

**Aus der Klinik für Augenheilkunde  
Universitätsklinikum des Saarlandes Homburg (Saar)  
Direktor: Prof. Dr. med. Berthold Seitz**

**Intraokularer Druckanstieg nach Pars-plana-Vitrektomie –  
Applanationstonometrie nach Goldmann misst niedriger als  
dynamische Konturtonometrie**

**Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin  
der Medizinischen Fakultät  
der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES  
2021**

Betreuer: Prof. Dr. med. Arne Viestenz  
Vorgelegt von: Sebastian Karl Baurle  
geb. am: 04.09.1990 in Lüdenscheid

Tag der Promotion: 20.01.2022

Dekan: Univ. Prof. Dr. med. Michael D. Menger

Berichterstatter: Prof. Dr. med. Arne Viestenz

Prof. Dr. rer. nat. Jutta Engel

## Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG (DEUTSCH)	III
ZUSAMMENFASSUNG (ENGLISCH)	V
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VII
1 EINLEITUNG UND THEORETISCHER HINTERGRUND	8
1.1 DER INTRAOKULARE DRUCK (IOD)	8
1.2 TONOMETRIE IN DER OPHTHALMOLOGIE	10
1.3 VITREORETINALE CHIRURGIE	13
1.4 INTRAOKULARER DRUCKANSTIEG NACH VITREKTOMIE	15
1.5 EIGENE FRAGESTELLUNG	18
2 PATIENTEN UND METHODIK	20
2.1 PATIENTENKOLLEKTIV	20
2.2 PRÄOPERATIVE UNTERSUCHUNGEN	20
2.3 DIE PARS-PLANA-VITREKTOMIE (PPV)	21
2.4 ENDOTAMPONADEN	22
2.5 VERWENDETE GERÄTE	27
2.5.1 DAS GOLDMANN-APPLANATIONSTONOMETER (GAT)	27
2.5.2 DAS DYNAMISCHE CONTOUR-TONOMETER (DCT)	29
2.5.3 DAS PERKINS-TONOMETER	32
2.5.4 DIE OPTISCHE KOHÄRENZTOMOGRAPHIE	33
2.6 PRÄOPERATIVE DURCHFÜHRUNG DER IOD-MESSUNG	34
2.7 INTRAOPERATIVE MESSUNG	36
2.8 POSTOPERATIVE MESSUNG WÄHREND DES STATIONÄREN AUFENTHALTES	38
2.9 AMBULANTE WIEDERVORSTELLUNG	38
2.10 STATISTISCHE DATENANALYSE	38
3 ERGEBNISSE	40
3.1 DAS PATIENTENKOLLEKTIV	40
3.2 PRÄOPERATIVE UNTERSUCHUNGEN	40
3.3 BIOMETRISCHE MESSWERTE	41
3.4 POSTOPERATIVER VERLAUF	42
3.5 ERSTE NACHUNTERSUCHUNG AM OPERATIONSTAG	42
3.6 ZWEITE POSTOPERATIVE UNTERSUCHUNG FOLGETAG	44
3.7 INTERTONOMETERDIFFERENZ PRÄOPERATIV	47
3.8 INTERTONOMETERDIFFERENZ POSTOPERATIV	48
3.9 ZENTRALE HORNHAUTDICKE UND INTERTONOMETERDIFFERENZ	52
3.10 AMBULANTE WIEDERVORSTELLUNG	53
3.11 INTRAOPERATIVE IOD-MESSUNG	57
4 DISKUSSION	60
4.1 IOD-ENTWICKLUNG IM RAHMEN DER DURCHGEFÜHRTEN PPV	60
4.2 INTERTONOMETERDIFFERENZ ZWISCHEN GAT UND DCT	61
4.3 LANGFRISTIGER POSTOPERATIVER IOD-VERLAUF UND EINFLUSS AUF DIE INTERTONOMETERDIFFERENZ	64
4.4 INTERTONOMETERDIFFERENZ UNMITTELBAR NACH OPERATIONSENDE	65
4.5 BEANTWORTUNG DER EIGENEN FRAGESTELLUNG	66
4.6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	67

5 LITERATURVERZEICHNIS	VIII
6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XIV
7 TABELLENVERZEICHNIS	XVI
8 PUBLIKATIONEN UND VORTRÄGE	XVII
9 DANKSAGUNG	XVIII
10 CURRICULUM VITAE	XIX

---

## Zusammenfassung (Deutsch)

### Fragestellung

Das dynamische Contour-Tonometer PASCAL (DCT) stellt ein digitales Kontakttonometer dar, welches der natürlichen Hornhautgeometrie angepasst ist. Verglichen wurde das DCT mit dem etablierten Goldmann-Appplanationstonometer (GAT) bei Augen vor und nach Pars-plana-Vitrektomie (ppV) unter der Verwendung verschiedener Endotamponaden.

### Methodik

In einer prospektiven Querschnittstudie wurden 100 Augen vor und nach ppV vergleichend mit dem GAT und DCT gemessen. Verwendete Endotamponanden waren Gase, Silikonöl und Balanced Salt Solution (BSS). 57 Augen waren bisher nicht voroperiert, 27 Augen kamen zur geplanten Silikonölexplantation. Erfasst wurden der präoperative intraokulare Druck (IOD), postoperative Druckveränderungen und die Intertonometerdifferenz.

### Ergebnisse

Präoperativ lag der mittlere intraokulare Druck (IOD) mit dem GAT gemessen bei  $15,8 \pm 5,2$  mmHg und dem DCT bei  $17,5 \pm 5,9$  mmHg. Die Intertonometerdifferenz zwischen dem DCT und GAT lag präoperativ bei 1,8 mmHg. Am ersten postoperativen Tag stieg bei Augen, die mit Gas versorgt wurden, der Druck im Mittel um 2,5 mmHg ( $p = 0,035$ ) an. Das DCT erfasste 18 Augen (19,1%) mit einem postoperativen IOD von  $\geq 25$  mmHg. Postoperativ maß das GAT den IOD im Schnitt 2,5 mmHg niedriger und bei expansiver Gas-Endotampoade im Mittel um 3,0 mmHg niedriger als das DCT. Bei IOD-Werten von postoperativ über 20 mmHg lag das GAT im Mittel 4,7 mmHg unter dem DCT. 10 von 18 Augen wurden mit dem GAT nicht als kritisch hypertensiv ( $\geq 25$  mmHg) erkannt. Bei 13% maß das DCT am 1. postoperativen Tag einen um mindestens 6 mmHg höheren IOD als das GAT. In einem Extremfall wurde der IOD mit dem GAT bei Gas-Endotamponade um 12 mmHg unterschätzt.

Auch 7 Wochen nach ppV konnten noch erhöhte Druckwerte gemessen werden. Kamen Silikonöl oder Gasgemische mit C3F8 als Endotamponade zum Einsatz, lag der IOD im Schnitt 2,4 mmHg höher als präoperativ.

## Schlussfolgerungen

Postoperative Druckanstiege nach ppV gehören weiterhin zu den gefürchteten Komplikationen. Insbesondere bei der Verwendung von expansiven Gasen und innerhalb der ersten 48 Stunden können diese zu irreversiblen Visusverlust führen. Es gilt, im Rahmen eines stationären Aufenthaltes, postoperative IOD-Anstiege frühzeitig zu erkennen und zu behandeln. Abhängig von der verwendeten Endotamponade misst das GAT den IOD niedriger. Besonders bei Augen mit postoperativen Druckspitzen, die mit expansiven Gasen versorgt wurden, misst das DCT höhere Werte. Die postoperative IOD-Messung nach ppV ist bedeutend und das DCT bietet eine zuverlässige Alternative zum etablierten GAT. Visusbedrohende postoperative Druckanstiege können eher erkannt und behandelt werden.

## Zusammenfassung (Englisch)

# Intraocular Pressure Elevation after Pars Plana Vitrectomy – Goldmann Applanation Tonometry measures lower Intraocular Pressure than Dynamic Contour Tonometry

### Purpose

The dynamic contour tonometer PASCAL (DCT) is a direct non-invasive digital tonometer matching the corneal contour. We compared the DCT with the established Goldmann applanation tonometer (GAT) before and after pars plana vitrectomy (ppV) using various endotamponade agents.

### Methods

One hundred eyes had been included into this prospective comparative clinical investigation and intraocular pressure (IOP) was measured with GAT and DCT before and after pars plana vitrectomy (ppV). Different intraocular endotamponades such as gas, silicone-oil and balanced salt solution (BSS) had been used. 57 eyes never underwent vitrectomy before, whereas 27 eyes were planned for elective silicone oil removal. Preoperative IOP, changes in IOP postoperatively and the inter-tonometer difference were measured.

### Results

The preoperative mean IOP was  $15.8 \pm 5.2$  mmHg measured with the GAT and  $17.5 \pm 5.9$  mmHg with DCT. Mean inter-tonometer difference was 1.8 mmHg before surgery. On the first postoperative day, in eyes with gas-endotamponade the mean IOP rise was 2.5 mmHg ( $p = 0,035$ ). Postoperative GAT measured IOP was 2.5 mmHg lower, and in eyes with gas-endotamponade the GAT measured the IOP 3.0 mmHg lower than the DCT. In eyes with a postoperative IOP above 20 mmHg, the GAT measured IOP 4.7 mmHg lower compared to the DCT. As a result, 10 out of 18 eyes had not been recognised as critical hypertensive ( $\geq 25$  mmHg). In 13% of the eyes the DCT measured at least 6 mmHg higher IOP levels than GAT on the first postoperative day. In one extreme case with gas-endotamponade, GAT underestimated the IOP by 12 mmHg compared to the DCT.

Seven weeks after vitrectomy, IOP was still elevated around 2.4 mmHg higher when silicone-oil or C3F8 Gas were used.

## Conclusions

IOP spikes after ppV are a feared complication and can lead to irreversible vision loss. Especially when using expansive gas-endotamponade, postoperative IOP-measurement is important during the first 48 hours after ppV and should be performed during inpatient stay preferably. Depending on the endotamponade, GAT measures lower IOP than DCT - especially in IOP spikes caused by expansive gas-endotamponade. The DCT is a reliable alternative to the established GAT. Postoperative pressure spikes after ppV may better be detected with DCT and therefore can be treated earlier.

---

## Abkürzungsverzeichnis

BSS	Balanced Salt Solution
C2F6	Perfluorethan
C3F8	Perfluorpropan
CCT	Zentrale Hornhautdicke (central corneal thickness)
DCT	Dynamisches Contour-Tonometer
GAT	Goldmann-Appplanationstonometer
IOD	Intraokulardruck
KOR	Korrelationskoeffizienten nach Pearson
mg	Milligramm
mm	Millimeter
µm	Mikrometer
mmHg	Millimeter Quecksilbersäule
OCT	Optische Kohärenz-Tomographie
OPA	Okuläre Pulsamplitude
OP	Operation
PPV	Pars-plana-Vitrektomie
PVR	Proliferative Vitreoretinopathie
RPE	Retinales Pigmentepithel
SF6	Schwefelhexafluorid

---

## 1 Einleitung und theoretischer Hintergrund

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Erfassung und dem Verlauf des intraokularen Drucks (IOD) nach Pars-plana-Vitrektomie (ppV) und vergleicht dabei das etablierte Goldmann-Appanationstonometer (GAT) mit dem dynamischen Contour-Tonometer (DCT)

Eine möglichst korrekte Erfassung des IOD hat eine große Bedeutung für das postoperative Ergebnis ophthalmochirurgischer Eingriffe, da bereits kurzzeitige postoperative IOD-Anstiege zu irreversiblen Nervenschädigungen und damit verbundenem Visusverlust führen können. Das GAT gilt als Goldstandard zur Erfassung des IOD und findet seit über 60 Jahren breiten Einsatz im klinischen Alltag. Dabei ist bekannt, dass die Messgenauigkeit des GAT durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Mit dem DCT ist seit 2006 ein Gerät auf dem Markt, das eine hohe Messgenauigkeit und Unabhängigkeit von Einflussfaktoren aufweist [9,25,77,96].

