertet wurde. In den Quadranten 1 und 3 ist der Unterschied zwischen der absoluten Anzahl von „gut“- und „unzureichend“-Bewertungen gering. In Quadrant 2 überwiegen, gemessen an der Gesamtzahl der Detektionen, die „unzureichenden“ Detektionen mit 47,4% den Detektionen, die als „gut“ (33,5%) bewertet wurden. 54,8% der Limbusdetektionen im 4. Quadranten erhielten die Bewertung „unzureichend“.

Bei den Eingriffen am linken Auge, schnitten die Detektionen im ersten Quadranten besser ab, als in den Quadranten 2, 3 und 4. Bei 32 der 75 operierten linken Augen wiesen diese eine gute Limbusdetektion im ersten Quadranten auf, 15 erhielten die Bewertung „mäßig“, 28 die Bewertung „mangelhaft“. In den übrigen Quadranten der linken Augen zeigt sich eine häufigere unzureichende Bewertung der Detektion des Limbus.

Im rechten Auge überwogen im 3. Quadranten die guten Detektionen den unzureichenden. 51,2% der 80 operierten rechten Augen zeigten im 3. Quadranten eine gute Limbusdetektion, 33,8% wurden mit „unzureichend“ bewertet. In den Quadranten (Q) 1, 2 und 4 der rechten Augen war die Bewertung „unzureichend“ stärker vertreten. In Q1 sind 34, Q2 37 und in Q4 43 Augen als „unzureichend“ bewertet. Insgesamt ergab die statistische Auswertung weder

einen signifikanten Unterschied zwischen der Limbusdetektion der einzelnen Quadranten ($p = 0,144$), noch zwischen der Detektion in den beiden Augen.

3.2.2 *Limbale Gefäßeinsprossungen*

Bei der Bewertung der limbalen Blutgefäßeinsprossungen wurden ebenfalls 155 Mitschnitte in die Bewertung einbezogen. Auch hier bestand bei 4 Videos die Problematik einer fehlerhaften, zu spät gestarteten Aufnahme.

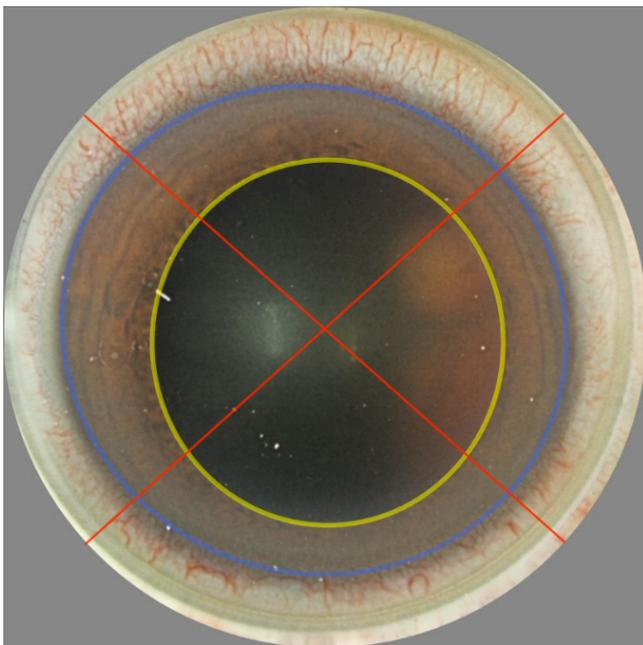


Abbildung 12 - Linkes Patientenaugenauge während des Docking-Prozesses mit automatischer Pupillendetektion (gelber Kreis) und Limbusdetektion (blauer Kreis) durch den Femtosekundenlaser: die Gefäßeinsprossungen in Zeitstunden wurden bei diesem Beispiel wie folgt gewertet: 1. Quadrant: 3h, 2. Quadrant: 0h, 3. Quadrant: 3h, 4. Quadrant: 1h

Die Bewertung wurde wie in Abbildung 12 veranschaulicht durchgeführt. Sobald ein Gefäß in einer Zeitstunde vorhanden war, galt dies als „1“, in 2 Zeitstunden als „2“ und in 3 Zeitstunden als „3“. War der Limbus des Quadranten frei von vorgeschobenen Gefäßen, wurde dies mit „0“ bewertet.

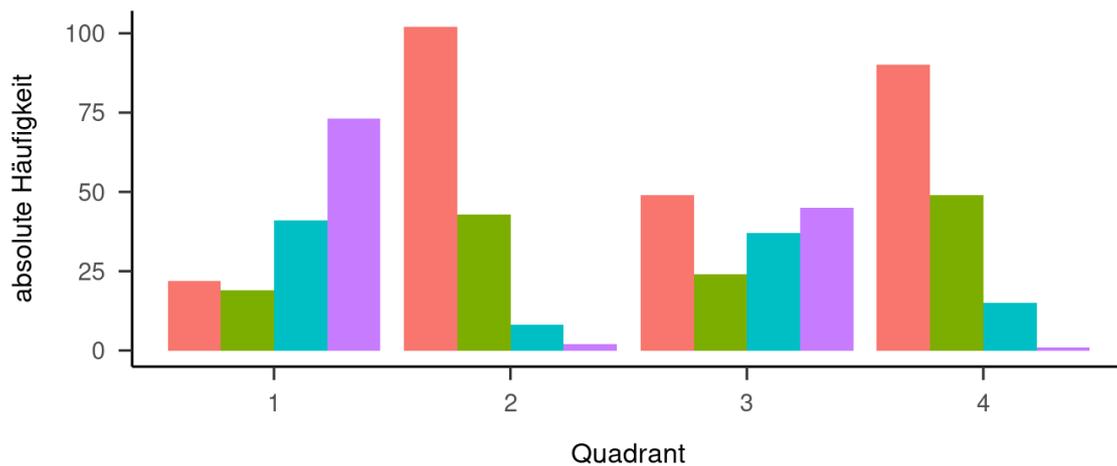


Abbildung 13 - Seitenunabhängige limbale Gefäßeinsprossungen in den einzelnen Quadranten (rot = keine, grün = 0 - 1h, blau = 1 - 2h, lila = 2 - 3h)

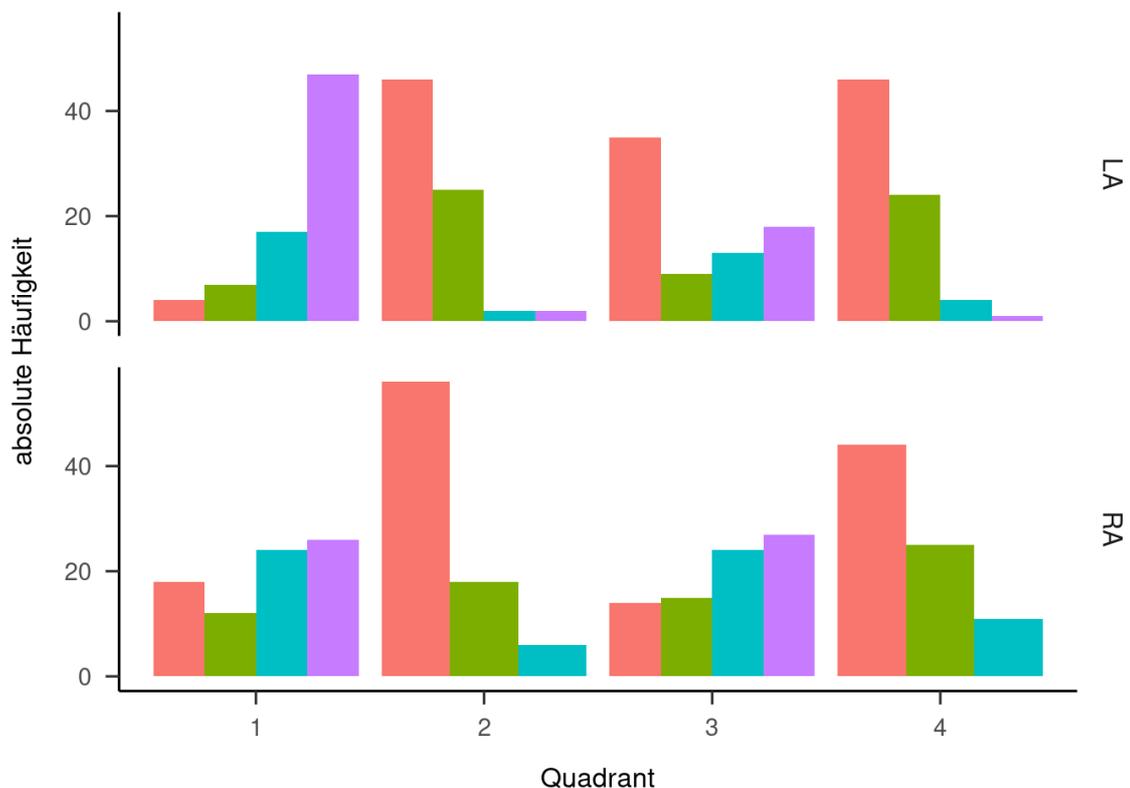


Abbildung 14 - Seitenabhängige limbale Vaskularisation in den Quadranten (rot = keine, grün = 0 - 1h, blau = 1 - 2h, lila = 2 - 3h)

Wie auch bei der Ergebnisdarstellung der Limbusdetektion, wurden die Ergebnisse zur limbalen Gefäßeinsprossung zum einen über alle Augen (Abbildung 13), zum anderen seitenspezifisch (Abbildung 14) aber jeweils quadrantenbezogen grafisch dargestellt. Auf den x-Achsen der

Säulendiagramme sind die Quadranten, auf den y-Achsen die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Bewertung angegeben. Die Legende enthält die Farbcodierung der Bewertung. Die genauen Werte sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2 - Absolute Verteilung limbalen Gefäßeinsprossungen in den Quadranten, seitenabhängig sowie insgesamt

Gefäße	Insgesamt				Linkes Auge				Rechtes Auge			
	Keine	0 - 1h	1 - 2h	2 - 3h	Keine	0 - 1h	1 - 2h	2 - 3h	Keine	0 - 1h	1 - 2h	2 - 3h
Quadrant 1	22 (14,2%)	19 (12,3%)	41 (26,5%)	73 (47,1%)	4 (5,3%)	7 (9,3%)	17 (22,7%)	47 (62,7%)	18 (22,5%)	12 (15,0%)	24 (30,0%)	26 (32,5%)
Quadrant 2	102 (65,8%)	43 (27,7%)	8 (5,2%)	2 (1,3%)	46 (61,3%)	25 (33,3%)	2 (2,7%)	2 (2,7%)	56 (70,0%)	18 (22,5%)	6 (7,5%)	0 (0%)
Quadrant 3	49 (31,6%)	24 (15,5%)	37 (23,9%)	45 (29,0)	35 (46,7%)	9 (12,0%)	13 (17,3%)	18 (24,0%)	14 (17,5%)	15 (18,8%)	24 (30,0%)	27 (33,8%)
Quadrant 4	90 (58,1%)	49 (31,6%)	15 (9,7%)	1 (0,6%)	46 (61,3%)	24 (32,0%)	4 (5,3%)	1 (1,3%)	44 (55,0%)	25 (31,2%)	11 (13,8%)	0 (0%)

Seitenunabhängig wurden im 1. Quadranten am häufigsten in 2 - 3 Zeitstunden Blutgefäße gesichtet. Im 2. Quadranten befanden sich in der Mehrheit der Fälle keine Blutgefäße innerhalb des Detektionsrings, ähnlich wie in Quadrant 4. In Quadrant 3 waren 49 Detektionen ohne sichtbare Blutgefäße, 45 jedoch mit Blutgefäßen in allen drei Zeitstunden.

Eine ähnliche Verteilung zeichnete sich in der isolierten Betrachtung der jeweiligen Augen ab. Auch hier zeigten beim rechten, als auch beim linken Auge der temporale und der nasale Quadrant deutlich weniger limbale Gefäßeinsprossungen auf als die superioren und inferioren Quadranten. Hier fanden sich bei 32,5 - 62,7% in bis zu 3 Zeitstunden Gefäße innerhalb der Limbusmarkierung im 1. Quadranten. Im rechten Auge waren im nasalen und temporalen Quadranten keine Gefäße in mehr als 2 Zeitstunden sichtbar. Insgesamt konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Seiten festgestellt werden.

Die statistische Auswertung der Inzidenz von Blutgefäßen in den einzelnen Quadranten zeigte eine signifikante Abhängigkeit zwischen Quadrant und Menge der detektierten Blutgefäße ($p < 0,001$). Besonders in den Quadranten 1 und 3 lagen Blutgefäße innerhalb des detektierten Limbus. In den Quadranten 2 und 4 (temporal und nasal) war die Häufigkeit limbalen Gefäßeinsprossungen am

geringsten. Dort waren in > 50% der Detektionen keine Blutgefäße sichtbar, die die Limbusmarkierung des Lasers überschritten (Quadrant 2 = 65,8%, Quadrant 4 = 58,1%). Stellt man Quadrant 3 und Quadrant 4 bzw. Quadrant 1 und 2, gegenüber, ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen den Quadranten ($p < 0,001$). Vergleicht man Quadrant 2 und 4 manifestiert sich kein signifikanter Unterschied.

3.2.3 Arcus lipoides

Bei der Bewertung des Arcus lipoides wurden alle 159 Mitschnitte in die Bewertung einbezogen. Die Ausprägung des Arcus lipoides wurde anhand der oben beschriebenen Skala (keiner – schwach – mittel – stark) in jedem Quadranten bewertet. Im Seitenvergleich zeigte sich hinsichtlich des Auftretens eines Arcus lipoides keine Signifikanz. Die Augen hingegen, die einen Arcus lipoides aufwiesen, zeigten einen signifikanten Unterschied in der Ausprägung des Arcus lipoides in den einzelnen Quadranten. Besonders im superioren und nasalen Quadranten konnte ein Arcus lipoides festgestellt werden.

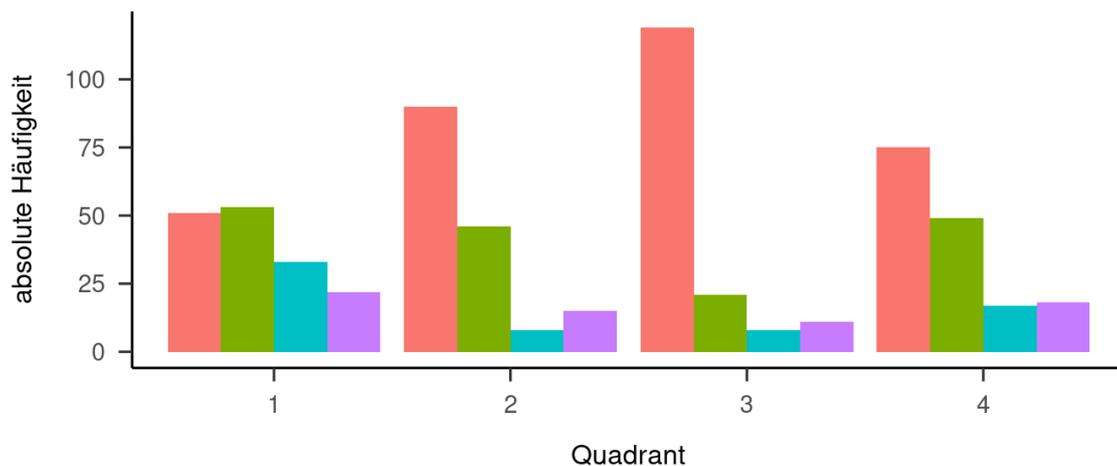


Abbildung 15 - Seitenunabhängige Bewertung der Ausprägung des Arcus lipoides in den einzelnen Quadranten (rot = keine, grün = 0 - 1h, blau = 1 - 2h, lila = 2 - 3h)

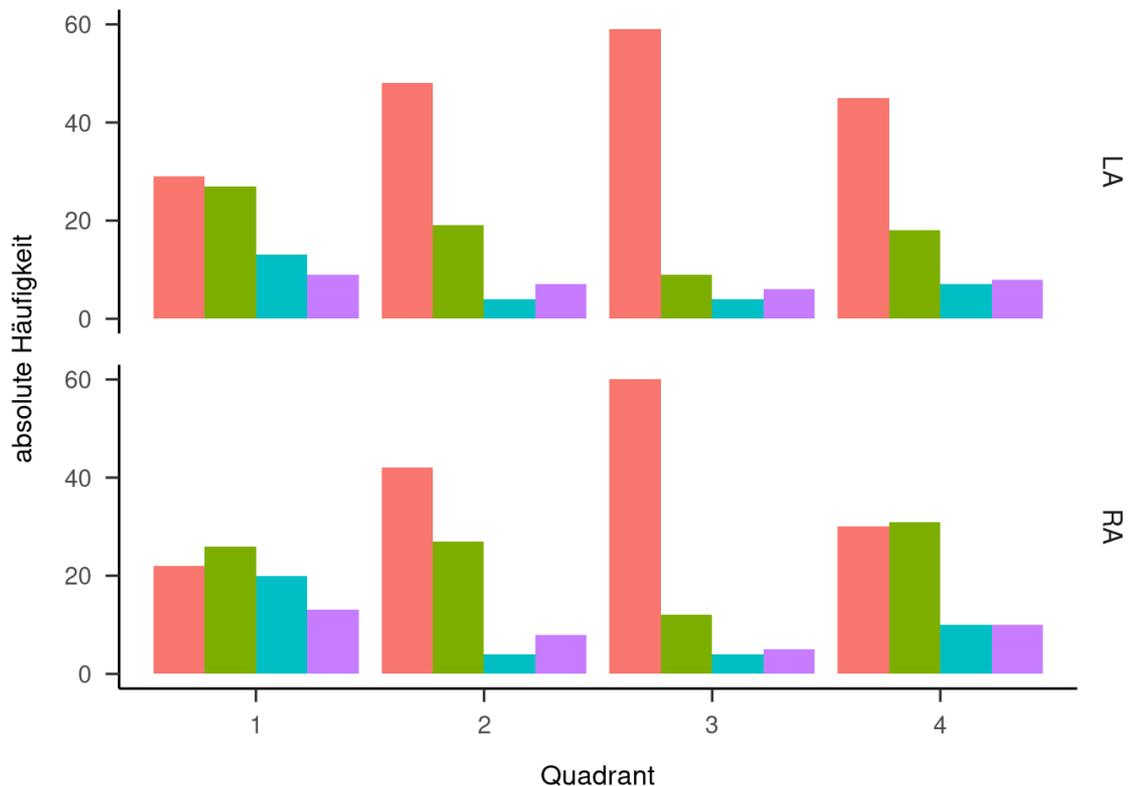


Abbildung 16 - Seitenabhängige Bewertung der Ausprägung des Arcus lipoides in den einzelnen Quadranten (rot = keine, grün = 0 - 1h, blau = 1 - 2h, lila = 2 - 3h)

Zur bildlichen Darstellung der Ergebnisse, zum einen im Gesamten zum anderen dem jeweiligen Auge nach aufgeschlüsselt, wurden auch hier Säulendiagramme gewählt (Abbildungen 15 und 16). Auf den x-Achsen sind die Quadranten, auf den y-Achsen die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Bewertung angegeben. Die Farbcodierung wurde wie folgt gewählt: rot = kein Arcus lipoides sichtbar, grün Arcus lipoides in 0 - 1h, blau in 1 - 2h und lila in 2 - 3h sichtbar.

