

Aus der Klinik für Augenheilkunde der Universität zu Lübeck

Direktor: Prof. Dr. med. S. Grisanti

**Kanaloplastik ab externo und Kanaloplastik ab interno mit ihren  
Modifikationen und Indikationen als drucksenkende Eingriffe  
beim Offenwinkelglaukom**

Inauguraldissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Universität zu Lübeck

- Aus der Sektion Medizin -

vorgelegt von

Michael W. Zimbelmann

aus Speyer

Lübeck 2021

1. Berichterstatterin: Frau Prof. Dr. med. Maya Müller  
2. Berichterstatter/in: Herr Prof. Dr. med. Paul Kremer

Tag der mündlichen Prüfung: 03.05.2022  
Zum Druck genehmigt Lübeck, den 03.05.2022

Promotionskommission der Sektion Medizin

„O eine edle Himmelsgabe ist das Licht des Auges-alle Wesen leben  
vom Lichte, jedes glückliche Geschöpf...“

aus Wilhelm Tell Teil I, 4. Satz  
Friedrich Schiller (1759 - 1805)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<u>1.1</u> Das Glaukom	1
<u>1.1.1</u> Definition	1
<u>1.1.2</u> Rolle des Augeninnendrucks und weitere Risikofaktoren	1
<u>1.1.3</u> Epidemiologie	2
<u>1.1.4</u> Glaukomformen	3
<u>1.2</u> Pathophysiologie des Offenwinkelglaukoms	3
<u>1.2.1</u> Entstehung und Zusammensetzung des Kammerwassers	4
<u>1.2.2</u> Kammerwasserabfluss	4
<u>1.2.3</u> Konventioneller Abflussweg	5
<u>1.2.3.1</u> Trabekelmaschenwerk	5
<u>1.2.3.2</u> Schlemm'scher Kanal	7
<u>1.2.3.3</u> Innenwandendothel des Schlemm'schen Kanals	8
<u>1.2.3.4</u> Kollektorkanäle und episklerales Venensystem	8
<u>1.2.3.5</u> Abflusswiderstand für das Kammerwasser	9
<u>1.3</u> Glaukomtherapie	9
<u>1.3.1</u> Medikamentöse Augeninnendrucksenkung	10
<u>1.3.2</u> Laserverfahren	10
<u>1.3.3</u> Glaukomchirurgie	11
<u>1.3.3.1</u> Penetrierende Glaukomchirurgie	11
<u>1.3.3.2</u> Nichtpenetrierende Glaukomchirurgie	12
<u>1.3.3.3</u> Kanaloplastik ab externo als nichtpenetrierendes OP-Verfahren	13
<u>1.3.3.4</u> Ab interno Glaukomeingriffe	14
<u>1.4</u> Fragestellung	18
<b>2. Material und Methoden</b>	<b>19</b>
<u>2.1</u> Patientenkollektiv	19
<u>2.2</u> Präoperative Daten und Daten aus den OP-Berichten	20

<u>2.3</u> Postoperative Daten	<b>22</b>
<u>2.4</u> Datenverarbeitung und statistische Auswertung	<b>24</b>
<u>2.5</u> Beschreibung der Operationsverfahren	<b>24</b>
<u>2.5.1</u> Kanaloplastik ab externo	<b>25</b>
<u>2.5.2</u> Kanaloplastik mit Stegmann Canal Expander (SCE)	<b>27</b>
<u>2.5.3</u> Kanaloplastik ab interno (AbiC)	<b>27</b>
<u>2.5.4</u> Gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomie	<b>29</b>
<b>3. Ergebnisse</b>	<b>30</b>
<u>3.1</u> Demographische Angaben	<b>30</b>
<u>3.2</u> Glaukomformen	<b>31</b>
<u>3.3</u> Gesichtsfelduntersuchung	<b>32</b>
<u>3.4</u> Antiglaukomatöse Voreingriffe	<b>33</b>
<u>3.5</u> Augenvorerkrankungen	<b>34</b>
<u>3.6</u> Kanaloplastik ab externo	<b>35</b>
<u>3.6.1</u> Augeninnendruckwerte im Verlauf	<b>35</b>
<u>3.6.2</u> Medikamentenbedarf	<b>37</b>
<u>3.6.3</u> Augeninnendrucksenkende Reoperationen und Laserungen	<b>38</b>
<u>3.6.4</u> Operationsnebenwirkungen und postoperative Besonderheiten/Komplikationen	<b>39</b>
<u>3.6.4.1</u> Operative Eingriffe aufgrund postoperativer Komplikationen	<b>40</b>
<u>3.6.5</u> Entwicklung der Sehschärfe	<b>41</b>
<u>3.6.6</u> Kanaloplastik ab externo mit/ohne Katarakt-Operation	<b>41</b>
<u>3.6.7</u> Kanaloplastik ab externo mit/ohne Perforation des Descemetfensters	<b>42</b>
<u>3.6.8</u> Kanaloplastik ab externo mit/ohne Cheese-wiring	<b>43</b>
<u>3.7</u> Kanaloplastik mit Stegmann Canal Expander	<b>44</b>
<u>3.7.1</u> Augeninnendruckwerte im Verlauf	<b>44</b>
<u>3.7.2</u> Medikamentenbedarf	<b>45</b>
<u>3.7.3</u> Postoperative Nebenwirkungen/Komplikationen und Reoperationen bei Therapieversagen	<b>46</b>
<u>3.7.4</u> Entwicklung der Sehschärfe	<b>47</b>

<u>3.8</u> Kanaloplastik ab interno	47
<u>3.8.1</u> Augeninnendruckwerte im Verlauf	47
<u>3.8.2</u> Medikamentenbedarf	49
<u>3.8.3</u> Postoperative Nebenwirkungen/Komplikationen und Reoperationen bei Therapieversagen	50
<u>3.8.4</u> Entwicklung der Sehschärfe	50
<u>3.9</u> Gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomie	51
<u>3.9.1</u> Augeninnendruckwerte im Verlauf	51
<u>3.9.2</u> Medikamentenbedarf	52
<u>3.9.3</u> Postoperative Nebenwirkungen/Komplikationen und Reoperationen bei Therapieversagen	53
<u>3.9.4</u> Entwicklung der Sehschärfe	54
<b>4. Diskussion</b>	<b>55</b>
<u>4.1</u> Kanaloplastik ab externo	55
<u>4.1.1</u> Augeninnendruck	55
<u>4.1.2</u> Medikamentenbedarf und Therapieversagen	58
<u>4.1.3</u> Operationsnebenwirkungen und postoperative Komplikationen	58
<u>4.1.4</u> Entwicklung der Sehschärfe	59
<u>4.1.5</u> Vergleich Kanaloplastik ab externo und Trabekulektomie	60
<u>4.2</u> Kanaloplastik mit Stegmann Canal Expander	61
<u>4.3</u> Kanaloplastik ab interno	63
<u>4.4</u> Gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomie	65
<u>4.5</u> Potentielle Störfaktoren	67
<u>4.5.1</u> Patientenkollektiv	67
<u>4.5.2</u> Präoperativer Augeninnendruck	67
<u>4.5.3</u> Weitere Störfaktoren	68
<u>4.6</u> Fazit und Ausblick	69
<b>5. Zusammenfassung</b>	<b>72</b>
<b>6. Literaturverzeichnis</b>	<b>73</b>
<b>7. Anhang</b>	<b>80</b>
<b>8. Danksagung</b>	<b>81</b>

**Abkürzungsverzeichnis**

Abb.	Abbildung
AbiC	Ab interno Canaloplasty (= Kanaloplastik ab interno)
AION	Anteriore ischämische Optikusneuropathie
ALT	Argonlasertrabekuloplastik
AMD	Altersbedingte Makuladegeneration
AT	Augentropfen
CPC	Zyklophotokoagulation
DMÖ	Diabetisches Makulaödem
ECM	Extrazelluläre Matrix
GATT	Gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomie
HH	Hornhaut
IE	Iridektomie
IOD	Intraokularer Druck
ITS	Intertrabecular Space
JCT	Juxtakanalikuläres Trabekelmaschenwerk
MD	Mittlere Defekttiefe bzw. Mean Defect
Med.	Medikamentenbedarf
MIGS	Minimally invasive Glaucoma Surgery bzw. Micro-invasive Glaucoma Surgery
ppV	Pars plana Vitrektomie
SA	Standardabweichung
SC	Schlemm'scher Kanal
SCE	Stegmann Canal Expander
SL	Schwalbe Linie
SLT	Selektive Lasertrabekuloplastik
SS	Sklerasporn
YAG-IT	Yttrium-Aluminium-Granat-Laser-Iridotomie
YAG-KT	Yttrium-Aluminium-Granat-Laser-Kapsulotomie
Z.n.	Zustand nach



# 1. Einleitung

## 1.1 Das Glaukom

### 1.1.1 Definition

Mit dem Begriff Glaukom wird eine heterogene Gruppe von Augenerkrankungen zusammengefasst, die eine multifaktorielle Ursache haben und deren gemeinsames Kennzeichen eine Optikusneuropathie darstellt, welche durch einen progressiven Untergang retinaler Ganglienzellen entsteht. Bei den Ganglienzellen handelt es sich um Nervenzellen, deren Zellkörper in den inneren Netzhautschichten liegen und deren Axone sich im Sehnerv vereinen. Ein Verlust dieser führt im Rahmen der Glaukomerkrankung zu einer typischen Aushöhlung des Sehnervenkopfes, was als Exkavation bezeichnet wird, sowie zu charakteristischen Ausfällen des Gesichtsfelds, die bis zur vollständigen Erblindung fortschreiten können.<sup>26,109</sup> Eine einheitliche Definition des Krankheitsbildes existiert bisher nicht.<sup>11,63</sup>

### 1.1.2 Rolle des Augeninnendrucks und weitere Risikofaktoren

Zwischen erhöhten Augeninnendruckwerten und dem Zelluntergang von Ganglienzellen besteht eine Korrelation.<sup>109</sup> Der Augeninnendruck in der erwachsenen Allgemeinbevölkerung ist annähernd normalverteilt und liegt im Mittel bei 15,5 mmHg mit einer Standardabweichung von ca. 3 mmHg. In der Literatur wird der Normbereich als doppelte Standardabweichung nach oben bzw. unten festgelegt, sodass sich ein Augeninnendruckbereich zwischen 10 und 21 mmHg ergibt.<sup>30</sup>

Ein erhöhter Augeninnendruck stellt den Hauptrisikofaktor für das Auftreten eines Glaukoms dar, trotzdem konnte in neueren Studien herausgestellt werden, dass bei 25-50% der Patienten mit einem diagnostizierten Glaukom der Augeninnendruck in Kontrollen stets unter 22 mmHg lag. Man spricht dann vom Normaldruckglaukom. Außerdem gibt es Patienten, deren Augeninnendruck längerfristig Werte von 21 mmHg überschreitet und trotzdem im Laufe des Lebens keine glaukomatösen Schäden entstehen. In diesen Fällen wird der Begriff okuläre Hypertension verwendet.<sup>109</sup> Die historische Definition eines Glaukoms, bei der ein Augeninnendruck oberhalb des Normbereichs als einziges definierendes Charakteristikum galt, greift somit zu kurz. Trotzdem bleibt eine Senkung des

Augeninnendrucks die einzige erwiesene Therapiestrategie im Rahmen einer Offenwinkelglaukomerkrankung.<sup>26,47,110</sup> In einer großangelegten Studie, dem „Early Manifest Glaucoma Trial“, konnte beispielsweise aufgezeigt werden, dass sich pro mmHg Augeninnendrucksenkung die Wahrscheinlichkeit des Fortschreitens von glaukomatösen Gesichtsfeldschäden um 10% verringert.<sup>47</sup> In aller Regel wird für Glaukompatienten ein Zieldruck festgelegt. Dieser stellt einen Augeninnendruckbereich dar, unter welchem ein Fortschreiten von Glaukomschäden nicht zu erwarten ist. Der Wert wird für jeden Patienten individuell festgelegt und hängt unter anderem von den bereits bestehenden glaukomatösen Schäden, der Lebenserwartung des Patienten sowie dem Ausgangsaugeninnendruck ab. Auch Blutdruckwerte können in die Zieldruckberechnung einfließen.<sup>80</sup>

Weitere Hauptrisikofaktoren, die für das Auftreten eines Offenwinkelglaukoms eine Rolle spielen, sind das fortschreitende Alter, Myopie, eine positive Familienanamnese für ein Glaukom, ein niedriger diastolischer Blutdruck, eine dünne zentrale Hornhautdicke sowie schwarze Hautfarbe. Als mögliche Risikofaktoren diskutiert werden zudem u.a. das Vorliegen einer Migräne, ein erhöhter systolischer Blutdruck, kardiovaskuläre Erkrankungen, das Vorliegen eines Diabetes mellitus sowie eines Schlaf-Apnoe-Syndroms.<sup>64,79,110</sup>

### **1.1.3 Epidemiologie**

Es wurde prognostiziert, dass 2020 die Zahl der Glaukompatienten weltweit bei 76,0 (Tham et al.) bzw. 79,6 Millionen Menschen (Quigley et al.) liegen wird.<sup>84,105</sup> Im Jahr 2040 werden nach Tham et al. schätzungsweise 111,8 Millionen Menschen an einem Glaukom erkrankt sein. Da die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Glaukoms mit fortschreitendem Lebensalter zunimmt, ist der Anstieg der Glaukomprävalenz auf die verlängerte Lebenserwartung insbesondere in bestimmten Teilen Afrikas sowie Asiens zurückzuführen.<sup>105</sup> In Deutschland liegt die Prävalenz für das Vorliegen eines Offenwinkelglaukoms bei über 40-jährigen bei 2,42% (SA ± 2,10%).<sup>85</sup> Weltweit betrachtet stellt das Glaukom nach der Katarakt den häufigsten Grund für eine Erblindung dar.<sup>111</sup> Beide Geschlechter sind in etwa gleich häufig betroffen.<sup>55,84</sup> Das Offenwinkelglaukom ist unter der afrikanischen Bevölkerung überproportional häufig zu finden. 90% aller weltweiten Engwinkelglaukomfälle betreffen Asiaten.<sup>84</sup>

### **1.1.4 Glaukomformen**

Man unterscheidet zwischen dem primären Glaukom, welches spontan auftritt, und sekundären Glaukomformen, die in Folge anderer Augenerkrankungen oder Allgemeinerkrankungen entstehen. Beispiele für Sekundärglaukome sind das Neovaskularisationsglaukom, bei dem pathologische Blutgefäße und fibrovaskuläre Membranen den Kammerwasserabfluss stören. Weitere Sekundärglaukome stellen das traumatische Glaukom nach Verletzung des Auges und der Kammerwinkelstrukturen oder das uveitische Glaukom im Rahmen von entzündlichen Augenerkrankungen dar. Auch das Pseudoexfoliationsglaukom, bei dem sich feinfibrilläres Material im Kammerwinkel absetzt, sowie das Pigmentdispersionsglaukom, im Rahmen dessen abgeschilfertes Pigment der Irisrückfläche die Kammerwinkelstrukturen verlegt, werden zu den sekundären Glaukomformen gezählt.

Eine Sonderform des primären Glaukoms ist das kongenitale oder juvenile Glaukom, bei dem die Ausdifferenzierung des Kammerwinkels ausbleibt und dieser von persistierendem embryonalem Gewebe blockiert wird.

Eine weitere Unterteilung bezieht sich auf die Konfiguration des Kammerwinkels. Hier unterscheidet man das Offenwinkelglaukom vom Engwinkelglaukom. Bei letzterem besteht aufgrund eines engen Kammerwinkels sowie einer flachen Vorderkammer ein erhöhter Abflusswiderstand, wodurch die Augeninnendruckwerte ansteigen und bei rezidivierenden bzw. chronischen Verläufen Schäden am Sehnerv entstehen können. In Europa stellt das primäre Offenwinkelglaukom mit mehr als 90% der Fälle die häufigste Form des Glaukoms dar.<sup>38</sup>

### **1.2 Pathophysiologie des Offenwinkelglaukoms**

Der Augeninnendruck wird bestimmt durch die Balance von Sekretion und Abfluss des Kammerwassers. Eine Erhöhung des Augeninnendrucks kommt dann zustande, wenn kein Gleichgewicht mehr zwischen Kammerwasserproduktion und Kammerwasserabfluss besteht.<sup>109</sup> Hierfür ist eine Verminderung des Abflusses und nicht etwa eine vermehrte Sekretion verantwortlich.<sup>64</sup>

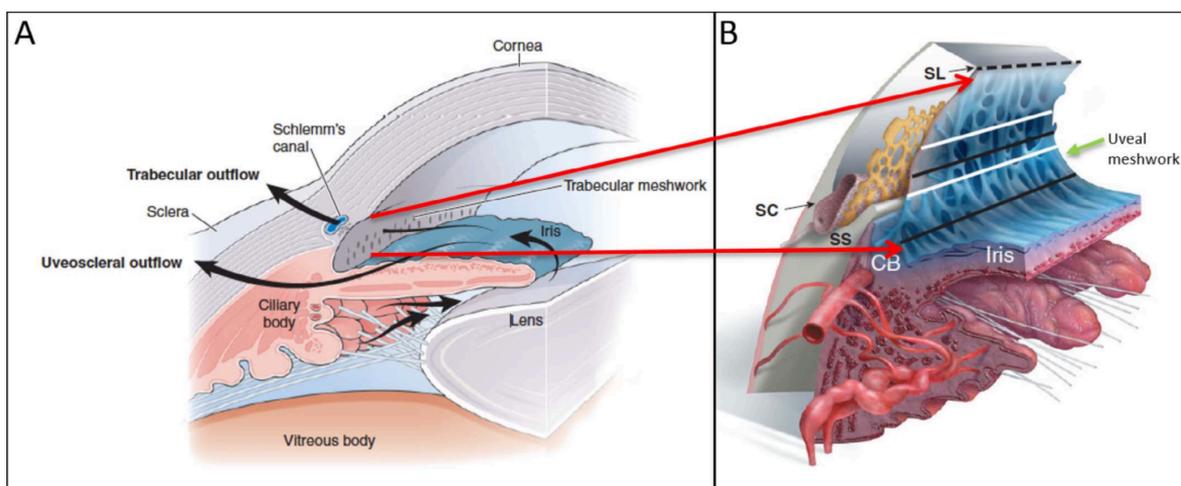
### **1.2.1 Entstehung und Zusammensetzung des Kammerwassers**

Das Kammerwasser stellt ein klares Medium im Auge dar, welches verschiedene Funktionen innehat. Zum einen ist es für die Formgebung des Auges von Bedeutung, indem es die Vorderkammer und Hinterkammer ausfüllt. Hierdurch ergibt sich auch der Beitrag zum optischen System des Auges.<sup>36</sup> Zum anderen spielt es bei der Versorgung mit Sauerstoff und Nährstoffen der Linse, der Hornhaut und des Trabekelmaschenwerks sowie beim Abtransport entstandener Stoffwechselprodukte eine entscheidende Rolle.<sup>36,93</sup> Die Produktion des Kammerwassers erfolgt von den Ziliarfortsätzen der Pars plicata des Ziliarkörpers aus in die Hinterkammer des Auges, von dort aus fließt die Flüssigkeit an der Linse vorbei durch die Pupille in die Vorderkammer des Auges ab (siehe Abb.1).<sup>36,93</sup> Die Kammerwasserflüssigkeit wird durch Diffusion, Ultrafiltration und aktive Sekretion gebildet, letzterer kommt dabei der höchste Stellenwert zu.<sup>7</sup> Die Hauptbestandteile des Kammerwasser sind Wasser, anorganische und organische Teilchen, Sauerstoff, Kohlenhydrate, Glutathion, Harnstoff, Aminosäuren und Proteine.<sup>38,98</sup> In der Minute werden durchschnittlich 2,75 +/- 0,63 µL Kammerwasser gebildet, wobei am Morgen die Produktion am höchsten ist. Über den Nachmittag hinweg fällt sie ab und erreicht nachts Tiefstwerte. Zu dieser Zeit wird nur noch die Hälfte des morgendlich produzierten Kammerwassers gebildet.<sup>19</sup>

### **1.2.2 Kammerwasserabfluss**

Erste Hinweise zum Kammerwasserabfluss des Auges fand H. Lauber im Jahr 1901. Er entnahm Blut aus der Pfote sowie aus der Ziliarvene eines Hundes. Lauber stellte fest, dass die Anzahl an Erythrozyten pro Kubikmillimeter Blut in der Ziliarvene deutlich geringer ausfiel als in der Vene der Pfote und postulierte, dass die Verdünnung des Blutes durch das Einfließen von Kammerwasser aus dem Auge zustande kommt.<sup>8</sup> In weiteren Versuchen stellte sich diese Hypothese als richtig heraus und der konventionelle Kammerwinkelabfluss war entdeckt. Über diesen Abflussweg fließt Kammerflüssigkeit aus der Vorderkammer über das Trabekelmaschenwerk, den Schlemm'schen Kanal und die Kollektorkanäle in die intra- und episkleralen Venen ab.<sup>49</sup> Im Jahr 1965 injizierte A. Bill in die Vorderkammer von Affen radiomarkiertes Albumin und bemerkte, dass ein erheblicher Anteil des radiomarkierten Albumins nicht in den episkleralen Venen ankam. Er fand die fehlenden Anteile in der Uvea und Teilen der Sklera, womit eine

weitere Route für den Abfluss von Kammerwasser, der so genannte uveosklerale Kammerwasserabflussweg, nachgewiesen werden konnte.<sup>17</sup> Hierbei fließt ein Teil der Kammerflüssigkeit über Spalten im Ziliarkörper in den suprachoroidalen Raum ab und sickert von dort aus durch das Skleragewebe und entlang von sklerapenetrierenden Gefäßen und Nerven in das periorbitale Gewebe.<sup>108</sup> Ein Teil wird zudem über die Vortexvenen aufgenommen.<sup>81</sup> Im Gegensatz zum konventionellen Kammerwasserabfluss erfolgt der uveosklerale Abfluss überwiegend unabhängig vom vorliegenden Augeninnendruck.<sup>108</sup> In der Literatur lassen sich teils sehr unterschiedliche Werte für den prozentualen Anteil des uveoskleralen Abflusses am Gesamtabfluss des Kammerwassers finden (4-60%). Im Allgemeinen wird angenommen, dass der weitaus überwiegende Teil des Kammerwassers über den konventionellen Abflussweg abgeführt wird.<sup>32,36,108</sup>



**Abb. 1:** Schematische Darstellung der an Kammerwasserbildung und -abfluss beteiligten Strukturen. SL=Schwalbe Linie, SC=Schlemm'scher Kanal, SS=Sklerasporn, CB=Ziliarkörper  
 Aus: Freddo TF, Chaum E (2017): Anatomy of the Eye and Orbit. 1st Edition, Wolters Kluwer, Philadelphia<sup>34</sup>

## 1.2.3 Konventioneller Abflussweg

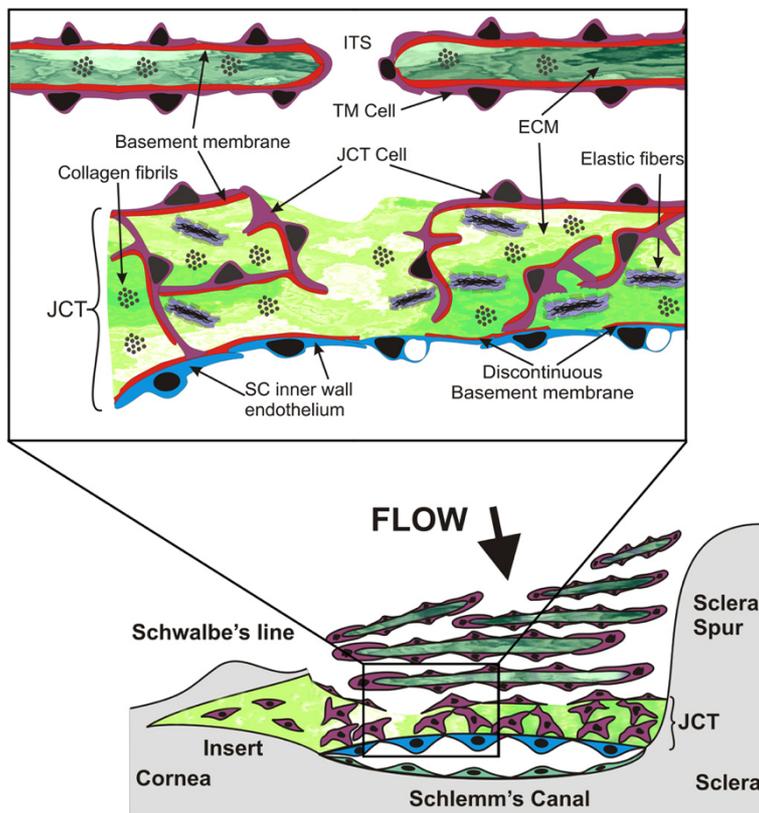
### 1.2.3.1 Trabekelmaschenwerk

Aus der Vorderkammer gelangt Kammerflüssigkeit in das so genannte Trabekelmaschenwerk. Hierbei handelt es sich um eine im Querschnitt dreieckige Struktur im Kammerwinkel, die ca. 350 x 50-150µm misst.<sup>1</sup> Der innere Teil liegt frei und hat direkten Kontakt zum Kammerwasser in der Vorderkammer. Nach anterior läuft das Trabekelmaschenwerk spitz zu und bildet eine Verbindung mit der Descemetmembran und den angrenzenden Hornhautlamellen, nach posterior geht

das Trabekelmaschenwerk in den Sklerasporn und indirekt in die Iriswurzel über. Nach außen bestehen die angrenzenden Strukturen aus kornealem sowie skleralem Gewebe und der inneren Wand des Schlemm'schen Kanals.<sup>9</sup>

Das Trabekelmaschenwerk lässt sich in drei Segmente unterteilen: dem innenliegenden uvealen Trabekelmaschenwerk, dem tieferliegenden korneoskleralen Trabekelmaschenwerk und dem daran angrenzenden juxtakanalikulären Trabekelmaschenwerk (JCT), welches nach außen an das Innenwandendothel des Schlemm'schen Kanals grenzt. Die verschiedenen Regionen des Trabekelmaschenwerks unterscheiden sich strukturell. Uveales und korneosklerales Maschenwerk setzen sich aus Lamellen zusammen, welche wiederum aus dicht gepacktem Kollagen (Typ I und III) sowie elastischen Fasern gebildet und von Trabekelmaschenwerkzellen bedeckt werden. Das uveale Maschenwerk besteht aus ein bis drei Lagen trabekulärer Lamellen, im korneoskleralen Maschenwerk lagern sich 8 bis 15 solcher Schichten übereinander.<sup>101</sup> In diesem Gebilde ergeben sich Zwischenräume, durch welche das Kammerwasser fließt. Je näher das Kammerwasser im Trabekelmaschenwerk in Richtung Schlemm'schen Kanal gelangt, desto kleiner werden die Poren, die es passiert.<sup>32</sup> Den Trabekelmaschenwerkzellen kommt eine phagozytierende Funktion zu. Außerdem bilden sie eine Art Vorfilter, der größere zelluläre Bestandteile aus dem Kammerwasser am Weiterfließen in Richtung des Schlemm'schen Kanals hindert. Das juxtakanalikuläre Maschenwerk stellt mit einer Dicke von 2-20 µm die dünnste Schicht des Trabekelmaschenwerks dar, bestehend aus zwei bis fünf Schichten sternförmiger Zellen, die in lockerem Bindegewebe eingebettet sind (siehe Abb. 2).<sup>32</sup> Hier findet man auch ein Netzwerk aus elastischen Fasern, das tangential zum Schlemm'schen Kanal verläuft und in Verbindung mit dem Innenwandendothel des Schlemm'schen Kanals steht.<sup>87</sup> Die elastischen Fasern machen eine Expansion oder ein Zusammenziehen des juxtakanalikulären Trabekelmaschenwerks je nach Augeninnendrucklage möglich.<sup>57</sup> In dieser Region kann es im Laufe des Lebens zu plaqueartigen Ablagerungen kommen.<sup>97</sup> Das juxtakanalikuläre Trabekelmaschenwerk trägt den größten Anteil zum Kammerwasserabflusswiderstand innerhalb des Trabekelmaschenwerks bei.<sup>1,2,32</sup> Die Abflussrate von Kammerwasser über das Trabekelmaschenwerk beträgt 2,5–3 µL/min.<sup>3</sup> In Versuchen konnte festgestellt werden, dass die Zellen des Trabekelmaschenwerks sowie die inneren Endothelzellen des Schlemm'schen

Kanals in der Lage sind einen erhöhten Augeninnendruck zu detektieren und Veränderungen in der extrazellulären Matrix anzustoßen, die mit einer Verminderung des Kammerwasserabflusswiderstands einhergehen. Dieser Vorgang kann ein bis mehrere Tage in Anspruch nehmen und ist verantwortlich dafür, dass bei den meisten Menschen der Augeninnendruck zeitlebens innerhalb enger physiologischer Grenzen gehalten werden kann.<sup>3,57</sup>



**Abb. 2:** Schematische Darstellung des Trabekelmaschenwerks (TM) und des Schlemm'schen Kanals (SC). Das untere Bild zeigt die Strukturen des SC und des TM im Querschnitt. Das obere Bild ist eine vergrößerte Darstellung des juxtakanalikulären TM (JCT). (ITS= Intertrabekular Space  
ECM= Extracelluläre Matrix)

Aus: Acott TS, Kelley MJ (2008): Extracellular Matrix in the Trabecular Meshwork. *Experimental Eye Research* 86 (4), 543-561

### 1.2.3.2 Schlemm'scher Kanal

Der Schlemm'sche Kanal wurde erstmalig 1830 durch den deutschen Anatom Friedrich Schlemm beschrieben. Es handelt sich um eine im Querschnitt abgeflachte Struktur, die ringförmig um den Hornhautrand im Bereich des Übergangs zur Sklera verläuft und an das juxtakanalikuläre Trabekelmaschenwerk grenzt. Er misst im Durchmesser ca. 200-500 µm und besitzt teilweise verzweigte Ausbuchtungen, die häufig untereinander anastomosieren.<sup>88</sup> Der Kanal besteht aus einer Innenwand und einer äußeren Wand, die sich jeweils aus einer Schicht Endothelzellen zusammensetzt, wobei sich die Endothelzellen der Innenwand von denen der äußeren Wand morphologisch und in der Funktion unterscheiden.<sup>28,72</sup>

### **1.2.3.3 Innenwandendothel des Schlemm'schen Kanals**

Die Innenwand des Schlemm'schen Kanals wird aus einer Zelllage von Endothelzellen gebildet, die einer diskontinuierlichen Basalmembran und dem juxtakanalikulären Bindegewebe aufliegt.<sup>52</sup> Die Endothelzellen sind flache, spindelförmige Zellen, die abgesehen von der Zellkernregion lediglich eine Dicke von 1 µm oder weniger aufweisen. Verbindungen zwischen den Endothelzellen bestehen über tight junctions.<sup>52,72</sup> Charakteristisch für die Innenwandendothelzellen ist die Bildung von Ausbuchtungen in den Schlemm'schen Kanal, der sogenannten Riesenvakuolen, die aufgrund eines Druckgradienten von basal nach apikal im Bereich der Endothelzellschicht entstehen. Der Abfluss des Kammerwassers in den Schlemm'schen Kanal findet über transzelluläre und parazelluläre Poren statt. Erstere bilden sich insbesondere in Bereichen, in denen das Zytoplasma dünn ist, sodass sich die basalen und apikalen Membranen der Endothelzellen nahekommen, was vor allem dort der Fall ist, wo sich Riesenvakuolen ausbilden. Ein erhöhter Augeninnendruck führt zu einer Verformung der Endothelzellen mit einer Ausdünnung des Zytoplasmas, was die Bildung von Poren begünstigt. Es wird daher postuliert, dass bei der Pathogenese des Glaukoms eine erhöhte Zellsteifigkeit eine Rolle spielt. Diese führt dazu, dass die Verformbarkeit der Endothelzellen und somit die Bildung von Poren ab- und der Abflusswiderstand zunimmt.<sup>57,97</sup> Das Innenwandendothel nimmt zudem eine Ventilfunktion ein. Diese entsteht unter anderem dadurch, dass die Anzahl an Poren deutlich abnimmt, sobald der Druck im Schlemm'schen Kanal den Druck im Auge übersteigt. Hierdurch wird ein Reflux von Blut aus dem Kanal in das Auge unterbunden und die Blutkammerwasserschranke aufrecht erhalten.<sup>12,51,97</sup>

### **1.2.3.4 Kollektorkanäle und episklerales Venensystem**

Die Verbindung zwischen dem Schlemm'schen Kanal und den intra- bzw. episkleralen Venen stellen Kollektorkanäle her. Hierbei handelt es sich um mit Endothel ausgekleidete Hohlräume in der Sklera, die der äußeren Wand des Schlemm'schen Kanals entspringen und diesen mit dem intraskleralen und episkleralen Venensystem verbinden.<sup>14</sup> Die Anzahl der Kanäle variiert im menschlichen Auge. In Experimenten von Rohen und Rentsch konnten zwischen 24 und 35 Kollektorkanäle dargestellt werden.<sup>88</sup> Von den episkleralen Venen erfolgt der weitere Abfluss über die vorderen Ziliarvenen und die Vena ophthalmica

superior in den Sinus cavernosus. Einige kammerwasserführende Gefäße münden auch in die konjunktivalen Venen.<sup>94</sup>

### **1.2.3.5 Abflusswiderstand für das Kammerwasser**

Ein erhöhter Augeninnendruck im Rahmen eines primären Offenwinkelglaukoms wird durch einen erhöhten Kammerwasserabflusswiderstand im Bereich des konventionellen Abflusses verursacht.<sup>52</sup> Der Ort des höchsten Kammerwasserabflusswiderstands liegt im Bereich des juxtakanalikulären Trabekelmaschenwerks und/oder dem Innenwandendothel mit der darunterliegenden Basalmembran.<sup>51,52,97</sup> Als zugrundeliegende Ursachen für die Erhöhung des Abflusswiderstands werden verschiedene Mechanismen diskutiert. Eine vermehrte Zellsteifigkeit der Trabekelmaschenwerkszellen und der Zellen im Schlemm'schen Kanal und eine hierdurch u.a. verminderte Porenbildung scheint eine zentrale Rolle bei der Entstehung des Kammerabflusswiderstands und der Pathogenese des Glaukoms zu spielen.<sup>97</sup> Des Weiteren wurde bei Glaukompatienten vermehrt das Vorkommen von verdickten Hüllen aus extrazellulärem plaquehaltigem Material um die elastischen Fasern beobachtet („sheath derived plaques“).<sup>87,97</sup> Zudem trägt eine trabekuläre Verdickung und eine Verschmelzung von trabekulären Lamellen zu einem erhöhten Kammerwasserabflusswiderstand bei.<sup>16,104</sup> Bei Glaukomekranken wurden zudem weitere Ursachen gefunden, die den Kammerwasserwiderstand verstärken. Dies sind ein im Vergleich zu gesunden Patienten kleineres Lumen des Schlemm'schen Kanals.<sup>112</sup> Außerdem bestehen häufiger Herniationen der inneren Wand des Schlemm'schen Kanals sowie des juxtakanalikulären Gewebes in die Kollektorkanäle.<sup>12</sup> Ein erhöhter Augeninnendruck kann zudem zu einem Kollaps des Schlemm'schen Kanals sowie zu einem Verschluss der Kollektorkanäle führen, wodurch sich der Abflusswiderstand verstärkt.<sup>16,53</sup>

## **1.3 Glaukomtherapie**

Um den Augeninnendruck in den Zieldruckbereich zu senken, gibt es zwei Ansätze: Zum einen kann die Produktion des Kammerwassers vermindert werden, zum anderen besteht die Möglichkeit, den Kammerwasserabfluss zu verbessern. Derzeit stehen hierzu Medikamente, Laserverfahren und Operationen zur Verfügung.