Ziel der Arbeit ist, den IOD-Verlauf nach vitreoretinalen Eingriffen unter Verwendung verschiedener Endotamponaden zu untersuchen und potentiell visusbedrohende postoperative Druckanstiege eher zu behandeln. Dabei wurde das etablierte GAT dem neueren DCT vergleichend gegenübergestellt.

### 1.1 Der Intraokulardruck

Der normale Intraokulardruck (IOD) des menschlichen Auges liegt bei 15,5 mmHg und Normalwerte liegen im Bereich von  $\pm 2$  Standardabweichungen zwischen 10 und 21 mmHg. Dabei schwankt der IOD physiologisch im Tagesverlauf und tendiert dazu, in den Morgenstunden am höchsten zu sein. Durchschnittlich werden Tagesdruckschwankungen von bis zu 5 mmHg und mehr beobachtet [75]. Der IOD ergibt sich aus einem Zusammenspiel zwischen Kammerwasserproduktion durch den Ziliarkörper und Kammerwasserabfluss über das schwammartige Trabekelwerk im Kammerwinkel sowie dem uveoskleralen Abfluss. Ist der Abflussweg aus verschiedenen Gründen gestört, kann das zu einer akuten oder auch langfristigen Steigerung des IOD führen [10].

Der IOD ist ein entscheidender Risikofaktor für Glaukomerkrankungen. Die Glaukome zählen zu den häufigsten Erblindungsursachen in den Industrienationen. Insgesamt erblinden jedes Jahr weltweit knapp 7 Millionen Menschen an dieser Erkrankung. Für das ophthalmologische Krankheitsbild des Glaukoms gilt per neuer Definition nicht mehr ein allein erhöhter Augen- druck als krankheitsdefinierend, sondern stellt lediglich einen Risikofaktor dar [56].

Das Krankheitsbild ist definiert durch die Neuropathie des Sehnervs in Kombination mit fortschreitenden Gesichtsfeldausfällen und glaukomtypischen Veränderungen im Bereich des Sehnervenkopfes [56].

Die glaukomatöse Optikusneuropathie gilt als neurodegenerative Erkrankung. Der Pathomechanismus des Glaukoms ist durch den Untergang retinaler Nervenfasern zu erklären. Ein erhöhter IOD führt unter anderem zu einem mechanischen Abknicken der Nerven-Axone und somit zu einer Unterbrechung des retrograden Axoplasma-Transportes. Die Folge ist der Zelltod und die damit verbundene Degeneration von retinalen Gliazellen. Außerdem führt ein erhöhter IOD zu Durchblutungsstörungen und Minderversorgung der Papille, was ebenfalls eine Degeneration von Nerven und Gliagewebe zur Folge hat [28]. Erst wenn 200.000 – 300.000 der insgesamt 1,1 Millionen Axone geschädigt sind, also ca. 1/3, treten glaukomtypische Symptome in Form von Gesichtsfeldausfällen auf [76]. Dieser Prozess kann schleichend über viele Jahre mit nur geringer Progression ablaufen. Aber bereits kurzfristige Druckanstiege und Druckspitzen können zu Nervenschädigungen mit irreversiblen Visusverlust führen. Durch hohen intraokularen Druck kommt es direkt mechanisch zu einer ischämischen Nekrose von Axonen der retinalen Ganglienzellen. Akute Glaukome führen so zu einer kavernösen Optikusatrophie. Histologisch sieht man das Bild eines ödematösen Papillenfarktes mit hineingepresster Hyaluronsäure aus dem Glaskörper (Optikusatrophie nach Schnabel) [83]. Übersteigt der IOD den Perfusionsdruck der Zentralarterie, bricht die Versorgung der Retina ab. Schon 90 min ohne ausreichende retinale Perfusion führen zu Ischämien der Netzhaut und nachfolgender Atrophie des Nervus opticus (Abbildung 1) [32]. Adachi et al. konnten in Tierversuchen zeigen, dass extreme IOD-Anstiege bereits nach 45 min zu ischämischen Schädigungen der retinalen Nervenfaserschicht und des Nervus opticus führen können [1].

Oben beschriebene Veränderungen treten ein, wenn der IOD 50 mmHg übersteigt. Dies wird als ein akuter Glaukomanfall definiert. Zusätzlich zu Sehstörungen klagen die Patienten über erhebliche Kopfschmerzen und es können auch Schwindel und Erbrechen auftreten [28].

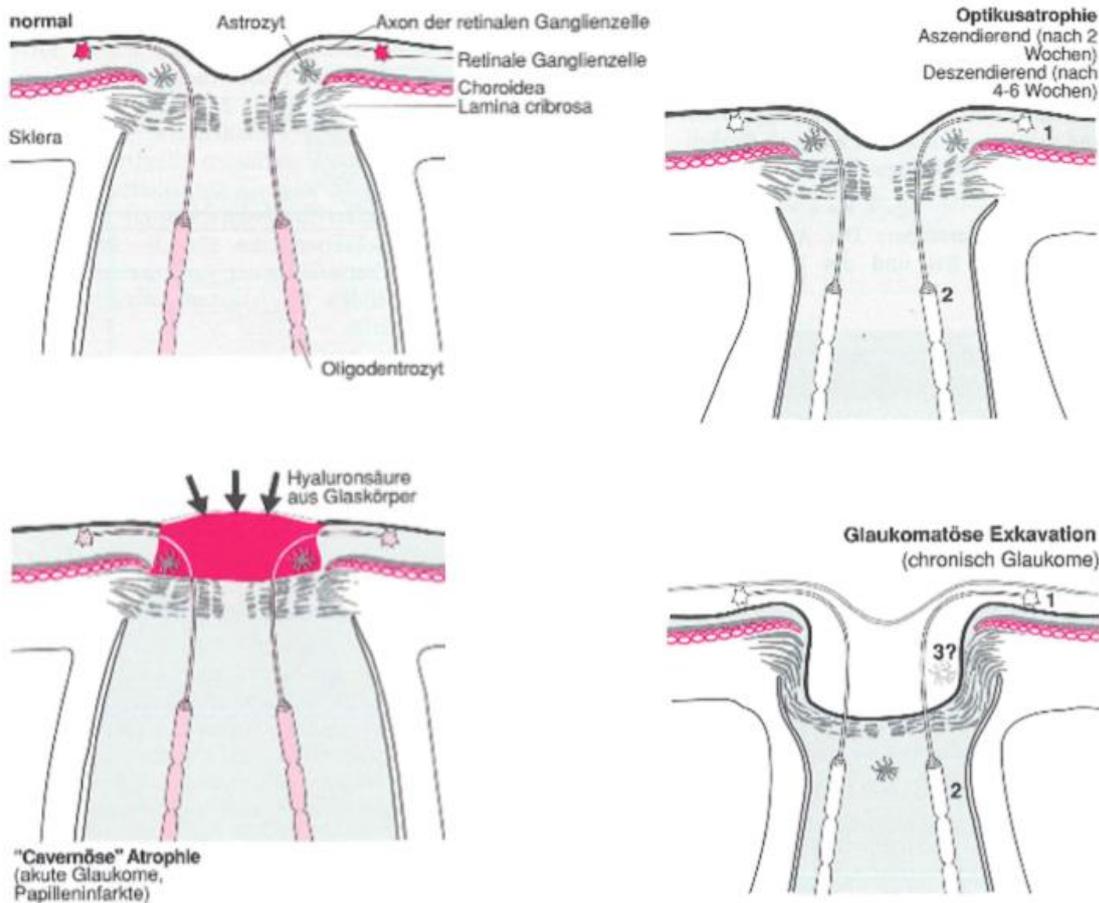


Abbildung 1: Prinzipien der einfachen, der akuten und der chronischen glaukomatösen Optikusatrophie. Bei akuten IOD Anstiegen wird Hyaluronsäure aus dem Glaskörper in den Sehnervenkopf gepresst [68].

## 1.2 Tonometrie in der Ophthalmologie

Das Messen des IOD gehört zur Standarddiagnostik, um eine okuläre Hypertension, eine manifeste Glaukomerkrankung oder kurzfristige postoperative IOD-Anstiege erkennen und behandeln zu können [84]. Bei bereits vorliegender Glaukomerkrankung ist die IOD-Messung eine essentielle Verlaufsuntersuchung oder dient bei Screening-Untersuchungen dem frühzeitigen Erkennen eines Glaukoms. Aber auch postoperativ nach ophthalmochirurgischen Eingriffen kann es zu IOD-Anstiegen kommen. Eine engmaschige postoperative Kontrolle des IOD ist wichtig, um oben genannte Komplikationen wie Glaukomschädigungen rechtzeitig erkennen und behandeln zu können [94].

Zur Bestimmung des IOD stehen heutzutage mehrere nicht invasive Verfahren zur Verfügung, um den Augendruck mit einer Genauigkeit von ca.  $\pm 1\text{mmHg}$  bestimmen zu können [28].

Johann Zacharias Platner beschrieb erstmals Ende des 17. Jahrhunderts einen erhöhten Augendruck bei glaukomatösen Augen durch digitales Palpieren mit zwei Zeigefingern über dem ge-

geschlossenen Augenlid. Auf Basis der digitalen Palpation führte Bowmann 1862 die erste Klassifikation ein (T1- extrem niedriger IOD bis T3 maximal erhöhter IOD) [52,88]. Noch heute steht dem erfahrenen Augenarzt diese Methode zur Abschätzung des IOD zur Verfügung, wenn andere Methoden nicht verfügbar sind oder der Verdacht einer Fehlmessung seitens des Tonometers besteht.

Die genaueste Messung des IOD wird durch die invasive Manometrie erreicht. Da der IOD den Atmosphärendruck übersteigt, führt das Einbringen einer Nadel oder Kanüle in die Vorderkammer des Auges dazu, dass Kammerwasser nach außen abfließt. Die Kanüle ist mit einem Flüssigkeitsbehälter verbunden, dessen Gegendruck dem im Auge vorliegenden Druck entspricht. Der im Auge vorliegende Druck kann dann an einer Skala (üblicherweise angegeben in mmHg) abgelesen werden. Diese Methode ist nur bei enukleierten Augen oder intraoperativ möglich und spielt im klinischen Alltag kaum eine Rolle [9]. Die Manometrie diente den meisten heutigen Tonomern, unter anderem auch dem Goldmann-Appplanationstonometer (GAT) und dem dynamischen Contour-Tonometer (DCT), als Kalibrierung [25,44].

Das Tonometer hat in der Ophthalmologie die Aufgabe, den Augendruck möglichst wenig invasiv und unbeeinflusst durch andere Faktoren korrekt zu messen. Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Instrumente in ihrer Vorgehensweise und haben ihre Vor- und Nachteile.