Tabelle 3 - Absolute Verteilung der Ausprägung des Arcus lipoides in den Quadranten, insgesamt und seitenabhängig.

Arcus lipoides	Insgesamt				Linkes Auge				Rechtes Auge			
	Keiner	Schwach	Mittel	Stark	Keiner	Schwach	Mittel	Stark	Keiner	Schwach	Mittel	Stark
Quadrant 1	51 (32,1%)	53 (33,3%)	33 (20,8%)	22 (13,8%)	29 (37,2%)	27 (34,6%)	13 (16,7%)	9 (11,5%)	22 (27,2%)	26 (32,1%)	20 (24,7%)	13 (16,0%)
Quadrant 2	90 (56,6%)	46 (28,9%)	8 (5,0%)	15 (9,4%)	48 (61,5%)	19 (24,4%)	4 (5,1%)	7 (9,0%)	42 (51,9%)	27 (33,3%)	4 (4,9%)	8 (10,0%)
Quadrant 3	119 (74,8%)	21 (13,2%)	8 (5,0%)	11 (6,9%)	59 (75,6%)	9 (11,5%)	4 (5,1%)	6 (7,7%)	60 (74,1%)	12 (14,8%)	4 (4,9%)	5 (6,2%)
Quadrant 4	75 (47,2%)	49 (30,8%)	17 (10,7%)	18 (11,3%)	45 (57,7%)	18 (23,1%)	7 (9,0%)	8 (10,3%)	30 (37,0%)	31 (38,3%)	10 (12,3%)	10 (12,3%)

Die genauen Daten sind in Tabelle 3 ersichtlich. Die meisten Augen zeigten keinen Arcus lipoides corneae (32,1 - 74,8%). Seitenunabhängig zeigte sich die Ausprägung des Arcus lipoides am geringsten im 3. Quadranten. Dort wurde in 119 Fällen kein Arcus lipoides festgestellt. Bei 11 Augen zeigte sich ein stark ausgeprägter Befund. Im 2. Quadranten wurde bei 15 Augen ein schwerer, bei 8 ein milder und bei 46 Augen ein gering ausgeprägter Arcus lipoides erfasst. 30,8% der Augen wiesen im 4. Quadranten eine geringe Ausprägung des lipoiden Bogens auf, 47,2% zeigten einen unbetroffenen Quadranten. Der superiore Quadrant war bei 20,8% (33) mittel, bei 13,8% (22) stark betroffen. Bei 119 Augen stellte man inferior keinen, bei 21 einen gering ausgeprägten Arcus lipoides fest.

3.3 Die Durchgängigkeit der Schnitte

Die Limbusdetektion, die Schwere des Arcus lipoides und die Menge der limbalen Blutgefäßeinsprossungen wurden der Durchgängigkeit der Schnitte gegenüber gestellt. Dabei wurden die Zugänge, Main Incision und Parazentesen, separat bewertet. Als „durchgängig“ wird ein Schnitt erachtet, bei dem kein Nachschneiden durch eine Klinge erforderlich ist. Somit sind die Inzisionen mit Brücken ebenfalls als durchgängig zu bewerten, da sie stumpf eröffnet werden können.

Auch die Feststellung, ob ein Schnitt im Vorfeld verschoben wurde, ist in die Bewertung mit eingeflossen.

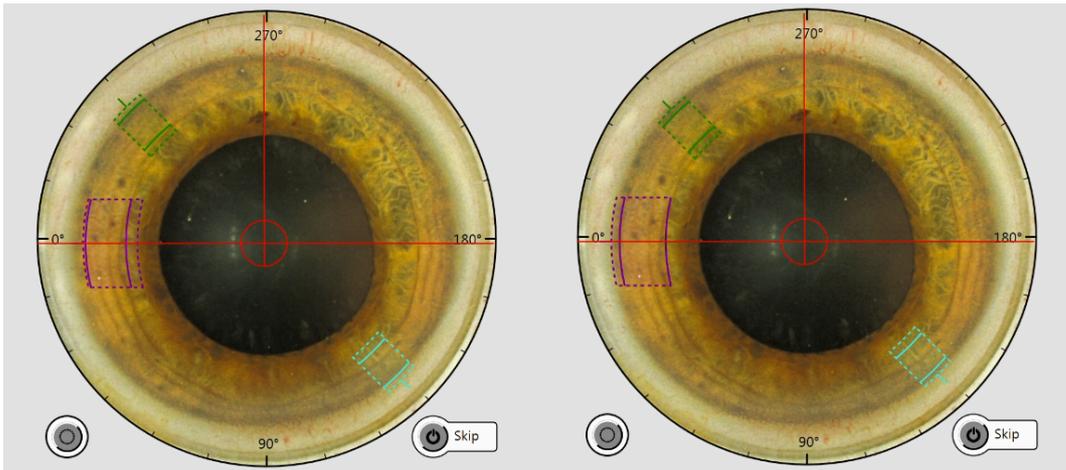


Abbildung 17 - Linkes Patientenauge vor und nach der Schnittplanungsanpassung durch den Operateur am GUI: Links zeigt die Einstellung der vom Laser geplanten Schnittpositionen, rechts die vom Operateur angepassten Schnittplanungen. Die Main Incision (MI) (lila) wurde nach lateral verschoben, sowie auch die türkise Parazentese, die grüne Parazentese wurde zentraler gelegt.

Die Verschiebung eines Schnitts bedeutet, dass der Operateur vor Beginn der OP, aufgrund der durchgeführten Scans und Schnittplanungen, die vom Laser gesetzten Schnittmarkierungen manuell über das GUI angepasst hat (Abbildung 17). Das kann zum einen den Grund haben, dass der Laser Schwierigkeiten hatte, an der festgelegten Position den Schnitt zu planen, zum anderen, dass der Operateur vorweg die Vermutung hatte, dass ein Schnitt an der ursprünglichen Lokalisation nicht erfolgreich sein könnte.

In der Gegenüberstellung wurde jeweils nur der Quadrant berücksichtigt, in dem Inzisionen vorgenommen wurden. Die Durchgängigkeit wurde mittels des Schemas: durchgängig „ja“/“nein“/“Brücken“ evaluiert. Unter Brücken sind kleine intrastromale Gewebsbrücken zu verstehen, die stumpf trennbar sind ohne Zuhilfenahme eines scharfen Instrumentes.

3.3.1 Der Einfluss der Limbusdetektion auf die Schnittdurchgängigkeit

Die Limbusdetektion des Lasers ist eine blaue Linie, mit der der Laser den chirurgischen Limbus am Auge markiert, und auf deren Grundlage er die Position der Schnitte kalkuliert und plant.

Durchgängigkeit der Main Incision

Die Main Incision, der Hauptzugang, wurde entweder bei 90°, superior, oder bei 0°/180°, temporal, gewählt.

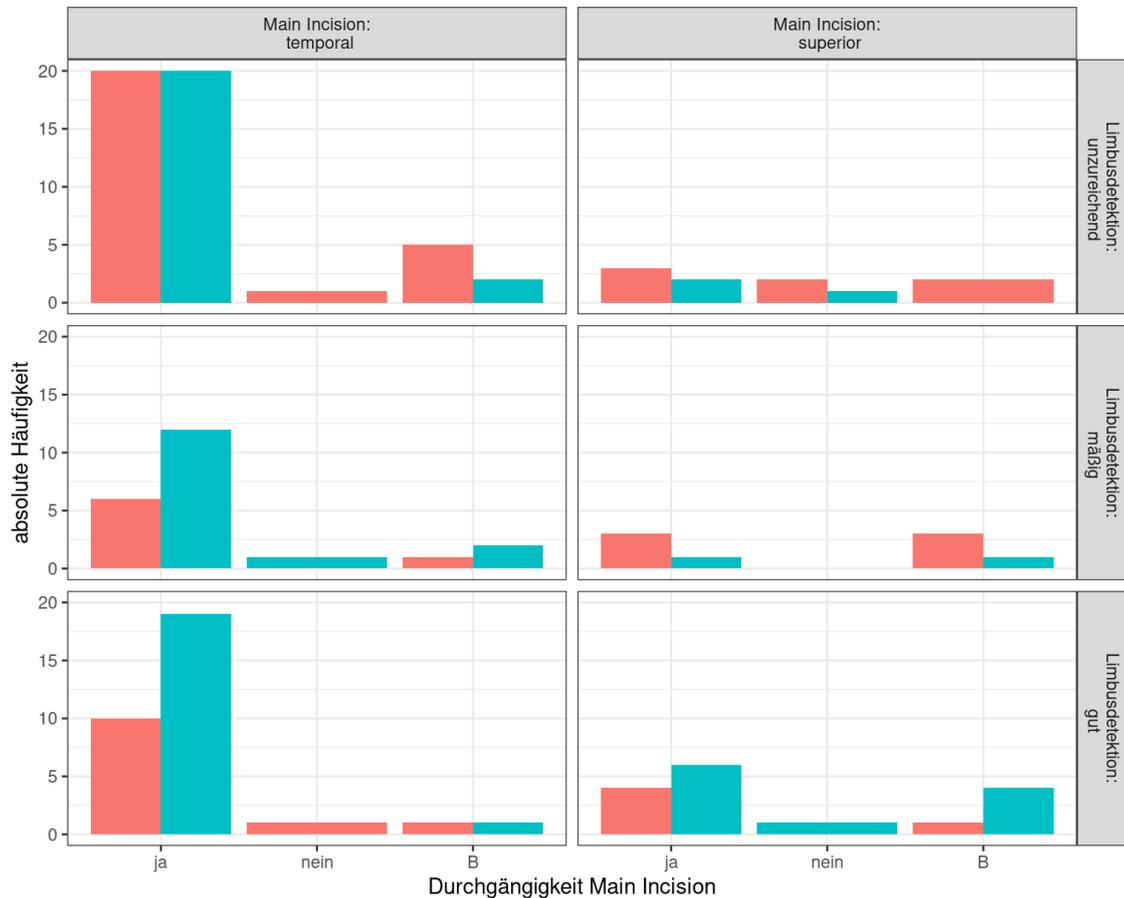


Abbildung 18 - Gegenüberstellung der Durchgängigkeit der Main Incision und der Schnittlokalisierung, Limbusdetektion, sowie Schnittplanung (rot = Anpassung der Schnittplanung, türkis = keine Anpassung der Schnittplanung)

In Abbildung 18 sind alle Parameter, wie Schnittlokalisierung, Schnittplanung und Qualität der Limbusdetektion, die zur Analyse der Einflussfaktoren auf die Durchgängigkeit erhoben wurden, der Durchgängigkeit eines Schnittes gegenübergestellt. Ihr ist zu entnehmen, dass beinahe alle Schnitte durchgängig sind. Besonders beim temporalen Zugangsweg präsentiert sich die 85,7%-ige Durchgängigkeit sehr deutlich, im Gegensatz zum superioren Zugang mit 58,3% Durchgängigkeit. Unter Einbezug der Durchgängigkeit mit Brücken, die als offen mit geringen Gewebswiderstand gewertet werden können, liegt die Durchgängigkeit der Schnitte bei 95%. Auf Quadrantenebene ausgedrückt,

waren die Inzisionen im 2. Quadranten häufiger durchgängig als im 1. Quadranten.

Tabelle 4 - Absolute Verteilung der Durchgängigkeit, abhängig von der Lokalisation der Main Incision

Durchgängigkeit abhängig der Schnittlokalisierung	Ja	Nein	Brücken	Insgesamt
Temporal (0°/180°)	90 (85,7%)	3 (2,9%)	12 (11,4%)	105 (74,5%)
Superior (90°)	21 (58,3%)	4 (11,1%)	11 (30,6%)	36 (25,5%)
Insgesamt	111 (78,7%)	7 (5,0%)	23 (16,3%)	141

Die Durchgängigkeit, abhängig vom gewählten Zugangsweg, ist in Tabelle 4 dargestellt. Insgesamt wurden 105 Hauptzugänge bei 0°/180° (temporal) geschnitten, 36 Schnitte wurden von superior (90°) gesetzt. 90 (85,7%) der 105 temporalen Inzisionen waren durchgängig, 12 (11,4%) mussten stumpf eröffnet, 3 (2,9%) manuell nachgeschnitten werden. Beim Zugang von superior waren 21 (58,3%) durchgängig, 11 Schnitte (30,6%) wiesen Brücken auf und 4 (11,1%) der 36 Schnitte waren nicht zu öffnen. Der dazu durchgeführte Chi-Quadrat-Test ergab einen signifikanten Zusammenhang zwischen Durchgängigkeit und Zugangsweg ($p = 0,003$). Hauptinzisionen, die temporal (2. Quadrant) liegen, sind demnach häufiger durchgängig (97,1%) als Hauptinzisionen von superior (88,9%).

Tabelle 5 - Absolute Verteilung der Durchgängigkeit der Main Incision in Abhängigkeit zur Limbusdetektion

Durchgängigkeit abhängig der Limbusdetektion	Ja	Nein	Brücken	Insgesamt
Unzureichend	46 (78,0%)	4 (6,8%)	9 (15,3%)	59 (43,1%)
Mäßig	22 (73,3%)	1 (3,3%)	7 (23,3%)	30 (21,9%)
Gut	39 (81,2%)	2 (4,2%)	7 (14,6%)	48 (35,0%)
Insgesamt	107 (78,1%)	7 (5,1%)	23 (16,8%)	137

Beim Gegenüberstellen der Bewertung der Limbusdetektion und Durchgängigkeit zeigten sich die Schnitte trotz mäßiger oder unzureichender Detektionsarbeit des Lasers vorwiegend durchgängig. Von insgesamt 137 einbezogenen Hauptinzisionen waren insgesamt 107 Schnitte durchgängig. Ca. 43% (46) dieser durchgängigen Hauptinzisionen lagen in Bereichen unzureichender Detektion, 20,5% (22) in Bereichen mäßiger Detektion (Tabelle

5). Es ließ sich keine Abhängigkeit zwischen den beiden Größen ermitteln ($p = 0,825$). Die Hauptinzisionen, die der Laser geschnitten hatte, waren zu fast 95% durchgehend. Hierbei war unerheblich, ob die Detektion des Limbus als gut, mäßig oder unzureichend bewertet wurde.