### **1.3.1 Medikamentöse Augeninnendrucksenkung**

Nach den Leitlinien der European Glaucoma Society gelten Betablocker, Alpha-2-Agonisten, Prostaglandin-Analoga und Karboanhydrasehemmer als Therapie der ersten Wahl zur Augeninnendrucksenkung beim Offenwinkelglaukom.<sup>31</sup> Betablocker hemmen die über Beta-Rezeptoren vermittelte Stimulation der Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>-ATPase des Ziliarkörpers und reduzieren somit die Produktion von Kammerwasser. Alpha-2-Rezeptor-Agonisten aktivieren die Alpha-2-Rezeptor vermittelte Hemmung der Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>-ATPase und fördern zusätzlich den uveoskleralen Abfluss. Zu den Wirkstoffen, die die Kammerwassersekretion vermindern, gehören auch die Karboanhydrasehemmer. Diese stehen nicht nur zur topischen sondern auch zur systemischen Anwendung mittels Tabletten oder parenteral zur Verfügung. Die effektivste Augeninnendrucksenkung ist mit Medikamenten der Substanzklasse der Prostaglandinanaloga möglich (bis zu 33%), die insbesondere den uveoskleralen Abfluss verbessern. Zur Reduktion der Tropfhäufigkeit sind mittlerweile eine Reihe von Kombinationspräparaten erhältlich, bei denen maximal zwei Wirkstoffe kombiniert werden.<sup>29,31</sup> Seit neuestem steht mit den Rho-Kinase-Inhibitoren eine weitere Wirkstoffgruppe an Augentropfen zur Verfügung, die überwiegend der Zellsteifigkeit im Trabekelmaschenwerk entgegenwirken, zudem den episkleralen Venendruck verringern und die Kammerwasserproduktion drosseln.<sup>56,70</sup>

### **1.3.2 Laserverfahren**

Es bestehen zwei verschiedene Ansätze zur Augeninnendrucksenkung mittels Laser. Bei der Argonlaser- oder selektiven Lasertrabekuloplastik wird das Trabekelmaschenwerk gelasert, um den Kammerwasserabfluss zu verbessern. Hierdurch konnte eine Augeninnendrucksenkung um 12-20% des Ausgangsdrucks innerhalb des ersten Jahres nach der Laserung nachgewiesen werden, jedoch hält die augeninnendrucksenkende Wirkung häufig nicht langfristig an.<sup>15,29</sup> Das zweite zur Verfügung stehende Laserverfahren stellt die Zyklphotokoagulation dar, bei welcher die nichtpigmentierten Epithelzellen des Ziliarkörpers teilweise verödet werden und somit die Kammerwasserproduktion gedrosselt wird. Über die Effektivität des Verfahrens herrschen sehr unterschiedliche Angaben in der Literatur.<sup>29</sup>

### **1.3.3 Glaukomchirurgie**

#### **1.3.3.1 Penetrierende Glaukomchirurgie/filtrierende Implantate**

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wurden operative Eingriffe an Offenwinkelglaukompatienten durchgeführt.<sup>86</sup> Der Goldstandard in der Glaukomchirurgie stellt seit den 1960er Jahren das von Cairns entwickelte Operationsverfahren der Trabekulektomie dar. Cairns wusste bereits, dass der Hauptabflusswiderstand im juxtakanalikulären Trabekelmaschenwerk oder der darunter liegenden Innenwand des Schlemm'schen Kanals liegt. Er wollte daher mit einem Zugang von außen einen Teil des Schlemm'schen Kanals entfernen, sodass Kammerwasser nicht zuerst das Trabekelmaschenwerk und das Innenwandendothel passieren muss, sondern über die freiliegenden Kanalöffnungen abfließen kann.<sup>24</sup> Es stellte sich durch die Bildung von Sickerkissen der Bindehaut heraus, dass der drucksenkende Effekt hauptsächlich im Fisteln von Kammerwasser an dem gebildeten Skleradeckel vorbei unter die Bindehaut bestand und nicht durch einen besseren Abfluss über den Schlemm'schen Kanal zustande kam.<sup>51</sup> Im Rahmen der Trabekulektomie wird zunächst auf halber Skleradicke ein Skleradeckel gebildet. Anschließend erfolgt eine Präparation nach anterior, wo Teile des Schlemm'schen Kanals, des Trabekelmaschenwerks und ein kleiner Teil der peripheren Iris entfernt werden. Hiernach wird der Skleradeckel in seine ursprüngliche Position zurückgeklappt und locker vernäht. Das Kammerwasser kann nun aus der Vorderkammer an der Skleralamelle vorbei unter die Bindehaut absickern und bildet dort ein Filterkissen. Es wird daher ein Abflusskanal aus der Vorderkammer unter die Bindehaut geschaffen.<sup>86</sup> Bemessen am Ausmaß der Augeninnendrucksenkung stellt die Trabekulektomie den effektivsten Eingriff in der Glaukomchirurgie dar. Allerdings besteht ein nicht unerhebliches Risiko an teils schwerwiegenden Komplikationen, wie beispielsweise ausgeprägte postoperative Hypotonien mit konsekutiver Aderhautschwellung oder hypotoner Makulopathie, Hyphämata, Endophthalmitiden, Entwicklung einer Katarakt oder Undichtigkeiten bzw. Infektionen des Sickerkissens. Zusätzlich besteht das Risiko, dass es zu Vernarbungen des Sickerkissens mit anschließendem erneuten Augeninnendruckanstieg kommt.<sup>29,46</sup> Ergänzend zur Trabekulektomie stehen seit einigen Jahren verschiedene Schlauch- und Ventilimplantate zur Verfügung, bei denen Kammerwasser aus der Vorderkammer durch die Sklera unter die Bindehaut abgeführt wird. Auch hierbei entstehen

Sickerkissen. Prominente Vertreter sind Ahmed Glaucoma Valve (® AGV; New World Medical, Ranchos Cucamonga, CA, USA) oder Baerveldt Glaucoma Implant (® Abbott Medical Optics Inc. Santa Ana, CA, USA), die man als Drainageimplantate bezeichnet. Ersterer ist zur Vermeidung postoperativer Hypotonien mit einem Ventilmechanismus ausgestattet. Zu nennen sind außerdem der EX-PRESS Shunt (EX-PRESS ® Glaucoma Filtration Device, Alcon Laboratories, Fort Worth, TX, USA) und der seit 2016 von der Food and Drug Administration zugelassene XEN-Schlauch (XEN ® Gel Implantat, Allergan Inc., CA, USA), welcher zu den MIGS-Verfahren gezählt wird und von innen durch den Schlemm'schen Kanal unter die Bindehaut geschoben wird.<sup>66,86</sup>

### **1.3.3.2 Nichtpenetrierende Glaukomchirurgie**

Insbesondere aufgrund der teils schwerwiegenden Komplikationen der Trabekulektomie und sickerkissenassoziierter Probleme wurden schonendere, nichtpenetrierende und somit sickerkissenfreie Operationsverfahren entwickelt.

„Das prinzipiell übliche Konzept der nichtpenetrierenden Glaukomchirurgie liegt darin, eine Filtration über eine natürlich bestehende Membran, die den Ort des Abflusswiderstands darstellt, zu ermöglichen, um eine Senkung des intraokularen Drucks zu erreichen und eine postoperative okuläre Hypotonie zu verhindern, ohne dass in die Vorderkammer eingedrungen wird.“<sup>91</sup> Als diese Membran fungieren die vorderen Anteile des Trabekelmaschenwerks sowie die periphere Descemetmembran der Hornhaut.<sup>86,91</sup> Die Menge des abfließenden Kammerwassers wird also nicht wie bei der Trabekulektomie durch die Dichtigkeit des vernähten Skleralappens bestimmt, sondern schon auf Höhe des Trabekelmaschenwerks und der Descemetmembran festgelegt.<sup>86</sup> Bei diesen Operationen wird zunächst eine tiefe Sklerokeratektomie durchgeführt, um die Trabekulo-Descemetmembran freizulegen, und hierdurch ein intraskleraler Raum geschaffen, welcher später als Reservoir für das Kammerwasser dient. Anschließend werden Teile des juxtakanalikulären Trabekelmaschenwerks sowie des Schlemm'schen Kanalendothels entfernt, sodass das Kammerwasser durch die verbliebenen inneren trabekulären Schichten in den intraskleralen See und die freien Öffnungen des Schlemm'schen Kanals abfließen kann. Fyodorov und Kozlov beschrieben dieses Verfahren im Jahr 1990 und bezeichneten es als *tiefe Sklerektomie*.<sup>89,91</sup> In den 1990er Jahren wurde durch Stegmann et al. mit der

*Viscocanalostomie* das Operationsverfahren erweitert. Hierbei wird der Schlemm'sche Kanal nach der Bildung eines Descemetfensters eröffnet und anschließend zu beiden Seiten eine hochmolekulare viskoelastische Substanz ca. 3-6 mm tief in den Schlemm'schen Kanal appliziert.<sup>99</sup> In histologischen Studien an Primaten- und Menschenaugen zeigte sich, dass durch diese Maßnahme zum einen der Schlemm'sche Kanal und die Kollektorkanäle sowie ihre Öffnungen geweitet werden, zum anderen Lücken im Innenwandendothel des Schlemm'schen Kanals sowie im juxtakanalikulären Trabekelmaschenwerk entstehen. Somit bilden sich direkte Verbindungen zwischen den juxtakanalikulären extrazellulären Räumen des Trabekelmaschenwerks und dem Schlemm'schen Kanal aus.<sup>95,102</sup> In größeren Studien konnte eine effektive Augeninnendrucksenkung bei seltenerem Auftreten von schwerwiegenden Nebenwirkungen im Vergleich zur Trabekulektomie beobachtet werden.<sup>86,99</sup>

### **1.3.3.3 Kanaloplastik ab externo als nichtpenetrierendes OP-Verfahren**

Im Rahmen von Reoperationen sowie gonioskopischen Untersuchungen zeigte sich, dass die Gründe für ein Therapieversagen im Rahmen der *Viscocanalostomie* in einem erneuten Kollabieren des Schlemm'schen Kanals sowie einem Verschließen der Öffnungen der Kollektorkanäle lagen. Es wurde daher von verschiedenen Fachleuten angenommen, dass eine zirkuläre Dilatation des Schlemm'schen Kanals die Chancen erhöht, diesen offen zu halten und ein langfristig verbesserter Abfluss über die Kollektorkanäle mit daraus resultierender effektiverer Drucksenkung erzielt wird. Diese These wurde unterstützt durch die Tatsache, dass die höchste Dichte an Kollektorkanälen nasal und inferior am Auge zu finden ist, einem Bereich, der im Rahmen der Dilatation durch die *Viscocanalostomie* nicht erreicht wird.<sup>41</sup> Die 360°-*Viscocanalostomie* ließ sich technisch erstmals im Jahr 2005 mit einem neu entwickelten Mikrokatheter (iTrack 250A, iScience Interventional, Menlo Park, CA, USA) umsetzen, welcher zudem eine beleuchtete Spitze besaß, sodass die Lokalisation im Schlemm'schen Kanal zu jedem Moment von der Chirurgin/dem Chirurgen nachvollzogen werden konnte.<sup>25</sup> Stegmann ergänzte das Verfahren um das Einlegen und Auf-Spannung-Bringen eines Fadens in den Schlemm'schen Kanal und kreierte damit die Kanaloplastik ab externo.<sup>40,68,69</sup>

Statt dem Einbringen eines Fadens zum Offenhalten des Schlemm'schen Kanals, kann die Kanaloplastik auch mit dem Einlegen eines 9 mm langen Implantats, dem Stegmann Canal Expander (® SCE, Ophthalmos GmbH, Schaffhausen, Switzerland), erfolgen.<sup>39</sup>

#### **1.3.3.4 Ab interno-Glaukomeingriffe**

Seit einigen Jahren besteht die Möglichkeit, Patienten<sup>a</sup> mit einem Offenwinkelglaukom über einen ab interno-Zugang zu operieren. Auch bei diesen Operationen wird in der Regel mittels verschiedener Verfahren der Abfluss über das Trabekelmaschenwerk, den Schlemm'schen Kanal und die Kollektorkanäle verbessert. Es wird mit Hilfe von Parazenteseschritten ein Zugang durch die Hornhaut in die Vorderkammer des Auges geschaffen. Bindehaut und Sklera bleiben dabei unangetastet. Anschließend wird eine Gonioskopielinse aufgesetzt, mit derer Hilfe die Operateurin/der Operateur die Strukturen des Kammerwinkels darstellen und im Bereich des Trabekelmaschenwerks bzw. des Schlemm'schen Kanals operieren kann. Derzeit gibt es vier verschiedene OP-Ansätze mit ab interno-Zugang zur Therapie des Offenwinkelglaukoms. Diese Operationen gehören zu den „MIGS“-Verfahren (minimal invasive glaucoma surgery) und werden häufig in Kombination mit einer Katarakt-Operation durchgeführt. Die Eingriffe gelten als komplikationsarm, sind in der Regel weniger invasiv und weniger aufwendig als die penetrierenden und nichtpenetrierenden Operationsverfahren, senken den Augeninnendruck meist aber auch nur in einem geringeren Umfang.<sup>33</sup>

#### **1. Entfernen von Teilen des Trabekelmaschenwerks und der Innenwand des Schlemm'schen Kanals (Ab interno Trabekulektomie)**

Eine solche Entfernung ist mittels eines speziell für diesen Zweck entwickelten Elektrokauters (Trabectome ® Neomedix, Tustin, CA, USA) oder Messers möglich (Kahook Dual Blade ® New World Medical, Rancho Cucamonga, CA, USA). Das Trabekelmaschenwerk wird von innen über drei bis vier Uhrzeiten gezielt entfernt. Hierdurch soll ein direkter Abfluss des Kammerwassers aus der Vorderkammer in den Schlemm'schen Kanal und von da aus in die Kollektorgefäße ermöglicht

---

<sup>a</sup> Aus Gründen der besseren Lesbarkeit bezieht sich in dieser Arbeit der Terminus *Patient*, hier und im Folgenden, sowohl auf weibliche als auch auf männliche Personen.

werden.<sup>33</sup> Durch dieses Verfahren konnte in verschiedenen Studien im ersten postoperativen Jahr eine IOD-Senkung von 20-34% beobachtet werden. Schwerwiegende Komplikationen wurden selten beobachtet, jedoch kam es häufig zum Auftreten von Hyphämata (in 10-100% der Fälle).<sup>13,62,77</sup>

## **2. Implantation eines Mikrostents**

Um den Ort des höchsten Kammerwassersabflusswiderstands zu überwinden, besteht die Möglichkeit der Implantation eines Stents über einen ab interno-Zugang. Dieser kann eine direkte Verbindung zwischen Vorderkammer und dem Schlemm'schen Kanal herstellen. Zudem gibt es Stents, die ein kleines Stück weit in den Schlemm'schen Kanal eingeführt werden, um diesen zusätzlich offen zu halten. Vertreter sind hier der iStent (iStent® trabecular microbypass stent, iStent inject®, Glaukos Corporation, Laguna Hills, CA, USA), der Hydrus Microstent (® Ivantis Inc., Irvine, CA, USA), der CyPass Mikrostent (® Transcend Medical Inc., Menlo Park, CA, USA) und der iStent Supra (® Glaukos Corporation, Laguna Hills, CA, USA). Die letzteren beiden stellen eine Verbindung zwischen der Vorderkammer und dem suprachoroidalen Raum her.<sup>54</sup> Der Cypass wurde 2018 wieder vom Markt genommen, da es postoperativ zu einem signifikanten Verlust von kornealen Endothelzellen kam.<sup>82</sup> In Studien senkte der iStent den Augeninnendruck nach 18 Monaten um 22-30%, wobei die Glaukomtherapie um 1,2 Wirkstoffe reduziert werden konnte.<sup>73</sup> Der Hydrus Mikrostent bewirkte eine ähnlich starke Drucksenkung, jedoch kamen nach der Hydrus-Implantation nach 12 Monaten signifikant mehr Patienten ohne Lokalthherapie aus als nach einer iStent-Implantation.<sup>4,90</sup>

## **3. Einreißen der inneren Wand des Schlemm'schen Kanals und des Trabekelmaschenwerks (Gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomie)**

Entwicklung der Trabekulotomie als Trabekulotomie ab externo: Unter einer Trabekulotomie versteht man das Einreißen der inneren Wand des Schlemm'schen Kanals sowie des Trabekelmaschenwerks, sodass das Kammerwasser das Trabekelmaschenwerk und Innenwandendothel als Orte des höchsten Abflusswiderstands gar nicht passieren muss, sondern direkt über die äußere Wand des Schlemm'schen Kanals in die Kollektorkanäle und von dort aus weiter abfließen

kann. Im Unterschied zur oben beschriebenen ab interno Trabekulektomie wird bei diesem Verfahren Gewebe lediglich eingerissen und nicht entfernt.

Das Verfahren der ab externo Trabekulotomie, bei der von außen durch ein Skleraschnitt Zugang in den Schlemm'schen Kanal geschaffen und dieser nach innen eingerissen wird, ist schon seit vielen Jahren bekannt und wurde erstmals 1960 an einem Menschen durchgeführt und seitdem insbesondere bei Kindern mit dysgenetischem Kammerwinkel mit großem Erfolg angewandt.<sup>75,96</sup> Anfangs wurde der Schlemm'sche Kanal nicht mit einem Faden, sondern mit einem rundlich geformten und der Struktur des Schlemm'schen Kanals angepassten Instrument, dem Trabekulotom, durchgeführt, bei dem der Schlemm'sche Kanal und das Trabekelmaschenwerk nur sektoriell und nicht zirkumferentiell eröffnet wurden. Bei Erwachsenen war die Effektivität der Drucksenkung anfangs enttäuschend.<sup>33,103</sup> Später erfolgte die ab externo Trabekulotomie mithilfe eines Nylonfadens, sodass nun eine 360°-Trabekulotomie möglich wurde. In einer großen Studie aus dem Jahr 1993 zeigten Tanihara et al. eine langfristige und effektive Drucksenkung durch dieses Verfahren auf und empfahlen das Operationsverfahren als risikoarme Alternative zur Trabekulektomie bei bestimmten Glaukompatienten im Erwachsenenalter.<sup>103</sup>

*Ab interno Trabekulotomie: Gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomie (GATT):* Grover et al. führten als schonendere Variante des oben beschriebenen Operationsverfahrens die gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomie (GATT) als ab interno-Verfahren ein. Hierbei werden Trabekelmaschenwerk und Schlemm'scher Kanal von der Vorderkammer aus durch einen kleinen Schnitt (Goniotomie) eröffnet, der Mikrokatheter (iTrack) wird mit Hilfe einer feinen Pinzette in den Schlemm'schen Kanal eingebracht und um 360° vorgeschoben. Anschließend wird das Ende gefasst und der Katheter nach innen in die Vorderkammer gezogen, sodass das Trabekelmaschenwerk sowie die Innenwand des Schlemm'schen Kanals um 360° einreißt.<sup>44</sup>

#### **4. Aufdehnen des Schlemm'schen Kanals mit einem Viskoelastikum (Kanaloplastik ab interno, AbiC)**

Die Kanaloplastik ab interno stellt eine minimalinvasive Weiterentwicklung der Kanaloplastik ab externo dar. Der Schlemm'sche Kanal wird mit einem feinen Messer von der Vorderkammer aus eröffnet. Anschließend wird der Mikrokatheter

in die Vorderkammer eingebracht und mithilfe einer Pinzette in den Schlemm'schen Kanal eingeführt. Es erfolgt das Verschieben des Katheters um 360° in den Schlemm'schen Kanal. Anschließend wird der Katheter um 360° zurückgezogen. Hierbei wird portionsweise Viskoelastikum abgegeben. Der Schlemm'sche Kanal wird hierdurch dilatiert und die Ostien der Kollektorkanäle eröffnet. Zudem bilden sich Lücken in der Innenwandendothel des Schlemm'schen Kanals sowie im juxtakanalikulären Trabekelmaschenwerk, sodass es zu einer Verringerung des Abflusswiderstands kommt.<sup>95</sup> Im Gegensatz zur Kanaloplastik ab externo wird kein Faden in den Schlemm'schen Kanal eingebracht. Hinweise darauf, dass mit alleiniger 360°-Viskodilatation ohne Einlegung eines Fadens in den Schlemm'schen Kanal der Augeninnendruck wirksam gesenkt werden kann, lieferte eine Studie von Cameron et al. aus dem Jahr 2006.<sup>25</sup> In den ersten Langzeitergebnissen von Lewis et al. zur Kanaloplastik ab externo wurden zudem auch Patienten nachverfolgt, bei denen keine Fadeneinlegung möglich war, sodass in diesen Fällen nur eine 360°-Viskodilatation erfolgte. Auch bei diesen Patienten kam es zu einer deutlichen Augeninnendrucksenkung und einem reduzierten postoperativen Medikamentenbedarf.<sup>68</sup>

## 1.4 Fragestellung

Die Kanalplastik ab externo ist ein verhältnismäßig junges Operationsverfahren, welches sich vom Goldstandard in der Glaukomchirurgie der Trabekulektomie insbesondere durch seinen schonenderen Charakter unterscheidet. Abgeleitet von der Kanalplastik ab externo und mit Hilfe neuer technischer Errungenschaften konnten sich in den letzten Jahren weitere, noch schonendere und weniger invasive MIGS- (minimale invasive glaucoma surgery) Operationsverfahren entwickeln, zu denen die Kanalplastik ab interno sowie die gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomie zählen. Zudem steht mit der Implantation eines Stegmann Canal Expanders eine Variante der Kanalplastik ab externo zu Verfügung, bei der statt einer Fadeneinlegung das Einsetzen eines Implantats erfolgt. Kennzeichnend für diese Operationsverfahren ist, dass der bestehende Abflussweg über den Kammerwinkel wiederhergestellt und kein zusätzlicher Abfluss geschaffen wird. Zu den drei letztgenannten OP-Verfahren liegen bisher nur vereinzelte Studien und kaum Langzeitergebnisse vor. In dieser Arbeit sollen Langzeitdaten zu den Operationsverfahren an einem Schweizer Patientenkollektiv generiert werden. Im Rahmen der Kanalplastik ab externo sollen als neue Aspekte chirurgische Besonderheiten wie die Perforation des Descemetfensters und die Auswirkung einer Fadenextrusion in die Vorderkammer untersucht werden. Außerdem sollen die neuen Operationsverfahren in ihrer Effektivität und Sicherheit betrachtet werden.

Das Hauptkriterium, um den Erfolg einer operativen Glaukomtherapie beurteilen zu können, stellt die Senkung des Augeninnendrucks dar. Als wichtige Nebenkriterien gelten die Reduktion der antiglaukomatösen Medikamente, die Notwendigkeit erneuter augeninnendrucksenkender Eingriffe und, um Aussagen über die Sicherheit des Operationsverfahren treffen zu können, postoperative Komplikationen sowie der Visus im Verlauf. Weiterhin werden die in dieser Studie erhobenen Daten mit vorhandenen Daten aus der Literatur zu den entsprechenden Operationsverfahren verglichen. Ziel ist es mit den Ergebnissen der zur Verfügung stehenden OP-Varianten der Kanalplastik einen Überblick der Wirksamkeit und des Risikoprofils zu bekommen und die Frage nach der Wahl des für den Patienten am besten geeigneten Operationsverfahrens zu beantworten.

## **2. Material und Methoden**

### **2.1 Patientenkollektiv**

In diese retrospektive Studie wurden all jene Patienten eingeschlossen, an denen im Zeitraum zwischen Januar 2013 und Dezember 2016 an den Pallas Kliniken Zürich und Olten (Schweiz) von derselben erfahrenen Augenchirurgin nicht-fistulierende Glaukomoperationen durchgeführt wurden. Bei den Eingriffen handelte es sich um die Kanaloplastik ab externo, Kanaloplastik ab externo mit Implantation eines Stegmann Canal Expanders, Kanaloplastik ab interno sowie die gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomie. Die für die Studie in Frage kommenden Patienten wurden anhand der Operationsdokumentationsbögen ermittelt.

Für die Studiengruppe mit Kanaloplastik ab externo wurden lediglich Operationen berücksichtigt, bei denen auch eine 360°-Katheterisierung mit Fadeneinlage in den Schlemm'schen Kanal möglich war. Bei der Kanaloplastik ab interno sowie der GATT wurde eine 360°-Katheterisierung als Kriterium für die Aufnahme in die Studie gewählt. Ein Teil der Patienten erhielt einen kombinierten Eingriff mit zusätzlicher mikroinzisionaler Katarakt-Operation. Allen Patienten war gemein, dass sie unter der Diagnose eines primären oder sekundären Offenwinkelglaukoms litten. Augenvoroperationen auch antiglaukomatöser Art oder andere Augenvorerkrankungen stellten kein Ausschlusskriterium für die Aufnahme in die Studie dar.

Ausschlaggebend für die Durchführung einer Glaukomoperation waren entweder eine nicht ausreichende Augeninnendrucksenkung bzw. ein Fortschreiten der Glaukomschäden auch unter medikamentöser Therapie und/oder eine Unverträglichkeit gegenüber den zu applizierenden Augentropfen. Die Erhebung der Daten erfolgte durch Einsicht in die digitale Patientenakte (ifa-Software, ifa systems AG, Frechen, Deutschland). Alle in diese Studie eingeschlossenen Patienten waren zum Zeitpunkt der Operation mindestens 18 Jahre alt und gaben zur Durchführung dieser Studie und zur Verwendung der Daten zu wissenschaftlichen Zwecken ihre informierte Einwilligung. Es liegt die Zustimmung der zuständigen Ethikkommission zur Durchführung der Studie vor (Kantonale Ethikkommission Zürich, BASEC-Nr.: 2017-01886).

## 2.2 Präoperative Daten und Daten aus den OP-Berichten

Aus der digitalen Patientenakte wurden folgende Daten erhoben:

- der präoperative Augeninnendruck:  
Dieser wurde mittels Applanationstonometer nach Goldmann erhoben und nach der Dresdner Korrekturtabelle entsprechend dem Ausmaß der zentralen Hornhautdicke angepasst (siehe Anlage 1).  
Unterschieden wird zwischen dem Baseline Augeninnendruck (der letzte unmittelbar vor der Operation gemessene Augeninnendruck) und dem Tmax-Wert (höchster dokumentierter Druck unter Therapie).
- die präoperative antiglaukomatöse Medikation:  
Gezählt wurden dabei die Anzahl der getropften oder systemisch eingenommenen antiglaukomatösen Wirkstoffe pro Tag unabhängig von der täglichen Einnahmehäufigkeit.
- der Visus:  
Die erhobenen Visus-Werte wurden als Dezimaläquivalent erhoben und in eine logarithmisierte Form (logMAR) umgerechnet, um statistische Auswertungen vornehmen zu können. Bestand ein Visus von Fingerzählen bzw. Handbewegung, wurde ein Wert von 0,01 bzw. von 0,001 in Dezimalschreibweise notiert, was + 2,0 bzw. + 3,0 in LogMAR-Schreibweise entspricht. In Fällen, in denen in der Sehschärfeprüfung nur Lichtschein wahrgenommen wurde oder eine nulla lux-Situation vorlag, konnte kein Dezimal-Visus/logMAR-Wert dokumentiert werden. Diese Patienten finden eine separate Erwähnung im Ergebnisteil.<sup>48</sup>

dezimaler Visus	LogMAR Visus
1,25	-0,10
1,00	0,00
0,80	0,10
0,63	0,20
0,50	0,30
0,40	0,40
0,32	0,50
0,25	0,60
0,20	0,70
0,16	0,80
0,13	0,90
0,10	1,00
0,08	1,10

**Tab.1:** Dezimalvisus mit entsprechendem logarithmiertem Visus gegenübergestellt.  
LogMAR = - Log (Dezimalvisus)

Angepasst nach:  
Holladay JT (1997):  
Proper Method for  
Calculating Average  
Visual Acuity.  
Journal of  
Refractive Surgery,  
3, 388-391

0,06	1,20
0,05	1,30
0,01 (Fingerzählen)	2,00
0,001 (Handbewegung)	3,0

- die Gesichtsfeldbefunde:  
Zur Einschätzung der Schwere der bereits bestehenden Gesichtsfelddefekte im Rahmen der Glaukomerkrankung wurde die mittlere Defekttiefe (MD) für jeden Patienten erhoben. Zudem wurde die Rate an falsch negativen/falsch positiven Ereignissen zur Beurteilbarkeit der Mitarbeit des Patienten notiert. Perimetrieergebnisse, die eine falsch-positive und/ oder falsch-negative Rate von 30% oder mehr vorwiesen, wurden nicht berücksichtigt. Bei den durchgeführten Untersuchungen handelte es sich um eine statische 30° Perimetrie.
- das Geschlecht
- das Alter zum Zeitpunkt der Operation
- die operierte Seite
- die Glaukomform
- das Vorliegen einer körpereigenen Linse (Phakie) oder Kunstlinse (Pseudophakie)
- antiglaukomatöse und nicht-antiglaukomatöse Augenvoroperationen oder Laserungen
- Augenvorerkrankungen jeglicher Art
- Spaltlampenbefunde und Auffälligkeiten im Rahmen der Gonioskopie
- Bestehende Unverträglichkeiten gegenüber augeninnendrucksenkenden Medikamenten

Es erfolgte außerdem eine Durchsicht sämtlicher OP-Berichte. Hierbei wurden Abweichungen vom routinemäßigen Operationsablauf notiert. Des Weiteren wurden schon im Rahmen der OP aufgetretene Nebenwirkungen/Komplikationen wie Bildung eines Hyphämas, eines Cheese-wiring-Phänomens, einer Descemetabhebung oder einer Perforation des Descemetfensters vermerkt. Zusätzlich wurde die Anästhesieform notiert.