Applanations-Tonometer wie das Goldmann-Tonometer basieren auf dem Imbert-Fick'schen Gesetz, welches besagt, dass der Druck, der benötigt wird, eine Fläche einer Sphäre zu applanieren, dem Gegendruck innerhalb der Sphäre entspricht. Basierend auf dieser Theorie hat Fick selber im Jahre 1888 ein handgehaltenes Tonometer entwickelt, welches aber nie beim Menschen zum Einsatz kam. Durch die Erfindung von Kokain-Tropfen zur topischen Anästhesie der Hornhaut war die direkte Applanation der Hornhaut am Menschen möglich und Maklakoff entwickelte 1885 das Maklakoff-Appplanationstonometer [52,88]. Das Instrument bestand aus einem metallischen Zylinder mit einem abgeflachten Boden. Auf die Hornhaut wurde Farbe gegeben und der Durchmesser des Farbabdrucks auf dem Zylinder entsprach der Applanationsfläche. Mit Hilfe des Imbert-Fick'schen Gesetzes konnte anschließend die Applanationskraft errechnet werden. Das Tonometer hatte einige Nachteile. Kapillarkräfte des Tränenfilms wurden ebenso wenig beachtet, wie andere Unregelmäßigkeiten der Hornhaut. Durch das hohe Eigengewicht des Tonometers wurde der IOD iatrogen erhöht. Atanassov et al. zeigten, dass das Maklakoff-Tonometer den IOD im Vergleich zum GAT signifikant unterschätzte [3].

1905 entwickelte Schiøtz eines der ersten Eindrucktonometer (Abbildung 2). Das Schiøtz-Tonometer basiert auf dem Prinzip, dass eine bekannte Kraft eine gefüllte Sphäre stärker eindellt, wenn der im Inneren herrschende Druck niedriger ist. Es wird also die Eindringtiefe gemessen, die ein definiertes Gewicht auf die Hornhaut ausübt und über eine Skala indirekt der IOD angegeben [81]. Aufgrund seiner Einfachheit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit ersetzte es nach Einführung

das Maklakoff-Tonometer und ist auch heute noch das einzige Tonometer dieser Art im gängigen Gebrauch.



Abbildung 2: Ficks handgehaltenes Tonometer (links) und ein Schiøtz-Eindrucktonometer aus dem Jahre 1905 (rechts) [52].

Als wichtigste Weiterentwicklung unter den Applanationstonometern entwickelte Goldmann 1955 das Goldmann Applanations-Tonometer. Sein Tonometer etablierte sich zum Standard, an dem sich bis heute alle anderen Tonometer messen. Es basiert wie die vorausgegangenen Applanations-Tonometer auf dem Imbert-Fick'schen Gesetz und trägt einen Zylinder mit eingelassenem Messprisma, welcher die Hornhaut auf einem Durchmesser von 3,06 mm applaniert. Die benötigte Applanationskraft des Zylinders kann präzise über ein Verstellrädchen angepasst werden, über welches der indirekt abgeleitete IOD abgelesen wird [25]. Das gesamte Instrument ist dabei an der Spaltlampe montiert. Noch heute wird der IOD dabei in der gängigen Praxis mit dem Goldmann-Applanationstonometer (GAT) erfasst, welches als Goldstandard zur IOD-Bestimmung gilt. Bereits Goldmann erwähnte nach Entwicklung des GAT, dass Faktoren wie die Hornhautdicke Einfluss auf die Applanationstonometrie haben müssen [25]. In den folgenden Jahren zeigte eine Vielzahl an Studien, dass das GAT in seiner Messgenauigkeit einer Beeinflussung durch Faktoren wie Hornhautdicke, Tränenfilm, Hornhautnarben, Astigmatismus, Hydrationszustand, Fremdkörper, Hornhaut- und Sklerarigidität und Kneifen der Lider unterliegt [70,89,102]. Moses et al. hatten bereits kurz nach Veröffentlichung des GAT 1958 zeigen können, dass bei enukleierten Augen mit ödematöser Hornhaut, bei denen ein manometrischer Druck von 60 mmHg angelegt wurde, Abweichungen von bis zu 22 mmHg nach unten mit dem GAT auftraten [67]. Ein hoher Hornhautastigmatismus von mehr als 3 Dioptrien kann zu signifikanten Fehlmessungen des IOD durch das GAT führen [70,102]. Zur Reduzierung des Fehlers kann das Messverfahren modifiziert werden, indem das Messprisma um 90° gedreht wird und der Mittelwert aus den beiden Messungen berechnet wird [52].

Aufgrund seiner Abhängigkeit von der Spaltlampe ist das GAT nicht mobil und verlangt dem Patienten eine sitzende Position ab. 1965 entwickelten Draeger und Perkins ein handgehaltenes, batteriebetriebenes Tonometer, welches sowohl bei aufrecht sitzenden als auch bei liegenden Patienten zum Einsatz kommen kann. Damit kann zum Beispiel direkt am Patientenbett oder im Operationssaal der IOD verlässlich ermittelt werden [17].

Neuere Tonometer wie z.B. das dynamische Contour-Tonometer (DCT) setzen auf das Prinzip der direkten und der Hornhaut kontourangepassten Messung des IOD [43,51]. Dadurch zeigt sich die Messgenauigkeit weniger beeinflusst durch Hornhautdicke oder weitere biomechanische Eigenschaften der Hornhaut, die sich oft nach chirurgischen Eingriffen verändert darstellen [51,72]. Böhm et al. konnten eine Abweichung von  $< 1$  mmHg bei Kanülierung der Vorderkammer in vivo und der gleichzeitigen DCT-Messung nachweisen [9]. Das DCT eignet sich daher zur genauen Erfassung des IOD und dem rechtzeitigen Erkennen von postoperativen Druckspitzen ohne die Gefahr der Unterschätzung, die das Prinzip der Applanationstonometrie mit sich bringt [9]. Zusätzlich erfasst das DCT die Differenz aus systolischem und diastolischem IOD und gibt diesen Wert als okuläre Pulsamplitude (OPA) an. Aufgrund des weitergeleiteten Blutflusses aus der Arteria Carotis interna bis in die Choriokapillaris weist der IOD bei gesunden Patienten physiologische pulssynchrone Schwankungen auf. Die OPA ist ein vitaler biometrischer Wert und indirekter Hinweis für die Durchblutung der Chorioidea [90]. Perkins beschrieb 1981 den Zusammenhang zwischen einem Niedrigdruckglaukom und niedriger OPA, sowie auch ein Zusammenhang zwischen okulärer Hypertension und einer erhöhten OPA gezeigt werden konnte [74]. Eine Seitendifferenz der OPA kann bei stenosierenden Erkrankungen der extrakraniellen hirnversorgenden Gefäße oder bei Sinus Cavernosus-Fisteln auftreten [27,49]. Die OPA liefert also einen weiteren Faktor zur Erkennung und Behandlung von Glaukomerkrankungen [90].

### 1.3 Vitreoretinale Chirurgie

Unter dem ophthalmochirurgischen Eingriff der Vitrektomie versteht man die operative Entfernung des Glaskörpers [10]. Durch diesen Eingriff und den Fortschritt auf dem Gebiet in den letzten Jahrzehnten stehen dem behandelnden Arzt ganz neue Behandlungsansätze vitreoretinaler Pathologien zur Verfügung [60]. Für eine Vielzahl von Netzhauterkrankungen, die früher in dem Umfang nicht behandelbar waren, ist dadurch ein therapeutischer Ansatz vorhanden [47]. In Deutschland werden jährlich über 30.000 Vitrektomien durchgeführt.

Als Grundlage gilt es, zuerst die anatomischen Verhältnisse zu erläutern. Das menschliche Auge lässt sich in einen vorderen und hinteren Abschnitt unterteilen. Der Hinterabschnitt wird hauptsächlich durch den Glaskörperraum und ein sich darin befindendes Hydrogel, dem Glaskörper (Corpus vitreum) gebildet. Begrenzt ist dieser nach vorne durch die Linse mit ihrem Halteapparat, den Zonulafasern. Nach posterior liegen dem Glaskörper die Netzhaut und der Sehnervenkopf mit seinem Austritt an. Der Glaskörper besteht zu 98% aus Wasser und zu 2% aus Kollagenfasern vom Typ 2, Hyaluronsäure und Mukopolysacchariden. Er ist ringförmig an der Glaskörperbasis, der Ora serrata, der Papille (Martegiani-Ring) und den peripheren Netzhautgefäßen angeheftet. Über die restliche Fläche liegt er mit etwas schwächeren Adhäsionskräften der innersten Schicht der Netzhaut, der inneren Grenzmembranschicht an. Die Netzhaut bildet den neurosensorischen

Teil des hinteren Augenabschnittes. In der Rezeptorzellschicht liegen insgesamt 7 Millionen Zapfen und 120 Millionen Stäbchen, die das einfallende Licht verarbeiten und in elektrische Signale umwandeln. Der Sehereiz wird durch die Netzhaut auf ein zweites Neuron und letztendlich auf ein drittes Neuron, die Ganglienzellen umgeschaltet. Diese ca. 1,1 Millionen Ganglienzellen ziehen als Nervenfaserschicht in Richtung Sehnervenkopf und bilden ab dort den Sehnerv. Zusätzlich enthält die Netzhaut noch weitere Interneurone und spezielle Gliazellen wie die Müller-Stützzellen [28,58].

Die moderne Netzhautchirurgie beginnt mit Erfindung des ersten Vitrektoms in den USA durch den Deutschen Robert Machemer in den frühen 1970er Jahren [60]. 1961 hatte bereits David Kasner die erste Vitrektomie durchgeführt. Dabei entfernte er bei einem traumatisch eröffneten Bulbus mit Zelluloseschwämmen und Scheren den Glaskörper [7]. Diese Erkenntnis nutzte Machemer und entwickelte zusammen mit dem Ingenieur Jean-Marie Parel die erste Vitrektomie-Maschine. Dieser sogenannte „vitreous infusion suction cutter (VISC)“ hatte einen Durchmesser von 17 Gauge (1,42 mm) und nutzte als intraokulären Zugangsweg, einen 2,3 mm breiten skleralen Schnitt auf Höhe der Pars plana. Die Pars plana ist eine anatomische Leitstruktur ca. 3–4 mm hinter dem Limbus, dem Übergang von Hornhaut zur Sklera. Es funktionierte als druckreguliertes geschlossenes System [60]. Mit dieser Erfindung führte Robert Machemer 1970 die erste ppV durch.

Innerhalb der darauffolgenden Jahrzehnte haben sich Operationstechniken und Instrumente rasch weiterentwickelt. Heutzutage wird die Operation standardmäßig als 3-Port-Vitrektomie durchgeführt. Dabei wird im Bereich der Pars plana des Ziliarkörpers, welcher sich ca. 3,5 – 4 mm hinter dem Limbus projiziert, drei Sklerotomien angelegt. Über die drei Ports werden dann eine Infusion zur Aufrechterhaltung des IOD, eine Lichtquelle und die Vitrektomiesonde mit einer oszillierenden Saug-Schneide-Einheit eingebracht. Anstatt der Sonde können je nach Bedarf im Operationsverlauf auch andere Instrumente wie Scheren, Pinzetten oder Zängchen verwendet werden. Die Visualisierung des Augeninneren gelingt über ein binokulares indirektes Ophthalmomikroskop (BIOM), welches ein auf dem Kopf stehendes seitenverkehrtes Bild erzeugt. Der Durchmesser der Instrumente und damit auch die Größe der Sklerotomie, hat in den Jahren auch abgenommen und liegt in der Regel heute bei 23 Gauge, aber es sind auch Vitrektomiesysteme mit 25 Gauge und 27 Gauge im Operationsalltag anzutreffen [104].

Indikationen für eine Vitrektomie können vielfältig sein, beschreiben aber Situationen, die früher häufig zur Erblindung geführt haben wie Netzhautablösungen, die durch andere operative Interventionen, wie zum Beispiel die eindellende Chirurgie durch die Verwendung von Plomben, nicht mehr beherrschbar waren. Dazu gehören insbesondere komplexe Netzhautablösungen in Kombination mit multiplen Foramina, Riesenforamina, Makulaforamina oder bereits vorliegender

proliferativer Vitreoretinopathie (PVR) durch bereits freigesetztes proliferierendes Pigmentepithel. In solchen Fällen ist die primäre Vitrektomie zu bevorzugen und eine Wiederanlage der Netzhaut wird in bis zu 70% der Fälle erreicht [33]. Weitere Indikationen sind nicht resorbierbare Glaskörperblutungen, wie sie bei der proliferativen diabetischen Retinopathie anzutreffen sind. Blutungsreste und proliferierendes Material können schrumpfende Membranen und Stränge bilden, die am Ende zu einer Netzhautablösung führen können [28,103].