Tabelle 6 - Absolute Durchgängigkeit in Abhängigkeit einer möglichen Veränderung der Schnittplanung der Main Incision

Durchgängigkeit abhängig der Schnittplanung	Ja	Nein	Brücken	Insgesamt
Verschieben	49 (74,2%)	4 (6,1%)	13 (19,7%)	66 (47,1%)
Nicht verschoben	61 (82,4%)	3 (4,1%)	10 (13,5%)	74 (52,9%)
Insgesamt	110 (78,6%)	7 (5,0%)	23 (16,4%)	140

Bei Prüfung der Durchgängigkeit in Abhängigkeit einer möglichen Veränderung der Schnittplanung, wurden die Daten in Tabelle 6 erhoben. Bei 74,2% der 66 verschobenen Schnitte waren diese durchgängig, 19,7% wiesen Brücken auf, 4 waren nicht durchgängig und mussten manuell nachgeschnitten werden. 74 der geplanten Schnitte wurden hingegen so belassen, wie sie vom Laser ursprünglich geplant wurden. Davon zeigten 13,5% Brücken und 4,1% waren nicht durchgängig. Ebenfalls steht das Verändern oder Verschieben der Planung eines Schnitts in keiner signifikanten Korrelation zur Durchgängigkeit ($p = 0,516$).

Durchgängigkeit der Parazentesen

Die Parazentesen, die seitlichen Hilfszugänge, wurden Operateur- und augenabhängig gesetzt. Insgesamt wurden bis zu 270 Parazentesen in die folgenden Analysen mit einbezogen.

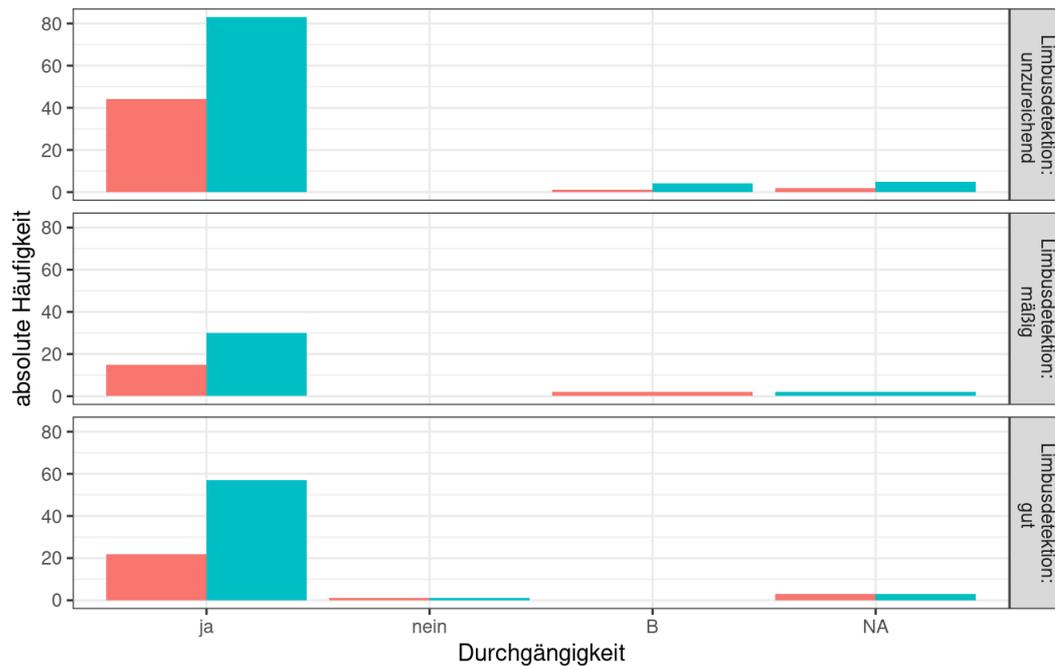


Abbildung 19 - Gegenüberstellung der Durchgängigkeit der Parazentesen und der Limbusdetektion, sowie Schnittplanung ebendieser (rot = Anpassung der Schnittplanung, türkis = keine Anpassung der Schnittplanung)

In Abbildung 19 sind alle Parameter, deren Einfluss auf die Durchgängigkeit der Parazentesen analysiert wurde, gegenübergestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die Hilfszugänge zu > 95% durchgängig sind. Im folgenden werden die Parameter einzeln betrachtet.

Tabelle 7 - Absolute Verteilung der Durchgängigkeit abhängig von der Lokalisation der Parazentesen

Durchgängigkeit abhängig der Lokalisation	Ja	Nein	Brücken	Insgesamt
Quadrant 1	26 (96,3%)	1 (3,7%)	0 (0%)	27 (10,0%)
Quadrant 2	106 (96,4%)	1 (0,9%)	3 (2,7%)	110 (40,7%)
Quadrant 4	128 (96,2%)	0 (0%)	5 (3,8%)	133 (49,3%)
Insgesamt	260 (96,3%)	2 (0,7%)	8 (3,0%)	270

Die Durchgängigkeit, je nach gewähltem Quadranten, ist in Tabelle 7 dargestellt. Insgesamt wurden 27 Hilfszugänge im 1., 110 im 2. Quadranten und 133 im 4. Quadranten geschnitten. Insgesamt waren 2 Parazentesen nicht durchgängig und mussten nachgeschnitten werden. 8 Hilfszugänge wiesen Gewebsbrücken auf, die stumpf aufzutrennen waren. Es ergab sich keine Abhängigkeit zwischen Durchgängigkeit und Quadrant ($p = 0,285$).

Tabelle 8 - Absolute Verteilung der Durchgängigkeit der Parazentesen in Abhängigkeit zur Limbusdetektion

Durchgängigkeit abhängig der Limbusdetektion	Ja	Nein	Brücken	Insgesamt
Unzureichend	128 (96,2%)	0 (0%)	5 (3,8%)	133 (50,8%)
Mäßig	45 (95,7%)	0 (0%)	2 (4,3%)	47 (17,9%)
Gut	80 (97,6%)	2 (2,4%)	0 (0%)	82 (31,3%)
Insgesamt	253 (96,6%)	2 (0,8%)	7 (2,7%)	262

Bei Gegenüberstellung der Durchgängigkeit der Parazentesen und der Detektion des Limbus (Tabelle 8) wurde erhoben, dass bei 128 der 253 durchgängigen Hilfszugänge eine unzureichende Limbusdetektion des betreffenden Auges vorlag, bei 45 eine moderate und bei 80 eine gute Detektion. Die Parazentesen waren zu > 95% durchgehend, unerheblich, ob die Detektion des Limbus als gut, mäßig oder unzureichend bewertet wurde.

Die Gegenüberstellung von Limbusdetektion und Durchgängigkeit ergab ebenfalls keinen Zusammenhang zwischen den beiden Größen ($p = 0,072$).

Tabelle 9 - Absolute Durchgängigkeit der Parazentesen in Abhängigkeit einer möglichen Veränderung der Schnittplanung

Durchgängigkeit abhängig der Schnittplanung	Ja	Nein	Brücken	Insgesamt
Verschoben	83 (95,4%)	1 (1,1%)	3 (3,5%)	87 (32,5%)
Nicht verschoben	175 (96,7%)	1 (0,5%)	5 (2,8%)	181 (67,5%)
Insgesamt	258 (96,3%)	2 (0,7%)	8 (3,0%)	268

Bei Prüfung der Durchgängigkeit in Verbindung mit einer möglichen Veränderung der Schnittplanung der Hilfszugänge, wurden die Daten in Tabelle 9 erhoben. Von insgesamt 87 verschobenen Schnittpositionen zeigten 3,5% Brücken. Lediglich ein Zugang musste manuell nachgeschnitten werden. Bei den belassenen Schnitten hatten 2,8% Brücken und einer musste ebenso manuell eröffnet werden. Es bestand keine Korrelation zwischen manuell geänderter Schnittposition und Schnittdurchgängigkeit ($p = 0,622$). Insgesamt zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen Limbusdetektion und Durchgängigkeit der Parazentesen ($p = 0,072$) bei dem Versuch, eine bessere Durchgängigkeit durch Verschieben der Schnittlokalisierung zu erzielen.

3.3.2 Einfluss der limbal einsprossenden Blutgefäße auf die Schnittdurchgängigkeit

Der Einfluss der limbalen Gefäße auf die Durchgängigkeit von Main Incision und Parazentesen ist folgend dargestellt. Als Gefäße mit Einfluss auf die Schnittqualität wurden die Gefäße gewertet, die über die Grenze des chirurgischen Limbus, demarkiert vom Laser durch eine blaue Linie, hinaus, in die Kornea einsprossen.

Durchgängigkeit der Main Incision

Berücksichtigt wurden die Gefäßeinsprossungen der Quadranten, in denen die Main Incision geschnitten wurde. Beim Zugangsweg von temporal war dies Quadrant 2, von superior handelte es sich um Quadrant 1.

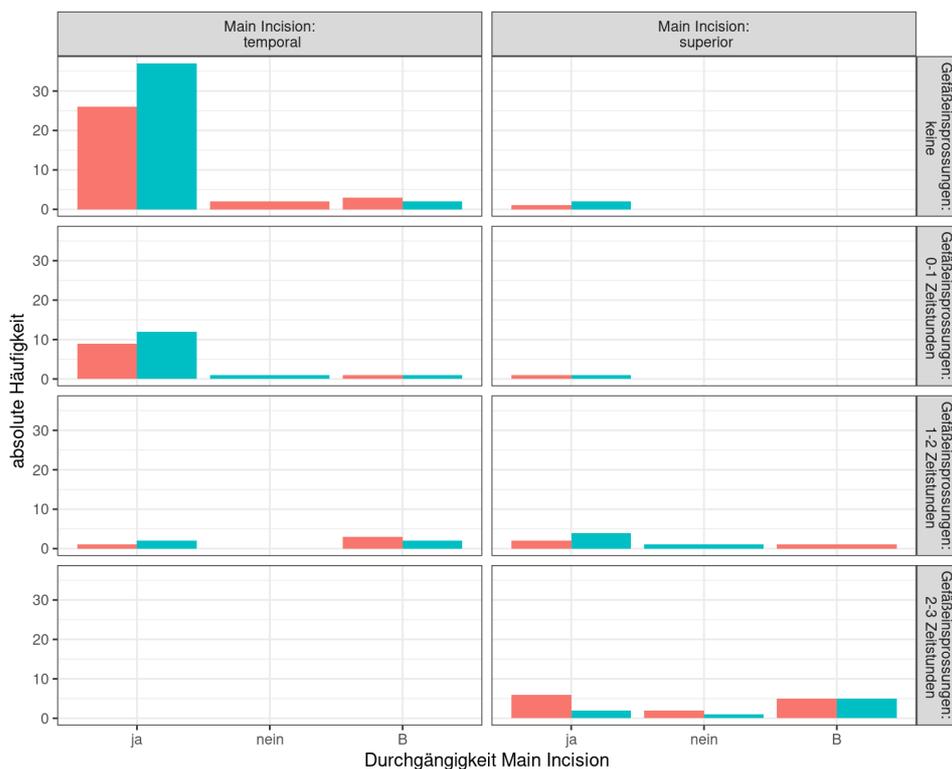


Abbildung 20 - Gegenüberstellende Zusammenfassung der absoluten Durchgängigkeit der Main Incision und der Bewertung der limbalen Gefäßeinsprossungen, sowie der Schnittlokalisierung und der Schnittplanung (rot = Anpassung der Schnittplanung, türkis = keine Anpassung der Schnittplanung)

In Abbildung 20 sind die erhobenen Werte der Durchgängigkeit in Abhängigkeit der limbalen Einsprossungen und der Schnittlokalisierung zusammengefasst

gegenübergestellt. Deutlich erkennbar ist eine Abnahme der Durchgängigkeit mit zunehmender Ausprägung der limbalen Vaskularisation. Im Folgenden sind die Parameter einzeln der Durchgängigkeit gegenübergestellt.

Die Analyse der Durchgängigkeit der Hauptinzisionen und der Bewertung der Ausprägung an Blutgefäßen im detektierten Limbusbereich ergab die in Tabelle 10 dargestellten Werte.

Tabelle 10 - Absolute Werte der Durchgängigkeitsbewertung der Main Incision in Abhängigkeit der limbalen Gefäßeinsprossungen

Durchgängigkeit abhängig der limbalen Vaskularisation	Ja	Nein	Brücken	Insgesamt
keine	67 (90,5%)	2 (2,7%)	5 (6,8%)	74 (54,0%)
0 - 1h	23 (88,5%)	1 (3,9%)	2 (7,7%)	26 (19,0%)
1 - 2h	9 (56,2%)	1 (6,3%)	6 (37,5%)	16 (11,7%)
2 - 3h	8 (38,1%)	3 (14,3%)	10 (47,6%)	21 (15,3%)
Insgesamt	107 (78,1%)	7 (5,1%)	23 (16,8%)	137

Insgesamt wiesen 74 Augen, in denen die Hauptinzision geplant waren, keinerlei vaskuläre Einsprossungen über den Limbus hinaus auf. Bei 26 Quadranten bestanden limbale Vaskularisationen in bis zu einer Zeitstunde, bei 16 Quadranten in bis zu 2 Zeitstunden. 21 der insgesamt 137 einbezogenen Augen zeigten limbale Blutgefäße im gesamten Quadranten (2 - 3 Zeitstunden) der Main Incision auf.

Am häufigsten stellten sich die Schnitte als durchgängig dar, die in maximal einer Zeitstunde Blutgefäße aufwiesen. Hier konnte eine Durchgängigkeit von 97% erreicht werden. Hingegen dessen nahm die Durchgängigkeitsrate bei stark ausgeprägter limbalen Vaskularisation auf 85,7% ab, mit einer überdurchschnittlichen Häufigkeit an intrastromalen Brücken (47,6%).

Tabelle 11 - Absolute Anzahl der Schnittplanungsanpassungen der Main Incision in Abhängigkeit von limbalen Gefäßeinsprossungen

Schnittplanung abhängig der limbalen Vaskularisation	Verschoben	Nicht verschoben	Insgesamt
keine	33 (44,6%)	41 (55,4%)	74 (53,6%)
0-1 h	11 (42,3%)	15 (57,7%)	26 (18,8%)
1-2 h	7 (43,8%)	9 (56,2%)	16 (11,6%)
2-3 h	13 (59,1%)	9 (40,9%)	22 (15,9%)
Insgesamt	64 (46,4%)	74 (53,6%)	138

Von 64 verschobenen Schnittpositionen wiesen 33 Planungen in der endgültigen Position keine Blutgefäße im Schnittbereich auf, 20,3% Blutgefäße in 2 - 3 Zeitstunden. 55,4% der blutgefäßfreien Schnittpositionen wurden zuvor nicht verschoben, sondern in ihrer voreingestellten Position belassen. 9 der 74 belassenen Lokalisationen enthielten vaskuläre Einsprossungen in 1 - 2 Zeitstunden und ebenfalls 9 in 2 - 3 Zeitstunden (Tabelle 11).

Der Chi-Quadrat-Test zeigte insgesamt eine deutliche signifikante Abhängigkeit der Durchgängigkeit und der Anzahl der Zeitstunden mit Blutgefäßen ($p < 0,001$).

Durchgängigkeit der Parazentesen

Unter Berücksichtigung der einsprossenden limbalen Gefäße wurden die Durchgängigkeit und die Planungsanpassungen der Parazentesen ebenfalls beleuchtet. Im Gegensatz zur Main Incision stehen die Parazentesen bezogen auf die Bewertung der Blutgefäße, in keiner Abhängigkeit zur Durchgängigkeit der Schnitte. Der Chi-Quadrat-Test ergab einen p-Wert von 0,35.

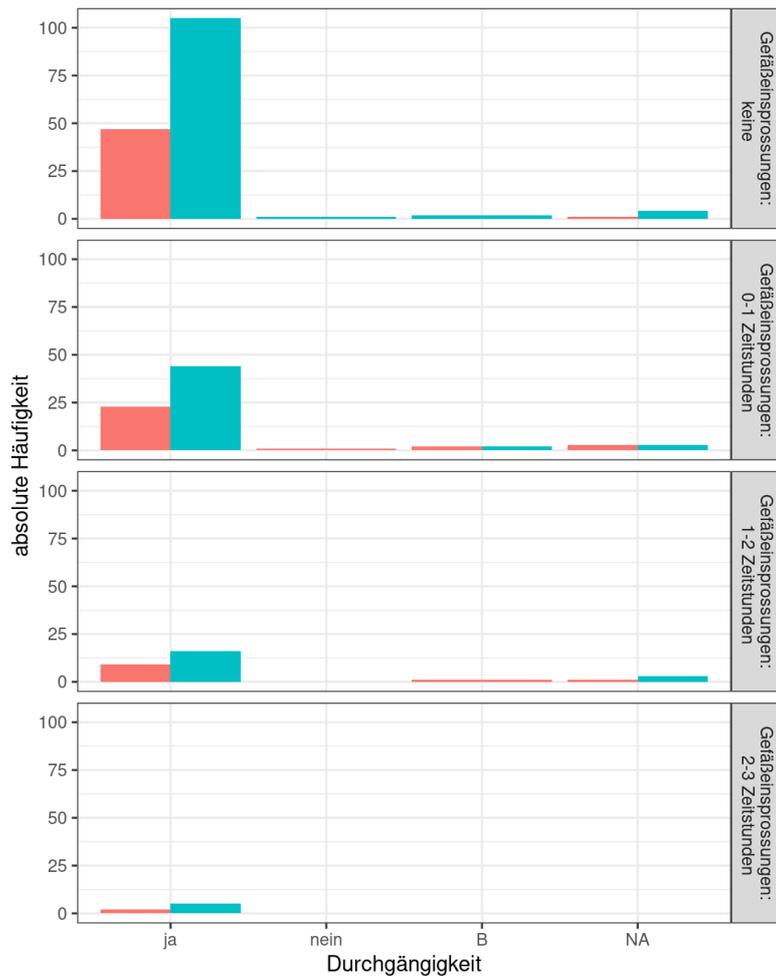


Abbildung 21 - Gegenüberstellung der Durchgängigkeit der Parazentesen und der limbalen Gefäßneovascularisation, sowie der Schnittplanungsänderungen (rot = Anpassung der Schnittplanung, türkis = keine Anpassung der Schnittplanung)

Abbildung 21 zeigt eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse des Einflusses der Menge der limbal einsprossenden Blutgefäße auf die Schnittdurchgängigkeit der Parazentesen.