## 2.3 Postoperative Daten

Im postoperativen Verlauf wurden Daten im Rahmen von regelmäßig erfolgten Kontrollterminen zu folgenden Zeitpunkten erhoben:

- ein Tag nach der Operation
- eine Woche (+/- 2 Tage) nach der Operation
- ein Monat (+/- 10 Tage) nach der Operation
- drei Monate (+/- 1 Monat) nach der Operation
- sechs Monate (+/- 2 Monate) nach der Operation
- ein Jahr (+/- 3 Monate) nach der Operation
- eineinhalb Jahre (+/- 3 Monate) nach der Operation
- zwei Jahre (+/- 3 Monate) nach der Operation
- drei Jahre (+/- 6 Monate) nach der Operation

Berücksichtigt wurden hierbei folgende Parameter:

- der Augeninnendruck
- antiglaukomatöse Medikation
- der Visus
- augeninnendrucksenkende Revisionseingriffe
- postoperative Nebenwirkungen oder Komplikationen (die häufigsten und schwerwiegendsten werden im Folgenden beschrieben):
  - Hyphäma: Hierbei handelt es sich um eine Einblutung in die Vorderkammer mit Ausbildung eines Blutspiegels. Unterschieden wird zwischen einem Makrohyphäma mit einem Blutspiegel  $\geq 1$  mm und einem Mikrohyphäma mit einem Blutspiegel  $< 1$  mm.
  - Cheese-wiring: Hierunter versteht man das teilweise Einschneiden des Trabekelmaschenwerks und des Schlemm'schen Kanals durch den eingelegten Faden im Rahmen der Kanaloplastik ab externo.
  - Periphere Descemetabhebung: Hierbei handelt es sich um eine lokalisierte Eröffnung der inneren Wand des Schlemm'schen Kanals, welche durch die Wirkung der Viskodilatation mit Hyaluronsäure zustande kommt. Diese häuft sich unter der Descemetmembran an und resorbiert sich nur langsam aufgrund des bradytrophen cornealen Stoffwechsels. Das Stoppen des

Katheters bei kontinuierlicher Viskodilatation provoziert eine solche Abhebung.

- Entstehung eines Hornhaut-Ödems: Darunter versteht man ein postoperatives, in der Regel passageres Aufquellen der Hornhaut. Das Ödem kann nur die äußere Epithelschicht, das Stroma oder beide Schichten der Hornhaut betreffen.
  - Hornhaut-Erosio: Abschürfung des Hornhautepithels, welches die oberflächlichste Schicht der Hornhaut darstellt.
  - Vordere Synechien: Hierunter versteht man ein Aneinanderhaften der in der Regel peripheren Irisanteile an das Hornhautendothel.
  - Hypotonie: Auftreten eines Augeninnendrucks von <5 mmHg zu mindestens einem Kontrolltermin.
  - Aderhautamotio: Dabei kommt es zu einer Abhebung der sich unterhalb der Netzhaut befindlichen Gefäßschicht des Auges. Dies entsteht meist im Rahmen von sehr niedrigen Augeninnendruckwerten.
  - Seidel-Phänomen: Dieses tritt im Rahmen von Undichtigkeiten des Auges auf. Der Flüssigkeitsaustritt aus dem Auge wird dargestellt, indem man die Augenoberfläche mit Fluoreszein anfärbt und diese unter Vorschalten des Blaufilters an der Spaltlampe beobachtet.
  - Fibrinreaktion: Sie tritt im Rahmen eines postoperativen Entzündungsreizes im Auge auf.
  - Steroid-Response: Darunter versteht man einen kurzzeitigen, aber deutlichen Augeninnendruckanstieg (>21 mmHg), der nach Absetzen der lokalen Steroidtherapie rückläufig ist.
  - Wipe-out: Ein ausgeprägter, idiopathischer Verlust der zentralen Sehschärfe nach einer Augen-Operation bei Glaukompatienten im fortgeschrittenen Krankheitsstadium.<sup>27</sup>
- Reoperationen im Rahmen von postoperativen Komplikationen

Wurden Patienten nicht von Ärztinnen oder Ärzten der Pallas-Kliniken, sondern von niedergelassenen Augenärztinnen oder Augenärzten im postoperativen Verlauf weiter betreut, wurde Kontakt mit diesen aufgenommen und fehlende Werte ergänzend eingeholt.

## **2.4 Datenverarbeitung und statistische Auswertung**

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine nicht randomisierte, retrospektive Beobachtungsstudie.

Zunächst wurden die Daten im Sinne der beschreibenden Statistik aufgearbeitet und analysiert. Zur weiteren Auswertung wurden Methoden der schließenden Statistik angewandt. Die Daten für den Augeninnendruck, Medikamentenverbrauch und Visus folgten keiner Normalverteilung. Dies wurde durch den Kolmogorov-Smirnov-Test bzw. Shapiro-Wilk-Test bestätigt. Es erfolgte daher die Anwendung des Friedman-Tests für nichtparametrische Stichproben. Bei einem signifikanten Friedman-Test ( $p \leq 0,05$ ), also der Annahme, dass die Stichproben nicht gleichverteilt sind, kam der Vorzeichenrangtest nach Wilcoxon zum Einsatz, um Unterschiede aufzuzeigen, wie sich der Augeninnendruck, der Medikamentenverbrauch bzw. der Visuswert zwischen den verschiedenen Messungen zum Ausgangswert verändern. Um die Wahrscheinlichkeit für einen Alphafehler aufgrund mehrerer Vergleiche zu minimieren, wurde das Level, welches ein signifikantes Ergebnis anzeigt, mit dem Bonferroni Post-hoc Test angeglichen. Zur Gegenüberstellung der verschiedenen Subgruppen im Rahmen der Kanaloplastik ab externo kamen der Mann-Whitney-U-Test sowie der Kruskal-Wallis-Test für unverbundene Stichproben zur Anwendung.

Zur Erstellung der vorliegenden Dissertation wurden folgende Programme verwendet: Microsoft® Word und Excel for Mac Version 16.24, 2019 (Redmond, WA, USA), SPSS 25,0 Statistiksoftware (IBM, NY, USA), VisualDesigner (Version 5.0., 2019, Vu Tien Thinh Applications), Libre Office® (Version 5.2.3.3, 2017).

## **2.5 Beschreibung der Operationsverfahren**

Die im folgenden beschriebenen Operationsverfahren wurden teilweise mit einer Katarakt-Operation kombiniert, wobei als Verfahren die mikroinzisionale Kataraktchirurgie zur Anwendung kam. Hierzu wurde bei den ab externo-Verfahren ein 1,8 mm breiter Parazenteseschnitt (Eröffnung der Hornhaut am Übergang zur Sklera mittels feiner Lanze) gesetzt.<sup>59</sup> Bei den ab interno-Verfahren wurde später der bereits bestehende temporale Parazenteseschnitt zu einem Tunnelschnitt erweitert.

Es folgte die kreisrunde Eröffnung des vorderen Kapselsacks (Kapsulorhexis) mit anschließender bimanueller Phakoemulsifikation, d.h. eine Linsenzerkleinerung

durch eine mit Ultraschallfrequenz in Längsrichtung schwingenden Kanüle, und der anschließenden Absaugung der Linsenbruchstücke, bis ein leerer Kapselsack verblieb. Die Kunstlinse wurde mittels eines Trägers in den leeren Kapselsack eingebracht, um sich dort zu entfalten und mittels ihrer Haptiken zu verankern.<sup>37</sup> Hierbei kamen folgende Kunstlinsen zum Einsatz: Akreos ® MI60 oder Akreos ® Adapt AO (Bausch und Lomb, Rochester, NY, USA). Zum Schluss wurde eine stromale Hydratation zum Verschluss der Parazenteseschritte durchgeführt.

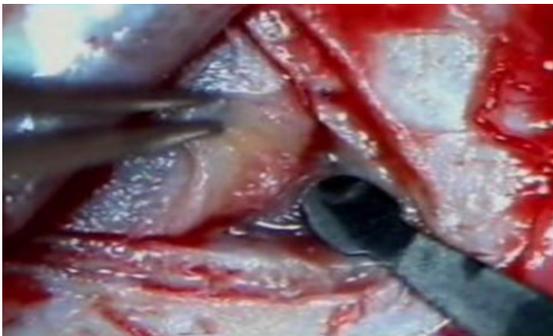
Zur OP-Vorbereitung wurde bei allen Patienten zwei Wochen vor dem Eingriff die lokale augeninnendrucksenkende Medikation abgesetzt und eine systemische Therapie mit Karboanhydrasehemmern bis zum Zeitpunkt der Operation ordiniert, sofern keine Kontraindikationen wie eine Niereninsuffizienz oder eine generelle Unverträglichkeit gegenüber dieser Medikation bestanden.

Alle Patienten erhielten ein Augentropfenschema für die Zeit nach dem Eingriff, bestehend aus antibiotischen Augentropfen für zwei Wochen sowie steroidal und nicht-steroidal antiinflammatorischen Augentropfen, welche über einen Zeitraum von zehn Wochen in ausschleichender Dosierung appliziert wurden.

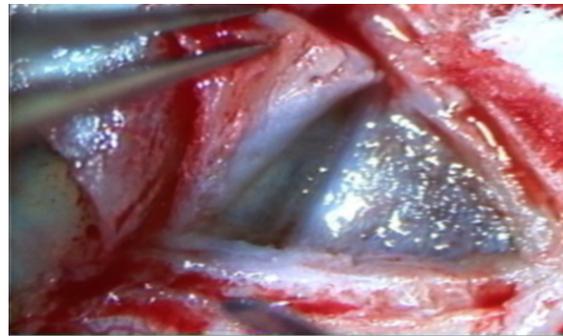
### **2.5.1 Kanaloplastik ab externo**

Als erster Schritt erfolgte die Eröffnung der Bindehaut mit Präparation eines konjunktivalen Lappens im superonasalen Quadranten des Auges. Anschließend wurde mit dem paraboloiden Markeur nach Kearny ein ca. 3 mm breites und 5 mm paraboloid längliches oberflächliches Sklerafenster gebildet und zur Hornhautseite geklappt. Nun erfolgte die Präparation eines kleineren innen liegenden Skleralappens in die Tiefe bis zum suprachoroidalen Raum. Zur Schaffung eines Descemetfensters wurde der tiefe Skleralappen weiter nach anterior bis deutlich in die Hornhaut und in der Tiefe bis zur Descemetmembran präpariert. Diese Lamelle wurde als tiefe Sklerektomie entfernt und die innere Wand des Schlemm'schen Kanals entdacht. Die freiliegenden Ostien wurden zunächst mit Hyaluronsäure (Healon GV ®, Abbott Medical Optics Inc., IL, USA) eröffnet und anschließend der Mikrokatheter (iTrack™, Ellex Medical Pty Ltd, Adelaide, Australia) unter Zuhilfenahme einer Pinzette in den Schlemm'schen Kanal eingebracht. Dieser wurde zunächst um 360° vorgeschoben, wobei die Position des Katheters permanent mithilfe der beleuchteten Katheterspitze durch die Sklera kontrolliert werden konnte. Im nächsten Schritt wurde am Ende des Katheters ein

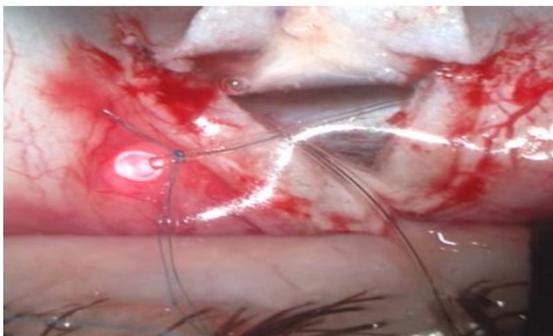
doppelläufiger 10-0 Prolenefaden (Prolene®, Ethicon Inc. GA, USA) befestigt und der Katheter unter Abgabe von Hyaluronsäure durch das Lumen des Katheters zur Durchführung einer Viskodilatation vollständig durch den Kanal zurückgezogen. Der im Schlemm'schen Kanal verbliebene Faden wurde auf Zug gebracht, sodass der Faden der inneren Wand des Schlemm'schen Kanals auflag und das Trabekelmaschenwerk etwas nach innen dehnte. Die Fadenenden wurden anschließend verknotet.<sup>69</sup> Zum Schluss wurde der oberflächliche Skleralappen zurückgeklappt, adaptiert und mit der umgebenden Sklera mittels Vicryl 10-0 Einzelknopfnähten (Vicryl, Ethicon Inc. GA, USA) vernäht. Im letzten Schritt erfolgte eine Bindehautnaht mit Vicryl (10-0) Einzelknopfnähten.



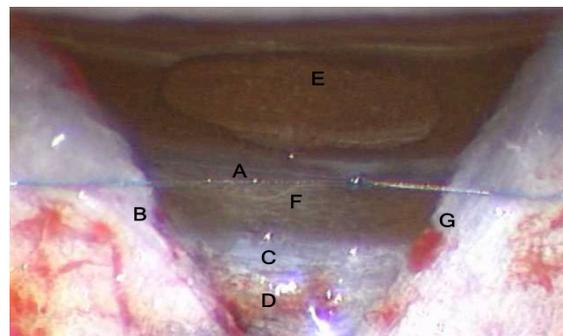
**Bild a**



**Bild b**



**Bild c**

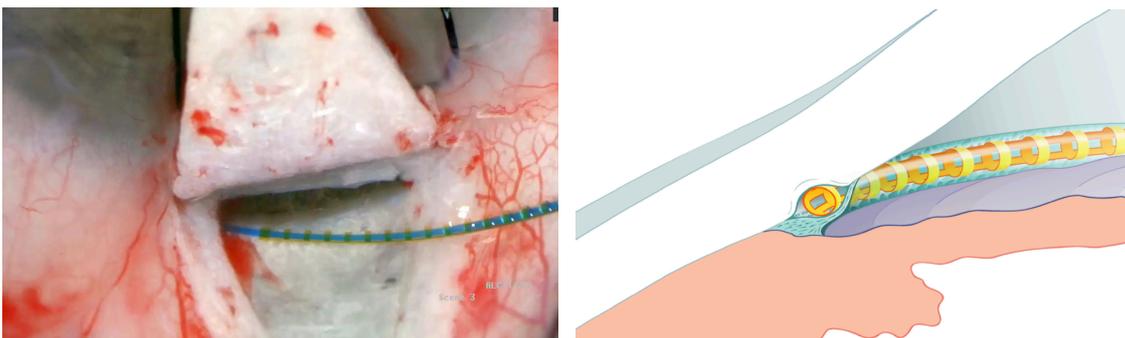


**Bild d**

**Abb. 3:** OP-Verlauf Kanaloplastik ab externo; **Bild a:** Präparation des tiefen Skleralappens; **Bild b:** Präparation nach anterior mit Schaffung eines Descemetfensters; **Bild c:** Bild nach der 360°-Viskodilatation mit sichtbarer illuminierter Spitze des iTrack-Katheters, an dessen Ende der Prolenefaden befestigt ist. **Bild d:** Blick auf das Operationsareal nach Fadeneinlegung und Verknotung. A= verknoteter Prolenefaden, B und G= Ränder des tiefen Sklerafensters, C= Sklerasporn, D= Sklera mit durchschimmernder Aderhaut, E= Descemetfenster mit Kammerwasserfluss, F= Trabekelmaschenwerk. Bilder als Anschauungsmaterial von der Firma Ellex Medical (Indianapolis, IN, USA) zur Verfügung gestellt.

## 2.5.2 Kanalplastik mit Stegmann Canal Expander (SCE)

Die Arbeitsschritte dieses Operationsverfahrens entsprachen zum Großteil dem soeben beschriebenen Vorgehen bei der Kanalplastik ab externo. Es erfolgte zunächst eine Präparation des Bindehautlappens sowie des oberflächlichen und tiefen Skleralappens mit tiefer Sklerektomie und Descemetfenster. Der Schlemm'sche Kanal wurde entdacht und der Mikrokatheter um 360° eingeführt. Der iTrack wurde nur unter Abgabe von Hyaluronsäure zur Viskodilatation um 12 Uhrzeiten zurückgezogen, ohne dass vorher ein Faden an der Katheterspitze befestigt wurde. Anschließend erfolgte die Einlage jeweils eines auf einem Träger aufgetragenen Stegmann Canal Expanders in den Schlemm'schen Kanal, wobei ein Expander im Bereich des tiefen Sklerafensters nach nasal, der andere nach temporal implantiert wurde. Zur dauerhaften Dehnung des Trabekelmaschenwerks sowie zum Aufspannen des Lumens des Schlemm'schen Kanals wurden die beiden Expander im Schlemm'schen Kanal belassen. Zum Schluss wurde der oberflächliche Skleradeckel mittels Vicryl-Einzelknopfnähten dicht vernäht, bevor am Ende des Eingriffs eine Bindehautnaht erfolgte. Beim Stegmann Canal Expander handelt es sich um ein 9 mm langes, aus Polyimid bestehendes, gefensterteres Implantat mit einem äußeren Durchmesser von 240 µm. Die Implantation von zwei Stegmann Canal Expandern dilatiert ca. ein Drittel der Zirkumferenz des Schlemm'schen Kanals.<sup>43</sup>



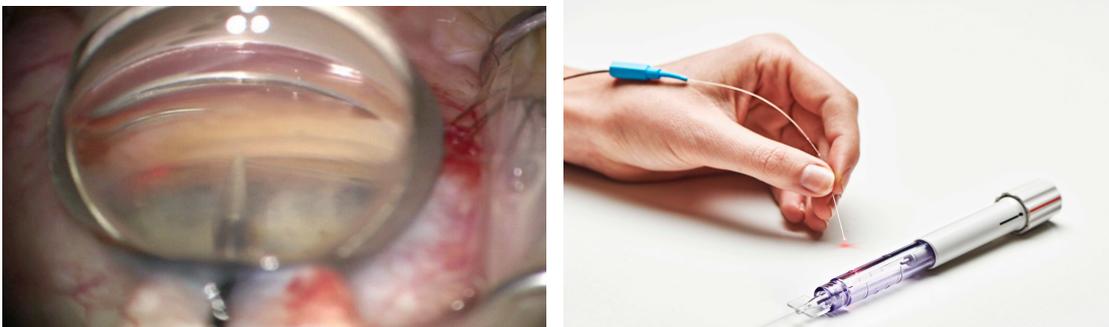
**Abb. 4:** Linkes Bild: Einführung des auf dem Träger befindlichen Schlemm Canal Expanders in den Schlemm'schen Kanal. Rechtes Bild: graphische Darstellung des Stegmann Canal Expanders in situ.

Aus: Grieshaber MC et al. (2017): Canaloplasty with Stegmann Canal Expander for primary open-angle glaucoma: two year clinical results. Acta Ophthalmologica, 95 (5), 503-508

## 2.5.3 Kanalplastik ab interno (AbiC)

Zunächst wurde temporal und inferior eine 0,9 mm große Parazentese angelegt und die Vorderkammer mit einem hochviskösen Viskoelastikum aufgefüllt. Für eine

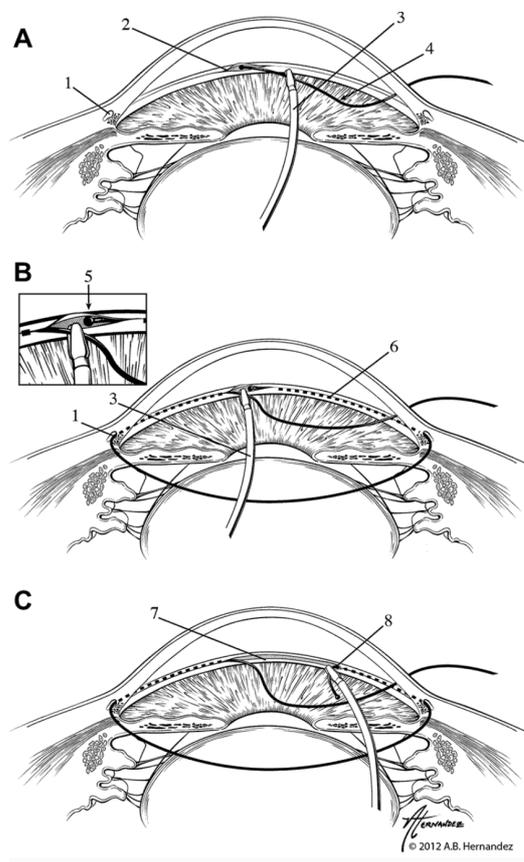
bessere intraoperative Einsicht des Kammerwinkels wurde der Kopf des Patienten etwas nach nasal gedreht. Entsprechend erfolgte auch die Positionierung des Mikroskops schräg auf diesen Winkel. Ebenfalls wurde in dieser Zeit der Katheter mit dem verbleibenden Rest der Hyaluronsäure luftfrei aufgefüllt. Die Goniolinse (Swan Jacobs Gonioprisma, Ocular Instruments, Bellevue, WA, USA) wurde aufgesetzt und durch die temporale Parazentese erfolgte mittels einer geraden Parazenteselanze eine kleine Goniotomie nasal. Der flexible Mikrokatheter (iTrack) wurde unter Mikroskopaufsicht in die Vorderkammer via Parazentese bei 6 Uhr eingeführt und mittels Hattenbach-Pinzette (Geuder, Heidelberg, Deutschland) von temporal intrakameral gefasst. Unter Gonioskopsicht wurde der Mikrokatheter in den Schlemm'schen Kanal eingeführt und langsam um 360° vorgeschoben. Zeitgleich wurde über das Lumen des Katheters portionsweise das Viskoelastikum durch Drehen an der Schraube des Viskoinjektors appliziert, wodurch der Schlemm'sche Kanal sanft dilatiert und die Ostien der Kollektorkanäle eröffnet wurden. Durch die rot leuchtende Katheterspitze ließ sich zu jeder Zeit während der Sondierung die Positionierung des Katheters von außen und nasal auch von innen kontrollieren. Nach der 360°-Sondierung wurde der Katheter unter erneuter Viskodilatation wieder zurückgezogen. Insgesamt wurden ca. 20 Einzelclicks, das heißt 20x die Abgabe einer Portion Viskoelastikum, zur Dilatation angestrebt. Bei Stoppen des Katheters und verhinderter Katheterisierung in eine Richtung wurde alternativ eine Parazentese bei 12 Uhr angelegt, der Katheter über diese eingeführt und in die Gegenrichtung vorgeschoben. Der Katheter wurde im Anschluss an die Sondierung und Viskodilatation wieder entfernt.



**Abb. 5: Linkes Bild:** Intraoperatives Bild bei Kanalplastik ab interno mit Darstellung der Kammerwinkelstrukturen und des iTrack-Katheters mit beleuchteter Spitze, gefasst von einer Pinzette unter der Gonioskoplinse. Aus: Körper N (2018): Ab interno Canaloplasty for the Treatment of Glaucoma: A Case Series Study. Spektrum der Augenheilkunde 32 (6). 223-227  
**Rechtes Bild :** iTrack Mikrokatheter mit Viskoinjektor (Bild als Anschauungsmaterial zur Verfügung gestellt von der Firma Ellex Medical).

## 2.5.4 Gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomie (GATT)

Die Arbeitsschritte entsprachen bis hin zur 360°-Katheterisierung mit Viskodilatation exakt denen der Kanaloplastik ab interno. Nach der 360°-Katheterisierung mit dem Mikrokatheter wurde das Ende des Mikrokatheters mit der Hattenbach-Pinzette gefasst und zentripedaler Zug ausgeübt, sodass es zu einem zirkulären Einreißen der inneren Wand des Schlemm'schen Kanals sowie des Trabekelmaschenwerks kam. Dieser Vorgang wird als ab interno Trabekulotomie bezeichnet. Im Anschluss wurde der Katheter aus der Vorderkammer entfernt. Es erfolgte das bimanuelle Absaugen von Viskoelastikum aus der Vorderkammer und es wurde eine stromale Hydratation durchgeführt.



**Abb. 5:** Schematische Darstellung der OP-Schritte im Rahmen einer GATT, hier durchgeführt mit einem Faden anstelle eines Katheters.

A: Kanülierung des Schlemm'schen Kanals aus der Vorderkammer heraus

B: Katheter bzw. Faden wird um 360° durch den Kanal geführt

C: Das distale Ende des Katheters oder Fadens wird gefasst und Zug ausgeübt, sodass das Trabekelmaschenwerk nach innen einreißt  
 1= Schlemm'scher Kanal

2= Goniotomieareal (schlitzförmige Eröffnung des Trabekelmaschenwerks und des Schlemm'schen Kanals)

3= Pinzette

4= Faden oder Mikrokatheter

5= distales Ende des Mikrokatheters oder Fadens, nachdem dieser 360° durch den Schlemm'schen Kanal geführt wurde

6= Verlauf des Fadens/Katheters im Schlemm'schen Kanal

7= eingerissenes Trabekelmaschenwerk

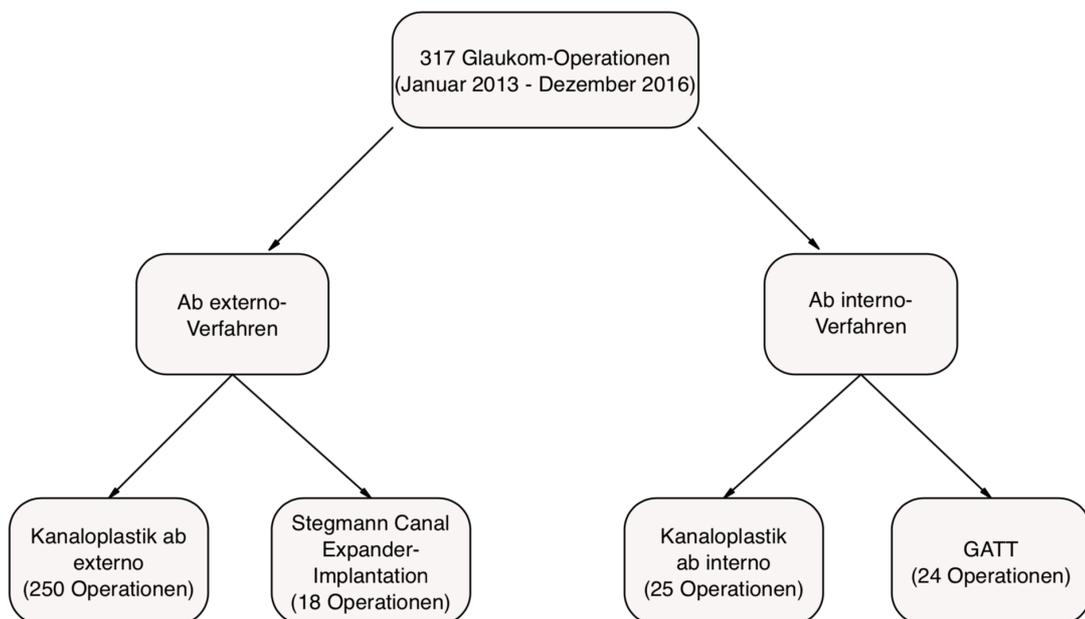
8= Durchführung der Trabekulotomie durch den Zug am distalen Ende des Katheters/Fadens, sodass dieser nach innen und aus dem Schlemm'schen Kanal in die Vorderkammer gezogen wird und dabei das Trabekelmaschenwerk einreißt.

Aus: Grover DS et al. (2014): Gonioscopy-assisted transluminal trabeculotomy, ab interno trabeculotomy: technique report and preliminary results. *Journal of Ophthalmology* 121, 855-861

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Demographische Angaben

Insgesamt wurden in dieser Studie die Daten von 237 Patienten analysiert, an denen 317 Glaukomoperationen durchgeführt wurden. Bei der Mehrzahl der Operationen handelte es sich um eine Kanaloplastik ab externo (Gruppe I) mit 250 Eingriffen. Eine Kanaloplastik ab externo mit Implantation eines Stegmann Canal Expanders erfolgte an 18 Augen (Gruppe II). Auf die ab interno-Verfahren fielen 25 Kanalplastiken ab interno (Gruppe III) und 24 gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomien (Gruppe IV). Abbildung 6 stellt die Anzahl und Zuordnung der verschiedenen Glaukomoperationen graphisch dar.



**Abb. 6:** Übersicht über die untersuchten Operationsverfahren.

Bei 205 der insgesamt 317 Eingriffe wurde zusätzlich zum Glaukomeingriff eine mikroinvasive Katarakt-Operation mit Phakoemulsifikation und Implantation einer Hinterkammerlinse durchgeführt.

Das Durchschnittsalter der Patienten betrug zum Zeitpunkt der Operation 70,0 Jahre (SA  $\pm$  9,82 Jahre). Der jüngste Patient war zum Operationszeitpunkt 28 Jahre, der älteste 92 Jahre alt. Das Geschlechterverhältnis war fast ausgeglichen, wobei 120 (50,6%) der operierten Patienten männlichen und 117 (49,4%) weiblichen Geschlechts waren. 312 Operationen wurden in Allgemeinanästhesie durchgeführt, fünf Eingriffe in Lokalanästhesie, wovon drei dieser Patienten der Kanaloplastik ab

interno-Gruppe angehörten. Weitere Angaben zur demographischen Verteilung der einzelnen Subgruppen können Tabelle 2 entnommen werden.

Parameter	Gruppe I Kanaloplastik ab externo	Gruppe II Kanaloplastik mit SCE	Gruppe III Kanaloplastik ab interno	Gruppe IV GATT	Gesamt- zahl
Patienten, n	206	18	23	20	237 *
Operationen, n (%)	250 (78,9 %)	18 (5,7 %)	25 (7,9 %)	24 (7,6 %)	317 (100%)
Mit/ ohne komb. Katarakt-OP, n	160/90	12/6	19/6	14/10	205/112
Geschlecht, n					
weiblich	101	10	9	12	117 *
männlich	105	8	14	8	120 *
Alter (Jahre)					
Durchschnitt $\pm$ SA	70,0 $\pm$ 9,85	72,0 $\pm$ 6,71	72,2 $\pm$ 8,1	67,2 $\pm$ 12,8	70,0 $\pm$ 9,82
Altersspanne	28-92	61-85	52-86	28-84	28-92
Auge, n					
rechts	122	8	15	14	159
links	127	11	10	10	158

**Tab. 2:** Demographische Angaben, n= Anzahl. \*Die Differenz aus der Gesamtzahl und der Summe der addierten Patientenzahlen zu den verschiedenen Operationsverfahren ergibt sich aus dem Umstand, dass manche Patienten an zwei Augen mit jeweils unterschiedlichen Operationsverfahren operiert wurden.

### 3.2 Glaukomformen

Bei 181 der operierten Augen lag ein primäres Offenwinkelglaukom vor. Die Diagnose eines Normaldruckglaukoms, einer Sonderform des Offenwinkelglaukoms, wurde in 23 Fällen gestellt. Unter den Sekundärglaukomen war das Pseudoexfoliationsglaukom am häufigsten vertreten (103 Augen), gefolgt vom Pigmentdispersionsglaukom (5 Augen) und dem traumatischen Sekundärglaukom (2 Augen). In drei Fällen wurde ein spätjuveniles Glaukom mit dysgenetischem Kammerwinkel als Glaukomform diagnostiziert. Die genaue

Verteilung der verschiedenen Glaukomformen auf die Operationsverfahren stellt Tabelle 3 dar.