Penetrierende Bulbusverletzungen, insbesondere mit Fremdkörperverbleib im Glaskörper, sind ebenfalls Indikationen zur Vitrektomie, wie auch akute Endophthalmitiden, bei denen der Glaskörper als Reservoir für Pilze und Bakterien dienen kann. Eine weitere gängige Indikation ist die idiopathische epiretinale Gliose, bei der eine Membran auf die Netzhautoberfläche im Bereich der Makula, der Stelle des schärfsten Sehens, wächst. Kommt es dort folglich zu Verziehungen, beschreibt der Patient ein Verzerrtsehen (Metamorphopsien). Durch die Vitrektomie in Kombination mit Entfernung dieser Membranen mithilfe feinsten Pinzetten (Membrane Peeling), kann wieder eine regelrechte Konfiguration der Makula erreicht werden.

Um die Netzhaut auch dauerhaft nach Vitrektomie in Anlage zu halten, muss besonders nach komplizierter ppV eine Endotampoade in das Auge gegeben werden. Dem Chirurgen stehen zum Beispiel expansive Gasgemische mit Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>), Perfluorethan (C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>) und Perfluorpropan (C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>) zur Verfügung. Die Gase werden zeitlich verzögert aus dem Auge resorbiert. Alternativ gibt es auch längerfristige Endotamponaden aus durchsichtigem Silikonöl, welche aber in einer zweiten Op aus dem Auge entfernt werden müssen [104].

## 1.4 Intraokularer Druckanstieg nach Vitrektomie

Bei einer Vielzahl ophthalmochirurgischer Eingriffe besteht das Risiko eines postoperativen Druckanstiegs. Besonders nach ppV ist der kurzfristige postoperative Druckanstieg eine gefürchtete Komplikation [2,14,94].

IOD-Anstiege können dabei zu fast jedem Zeitpunkt nach Vitrektomie auftreten und zu irreversiblen Visusverlust führen. Erste Studien aus den 1980er Jahren beschreiben einen Anstieg des IOD nach ppV von mindestens 10 mmHg bei 30% [101]. Betrachtet man die vorliegenden Studien, ist die Bandbreite wie oft und wie stark der IOD nach ppV ansteigt sehr groß. Studien berichten dabei von postoperativen Druckanstiegen bei 5% bis 58,9 % der Patienten nach ppV [54].

Die möglichen Einflussfaktoren auf den postoperativen IOD sind vielfältig und beinhalten zum Beispiel die Art der verwendeten Endotamponade, Verwendung von Laserkoagulation, Patientenalter, IOD am Ende der Operation und ob bereits ein Glaukom vorliegt [94]. Insbesondere als Endotamponade verwendete Gasgemische mit Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>), Perfluorethan

(C2F6) und Perfluorpropan (C3F8) beinhalten aufgrund ihres expansiven Verhaltens die Gefahr von erheblichen Druckanstiegen [79]. Eine Datenanalyse von Kanclerz und Grzybowski bestätigten, dass IOD-Anstiege nach Vitrektomie unter der Verwendung von expansiven Gasgemischen eine Hauptkomplikation darstellten [41]. Je nach eingegebener Endotamponade und Gemisch kann es bereits in den ersten zwei Stunden postoperativ aber insbesondere in den ersten 24 Stunden zu signifikanten Druckanstiegen kommen. Desai et al. berichteten von 40% postoperativen IOD-Anstiegen auf gleich oder größer 30 mmHg [14].

Zusätzlich kann eine übermäßige Expansion des Gases zur Verschiebung des Iris-Linsen-Diaphragmas in Richtung Vorderkammer führen. Dadurch wird der Kammerwinkel verschlossen und es entsteht ein akutes Winkelblockglaukom. Dieses Phänomen kann auch bei Lagerungsincompliance, insbesondere Rückenlage des Patienten, beobachtet werden. Liegt der Patient postoperativ vermehrt auf dem Rücken, steigt die Gasblase nach oben, verschiebt das Linsen-Iris-Diaphragma nach vorne und verlegt den Kammerwinkel [104].

Während des stationären Aufenthaltes sollte durch das Personal oder andere Hilfsmittel gewährleistet werden, dass Patienten ihre Lagerungsanweisungen einhalten [24]. Länger im Auge verbleibende Gase können auch nach Entlassung im heimischen Umfeld dazu führen, dass Patienten bei Lagerungsincompliance ein akutes Winkelblockglaukom erleiden. Eine genaue Aufklärung des Patienten bezüglich des postoperativen Verhaltens ist essentiell für den Heilungsverlauf.

Da eine direkte Sonneneinstrahlung, insbesondere in Kombination mit hohen Außentemperaturen, zu einer Erwärmung und somit Expansion intraokularer Gase führen kann, sollten Patienten darauf hingewiesen werden, postoperativ eine direkte Sonnenexposition zu meiden.

Der postoperative Erfolg eines vitreoretinalen Eingriffs hängt von vielen Faktoren ab. Als frustrierend für den Operateur und den Heilungsverlauf des Patienten gilt ein unwiederbringlicher Visusverlust und das Vorliegen einer irreversiblen Schädigung der Nervenfaserschichten verbunden mit einer Atrophie des Nervus Opticus, insbesondere bei komplikationslosem Operationsverlauf und scheinbar gutem postoperativen Verhalten des Patienten. So beschrieb zum Beispiel Kangas et al. einen unklaren Visusverlust nach ppV auf unter Lichtscheinwahrnehmung bei sieben Patienten. Bei sechs davon lag ein erhöhter IOD von über 26 mmHg vor [42]. Eine engmaschige postoperative Kontrolle des IOD ist wichtig, um oben genannte Komplikationen rechtzeitig erkennen und behandeln zu können [94].

Je nach Ausmaß und auch Genese des Tensioanstiegs stehen dem behandelnden Arzt mehrere therapeutische Möglichkeiten zur Verfügung um den IOD wieder in einen akzeptablen Bereich zu bringen. Bei mäßigem Druckanstieg im Sinne einer okulären Hypertension mit IOD-Werten von  $>26$  mmHg können lokale drucksenkende Augentropfen verwendet werden. Augentropfen, die Betablocker oder Karbonanhydrasehemmer enthalten, drosseln die Kammerwasserproduktion und senken somit den IOD. Bei höheren IOD-Anstiegen von über 35 mmHg werden in der Regel systemische Karbonanhydrasehemmer wie Acetazolamid intravenös verabreicht. Liegt durch

---

massive Gasexpansion oder durch Verschiebung des Iris-Linsen-Diaphragmas ein akuter Winkelblock vor, können auch Druckspitzen von über 50 mmHg erreicht werden. Der Bulbus fühlt sich bereits durch bloßes digitales Palpieren steinhart an. Kann eine Kombination aus oben genannten medikamentösen Maßnahmen den IOD nicht senken, kann Mannitol (Mannit 20% ®) als 250 ml-Infusion verabreicht werden. Als hyperosmolare Lösung entzieht es dem Auge Wasser und veranlasst eine Flüssigkeitsverschiebung in den intravasalen Raum. Interventionell gibt es auch die Möglichkeit zur Anlage einer peripheren Iridektomie, um eine Verbindung zwischen hinterer und vorderer Augenkammer herzustellen. Das Kammerwasser kann somit direkt in den Kammerwinkel abfließen. Das kann durch den gezielten Einsatz eines Nd:YAG-Lasers (Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall) geschehen oder chirurgisch erfolgen [28,58]. Ansonsten ist auch die manuelle Eröffnung der Sklerotomie zur Gasablassung ein Mittel der Wahl, um den IOD zu senken. Ein deutlich erhöhter IOD von über 25 mmHg postoperativ sollte dauerhaft nicht toleriert werden.

Chang et al. konnten zeigen, dass ein erhöhter IOD auch als Langzeitfolge nach Vitrektomie ein Problem darstellen kann. Insbesondere bei bereits durch eine Glaukomerkrankung vorgeschädigten Augen konnte nach Vitrektomie eine Progression des Glaukoms gezeigt werden beziehungsweise es bestand postoperativ ein erhöhter Bedarf an drucksenkenden Medikamenten [11]. Ebenfalls mussten sich Patienten infolge eines erhöhten Risikos für ein Sekundärglaukom häufiger drucksenkenden Operationen unterziehen [54]. Die pathophysiologische Erklärung dahinter ist noch unklar. Mögliche Hypothesen sind zum einen, dass postoperativ Entzündungszellen und Restbestandteile den Kammerwasserabfluss behindern und weiter vermuten Chang et al. auch, dass oxidativer Stress der Zellen im Trabekelmaschenwerk, welches für den Kammerwasserabfluss zuständig ist, im Einzelfall für einen dauerhaften IOD-Anstieg verantwortlich sein kann [11].

Wie im vorausgegangenen Kapitel sind bei manchen Indikationen, wie dem Vorliegen einer proliferativen Vitreopathie (PVR), auch langfristig wirkende Endotamponaden wie Gasgemische mit C3F8-Anteil oder Silikonöl notwendig. Diese führen auch zu chronischen Veränderungen des IOD. Barr et al. konnten zeigen, dass bei 5% der vitrektomierten Augen mit PVR-Reaktion ein chronisch erhöhter IOD (> 25 mmHg) vorlag. Dabei handelte es sich hauptsächlich um Augen, welche mit Silikonöl versorgt wurden. Es besteht also einen Zusammenhang zwischen der verwendeten Endotamponade und dem vermehrten Auftreten von Sekundärglaukomen [4]. Auch im Langzeitverlauf ist es notwendig, den IOD regelmäßig korrekt zu erfassen und IOD-Anstiege rechtzeitig zu erkennen und zu behandeln.

## 1.5 Eigene Fragestellung

Die vorliegende Arbeit untersucht die IOD-Entwicklung nach ppV und den Einfluss verwendeter Endotamponaden auf diesen. Postoperative Druckanstiege nach ppV sind häufig beschriebene Komplikationen aber je nach Studie gibt es erhebliche Schwankungen. Besonders die Verwendung expansiver Gasendotamponaden scheint hierbei eine entscheidende Rolle zu spielen. In den letzten Jahrzehnten, seit Einführung der Vitrektomie haben sowohl technischer Fortschritt als auch die Erfahrung bezüglich postoperativer Komplikationen zugenommen. Mit dem heutigen Verständnis ist eine Auswertung der IOD-Entwicklung nach ppV unter Verwendung verschiedener Endotamponaden durchaus angebracht, und wie sich die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mit der vorliegenden Studienlage vereinbaren lassen. Eine Differenzierung zwischen kurzfristigen Druckanstiegen und langfristiger IOD-Erhöhung scheint ebenfalls so wichtig wie die Auswirkung der einzelnen Endotamponade auf langfristige Druckanstiege.

Dabei spielt die korrekte IOD-Ermittlung durch verschiedene Tonometersysteme eine entscheidende Rolle. Eine möglichst geringe Beeinflussung durch postoperative Veränderungen des Auges, wie das Auftreten von postoperativen Hornhautödemen oder das Verhalten eingegebener Endotamponaden auf die Messgenauigkeit der Tonometer, sind dabei wichtig.