Tabelle 12 - Absolute Werte der Durchgängigkeitsbewertung der Parazentesen in Abhängigkeit der limbalen Gefäßneovascularisation

Durchgängigkeit abhängig der limbalen Vaskularisation	Ja	Nein	Brücken	Insgesamt
keine	153 (98,1%)	1 (0,6%)	2 (1,3%)	156 (59,5%)
0 - 1h	67 (93,1%)	1 (1,4%)	4 (5,6%)	72 (27,5%)
1 - 2h	25 (96,2%)	0 (0%)	1 (3,8%)	26 (9,9%)
2 - 3h	8 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	8 (3,1%)
Insgesamt	253 (96,6%)	2 (0,8%)	7 (2,7%)	262

Insgesamt wiesen 156 Quadranten, in denen Parazentesen geplant waren, keinerlei vaskuläre Einsprossungen über den Limbus hinaus auf. In 72 Quadranten bestanden limbale Vaskularisationen in bis zu einer Zeitstunde, bei 26 Quadranten in bis zu 2 Zeitstunden. Bei 8 Parazentesen beinhaltete der zugehörige Quadrant über alle Zeitstunden hinweg limbale Blutgefäße. Bei 3,4% der Parazentesen zeigten sich Brücken oder waren bei Gefäßeinsprossungen in bis zu zwei Zeitstunden manuell zu eröffnen (Tabelle 12). Hier besteht kein Zusammenhang zwischen Anzahl der Zeitstunden mit Blutgefäßen und der prä-interventionellen Verschiebung der Schnittplanung ($p = 0,677$).

Tabelle 13 - Absolute Anzahl der Schnittplanungsanpassungen der Parazentesen in Abhängigkeit von limbalen Gefäßeinsprossungen

Schnittplanung abhängig der limbalen Vaskularisation	Verschoben	Nicht verschoben	Insgesamt
keine	48 (30.0%)	112 (70.0%)	160 (58,2%)
0 - 1h	29 (37.2%)	49 (62.8%)	78 (28,4%)
1 - 2h	11 (36.7%)	19 (63.3%)	30 (10,9%)
2 - 3h	2 (28.6%)	5 (71.4%)	7 (2,5%)
Insgesamt	90 (32,7%)	185 (67,3)	275

In Fällen der Anpassungen durch den Operateur wurden bei 90 Parazentesen die Planungen der Position verschoben. Davon wiesen ca. 53% überhaupt keine Blutgefäße innerhalb der Limbusmarkierung im Quadranten auf. Die Quadranten, der insgesamt 185 belassenen Schnittmarkierungen, beinhalteten 39,5% limbale Gefäßeinsprossungen in mindestens einer Zeitstunde, davon 7% im gesamten zugehörigen Quadranten (Tabelle 13).

Auch hier besteht keine signifikante Abhängigkeit zwischen Verschiebung der Parazentesen und Menge an Blutgefäßen im Quadranten (p -Wert = 0,677).

3.3.3 Einfluss der Ausprägung des Arcus lipoides auf die Schnittdurchgängigkeit

Durchgängigkeit der Main Incision

Es erfolgte die Prüfung des Zusammenhangs zwischen der Durchgängigkeit der Hauptinzisionen und der Ausprägung des Arcus lipoides im jeweiligen Quadranten.

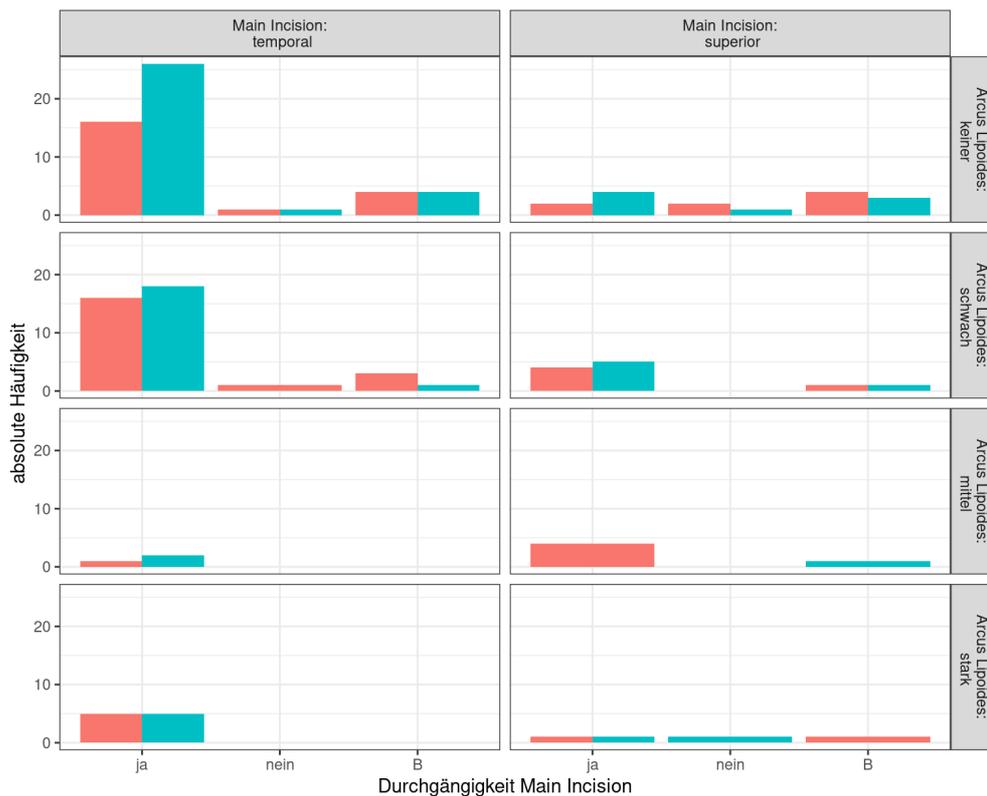


Abbildung 22 - Gegenüberstellung der Durchgängigkeit der Main Incision und der Schnittlokalisation, der Ausprägung des Arcus lipoides, sowie der Schnittplanungsänderungen (rot = Anpassung der Schnittplanung, türkis = keine Anpassung der Schnittplanung)

Die erhobenen Werte sind in Abbildung 22 zusammenfassend abgebildet.

Tabelle 14 - Absolute Werte der Durchgängigkeitsbewertung der Main Incision in Abhängigkeit der Ausprägung des Arcus lipoides

Durchgängigkeit abhängig des Arcus lipoides	Ja	Nein	Brücken	Insgesamt
Keine	49 (71,0%)	5 (7,3%)	15 (21,7%)	69 (48,9%)
Schwach	43 (86,0%)	1 (2,0%)	6 (12,0%)	50 (35,5%)
Mittel	7 (87,5%)	0 (0,0%)	1 (12,5%)	8 (5,7%)
Stark	12 (85,7%)	1 (7,1%)	1 (7,1%)	14 (9,9%)
Insgesamt	111 (78,7%)	7 (5,0%)	23 (16,3%)	141

Tabelle 14 gibt Aufschluss über die einzelnen Werte der Durchgängigkeit in Abhängigkeit der Ausprägung des Arcus lipoides. Von 141, der hinsichtlich des Arcus lipoides beurteilten, Quadranten zeigten 14 Quadranten eine starke, 8 eine milde und 50 eine geringe Ausprägung lipoider Einlagerungen im Bereich des Limbus. 78,7% aller Hauptinzisionen erwiesen sich als durchgängig, davon war bei 82,8% keiner oder nur ein schwach ausgeprägter Arcus lipoides festgestellt worden. 29% der 69 Quadranten ohne Arcus lipoides wiesen Brücken im

Schnittkanal auf, oder mussten manuell nachgeschnitten werden. Von 14 schwer betroffenen Quadranten, musste 1 Schnitt manuell nachgeschnitten werden. Insgesamt konnte eine Durchgängigkeit von 95% erzielt werden.

Tabelle 15 - Absolute Anzahl der Schnittplanungsanpassungen der Main Incision in Abhängigkeit von der Ausprägung des Arcus lipoides

Schnittplanung abhängig des Arcus lipoides	Vershoben	Nicht verschoben	Insgesamt
Keine	30 (43.5%)	39 (56.5%)	69 (48,6%)
Schwach	25 (49.0%)	26 (51.0%)	51 (35,9%)
Mittel	5 (62.5%)	3 (37.5%)	8 (5,6%)
Stark	7 (50.0%)	7 (50.0%)	14 (9,9%)
Insgesamt	67 (47,2%)	75 (52,8%)	142

Bei Betrachtung der Ausprägung des Arcus lipoides in Abhängigkeit einer möglichen Veränderung der Schnittplanung des Hauptzugangs, wurden die Daten in Tabelle 15 erhoben. 67 Schnittplanungen wurden durch den Operateur angepasst. 7 dieser Schnitte lagen in Quadranten mit stark ausgeprägtem Arcus lipoides, bei 37,3% war er gering ausgebildet. 52,8% der Schnitte wurden in ihrer Ursprungsposition belassen. Auch hier waren 7 Hauptinzisionen in Quadranten mit stark ausgeprägter lipoider Einlagerung lokalisiert. Deutlich mehr Quadranten wiesen aber keine (52%), bzw. nur eine geringe Ausprägung (34,6%) des Arcus lipoides im jeweiligen Quadranten auf.

Der Chi-Quadrat-Test zeigte ebenfalls, dass zwischen Durchgängigkeit und Ausprägung des Arcus lipoides im jeweiligen Quadranten kein Zusammenhang besteht ($p = 0,461$). Ferner stellten sich die Ausprägung des Arcus lipoides und die Verschiebung der präoperativen Schnittplanung als unabhängig dar ($p = 0,741$).

Schnittanpassungen der Parazentesen

Im Einklang mit den Ergebnissen des Einflusses des Arcus lipoides auf die Durchgängigkeit der Main Incision stehen die Resultate der Auswertung der Parazentesen hinsichtlich der Durchgängigkeit bei Arcus lipoides.

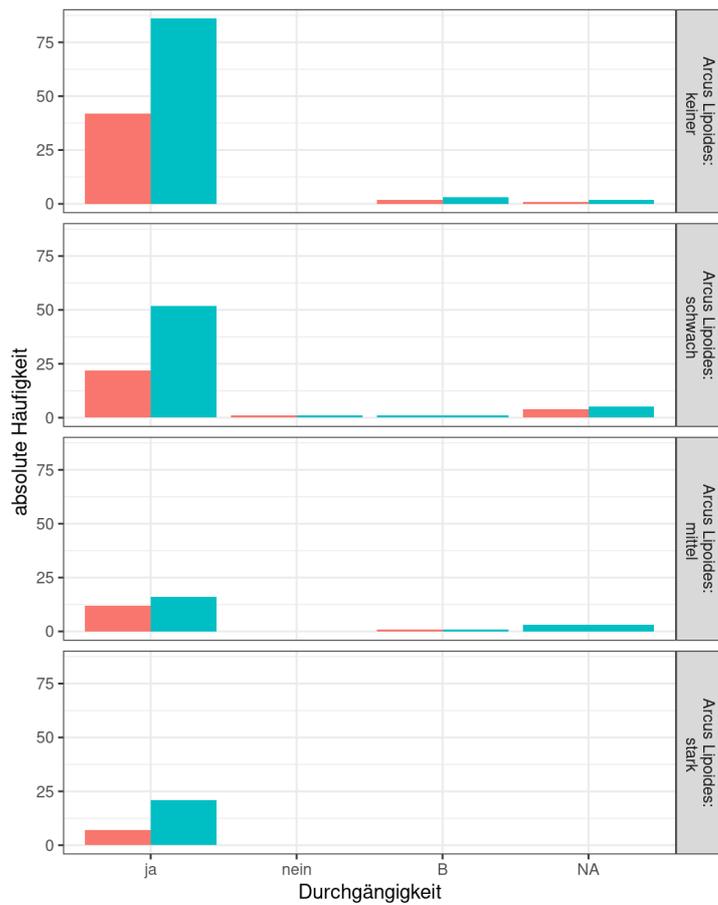


Abbildung 23 - Gegenüberstellung der Durchgängigkeit der Parazentesen und der Ausprägung des Arcus lipoides, sowie der Schnittplanungsänderungen (rot = Schnittplanung angepasst, türkis = Schnittplanung nicht angepasst)

In Abbildung 23 sind alle erhobenen Parameter gegenübergestellt. Ihr ist zu entnehmen, dass beinahe alle Schnitte durchgängig sind. Insgesamt zeigten sich deutlich über 95% der Schnitte als durchgängig, ungeachtet der Stärke der Ausprägung des Arcus lipoides.

Tabelle 16 – Absolute Werte der Durchgängigkeitsbewertung der Parazentesen in Abhängigkeit der Ausprägung des Arcus lipoides

Durchgängigkeit abhängig des Arcus lipoides	Ja	Nein	Brücken	Insgesamt
Keine	130 (96,3%)	0 (0%)	5 (3,7%)	135 (50,0%)
Schwach	74 (96,1%)	2 (2,6%)	1 (1,3%)	77 (28,5%)
Mittel	28 (93,3%)	0 (0%)	2 (6,7%)	30 (11,1%)
Stark	28 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	28 (10,3%)
Insgesamt	260 (96,3%)	2 (0,7%)	8 (3,0%)	270

In Tabelle 16 sind die einzelnen Ergebnisse der Durchgängigkeit der Parazentesen unter Berücksichtigung der Ausprägung des Arcus lipoides dargestellt. Insgesamt sind 270 Parazentesen in die Bewertung mit eingeflossen. Trotz starker Ausprägung des Arcus lipoides in 28 Fällen, waren die Schnitte dort zu 100% durchgängig, zwei Inzisionen, im „schwach“ klassifizierten Quadranten, waren undurchgängig und mussten mit einer Phakolanze eröffnet werden. Lediglich 3% aller Parazentesen wiesen Brücken auf.

Tabelle 17 - Absolute Anzahl der Schnittplanungsanpassungen der Parazentesen in Abhängigkeit von der Ausprägung des Arcus lipoides

Schnittplanung abhängig des Arcus lipoides	Verschoben	Nicht verschoben	Insgesamt
Keine	45 (33.1%)	91 (66.9%)	136 (48,1%)
Schwach	27 (31.4%)	59 (68.6%)	86 (30,4%)
Mittel	13 (39.4%)	20 (60.6%)	33 (11,7%)
Stark	7 (25.0%)	21 (75.0%)	28 (9,9%)
Insgesamt	92 (32,5%)	191 (67,5%)	283

Tabelle 17 stellt die operateurabhängige Anpassung der Schnittposition der Parazentesen der Ausprägung der lipoiden Einlagerungen im Bereich des Limbus im zugehörigen Quadranten gegenüber. Von 283 Parazentesen wurden 32,5% verschoben. Hiervon waren 7 der geplanten Inzisionen in Quadranten mit stark ausgeprägtem Arcus lipoides lokalisiert, bei ca. 49% waren keine lipoiden Einlagerungen im zugehörigen Quadranten feststellbar. 48,1% der Hilfszugänge lagen in klaren Hornhautbereichen und 67% hiervon wurden auch in ihrer Lokalisation belassen. 21 der 191 nicht verschobenen Schnittplanungen waren in Quadranten mit stark ausgeprägtem Arcus lipoides situiert. Alles in allem konnte keine Korrelation zwischen der Durchgängigkeit und der Ausprägung des Arcus lipoides festgestellt werden ($p = 0,243$).

4 Diskussion

Im Rahmen unserer Studie wurde zum ersten Mal die Durchgängigkeit der FLACS-Inzisionen überprüft und in Zusammenhang mit möglichen Störfaktoren gestellt.