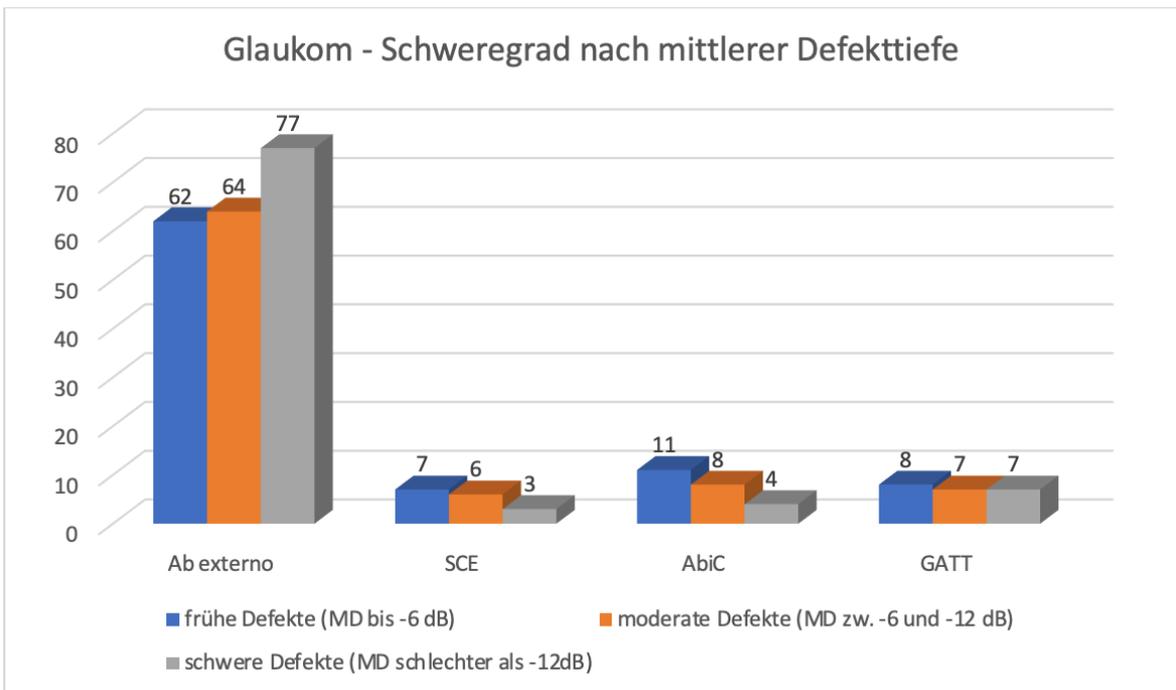
Glaukomform	Gruppe I (n=250)	Gruppe II (n=18)	Gruppe III (n=25)	Gruppe IV (n=24)	Insgesamt (n=317)
	Kanaloplastik ab externo	Kanaloplastik mit SCE	Kanaloplastik ab interno	GATT	
Primäres Offenwinkel- glaukom, n (%)	140 (56,0)	8 (44,4)	16 (64,0)	17 (64,0)	181 (57,1)
Pseudoexfolia- tionsglaukom, n (%)	86 (34,4)	9 (50,0)	4 (16,7)	4 (16,0)	103 (32,5)
Normaldruck- glaukom, n (%)	15 (6,0)	1 (5,6)	5 (20,0)	2 (8,3)	23 (7,3)
Pigmentdisper- sionsglaukom, n (%)	5 (2,0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	5 (1,6)
Traumatisches Sekundär- glaukom, n (%)	2 (0,8)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (0,6)
Spätjuveniles Glaukom (dysg. KW), n (%)	2 (0,8)	0 (0)	0 (0)	1 (4,2)	3 (0,9)

**Tab. 3:** Präoperativ diagnostizierte Glaukomform, n= Anzahl an Patientenaugen

### 3.3 Gesichtsfelduntersuchungen

In der Gruppe der Patienten, die eine Kanaloplastik ab externo erhielten, lag die mittlere Defekttiefe (MD) präoperativ im Mittel bei -10,23 dB (n= 203, SA +/- 6,36 dB). In dieser Gruppe gab es vergleichsweise viele Patienten mit bereits schweren Gesichtsfelddefekten. Patienten, welche eine Implantation eines Stegmann Canal Expanders erhielten, hatten einen durchschnittlichen MD-Wert von -8,56 dB vorzuweisen (n=16, SA +/- 4,84 dB). In der Kanaloplastik ab interno-Gruppe lag die durchschnittliche mittlere Defekttiefe bei -7,07 dB (n=23, SA +/- 5,0 dB).

Knapp die Hälfte der Patienten in dieser Gruppe hatten präoperativ lediglich frühe Defekte im Rahmen der perimetrischen Untersuchung (siehe Abb. 7). In der Gruppe der Patienten mit einer GATT-Operation im Verlauf lag der MD-Wert bei -11,21 dB (n=22, SA +/- 8,44 dB).



**Abb. 7:** Schweregrad der Glaukomschädigung, eingeteilt nach MD-Wert in Anlehnung an die Hodapp-Parish-Anderson-Kriterien (diese beinhalten neben der MD noch weitere Kriterien, die für die Einteilung in dieser Grafik nicht berücksichtigt wurden).<sup>100</sup>

### 3.4 Antiglaukomatöse Voreingriffe

Von den 317 operierten Augen waren 135 (42,6%) bereits mindestens einmal mittels Lasereingriff oder Operation antiglaukomatös vorbehandelt worden. Mit 113 Eingriffen an 78 Augen wurde als häufigster Voreingriff eine selektive Lasertrabekuloplastik am beobachteten Patientenkollektiv durchgeführt. Die Trabekulektomie war mit 35 Operationen an 31 Patienten der am zweithäufigsten erfolgte augeninnendrucksenkende Voreingriff, gefolgt von der Zyklphotokoagulation mit 27 Eingriffen an 23 Augen. Insgesamt hatten 70 Patienten einen Voreingriff vorzuweisen, bei 41 Patienten wurden bereits zwei, bei 16 Patienten drei Voreingriffe durchgeführt. Sechs Patienten waren vierfach antiglaukomatös vortherapiert worden und jeweils ein Patient hatte fünf bzw. sechs Voreingriffe über sich ergehen lassen. Tabelle 4 schlüsselt die Voreingriffe für die verschiedenen Operationsverfahren auf.

	Gruppe I (n=250)	Gruppe II (n=18)	Gruppe III (n=25)	Gruppe IV (n=24)	Insgesamt (n=317)
Operationen	Kanaloplastik ab externo	Kanaloplastik mit SCE	Kanaloplastik ab interno	GATT	
Trabekulek- tomie, n (%)	26 (12,0)	4 (22,0)	0 (0)	1 (4,2)	31 (11,0)
Tiefe Sklerektomie, n (%)	4 (1,6)	1 (5,6)	0 (0)	0 (0)	5 (1,6)
SLT, n (%)	67 (26,8)	5 (27,8)	3 (8,3)	6 (25,0)	78 (24,6)
ALT, n (%)	9 (3,6)	1 (5,6)	1 (4,0)	2 (8,3)	13 (4,1)
CPC, n (%)	22 (8,8)	1 (5,6)	0 (0)	0 (0)	23 (7,3)
YAG-IT/IE, n (%)	16 (6,4)	1 (5,6)	0 (0)	0 (0)	17 (5,4)
Sklerothalamek- tomie, n (%)	6 (2,4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	6 (1,9)
Andere Glaukom-OPs*, n (%)	7 (2,8)	2 (11,1)	0 (0)	0 (0)	9 (2,8)

**Tab. 4:** Antiglaukomatöse Voreingriffe, n= Anzahl an Augen, die mit diesem Voreingriff mindestens einmalig vorbehandelt wurden. \*Hierunter fällt jeweils ein Patient mit Kanaloplastik ab externo, Kanaloplastik ab interno, Kanaloplastik mit Stegmann Canal Expander, Viscocanalostomie, Implantation eines Baerveldt-Implantats, Trabekelwerksaspiration sowie drei Patienten mit Z.n. Laser- bzw. chirurgischen Glaukomeingriffen ohne nähere Bezeichnung.

### 3.5 Augenvorerkrankungen

Abgesehen von einem Offenwinkelglaukom als Grunderkrankung sowie einer vorliegenden Katarakt, litten die Patienten teilweise an verschiedenen anderen Augenvorerkrankungen. Diese werden in Tabelle 5 aufgeführt.

	Gruppe I (n=250)	Gruppe II (n=18)	Gruppe III (n=25)	Gruppe IV (n=24)	Insgesamt (n=317)
Vorer- Krankungen	Kanaloplastik ab externo	Kanaloplastik mit SCE	Kanaloplastik ab interno	GATT	
AMD					
- nicht ex- sudativ	8	1	1	0	10
- exsudativ	5	1	0	1	7
Z.n. Venenver- schluss	2	1	2	0	5

Vorerkrankungen	Gruppe I (n=250) Kanaloplastik ab externo	Gruppe II (n=18) Kanaloplastik mit SCE	Gruppe III (n=25) Kanaloplastik ab interno	Gruppe IV (n=24) GATT	Insgesamt (n=317)
Z.n. ppV	6	0	1	1	8
Z.n. Amotio	3	0	1	0	4
Gliose	4	0	0	0	4
Myopia magna	1	2	0	0	3
HH-Degeneration/ Dystrophie	3	0	0	0	3
AION	2	0	0	0	2
DMÖ	2	0	0	0	2
Z.n. Bulbus-Trauma	2	0	0	0	2
AT-Unverträglichkeit	64	1	8	3	76

**Tab. 5:** Bestehende Vorerkrankungen an den operierten Augen.

Zudem gab es Vorerkrankungen, die jeweils nur an einem Auge bestanden, und im Folgenden aufgezählt werden: Retinopathia centralis serosa, Amblyopie, Irvine-Gass-Syndrom, Z.n. Aderhautruptur, vitreoretinales Traktionssyndrom, Embryotoxon und Fuchs-Heterochromie-Iridozyklitis.

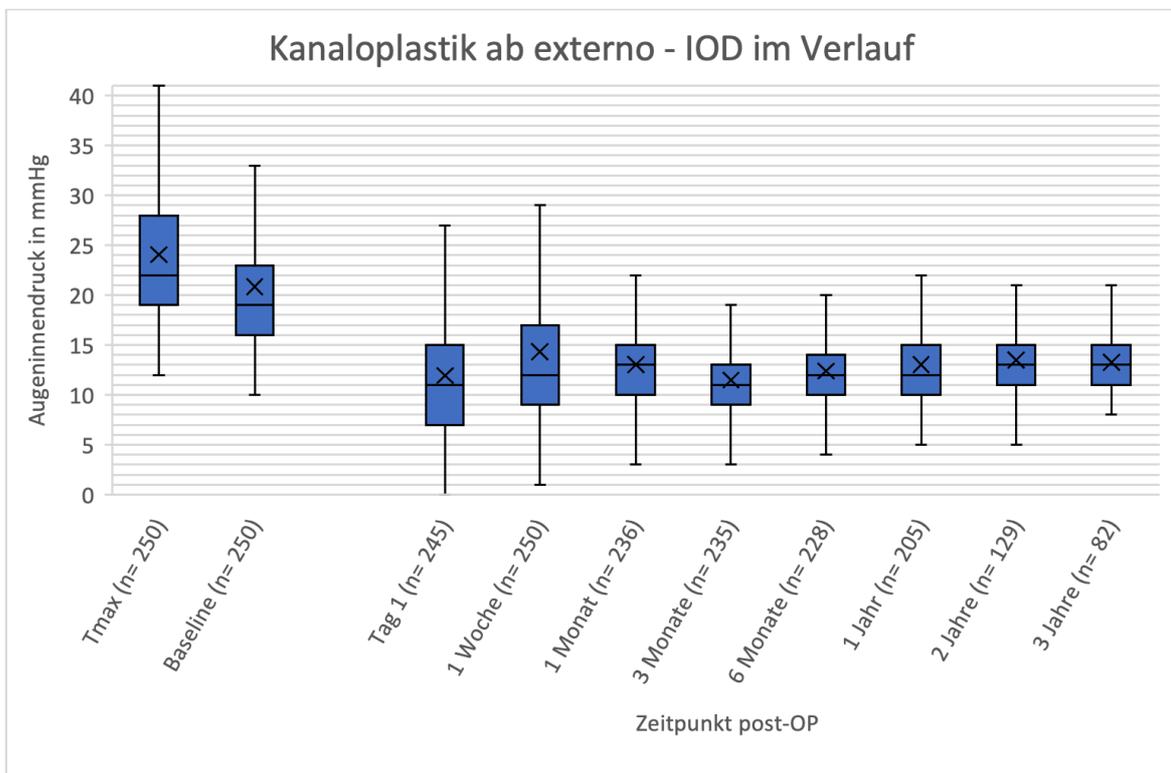
Weiterhin wurden die Patienten erfasst, die unter einer Unverträglichkeit auf mindestens eine Sorte von augeninnendrucksenkenden Augentropfen litten. Betroffen waren hiervon 76 der operierten Augen. Der prozentual höchste Anteil entfiel auf die Gruppe der Patienten, die eine Kanaloplastik ab interno erhielten, von denen insgesamt 32,0% unter einer Unverträglichkeit litten, gefolgt von der Gruppe der Patienten mit Kanaloplastik ab externo im Verlauf (25,6%).

### 3.6 Kanaloplastik ab externo

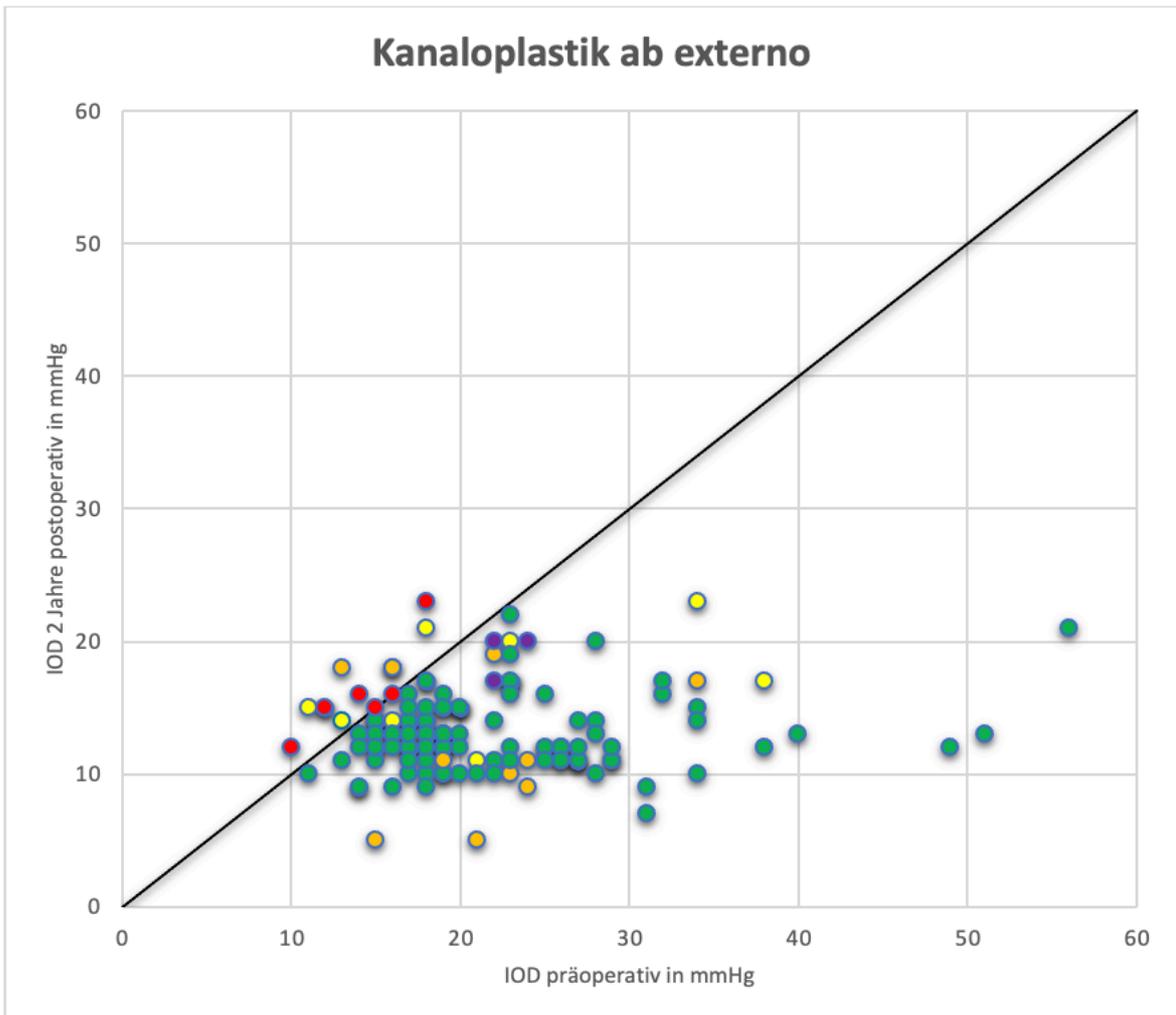
#### 3.6.1 Augeninnendruckwerte im Verlauf

Der mittlere Baseline-Augeninnendruck in dieser Gruppe betrug  $20,82 \pm 7,2$  mmHg (n= 250). Ab dem ersten postoperativen Tag (mittlerer IOD= 11,98 mmHg) und zu allen späteren Kontrollen lag der Augeninnendruck signifikant ( $p < 0,001$ ) unter dem Ausgangswert. Ein Jahr nach der Operation betrug der IOD im Mittel  $13,05 \pm 4,0$

mmHg (n= 205), woraus sich eine durchschnittliche Augeninnendrucksenkung von 37,3% verglichen zum Baseline-IOD ergibt. Zwei Jahre nach der Operation wurde ein mittlerer Augeninnendruck von  $13,47 \pm 3,4$  mmHg (n= 129) und nach drei Jahren von  $13,16 \pm 3,1$  mmHg (n= 82) erhoben, was einer prozentualen Augeninnendrucksenkung von 35,3% (Zweijahreswert) bzw. 36,0% (Dreijahreswert) entspricht. Abbildung 8 gibt den Augeninnendruckverlauf zu den verschiedenen Messzeitpunkten wieder. Abbildung 9 stellt die präoperativen Augeninnendruckwerte (Baseline) dem Zweijahreskontrollintervall gegenüber.



**Abb. 8:** Boxplot: IOD im Verlauf nach Kanalplastik ab externo.



**Abb. 9:** Scatterplot: Vergleich IOD prä-OP und zwei Jahre post-OP.

Punkte oberhalb der Linie: IOD höher als Ausgangs-IOD

Grüne Punkte: IOD niedriger als Ausgangs-IOD ohne Lokalthherapie oder Reoperation

Rote Punkte: IOD höher oder wie präoperativ ohne Lokalthherapie oder Reoperation

Gelbe Punkte: IOD unter augeninnendrucksenkender Lokalthherapie nach 2 Jahren

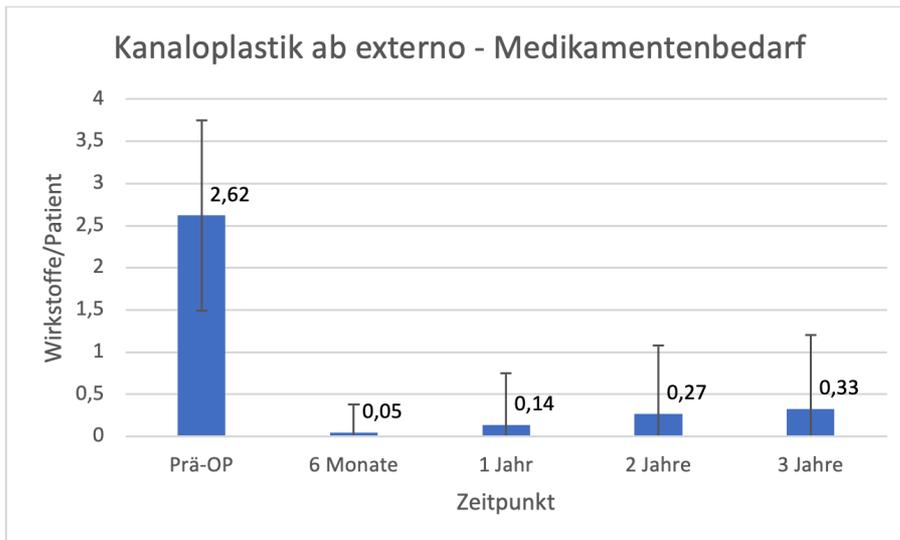
Orangene Punkte: IOD nach Re-OP

Lila Punkte: IOD unter Medikation und nach Re-OP

### 3.6.2 Medikamentenbedarf

Der mittlere Medikamentenbedarf vor Kanaloplastik ab externo lag bei  $2,62 \pm 1,13$  Wirkstoffen pro Patient. Präoperativ bekamen 45 Personen ein oder kein antiglaukomatöses Medikament (17,9%). Eine Glaukomtherapie mit zwei oder drei Wirkstoffen erhielten 146 Patienten (58,5%), mit vier oder fünf Wirkstoffen 59 der Patienten (23,6%). Der Bedarf an Antiglaukomatosa konnte signifikant auf durchschnittlich  $0,14 \pm 1,17$  Wirkstoffe pro Patient nach einem Jahr gesenkt werden ( $p < 0,001$ ). Mit 189 von 205 Patienten war der überwiegende Teil der Patienten zu diesem Zeitpunkt frei von einer augeninnendrucksenkenden Medikation (92,2%). Nach zwei Jahren lag der Medikamentenverbrauch pro Patient im Mittel bei  $0,27 \pm$

0,81 Wirkstoffen ( $p < 0,001$ ). 111 von 129 Patienten waren medikamentenfrei, was einem Anteil von 86,0% entspricht. Nach drei Jahren stieg der Medikamentenverbrauch leicht auf durchschnittlich  $0,33 \pm 0,77$  Wirkstoffe an ( $p < 0,001$ ), wobei 15 von 82 operierten Patienten eine medikamentöse Glaukomtherapie erhielten, 81,7% der Patienten waren auch nach drei Jahren frei von einer medikamentösen Therapie (siehe Abb. 10).



**Abb. 10:** Medikamentenbedarf nach Kanaloplastik ab externo im Verlauf. Die Fehlerbalken geben +/- eine Standardabweichung (= SA) an.

### 3.6.3 Augeninnendrucksenkende Reoperationen und Laserungen

Der häufigste Eingriff, der aufgrund einer nicht ausreichenden Augeninnendruckkontrolle im Verlauf durchgeführt werden musste, war die Rekanaloplastik (15 Eingriffe). Hierbei wird der Skleradeckel von außen wiedereröffnet, der Schlemm'sche Kanal erneut mit Viscoelastikum dilatiert, der Faden in die Vorderkammer eingebracht (Trabekulotomie) und dann entfernt. Ein weiteres, nach einer Kanaloplastik ab externo verwendetes drucksenkendes Verfahren ist die Goniopuncture, bei der mittels YAG-Laser das Descemetfenster eröffnet wird, um einen stärkeren drucksenkenden Effekt zu erzielen. Dieser Eingriff wurde bei sechs der Patienten durchgeführt. In drei Fällen erfolgte eine Ahmed Glaucoma Valve-Implantation aufgrund von Therapieversagen. Des Weiteren erhielten zwei Patienten eine Zyklphotokoagulation und ein Patient eine GATT. Insgesamt wurden somit an 21 Patienten (8,4%) 27 augeninnendrucksenkende Folgeeingriffe innerhalb des Beobachtungszeitraums vollzogen. Am häufigsten

erfolgte ein Revisionseingriff im zweiten postoperativen Jahr. Tabelle 6 gibt eine Übersicht zu Zeitpunkt und Art des Revisionseingriffes.

	< 6 Monate post-OP	6-12 Monate post-OP	12-24 Monate post-OP	24-36 Monate post-OP	Insgesamt
Rekanaloplastik, n	3	4	6	2	15
Goniotomy, n	1	2	3		6
Ahmed-Valve, n			2	1	3
CPC, n			2		2
GATT, n	1				1
Alle Verfahren, n	5	6	13	3	27

**Tab. 6:** Häufigkeit und Zeitpunkt eines IOD-senkenden Revisionseingriffes, n= Anzahl operierter Augen

### 3.6.4 Operationsnebenwirkungen und postoperative Besonderheiten/Komplikationen

Insgesamt kam es an 89 der operierten Augen (35,6%) postoperativ zu einem Hyphäma, wobei es sich in 49 Fällen um ein Mikrohyphäma und in 40 Fällen um ein Makrohyphäma handelte. Ein kurzfristiger, mehr oder weniger stark ausgeprägter Steroid-Response trat 62-mal (24,8%) auf und machte das Absetzen der postoperativen steroidal Lokaltherapie erforderlich. An 63 (25,2%) der operierten Augen bestand in den ersten Tagen nach der Operation ein Hornhautepithelödem, welches sich in allen Fällen innerhalb weniger Tage zurückbildete. Ein Cheese-wiring-Phänomen wurde an 51 Augen (20,4%) im postoperativen Verlauf beobachtet. Diese Patientengruppe wurde separat auf einen potenziell augeninnendruckbeeinflussenden Effekt durch die Fadenextrusion untersucht (s.u.). Hypotonien traten innerhalb der ersten postoperativen Woche in 25 Fällen auf (10,0%), wobei bei einem Patienten eine schwere Hypotonie mit flacher Vorderkammer bestand. Nach einem Monat hatte sich in 23 Fällen der Augeninnendruck normalisiert. Bei zwei Patienten persistierte die Hypotonie. In einem der beiden Fälle bestanden hypotone aber noch tolerierbare Augeninnendruckwerte bis sechs Monate postoperativ fort, im anderen Fall wurde aufgrund der ausgeprägten Hypotonie eine Operation notwendig (s.u.). Zwei Patienten entwickelten erst nach einem Monat eine passagere Hypotonie, die nach drei bzw. neun Monaten nicht mehr bestand. Bei zwei Patienten (0,8%) kam es zu

einer Aderhaut-Amotio, die sich in beiden Fällen innerhalb des ersten postoperativen Monats vollständig regredient zeigte. Zu einer peripheren umschriebenen Descemetabhebung kam es bei 22 (8,8%) der operierten Augen, diese bildete sich jeweils ohne Intervention innerhalb der ersten postoperativen Wochen zurück. Eine Fibrinreaktion konnte in elf Fällen (4,4%), ein Seidelphänomen in zwölf Fällen (4,8%) beobachtet werden. Trat letzteres auf, erhielten die Patienten eine Verbandskontaktlinse. Bei fünf Augen mit Seidelphänomen bestand auch eine Hypotonie. An sieben Augen zeigten sich vordere Synechien, die operativ versorgt wurden (s.u.). In drei Fällen bestand direkt postoperativ eine nennenswerte Erosio (1,2%), die in den ersten zwei Wochen komplikationslos abheilte. Drei Patienten (1,2%) entwickelten in den ersten Wochen nach der Operation ein zystoides Makulaödem, wobei sich dieses in zwei der operierten Augen innerhalb der ersten drei Monate ohne weitere Therapie vollständig resorbierte. In einem Fall wurden intravitreale Injektionen notwendig. Zwei Patienten erlitten operationsbedingt einen kleinen Irisdefekt. Ein wipe-out Phänomen trat an keinem der operierten Augen auf.

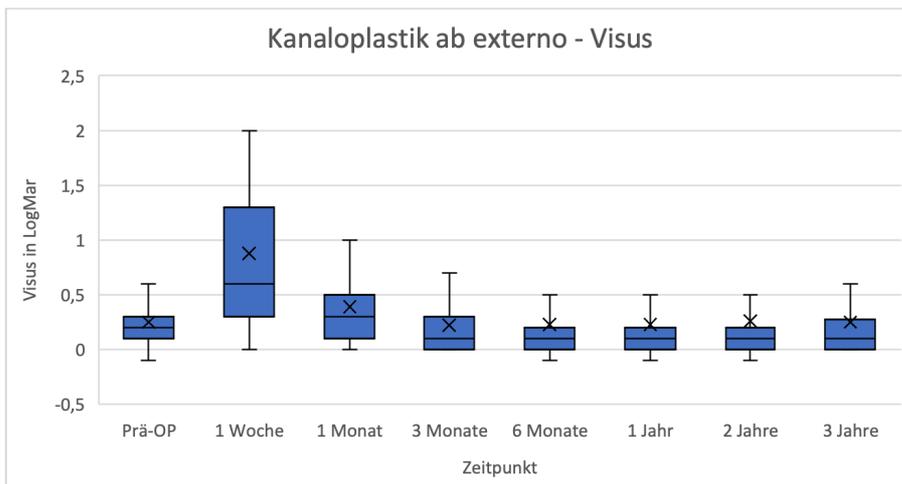
### **3.6.4.1 Operative Eingriffe aufgrund postoperativer**

#### **Komplikationen**

In elf Fällen (4,4%) war ein konservatives Therapieregime zur Behebung einer Komplikation nicht ausreichend, sodass eine Operation notwendig wurde. Sieben Patienten erhielten in den ersten Monaten nach der Operation einen kleineren Revisionseingriff mit Synechiolyse bei vorderen Synechien. In einem Fall erfolgte hierbei zusätzlich eine periphere Iridektomie. Aufgrund eines ausgeprägten Hyphämas wurde bei einem Patienten eine Vorderkammer-Spülung durchgeführt. In einem Fall musste eine Pars plana Vitrektomie im Rahmen einer Glaskörperblutung erfolgen. Aufgrund einer Undichtigkeit im Skleradeckel wurde bei einem Patienten mit Hypotonie und Aderhautschwellung eine Bulbustonisierung mit Tutoplastaufnäher notwendig und in einem weiteren Fall kam es zu einer Einklemmung der Iris in das Sklerafenster, sodass eine Skleradeckeleröffnung mit peripherer Iridektomie als Revisionseingriff vollzogen wurde.

### 3.6.5 Entwicklung der Sehschärfe

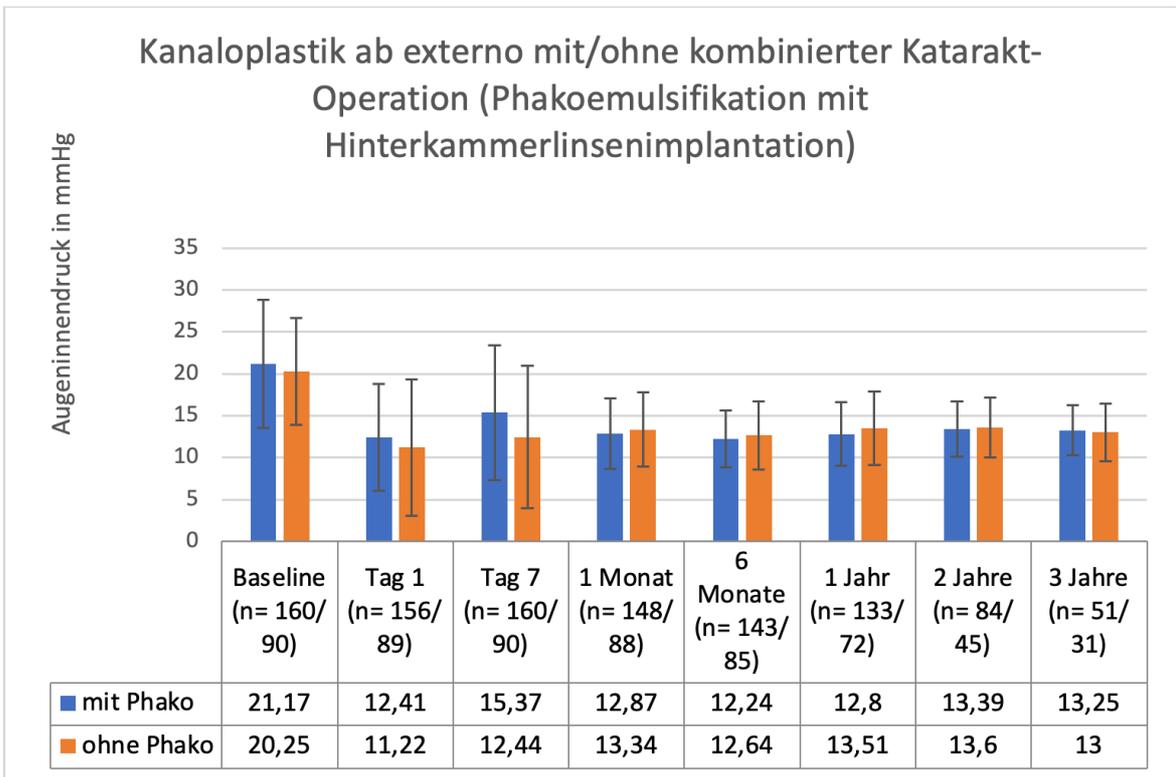
Der präoperativ zuletzt gemessene mittlere logarithmierte Visus der Patienten, die im Verlauf eine Kanalplastik ab externo erhielten, lag bei  $0,26 \pm 0,43$ . Eine Woche nach dem Eingriff zeigte sich der mittlere logarithmierte Visus mit  $0,87 \pm 0,70$  signifikant verschlechtert zum Ausgangsvisus ( $p < 0,001$ ). Einen Monat post operationem betrug dieser  $0,38 \pm 0,44$  und rangierte damit noch etwas unterhalb der Ausgangsvisuswerte, jedoch nicht mehr signifikant ( $p = 0,061$ ). Zum Kontrolltermin nach drei Monaten verbesserte sich der Visus auf Werte von  $0,23 \pm 0,38$  ( $p = 0,287$ ). Auch zu den weiteren Kontrollen zwischen sechs Monaten und drei Jahren postoperativ bestand kein signifikanter Unterschied ( $p > 0,05$ ) zum Ausgangsvisus (siehe Abb.11).