Mit dem DCT gibt es ein neues Tonometer auf dem Markt, welches durch das Prinzip der direkten konturangepassten Tonometrie eine genaue IOD Bestimmung möglich macht. Dadurch ist seine Messgenauigkeit weniger anfällig gegenüber postoperativen Veränderungen, Änderungen der Biomechanik oder unterschiedliche Endotamponaden des Auges. Das DCT wurde schon in einigen Vorstudien postoperativ mit dem GAT verglichen und stellte sich als genaues und zuverlässiges Tonometer dar [18,34,35,97]. Das GAT hat eine bekannte Abhängigkeit von mehreren Faktoren und lässt die Annahme zu, postoperativ den IOD falsch zu niedrig einzuschätzen. Insbesondere das Unterschätzen von potentiell visusbedrohenden Druckspitzen ist gefährlich.

Bisher haben nur wenige Studien die beiden Tonometer nach ppV verglichen und kamen zu teils konträren Aussagen. Auch bezüglich der Datenerhebung und zu welchem Zeitpunkt gemessen wurde, unterscheiden sich die vorliegenden Studien [54,62].

Die vorliegende Arbeit unterscheidet sowohl, ob es sich um unmittelbare Druckanstiege innerhalb der ersten zwei Tage handelte oder ob längerfristig erhöhte IOD-Werte gemessen werden konnten. Dabei wird bei jeder Messung das DCT mit dem GAT verglichen und zwischen den verwendeten Endotamponaden unterschieden.

**Die Fragestellungen für die vorliegende Arbeit lauten wie folgt:**

- Fragestellung 1: Um wieviel mmHg ändert sich der IOD postoperativ nach ppV im Mittel und wie häufig kommt es zu erheblichen Druckspitzen?
- Fragestellung 2: Gibt es einen Unterschied zwischen den verwendeten Endotamponaden bezüglich des IOD-Anstiegs?
- Fragestellung 3: Gibt es einen Unterschied zwischen dem GAT und dem DCT und wie verändert dieser sich postoperativ (Intertonometerdifferenz)?
- Fragestellung 4: Wie verhält sich die IOD-Entwicklung längerfristig postoperativ 4-8 Wochen nach ppV und hat das einen Einfluss auf die Intertonometerdifferenz?
- Fragestellung 5: Wie ausgeprägt ist die Zunahme der zentralen Hornhautdicke bei Vorliegen eines postoperativen Hornhautödems und wird dadurch die Intertonometerdifferenz beeinflusst?

---

## 2 Patienten und Methodik

### 2.1 Patientenkollektiv

In dieser prospektiven Studie wurden 100 Patienten der Klinik für Augenheilkunde Homburg (Saar) vor und nach ppV mit dem GAT und dem DCT gemessen. Der Untersuchungszeitraum erstreckte sich von der präoperativen Untersuchung bei stationärer Aufnahme, über die postoperativen Kontrollen im Rahmen des stationären Aufenthaltes, bis zur ersten postoperativen ambulanten Vorstellung 4-8 Wochen nach ppV. Die Einschlusskriterien für das Untersuchungskollektiv umfassten verschiedene Indikationen zur ppV. 29 Patienten präsentierten sich mit einer epiretinalen Gliose und 27 Patienten kamen zur geplanten Silikonölexplantation. 57 Patienten waren noch nicht vorvitrektomiert. Minderjährige und nicht selbstständig einwilligbare Patienten, zum Beispiel Kinder, geistig retardierte oder medizinisch betreute Patienten wurden nicht in diese Studie eingeschlossen. Ebenfalls Ausschlusskriterien waren Blindheit und Oculus unicus Situationen. Die Studie wurde entsprechend der Deklaration von Helsinki durchgeführt. Jeder Patient wurde vor Einschluss über das Studiendesign aufgeklärt und eine Einverständniserklärung wurde eingeholt. Für die Messung unter Anästhesie lag ein positives Ethikvotum vor.

### 2.2 Präoperative Untersuchungen

Alle Studienteilnehmer wurden im Rahmen ihrer Erkrankung und OP-Indikation entweder elektiv oder notfallmäßig stationär aufgenommen. Der Patient wurde ausführlich über den operativen Eingriff aufgeklärt und vom Operateur oder einem erfahrenen Augenarzt an der Spaltlampe untersucht. Untersuchungen des vorderen Augenabschnittes und Untersuchung des hinteren Augenabschnitts mittels Funduskopie wurden in der Patientenakte dokumentiert. Die apparative Voruntersuchung erfasste: IOD mittels DCT und GAT, zentrale Hornhautdicke (CCT) und die Hornhautkrümmungsradien K1 und K2 (in Dioptrien). Als Hilfestellung für die vorliegende Arbeit wurden sämtliche Parameter auf einem Studien-Protokollbogen erfasst. Der Protokollbogen diente der Datenerhebung und nachfolgender Datenanalyse.

Die verwendeten Geräte für die prä- und postoperativen Untersuchungen werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

## 2.3 Die Pars-plana-Vitrektomie

Grundsätzlich kann eine ppV unter Vollnarkose oder in Lokalanästhesie durchgeführt werden. 55 ppVs wurden dabei unter Vollnarkose durchgeführt. Zu jeder durchgeführten Operation wurde ein detaillierter OP-Bericht angelegt, aus dem sich alle Informationen für die vorliegende Arbeit entnehmen ließen. Diese beinhalteten die allgemeinen Patientendaten, Art der Vitrektomie (20 Gauge, 23 Gauge, 27 Gauge) und ob im Rahmen der Vitrektomie noch andere Eingriffe durchgeführt worden waren. Liegt eine erhebliche Linsentrübung vor, die eine operative Durchführung erschwert, kann eine Katarakt-Operation mit der ppV kombiniert werden. Die Katarakt-OP wird dabei vor der ppV durchgeführt.

Dokumentiert wurden die verwendeten Endotamponaden, deren Mischungsverhältnis und eventuelle Besonderheiten oder Komplikationen während der Operation.

Die ppV wurde immer als Standard-3-Port Vitrektomie durchgeführt. Es wurden verschiedene Trokarsysteme mit Durchmessern von 20 Gauge (0,9 mm) bis 27 Gauge (0,4 mm) verwendet. Die Sklerotomien wurden je nach Durchmesser und System mit einer 2,3 mm Lanzette 3,5 mm hinter dem Limbus angelegt oder mit selbstdichtenden Trokaren direkt durch Bindehaut und Sklera gestochen (Abbildung 3). Mit dem oszillierenden Vitrektom konnte anschließend der Glaskörper von zentral bis in die Peripherie entfernt werden. Bei Glaskörperblutungen erfolgte die Entfernung der Hämorrhagie ebenfalls über dieses System. Verbliebener oder anheftender Glaskörper sowie epiretinale Gliosen wurden mit Triamcinolonacetonid oder speziellen Farbstoffen angefärbt und anschließend mit Instrumenten wie Pinzetten oder Scheren entfernt. Bei Netzhautablösungen mit subretinaler Flüssigkeit, konnte durch Eingabe von schweren Flüssigkeiten wie Perfluorcarbon (PFCL), die Netzhaut wieder zur Anlage gebracht werden. Diese Flüssigkeiten besitzen eine hohe Dichte und verdrängen die subretinale Flüssigkeit von zentral nach peripher in Richtung der Netzhautlöcher, über welche sie drainiert werden kann. Aufgrund der Retinotoxizität und mechanischen Belastung eignet sich Perfluorcarbon nicht als dauerhafte Tamponade und muss vor Operationsende gegen eine kurz- oder langfristige Endotamponade ausgetauscht werden [104]. Um eine sofortige Wiederablösung der Netzhaut zu vermeiden, wurden Endotamponaden wie Gas oder Silikonöl verwendet. Wurde sich für eine expansive Gas-Endotamponade entschieden, kamen nach Wasser-Luftaustausch SF<sub>6</sub>-Gas in einem Mischungsverhältnis von 20 oder 25% mit gefilterter Raumluft oder als Mischung mit C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> in 15%iger oder 20%iger Konzentration (Luftgemisch) als Endotamponade zum Einsatz. Danach wurden die Sklerotomien übernäht oder bei selbstdichtenden Sklerotomien auf Dichtigkeit geprüft und ggf. übernäht. Bevor ein Augenverband angelegt wurde, erfolgte noch bei 65 von 100 Patienten eine suffiziente IOD Messung mittels GAT bzw. DCT durch den Operateur.

Alle aufgeführten Schritte und Informationen über die Operation wurden standardmäßig in einem Operationsbericht festgehalten. Für diese Arbeit relevante Informationen wurden in die Studienprotokollbögen übertragen.

Alle im Rahmen dieser Arbeit eingeschlossenen Operationen wurden durch denselben erfahrenen Netzhautchirurgen durchgeführt.

Die postoperative IOD-Messung mittels GAT bzw. DCT erfolgte durch den trainierten Doktoranden, bzw. den Operateur.

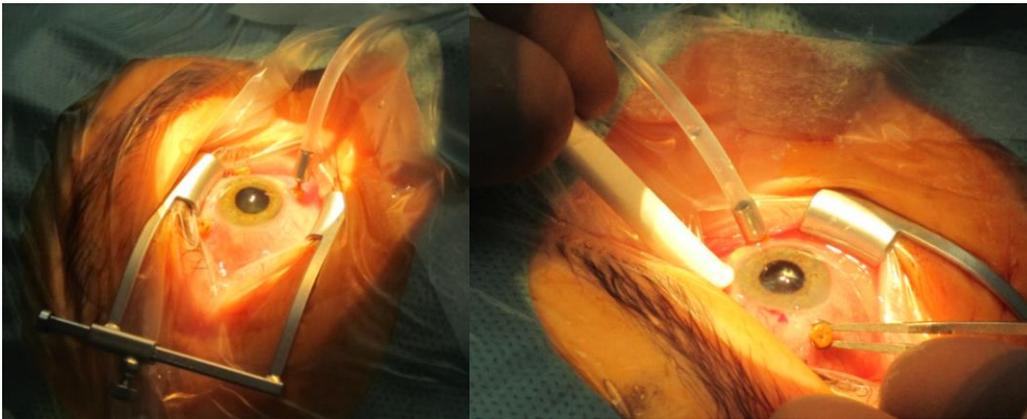


Abbildung 3: 3-Port-Pars-plana-Vitrektomie an der Universitätsaugenklinik UKS Homburg (Saar). Die Sklerotomie ist bei 5 Uhr mit der Infusion verbunden. Bei 11 Uhr und 2 Uhr befinden sich die Sklerotomien für das Vitrektom und die Lichtquelle (links). Entfernen der selbstdichtenden 23 Gauge Trokare nach Operationsende (rechts).

## 2.4 Endotamponaden

Unter Endotamponaden versteht man Substanzen die nach Entfernung des Glaskörpers in das Auge eingegeben werden [57]. Bei den meisten in die Untersuchung eingeschlossenen Patienten bedurfte es einer temporär wirkenden Endotamponade, um langfristige Erfolge der operativen Therapie zu erzielen. Dadurch wird die intraoperativ wieder angelegte Netzhaut gegen das retinale Pigmentepithel (RPE) gedrückt und eine Re-Ablatio retinae verhindert. In den Folgetagen bilden sich chorioretinale Narben im Bereich der intraoperativ angelegten Laserphotokoagulation oder Kryokoagulation aus und die Netzhaut bleibt meist anliegend. Gasinjektionen eignen sich aufgrund der hohen Oberflächenspannung zwischen Gasblase und Netzhaut gut für eine Tamponade von mehreren Tagen bis Wochen.