Trotz deutlich verbesserungswürdiger Limbusdetektion konnte der Laser eine hohe Durchgängigkeit der Schnitte erzielen. Eine Anpassung der Schnittposition durch den Ophthalmochirurgen hatte in dieser Untersuchung keinen Einfluss auf die Schnittdurchgängigkeit. Auch ein Arcus lipoides war für die Durchgängigkeit eines Schnittes nicht von Bedeutung, denn trotz starker Ausprägung des Arcus lipoides waren die Schnitte in über 8 von 10 Fällen durchgängig.

Obwohl eine gute Durchgängigkeit auch bei ausgeprägter limbaler Vaskularisation erzielt werden konnte, stellten wir hier einen signifikanten Zusammenhang zwischen Durchgängigkeit und limbaler Gefäßeinsprossung pro Zeitstunde in einem Quadranten fest.

Diese Ergebnisse stellen einen wichtigen Beitrag für die Optimierung einer schon sehr ausgefeilten Technik dar, ihre Ebenbürdigkeit zur konventionellen Kataraktchirurgie zu unterstreichen und ihre weitere Etablierung und Standardisierung voranzutreiben.

Denn als die am häufigsten durchgeführte Operation am Menschen ist die Kataraktchirurgie, mit über 19 Millionen Eingriffen pro Jahr weltweit, und einer Geschichte, die bis in die vorchristliche Zeit zurückreicht, ein wichtiger Teil der kurativen Medizin. Zudem ist die Katarakt, infolge des demographischen Wandels, eine Erkrankung mit steigender Inzidenz, und dem damit verbundenen Anstieg der jährlichen operativen Eingriffe auf über 35 Millionen jährlich, auch medizinökonomisch ein äußerst relevantes Thema.

Seit dem 18. Jahrhundert wurde die manuelle Chirurgie des grauen Stars stetig optimiert und technisch verfeinert. Heute ist sie mit einer Eingriffsdauer von ca. 15 Minuten schnell, effektiv und auch ambulant in einer Tropfanästhesie für die Patienten möglich. Neue Technologien, Techniken und Methoden, die die konventionelle Kataraktchirurgie in Ihrer jetzigen Art verändern oder verbessern

sollen, müssen sich mit bereits hohen Qualitätsrichtlinien und Effizienz an der jetzigen Technik messen lassen.

Im Rahmen der refraktiven Hornhautchirurgie zeigte der Femtosekundenlaser bereits in mehreren Studien eine höhere Sicherheit und Reproduzierbarkeit (von Jagow and Kohnen, 2009, Montes-Mico et al., 2007, Juhasz et al., 1999). All diese Eigenschaften sollen auch für die Kataraktchirurgie genutzt werden.

Nagy et al. führte die erste FLACS 2008 am menschlichen Auge durch, mit dem Ziel, eine sichere und prognostizierbarere Kapsulotomie zu erhalten, sowie Ultraschallenergie einzusparen (Nagy et al., 2009).

Besonders hinsichtlich Präzision und Reproduzierbarkeit sind in der Lasertechnik klare Vorteile zu erkennen. Die automatisierten Prozesse sollten den chirurgischen Ablauf vereinfachen sowie beschleunigen, die Operation möglichst risikoarm und berechenbar machen. Auch Faktoren, die bis jetzt noch nicht in die Therapie mit eingeflossen sind, sind nun präzise zu berücksichtigen bzw. zu behandeln. Seit 2008 wurden viele Erfahrungen gesammelt und die Technik der FLACS kontinuierlich weiterentwickelt.

Der Review von Abouzeid und Ferrini beleuchtet den potenziellen Nutzen der Automatisierung einzelner Teilabschnitte der Kataraktchirurgie durch den Femtosekundenlaser. Sie konstatierten zwar eine Ausbaufähigkeit hinsichtlich randomisierter, prospektiver Studien mit großem Stichprobenumfang zur vollumfänglichen Analyse des refraktiven Vorteils der FLACS gegenüber der konventionellen Kataraktchirurgie, zeigten aber bereits einige Studien mit ebenbürtigem oder vorteilhafterem Ergebnis einzelner Teilschritte der FLACS auf (Abouzeid and Ferrini, 2014) wie im Folgenden dargestellt.

Die FLACS untergliedert sich in folgende Schritte: Docking, Lasereinstellung, Kernfragmentierung, Kapsulotomie, kornealen Inzisionen, Phakoaspiration und IOL-Einsatz. Von diesen laufen die Kernfragmentierung, Kapsulotomie und das Anlegen kornealer Inzisionen automatisiert ab, mit schrittweisen Herausforderungen und Risiken.

Zur effektiven Laserapplikation ist ein stabiles Docking des Lasers an das Patientenaugene unerlässlich. Die Vermittlung zwischen Patientenaugene und Laser Interface erfolgt über ein Vakuum. Dieses und die Beschaffenheit des Interfaces

haben Einfluss auf den Augeninnendruck. Ein applanierendes Handstück verursacht eine Erhöhung des intraoperativen IOP (Chaurasia et al., 2010, Hernandez-Verdejo et al., 2007). So auch das Liquid-Interface, jedoch in deutlich geringerem Ausmaß. Der IOP-Anstieg stellt sich als linear zum Vakuum dar (Ebner et al., 2017, Talamo et al., 2013) und erreicht sein Maximum nach Durchführung der Kapsulotomie (Kerr et al., 2013). Risiken eines erhöhten Augeninnendrucks sind die Behinderung des okulären Blutflusses mit Gefahr von Netzhaut- und Nervenschädigung sowie Glaukomschäden.

Die Kapsulotomie bzw. Kapsulorhexis sollte präzise positioniert und stabil sein. Der Kapselsack muss noch genügend Halt für die IOL bieten, um eine Verlagerung, Drehung oder Tilt der IOL zu verhindern (Smith et al., 2004, Ravalico et al., 1996, Ernest et al., 1994). Die kreisrunde Öffnung der Kapsel darf aber auch nicht zu klein sein, da sonst die Gefahr einer anterioren Kapselneubildung besteht (Sanders et al., 2006). Laut Studien von Friedman et al. und Nagy und Kollegen sind die Kapsulotomien mithilfe des Femtosekundenlaser zentrierter, präziser, stabiler und reproduzierbarer (Friedman et al., 2011, Nagy et al., 2011). Auch Kránitz und Kollegen kamen zu diesem Ergebnis. Sie eruierten in einem Vergleich zwischen manueller und lasergestützter Kapsulotomie, dass die IOLs in einem manuell gerissenen Kapselsack deutlich häufiger horizontale und vertikale Verkippung aufwiesen, also instabiler waren, als die Linsen in einem Kapselsack mit lasergestützter Kapsulotomie (Kranitz et al., 2011). Die Neigung der Linse im Kapselsack stand darüber hinaus signifikant im Zusammenhang mit der Änderung der Sehschärfe (Kranitz et al., 2012).

Mittlerweile gibt es verschiedene Optionen, die Zentrierung der Kapsulotomie auf die Pupille, den Linsenapex oder die Sehachse auszurichten, um ein optimales subjektiv-refraktives Ergebnis zu erzielen. Des Weiteren sollten die Kanten der Kapselsacköffnung eine hohe Reißfestigkeit aufweisen, um anteriore Kapselblattdefekte oder schwerwiegendere Komplikationen zu vermeiden (Carifi et al., 2015). Hinsichtlich der Stabilität der Kapselschnittränder zeigen Studien bisher inhomogene Ergebnisse. Um die anfänglich hohe Inzidenz von radiären Einrissen der Vorderkapsel zu senken, wurden bereits viele Verbesserungen der Lasereinstellungen durchgeführt, die Schnittkantenmorphologie der

Femtosekundenlaser-Kapsulotomie zu optimieren und weichere, stabilere Kapselränder zu generieren (Schultz et al., 2017, Williams et al., 2016).

In einer Metaanalyse von 14567 Augen arbeiteten auch Popovic et al. signifikante Unterschiede zwischen laserassistierter und konventioneller Kataraktchirurgie hinsichtlich Zirkularität der Kapsulotomie, Zentrierung der IOL im Kapselsack, der Phakoemulsifikationszeit und der Auswirkungen auf die Kornea heraus. Die laserassistierte Kapsulotomie wies zwar nur in einer von zwei Berechnungsmethoden eine bessere Zirkularität auf, insgesamt aber eine Größe, die näher am erwarteten/gewünschten Wert lag als die der manuellen Kataraktchirurgie. Am ehesten sei dies mit den individuellen Techniken der Chirurgen zu begründen (Popovic et al., 2016).

Dick und Kollegen verwiesen außerdem auf eine Abhängigkeit zwischen Durchmesser der Kapsulotomie und Patientenalter. Je jünger der Patient desto größer zeigte sich der Weitungsfaktor der Kapselöffnung (Dick et al., 2015).

Die bessere Zirkularität als auch Zentrierung der Kapsulotomie könnten Gründe für die geringere horizontale Dezentrierung der IOL bei FLACS sein und somit die Möglichkeit auf ein verbessertes visuelles und refraktives Ergebnis der FLACS mit sich bringen (Roberts et al., 2013).

Die Phakoemulsifikation während der konventionellen Kataraktchirurgie birgt, besonders bei harter Katarakt, das Risiko des hohen Verbrauchs von Phako-/Ultraschallenergie, welches Endothelschäden und Kapselkomplikationen nach sich zieht (Johansson et al., 2009, Richard et al., 2008, Hayashi et al., 1996). Durch Fragmentierung des Linsenkerns mit der FLACS muss weniger Phakoenergie aufgebracht werden, um die Linse zu zerkleinern und abzusaugen. Somit ist auch die Phakozeit insgesamt deutlich verkürzt (Abell et al., 2013, Conrad-Hengerer et al., 2012b, Palanker et al., 2010) und die Komplikationsrate geringer. Nagy et al. ermittelte in diesem Zusammenhang eine Reduktion der Phakoenergie um 43% und der Phakozeit um 51% im Gegensatz zur etablierten manuellen Kataraktchirurgie (Nagy et al., 2009). Auch Popovic und Kollegen ermittelten bei der FLACS eine geringere effektive Phakoemulsifikationszeit von > 3 Sekunden Unterschied zur manuellen Chirurgie (Popovic et al., 2016). Die geringere bis keine effektive Phakoemulsifikationszeit (Abell et al., 2013) und die

deutliche Reduktion der Phakoenergie (Kaur et al., 2018, Shajari et al., 2017, Schultz and Dick, 2014, Reddy et al., 2013) ziehen eine Verminderung des, durch freie Radikale induzierten, oxidativen Stresses nach sich, und bringen so den Vorteil der Schonung kornealen Endothels (Mariacher et al., 2016, Conrad-Hengerer et al., 2012b). Eine Verringerung der beiden Werte kann besonders von Vorteil für Patienten mit hohem postoperativem Risiko eines Hornhautödems sein, sowie die Abheilung der kornealen Inzisionen unterstützen.

Präzision und Komplikationsrate stellen sich als abhängig von dem behandelnden Chirurgen und der präoperativen Ausgangslage dar. Laut einer Studie von Bell und Kollegen nimmt die Rate von unerwünschten intra- und postoperativen Ereignissen mit Zunahme der Anzahl durchgeführter konventioneller Kataraktoperationen pro Jahr ab. Chirurgen, die im Schnitt 50-250 Kataraktoperationen im Jahr durchführen, haben eine Komplikationsrate von 0,8%, während Operateure mit über 1000 Operationen pro Jahr eine Rate von 0,1% vorweisen (Bell et al., 2007). Zwei weitere Studien kamen zu einem ähnlichen Ergebnis. Besonders Kliniken mit hohem Durchsatz an kataraktchirurgischen Eingriffen haben eine geringe Risikorate für Zwischenfälle als kaum chirurgisch tätige Ophthalmologen (Campbell et al., 2021, Cox et al., 2019). Zum einen können diese Ergebnisse herangezogen werden, um die These zu untermauern, dass automatisierte Prozeduren eine höhere Reproduzierbarkeit mit sich bringen. Allerdings ergaben bisherige Studien große Unterschiede hinsichtlich der Sicherheit der FLACS. Dies kann wiederum damit zusammenhängen, dass die FLACS eine sehr neue Methode ist, bei der der Lernprozess der Chirurgen noch weniger fortgeschritten ist, als bei der konventionellen Kataraktchirurgie.

Eine häufige früh-postoperative Komplikation der Kataraktchirurgie stellt das korneale Ödem dar, eine spät-postoperative Komplikation der korneale Endothelzellverlust. Es konnte bereits in mehreren Studien gezeigt werden, dass u.a. die Menge der Phakoemulsifikation, die Kataraktstärke also auch mechanische und thermische Einflüsse, sowie Technik und Erfahrung des Chirurgen Einfluss auf die Hornhaut, und somit auf das refraktive Ergebnis der Kataraktoperation haben (Takacs et al., 2012, Walkow et al., 2000, Dick et al.,

1996). Dementsprechend wäre eine Reduktion dieser postoperativen Komplikationen eine Möglichkeit zur Optimierung des refraktiven Ergebnisses. In ihrer Metaanalyse ermittelten Popovic und Kollegen insgesamt eine geringere korneale Dicke, bzw. ein geringeres Ausmaß eines kornealen Ödems, nach FLACS, als nach konventioneller Kataraktchirurgie. Sie schlussfolgerten daraus einen geringeren kornealen Stress bei laserassistierter Chirurgie. Die geringere Reduktion der kornealen Endothelzellen im Rahmen der FLACS verglichen zur konventionellen Kataraktchirurgie, mit derer ein traumatischer Eingriff in Verbindung gebracht wird, untermauert diese Ermittlungen (Popovic et al., 2016). Auch Takács et al. erhoben eine geringere korneale Schwellung nach FLACS als bei konventioneller Kataraktchirurgie, konnten jedoch keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich Endothelzellverlust nach den jeweiligen Eingriffen feststellen (Takacs et al., 2012). Abell und Kollegen zeigten in ihrer Studie, dass bei FLACS ein geringeres korneales Ödem und ein geringerer kornealer Endothelverlust früh postoperativ erzielt wird, jedoch nur unter der Prämisse geringster effektiver Pakoemulsifikationszeit und manuell geschnittenen clear corneal incisions (CCI). In diesem Fall zeigten sich sogar 6 Monate postoperativ bessere korneale Ergebnisse als bei FLACS mit Femtosekundenlaser-geschnittenen CCIs oder konventioneller Kataraktchirurgie (Abell et al., 2014). Die Schonung des Endothels ist insbesondere bei Patienten mit kompromitierten Hornhäuten wie z.B. einer Fuchs-Endotheldystrophie vorteilhaft. Im Kontrast zu den o.g. Thesen der gewebeschonenderen FLACS steht die Erkenntnis, dass die FLACS höhere postoperative Prostaglandinspiegel im Vorderkammerwasser induziert. Popovic et al. nehmen an, dass das durch den Femtosekundenlaser erzeugte Mikroplasma die Prostaglandinfreisetzung triggert (Popovic et al., 2016). Eine weitere Studie kam zu dem Schluss, dass die Kapsulotomie eine der Hauptauslöser der Entzündungsmediatorfreisetzung ins Kammerwasser darstellt. Aufgrund der pH-Wert-Verschiebung durch die Gasentwicklung und durch den Kontakt des Linsenmaterials mit dem Kammerwasser kommt es infolgedessen zu einer Entzündungsreaktion (Schultz et al., 2015). Da eine erhöhte Prostaglandinkonzentration in Zusammenhang mit einer pupillären Miosis und einer Störung der Blut-

Kammerwasser-Schranke (Abdel-Latif, 1991) steht, sowie ein erhöhtes Risiko für Makulaödeme und retinale Beeinträchtigungen birgt, empfahl Schultz bereits in einer früheren Studie eine präoperative nicht-steroidale antientzündliche Therapie (Schultz et al., 2013). Zudem konnten Schwarzenbacher und Kollegen in ihrer Studie zeigen, dass bei dem Einsatz eines niedrigenergetischen Femtosekundenlaser ein geringeres Ausmaß an Entzündungsreaktionen induziert wird (Schwarzenbacher et al., 2020). Dies kann auch an der unterschiedlichen Reihenfolge der Arbeitsschritte dieses Lasers liegen. In der Regel wird mit dem FEMTO LDV Z8 zuerst die Linsenfragmentierung und anschließend die Kapsulotomie durchgeführt.

Hinsichtlich komplexer Kataraktfälle, wie sie im Rahmen bestimmter Erkrankungen auftreten, bspw. Marfan-Syndrom, traumatischer Katarakt oder kindlicher Katarakt, kann der Femtosekundenlaser neue Behandlungsoptionen eröffnen. In diesen Fällen ist es entscheidend, möglichst atraumatisch zu arbeiten, ohne den Kapselsack und die Zonulafaser übermäßig zu destabilisieren. Verschiedene Case Reports u.a. von Schultz, Dick und Conrad-Hengerer ließen erkennen, dass mithilfe des Femtosekundenlasers zentrale, kontinuierliche Kapsulotomien bei Marfan-Syndrom (Schultz et al., 2013) und traumatischer Katarakt (Conrad-Hengerer et al., 2014), sowie reproduzierbare Kapsulotomien trotz erhöhter Elastizität des kindlichen Kapselsacks (Dick and Schultz, 2013) erreichbar waren.