**Abb. 11:** Boxplot: Darstellung des Visusverlaufs nach Kanalplastik ab externo. Die Fehlerbalken geben die SA an.

### 3.6.6 Kanalplastik ab externo mit/ohne Katarakt-Operation

Um einen möglichen Einfluss einer Phakoemulsifikation mit Implantation einer Hinterkammerlinse auf den augeninnendrucksenkenden Effekt der Kanalplastik ab externo zu evaluieren, wurden die Patienten in eine Gruppe mit kombinierter und ohne kombinierte Linsenoperation unterteilt und die Augeninnendruckwerte verglichen. Direkt postoperativ lag der Augeninnendruck in der Gruppe mit kombinierendem Eingriff signifikant höher ( $p = 0,039$ : 1. Tag post-OP) als in der Gruppe ohne Katarakt-Operation. Zu den Kontrollen ab einem Monat postoperativ lag der Augeninnendruck in beiden Gruppen stets in ähnlichen Bereichen (siehe Abb. 12). Ein signifikanter Unterschied in der Augeninnendrucksenkung war nicht mehr festzustellen ( $p > 0,05$ ).

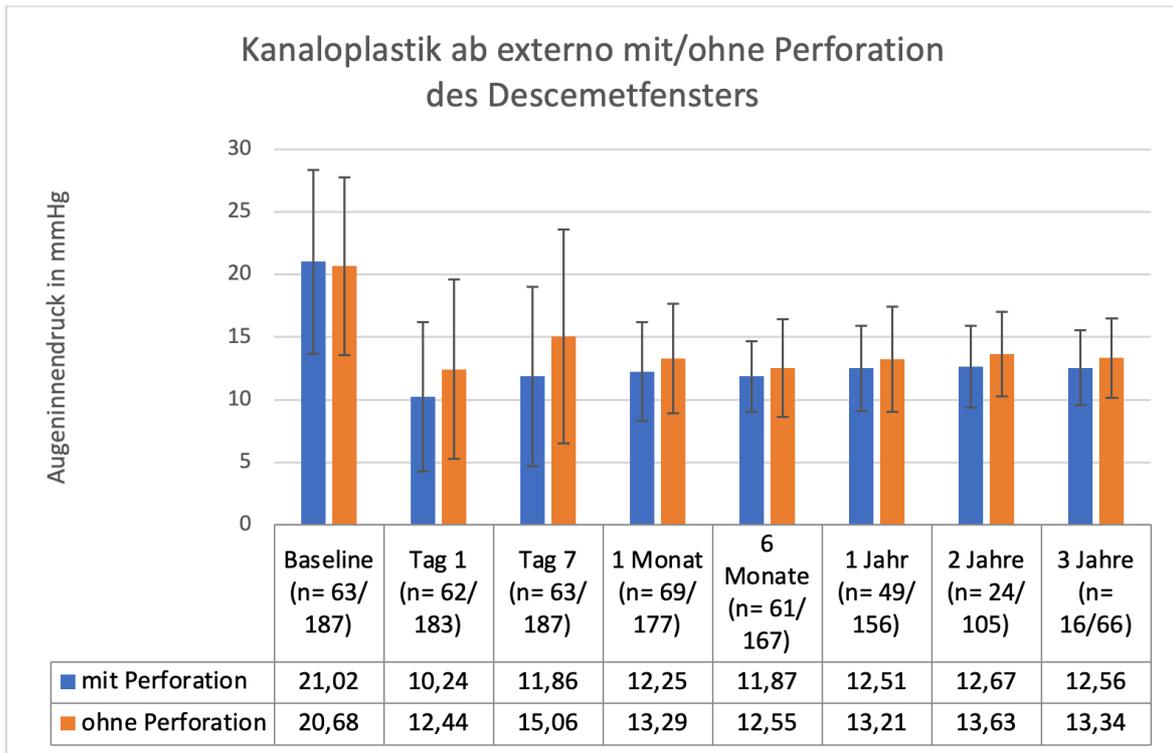


**Abb. 12:** Gegenüberstellung der IOD-Werte bei Kanaloplastik ab externo mit und ohne kombinierter Katarakt-Operation. Die Fehlerbalken entsprechen +/- eine SA.

### 3.6.7 Kanaloplastik ab externo mit/ohne Perforation des Descemetfensters

Es erfolgte eine Gegenüberstellung der Gruppe an Patienten, bei denen es im Rahmen der Operation zu einer Perforation des Descemetfensters kam ( $n = 63$ ), mit der Patientengruppe ohne eine solche ( $n = 187$ ). Postoperativ konnte in der ersten Gruppe zu allen Kontrollterminen eine stärkere Augeninnendrucksenkung im Vergleich zur zweiten Gruppe festgestellt werden (Abb. 13). Bei diesem beobachteten Effekt handelte es sich lediglich um einen Trend, eine statistische Signifikanz bestand nur direkt postoperativ ( $p = 0,007$ ). Zu den Kontrollen nach einem Monat ( $p = 0,154$ ), nach sechs Monaten ( $p = 0,347$ ) und einem Jahr ( $p = 0,219$ ) bestand kein statistisch signifikanter Unterschied, dies galt auch für die Kontrollen nach zwei Jahren ( $p = 0,058$ ) und drei Jahren ( $p = 0,170$ ). Die Rate an Patienten, bei denen ein erneuter drucksenkender Eingriff durchgeführt wurde, lag in der Gruppe mit Perforation des Descemetfensters bei 4,8%, in der Gruppe ohne bei 10,2%. Postoperative Hypotonien traten in der ersten Gruppe in acht Fällen (12,7%) auf, wobei es zu einer schweren Hypotonie mit undichtem Skleradeckel kam, die einen

Revisionseingriff mit Bulbustonisierung notwendig machte. In der zweiten Gruppe kam es in 17 (9,1%) Fällen zu einer postoperativen Hypotonie.

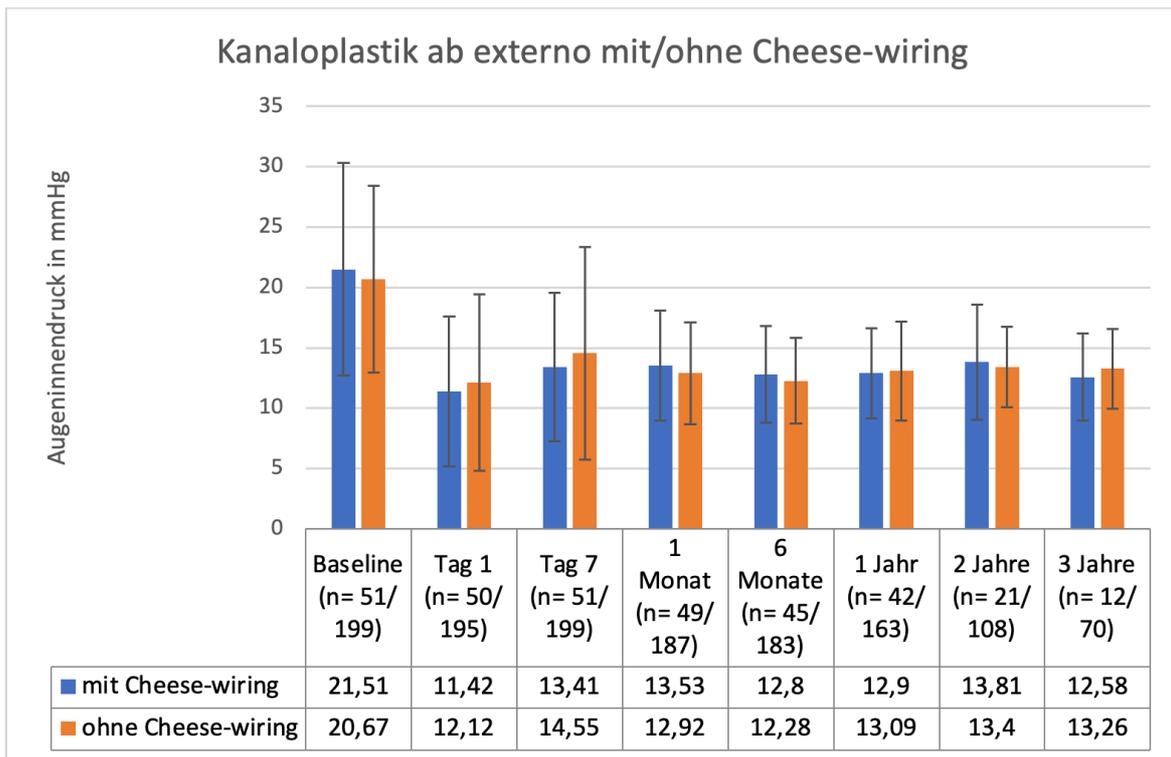


**Abb. 13:** Gegenüberstellung der IOD-Werte bei Kanaloplastik ab externo mit und ohne Perforation des Descemetfensters.

### 3.6.8 Kanaloplastik ab externo mit/ohne Cheese-wiring

Im Rahmen eines Cheese-wiring-Phänomens kommt es zu einer partiellen Trabekulotomie, bedingt durch eine starke Fadenspannung. Um einen zusätzlichen augeninnendrucksenkenden Effekt dieses Phänomens zu eruieren, erfolgte eine Unterteilung der Patienten in eine Gruppe mit und eine ohne Cheese-wiring.

Dieses trat an 51 (20,4%) der operierten Augen auf: in sechs Fällen bereits intraoperativ, an 22 Augen innerhalb der ersten postoperativen Woche, in zehn Fällen im ersten postoperativen Monat und an weiteren neun operierten Augen in einem Zeitraum bis zu sechs Monaten postoperativ. An den restlichen vier Augen kam es zwischen der Halbjahres- und der Zweijahreskontrolle zum Cheese-wiring. In zwölf Augen bildete sich die Fadenextrusion über ein bis zwei Uhrzeiten, in 30 Fällen über drei bis vier und in neun Augen über fünf bis sechs Uhrzeiten aus. Im Vergleich der Gruppen mit (n= 51) und ohne Cheese-wiring (n= 199) bestand zu keinem postoperativen Zeitpunkt ein signifikanter Unterschied in der Augeninnendrucksenkung ( $p > 0,05$ ; siehe Abb. 14).

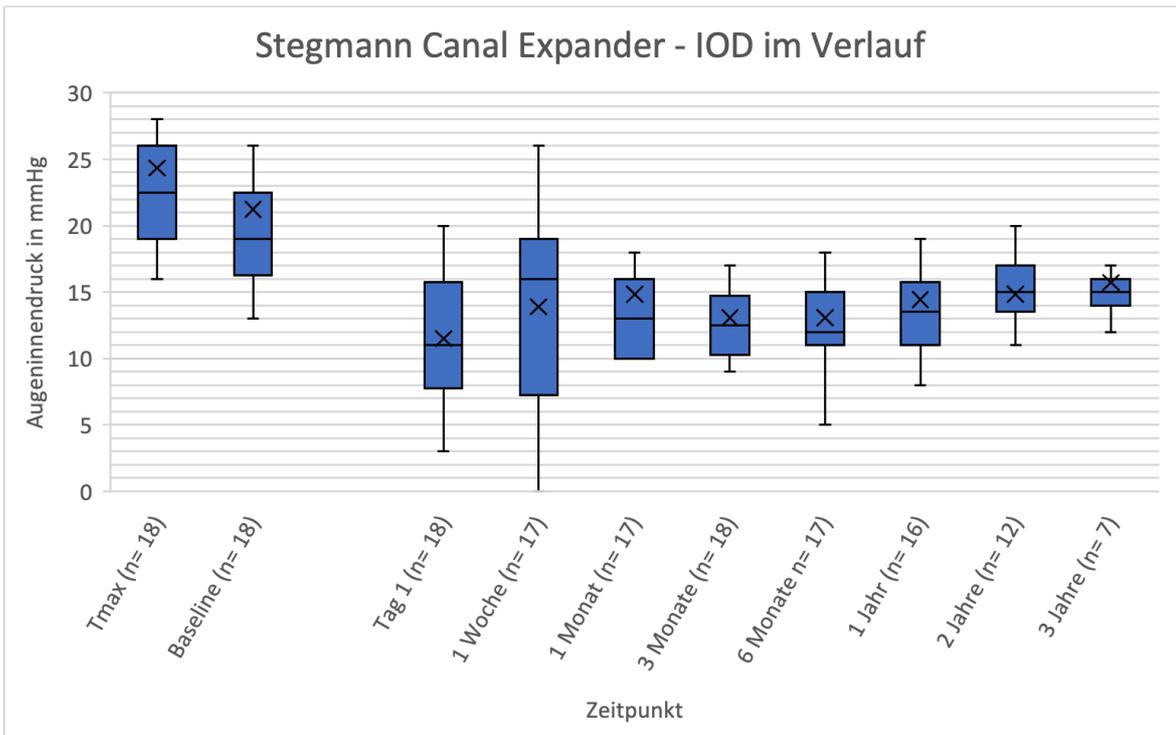


**Abb. 14:** Gegenüberstellung IOD-Werte bei Kanaloplastik ab externo mit und ohne Auftreten eines Cheese-wirings.

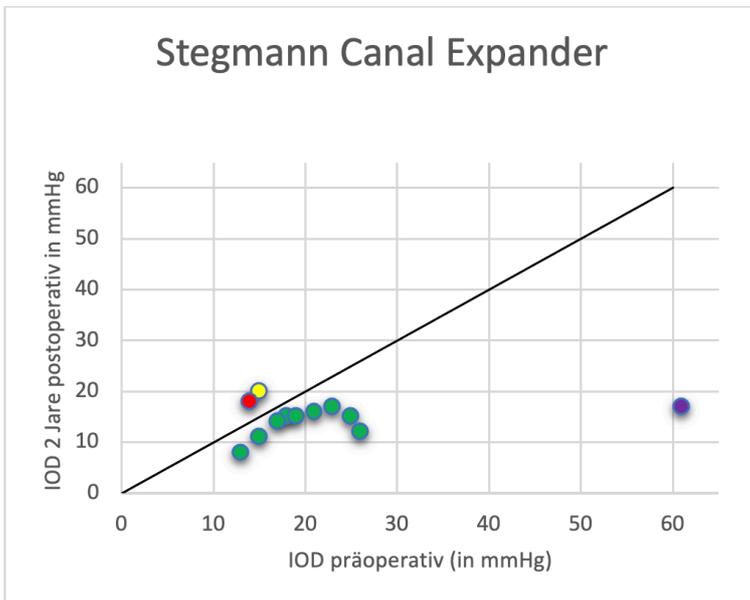
### 3.7 Kanaloplastik mit Stegmann Canal Expander

#### 3.7.1 Augeninnendruckwerte im Verlauf

Der mittlere Augeninnendruck vor der Operation (Baseline) lag bei  $21,22 \pm 10,6$  mmHg und konnte zu allen postoperativen Kontrollterminen bis zwei Jahre nach der OP signifikant zum Ausgangswert gesenkt werden. Nach sechs Monaten wurde ein mittlerer Augeninnendruck von  $13,06 \text{ mmHg} \pm 4,5 \text{ mmHg}$  ( $n= 17$ ,  $p= 0,003$ ) erhoben, was einer prozentualen Augeninnendrucksenkung von 38,5% gleichkommt. Zum Einjahreskontrolltermin betrug der mittlere Augeninnendruck  $14,44 \pm 4,7 \text{ mmHg}$  ( $n= 16$ ,  $p= 0,012$ ), nach zwei Jahren  $14,83 \pm 3,3 \text{ mmHg}$  ( $n= 12$ ,  $p= 0,028$ ), entsprechend einer Augeninnendrucksenkung von 32,0 bzw. 31,1% im Vergleich zum Baseline-IOD. In zehn von zwölf Augen lag der Augeninnendruck niedriger als der Ausgangs-IOD (Abb. 16). Drei Jahre postoperativ wurde ein mittlerer Augeninnendruck von  $15,71 \pm 3,6 \text{ mmHg}$  ( $n= 7$ ) gemessen, dieser lag somit 26,0% unter dem Ausgangswert (Abb. 15). Auf die Berechnung einer statistischen Signifikanz wurde zum Dreijahreskontrollintervall aufgrund der kleinen Stichprobengröße verzichtet.



**Abb. 15:** Boxplot: IOD im Verlauf nach Kanaloplastik mit Stegmann Canal Expander.

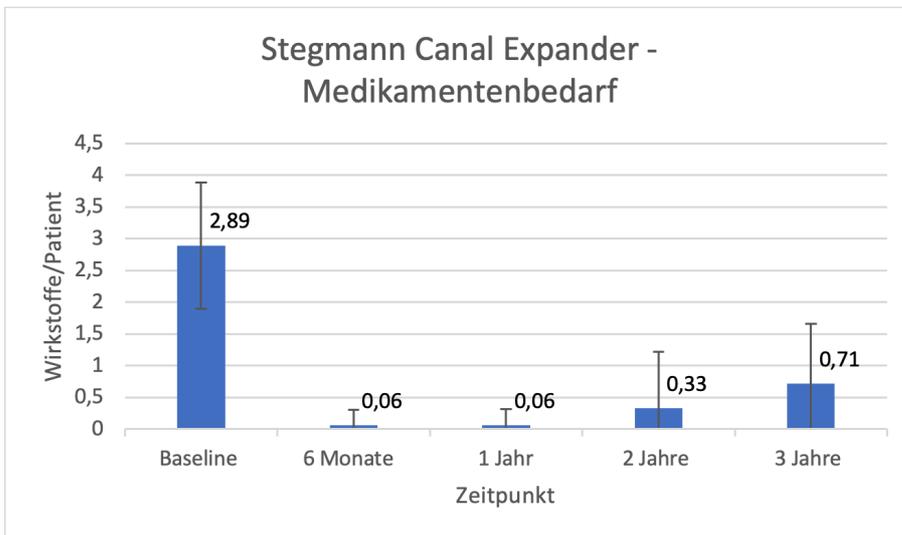


**Abb. 16:** Scatterplot Stegmann Canal Expander. (Legende siehe Abb. 9, S. 37)

### 3.7.2 Medikamentenbedarf

Präoperativ wurde ein Medikamentenbedarf von  $2,89 \pm 1,0$  Wirkstoffe pro Patient erhoben. Dieser konnte im postoperativen Verlauf signifikant auf  $0,06 \pm 0,25$  nach einem Jahr gesenkt werden ( $p < 0,001$ ). Zum Zweijahreskontrollintervall lag der mittlere Medikamentenbedarf bei  $0,33 \pm 0,89$  ( $p = 0,002$ ), wobei zwei Patienten eine

antiglaukomatöse Lokalthherapie erhielten (siehe Abb. 16). Zum Dreijahresintervall betrug der Wirkstoffbedarf  $0,71 \pm 0,95$  pro Patient (siehe Abb. 17).



**Abb. 17:** Medikamentenbedarf nach Kanaloplastik mit Stegmann Canal Expander im Verlauf.

### 3.7.3 Postoperative Nebenwirkungen/Komplikationen und Reoperationen bei Therapieversagen

Insgesamt neun Patienten entwickelten postoperativ ein Hyphäma (50%), hierunter fielen vier Makrohyphämata und fünf Mikrohyphämata. In vier Fällen kam es zu einem Steroid-Response. Eine kurzzeitige, reversible Abhebung der Descemetmembran konnte bei zwei Patienten, ein Hornhautepithelödem an drei der operierten Augen beobachtet werden. Bei zwei Patienten lagen am ersten postoperativen Tag hypotone Augeninnendruckwerte vor, die eine Woche postoperativ nicht mehr bestanden. In einem der beiden Fälle trat zudem eine Aderhautschwellung auf, diese zeigte sich nach etwas mehr als zwei Wochen vollständig regredient. Operative Maßnahmen wurden in keinem der beschriebenen Fälle mit postoperativen Nebenwirkungen notwendig.

An zwei der 18 mit Stegmann Canal Expandern operierten Patienten wurden augeninnendrucksenkende Folgeeingriffe durchgeführt. Eine Person wurde zunächst mit einer SLT-Laserung im Bereich der Expander therapiert, was ohne Erfolg blieb, sodass eine Rekanaloplastik durchgeführt wurde, diesmal mit Katheterisierung und Einlage eines Fadens. Der zweite Patient erhielt mehr als zwei Jahre postoperativ eine Zyklophotokoagulation.

### 3.7.4 Entwicklung der Sehschärfe

Der logarithmierte Visus vor dem Eingriff betrug  $0,19 \pm 0,18$ . Zum Untersuchungstermin eine Woche nach der Operation verschlechterte sich der Visus nicht signifikant auf Werte von  $0,40 \pm 0,31$ . Nach einem Monat konnte mit einem mittleren logarithmierten Visus von  $0,21 \pm 0,22$  eine Verbesserung der Sehschärfe auf Werte im Bereich des Ausgangsvisus festgestellt werden. Zu den folgenden postoperativen Kontrollen zwischen drei und zwölf Monaten lag der Visus zwischen  $0,11 \pm 0,18$  und  $0,13 \pm 0,16$ , nach zwei Jahren bei  $0,07 \pm 0,1$ . Es bestand keine postoperative signifikante Verschlechterung der Sehschärfe zum Ausgangswert ( $p > 0,05$ ). Der Visusverlauf kann dem Boxplot in Abb. 18 entnommen werden.

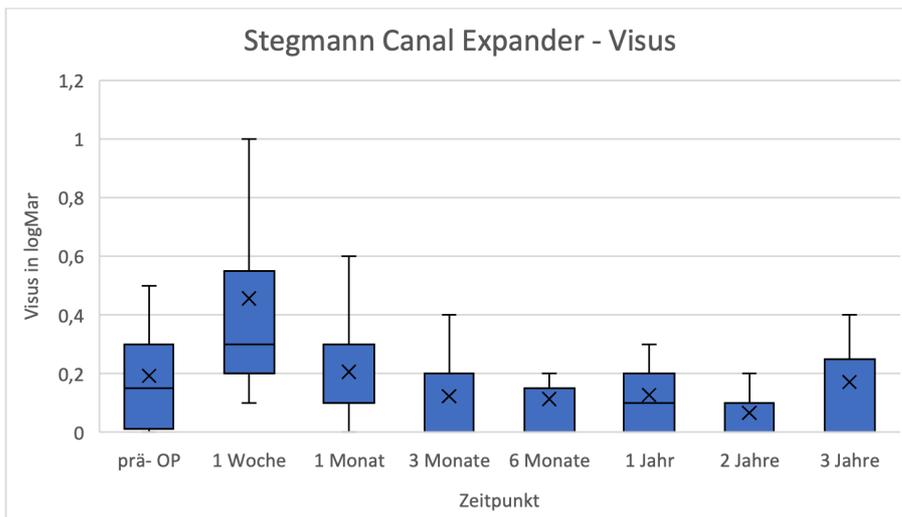


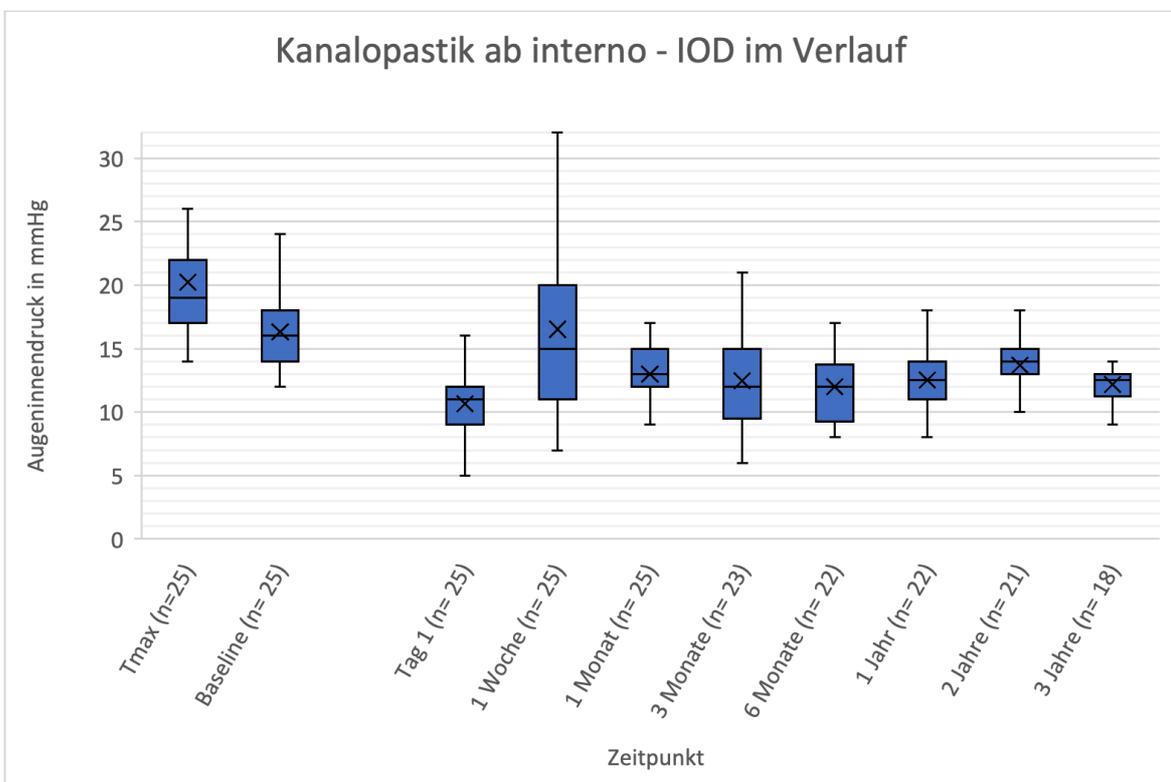
Abb. 18 Boxplot: Darstellung des Visusverlaufs nach Implantation eines SCE.

## 3.8 Kanaloplastik ab interno

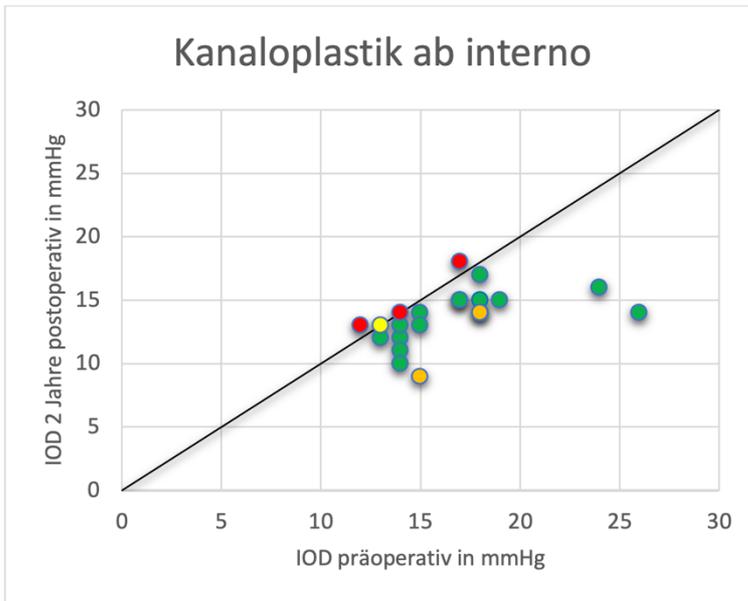
### 3.8.1 Augeninnendruckwerte im Verlauf

In der Gruppe der Patienten, die eine Kanaloplastik ab interno erhielten, war mit Ausnahme des Kontrollintervalls nach einer Woche zu allen Kontrollzeitpunkten eine signifikante Reduktion des Augeninnendrucks im Vergleich zum präoperativen Wert zu beobachten. Der mittlere Augeninnendruckwert vor der Operation lag bei  $16,32 \pm 3,2$  mmHg, der Tmax-Wert betrug 20,24 mmHg. Bereits einen Tag nach dem Eingriff war eine deutliche und signifikante Reduktion der Augeninnendruckwerte zum Baseline-IOD um 34,8% auf  $10,64 \pm 2,77$  mmHg ( $p < 0,001$ ) festzustellen. Der Augeninnendruck stieg kurzzeitig in der ersten

postoperativen Woche auf  $16,52 \pm 6,72$  mmHg an, lag jedoch nach einem Monat mit  $13,0 \pm 2,55$  mmHg wieder signifikant unter dem Baseline-IOD ( $p < 0,001$ ). Nach sechs Monaten wurde ein mittlerer Tensiwert von  $12,0$  mmHg  $\pm 3,24$  mmHg ( $p < 0,001$ ) und nach einem Jahr von  $12,55$  mmHg  $\pm 3,33$  ( $p < 0,001$ ) ermittelt. Zum Zweijahreskontrollintervall lag der Augeninnendruck mit  $13,67 \pm 2,15$  mmHg ( $p < 0,001$ ) etwas höher aber immer noch signifikant unterhalb des Ausgangs-IOD. Abbildung 20 stellt die präoperativen und die IOD-Werte der Zweijahreskontrolle gegenüber. Der mittlere IOD nach drei Jahren lag bei  $12,17 \pm 2,2$  mmHg ( $p < 0,001$ ) und somit 25,4% unter dem Baseline-Wert (Abb. 19).



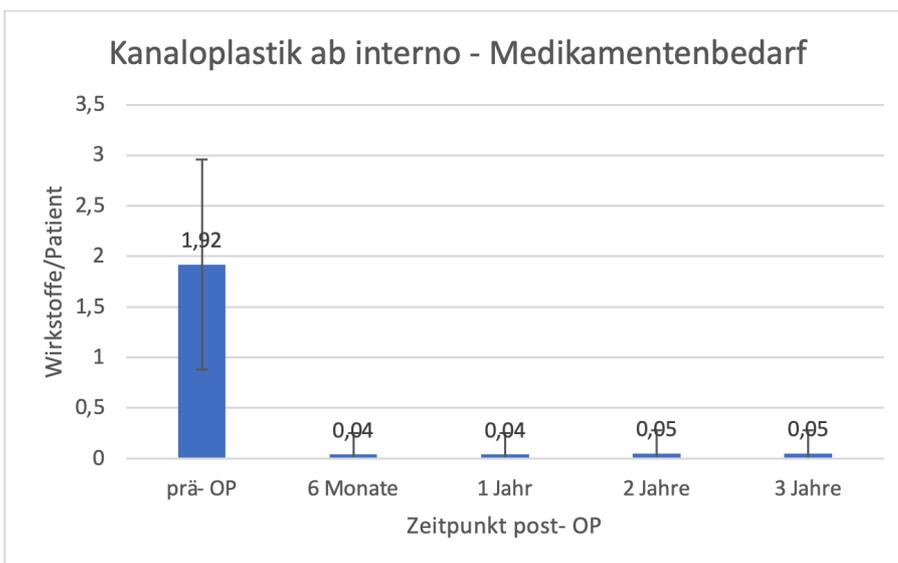
**Abb. 19:** Boxplot: IOD im Verlauf nach Kanaloplastik ab interno



**Abb. 20:** Scatterplot Kanaloplastik ab interno (Legende siehe Abb. 9, S.37).

### 3.8.2 Medikamentenbedarf

Zum Zeitpunkt vor der Operation wurden im Mittel  $1,92 \pm 1,04$  Wirkstoffe pro Tag und Patient appliziert. Die Menge der Wirkstoffe variierte zwischen null und vier, wobei die antiglaukomatöse Therapie am häufigsten zwei Wirkstoffe umfasste ( $n=11$ ). Der Medikamentenbedarf konnte zu allen postoperativen Kontrollen signifikant ( $p < 0,001$ ) zum Ausgangswert reduziert werden (Abb. 21). Insgesamt wurde bei drei Patienten im postoperativen Verlauf erneut eine antiglaukomatöse Lokalthherapie angesetzt.



**Abb. 21:** Medikamentenbedarf nach Kanaloplastik ab interno im Verlauf.

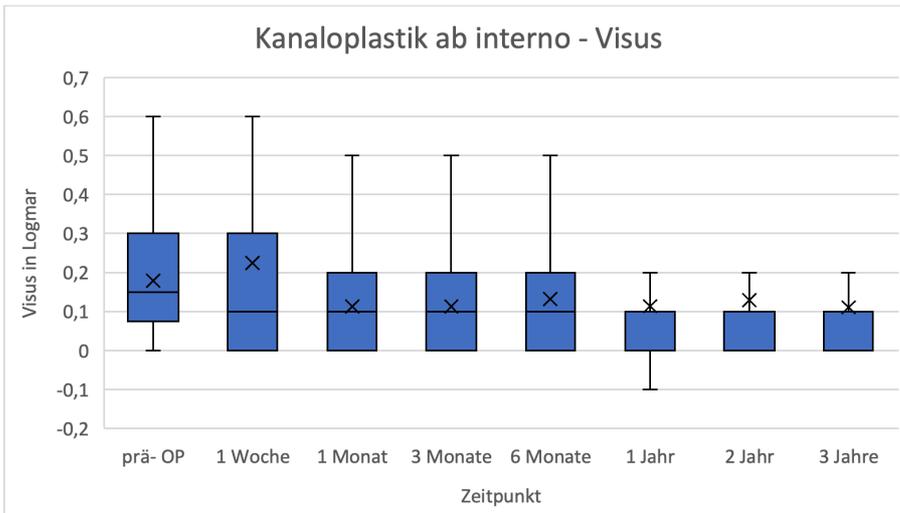
### **3.8.3 Postoperative Nebenwirkungen/Komplikationen und Reoperationen bei Therapieversagen**

Aufgrund einer nicht ausreichenden Augeninnendrucksenkung und des Wunsches nach bzw. der Notwendigkeit der Medikamentenfreiheit, erfolgte an drei Patienten eine IOD-senkende Reoperation. Hierbei handelte es sich jeweils um eine Kanalooplastik ab externo, die zweieinhalb Monate, ein Jahr und zwei Monate sowie zwei Jahre nach dem Ersteingriff erfolgte.