Bereits im Jahre 1911 beschrieb Ohm erstmalig die intravitreale Eingabe von Luft in den Glaskörper zu Behandlung von Netzhautablösungen. Der Patient wurde damals so gelagert, dass die Netzhautablösung an der obersten Stelle durch die Luftblase wieder an das RPE angeedrückt

wurde [22]. Fortgeführt wurden diese Erkenntnisse von Bengt Rosengren, der auch mittels Luftinjektion eine suffiziente Netzhautanlage bis zur Ausbildung der chororetinalen Narbe erreichte und erstmals von einer „Tamponade“ sprach [78]. In den 1950er Jahren kam das Gas Sulfurhexafluorid (SF<sub>6</sub>) erstmalig in der Medizin zum Einsatz. Als expansives Gas wurde es damals noch bei der Behandlung von Tuberkulose und Pneumothorax genutzt. Dennoch machte erst die Entwicklung der modernen Vitrektomie durch Machemer mit der Entfernung des Glaskörpers ein gesamtes Ausfüllen des Glaskörperaums durch eine Endotamponade möglich. Norton, der zusammen mit Machemer arbeitete, beschrieb 1973 die ersten vollständigen Gasendotamponaden aus Gemischen mit SF<sub>6</sub>-Gas und führte damit die Technik der modernen pneumatischen Retinopexie, wie wir sie heute kennen, ein [23,69,79].

Verantwortlich für den suffizienten Verschluss von Netzhautlöchern ist die hohe Oberflächenspannung zwischen Gasen und Flüssigkeit. Dadurch kann das RPE die restliche subretinale Flüssigkeit resorbieren. Durch den Auftrieb der Gase ist dieser Effekt an der Spitze der Gasblase am stärksten ausgeprägt, was je nach Ursprungsort der Netzhautablösung oder Lochbildung die Bedeutung der postoperativen Lagerung des Patienten erklärt. Als Gase kommen heutzutage hauptsächlich 4 verschiedene Sorten zum Einsatz: Luft, Sulfurhexafluoride (SF<sub>6</sub>), Perfluorethan (C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>) und Perfluorpropan (C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>). Nach intravitrealer Eingabe lassen sich drei Phasen beschreiben, die sich durch das Fick'sche Diffusionsgesetz erklären lassen. Danach bestreben zwei Gase, entlang einer semipermeablen Membran die Diffusion, bis die selbe Konzentration auf beiden Seiten erreicht ist. Die großmolekularen Gase lösen sich deutlich schlechter in Blut als Stickstoff. Dies hat zur Folge, dass Stickstoff schneller aus dem Blut nach intraokular diffundiert, als dass das intraokulare Gas ins Blut wandert. Dadurch kommt es zu einer intraokularen Expansion. Dieser Prozess findet hauptsächlich in den ersten 6-8 Stunden nach Eingabe statt. Danach wird ein Equilibrium erreicht, wobei sich die Diffusionsgradienten der verschiedenen Gase auf beiden Seiten ausgleichen. Schlussendlich wird das Gas nach dem ersten Gesetz der Kinetik kontinuierlich aus dem Glaskörperaum resorbiert [91,104].

Bei den Gasen kamen C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>, SF<sub>6</sub> und Luft zum Einsatz (Tabelle 1). C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> hat in reiner Form mit ca. 4,2x den größten Expansionsfaktor und verbleibt mit bis zu 8 Wochen auch am längsten im Auge [95]. Durch das längere Verbleiben im Auge eignet sich es zur Tamponade von mehreren Netzhaut-Löchern, auch im inferioren Bereich der Netzhaut oder von Löchern im Makulabereich [57,95]. SF<sub>6</sub> expandiert mit einem Faktor von ca. 1,8x nicht so stark, erreicht dafür meist seine maximale Expansion bereits am 1. postoperativen Tag und verbleibt im Schnitt 2-6 Wochen im Auge [95,104]. Alle Gase wurden als nicht- oder gering-expansives Luft-Gas-Gemisch in das Auge gegeben. Nicht stark expansive Konzentrationen für SF<sub>6</sub> sind 20% und bei C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> 14 % reiner Anteil an Gas gemischt mit 80% bzw. 86% Raumluft.

Gastamponade	Expansionsfaktor	Maximum der Expansion	der Verbleibdauer	Nicht-expansives Gasgemisch
Luft	-	-	5-7 T	-
SF6	1,8	1-2 T	2 W	20%
C2F6	3,0	1-3 T	4-5W	16%
C3F8	4,2	3-4 T	8 W	14%

Tabelle 1: Verhalten intraokularer Gase: Expansionsfaktor im Glaskörperraum mit dem Maximum der Expansion nach 1 – 4 Tagen (T) und einer Verweildauer der Gase von 5 Tagen bis 8 Wochen (W) [95].

Wie in Kapitel 1.4 erläutert, kann das expansive Verhalten von Gasen für einen kurz-bis mittelfristigen IOD-Anstieg verantwortlich sein. Eine Datenanalyse von Kanclerz et al. zeigte, dass IOD-Anstiege nach Vitrektomie mit Gasendotampoade bei 6,1% bis zu 58,9% auftraten (Tabelle 2). Gase werden meist als Gemisch mit Luft eingegeben und es besteht auch die Möglichkeit Gase untereinander zu mischen. Wie lange ein Gas im Auge verbleibt, hängt aber nicht nur vom Eingabevolumen und der Konzentration ab, sondern auch von der chorioidalen Durchblutung. Operateure berichten in einzelnen Fällen von IOD-Anstiegen durch zu hohe Gas-Konzentration. Am Ende der Operation obliegt es dem Operateur und seiner Erfahrung, in Abhängigkeit vom individuellen Befund zu entscheiden, welche Art von Gas in welchem Gemisch verwendet wird [41].

Autor	Auftreten von IOD		
	Anstieg	Definition von IOD Anstieg	Verwendetes Gas
Abrahams et al.	45%	>30 mmHg in der Frühphase	SF6 20% - 100%
Chang et al.	58,9%	>22 mmHg innerhalb der ersten Woche	C2F8, C3F8
Wong et al.	20,4%	>30 mmHg am ersten Tag nach ppV	SF6 30%
Mitra et al.	52,4 %	>25 mmHg innerhalb 4-6 Stunden nach ppV	SF6 (18%-20%), C3F8 (12%-16%)
The Silicone Study Group	8,7%	>30 mmHg zu jedem postoperativen Moment	C3F8 14%
The Silicone Study Group	6,1%	>30 mmHg zu jedem postoperativen Moment	SF6 20%

Tabelle 2: Studienüberblick über IOD-Anstiege nach Verwendung von expansiven Gasen in %. Die Studien unterscheiden sich dabei in Ihrer Definition von IOD-Anstieg und verwendeter Gase und Konzentrationen [41].

Wenn die ppV unter Vollnarkose stattfindet, sollte auf die Verwendung von Lachgas (NO<sub>2</sub>) als Anästhetikum verzichtet werden. Der Blut-Gas-Verteilungskoeffizient von NO<sub>2</sub> ist 35 mal höher als der von Stickstoff, was zur Folge hat, dass im Rahmen des Gasaustausches NO<sub>2</sub> schneller aus dem Blut in den Bulbus fließt. Das führt sehr schnell zu erheblichen unkontrollierten Druckanstiegen [86,87]. Da besonders gering lösliche Gase wie C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> bis zu 8 Wochen im Auge verbleiben, muss auch bei Folgeeingriffen unter Vollnarkose darauf geachtet werden, N<sub>2</sub>O als Anästhetikum zu vermeiden. In 13 beschriebenen Fällen wird von vollständigem Visusverlust durch massiven IOD-Anstieg und folglich zentralen Ischämien durch einen retinalen Gefäßverschluss berichtet. Folge waren irreversible Netzhautischämien mit Atrophie des Nervus opticus [85,98].

Ein weiterer Expansionsrisikofaktor eingegebener Gase ist ein reduzierter Atmosphärendruck, der zum Beispiel bei Reisen in großer Höhe vorliegt. Ausgehend vom Meeresspiegel nimmt der Atmosphärendruck alle 8 m Höhenanstieg um 1 Hektopascal (hPa) ab. Nach dem Gasgesetz von Boyle-Mariotte, bei dem das Produkt aus Volumen (V) und Gasdruck (P) konstant ist, steigt bei abfallendem P die Expansion des intraokularen Gases an. Abhängig vom Flugzeugtyp entspricht der Kabinendruck bei einer Flughöhe von 11200m Höhe einer Realhöhe Höhe von 1700 m bis 2400 m. Diese Höhen werden auch bei der Überquerung von Gebirgsketten erreicht und der Patient muss generell darüber aufgeklärt werden, während der Zeit, in der er Gas im Auge hat, Reisen in extreme Höhe zu vermeiden [59].

Bei ausgeprägten Befunden oder wenn eine längerfristige Tamponade notwendig war, entschieden wir uns für die Verwendung von Silikonölen. Silikonöl wurde erstmalig 1962 als Endotamponade in der Netzhautchirurgie verwendet [13]. Im Gegensatz zu Gasen, werden Silikonöle nicht resorbiert oder diffundieren aus dem Glaskörperaum heraus, sondern verbleiben dauerhaft im Auge und müssen meist in einer zweiten Operation entfernt werden. Leichte Silikonöle haben ein spezifisches Gewicht von etwa 0,97 g/ml und steigen im Auge somit nach oben. Studien haben gezeigt, dass bei schweren Netzhautablösungen mit PVR längerfristige Endotamponaden wie Silikonöl zu besseren postoperativen Ergebnissen bezüglich Netzhautanlage und Visusergebnis geführt haben [63]. Silikonöle kamen als hochreine Polydimethylsiloxane (PDMS) in verschiedener Kettenlänge und Viskosität von 2000 und 5700 Centistokes zum Einsatz.

Häufige Komplikationen bei Silikonölendotamponade sind IOD-Anstiege und die Entwicklung eines Sekundärglaukoms. Silikonölbläschen können sich in das Trabekelmaschenwerk setzen und dort den Kammerwasserabfluss behindern [68]. Honavar et al. konnte zeigen, dass bis zu 40% der Patienten, die Silikonöl als Endotamponade erhielten, ein Sekundärglaukom mit erhöhtem IOD entwickelten [38]. Silikonöl kann aber auch durch Verschiebung des Iris-Linsendiaphragmas zu einem Pupillarblock-Glaukom führen. Sowohl bei noch phaken Augen, als auch bei Augen, bei denen bereits eine Kunstlinse implantiert wurde (Pseudophakie), können silikonölassoziierte Winkelblöcke auftreten [39]. Das Silikonöl kann dabei zwischen Iris und Linse wandern und die

Iris gegen den Kammerwinkel drücken. Präventiv kann bei Verwendung von Silikonöl eine chirurgische Iridektomie am tiefsten Punkt der Iris, also meist in der 6-Uhr Position angelegt werden [104].

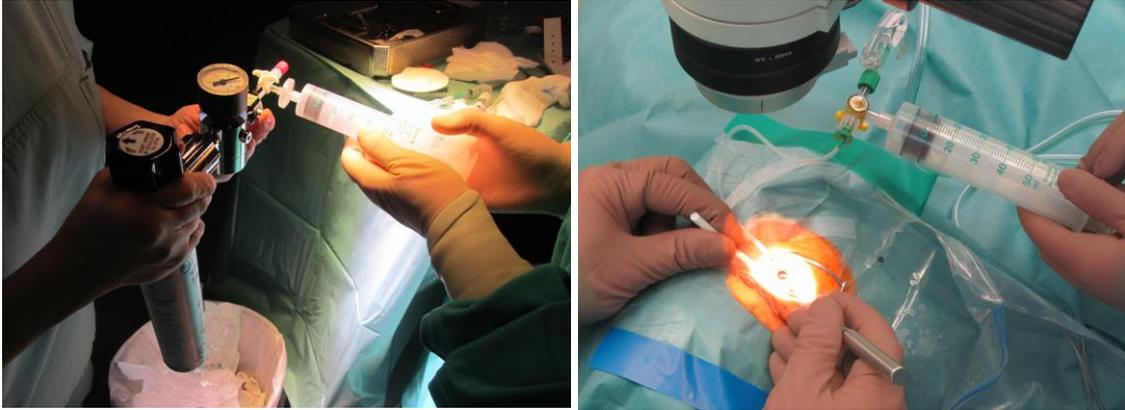


Abbildung 4: Aufziehen der Gas-Endotamponade als Luft-Gasgemisch (links) und Eingabe in den Bulbus über einen Dreiwege-Hahn und den Infusionsschlauch während des Luft-Gasaustauschs (rechts).