Trotz der möglichen Vorteile, die die automatisierten Teilprozeduren in die Kataraktchirurgie mit einbringen würden, greifen viele Ophthalmochirurgen auf die altbewährten manuellen Inzisionen mit dem Messer zurück. Unzureichende Ergebnisse hinsichtlich der intrastromalen Inzisionsqualität vieler Vorgängermodelle verschiedener Laserplattformen verursachten Skepsis.

Weiterhin birgt die Anschaffung des Femtosekundenlasers einen hohen Investitionsbedarf und seine Verwendung gilt im Rahmen der Kataraktchirurgie, im Gegensatz zur „Phako“, als private Zusatzleistung. Besonders im Niedergelassenen-Bereich wird die FLACS als nicht rentabel angesehen, da die konventionelle Technik bereits sehr gute Ergebnisse liefert. Dem ist entgegen zu

setzen, dass die Phakoemulsifikation als Methode bereits höchst entwickelt ist und über mehrere Jahre stetig verfeinert wurde, während die FLACS eine vergleichsweise neue Methode ist, die bei vielen Fachleuten noch wenig Anklang findet. Dies meint jedoch nicht, dass die FLACS nicht ausgereift genug ist, viel mehr ist sie der Phakoemulsifikation bereits jetzt ebenbürtig und bietet auch für die Zukunft Verbesserungspotenzial.

Weitere mögliche Gründe für eine Bevorzugung der konventionellen Chirurgie sind die räumlichen Anforderungen, also auch eine komplizierte Anatomie des Patienten, die eine Anwendung des Femtosekundenlaser verhindert. Hinsichtlich der Technik kann einerseits die räumliche Begrenzung durch das Patienteninterface hinderlich sein, wenn beispielsweise die Schnitte nicht beliebig peripher positioniert werden können. Andererseits kann der Laser nur in klaren Hornhautabschnitten schneiden, weswegen Trübungen und Gefäße Störfaktoren darstellen und Schnitte somit weit zentraler gesetzt werden müssen. Der Femtosekundenlaser richtet sich zur Planung der Schnitte am Limbus corneae. Somit ist zur Gewährleistung einer hohen Schnittqualität der Inzisionen eine präzise Detektion der okulären Strukturen durch die Laserplattform zwingend notwendig. Sie dienen neben den Grenzflächen der Hornhaut und Linse als Grundlage der Berechnungen für Schnittplanung und Refraktionskorrektur. Wird der Limbus nicht richtig detektiert, könnten Schnitte möglicherweise zu zentral geplant werden und so bei fehlender Korrektur durch den Chirurgen, einen größeren Einfluss auf das refraktive Endergebnis haben. Außerdem nähmen fehlerhafte Schnittplanungen zusätzlich Zeit in Anspruch, da sie durch den Chirurgen manuell korrigiert werden müssten. Für ein zufriedenstellendes refraktives Ergebnis, im Rahmen der kornealen Schnittführung, ist weiterhin eine gute Wund- und Hornhautstabilität mit lückenloser Wundheilung und minimaler Topografieänderung der Hornhaut essenziell (Menapace and Dick, 2014).

Nach Einführung der selbstheilenden kornealen Inzisionen durch I. Howard Fine in 1992 gewannen diese, aufgrund operativer Zeitersparnis, schnellerer visueller Regeneration und geringerem chirurgisch induzierten Astigmatismus zunehmend an Popularität gegenüber den bisherigen skleralen Tunnelschnitten

(Fine et al., 2007, Leaming, 2003). In Literaturrecherchen von Taban et al. sowie Cooper et al. stellten die Forscher mit der Einführung der CCI jedoch eine Zunahme der postoperativen Endophthalmitis-Rate nach Kataraktchirurgie fest. Als Ursache sehen sie eine mangelnde Wundstabilität und somit reduzierte Wundintegrität an (Taban et al., 2005, Cooper et al., 2003), die vor allem durch Wunddefekte, wie Wundklaffen, Wunddiskontinuität und Leckage hervorgerufen wird (Maxwell et al., 1994). Laut einer Studie von McDonnell und Kollegen hat zudem der intraokulare Druck Einfluss auf die Entstehung einer postoperativen Endophthalmitis. Augen mit geringeren IOP-Werten zeigten hier einen schlechteren Wundverschluss der CCI mit der Tendenz zur Klaffung als solche Augen mit höheren IOP-Werten (McDonnell et al., 2003).

Eine fehlerhafte Schnittführung kann die Dichtigkeit der Inzision negativ beeinträchtigen, das Endophthalmitis-Risiko steigern und den chirurgisch-induzierten Astigmatismus (SIA) erhöhen. Zudem müssen die Schnitte gut belastbar sein und der mechanischen Beanspruchung durch Instrumente während der Phakoemulsifikation standhalten. Manuelle Inzisionen sind schwieriger zu koordinieren und hängen von der Erfahrung des Chirurgen ab. Die Inzisionen des Femtosekundenlasers hingegen lassen sich stets identisch multiplanar und größenpräzise gestalten (Masket et al., 2010).

Multiplanare Schnitte werden als stabiler und dichtender hinsichtlich ihres nahtlosen Verschlusses und Abheilung erachtet (Dewey et al., 2014). Zudem werden sie mit einem geringeren Risiko für intraokulären Druckabfall, eines Irisprolaps, Wundheilungsstörungen und Astigmatismus in Verbindung gebracht (Tripathi et al., 2013, Masket and Belani, 2007). In mehreren Studien zeigte sich bisher, dass der Femtosekundenlaser, aufgrund einheitlicher und beständiger Schnittmorphologie, bessere selbstheilende und damit widerstandsfähigere Schnitte konstruiert, als die Schnitte der konventionellen Kataraktchirurgie (Uy et al., 2017, Grewal and Basti, 2014, Mastropasqua et al., 2014, Lyles et al., 2011, Calladine and Packard, 2007).

In unserer Analyse konnten wir eine Durchgängigkeit der Femtosekundenlaser-Inzisionen in > 95% der Fälle in jeglicher Schnittlokalisation der Main-Incisions und Parazentesen zeigen und somit wichtige Daten über signifikante

Einflussfaktoren auf korneale Inzisionen im Rahmen der laserassistierten Kataraktchirurgie liefern. Als signifikante Störfaktoren ($p < 0,001$) erwiesen sich hauptsächlich korneale Blutgefäßeinsprossungen im Inzisionsgebiet. Dies könnte den Grund haben, dass das Hämoglobin in blutgefüllten Gefäßen die Laserenergie stärker absorbiert als ein Arcus lipoides, der den Laserstrahl eher streut. Um dennoch eine optimale Qualität der Schnittdurchgängigkeit zu erzielen, könnte es sich als hilfreich erweisen, die Schnittenergie in diesen Fällen bewusst zu erhöhen. Hingegen dessen zeigte die Präzision der Limbusdetektion des Lasers und die Proteineinlagerungen im Sinne eines Arcus lipoides keine signifikante Beeinträchtigung der Inzisionsdurchgängigkeit. Weiterhin stellten wir bei der Analyse der Lokalisation der Hauptinzisionen fest, dass sich die Schnitte von temporal als häufiger durchgängig ($p = 0,003$) erwiesen, als die von superior angelegten Schnitte. Dies könnte daher rühren, dass im 2. Quadranten die Ausprägung des Arcus lipoides und limbalen Gefäßeinsprossungen geringer ist, als in anderen Quadranten. Auch in anderen Studien zeigte sich der temporale Zugangsweg als die zu präferierende Lokalisation. Sowohl Nikose, als auch Kohnen und Kollegen stellten einen geringeren chirurgisch induzierten Astigmatismus fest, wenn die Main Incision temporal angelegt wurde (Kohnen et al., 2019, Nikose et al., 2018).

Mit unserer Arbeit konnten wir deutlich zeigen, dass die Inzisionen des Femtosekundenlaser Z8 sehr häufig durchgängig sind, unabhängig von Laserdetektion und Störfaktoren wie z.B. ein Arcus lipoides und entgegen der bisherigen allgemeinen Meinung der Ophthalmochirurgen, die noch immer die konventionellen Inzisionen favorisieren. Weiterhin konnten wir objektiv Störfaktoren aufzeigen, die als Basis zur Weiterentwicklung der Inzisionen mit dem Femtosekundenlaser dienen.

Unter den Plattformen für FLACS ist der Z8 im Gegensatz zu anderen Laserplattformen in der Lage, die Schnitte weit peripherer anzulegen, weswegen Z8-Chirurgen die FLACS inklusive der Inzisionen durchführen, wo bei anderen FLACS manuell geschnitten wird. Hinsichtlich dessen ist eine Analyse der Schnittqualität von Femtosekundenlasern zur Weiterentwicklung dieses Tools bedeutsam und unsere Daten widersprechen dem bisherigen negativen Tenor

qualitativ unzureichender Femtosekundenlaser-assistierter Schnitte. Eine gute Schnittdurchgängigkeit mit glatten Wundrändern ist essenziell für eine bestmögliche Wundheilung und ein zufriedenstellendes refraktives Ergebnis. Man könnte nun argumentieren, dass im Falle manueller Inzisionen das Problem der Schnittdurchgängigkeit nicht bestehe, da die Hornhaut regelrecht durchstoßen wird. Genau dies stellt aber laut Grewal und Kollegen ein zentrales Problem bei der Wundheilung und dem visuellen Ergebnis dar. Durch das Durchstoßen der Kornea mithilfe der Phakolanzie wird die Descemet-Membran vom Stroma abgehoben und ein kleiner Spalt entsteht. Die Wundränder können nicht mehr nahtlos adaptieren und es kommt eher zu einer Spalt- oder Saumbildung. Folgen können Endophthalmitis, höhergradige Aberrationen und Astigmatismus sein. Der Femtosekundenlaser durchtrennt das Gewebe durch kleine Kavitationsblasen, die eine Spaltung des Gewebes verursachen (Titiyal et al., 2018, Grewal and Basti, 2014). Zeigen sich die Femtosekundenlaser-Schnitte als durchgängig mit Brücken, sind sie stumpf zu eröffnen. Undurchgängige Schnitte führen aufgrund des manuellen Nachschnitts zu einem erhöhten Risiko für Endothelklaffung, Saumbildung oder Descemet-Membran-Ablösung. Dieser Aspekt unterstreicht die Bedeutung unserer Arbeit als erste Durchgängigkeitsanalyse von Femtosekundenlaser-assistierten Clear-Corneal-Incisions. Sie liefert wertvolle Daten zum Umgang mit dem FEMTO LDV Z8, sowie zur Optimierung der Präzision als auch Reproduzierbarkeit der Ergebnisse als die klaren Vorteile der laserassistierten Kataraktchirurgie. Mit einer bestmöglichen Detektionsarbeit des Lasers wäre es möglich, diese Parameter noch genauer auf die spezifischen Bedürfnisse eines jeden Patienten anzupassen. Diese optimierten, automatisierten Schnittplanungen des Lasers könnten die Chirurgie noch effizienter und präziser machen. Anpassungen aufgrund falscher Detektion benötigen Zeit, welche durch eine solche Optimierung eingespart werden könnte.

Nicht nur die Lokalisation, Konfiguration, Durchgängigkeit und Suffizienz der Schnitte macht die Sicherheit einer Kataraktoperation aus, indem sie die Risiken für Endothelklaffung, Saumbildung, Descemet-Membran-Ablösung und Endophthalmitis reduzieren. Auch der chirurgisch induzierte Astigmatismus (SIA)

durch FLACS spielt hierbei eine erhebliche Rolle und stellt eine Limitation dieser Arbeit dar. Der SIA kann zum einen den Unterschied zwischen menschlicher Hand und Maschine veranschaulichen, zum anderen aber auch darstellen, welchen nennenswerten Einfluss die Schnittparameter auf das refraktive Ergebnis haben.

Es ist anzunehmen, dass in naher Zukunft, der Erfolg der laserassistierten Kataraktchirurgie durch Anpassung der Inzisionsparameter und Weiterentwicklung der Planungstechnik zunehmen wird. Es könnte eine komplett individuelle Kataraktchirurgie, angepasst an das jeweilige Auge, möglich werden, indem noch spezifischere Daten aus der präoperativen Diagnostik, wie beispielweise OCT-basierte Messungen, mit einfließen. So könnten intraoperative Messungen der intrastromale Struktur der Kornea im Bereich des Limbus (Dichtemessungen) zur individuellen Anpassung der notwendigen Laserenergie hinzugezogen werden.

Jedoch sollte das refraktive Ergebnis, das den wichtigsten Aspekt für die Zufriedenheit des Patienten darstellt, im Vergleich zwischen alt bewährter und neuer Methode, nicht außer Acht gelassen werden. Denn ändert sich das refraktive Ergebnis nicht, stellt sich die Frage, wie sinnvoll es ist, ein schon optimales Ergebnis manueller Chirurgie noch mithilfe eines Lasers verbessern zu wollen, wenn es im Endeffekt keinen klinischen Vorteil bringt.

Es ist jedoch antiquiert, die Methoden rein nach Visusergebnis zu beurteilen. Viel mehr müssen weitere Faktoren wie das Kontrastsehen, die IOL-Denzentrierung oder Abbildungsfehler höherer Ordnung mit hinzugezogen werden um den Unterschied zwischen lasergesteuerter Chirurgie und konventionell manueller Kataraktchirurgie herauszufinden.

Hinzu kommt der Aspekt der Wirtschaftlichkeit. Neue Lasertechnologien zeigen zwar viele Vorzüge auf, sind in ihrer Finanzierung und Wartung jedoch meist sehr kostspielig und können nicht von jedem Budget bezahlt werden. Kosten und Nutzen müssen daher genau abgewägt werden.

Unverkennbar bleibt, dass der Femtosekundenlaser viele Vorteile in die Kataraktchirurgie mit einbringen kann, die bisher noch nicht vollends

ausgeschöpft werden. Seine Schnitte erweisen sich als fehlerarm und vorhersagbarer gegenüber der manuellen Kataraktchirurgie. Hier liegt ein großes Potenzial, die Kataraktoperation berechenbarer und spezifischer zu gestalten, um auf die individuellen Gegebenheiten eines jeden Patienten reagieren und eingehen zu können.

5 Zusammenfassung

Zum ersten Mal seit Einführung des Femtosekundenlasers in die Kataraktchirurgie erfolgte eine Analyse der Detektion und Suffizienz der kornealen Inzisionen des Ziemer LDV Z8.

Die konventionelle Kataraktchirurgie wurde über Jahrzehnte hinweg weiterentwickelt und optimiert, ihre Ergebnisse sind durchweg zufriedenstellend und ihre Effizienz mit einer Eingriffsdauer von 15 Minuten sehr hoch. Und doch konnte die Laserchirurgie im Rahmen der Kataraktoperationen ebenbürtige Ergebnisse erzielen und sich bereits nach kürzester Zeit etablieren. Sie übernimmt wichtige Schritte der Kataraktchirurgie, wie die Kapsulotomie und Fragmentierung der Linse und führt bereits so zu einem deutlich reproduzierbareren und präziseren Eingriff. Trotzdem nutzen viele FLACS-User noch nicht alle Features, die der Femtosekundenlaser mit sich bringt, wie beispielsweise das lasergeführte Anlegen von Clear Corneal Incisions. Hierfür konnten wir wichtige und befürwortende Daten liefern. Bei der Analyse der Durchgängigkeit der Clear Corneal Incisions konnten wir eine Durchgängigkeitsrate von über 95% in jeglicher Schnittposition, trotz verbesserungswürdiger Detektionsarbeit des Lasers, zeigen. Auch unter schwierigen Gegebenheiten, wie ausgeprägtem Randschlingennetz oder eines Arcus lipoides, war der FEMTO LDV Z8 imstande eine gute Schnittqualität zu erzielen. Noch bessere Ergebnisse wären durch Hochregulieren der Laserenergie bei ausgedehnter limbaler Vaskularisation möglich. Dies ist ein großer Zugewinn für die Sicherheit der Methode, denn keine Chirurgenhand ist zu einhundert Prozent „ruhig“, Schnittgröße und -winkel variieren.

Genau festgelegte Parameter, wie Eintrittswinkel, Schnittgröße, Schnittebenen und Schnittenergie, können in Zukunft optimal und individuell auf die Gegebenheiten eines jeden Patienten angepasst werden, eventuell unter Einbeziehen intraoperativer bildgebender Verfahren, wie das OCT. Somit wird auch der SIA zu einer kalkulierbaren Größe, die man zur Ergebnisoptimierung einsetzen kann. Auch bieten präzise und minimalistische Schnitte einen

möglichst stabilen Kapselsack, der optimalerer Positionierungen der IOL, als auch eventuell die Tür zum „lens refilling“ öffnet.