Als postoperative Nebenwirkung kam es in fünf Fällen zu einem Hyphäma (20%), hierunter fielen drei Makrohyphämata sowie zwei Mikrohyphämata. Vier Patienten entwickelten ein Hornhautepithelödem. Außerdem kam es in vier Fällen zu einer Steroidresponse. An einem Auge bildete sich eine Descemetmembranabhebung, die sich innerhalb der ersten postoperativen Wochen ohne weitere Intervention selbstständig resorbierte. Bei einem Patienten lagen direkt postoperativ hypotone Augeninnendruckwerte vor, die sich bereits in der ersten postoperativen Woche normalisierten. Es traten keine Fälle von Aderhautschwellungen auf. Ein operativer Eingriff aufgrund einer postoperativen Nebenwirkung wurde bei keinem der Patienten notwendig.

### **3.8.4 Entwicklung der Sehschärfe**

In der Gruppe der Patienten, die eine Kanalooplastik ab interno erhielten, wurde im Mittel ein logarithmierter Ausgangsvisus von  $0,18 \pm 0,16$  erhoben. Eine Woche postoperativ lag der Visus mit  $0,22 \pm 0,26$  nur minimal verschlechtert im Vergleich zum präoperativ erhobenen Visuswert. Ein Monat postoperativ war eine signifikante Verbesserung des Visus zum Ausgangsvisus festzustellen ( $p=0,01$ ). Auch bei den Langzeitkontrollen ab sechs Monaten postoperativ lag der Visus in signifikant gebesserten Bereichen mit Werten zwischen  $0,11 \pm 0,16$  und  $0,13 \pm 0,16$  ( $p < 0,01$ ), wie auch aus Abbildung 22 zu entnehmen ist.



**Abb. 22:** Boxplot: Entwicklung der Sehschärfe bei Kanaloplastik ab interno.

### 3.9 Gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomie

#### 3.9.1 Augeninnendruckwerte im Verlauf

Präoperativ wurde in der GATT-Gruppe ein Baseline-IOD von  $21,82 \pm 9,31$  mmHg erhoben. Am ersten postoperativen Tag lag der Augeninnendruck signifikant unter diesem Wert ( $12,70 \pm 4,96$  mmHg;  $p < 0,001$ ). Zu den Kontrollen nach einer Woche ( $15,92$  mmHg  $\pm 8,82$ ) und einem Monat ( $15,88 \pm 8,45$  mmHg;  $p = 0,005$ ) stieg der mittlere Augeninnendruck zwischenzeitlich leicht an. Langfristig lag der Augeninnendruck bei  $13,0 \pm 3,29$  ( $p < 0,001$ ),  $13,33 \pm 2,08$  ( $p = 0,001$ ),  $14,26 \pm 2,90$  ( $p = 0,002$ ) und  $13,76 \pm 2,11$  mmHg ( $p = 0,001$ ) nach sechs Monaten, einem, zwei und drei Jahren (Abb. 23), was einer prozentualen Drucksenkung von 40,4%, 39,0%, 34,6% und 36,9% entspricht.

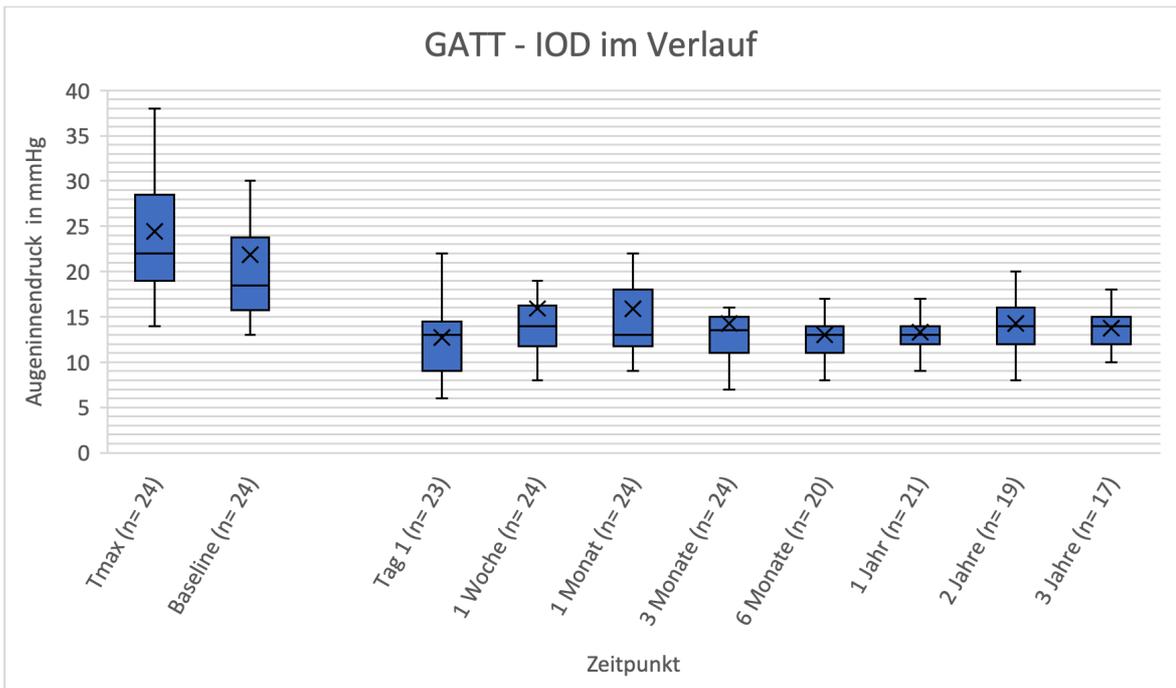


Abb. 23: Boxplot: IOD im Verlauf nach GATT.

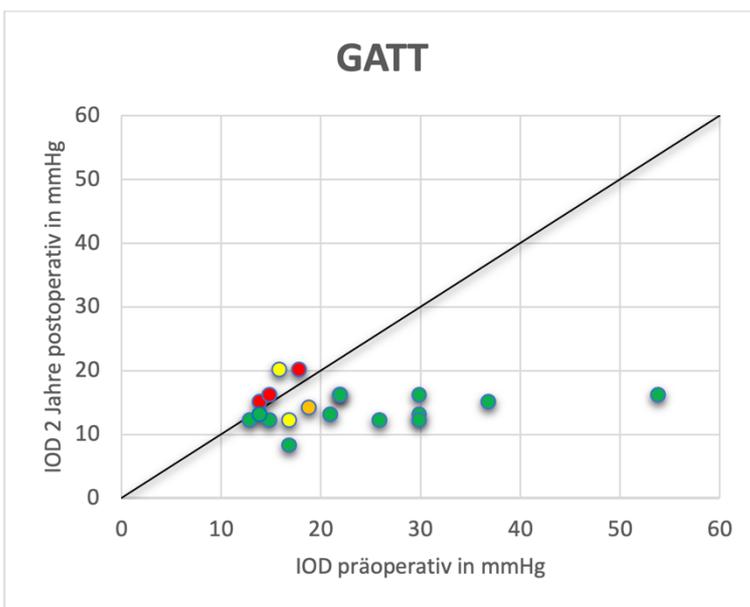
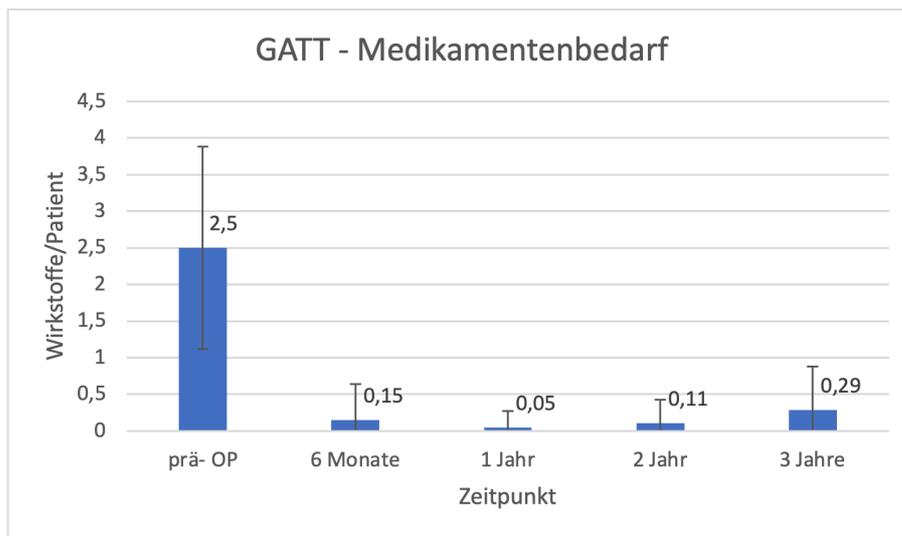


Abb. 24: Scatterplot GATT (Legende siehe Abb. 9, S. 37).

### 3.9.2 Medikamentenbedarf

Präoperativ lag der mittlere Medikamentenbedarf in dieser Gruppe bei  $2,50 \pm 1,38$  Wirkstoffe pro Patient mit einem Minimum von 0 Wirkstoffen und einem Maximum von 4 Wirkstoffen pro Tag und Patient. Sechs Monate postoperativ lag dieser bei  $0,15 \pm 0,49$  Wirkstoffe pro Patient. In der Kontrolle ein Jahr postoperativ sank der Wert auf  $0,05 \pm 0,22$  und stieg dann zum Zweijahres- und Dreijahreskontrollintervall

auf Werte von  $0,11 \pm 0,32$  bzw.  $0,29 \pm 0,59$  an. Zur Einjahreskontrolle musste ein Patient erneut Augentropfen applizieren, nach zwei Jahren zwei Patienten (siehe Abb. 24) und nach drei Jahren insgesamt vier Patienten. Der Medikamentenbedarf konnte zu allen Messzeitpunkten signifikant ( $p < 0,001$ ) zum präoperativen Wert gesenkt werden (siehe Abb. 25).



**Abb. 25:** Medikamentenbedarf nach GATT im Verlauf.

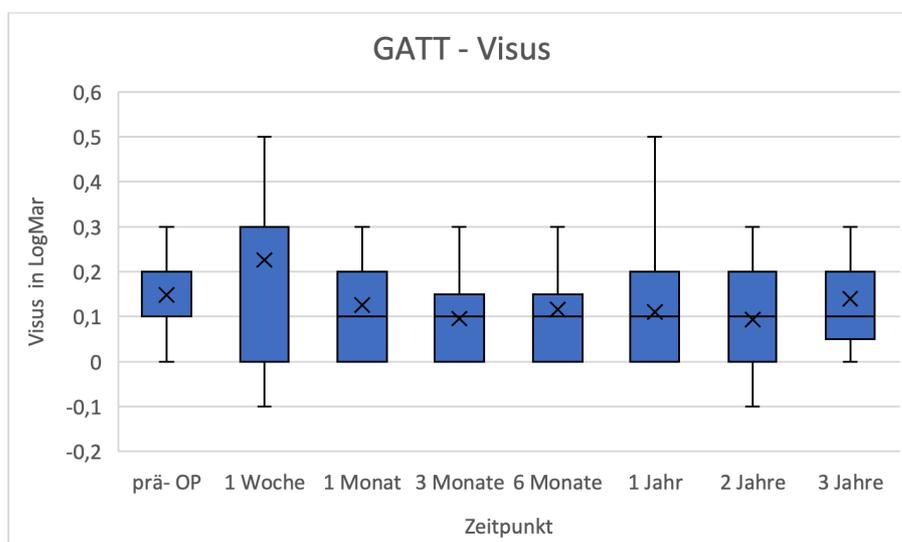
### 3.9.3 Postoperative Nebenwirkungen/Komplikationen und Reoperationen bei Therapieversagen

Bei 50% der Patienten trat im postoperativen Verlauf ein Hyphäma auf, wobei es sich in sieben Fällen um ein Mikrohyphäma und in fünf Fällen um ein Makrohyphäma handelte. An einem dieser Augen kam es zur Ausbildung eines ausgeprägten, die Vorderkammer fast ausfüllenden (subtotalen) Hyphämas sowie einer Glaskörperblutung, sodass eine Vitrektomie und eine Spülung der Vorderkammer und des Trabekelmaschenwerks zwei Monate postoperativ notwendig wurden. Im Verlauf erholte sich der Visus auf das präoperative Niveau, allerdings kam es an diesem Auge zu einem Therapieversagen mit erneuter Tropfnotwendigkeit. An vier operierten Augen trat ein Steroidresponse auf. Drei Patienten entwickelten ein Epithelödem, was sich in den ersten postoperativen Tagen zurückbildete. In einem Fall entstand eine kurzzeitige, innerhalb der ersten postoperativen Wochen vollständig regrediente Descemetmembranabhebung. Bei bestehenden vorderen Synechien wurde an drei Patienten eine Synechiolyse innerhalb der ersten sechs Wochen nach der OP durchgeführt. Ein Patient

entwickelte eine Fibrinreaktion, die sich komplikationslos zurückbildete. Hypotone Augeninnendruckwerte bestanden an keinem der operierten Augen. Aufgrund eines ausgeprägten postoperativen Augeninnendruckanstiegs musste in einem Fall drei Tage nach der Operation Vorderkammerflüssigkeit über eine Parazenteseöffnung abgelassen werden. Bei diesem Patienten stabilisierten sich die Augeninnendruckwerte nicht, sodass sieben Monate nach dem Eingriff eine Ahmed Glaucoma Valve-Implantation erfolgte. Bei einem weiteren Patienten wurde aufgrund einer insuffizienten Augeninnendrucksenkung zunächst eine Lokalthherapie und zweieinhalb Jahre postoperativ eine augeninnendrucksenkende Reoperation mit Implantation eines Ahmed Glaucoma Valve-Implantats durchgeführt.

### 3.9.4 Entwicklung der Sehschärfe

Der mittlere präoperative Visus der Patienten, die eine GATT erhielten, lag bei  $0,15 \pm 0,17$ . Nach einer Woche postoperativ lag der Visus nicht signifikant verschlechtert bei  $0,23 \pm 0,63$ . Nach einem und sechs Monaten postoperativ wurden Werte von  $0,13 \pm 0,17$  sowie  $0,10 \pm 0,11$  erhoben. Im langfristigen Verlauf lagen die Werte bei  $0,11 \pm 0,13$  nach einem Jahr,  $0,09 \pm 0,11$  nach zwei Jahren und  $0,14 \pm 0,14$  nach drei Jahren (siehe Abb. 26). In einem Fall lag bereits präoperativ eine nulla lux-Situation vor, die unverändert zu den Kontrollen fortbestand. Insgesamt wurde keine anhaltende signifikante operationsbedingte Visusveränderung beobachtet ( $p=0,334$ ).



**Abb. 26:** Boxplot: Entwicklung der Sehschärfe bei GATT.

## 4. Diskussion

### 4.1. Kanalplastik ab externo

#### 4.1.1 Augeninnendruck

Der Augeninnendruck konnte postoperativ nach Durchführung einer Kanalplastik ab externo effektiv und signifikant gesenkt werden und lag auch zu den Langzeitkontrollen nach ein, zwei und drei Jahren 35,2-37,3% unter dem Baseline-IOD. Insgesamt sind die im Rahmen unserer Studie erhobenen Daten in Bezug auf die Effektivität der Augeninnendrucksenkung mit den in der Literatur vorhandenen Werten vergleichbar und schneiden hierbei sehr gut ab (siehe Tab. 7).

In einer ersten großen Studie zur Kanalplastik ab externo von Lewis et al. lag der präoperative Augeninnendruck bei  $23,8 \pm 5,0$  mmHg und somit höher als in dieser Studie. Eine Ursache hierfür könnte in den unterschiedlichen Einschlusskriterien liegen (s.u.). Nach ein, zwei und drei Jahren sank bei Lewis et al. der mittlere Augeninnendruck auf Werte von  $15,6 \pm 4,2$  mmHg,  $15,8$  mmHg  $\pm 4,2$  mmHg und  $15,2 \pm 3,5$  mmHg. Die prozentuale Augeninnendrucksenkung betrug 34,5%, 33,6% und 36,1% und ist somit vergleichbar mit unseren Ergebnissen.<sup>68</sup> Brusini erhob in seiner Studie zur Kanalplastik ab externo präoperativ einen vergleichsweise hohen mittleren Augeninnendruck von  $29,4 \pm 7,9$  mmHg, welcher nicht genauer definiert wurde. Der IOD lag nach einem Jahr bei  $16,8 \pm 4,2$  mmHg, nach zwei Jahren bei  $17,1 \pm 4,7$  mmHg und nach drei Jahren bei  $17,3 \pm 3,9$  mmHg. Postoperativ wurden zwar somit im Vergleich zu unseren Daten etwas höhere Druckwerte gemessen, die prozentuale Augeninnendrucksenkung fiel mit 42,9%, 41,8% und 41,2% jedoch etwas stärker aus.<sup>22</sup> Khaimi et al. untersuchten insgesamt 277 Patienten nach Kanalplastik ab externo. Präoperativ lag der mittlere Augeninnendruck bei  $19,7 \pm 6,7$  mmHg; nach einem, zwei und drei Jahren bei  $14,3 \pm 4,6$ ,  $14,0 \pm 4,2$  und  $15,2 \pm 4,3$  mmHg, was einer prozentualen Senkung zum Ausgangsdruck von 27,4%, 28,9% und 22,8% entspricht.<sup>58</sup>

Die Gegenüberstellung der Subgruppen mit und ohne kombinierter Kataraktoperation ergab zu den Langzeitkontrollen in unserer Datenerhebung keinen signifikanten Unterschied in der Augeninnendrucksenkung, was sich mit den Ergebnissen von Khaimi et al. deckt.<sup>58</sup> In den Studien von Lewis et al. sowie Bull et al. konnte ein zusätzlicher augeninnendrucksenkender Effekt durch eine kombinierte Katarakt-Operation aufgezeigt werden.<sup>68,23</sup> Das Ausbleiben dieses

Effektes in unserer Studie könnte darin begründet liegen, dass, abgesehen von sechs Augen, in allen Fällen, in denen eine Kanaloplastik ab externo ohne kombinierte Katarakt-Operation durchgeführt wurde, eine Pseudophakie vorlag und sich dies bereits auf den Augeninnendruck auswirkte. Lewis und Bull et al. führten im Gegensatz dazu eine Kanaloplastik ab externo ohne Katarakt-OP auch an vielen phaken Augen durch.<sup>68,23</sup>

Studie	Prä-OP			1 Jahr			2 Jahre			3 Jahre		
	n=	IOD	Med.	n=	IOD	Med.	n=	IOD	Med.	n=	IOD	Med.
<b>Müller/ Zimbelmann - Kanaloplastik</b>	90	20,3 ± 6,4		72	13,5 ± 4,4		45	13,6 ± 3,5		31	13,0 ± 3,4	
<b>- Phakokanaloplastik</b>	160	21,2 ± 7,6		133	12,8 ± 3,8		84	13,4 ± 3,3		51	13,3 ± 3,0	
<b>- insgesamt</b>	250	20,8 ± 7,2	2,62 ± 1,1	205	13,1 ± 4,0	0,14 ± 1,2	129	13,5 ± 3,4	0,27 ± 0,8	82	13,2 ± 3,1	0,33 ± 0,8
<b>Lewis et al. - Kanaloplastik</b>	103	23,5 ± 4,5	1,9 ± 0,8	91	16,1 ± 3,9	0,6 ± 0,8	89	16,1 ± 4,0	0,6 ± 0,8	89	15,5 ± 3,5	0,9 ± 0,9
<b>- Phakokanaloplastik</b>	30	23,5 ± 5,2	1,5 ± 1,0	27	13,6 ± 4,1	0,1 ± 0,4	25	13,4 ± 3,2	0,2 ± 0,4	27	13,6 ± 3,6	0,3 ± 0,5
<b>- insgesamt</b>	157	23,8 ± 5,0	1,8 ± 0,9	136	15,6 ± 4,2	0,5 ± 0,8	132	15,8 ± 4,2	0,6 ± 0,8	134	15,2 ± 3,5	0,8 ± 0,9
<b>Brusini - insgesamt</b>	214	29,4 ± 7,9	3,3 ± 0,9	144	16,8 ± 4,2	0,7 ± 1,2	80	17,1 ± 4,7	1,1 ± 1,3	29	17,3 ± 3,9	1,3 ± 1,5
<b>Khaimi et al. - Kanaloplastik</b>	150	21,1 ± 7,2	2,2 ± 1,3	102	14,2 ± 4,6	0,5 ± 0,9	75	13,3 ± 4,1	0,5 ± 0,8	39	15,0 ± 4,6	0,5± 0,8
<b>- Phakokanaloplastik</b>	127	18,1 ± 5,6	2,0 ± 1,1	79	14,4 ± 4,6	0,4 ± 0,7	69	14,7 ± 4,4	0,6 ± 0,9	27	15,4 ± 4,0	0,7 ± 1,1
<b>- insgesamt</b>	277	19,7 ± 6,7	2,1 ± 1,2	181	14,3 ± 4,6	0,4 ± 0,8	144	14,0 ± 4,2	0,5 ± 0,9	66	15,2 ± 4,3	0,6 ± 0,9
<b>Bull et al. - Kanaloplastik</b>	82	23,0 ± 4,3	1,9 ± 0,7	73	15,5 ± 3,5	0,6 ± 0,9	70	15,4 ± 3,3	0,7 ± 0,8	74	15,1 ± 3,1	0,9 ± 0,9
<b>- Phakokanaloplastik</b>	16	24,3 ± 6,0	1,5 ± 1,2	15	14,0 ± 3,7	0,1 ± 0,4	12	14,7 ± 2,8	0,3 ± 0,5	13	13,8 ± 3,2	0,5 ± 0,7

**Tab. 7:** Ergebnisse aus vorliegenden Vergleichsstudien zur Kanaloplastik ab externo.  
Quelle:<sup>22,23,58,68</sup>

Im Vergleich der beiden Subgruppen mit und ohne Perforation des Descemetfensters zeigte sich eine zusätzliche, jedoch nicht signifikante Augeninnendrucksenkung zu allen Kontrollterminen in der Gruppe mit Perforation. Des Weiteren war der Trend festzustellen, dass bei diesen Patienten in selteneren Fällen eine augeninnendrucksenkende Reoperation erforderlich war, jedoch zeigte sich ein tendenziell etwas höheres Risiko für postoperative Hypotonien. Zu einer ähnlichen Feststellung kamen auch Pullig et al. in einer Publikation aus dem Jahr 2019. In dieser wurde bis ein Jahr postoperativ eine ausgeprägtere, jedoch statistisch nicht signifikante Augeninnendrucksenkung in der Gruppe mit Perforation des Descemetfensters beobachtet.<sup>83</sup> Die Ergebnisse in dieser Dissertationsarbeit zeigen erstmalig, dass dieser Effekt auch über ein längeres Untersuchungsintervall von zwei und drei Jahren hinweg bestehen bleibt. Eine beabsichtigte Perforation des Descemetfensters kann daher von Glaukomchirurginnen/Glaukomchirurgen zur Optimierung des Therapieerfolges in Erwägung gezogen, muss jedoch mit dem tendenziell höheren Risiko einer postoperativen Hypotonie abgewogen werden.

Ein Cheese-wiring Phänomen trat in dieser Studie an 51 Augen (20,4%) auf. In den Arbeiten von Lewis et al., Brusini und einer Studie von Grieshaber et al. wurde dieses Phänomen deutlich seltener beobachtet (in 1,9%, 0,9% sowie 0,0% der operierten Augen).<sup>22,41,68</sup> Ein Grund hierfür könnte in einer vergleichsweise stärker angelegten Fadenspannung durch die Operateurin liegen. Studien zeigten auf, dass in Augen, in denen der Schlemm'sche Kanal durch eine gute Fadenspannung offengehalten wurde, tendenziell eine stärkere Augeninnendrucksenkung zustande kam als in Augen, in denen dies nicht der Fall war.<sup>18,67</sup> Im Vergleich der Subgruppen mit und ohne Cheese-wiring konnte kein signifikanter Effekt durch die Fadenextrusion, d.h. die partielle Trabekulotomie sowie die in diesen Fällen potenziell höhere Fadenspannung auf den Augeninnendruck, beobachtet werden. Dies könnte darin begründet liegen, dass im Rahmen eines Cheese-wirings lediglich ein kleiner Teil des Trabekelmaschenwerks und nicht wie bei einer 360°-Trabekulotomie das gesamte Trabekelmaschenwerk eingerissen wird. Zudem könnte durch die Viskodilatation und den eingelegten Faden im Rahmen der Kanaloplastik ab externo der Abfluss über das Trabekelmaschenwerk bereits erheblich gebessert sein, sodass kein zusätzlicher messbarer Effekt auf den Kammerwasserabfluss durch das Einreißen des Trabekelmaschenwerks entsteht. Brandao et al. diskutierten außerdem, dass das Anlegen einer zu starken

Fadenspannung zelluläre Mechanismen im Kammerwinkel auslöst, welche zu einer Erhöhung des Abflusswiderstands führen.<sup>18</sup> Dieses Phänomen könnte einen zusätzlichen abflussfördernden Effekt durch die partielle Trabekulotomie relativieren.

#### **4.1.2 Medikamentenbedarf und Therapieversagen**

Auch der Medikamentenbedarf konnte in dieser Studie direkt postoperativ sowie zu den langfristigen Kontrollen nach Kanaloplastik ab externo signifikant reduziert werden. Diese Feststellung machten auch Lewis et al., die einen mittleren präoperativen Medikamentenbedarf von  $1,8 \pm 0,9$  Wirkstoffe pro Patient erfassten. Postoperativ lag dieser bei  $0,5 \pm 0,8$  nach einem,  $0,6 \pm 0,8$  nach zwei sowie  $0,8 \pm 0,9$  nach drei Jahren.<sup>68</sup> In der Studie von Brusini lag der präoperative mittlere Medikamentenbedarf pro Patient bei  $3,3 \pm 0,9$ , im postoperativen Verlauf bei  $0,7 \pm 1,2$ ,  $1,1 \pm 1,3$  und  $1,3 \pm 1,5$  nach einem, zwei und drei Jahren.<sup>22</sup>

Khaimi et al. beobachteten präoperativ einen mittleren Medikamentenverbrauch von  $2,1 \pm 1,2$  Wirkstoffen pro Patient, der auf Werte von  $0,4 \pm 0,8$ ,  $0,5 \pm 0,9$  und  $0,6 \pm 0,9$  zu den jährlichen postoperativen Kontrollen sank.<sup>58</sup> Am Zürcher und Oltener Patientenkollektiv konnte der Medikamentenbedarf daher auf vergleichsweise niedrigere Werte postoperativ reduziert werden (siehe Tab. 7, S. 56). Auch was die Häufigkeit an notwendigen augeninnendrucksenkenden Folgeeingriffen anbetrifft, schneiden die von uns nachbeobachteten Patienten vergleichsweise sehr gut ab. Insgesamt wurden im Beobachtungsintervall von drei Jahren an 21 Augen 27 augeninnendrucksenkende Reoperationen durchgeführt. Dies entspricht 8,4% der operierten Augen. Lewis et al. führten an 25 von 157 Patienten (15,9%) eine drucksenkende Reoperation durch.<sup>68</sup> In der Studie von Brusini betraf dies 43 von den 214 operierten Augen (20,1%).<sup>22</sup> Khaimi et al. machen hierzu keine Angaben.<sup>58</sup>

#### **4.1.3 Operationsnebenwirkungen und postoperative**

##### **Komplikationen**

Häufigste Operationsnebenwirkung war das Auftreten eines Hyphämas an insgesamt 89 (35,6%) der operierten Augen. Eine Studie von Grieshaber et al. konnte aufzeigen, dass das postoperative Auftreten eines Mikrohyphämas einen positiven prognostischen Parameter für eine effektive Augeninnendrucksenkung darstellt. Die Autoren schlagen daher vor, dass in diesen Fällen nicht von einer

Komplikation, sondern einer Nebenwirkung der Operation gesprochen wird. Als zugrundeliegenden Mechanismus nehmen die Autoren an, dass der physiologische Abflussweg durch die Kanaloplastik wiedereröffnet wird und dadurch ein Reflux von Blut über den episkleralen Venenplexus, den chirurgisch erweiterten Schlemm'schen Kanal und das Trabekelmaschenwerk in die Vorderkammer entsteht.<sup>42</sup> Die prozentuale Häufigkeit des Auftretens von Hyphämata variiert in den vorliegenden Studien (Lewis et al. 22,3%, Bull et al. 18,3%, Brusini 21,9%, Khaimi et al. 52,8%) und trat somit im Rahmen unserer Studienpopulation prozentual etwas häufiger als in den meisten anderen Studien auf.<sup>22,23,58,68</sup>

Der beobachtete Steroid-Response an 62 Patienten (24,8%) erklärt einen kurzzeitigen Anstieg der Augeninnendruckwerte eine Woche bis einen Monat postoperativ, der sowohl in der Kanaloplastik ab externo-Gruppe als auch in den anderen Gruppen feststellbar war. Die Vergleichsstudien machen keine Angaben zum Auftreten eines Steroid-Response. Eine Publikation von Thomas et al. zur Häufigkeit dieses Phänomens nach Trabekulektomie ergab mit 23% eine mit dieser Studie vergleichbare Inzidenz.<sup>106</sup>

In dieser Studienpopulation kam es an 22 operierten Augen (8,8%) zu einer passageren Descemetmembranabhebung, in anderen Studien trat diese Komplikation seltener auf (Lewis et al. 3,25%, Grieshaber 3,3%, Bull et al. 3,7%, Brusini 5,1%).<sup>22,23,41,68</sup> Eine Aderhautschwellung, die an zwei unserer Studienaugen beobachtet wurde (0,8%), beschrieben andere Autoren nicht. Schwere Hypotonien mit flacher Vorderkammer kamen bei Lewis et al. wie in unserer Studienpopulation einmal vor.<sup>68</sup> Die anderen Studien nennen keine Fälle. Zu den weiteren von uns erhobenen leichten Komplikationen machen die anderen Arbeiten keine Angaben. Folgeeingriffe aufgrund postoperativer Komplikationen wurden an insgesamt elf Patienten (4,4%) durchgeführt, wobei eine Synechiolyse an sieben Augen als vergleichsweise harmlose Komplikation mit Notwendigkeit eines kleinen Eingriffes zu werten ist. An vier Patienten musste ein größerer Folgeeingriff durchgeführt werden. Lewis et al. führten an 8,2% der Augen aufgrund von postoperativen Komplikationen kleinere Folgeeingriffe durch.<sup>68</sup> Das seltene Auftreten von schwerwiegenden Komplikationen in unserer Studie stützt den auch aus der Literatur zu entnehmenden Eindruck, dass es sich bei der Kanaloplastik ab externo um ein sicheres Operationsverfahren handelt, bei dem nur in sehr seltenen Fällen mit gravierenden Komplikationen zu rechnen ist.

#### **4.1.4 Entwicklung der Sehschärfe**

In dem von uns beobachteten Patientenkollektiv zeigte sich eine signifikante Verschlechterung der Sehschärfe in den ersten postoperativen Tagen und Wochen. Diese lässt sich zum einen auf meist leichte operationsbedingte Begleitreaktionen, wie aufgewirbeltes Sanguis in der Vorderkammer oder das Vorliegen eines Epithelödems, zurückführen. Zum anderen verursacht eine Kanaloplastik ab externo bekanntermaßen einen Astigmatismus, welcher innerhalb der ersten postoperativen Wochen am ausgeprägtesten ist. Der Astigmatismus wirkt sich deutlich auf die Sehschärfe aus, bildet sich jedoch innerhalb der ersten sechs postoperativen Monate fast immer vollständig zurück.<sup>76</sup> In der Studie von Khaimi et al. kam es wie in unserer Studie zu einem signifikanten Visusabfall bis einen Monat postoperativ. Anschließend erholte sich die Sehschärfe.<sup>58</sup> Ab der Dreimonatskontrolle kam es sogar zu einer signifikanten Visusverbesserung. Bull et al. erhoben präoperativ einen LogMar Visus von  $0,22 \pm 0,25$ , Lewis et al. einen Visus von  $0,22 \pm 0,36$ . Drei Jahre nach der OP lag dieser in der Gruppe, die lediglich eine Kanaloplastik ab externo erhielt, bei  $0,20 \pm 0,26$  ( $p= 0,70$ ) bei Bull et al. und bei  $0,20 \pm 0,25$  ( $p= 1,00$ ) in der Studie von Lewis et al. Somit wurde in diesen Studien wie auch in unserer Arbeit keine langfristige signifikante Verschlechterung der Sehschärfe beobachtet, was einmal mehr für die Sicherheit und den schonenden Charakter des OP-Verfahrens spricht.<sup>23,68</sup> Es bleibt jedoch festzuhalten, dass Patienten nach der Operation durch eine passagere Sehschärfenminderung beeinträchtigt sein können, worüber diese aufgeklärt werden sollten.