## 2.5 Verwendete Geräte

Sämtliche Geräte befanden sich zu Beginn der Arbeit bereits in routinemäßigem Einsatz in der Augenklinik Homburg (Saar). Das DCT kam bis zu Beginn dieser Arbeit in Einzelfällen oder im Rahmen von anderen Arbeiten zum Einsatz. Die Durchführung erfolgte großteils durch den eingewiesenen Doktoranden selbst oder den Operateur.

### 2.5.1 Das Goldmann-Applanationstonometer

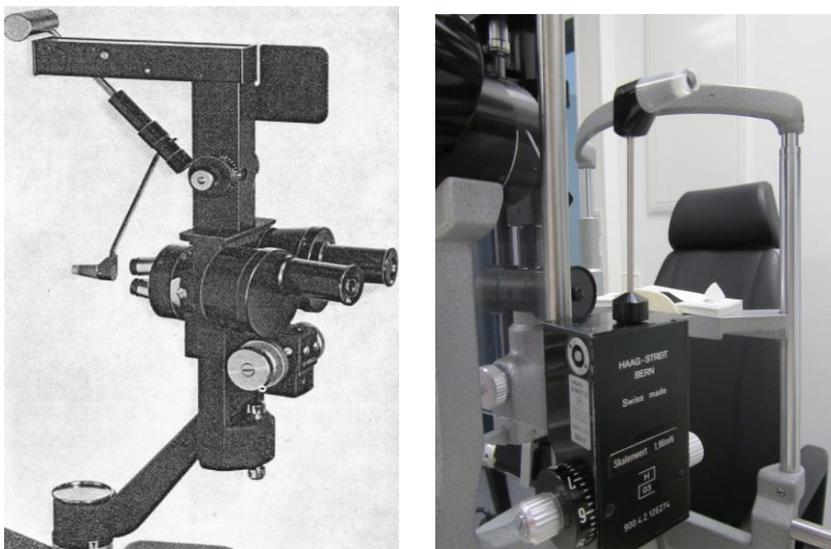


Abbildung 5: Goldmann Applanationstonometer 1955 (Goldmann und Schmidt 1957 (links) und 2015 (rechts) aus der Universitätsaugenklinik Homburg (Saar) montiert an der Spaltlampe.

In der vorliegenden Arbeit wurde der IOD zuerst mit dem GAT gemessen, damit sollte ein Bias vermieden werden, dass der Untersucher bereits den digitalen Wert kannte [96]. Das Tonometer wurde 1957 von Hans Goldmann vorgestellt und basiert als Applanationstonometer auf dem Imbert-Fick'schen Gesetz [25]. Dieses besagt, dass die Kraft, die benötigt wird um eine flüssigkeitsgefüllte Kugel, die von einer dünnen Membran umgeben ist, an einer Stelle zu applizieren, dem Gegendruck in der Kugel entspricht. Der Augendruck nach Goldmann entspricht also indirekt einer Äquivalenzkraft, die benötigt wird um die Hornhaut auf einer Fläche mit 3,06 mm Durchmesser abzuplatten (applizieren) [25].

Die Hornhaut wird dabei durch ein Tonometerköpfchen appliziert, welches über einen Arm mit einem federgeladenen Kästchen verbunden ist. Die gesamte Tonomereinheit ist fest an der Untersuchungsspaltlampe montiert (Abbildung 5). Nach Betäubung der Hornhautoberfläche und Anfärbung des Tränenfilms mit Fluoreszein wird das Messköpfchen vorsichtig auf die Hornhaut gebracht, bis diese auf einem Durchmesser von 3,06 mm appliziert ist und der Tränenfilm an den

Rand des Köpfchens verdrängt ist. In dem zylinderförmigen Tonometerköpfchen sind zwei Prismen eingelassen. Die Prismen sind optisch voneinander getrennt und so orientiert, dass sich die bei einer exakten Applanations der Hornhaut, die durch den fluoreszierenden Tränenmeniskus gebildeten Halbkreise leicht versetzt überlappen (Abbildung 6) [25].

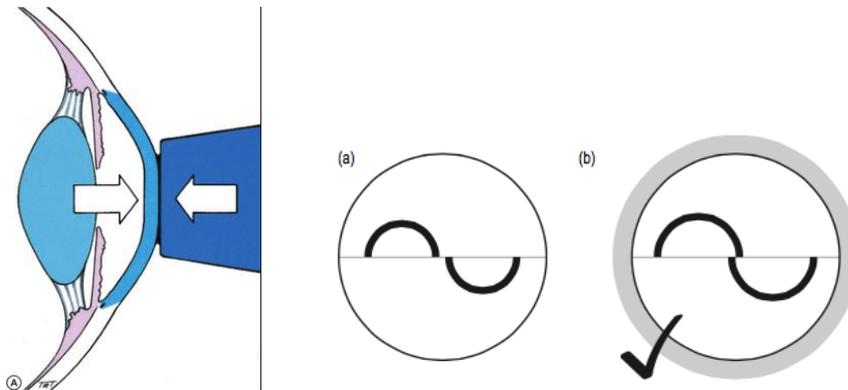


Abbildung 6: Physikalisches Prinzip der Goldmann-Tonometrie (links). Durch die zwei Prismen erzeugtes Bild des Tränenfilms (rechts). Bei einer Überlappung (b) ist die Hornhaut auf einer Fläche mit einem Durchmesser von 3,06 mm exakt applaniert [10].

Erste Studien zeigten eine signifikante Korrelation zwischen manometrisch erzeugtem Druck und mit dem GAT gemessenem IOD [26]. Aufgrund der Einfachheit und Konkurrenzlosigkeit zur damaligen Zeit etablierte sich das Messverfahren schnell als Goldstandard, an dem sich alle nachfolgenden Tonometer messen lassen mussten [52].

In der Theorie des Imbert Fick'schen Gesetzes ist die Flüssigkeit umgebende Membran unendlich dünn und ohne Eigensteifigkeit. Das gilt in der Realität nicht für die menschliche Hornhaut und so wurde das Tonometer orientierend anhand von manometrischen IOD-Messungen geeicht. Als Resultat gilt die Goldmann-Applanations-tonometrie idealerweise für Hornhäute mit einer Dicke von 520  $\mu\text{m}$  [52]. Durch die Eigenelastizität der Hornhaut wird mehr Kraft zur Applanations benötigt und es kommt zu einer Überschätzung des IOD. Jedoch wirkt die Oberflächenspannung des Tränenfilms anziehend auf das Tonometerköpfchen und erleichtert die Applanations, was zu einer Unterschätzung führt. Goldmann ging von einer normalen zentralen Hornhautdicke von 0,5 mm aus und errechnete so, dass bei einer zu applanierenden Fläche von 3,06 mm Durchmesser sich diese beiden Einflussfaktoren gegeneinander ausgleichen. Aber bereits Goldmann und Schmidt selbst gaben zu bedenken, dass Faktoren wie die Hornhautdicke zu Abweichungen der IOD-Werte führen können [26].

In den folgenden Jahren zeigte eine Vielzahl an Studien, dass das GAT in seiner Messgenauigkeit einer Beeinflussung durch Faktoren wie Hornhautdicke, Tränenfilm, Hornhautnarben, Astigmatismus, Hydrationszustand, Fremdkörper, Hornhaut- und Sklerarigidität und Kneifen der Lider unterliegt [70,89,102]. Madjlessi et al. konnten nachweisen, dass bei pathologisch veränderten

Hornhäuten mit postoperativem Hornhautödem eine konkrete Unterschätzung des GAT im Vergleich zur intraokularen Nadeldruckmessung vorlag [61].

### 2.5.2 Das dynamische Contour-Tonometer (DCT)



Abbildung 7: Das DCT inklusive Zubehöres (rechts) und montiert angeschraubt auf die Metallplatte zur Anbringung an die Spaltlampe (links).

Im Laufe der Jahre kamen neue Tonometer-Systeme auf den Markt, welche sich vom Prinzip der Applanationstonometrie unterscheiden. 2005 berichteten Kniestedt und Kanngiesser von einer Möglichkeit zur nicht-invasiven und direkten Messung des IOD, der dynamischen Konturtonometrie [44,51]. Das dynamische Contour-Tonometer PASCAL® (Ziemer Ophthalmology) setzt auf das Prinzip der konturangepassten Tonometrie, mit einem der Hornhautkrümmung angepasstem Tonometermessköpfchen mit eingelassenem piezoresistiven Drucksensor (Abbildung 7). Der Hornhaut wird ein konturangepasstes Tonometerköpfchen mit einem Krümmungsradius von 10,5 mm und einem Gewicht von 1 g aufgesetzt. Dadurch wird die Hornhaut in die Form gebracht, die sie natürlicherweise einnimmt, wenn der Druck auf beiden Seiten der Kornea gleich ist. Das Kräftefeld zwischen Köpfchen und Hornhaut rings um den Apex entspricht demjenigen, welches durch den IOD erzeugt wird (Abbildung 8). In der konkaven Wölbung ist ein piezoresistiver Drucksensor eingebracht, der ein zum IOD proportionales elektrisches Signal generiert. Der Sensor hat eine Fläche von weniger als 0,25 mm<sup>2</sup> und kann den IOD in einem Bereich von 0 – 300 mmHg mit einer Auflösung von 0,1 mmHg erfassen. Der konturangepasste Tonometerkopf mit einem Durchmesser von 7,0 mm bildet einen spannungsfreien Zustand der Hornhaut. Es entsteht keine endothelial-epitheliale Druckdifferenz, die von biomechanischen Eigenschaften der Hornhaut abhängig ist, was im Gegensatz bei der Applanation der Hornhaut der Fall ist. Das Kräftefeld zwischen Messköpfchen und Hornhaut rings um den Apex entspricht dabei dem von innen erzeugten IOD [51].

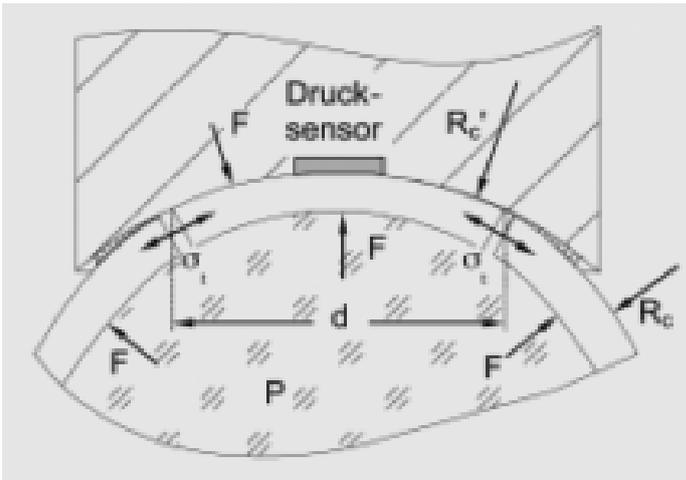


Abbildung 8: Physikalisches Prinzip der dynamischen Konturtonometrie. Durch den IOD (P) wirkt eine Kraft (F) auf die Kornea. F ist die Kraft des Drucks P (IOD) auf die Kornea mit einem Krümmungsradius  $R_c$ . Darauf liegt das Tonometerköpfchen mit einem Krümmungsradius von  $R_c'$  auf und passt die Kontur der Hornhaut auf einer Fläche mit dem Durchmesser (d) an. Rings um diesen Bereich bestehen weiterhin die Tangentialspannungen ( $\alpha_1$ ) durch die auf die Hornhaut wirkenden Kräfte [51].