Insgesamt bilden die Femtosekundenlaser-assistierte Inzisionen einen wichtigen Baustein in der modernen Kataraktchirurgie, haben sie doch den Vorteil durch weiterführende Untersuchungen und Messungen zu störfaktorfreien und individualisierbaren Tools zu werden.

6 Literaturverzeichnis

- ABDEL-LATIF, A. A. 1991. Release and effects of prostaglandins in ocular tissues. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 44, 71-82.
- ABELL, R. G., KERR, N. M., HOWIE, A. R., MUSTAFFA KAMAL, M. A., ALLEN, P. L. & VOTE, B. J. 2014. Effect of femtosecond laser-assisted cataract surgery on the corneal endothelium. *J Cataract Refract Surg*, 40, 1777-83.
- ABELL, R. G., KERR, N. M. & VOTE, B. J. 2013. Toward zero effective phacoemulsification time using femtosecond laser pretreatment. *Ophthalmology*, 120, 942-8.
- ABOUZEID, H. & FERRINI, W. 2014. Femtosecond-laser assisted cataract surgery: a review. *Acta Ophthalmol*, 92, 597-603.
- ARBISSER, L. B., SCHULTZ, T. & DICK, H. B. 2013. Central dimple-down maneuver for consistent continuous femtosecond laser capsulotomy. *J Cataract Refract Surg*, 39, 1796-7.
- AUGUSTIN, A. J. 2001. Glaukom. *Augenheilkunde*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- AWASTHI, N., GUO, S. & WAGNER, B. J. 2009. Posterior capsular opacification: a problem reduced but not yet eradicated. *Arch Ophthalmol*, 127, 555-62.
- BARRAQUER, J. & RUTLLÁN, J. 1964. Alpha-Chymotrypsin in Cataract Surgery. *Postgraduate Medicine*, 35, 57-62.
- BARRY, P., SEAL, D. V., GETTINBY, G., LEES, F., PETERSON, M., REVIE, C. W. & GROUP, E. E. S. 2006. ESCRS study of prophylaxis of postoperative endophthalmitis after cataract surgery: Preliminary report of principal results from a European multicenter study. *J Cataract Refract Surg*, 32, 407-10.
- BELL, C. M., HATCH, W. V., CERNAT, G. & URBACH, D. R. 2007. Surgeon volumes and selected patient outcomes in cataract surgery: a population-based analysis. *Ophthalmology*, 114, 405-10.
- BODEN, K. T., SCHLOSSER, R., REIPEN, L., SEITZ, B., JANUSCHOWSKI, K., SZURMAN, P., WAKILI, P., JULICH-HAERTEL, H. & RICKMANN, A. 2021. The impact of limbus detection, arcus lipoides and limbal vessels on the primary patency of clear cornea incisions in femtosecond laser-assisted cataract surgery. *Acta Ophthalmol*, 99, e943-e948.
- BODEN, K. T. & SZURMAN, P. 2020. [Current value of femtosecond laser-assisted cataract surgery]. *Ophthalmologe*, 117, 405-414.
- CALLADINE, D. & PACKARD, R. 2007. Clear corneal incision architecture in the immediate postoperative period evaluated using optical coherence tomography. *J Cataract Refract Surg*, 33, 1429-35.
- CAMPBELL, R. J., EL-DEFRAWY, S. R., GILL, S. S., WHITEHEAD, M., CAMPBELL, E. L. P., HOOPER, P. L., BELL, C. M. & TEN HOVE, M. W. 2021. Surgical Outcomes among Focused versus Diversified Cataract Surgeons. *Ophthalmology*, 128, 827-834.

- CARIFI, G., MILLER, M. H., PITSAS, C., ZYGOURA, V., DESHMUKH, R. R., KOPSACHILIS, N. & MAURINO, V. 2015. Complications and outcomes of phacoemulsification cataract surgery complicated by anterior capsule tear. *Am J Ophthalmol*, 159, 463-9.
- CHAN, E., MAHROO, O. A. & SPALTON, D. J. 2010. Complications of cataract surgery. *Clin Exp Optom*, 93, 379-89.
- CHAURASIA, S. S., LUENGO GIMENO, F., TAN, K., YU, S., TAN, D. T., BEUERMAN, R. W. & MEHTA, J. S. 2010. In vivo real-time intraocular pressure variations during LASIK flap creation. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 51, 4641-5.
- CONRAD-HENGERER, I., DICK, H. B., SCHULTZ, T. & HENGERER, F. H. 2014. Femtosecond laser-assisted capsulotomy after penetrating injury of the cornea and lens capsule. *J Cataract Refract Surg*, 40, 153-6.
- CONRAD-HENGERER, I., HENGERER, F. H., SCHULTZ, T. & DICK, H. B. 2012a. Effect of femtosecond laser fragmentation of the nucleus with different softening grid sizes on effective phaco time in cataract surgery. *J Cataract Refract Surg*, 38, 1888-94.
- CONRAD-HENGERER, I., HENGERER, F. H., SCHULTZ, T. & DICK, H. B. 2012b. Effect of femtosecond laser fragmentation on effective phacoemulsification time in cataract surgery. *J Refract Surg*, 28, 879-83.
- COOPER, B. A., HOLEKAMP, N. M., BOHIGIAN, G. & THOMPSON, P. A. 2003. Case-control study of endophthalmitis after cataract surgery comparing scleral tunnel and clear corneal wounds. *Am J Ophthalmol*, 136, 300-5.
- COX, J. T., SUBBURAMAN, G. B., MUNOZ, B., FRIEDMAN, D. S. & RAVINDRAN, R. D. 2019. Visual Acuity Outcomes after Cataract Surgery: High-Volume versus Low-Volume Surgeons. *Ophthalmology*, 126, 1480-1489.
- DANYSH, B. P. & DUNCAN, M. K. 2009. The lens capsule. *Exp Eye Res*, 88, 151-64.
- DAVIS, G. 2016. The Evolution of Cataract Surgery. *Mo Med*, 113, 58-62.
- DEWEY, S., BEIKO, G., BRAGA-MELE, R., NIXON, D. R., RAVIV, T., ROSENTHAL, K., ASCRS CATARACT CLINICAL COMMITTEE, I. & SUBCOMMITTEE, I. O. 2014. Microincisions in cataract surgery. *J Cataract Refract Surg*, 40, 1549-57.
- DICK, H. B., KOHNEN, T., JACOBI, F. K. & JACOBI, K. W. 1996. Long-term endothelial cell loss following phacoemulsification through a temporal clear corneal incision. *J Cataract Refract Surg*, 22, 63-71.
- DICK, H. B., SCHELENZ, D. & SCHULTZ, T. 2015. Femtosecond laser-assisted pediatric cataract surgery: Bochum formula. *J Cataract Refract Surg*, 41, 821-6.
- DICK, H. B. & SCHULTZ, T. 2013. Femtosecond laser-assisted cataract surgery in infants. *J Cataract Refract Surg*, 39, 665-8.
- EBNER, M., MARIACHER, S., JANUSCHOWSKI, K., BODEN, K., SEUTHE, A. M., SZURMAN, P. & BODEN, K. T. 2017. Comparison of intraocular pressure during the application of a liquid patient interface (FEMTO LDV Z8) for femtosecond laser-assisted cataract surgery using two different vacuum levels. *Br J Ophthalmol*, 101, 1138-1142.

- ENDOPHTHALMITIS-VITRECTOMY-STUDY-GROUP 1995. Results of the Endophthalmitis Vitrectomy Study. A randomized trial of immediate vitrectomy and of intravenous antibiotics for the treatment of postoperative bacterial endophthalmitis. *Arch Ophthalmol*, 113, 1479-1496.
- EPSTEIN, D. L. 1982. Diagnosis and management of lens-induced glaucoma. *Ophthalmology*, 89, 227-30.
- ERNEST, P. H., LAVERY, K. T. & KIESSLING, L. A. 1994. Relative strength of scleral corneal and clear corneal incisions constructed in cadaver eyes. *J Cataract Refract Surg*, 20, 626-9.
- FINE, I. H., HOFFMAN, R. S. & PACKER, M. 2007. Profile of clear corneal cataract incisions demonstrated by ocular coherence tomography. *J Cataract Refract Surg*, 33, 94-7.
- FISUS, A. D. & FINDL, O. 2020. Capsular fibrosis: a review of prevention methods and management. *Eye (Lond)*, 34, 256-262.
- FRIEDMAN, N. J., PALANKER, D. V., SCHUELE, G., ANDERSEN, D., MARCELLINO, G., SEIBEL, B. S., BATLLE, J., FELIZ, R., TALAMO, J. H., BLUMENKRANZ, M. S. & CULBERTSON, W. W. 2011. Femtosecond laser capsulotomy. *J Cataract Refract Surg*, 37, 1189-98.
- GEKELER, K. & GEKELER, F. 2015. Sekundäre Linsenimplantation. *Klin Monbl Augenheilkd*, 232, 1003-1022.
- GIMBEL, H. V., SUN, R., FERENSOWICZ, M., ANDERSON PENNO, E. & KAMAL, A. 2001. Intraoperative management of posterior capsule tears in phacoemulsification and intraocular lens implantation. *Ophthalmology*, 108, 2186-9; discussion 2190-2.
- GREHN, F. 2012. *Augenheilkunde*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- GREWAL, D. S. & BASTI, S. 2014. Comparison of morphologic features of clear corneal incisions created with a femtosecond laser or a keratome. *J Cataract Refract Surg*, 40, 521-30.
- GRZYBOWSKI, A. & ASCASO, F. J. 2014. Sushruta in 600 B.C. introduced extraocular expulsion of lens material. *Acta Ophthalmol*, 92, 194-7.
- HAYASHI, K., HAYASHI, H., NAKAO, F. & HAYASHI, F. 1996. Risk factors for corneal endothelial injury during phacoemulsification. *J Cataract Refract Surg*, 22, 1079-84.
- HEJTMANCIK, J. F., RIAZUDDIN, S. A., MCGREAL, R., LIU, W., CVEKL, A. & SHIELS, A. 2015. Lens Biology and Biochemistry. *Prog Mol Biol Transl Sci*, 134, 169-201.
- HERNANDEZ-VERDEJO, J. L., TEUS, M. A., ROMAN, J. M. & BOLIVAR, G. 2007. Porcine model to compare real-time intraocular pressure during LASIK with a mechanical microkeratome and femtosecond laser. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 48, 68-72.
- HOLZER, M. P., RABSILBER, T. M. & AUFFARTH, G. U. 2006. Femtosecond laser-assisted corneal flap cuts: morphology, accuracy, and histopathology. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 47, 2828-31.
- ISSA, A. & AL HASSANY, U. 2011. Femtosecond laser flap parameters and visual outcomes in laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg*, 37, 665-74.

- JOHANSSON, B., LUNDSTROM, M., MONTAN, P., STENEVI, U. & BEHNDIG, A. 2009. Capsule complication during cataract surgery: Long-term outcomes: Swedish Capsule Rupture Study Group report 3. *J Cataract Refract Surg*, 35, 1694-8.
- JUHASZ, T., LOESEL, F. H., KURTZ, R. M., HORVATH, C., BILLE, J. F. & MOUROU, G. 1999. Corneal refractive surgery with femtosecond lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 5, 902-910.
- KAUR, M., TITIYAL, J. S., SURVE, A., FALERA, R. & VERMA, M. 2018. Effect of Lens Fragmentation Patterns on Phacoemulsification Parameters and Postoperative Inflammation in Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery. *Curr Eye Res*, 43, 1228-1232.
- KELMAN, C. D. 1967. Phaco-Emulsification and Aspiration. *American Journal of Ophthalmology*, 64, 23-35.
- KERR, N. M., ABELL, R. G., VOTE, B. J. & TOH, T. 2013. Intraocular pressure during femtosecond laser pretreatment of cataract. *J Cataract Refract Surg*, 39, 339-42.
- KEZIRIAN, G. M. & STONECIPHER, K. G. 2004. Comparison of the IntraLase femtosecond laser and mechanical keratomes for laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg*, 30, 804-11.
- KOHNEN, T. 2013. Interface for femtosecond laser-assisted lens surgery. *J Cataract Refract Surg*, 39, 491-2.
- KOHNEN, T., LOFFLER, F., HERZOG, M., PETERMANN, K. & BOHM, M. 2019. Tomographic analysis of anterior and posterior surgically induced astigmatism after 2.2 mm temporal clear corneal incisions in femtosecond laser-assisted cataract surgery. *J Cataract Refract Surg*, 45, 1602-1611.
- KRANITZ, K., MIHALTZ, K., SANDOR, G. L., TAKACS, A., KNORZ, M. C. & NAGY, Z. Z. 2012. Intraocular lens tilt and decentration measured by Scheimpflug camera following manual or femtosecond laser-created continuous circular capsulotomy. *J Refract Surg*, 28, 259-63.
- KRANITZ, K., TAKACS, A., MIHALTZ, K., KOVACS, I., KNORZ, M. C. & NAGY, Z. Z. 2011. Femtosecond laser capsulotomy and manual continuous curvilinear capsulorrhexis parameters and their effects on intraocular lens centration. *J Refract Surg*, 27, 558-63.
- KRASNOV, M. M. 1975. Laser-phakopuncture in the treatment of soft cataracts. *Br J Ophthalmol*, 59, 96-8.
- LANG, G. K. 2019. Operationsmethoden. In: LANG, G. K., ESSER, J., GAREIS, O., LANG, G. E., LANG, S. J., SPRAUL, C. W. & WAGNER, P. (eds.) *Augenheilkunde*. 6., überarbeitete Auflage ed.: Georg Thieme Verlag.
- LEAMING, D. V. 2003. Practice styles and preferences of ASCRS members--2002 survey. *J Cataract Refract Surg*, 29, 1412-20.
- LI, A., SHAO, J., GANS, R., BENA, J. & GOSHE, J. 2019. Postoperative Endophthalmitis Before and After Preferred Utilization of Prophylactic Intracameral Antibiotics for Phacoemulsification Cataract Surgeries at Cole Eye Institute. *Eye Contact Lens*, 45, 306-309.
- LOESEL, F. H., NIEMZ, M. H., BILLE, J. F. & JUHASZ, T. 1996. Laser-induced optical breakdown on hard and soft tissues and its dependence on the

- pulse duration: experiment and model. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 32, 1717-1722.
- LUBATSCHOWSKI, H., KRUEGER, R. R. & SMADJA, D. 2013. Femtosecond Laser Fundamentals. In: KRUEGER, R. R., TALAMO, J. H. & LINDSTROM, R. L. (eds.) *Textbook of Refractive Laser Assisted Cataract Surgery (ReLACS)*. New York, NY: Springer New York.
- LYLES, G. W., COHEN, K. L. & LAM, D. 2011. OCT-documented incision features and natural history of clear corneal incisions used for bimanual microincision cataract surgery. *Cornea*, 30, 681-6.
- MARIACHER, S., EBNER, M., SEUTHE, A. M., JANUSCHOWSKI, K., IVANESCU, C., OPITZ, N., SZURMAN, P. & BODEN, K. T. 2016. Femtosecond laser-assisted cataract surgery: First clinical results with special regard to central corneal thickness, endothelial cell count, and aqueous flare levels. *J Cataract Refract Surg*, 42, 1151-6.
- MASKET, S. & BELANI, S. 2007. Proper wound construction to prevent short-term ocular hypotony after clear corneal incision cataract surgery. *J Cataract Refract Surg*, 33, 383-6.
- MASKET, S., SARAYBA, M., IGNACIO, T. & FRAM, N. 2010. Femtosecond laser-assisted cataract incisions: architectural stability and reproducibility. *J Cataract Refract Surg*, 36, 1048-9.
- MASTROPASQUA, L., TOTO, L., MASTROPASQUA, A., VECCHIARINO, L., MASTROPASQUA, R., PEDROTTI, E. & DI NICOLA, M. 2014. Femtosecond laser versus manual clear corneal incision in cataract surgery. *J Refract Surg*, 30, 27-33.
- MAXWELL, D. P., JR., DIAMOND, J. G. & MAY, D. R. 1994. Surgical wound defects associated with endophthalmitis. *Ophthalmic Surg*, 25, 157-61.
- MCDONNELL, P. J., TABAN, M., SARAYBA, M., RAO, B., ZHANG, J., SCHIFFMAN, R. & CHEN, Z. 2003. Dynamic morphology of clear corneal cataract incisions. *Ophthalmology*, 110, 2342-8.
- MENAPACE, R. M. & DICK, H. B. 2014. [Femtosecond laser in cataract surgery. A critical appraisal]. *Ophthalmology*, 111, 624-37.
- MONTES-MICO, R., RODRIGUEZ-GALIETERO, A. & ALIO, J. L. 2007. Femtosecond laser versus mechanical keratome LASIK for myopia. *Ophthalmology*, 114, 62-8.
- NAGAKI, Y., HAYASAKA, S., KADOI, C., MATSUMOTO, M., YANAGISAWA, S., WATANABE, K., WATANABE, K., HAYASAKA, Y., IKEDA, N., SATO, S., KATAOKA, Y., TOGASHI, M. & ABE, T. 2003. Bacterial endophthalmitis after small-incision cataract surgery. effect of incision placement and intraocular lens type. *J Cataract Refract Surg*, 29, 20-6.
- NAGY, Z., TAKACS, A., FILKORN, T. & SARAYBA, M. 2009. Initial clinical evaluation of an intraocular femtosecond laser in cataract surgery. *J Refract Surg*, 25, 1053-60.
- NAGY, Z. Z., KRANITZ, K., TAKACS, A. I., MIHALTZ, K., KOVACS, I. & KNORZ, M. C. 2011. Comparison of intraocular lens decentration parameters after femtosecond and manual capsulotomies. *J Refract Surg*, 27, 564-9.