#### **4.1.5 Vergleich Kanaloplastik ab externo und Trabekulektomie**

Es gibt mehrere Arbeiten, die die Operationsergebnisse nach Kanaloplastik mit denen nach Trabekulektomie gegenüberstellen. In einer retrospektiven Studie von Ayyala et al. mit 79 Patienten wurde ein Jahr nach Kanaloplastik ab externo eine Augeninnendrucksenkung von  $32 \pm 22\%$  erzielt, nach Trabekulektomie lag dieser Wert bei  $43 \pm 28\%$ . Dies entspricht einer signifikant höheren Drucksenkung ( $p= 0,072$ ) nach Trabekulektomie.<sup>10</sup> Auch Matlach et al. erzielten in einer prospektiven Studie eine signifikant höhere Erfolgsquote in der Gruppe der Patienten mit Trabekulektomie im Vergleich zur Kanaloplastik ab externo. Zu allen postoperativen Zeitpunkten lag in dieser Studie der Augeninnendruck in der Gruppe mit Trabekulektomie etwas niedriger als in der Gruppe mit Kanaloplastik ab externo.<sup>74</sup>

Brüggemann und Müller et al. untersuchten in einer retrospektiven Arbeit 30 Patienten, die eine Trabekulektomie an einem sowie eine Kanaloplastik am Partnerauge erhielten. Nach einem Jahr lag die Augeninnendrucksenkung bei  $50,3\% \pm 10,5\%$  in der Gruppe mit Kanaloplastik ab externo und bei  $53,4\% \pm 20,1\%$  in der Gruppe mit Trabekulektomie, was keinem signifikanten Unterschied entsprach.<sup>20</sup> Eine Meta-Analyse von Lin et al. kam zu dem Ergebnis, dass der Augeninnendruck nach einem Jahr nach Trabekulektomie um 2,33 mmHg stärker als nach Kanaloplastik ab externo gesenkt werden konnte. Die Erfolgsrate, wenn als Erfolgskriterium ein Augeninnendruck von 18 mmHg festgelegt wurde, unterschied sich jedoch nicht signifikant.<sup>71</sup> In allen Studien zeigte sich eine höhere Rate an teils schwerwiegenden Komplikationen in der Gruppe der Patienten mit Trabekulektomie. Insbesondere das Risiko für Hypotonien und hypotonieassoziierte Komplikationen, wie Aderhautschwellung und hypotoner Makulopathie (12,5-33,3%), ist nach einer Trabekulektomie nicht unerheblich.<sup>10,20,74</sup> Hypotoniebedingte Komplikationen traten nach einer Kanaloplastik ab externo in der von uns durchgeführten Studie in nur 0,8% der Fälle auf. Weiterhin waren nach Matlach et al. auch deutlich mehr postoperative Eingriffe nach Trabekulektomie notwendig, dazu gehören insbesondere Sickerkisseneingriffe wie 5-FU-Gaben oder Needling.<sup>74</sup> Eine Studie von Brüggemann und Müller aus dem Jahr 2012 kam außerdem zum Ergebnis, dass nach Trabekulektomie im Vergleich zur Kanaloplastik ab externo eine doppelt so lange stationäre Verweildauer erforderlich war und zudem häufiger Wiederaufnahmen sowie regelmäßiger Nachkontrollen notwendig wurden. Somit ist die Trabekulektomie als das kostenintensivere und in der Nachbetreuung aufwendigere Verfahren zu betrachten.<sup>21</sup>

## **4.2 Kanaloplastik mit Stegmann Canal Expander**

Auch in der Gruppe der Patienten, die eine Implantation eines Stegmann Canal Expanders erhielten, lag sowohl der Augeninnendruck als auch der Medikamentenbedarf zu den Kontrollen bis zwei Jahre postoperativ signifikant unter dem Ausgangswert. Im Vergleich mit den von uns erhobenen Daten zur klassischen Kanaloplastik ab externo fiel die prozentuale Augeninnendrucksenkung jedoch etwas geringer aus: 32,0% Drucksenkung gegenüber 37,7% nach einem und 31,1% gegenüber 35,3% nach zwei Jahren post operationem. Zu diesem Operationsverfahren liegt bisher eine Vergleichsstudie von Grieshaber et al. vor, in

der 42 Patienten für zwei Jahre nach der Implantation eines Stegmann Canal Expanders nachverfolgt wurden. Der mittlere Ausgangs-IOD betrug  $26,8 \pm 5,6$  mmHg, der mittlere Medikamentenbedarf  $2,8 \pm 0,4$  Wirkstoffe pro Patient. Zu den Kontrollen nach einem und zwei Jahren lag der mittlere Augeninnendruck mit Werten von  $13,2 \pm 1,2$  mmHg und  $13,3 \pm 2,5$  mmHg signifikant ( $p \leq 0,001$ ) unter dem mittleren Ausgangsaugeninnendruck. Der Medikamentenbedarf konnte auf  $0,2 \pm 0,5$  Wirkstoffe pro Patient gesenkt werden.<sup>43</sup> In der von uns durchgeführten Studie fiel die Augeninnendrucksenkung daher vergleichsweise geringer aus.

Ein Grund hierfür könnte darin liegen, dass Grieshaber et al. aus ihrer Studie alle Patienten mit antiglaukomatösen Voreingriffen ausgeschlossen hatten, was in unserer Datenerhebung nicht der Fall war.<sup>43</sup> Insgesamt hatten bereits vier Patienten eine Trabekulektomie als Voreingriff, welche bekanntermaßen zu Schädigungen des Schlemm'schen Kanals führen und sich somit negativ auf die Katheterisierung und den Operationserfolg auswirken kann. Eine weitere Ursache könnte darin begründet sein, dass 50% der Patienten, die im Rahmen unserer Studie einen Stegmann Canal Expander implantiert bekamen, initial eine Kanaloplastik ab externo mit Fadeneinlegung erhalten sollten, intraoperativ jedoch der Stegmann Canal Expander gewählt wurde, da es zu einem Stopp des Katheters im Rahmen der Sondierung des Schlemm'schen Kanals kam. Somit war in unserer Studie nur in der Hälfte der Fälle vor Implantation des Stegmann Canal Expanders eine 360°-Viskodilatation möglich. In der Studie von Grieshaber et al. betraf dies lediglich 9,5% der Patienten. Augeninnendrucksenkende Reoperationen führten Grieshaber et al. an sechs Augen (14,3%) durch.<sup>43</sup> In unserer Studie erfolgten solche an zwei Augen (11,1%). Eine signifikante Verschlechterung der Sehschärfe postoperativ im Vergleich zur Sehschärfe vor der Operation wurde weder in unserer noch in der Studie von Grieshaber et al. beobachtet.<sup>43</sup> Bis auf eine Aderhautschwellung in unserer Studie kam es zu keinen nennenswerten Komplikationen. Auch Grieshaber et al. beschreiben lediglich kleine Komplikationen.<sup>43</sup> Somit lässt sich die Kanaloplastik mit Stegmann Canal Expander als eine komplikationsarme Alternative zur konventionellen Kanaloplastik ab externo ansehen, insbesondere in Situationen, in denen eine 360°-Katheterisierung/Viskodilatation nicht möglich ist.

### 4.3 Kanaloplastik ab interno

Mit  $16,32 \pm 3,2$  mmHg lag der mittlere Augeninnendruck direkt präoperativ im Vergleich zu den anderen untersuchten Gruppen in einem niedrigeren Tensiobereich. Auch der präoperative Medikamentenbedarf fiel mit  $1,92 \pm 1,04$  Wirkstoffen pro Patient geringer aus. Auffallend war in dieser Gruppe der besonders hohe Anteil an Patienten mit Unverträglichkeiten gegenüber augeninnendrucksenkenden Medikamenten sowie an Patienten mit nur geringen Gesichtsfeldeinschränkungen. Der Augeninnendruck erwies sich auch im Langzeitverlauf als signifikant gesenkt, die prozentuale Augeninnendrucksenkung fiel jedoch zu den Ein-, Zwei- und Dreijahreskontrollen im Vergleich zur Kanaloplastik ab externo-Gruppe niedriger aus (Kanaloplastik ab interno: 16,2-25,4%, Kanaloplastik ab externo: 35,3-37,3%). Es liegen derzeit mehrere Studien zur Kanaloplastik ab interno mit unterschiedlichem Studiendesign vor. In der ersten publizierten Studie von Körper wurden 23 Patienten an denen eine Kanaloplastik ab interno erfolgte eingeschlossen. Elf Patienten konnten ein Jahr nachbeobachtet werden. Der präoperative mittlere IOD lag bei  $18,8 \pm 5,63$  mmHg unter 1,69 Wirkstoffen pro Patient und betrug nach sechs Monaten  $14,69 \pm 2,36$  mmHg sowie  $14,73 \pm 2,97$  mmHg nach einem Jahr. Der mittlere Medikamentenbedarf bei der letzten Follow-up-Visite lag bei 0,21 Wirkstoffen pro Patient.<sup>60</sup> In einer Studie von Ondrejka und Körper aus dem Jahr 2019 wurden 106 Augen bis zu einem Jahr nach Kanaloplastik ab interno beobachtet. Die Patienten wurden jeweils in eine Subgruppe mit einem Ausgangsinnendruck von  $>18$  mmHg (72 Patienten) und eine von  $<18$  mmHg (34 Patienten) aufgeteilt. In ersterer sank der Augeninnendruck nach einem Jahr von einem mittleren Ausgangs-IOD von  $24,6 \pm 7,1$  mmHg signifikant auf  $14,6 \pm 2,8$  mmHg. Der Medikamentenbedarf sank von  $2,1 \pm 1,0$  auf  $0,2 \pm 0,6$  Wirkstoffe pro Patient. In der zweiten Gruppe lag der mittlere IOD präoperativ bei  $14,9 \pm 1,8$  mmHg und betrug nach einem Jahr  $13,6 \pm 2,3$  mmHg, sodass hier keine signifikante Augeninnendrucksenkung festzustellen war, jedoch der Medikamentenbedarf signifikant von  $1,8 \pm 0,9$  auf  $0,2 \pm 0,6$  Wirkstoffe pro Patient nach einem Jahr reduziert werden konnte.<sup>78</sup> Beide Studien beinhalteten, wie auch unsere Studie, Patienten mit und ohne kombinierter Katarakt-Operation. Gallardo et al. untersuchten 72 Patienten bis zu einem Jahr postoperativ. Auch hier kam es zu einer signifikanten Augeninnendrucksenkung von präoperativ  $20,39 \pm 4,7$  mmHg auf  $13,3 \pm 1,9$  mmHg nach einem Jahr. Der mittlere Medikamentenbedarf

sank von präoperativ  $2,8 \pm 0,9$  Wirkstoffe auf  $1,1 \pm 1,1$  Wirkstoffe ein Jahr postoperativ. Es erfolgte zudem eine Unterscheidung zwischen Kanalplastik mit und ohne kombinierter Katarakt-Operation, wobei die prozentuale Augeninnendrucksenkung in beiden Gruppen gleich stark ausfiel.<sup>35</sup> Hughes und Traynor publizierten im Oktober 2020 die Daten von 89 Augen nach Kanalplastik ab interno, die maximal Eineinhalbjahre nachbeobachtet wurden. Der präoperative Augeninnendruck betrug  $24,5 \pm 8,3$  mmHg unter  $2,5 \pm 1,3$  Wirkstoffen pro Patient und lag eineinhalb Jahre postoperativ signifikant reduziert bei  $15,8 \pm 2,5$  mmHg ( $p < 0,001$ ) unter  $1,7 \pm 1,5$  Wirkstoffe ( $p < 0,05$ ). Ein Unterschied in der Augeninnendrucksenkung oder im Medikamentenbedarf im Vergleich der Gruppen mit und ohne Katarakt-Operation bestand auch in dieser Studie nicht.<sup>50</sup>

Insgesamt betrachtet kommt die Studie im Rahmen dieser Dissertation daher zu vergleichbaren Einjahresergebnissen und beschreibt zudem erstmalig zu den Langzeit-Kontrollintervallen von zwei und drei Jahren eine signifikante Drucksenkung. Zudem fällt auf, dass sowohl in unserer Studie wie auch in den Vergleichsstudien der Medikamentenbedarf nach Kanalplastik ab interno in einem hohen Maß gesenkt werden konnte. Eine Reoperation war in unserer Studie an drei Augen bei Therapieversagen notwendig, in der Studie von Gallardo et al. erfolgte an zwei Patienten postoperativ die Implantation eines Express Shunts bei Therapieversagen.<sup>35</sup> Hughes und Traynor führten in sechs Fällen filtrierende Reoperationen durch, in den Studien von Körper und Ondrejka wurden keine Reoperationen bei Therapieversagen angegeben.<sup>50,60,78</sup>

Nebenwirkungen oder Komplikationen traten in dieser Arbeit sowie in den Vergleichsstudien kaum auf: Ondrejka beschreibt in 13% der Fälle ein Hyphäma, bei Hughes trat ein solches an einem, bei Gallardo et al. an zwei Patienten auf.<sup>78,50,35</sup> Eine Descemetolyse trat wie in unserer Studie bei Körper einmal auf.<sup>60</sup> Das Operationsverfahren der Kanalplastik ab interno lässt sich daher als sehr sicher einstufen. Eine signifikante postoperative Verschlechterung der Sehschärfe bestand weder in unserer noch in den Studien von Hughes, Ondrejka und Gallardo et al.<sup>35,50,78</sup> Bereits eine Woche nach der Operation waren die Visuswerte beim Zürcher und Oltener Patientenkollektiv nur noch minimal reduziert im Vergleich zum präoperativen Wert, was den schonenden Charakter der OP unterstreicht und einen großen Vorteil gegenüber der Kanalplastik ab externo bietet, bei der es zunächst zu einer deutlichen Visusverschlechterung kommt.

#### **4.4 Gonioskopie-assistierte transluminale Trabekulotomie**

Der mittlere Baseline-IOD lag in dieser Gruppe mit  $21,83 \pm 9,31$  mmHg etwas höher als bei den anderen untersuchten OP-Verfahren. Zu den Kontrollen nach einem, zwei und drei Jahren konnte der Augeninnendruck und der Medikamentenbedarf signifikant gesenkt werden. Das Ausmaß der Drucksenkung nach Durchführung einer GATT lässt sich in der vorliegenden Studie mit der nach Kanaloplastik ab externo vergleichen.

Es liegt eine große retrospektive Vergleichsstudie von Grover et al. aus dem Jahr 2018 vor, in der 198 Patienten nach GATT in einem Beobachtungsintervall von zwei Jahren postoperativ untersucht wurden. Es erfolgte eine Einteilung in sechs Subgruppen, wobei zwischen Patienten mit primärem Offenwinkelglaukom und allen anderen Glaukomformen unterschieden wurde. Hieraus erfolgte eine Aufgliederung in Subgruppen mit kombinierter und ohne kombinierter Katarakt-Operation sowie mit bereits pseudophaken Patienten. Der mittlere Augeninnendruck betrug präoperativ zwischen  $22,5 \pm 5,4$  mmHg und  $30,9 \pm 10,0$  mmHg und lag nach einem Jahr zwischen  $12,2 \pm 3,5$  mmHg und  $17,1 \pm 6,7$  mmHg in den verschiedenen Subgruppen. Nach zwei Jahren bestanden Augeninnendruckwerte zwischen  $13,4 \pm 4,7$  mmHg und  $15,8 \pm 7,4$  mmHg. Der Augeninnendruck konnte in allen Untersuchungsgruppen zu den postoperativen Kontrollen signifikant unter den mittleren Ausgangsdruck gesenkt werden. Auch der mittlere Medikamentenbedarf sank bis auf eine Ausnahme signifikant in den Subgruppen von  $2,6 \pm 1,1$  bis  $3,6 \pm 1,2$  Wirkstoffen pro Patient präoperativ auf Werte von  $0,8 \pm 1,1$  bis  $1,7 \pm 1,6$  nach einem und  $1,0 \pm 1,6$  bis  $1,8 \pm 1,5$  nach zwei Jahren.<sup>45</sup> Aufgrund des sehr unterschiedlichen Studienaufbaus der Studie von Grover et al. ist ein Vergleich mit der im Rahmen dieser Dissertation analysierten Daten schwierig. In allen Gruppen zusammengenommen sank der Augeninnendruck bei Grover et al. im Mittel um 9,2 mmHg nach zwei Jahren zum Ausgangsaugeninnendruck (unsere Studie: 7,56 mmHg). Insgesamt zeigt sich daher eine durchaus vergleichbare Drucksenkung, wobei in unserer Studie der Medikamentenbedarf deutlicher gesenkt werden konnte.

In einer Arbeit von Aktas et al. aus dem Jahr 2019 wurden 104 Operationen durchschnittlich  $19,4 \pm 8,1$  Monate nachverfolgt. Der präoperative Augeninnendruck lag bei  $25,0 \pm 7,3$  mmHg unter  $3,4 \pm 0,6$  Wirkstoffe pro Patient. Im Rahmen der letzten Visite lag der Augeninnendruck und der Medikamentenbedarf signifikant

niedriger bei  $15,9 \pm 4,3$  mmHg unter  $1,2 \pm 0,5$  Wirkstoffe pro Patient ( $< 0,001$ ). Die prozentuale Drucksenkung bei der letzten Visite (36,4%) ist mit der zu den Langzeitkontrollen am Zürcher und Oltener Patientenkollektiv vergleichbar. Aufgrund der effektiven Augeninnendruck- und Medikamentenreduktion empfehlen die Autoren die GATT auch bei Patienten in moderaten oder bereits fortgeschrittenen Krankheitsstadien.<sup>5</sup>

In der Studie von Grover et al. wurden augeninnendrucksenkende Operationen in den ersten zwei Jahren postoperativ an 51 Patienten (25,8%) durchgeführt, bei Aktas et al. an sieben Augen (6,7%), in der vorliegenden Studie war dies nach drei Jahren Nachbeobachtung in zwei Fällen (8,3%) notwendig. Als häufigste Nebenwirkung trat sowohl hier (50,0% der Fälle) als auch bei Grover et al. (31,3%) und Aktas et al. (28,3%) ein Hyphäma auf. In unserer Studie kam es in zwei Fällen postoperativ zu schwerwiegenderen Komplikationen, in einem Fall mit subtotalem Hyphäma und Glaskörperblutung und in einem anderen Fall zu einer ausgeprägten Druckentgleisung, die mittels Parazentesewiedereröffnung entlastet werden musste. Auch bei Grover et al. kam es vereinzelt zu schweren Komplikationen mit Iridodialyse in zwei Fällen sowie Cyclodialyse in einem weiteren Fall. Bei einem Patienten kam es zu einer Aderhautschwellung und hypotoner Makulopathie. Aktas et al. führten aufgrund einer ausgeprägten Blutung in die Vorderkammer in zwei Fällen eine Vorderkammerspülung durch, in einem Fall kam es zu einer suprachoroidalen Blutung. Ein Patient entwickelte ein toxic anterior segment syndrome (TASS) und in einem weiteren Fall kam es zu einer Iridodialyse. Sowohl unsere als auch die Studie von Grover et al. beobachteten eine kurzzeitige postoperative Visusverschlechterung, die in beiden Studienpopulationen nach einem Monat nicht mehr bestand.<sup>5,45</sup> Es lässt sich daher festhalten, dass mit der GATT ein in der Drucksenkung effektives Operationsverfahren zur Verfügung steht, jedoch ein gewisses Risikoprofil für postoperative Komplikationen (insbesondere intra- und postoperative Blutungen) besteht.

Eine Kombination der beiden Ab interno-Verfahren mit Durchführung einer Viskodilatation des Schlemm'schen Kanals und der Kollektorkanäle sowie anschließender 360°-Trabekulotomie ist möglich. Hierzu publizierten Al Habash et al. 2020 eine Studie mit 20 Patienten, die nach einem solchen kombinierten Eingriff und zusätzlicher Katarakt-Operation bis ein Jahr postoperativ nachbeobachtet wurden. Die Augeninnendrucksenkung lag nach einem Jahr mit 32,7% in einem

ähnlichen Bereich wie in den Studien, in denen eine reine GATT durchgeführt wurde (prä-OP: IOD=  $19,75 \pm 4,68$  mmHg; Med.:  $3,4 \pm 0,6$  Wirkstoffe pro Patient; 1 Jahr: IOD=  $13,30 \pm 1,30$  mmHg; Med.:  $1,1 \pm 1,0$  Wirkstoffe pro Patient) bei ähnlichem Nebenwirkungsprofil.<sup>6</sup>

## **4.5 Potentielle Störfaktoren**

### **4.5.1 Patientenkollektiv**

Für die Aufnahme in diese Studie wurden wenige Ausschlusskriterien festgelegt, sodass es sich insgesamt um ein heterogenes Patientenkollektiv handelt. Dies betrifft den bisherigen Krankheitsverlauf, den Fortgeschrittenheitsgrad des Glaukoms, die Anzahl der antiglaukomatösen Wirkstoffe sowie die bereits durchgeführten Glaukomeingriffe und andere Augenvorerkrankungen. In den Vergleichsstudien bestanden teils Ausschlusskriterien, wie bestimmte oder sämtliche Glaukomvoreingriffe oder Augenvoroperationen.<sup>43,68,60,23</sup> Hieraus resultiert auf der einen Seite eine schwierigere Vergleichbarkeit mit anderen Studien sowie mögliche Verzerrungen in Bezug auf den Therapieerfolg. Auf der anderen Seite stellt das hier untersuchte Patientengut in seiner Heterogenität ein realistisches Abbild dessen dar, mit dem sich die Glaukomchirurgin/der Glaukomchirurg im Alltag konfrontiert sieht und liefert Daten zur nicht fistulierenden Glaukomchirurgie aus dem klinischen Alltag.

### **4.5.2 Präoperativer Augeninnendruck**

Der Ausgangs-Augeninnendruck wurde in den Vergleichsstudien sehr unterschiedlich und häufig gar nicht definiert. Lewis et al. wählten einen Augeninnendruck innerhalb der letzten 60 Tage vor der Operation von 16 mmHg oder höher.

Lag ein solcher Augeninnendruck nicht vor, erfolgte der Ausschluss aus der Studie, zudem musste der höchste je gemessene Augeninnendruck mehr als 21 mmHg betragen.<sup>68</sup> Grieshaber et al. nahmen für ihre Studie über den Stegmann Canal Expander nur Patienten mit einem Augeninnendruck von  $>21$  mmHg unter maximal tolerierbarer Therapie auf und erhoben den Mittelwert aus drei Augeninnendruckmessungen am präoperativen Tag.<sup>43</sup> In der Studie von Grover et al. wurde der Baseline-IOD als der Mittelwert zwischen den letzten beiden präoperativen Messungen festgelegt.<sup>44</sup> Weitere mögliche Definitionen des

Ausgangsaugeninnendrucks sind unter anderem der höchste Augeninnendruck vor dem Ansetzen einer Lokalthherapie bzw. vor einer operativen Maßnahme oder unter Lokalthherapie sowie der Augeninnendruck mit „wash-out“, das heißt ein Augeninnendruck unter kurzzeitigem Absetzen der Lokalthherapie direkt vor dem operativen Eingriff. Ein einheitlicher Konsens besteht bei der Wahl des Ausgangs-IODs nicht.<sup>92</sup> Der Vergleich der prä- zur postoperativen Drucksenkung (meist als prozentuale Drucksenkung angeben) mit anderen Studien ist daher schwierig.

In der vorliegenden Studie erfolgte ein Einschluss aller mit entsprechenden OP-Verfahren versorgter Patienten unabhängig vom Ausgangsinnendruck. Für die Betrachtung der Daten in dieser Dissertation wurde der letzte Augeninnendruck vor der Operation als Baseline-IOD definiert und als Vergleichsparameter für die Kontrollen festgelegt. Zudem wurde der Tmax-Wert, als höchster unter Therapie gemessener Augeninnendruck in den Boxplots aufgeführt und eine statistische Berechnung mit dem Wert durchgeführt. Es zeigte sich, dass in allen Fällen, in denen die Augeninnendruckwerte signifikant zum Baseline-IOD gesenkt werden konnten, auch eine signifikante Augeninnendrucksenkung zum Tmax-Wert vorlag.

### **4.5.3 Weitere Störfaktoren**

Eine Limitation der Studie liegt in der teils nur kurzen Follow-up-Zeit. So wurden auch Patienten eingeschlossen, bei denen zum Zeitpunkt der Datenerhebung noch keine Langzeitdaten vorlagen. Dies ermöglicht zwar Aussagen zur Operationssicherheit und zur Beurteilung des kurzfristigen Operationserfolgs, die Einschätzung des Langzeiterfolgs wird wegen der geringen Fallzahl zu den Langzeitkontrollen aber schwieriger. Aufgrund des retrospektiven Designs und der Erhebung von Daten in den Regionen Zürich/Olten lässt sich ein gewisses Selektions-Bias in dieser Studie nicht ausschließen. Weitere Limitationen stellen die teils kleinen Studienpopulationen dar, was für die Untersuchungen der Patienten mit Stegmann Canal Expander, Kanaloplastik ab interno und GATT zutrifft. Da für diese drei Gruppen bisher kaum Langzeitdaten vorliegen, sind die im Rahmen dieser Doktorarbeit erhobenen Daten trotzdem von Bedeutung. Diese Arbeit zeigt erstmals 3-Jahresdaten für diese Operationsverfahren auf. Jedoch sind weitere, größer angelegte Studien zu diesen Operationen sinnvoll, um unserer Ergebnisse zu untermauern.

Die für die vorliegende Studie berücksichtigten Patienten waren in vielen Fällen bereits antiglaukomatös voroperiert, was sich auf den Operationserfolg auswirken<sup>65</sup> und die Vergleichbarkeit mit anderen Studien erschweren kann, da in manchen Arbeiten voroperierte Patienten exkludiert (z.B. Lewis et al.<sup>68</sup>) und in anderen eingeschlossen wurden (z.B. Khaimi et al.<sup>58</sup>). Eine weitere Limitation besteht darin, dass in die statistische Auswertung auch Patienten einbezogen wurden, die im Verlauf einen augeninnendrucksenkenden Folgeeingriff oder eine erneute augeninnendrucksenkende Lokalthherapie erhielten. Dies könnte zu Verzerrungen bezüglich des augeninnendrucksenkenden Effekts der Operation führen. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Rate an reoperierten Patienten stets verhältnismäßig gering ausfiel. Ein weiteres Problem in der Vergleichbarkeit der verschiedenen Studien besteht auch dadurch, dass es kein einheitliches Vorgehen bei Patienten mit Reoperationen aufgrund von Therapieversagen gibt. Lewis et al. exkludierten beispielsweise alle Patienten ab dem Zeitpunkt der Reoperation. Brusini schloss Patienten aus, die nach erfolgloser Kanaloplastik eine Trabekulektomie erhielten. Patienten, die eine Goniopuncture erhielten, verblieben in der Studie. Khaimi et al. machen keine Angaben zu den reoperierten Patienten.<sup>22,58,69</sup>

Eine weitere Limitation könnte in der Nichtunterscheidung zwischen Patienten mit und ohne kombinierter Kataraktoperation in den Gruppen mit Stegmann Canal Expander, Kanaloplastik ab interno und GATT liegen. Dies war aufgrund der kleinen Stichprobengrößen bei diesen OP-Verfahren nicht möglich. In der Studiengruppe mit Kanaloplastik ab externo zeigte sich in der Gegenüberstellung jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen Patienten mit und ohne Phakoemulsifikation und Hinterkammerlinsenimplantation. Die Vergleichsstudien kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen.<sup>5,58,68</sup>

#### **4.6 Fazit und Ausblick**

Die vorliegende Studie bestätigt die bisherigen Ergebnisse, wonach die Kanaloplastik ab externo ein in der Augeninnendrucksenkung und Verringerung des Medikamentenbedarfs effektives Operationsverfahren beim Offenwinkelglaukom darstellt. Zudem stützt die Studie die bisherigen Daten dahingehend, dass schwerwiegende Nebenwirkungen und postoperative Komplikationen selten auftreten, was insbesondere gegenüber dem Operationsverfahren der Trabekulektomie einen erheblichen Vorteil darstellt. Aufgrund der effektiven

Drucksenkung kann das Operationsverfahren auch bei Patienten in fortgeschritteneren Krankheitsstadien angewendet werden.

Bemerkenswert ist, dass nach einer akzidentiellen intraoperativen Perforation des Descemetfensters ein messbarer und langfristiger, jedoch nicht signifikanter Effekt auf die Augeninnendrucksenkung festzustellen ist. Es besteht daher für die Operateurin oder dem Operateur die Möglichkeit, durch eine mutwillige Perforation des Descemetfensters den Behandlungserfolg einer Kanaloplastik ab externo zu optimieren. Der Glaukomchirurgin/dem Glaukomchirurgen steht ergänzend zur klassischen Kanaloplastik die Kanaloplastik mit Implantation eines Stegmann Canal Expanders zur Verfügung. In manchen Fällen stellt sich intraoperativ heraus, dass eine 360°-Sondierung und Einlegung eines Fadens, z.B. aufgrund von Vernarbungen und Verwachsungen des Schlemm'schen Kanals, nicht möglich sind. In diesen Fällen bietet die Implantation des Expanders die Möglichkeit, eine Dilatation und ein Offenhalten von 180° des Schlemm'schen Kanals zu ermöglichen und somit die Kanaloplastik erfolgreich zu Ende zu bringen. In der vorliegenden Studie fiel die Augeninnendrucksenkung im Vergleich zur klassischen Kanaloplastik zu den Langzeitkontrollen etwas weniger ausgeprägt aus. Deshalb sowie aufgrund der kaum vorhandenen Studien zu diesem Operationsverfahren und der hierdurch nur eingeschränkten Beurteilbarkeit der Effektivität sowie des Nebenwirkungsprofils, sollte die Kanaloplastik ab externo weiter als das Standardverfahren angesehen werden und das Einlegen eines Stegmann Canal Expanders den o.g. Situationen vorbehalten bleiben.

Noch weniger invasiv sind die Ab interno-Verfahren der Kanaloplastik, welche zu den MIGS-Verfahren zählen. In der hier untersuchten Studiengruppe an Patienten, die eine Kanaloplastik ab interno erhielten, konnte eine signifikante Augeninnendrucksenkung und eine deutliche Reduktion des Medikamentenbedarfs zu den postoperativen Kontrollen nachgewiesen werden. Der augeninnendrucksenkende Effekt fällt im Vergleich zur Kanaloplastik ab externo-Gruppe aber etwas niedriger aus (Augeninnendrucksenkung nach drei Jahren: ab externo 35,3%, ab interno 25,4%). Bemerkenswert sind die im Rahmen dieses Operationsverfahrens selten beobachteten Komplikationen, die, wenn sie auftraten, nur als leichte Komplikationen zu werten sind. Die Sehschärfe fiel auch in den ersten postoperativen Tagen und Wochen nicht nennenswert ab, wie es im Rahmen der Kanaloplastik ab externo der Fall ist. Die schnellere Rehabilitation unterstreicht den

schonenden Charakter der Kanaloplastik ab interno. Für Patienten, die unter einer Augentropfenunverträglichkeit leiden, wie es in dieser Studie bei fast jedem vierten der 317 Patienten der Fall war, kann dieses Verfahren als eine risikoarme Behandlungsoption angesehen werden, um eine Tropffreiheit zu erreichen. Da Blutungen sehr selten auftreten, ist die Kanaloplastik ab interno auch bei Patienten unter antikoagulativer Therapie oder mit einer hämorrhagischen Diathese gut geeignet. Aufgrund der geringen Invasivität und der kurzen Operationszeit eignet sich die Kanaloplastik ab interno im Gegensatz zur Kanaloplastik ab externo als Eingriff in lokaler Betäubung. Dies bietet den Vorteil, dass Patienten, die aufgrund von Vorerkrankungen nicht narkosefähig sind, mit diesem Verfahren operiert werden können. Auch für diese Operation bedarf es weiterer Studien mit größeren Fallzahlen, um den langfristigen augeninnendrucksenkenden Effekt sowie die Sicherheit dieser neuen Behandlungsmethode zu bestätigen. Als weiteres ab interno-Verfahren steht die GATT zur Verfügung. Unsere Studie sowie die vorliegenden Vergleichsstudien bestätigen, dass eine ab interno-Trabekulotomie nicht nur bei dysgenetischem Kammerwinkel - im Rahmen dessen Trabekulotomien schon seit vielen Jahren durchgeführt werden<sup>107</sup>- sondern auch bei unterschiedlichen Formen des Offenwinkelglaukoms angewendet werden kann und zu einer effektiven Augeninnendrucksenkung und Reduktion des Medikamentenbedarfs ähnlich der Kanaloplastik ab externo führt. Vorteil dieses Ab interno-Verfahrens ist im Vergleich zur Kanaloplastik ab interno eine stärkere Augeninnendrucksenkung (Augeninnendrucksenkung nach drei Jahren: GATT 37,0%, Kanaloplastik ab interno 25,4%), jedoch zeigte sich bei diesem MIGS-Verfahren auch ein erheblich höherer Anteil an Patienten mit postoperativen Komplikationen. Insbesondere ist hier das Risiko für teils ausgeprägte Nachblutungen in die Vorderkammer zu nennen. In der vorliegenden Studie (50% der Fälle) und den Vergleichsstudien traten diese relativ häufig auf und machten teilweise Reoperationen notwendig. Das Verfahren kommt daher auch in fortgeschritteneren Erkrankungsstadien in Frage, sollte aber nicht bei antikoagulierten Patienten und Patienten mit hämorrhagischen Diathesen angewendet werden. Ein Vorteil beider ab interno-Verfahren liegt darin, dass die Bindehaut geschont wird, was den Therapieerfolg von potenziellen Folgeeingriffen, wie einer Trabekulektomie, wahrscheinlicher macht.

## 5. Zusammenfassung

Neue technische Errungenschaften machen seit einigen Jahren glaukomchirurgische Eingriffe an Trabekelmaschenwerk und Schlemm'schen Kanal, den Bereichen des stärksten Abflusswiderstands beim Offenwinkelglaukom, möglich. In dieser Arbeit wurde die Kanaloplastik ab externo und die von ihr abgeleiteten, minimalinvasiven kammerwinkelchirurgischen Operationsmethoden (MIGS) erläutert und ihre Wirksamkeit (Augeninnendrucksenkung und Verringerung des Medikamentenbedarfs) sowie das Sicherheitsprofil überprüft. Hierfür erfolgte eine retrospektive Datenanalyse von 237 Patienten, an denen 317 glaukomchirurgische OPs zwischen 2012 und 2016 in den Pallas Kliniken Zürich/Olten vollzogen wurden. Alle vier untersuchten Verfahren zeigten eine effektive Augeninnendrucksenkung bis drei Jahre postoperativ (Kanaloplastik ab externo: prä-OP:  $20,82 \pm 7,2$  mmHg, ein Jahr:  $13,05 \pm 4,0$  mmHg ( $p < 0,001$ ), zwei Jahre:  $13,47 \pm 3,4$  mmHg ( $p < 0,001$ ), drei Jahre:  $13,32 \pm 2,8$  mmHg ( $p < 0,001$ ); Stegmann Canal Expander: prä-OP:  $21,22 \pm 10,6$  mmHg, ein Jahr:  $14,44 \pm 4,7$  mmHg ( $p = 0,012$ ), zwei Jahre:  $14,83 \pm 3,3$  mmHg ( $p = 0,028$ ), drei Jahre:  $15,71 \pm 3,6$  mmHg; Kanaloplastik ab interno: prä-OP:  $16,32 \pm 3,2$  mmHg, ein Jahr:  $12,55 \pm 3,33$  mmHg ( $p < 0,001$ ), zwei Jahre:  $13,67 \pm 2,2$  mmHg ( $p < 0,001$ ), drei Jahre:  $12,17 \pm 2,2$  mmHg ( $p < 0,001$ ); GATT: prä-OP:  $21,82 \pm 9,31$  mmHg, ein Jahr:  $13,33 \pm 2,08$  mmHg ( $p = 0,001$ ) zwei Jahre:  $14,26 \pm 2,90$  mmHg ( $p = 0,002$ ), drei Jahre:  $13,76 \pm 2,11$  mmHg ( $p = 0,001$ )). Der Medikamentenbedarf konnte in allen Gruppen signifikant gesenkt werden. Die Kanaloplastik ab externo senkt den Augeninnendruck sehr effektiv, Komplikationen sind selten, aber möglich. Wir stellten fest, dass durch die intraoperative Perforation des Descemetfensters eine zusätzliche, jedoch nicht signifikante Reduktion des Augeninnendrucks erzielt werden kann. Ein Cheese-wiring hat keinen Effekt auf den Augeninnendruck. In Fällen, in denen keine 360°-Katheterisierung mit Fadeneinlegung in den Schlemm'schen Kanal möglich ist, kann der Stegmann Canal Expander als sichere aber etwas minder effektive Alternative verwendet werden. Die Kanaloplastik ab interno, als weniger aufwendiges MIGS-Verfahren, senkt den Augeninnendruck prozentual geringer als die Kanaloplastik ab externo, zeichnet sich jedoch durch ein hohes Sicherheitsprofil aus. Das Verfahren kommt daher v.a. bei Patienten mit Medikamentenunverträglichkeit und in frühen Krankheitsstadien in Frage. Die GATT ist ein weiteres MIGS-Verfahren, welches den Augeninnendruck effektiv zu senken vermag, jedoch besteht ein gewisses Risiko für intra- und postoperative Blutungen.

## 6. Literaturverzeichnis

- 1) **Abu-Hassan DW, Acott TS, Kelley MJ (2014):** The Trabecular Meshwork: A Basic Review of Form and Function. *Journal of Ocular Biology* 2 (1)
- 2) **Acott TS, Kelley MJ (2008):** Extracellular Matrix in the Trabecular Meshwork. *Experimental Eye Research* 86 (4), 543-561
- 3) **Acott TS, Kelley MJ, Keller KE, Vranka JA, Abu-Hassan DW, Li X, Aga M, Bradley JM (2014):** Intraocular Pressure Homeostasis: Maintaining Balance in a High-Pressure Environment. *Journal of Ocular Pharmacology and Therapeutics* 30 (2-3), 94-101
- 4) **Ahmed IIK, Fea A, Ang RE, Harasymowycz P, Jampel HD, Samuelson TW, Chang DF, Rhee DJ (2020):** A Prospective Randomized Trial Comparing Hydrus and iStent Microinvasive Glaucoma Surgery Implants for Standalone Treatment of Open-Angle Glaucoma: The COMPARE Study. *Ophthalmology* 127 (1), 52-61
- 5) **Aktas Z, Ucgul AY, Bektas C, Karamert SS (2019):** Surgical Outcomes of Prolene Gonioscopy-assisted Transluminal Trabeculotomy in Patients with moderate to advanced Open-Angle Glaucoma. *Journal of Glaucoma* 28 (10), 884-888
- 6) **Al Habash A, Alrushoud M, Al Abdulsalam O, Al Somali AI, Aljindan M, Al Ahmadi AS (2020):** Combined Gonioscopy Assisted Transluminal Trabeculotomy (GATT) with Ab Interno Canaloplasty (ABiC) in Conjunction with Phakoemulsification: 12-Months Outcomes. *Clinical Ophthalmology* 14, 2491-2496
- 7) **Andrés-Guerrero V, García-Feijoo J, Konstas AG (2017):** Targeting Schlemm's Canal in the Medical Therapy of Glaucoma: Current and Future Considerations. *Advances in Therapy* 34 (5), 1049-1069
- 8) **Asher KW (1942):** The Aqueous Veins- I. Physiologic Importance of the Visible Elimination of Intraocular Fluid. *American Journal of Ophthalmology* 25, 1174-1209
- 9) **Ashton N, Brini A, Smith R (1956):** Anatomical studies of the trabecular meshwork of the human eye. *British Journal of Ophthalmology* 40 (5), 257-282
- 10) **Ayyala RS, Chaudhry AL, Okogbaa CB, Zurakowski D (2011):** Comparison of surgical outcomes between canaloplasty and trabeculectomy at 12 months' follow up. *Journal for Ophthalmology* 118, 2427-2433
- 11) **Bathija R, Gupta N, Zangwill L, Weinreb RN (1998):** Changing Definition of Glaucoma. *Journal of Glaucoma* 7 (3), 165-169
- 12) **Battista SA, Lu Z, Hofmann S, Freddo T, Overby D, Gong H (2008):** Reduction of the Available Area for Aqueous Humor Outflow and Increase in Meshwork Herniations into Collector Channels Following Acute IOP Elevation in Bovine Eyes. *Investigative Ophthalmological and Visual Science*, 49 (12), 5346-5352
- 13) **Bendel RE, Patterson MT (2018):** Long-term Effectiveness of Trabectome (Ab interno Trabeculectomy) Surgery. *Journal of Current Glaucoma Practice* 12 (3), 119-124
- 14) **Bentley MD, Hann CR, Fautsch MP (2016):** Anatomical Variation of Human Collector Channel Orifices. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 57 (3), 1153-1159

- 15) **Best U-P, Domack H, Schmidt V (2005):** Langzeitergebnisse nach selektiver Lasertrabekuloplastik- eine klinische Studie an 269 Augen. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 222 (4), 326-331
- 16) **Bhartiva S, Ichhpujani P, Shaarawy T (2015):** Surgery on the Trabecular Meshwork: Histopathological Evidence. *Journal of Current Glaucoma Practive* 9 (2), 51-61
- 17) **Bill A (1965):** The Aqueous Humor Drainage Mechanism in Cynomolgus Monkey (*Macaca irus*) with Evidence for Unconventional Routes. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 4 (5) 911-919
- 18) **Brandao LM, Schötzau A, Grieshaber M (2015):** Suture Distension of Schlemm's Canal in Canaloplasty: An Anterior Segment Imaging Study. *Journal of Ophthalmology* Volume 2015, 1-7
- 19) **Brubaker RF (1991):** Flow of aqueous humor in humans (The Friedenwald Lecture). *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 32 (13), 3145-3166
- 20) **Brüggemann A, Despouy JT, Wegent A, Müller M (2013):** Intraindividual Comparison of Canaloplasty versus Trabeculectomy with Mitomycin C in a Single-Surgeon Series. *Journal of Glaucoma* 22 (7), 577-583
- 21) **Brüggemann A, Müller M (2012):** Trabekulektomie versus Kanaloplastik-eine Kosten- und Aufwandsanalyse. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 229 (11), 1118-1123
- 22) **Brusini P (2014):** Canaloplasty in Open-Angle Glaucoma Surgery: A Four-Year Follow-Up, *Scientific World Journal*, (online journal)
- 23) **Bull H, von Wolff K, Körber N, Tetz M (2011):** Three-year canaloplasty outcomes for the treatment of open-angle glaucoma: European study results. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology* 249 (10), 1537-1545
- 24) **Cairns JE (1968):** Trabeculectomy-Preliminary Report of a New Method. *American Journal of Ophthalmology* 66 (4), 673-679
- 25) **Cameron B, Field M, Ball S, Kearney J (2006):** Circumferential viscodilation of Schlemm's canal with a flexible microcannula during non-penetrating glaucoma surgery. *Digital Journal of Ophthalmology* 12 (1) (EPaper)
- 26) **Casson R, Chidlow G, Wood JP, Crowston JG, Goldberg I (2012):** Definition of glaucoma: clinical and experimental concepts. *Clinical and Experimental Ophthalmology* 40, 341-349
- 27) **Costa VP, Smith M, Spaeth GL, Gandham S, Markovitz B (1993):** Loss of visual acuity after trabeculectomy. *American Journal of Ophthalmology* 100 (5), 599-612
- 28) **Dautriche CN, Tian Y, Xie Y, Sharfstein S (2015):** A Closer Look at Schlemm's Canal Cell Physiology: Implications for Biomimetics. *Journal of Functional Biomaterials* 6 (3), 963-985
- 29) **Dietlein TS, Hermann MH, Jordan MF (2009):** The Medical and Surgical Treatment of Glaucoma. *Deutsches Ärzteblatt International* 106 (37), 597-606
- 30) **European Glaucoma Society:** Terminology and Guidelines for Glaucoma (2017), 4th Edition Chapter 1: Patient Examination. *British Journal of Ophthalmology* 101 (4),32-33
- 31) **European Glaucoma Society:** Terminology and Guidelines for Glaucoma (2017), 4th Edition Chapter 3: Treatment principles and options supported by the EGS Foundation. *British Journal of Ophthalmology* 101 (6), 130-190

- 32) **Fautsch MP, Johnson DH, the Second ARVO/Pfizer Research Institute Working Group (2006):** Aqueous Humor Outflow-What do we know? Where will it lead us? *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 47 (10), 4181-4187
- 33) **Francis BA, Akil H, Bert BB (2017):** Ab interno Schlemm's Canal Surgery. *Developments in Ophthalmology* 59, 127-146
- 34) **Freddo TF, Chaum E (2017):** *Anatomy of the Eye and Orbit*. 1st Edition, Wolters Kluwer, Philadelphia
- 35) **Gallardo MJ, Supnet RA, Ahmed IIK (2018):** Viscodilation of Schlemm's canal for the reduction of IOP via an ab interno approach. *Clinical Ophthalmology* 12, 2149-2155
- 36) **Goel M, Picciani RG, Lee RK, Bhattacharva SK (2010):** Aqueous Humor Dynamics: A Review. *Open Ophthalmology Journal* 4, 52-59
- 37) **Grehn F (2012):** Linse. In: *Augenheilkunde*, 31. Auflage, 149-169, Springer Verlag Berlin, Heidelberg
- 38) **Grehn F (2012):** Glaukom. In: *Augenheilkunde*, 31. Auflage, 316-339, Springer Verlag Berlin, Heidelberg
- 39) **Griehaber MC, Stegmann R, Griehaber HR, Meyer P (2015):** Novel device for expanding Schlemm's canal: a morphological study. *British Journal of Ophthalmology* 99, 875-877
- 40) **Griehaber MC (2017):** Visco canalostomy and Canaloplasty: Ab Externo Schlemm's Canal Surgery. *Developments in Ophthalmology* 59, 113-126
- 41) **Griehaber MC, Pienaar A, Olivier J, Stegmann R (2010):** Canaloplasty for primary open-angle glaucoma: long-term outcome. *British Journal of Ophthalmology* 94, 1478-1482
- 42) **Griehaber MC, Schoetzau A, Flammer J, Orgül S (2013):** Postoperative microhyphema as a positive prognostic indicator in canaloplasty. *Acta Ophthalmologica* 91 (2), 151-156
- 43) **Griehaber MC, Schoetzau A, Griehaber HR, Stegmann R (2017):** Canaloplasty with Stegmann Canal Expander for primary open-angle glaucoma: two year clinical results. *Acta Ophthalmologica*, 95 (5), 503-508
- 44) **Grover DS, Godfrey DG, Smith O, Feuer WJ, Montes De Oca I, Fellmann RL (2014):** Gonioscopy-assisted transluminal trabeculotomy, ab interno trabeculotomy: technique report and preliminary results. *Journal of Ophthalmology* 121, 855-861
- 45) **Grover DS, Smith O, Fellman RL, Godfrey DG, Gupta A, Montes de Oca I, Feuer WJ (2018):** Gonioscopy-assisted Transluminal Trabeculotomy: An Ab Interno Circumferential Trabeculotomy: 24 Months Follow-up. *Journal of Glaucoma* 27 (5), 393-401
- 46) **Haifeng L, Haitao Z, Yanhua L, Han Y (2019):** Safety and efficacy of canaloplasty versus trabeculectomy in treatment of glaucoma. *Oncotarget*, 8 (27)
- 47) **Heijl A, Leske MC, Bengtsson B, Hyman L, Bengtsson B, Hussein M (2002):** Reduction of Intraocular pressure and Glaucoma Progression-Results from the Early Manifest Glaucoma Trial. *The Archives of Ophthalmology* 120, 1268-1279
- 48) **Holladay JT (1997):** Proper Method for Calculating Average Visual Acuity. *Journal of Refractive Surgery*, 3, 388-391
- 49) **Huang AS, Francis BA, Weinreb RN (2018):** Structural and Functional Imaging of Aqueous Humor Outflow: A review. *Clinical and Experimental Ophthalmology* 46 (2), 158-168

- 50) **Hughes T, Traynor M (2020)**: Clinical Results of Ab Interno Canaloplasty in Patients in Open-Angle Glaucoma. *Clinical Ophthalmology* 14, 3641-3650
- 51) **Johnson DH, Johnson M (2001)**: How does nonpenetrating glaucoma surgery work? Aqueous outflow resistance and glaucoma surgery. *Journal of Glaucoma* 10 (1), 55-67
- 52) **Johnson M (2006)**: What controls aqueous humor outflow resistance. *Experimental Eye Research*, 82 (4), 545-557
- 53) **Johnstone MA, Grant WM (1973)**: Pressure-Dependent Changes in Structures of the Aqueous Outflow System of Human and Monkey Eyes. *American Journal of Ophthalmology* 75 (3), 365-383
- 54) **Kammer JA, Mundy KM (2015)**: Suprachoroidal Devices in Glaucoma Surgery. *Middle East African Journal of Ophthalmology* 22 (1), 45-52
- 55) **Kapetanakis VV, Chan, MPY, Foster PJ, Cook DG, Owen CG, Rudnicka AR (2016)**: Global Variations and Time Trends in the Prevalence of Open Angle Glaucoma (POAG): A Systematic Review and Meta-Analysis. *British Journal of Ophthalmology* 100 (1), 86-93
- 56) **Kazemi A, McLaren JW, Kopczyński CC, Heah TG, Novack GD, Sit AJ (2018)**: The Effects of Netarsudil Ophthalmic Solution on Aqueous Humor Dynamics in a Randomized Study in Humans. *Journal of Ocular Pharmacology and Therapeutics* 34 (5), 380-386
- 57) **Keller KE, Acott TS (2013)**: The Juxtacanalicular Region of Ocular Trabecular Meshwork: A Tissue with a Unique Extracellular Matrix and Specialized Function. *Journal of Ocular Biology* 1(1), 3-9
- 58) **Khaimi MA, Dvorak JD, Ding K (2017)**: An Analysis of 3-year outcomes following canaloplasty for the treatment of open-angle glaucoma. *Journal of Ophthalmology*. (Epub)
- 59) **Kohnen T (2010)**: MICS – Mikroinvasive Kataraktchirurgie. *Der Ophthalmologe* 107, 105-107
- 60) **Körber N (2017)**: Kanaloplastik ab interno-eine minimalinvasive Alternative. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 234, 991-995
- 61) **Körber N (2018)**: Ab interno Canaloplasty for the Treatment of Glaucoma: A Case Series Study. *Spektrum der Augenheilkunde* 32 (6). 223-227
- 62) **Kornmann HL, Fellmann RL, Feuer WJ, Butler MR, Godfrey, DG, Smith, OU, Emanuel, ME, Grover, DS (2019)**: Early Results of Goniotomy with Kahook Dual Blade, a Novel Device for the Treatment of Glaucoma. *Clinical Ophthalmology* 13, 2369-2376
- 63) **Kroese M, Burton H (2003)**: Primary open angle glaucoma. The need for a consensus case definition. *Journal of Epidemiology and Community Health* 57 (9), 752-754
- 64) **Kwon YH, Fingert JH, Kuehn MH, Alward, WLM (2009)**: Primary Open-Angle Glaucoma. *New England Journal of Medicine* 360, 1113-1124
- 65) **Law SK, Shih K, Tran DH, Coleman AL, Caprioli J (2009)**: Long-term outcomes of repeat vs initial trabeculectomy in open-angle glaucoma. *American Journal of Glaucoma* 148 (5), 685-695
- 66) **Lenzhofer M, Hohensinn M, Strohmaier C, Reitsamer HA (2018)**: Subkonjunktivale minimalinvasive Glaukomchirurgie-Verfahren und klinische Ergebnisse. *Der Ophthalmologe* 115, 381-387
- 67) **Lewis RA, von Wolff K, Tetz M (2009)**: Canaloplasty: circumferential viscodilation and tensioning of Schlemm Canal using a microcatheter for the treatment of open angle glaucoma in adults: two year interim clinical study results. *Journal of Cataract and Refractive Surgery* 35, 814-824

- 68) **Lewis RA, von Wolff K, Tetz M, Körber N, Kearney JR, Shingleton BJ, Samuelson TW (2011):** Canaloplasty: Three years results of circumferential viscodilation and tensioning of Schlemm canal using a microcatheter to treat open-angle glaucoma. *Journal of Cataract and Refractive Surgery* 37 (4), 682-690
- 69) **Lewis RA, von Wolff K, Tetz M, Körber N, Kearney JR, Shingleton B, Samuelson TW (2007):** Canaloplasty: Circumferential viscodilation and tensioning of Schlemm's canal using a flexible microcatheter for the treatment of open-angle glaucoma in adults- Interim clinical study analysis. *Journal of Cataract and Refractive Surgery* 33, 1217-1226
- 70) **Lin C-W, Sherman B, Moore LA, Laethem CL, Lu D-W, Pattabiraman PP, Rao PV, de Long MA, Kopczynski CC (2018):** Discovery and Preclinical Development of Netarsudil, a Novel Ocular Hypotensive Agent for the Treatment of Glaucoma. *Journal of Ocular Pharmacology and Therapeutics* 34 (1-2), 40-51
- 71) **Lin ZJ, Xu S, Huang SY, Zhang XB, Zhong YS (2016):** Comparison of canaloplasty and trabeculectomy for open angle glaucoma: A Meta-Analysis. *International Journal of Ophthalmology* 9, 1814-1819
- 72) **Lutjen-Drecoll E, Rohen JW (1970):** Endothelial studies of the Schlemm's canal using silver-impregnation technic. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology* 180 (4), 249-266
- 73) **Malvankar-Mehta MS, Chen YN, Iordanous Y, Wang WW, Costella J, Hutnik CML (2015):** iStent as a Solo Procedure for Glaucoma Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis, *Public Library of Science (PLoS ONE)* 10(5) (EPaper)
- 74) **Matlach J, Dhillon C, Hain J, Schlunck G, Grehn F, Klink T (2015):** Trabeculectomy versus canaloplasty (TVC study) in the treatment of patients with open-angle glaucoma: a prospective randomized clinical trial. *Acta Ophthalmologica* 93 (8), 753-761
- 75) **McPherson SD (1973):** Results of external Trabeculectomy. *Transactions of the American Ophthalmological Society*, 71, 163-170
- 76) **Moelle MC, Cursiefen C, Rejdak R, Horn F, Jünemann AGM (2014):** Time Course of Induced Astigmatism After Canaloplasty. *Journal of Glaucoma* 23 (1), 53-59
- 77) **Mossaed M, Dustin L, Minckler DS (2009):** Comparative Outcomes between Newer and Older Surgeries for Glaucoma. *Transactions of the American Ophthalmological Society* 107, 127-133
- 78) **Ondrejka S, Körber N (2019):** 360° ab-interno Schlemm's canal viscodilation in primary open-angle glaucoma. *Clinical Ophthalmology* 13, 1235-1246
- 79) **Pache M (2014):** Sleep apnoe and glaucoma. *Klinische Monatsblätter Augenheilkunde* 231, 127-129
- 80) **Palmberg P (2004):** Evidence-Based Target Pressures: How to choose and achieve them. *International Ophthalmology Clinics* 44(2), 1-14
- 81) **Pederson JE, Gaasterland DE, MacLellan HM (1977):** Uveoscleral aqueous outflow in the rhesus monkey: importance of uveal reabsorption. *Investigative and Visual Science* 16 (11), 1008-1017
- 82) Preliminary ASCRS CyPass Withdrawal Consensus Statement  
<https://www.eyeworld.org/preliminary-ascrs-cypass-withdrawal-consensus-statement> (Tag des Zugriffs: 09.12.2020)

- 83) **Pullig B, Koerber NJ, Dietlein T (2019)**: Can perforation of descemet's window (DW) improve the outcome of canaloplasty in open angle glaucoma? *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology* 257, 1733-1740
- 84) **Quigley HJ, Broman AT (2006)**: The number of people with glaucoma worldwide in 2010 and 2020. *British Journal of Ophthalmology* 90 (3), 262-267
- 85) **Quigley, HA (1996)**: Number of people with glaucoma worldwide. *British Journal of Ophthalmology* 80, 389-399
- 86) **Razeghinejad MR, Spaeth GL (2011)**: A History of the Surgical Management of Glaucoma. *Optometry and Vision Science* 88 (1), 39-47
- 87) **Rohen JW, Futa R, Lütjen-Drecoll E (1981)**: The fine structure of the cribriform meshwork in normal and glaucomatous eyes as seen in tangential sections. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 21 (4), 574-585
- 88) **Rohen JW, Rentsch, FJ (1968)**: Morphology of Schlemm's Canal and Related Vessels in the Human Eye. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 176 (4), 309-329
- 89) **Roy S, Mermoud A (2017)**: Deep Sclerectomy. *Developments in Ophthalmology* 59, 36-42
- 90) **Samet S, Ong JA, Ahmed IIK (2019)**: Hydrus microstent implantation for surgical management of glaucoma: a review of design, efficacy and safety. *Eye and Vision (London)* 6 (EPaper)
- 91) **Shaarawy TM, Mendrinós E (2009)**: The Current Situation in Non-penetrating Glaucoma Surgery. *European Ophthalmic Review* 2 (1), 35-38
- 92) **Shaarawy TM, Sherwood MB, Grehn F (2008)**: WGA Guidelines on design and reporting of glaucoma surgical trials, p. 16, Kugler Publications, Amsterdam, Netherlands
- 93) **Shahidullah M, Al-Malki WH, Delamere NA (2011)**: Mechanism of Aqueous Humor Secretion, its Regulation and Relevance to Glaucoma. In: Rumelt S (Editor): *Glaucoma-Basics and Clinical Concepts*, 3-22, IntechOpen, London
- 94) **Shields MB, Kriegelstein GK (1993)**: Kammerwasserdynamik-Anatomie und Physiologie. In: *Glaukom-Grundlagen Differentialdiagnose Therapie*, 5-33, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York
- 95) **Smit BA, Johnstone MA (2002)**: Effects of Viscoelastic Injection into Schlemm's Canal in Primate and Human Eyes: Potential Relevance to Viscoanalostomy. *Ophthalmology* 109 (4), 786-792
- 96) **Smith R (1960)**: A new technique for opening the canal of Schlemm: preliminary report. *British Journal of Ophthalmology* 44, 370-373
- 97) **Stamer WD, Braakman ST, Zhou EH, Ethier CR, Fredberg JJ, Overby DR, Johnson M (2015)**: Biomechanics of Schlemm's canal endothelium and intraocular pressure reduction. *Progress in Retinal and Eye Research* 44, 86-98
- 98) **Stamper L, Lieberman MF, Drake MV (2009)**: Chemical Composition of The Aqueous Humor. In: *Becker-Shaffer's Diagnosis and Therapy in Glaucoma*, 8. Auflage, 8-24, Mosby Inc., Elsevier, Amsterdam
- 99) **Stegmann R, Pienaar A, Miller D (1999)**: Viscoanalostomy for Open-Angle Glaucoma in Black African Patients. *Journal of Cataract and Refractive Surgery* 25 (3), 316-322.

- 100) **Susanna R, Vessani RM (2009)**: Staging Glaucoma Patient: Why and How? The Open Ophthalmology Journal 3, 59-64
- 101) **Tamm ER (2009)**: The trabecular meshwork outflow pathways: Structural and functional aspects. Experimental Eye Research 88 (4), 648-655
- 102) **Tamm ER, Carassa RG, Albert DM, Gabel BT, Patel S, Rasmussen CA, Kaufman PL (2004)**: Visco canalostomy in Rhesus Monkeys. Archives of Ophthalmology 122 (12), 1826-1838
- 103) **Tanihara H, Negi A, Akimoto M, Terauchi H, Okudaira A, Kozaki J, Takeuchi A, Nagata M (1993)**: Surgical Effects of Trabeculotomy Ab Externo on Adult Eyes with Primary Open Angle Glaucoma and Pseudoexfoliation Syndrom. The Archives of Ophthalmology 111, 1653-1661
- 104) **Tektas OY, Lütjen-Drecoll E (2009)**: Structural changes of the trabecular meshwork in different kinds of glaucoma. Experimental Eye Research 88 (4), 769-775
- 105) **Tham YC, Li X, Wong TY, Quigley HA, Aung T, Cheng CY (2014)**: Global Prevalence of Glaucoma and Projections of Glaucoma Burden through 2040- A systemic Review and Meta- Analysis. Ophthalmology 121 (11), 2081-2090
- 106) **Thomas R, Jay JL (1988)**: Raised intraocular pressure with topical steroids after trabeculectomy. Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology 266, 337-340
- 107) **Van Oterendorp C (2019)**: Glaukomchirurgie bei Vorderabschnittsdysgenesien. Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde 236 (6), 745-750
- 108) **Weinreb RN (2000)**: Uveoscleral Outflow: The Other Outflow Pathway. Journal of Glaucoma 9, 343-345
- 109) **Weinreb RN, Aung T, Medeiros FA (2014)**: The Pathophysiology and Treatment of Glaucoma. JAMA 311 (18), 1901-1911
- 110) **Weinreb RN, Khaw PT (2004)**: Primary open angle glaucoma. The Lancet 363 (9422), 1711-1720
- 111) World Health Organisation, Global Data on Visual Impairments 2010, <http://www.who.int/blindness/publications/globaldata/en/> (Tag des Zugriffs: 09.12.2020)
- 112) **Yan X, Li M, Chen Z, Zhu Y, Song Y, Zhang H (2016)**: Schlemm's Canal and Trabecular Meshwork in Eyes with Primary Open Angle Glaucoma: A Comparative Study Using High-Frequency Ultrasound Biomicroscopy. PloS One, 11 (1) (EPaper)

## 7. Anhang

Zentrale Hornhautdicke	Korrekturfaktor
475	+ 3 mmHg
500	+ 2 mmHg
525	+ 1 mmHg
550	± 0 mmHg
575	- 1 mmHg
600	- 2 mmHg
625	- 3 mmHg
650	- 4 mmHg
675	- 5 mmHg
700	- 6 mmHg

### Anlage 1: Dresdner Korrekturtabelle

**Quelle:** Kohlhaas M, Boehm GB, Spoerl E, Pürsten A, Grein HJ, Pillunat ME (2006): Effect of Central Corneal Thickness, Corneal Curvature, and Axial Length on Applanation Tonometry. Archives of Ophthalmology 124 (4), 471-476

## **8. Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. med. Maya Müller, die mir die Chance gab, dieses spannende Thema zu bearbeiten, wodurch meine Begeisterung für das Fachgebiet der Augenheilkunde weiter gesteigert wurde. Danke, dass Sie mir mit ihrer freundlichen und unterstützenden Art sowie ihrer Expertise stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Mein weiterer Dank gilt Frau Dr. med. univ. Sara Kazerounian, welche mir als meine direkte Ansprechpartnerin in Zürich in vielen Bereichen Hilfestellungen bot und jederzeit ein offenes Ohr für meine Fragen hatte.

Zudem möchte ich meinen tiefen Dank Herrn Martin Loertscher (PhD, Optometrist MSc) für sein Engagement in der statistischen Betreuung und Beratung dieser Arbeit aussprechen.

Weiterhin bedanke ich mich bei Familie Birnstiel in Schlieren, die mir während meiner vielen Aufenthalte in Zürich Obdach bot, für die mir entgegengebrachte Gastfreundschaft und Herzlichkeit.

Ich bedanke mich zudem bei meinem Chefarzt und Klinikdirektor, Herrn Prof. Dr. med. Salvatore Grisanti, der es mir ermöglichte, als Doktorand der Universitätsaugenklinik in Lübeck die Daten in der Schweiz unter Frau Prof. Dr. med. M. Müller zu erheben.

Ein Dankeschön gilt außerdem dem gesamten Team der Pallas Kliniken in Zürich für die Unterstützung und die Möglichkeit der Nutzung der Räumlichkeiten zur Datenerhebung.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mich auf dem Weg des Arztwerdens treu und liebevoll begleitet und immer wieder motiviert haben.

Mein letzter Dank ist meiner Frau gewidmet, die mich in meinem Vorhaben zu promovieren so treu unterstützte, mich im Verlauf mit ihrer positiven Art immer wieder ermutigte und mir den Rücken zum Fertigstellen der Dissertation freihielt.