- NIEVES-MORENO, M., ASOREY-GARCIA, A., SANTOS-BUESO, E. & GARCIA-SANCHEZ, J. 2015. [History of cataract surgery (I): from destruction to removal]. *Arch Soc Esp Ophthalmol*, 90, e3-5.
- NIKOSE, A. S., SAHA, D., LADDHA, P. M. & PATIL, M. 2018. Surgically induced astigmatism after phacoemulsification by temporal clear corneal and superior clear corneal approach: a comparison. *Clin Ophthalmol*, 12, 65-70.
- PAJIC, B., CVEJIC, Z. & PAJIC-EGGSPUEHLER, B. 2017. Cataract Surgery Performed by High Frequency LDV Z8 Femtosecond Laser: Safety, Efficacy, and Its Physical Properties. *Sensors (Basel)*, 17.
- PAJIC, B., VASTARDIS, I., GATZIOUFAS, Z. & PAJIC-EGGSPUEHLER, B. 2014. First experience with the new high-frequency femtosecond laser system (LDV Z8) for cataract surgery. *Clin Ophthalmol*, 8, 2485-9.
- PALANKER, D. V., BLUMENKRANZ, M. S., ANDERSEN, D., WILTBERGER, M., MARCELLINO, G., GOODING, P., ANGELEY, D., SCHUELE, G., WOODLEY, B., SIMONEAU, M., FRIEDMAN, N. J., SEIBEL, B., BATLLE, J., FELIZ, R., TALAMO, J. & CULBERTSON, W. 2010. Femtosecond laser-assisted cataract surgery with integrated optical coherence tomography. *Sci Transl Med*, 2, 58ra85.
- PFAU, N., KERN, A., WOLFRAM, C., KALCKLÖSCH, M. & PRÜTZ, F. 2017. GBE-Themenheft Blindheit und Sehbehinderung. Gesundheitsberichterstattung des Bundes. *In: GESUNDHEIT*, B. F. R. (ed.). Berlin: Robert Koch-Institut.
- PHAM, D.-T. & PLEYER, U. 2017. Endophthalmitis nach Kataraktchirurgie. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*, 234, 617-627.
- POPOVIC, M., CAMPOS-MOLLER, X., SCHLENKER, M. B. & AHMED, II 2016. Efficacy and Safety of Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery Compared with Manual Cataract Surgery: A Meta-Analysis of 14 567 Eyes. *Ophthalmology*, 123, 2113-26.
- RATKAY-TRAUB, I., FERINCZ, I. E., JUHASZ, T., KURTZ, R. M. & KRUEGER, R. R. 2003. First clinical results with the femtosecond neodymium-glass laser in refractive surgery. *J Refract Surg*, 19, 94-103.
- RAVALICO, G., TOGNETTO, D., PALOMBA, M., BUSATTO, P. & BACCARA, F. 1996. Capsulorhexis size and posterior capsule opacification. *J Cataract Refract Surg*, 22, 98-103.
- REDDY, K. P., KANDULLA, J. & AUFFARTH, G. U. 2013. Effectiveness and safety of femtosecond laser-assisted lens fragmentation and anterior capsulotomy versus the manual technique in cataract surgery. *J Cataract Refract Surg*, 39, 1297-306.
- RIAU, A. K., LIU, Y. C., LWIN, N. C., ANG, H. P., TAN, N. Y., YAM, G. H., TAN, D. T. & MEHTA, J. S. 2014. Comparative study of nJ- and muJ-energy level femtosecond lasers: evaluation of flap adhesion strength, stromal bed quality, and tissue responses. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 55, 3186-94.
- RICHARD, J., HOFFART, L., CHAVANE, F., RIDINGS, B. & CONRATH, J. 2008. Corneal endothelial cell loss after cataract extraction by using ultrasound phacoemulsification versus a fluid-based system. *Cornea*, 27, 17-21.

- ROBERTS, T. V., LAWLESS, M., BALI, S. J., HODGE, C. & SUTTON, G. 2013. Surgical outcomes and safety of femtosecond laser cataract surgery: a prospective study of 1500 consecutive cases. *Ophthalmology*, 120, 227-33.
- RUCKER, C. W. 1965. Cataract: A Historical Perspective. *Invest Ophthalmol*, 4, 377-83.
- SANDERS, D. R., HIGGINBOTHAM, R. W., OPATOWSKY, I. E. & CONFINO, J. 2006. Hyperopic shift in refraction associated with implantation of the single-piece Collamer intraocular lens. *J Cataract Refract Surg*, 32, 2110-2.
- SCHULTZ, T. & DICK, H. B. 2014. Laser-assisted mini-capsulotomy: a new technique for intumescent white cataracts. *J Refract Surg*, 30, 742-5.
- SCHULTZ, T., EZEANOSIKE, E. & DICK, H. B. 2013. Femtosecond laser-assisted cataract surgery in pediatric Marfan syndrome. *J Refract Surg*, 29, 650-2.
- SCHULTZ, T., JOACHIM, S. C., NORISTANI, R., SCOTT, W. & DICK, H. B. 2017. Greater vertical spot spacing to improve femtosecond laser capsulotomy quality. *J Cataract Refract Surg*, 43, 353-357.
- SCHULTZ, T., JOACHIM, S. C., STELLBOGEN, M. & DICK, H. B. 2015. Prostaglandin release during femtosecond laser-assisted cataract surgery: main inducer. *J Refract Surg*, 31, 78-81.
- SCHWARZENBACHER, L., SCHARTMULLER, D., LEYDOLT, C. & MENAPACE, R. 2020. Intraindividual comparison of cytokine and prostaglandin levels with and without low-energy, high-frequency femtosecond laser cataract pretreatment after single-dose topical NSAID application. *J Cataract Refract Surg*, 46, 1086-1091.
- SHAJARI, M., KHALIL, S., MAYER, W. J., AL-KHATEEB, G., BOHM, M., PETERMANN, K., HEMKEPLER, E. & KOHNEN, T. 2017. Comparison of 2 laser fragmentation patterns used in femtosecond laser-assisted cataract surgery. *J Cataract Refract Surg*, 43, 1571-1574.
- SHARP, S. 1753. XXIV. A description of a new method of opening the cornea, in order to extract the crystalline humour; by Mr. Samuel Sharp, Surgeon to Guy's Hospital, and FR S. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 161-163.
- SMITH, S. R., DAYNES, T., HINCKLEY, M., WALLIN, T. R. & OLSON, R. J. 2004. The effect of lens edge design versus anterior capsule overlap on posterior capsule opacification. *Am J Ophthalmol*, 138, 521-6.
- STEINMETZ, J. D., BOURNE, R. R. A., BRIANT, P. S., FLAXMAN, S. R., TAYLOR, H. R. B., JONAS, J. B., ABDOLI, A. A., ABRHA, W. A., ABUALHASAN, A., ABU-GHARBIEH, E. G., ADAL, T. G., AFSHIN, A., AHMADIEH, H., ALEMAYEHU, W., ALEMZADEH, S. A. S., ALFAAR, A. S., ALIPOUR, V., ANDROUDI, S., ARABLOO, J., ARDITI, A. B., AREGAWI, B. B., ARRIGO, A., ASHBAUGH, C., ASHRAFI, E. D., ATNAFU, D. D., BAGLI, E. A., BAIG, A. A. W., BÄRNIGHAUSEN, T. W., BATTAGLIA PARODI, M., BEHESHTI, M. S., BHAGAVATHULA, A. S., BHARDWAJ, N., BHARDWAJ, P., BHATTACHARYYA, K., BIJANI, A., BIKBOV, M., BOTTONI, M., BRAITHWAITE, T. M., BRON, A. M., BURUGINA NAGARAJA, S. A., BUTT, Z. A., CAETANO DOS SANTOS,

- F. L. L., CARNEIRO, V. L. J., CASSON, R. J., CHENG, C.-Y. J., CHOI, J.-Y. J., CHU, D.-T., CICINELLI, M. V. M., COELHO, J. M. G., CONGDON, N. G. A., COUTO, R. A. A., CROMWELL, E. A. M., DAHLAWI, S. M., DAI, X., DANA, R., DANDONA, L., DANDONA, R. A., DEL MONTE, M. A., DERBEW MOLLA, M., DERVENIS, N. A., DESTA, A. A. P., DEVA, J. P., DIAZ, D., DJALALINIA, S. E., EHRLICH, J. R., ELAYEDATH, R. R., ELHABASHY, H. R. B., ELLWEIN, L. B., EMAMIAN, M. H., ESKANDARIEH, S., FARZAD FAR, F. G., FERNANDES, A. G., FISCHER, F. S., FRIEDMAN, D. S. M., FURTADO, J. M., GAIDHANE, S., GAZZARD, G., GEBREMICHAEL, B., GEORGE, R., GHASHGHAE, A., GILANI, S. A., GOLECHHA, M., HAMIDI, S. R., HAMMOND, B. R. R., HARTNETT, M. E. R. K., HARTONO, R. K., HASHI, A. I., HAY, S. I., HAYAT, K., HEIDARI, G., HO, H. C., HOLLA, R., HOUSEH, M. J., HUANG, J. J. E., IBITOYE, S. E. M., ILIC, I. M. D., ILIC, M. D. D., INGRAM, A. D. N., IRVANI, S. S. N., ISLAM, S. M. S., et al. 2021. Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years, and prevalence of avoidable blindness in relation to VISION 2020: the Right to Sight: an analysis for the Global Burden of Disease Study. *The Lancet Global Health*, 9, e144-e160.
- TABAN, M., BEHRENS, A., NEWCOMB, R. L., NOBE, M. Y., SAEDI, G., SWEET, P. M. & MCDONNELL, P. J. 2005. Acute endophthalmitis following cataract surgery: a systematic review of the literature. *Arch Ophthalmol*, 123, 613-20.
- TAKACS, A. I., KOVACS, I., MIHALTZ, K., FILKORN, T., KNORZ, M. C. & NAGY, Z. Z. 2012. Central corneal volume and endothelial cell count following femtosecond laser-assisted refractive cataract surgery compared to conventional phacoemulsification. *J Refract Surg*, 28, 387-91.
- TALAMO, J. H., GOODING, P., ANGELEY, D., CULBERTSON, W. W., SCHUELE, G., ANDERSEN, D., MARCELLINO, G., ESSOCK-BURNS, E., BATLLE, J., FELIZ, R., FRIEDMAN, N. J. & PALANKER, D. 2013. Optical patient interface in femtosecond laser-assisted cataract surgery: contact corneal applanation versus liquid immersion. *J Cataract Refract Surg*, 39, 501-10.
- TARAVELLA, M. J., MEGHPARA, B., FRANK, G., GENSHEIMER, W. & DAVIDSON, R. 2016. Femtosecond laser-assisted cataract surgery in complex cases. *J Cataract Refract Surg*, 42, 813-6.
- TESHIGAWARA, T., MEGURO, A., SANJO, S., HATA, S. & MIZUKI, N. 2019. The advantages of femtosecond laser-assisted cataract surgery for zonulopathy. *Int Med Case Rep J*, 12, 109-116.
- TITIYAL, J. S., KAUR, M., RAMESH, P., SHAH, P., FALERA, R., BAGESHWAR, L. M. S., KINKAR, A. & SHARMA, N. 2018. Impact of Clear Corneal Incision Morphology on Incision-Site Descemet Membrane Detachment in Conventional and Femtosecond Laser-Assisted Phacoemulsification. *Curr Eye Res*, 43, 293-299.
- TRAUTNER, C., HAASTERT, B., RICHTER, B., BERGER, M. & GIANI, G. 2003. Incidence of blindness in southern Germany due to glaucoma and degenerative conditions. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 44, 1031-4.

- TRIKHA, S., TURNBULL, A. M., MORRIS, R. J., ANDERSON, D. F. & HOSSAIN, P. 2013. The journey to femtosecond laser-assisted cataract surgery: new beginnings or a false dawn? *Eye (Lond)*, 27, 461-73.
- UY, H. S., SHAH, S. & PACKER, M. 2017. Comparison of Wound Sealability Between Femtosecond Laser-Constructed and Manual Clear Corneal Incisions in Patients Undergoing Cataract Surgery: A Pilot Study. *J Refract Surg*, 33, 744-748.
- VAN BUSKIRK, E. M. 1989. The anatomy of the limbus. *Eye (Lond)*, 3 (Pt 2), 101-8.
- VENTURA, A. C., WALTI, R. & BOHNKE, M. 2001. Corneal thickness and endothelial density before and after cataract surgery. *Br J Ophthalmol*, 85, 18-20.
- VON JAGOW, B. & KOHNEN, T. 2009. Corneal architecture of femtosecond laser and microkeratome flaps imaged by anterior segment optical coherence tomography. *J Cataract Refract Surg*, 35, 35-41.
- WALKOW, T., ANDERS, N. & KLEBE, S. 2000. Endothelial cell loss after phacoemulsification: relation to preoperative and intraoperative parameters. *J Cataract Refract Surg*, 26, 727-32.
- WANG, W., YAN, W., FOTIS, K., PRASAD, N. M., LANSINGH, V. C., TAYLOR, H. R., FINGER, R. P., FACCILOLO, D. & HE, M. 2016. Cataract Surgical Rate and Socioeconomics: A Global Study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 57, 5872-5881.
- WILLIAMS, G. P., GEORGE, B. L., WONG, Y. R., SEAH, X. Y., ANG, H. P., LOKE, M. K., TAY, S. C. & MEHTA, J. S. 2016. The effects of a low-energy, high frequency liquid optic interface femtosecond laser system on lens capsulotomy. *Sci Rep*, 6, 24352.
- ZUBERBUEHLER, B., HAEFLIGER, E., MENAPACE, R. & NEUHANN, T. 2008. *Kataraktchirurgie*, Heidelberg, Springer.

7 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Augenklinik Sulzbach, Knappschaftsklinikum Saar unter Betreuung von Prof. Dr. med Kai Januschowski durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. med Peter Szurman, Chefarzt der Augenklinik Sulzbach und Dr. med. Karl Thomas Boden, Leitender Oberarzt der Augenklinik Sulzbach.

Die Auswertungen wurden von mir eigenständig durchgeführt. Die operativen Eingriffe erfolgten durch Prof. Dr. med. Peter Szurman und Dr. med Karl Thomas Boden, deren Daten und Videomitschnitte mir zur Verfügung gestellt wurden.

Die statistische Auswertung erfolgte mithilfe von Rudolf Siegel, M.Sc. .

Ich versichere, das Manuskript selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den

Lena Reipen

8 Veröffentlichungen

Boden KT, Schlosser R, Reipen L, Seitz B, Januschowski K, Szurman P, Wakili P, Julich-Haertel H, Rickmann A. The impact of limbus detection, arcus lipoides and limbal vessels on the primary patency of clear cornea incisions in femtosecond laser-assisted cataract surgery. *Acta Ophthalmol.* 2021 Sep;99(6):e943-e948. doi: 10.1111/aos.14705. Epub 2021 Jan 27. PMID: 33502099.

9 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all den Menschen bedanken, die zum Gelingen meiner Doktorarbeit beigetragen haben.

Zunächst bedanke ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr. med. Kai Januschowski für die Annahme als Doktorandin in seiner Arbeitsgruppe, sowie das Überlassen des Themas dieser Dissertation.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr. med. Karl Boden für die unermüdliche, geduldige und außerordentliche Betreuung und Unterstützung. Trotz hoher Arbeitsbelastung nahm er sich stets Zeit für meine Fragen, Ideen und Anregungen und hatte damit einen entscheidenden Anteil am Abschluss der Arbeit.

Ein großes Dankeschön geht ebenfalls an Rosemarie Schlosser, die mir stets unterstützend und mit Rat und Tat zur Seite stand.

Abschließend danke ich meinen Geschwistern, Daniel und besonders meinen Eltern, denen diese Arbeit gewidmet ist. Danke für den dauerhaften Rückhalt, die bedingungslose Unterstützung und Geduld während meiner gesamten Ausbildung.

10 Lebenslauf