Das Tonometerköpfchen liegt der Hornhaut 5 Sekunden auf und führt bei einer Frequenz von 100 Hz insgesamt 500 Einzelmessungen durch. Die Messung des IOD ist direkt, nicht invasiv und kontinuierlich. Nach einem akustischen Signal können auf einem LCD-Bildschirm der IOD, die okuläre Pulsamplitude (OPA) und eine Qualitätsstufe Q1 - Q5 abgelesen werden. Durch die Qualitätsstufe Q erhält der Untersucher direkte Rückmeldung über die Qualität der Messung [51,96]. Das DCT kann an eine herkömmliche Spaltlampe montiert werden und das Tonometerköpfchen wird mit einer sterilen, für den einmaligen Gebrauch vorgesehenen Silikonmembran überzogen. Die Intra- und Interuntersuchervariabilität ist durch die einfache Handhabung, die automatische digitalisierte Berechnung und die Qualitätskontrolle gering und liegt unter der der Applanationstonometrie [45,96].

In den ersten Studien von Kniestedt et al. zeigte sich eine hohe Messgenauigkeit des Tonometers. Im Vergleich zu einem manometrisch abgeleiteten IOD lag der systematische Messfehler bei unter 0,8 mmHg [50]. Weitere unabhängige Untersuchungen bestätigten die hohe Präzision des DCT mit einer guten Reproduzierbarkeit [9,100].

Das DCT misst den IOD präzise und weitestgehend unabhängig von Hornhautdicke und anderen biomechanischen Eigenschaften und zeigt dabei eine geringere bis keine Beeinflussung der Messgenauigkeit im Vergleich zum GAT [16,20]. Viestenz et al. wiesen mit dem DCT einen um ca. 4 mmHg höheren IOD als mit dem GAT an keratoplastizierten Augen nach [96]. Betrachtet man zum Beispiel die korneale Hysterese (CH) und den Corneal Resistance Factor (CRF), so konnte deren Einfluss auf die Messgenauigkeit des GAT gezeigt werden. Touboul et al. beschrieben, dass eine niedrige CH und CRF ein potentielles Risiko für die Unterschätzung des IOD sind [92].

Der Hydrationszustand der Hornhaut wie zum Beispiel bei postoperativen Hornhautödemen beeinflusst die Messgenauigkeit des DCT ebenfalls nicht signifikant. Insgesamt misst das DCT in den vorliegenden Studien eher höhere IOD-Werte als das GAT [8,46,71,96].

Postoperativ wurde das DCT als zuverlässige Messmethode bestätigt. Sowohl nach Katarakt-Operation als auch nach Laser in Situ Keratomileusis (LASIK) misst das GAT signifikant niedrigere IOD-Werte als das DCT [34]. Auch nach Vitrektomie wird in der Literatur ein Unterschied zwischen den beiden Tonometrieverfahren beschrieben. Postoperativ wurden in Einzelfällen teilweise große Differenzen zwischen dem DCT und GAT beobachtet [36,62].

Geht man von der beschriebenen Beeinflussbarkeit der Messgenauigkeit des GAT aus, kann angenommen werden, dass durch postoperative Veränderungen der Biomechanik der Hornhaut das GAT den IOD falsch zu niedrig misst [34].

Ein weiterer Vorteil des DCT ist die Unabhängigkeit von der Spaltlampe. Das Tonometer kann frei gehalten am aufrecht sitzenden Patienten durchgeführt werden. Sofern der Patient nicht aufrecht sitzen kann, kann der Kopf um 90° gedreht werden, um die Messung durchzuführen. Dadurch eignet sich das DCT auch zu IOD-Bestimmung bei immobilen Patienten oder im OP. Die Messgenauigkeit unterscheidet sich dabei nicht signifikant von der spaltlampenmontierten Messung [48].

### 2.5.3 Das Perkins Tonometer

Im Jahre 1965 erkannte Edward S. Perkins das Problem der IOD-Messung bei liegenden oder immobilen Patienten und entwickelte ein mobiles handgehaltenes Applanations-Tonometer (Abbildung 9). Das Instrument setzt auf dasselbe Prinzip wie das Goldmann-Tonometer kann aber in der Hand gehalten werden und benötigt keine Spaltlampe. Das Messköpfchen ist über einen Arm mit einem Gegengewicht verbunden und an einer vorgeladenen Feder angebracht. Der Patient kann sowohl eine aufrechte oder liegende Position einnehmen [73].

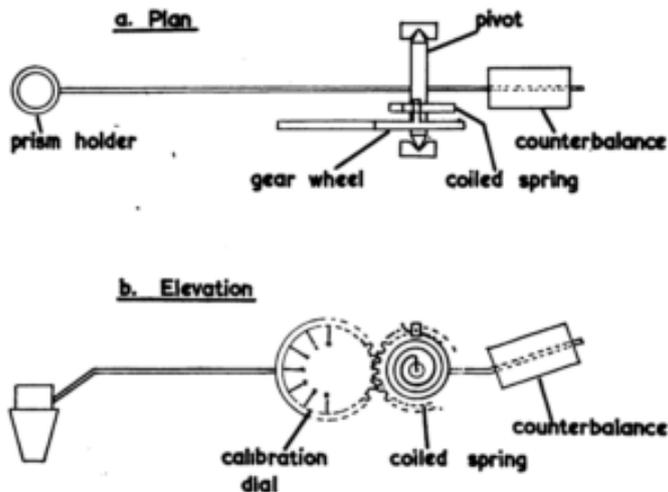


Abbildung 9: Zeichnerische Darstellung des Prototypen des Perkins Tonometer in Aufsicht (oben) und Seitenansicht (unten) [73]

Erste Vergleiche mit dem GAT zeigten, dass es sich bei dem Perkins-Tonometer um eine praktische, zuverlässige und portable Alternative zum etablierten GAT handelt. Wallace et al. konnten eine mittlere IOD Differenz von 0,5 mmHg im Vergleich mit dem GAT nachweisen [99]. Lediglich die schwache Lichtquelle der mobilen Apparatur wurde damals noch bemängelt.

Das von uns verwendete Tonometer Perkins MK 2 ® (HaagStreit) ist die technische Weiterentwicklung des ursprünglichen Modells in neuem Design mit längerer Akkulaufleistung und moderner LED-Beleuchtung. Das Tonometerköpfchen ist identisch zu dem des GAT (Abbildung 10).



Abbildung 10: Von uns verwendetes Perkins Tonometer Mk2 im Operationssaal (UKS).

## 2.5.4 Die optische Kohärenztomographie (OCT)

Die optische Kohärenztomografie ist eine etablierte, nichtinvasive bildgebende Diagnostik. Sie liefert eine hochauflösende Querschnittsdarstellung der Retina. Nach gleichem Prinzip kann man sie auch zur Durchführung am vorderen Augenabschnitt nutzen [28]

Vom Prinzip funktioniert die OCT analog zur B-Bild-Ultrasonographie, verwendet aber Interferometrie mit Infrarotlicht anstelle von Schallwellen. Bei der Interferometrie wird das Interferenzmuster untersucht, das durch Überlagerung von Wellen entsteht. Hierbei wird der Lichtstrahl durch einen Strahlenteiler zum einen in ein Lichtbündel aufgespalten, welche das zu untersuchende Gewebe abtastet und in ein Referenzlichtbündel, das von einem Spiegel reflektiert wird. Am Ende wird das Interferenzmuster detektiert und ausgewertet. Dadurch kann ein Rückschluss auf das durchleuchtete Gewebe gezogen werden. Bei der Time-Domain-OCT wird der Referenzspiegel von der Lichtquelle vor- und zurückbewegt. Durch laterales Verschieben der A-Scan Folgen entstehen zweidimensionale Querschnittsbilder [28]. Bei neueren OCT Geräten mit Spektral-/Fourier-Domain Analyse ist eine Spiegelbewegung nicht mehr nötig. Durch simultane Registrierung der Informationen für jeden Punkt A wird eine höhere Bildaufnahmegeschwindigkeit und bessere Auflösung erreicht. Die dadurch erstellte dreidimensionale Rekonstruktion der Netzhaut ermöglicht die Unterscheidung einzelner Netzhautschichten [82]. Seitdem die OCT als diagnostisches Mittel des vorderen Augenabschnittes eingeführt wurde, kommt es standardmäßig zur Darstellung kornealer Veränderungen und zur Erstellung einer Hornhautpachymetrie zum Einsatz [37,105].

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Gerät handelt es sich um den Tomey SS-1000® (Casia), welches die oben erläuterte Spektral-/Fourier-Domain Analyse verwendet. Mit 30.000 A-Scans pro Sekunde und 256 B-Scans kreiert das Gerät ein hochauflösendes dreidimensionales Bild der Hornhaut, der Vorderkammer und erstellt eine Topographie-Karte der Hornhaut. Aus der Pachymetrie lässt sich die zentrale Hornhautdicke ablesen (Abbildung 11).

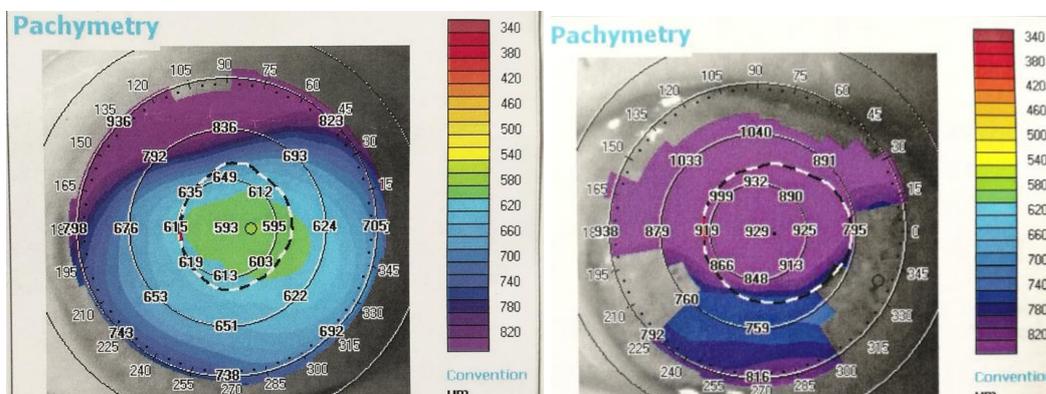


Abbildung 11: Hornhautpachymetrie mittels Vorderabschnitt-OCT bei postoperativem Hornhautödem nach ppV. Links eine regelrechte Hornhautkonfiguration mit einer CCT von 593 µm und rechts ein postoperatives Hornhautödem mit einer CCT von 929 µm.

## 2.6 Präoperative Durchführung der IOD-Messung

Nach stationärer Aufnahme der Patienten erfolgte noch am Tag vor der OP die IOD-Bestimmung mit den beiden Tonometer GAT und DCT. Um eine Beeinflussung des Untersuchers zu vermeiden, wurde zuerst analog der IOD mit dem GAT in 2 Achsen (um  $90^\circ$  versetzt) und anschließend digital mit dem DCT gemessen. Beide Messungen wurden durch den selben Untersucher durchgeführt (Doktorand oder Operateur). Die Mehrzahl der Messungen wurden dabei durch den Doktoranden selber durchgeführt. Die ersten Messungen fanden unter Anleitung statt und die ersten 20 Werte wurden als anfängliche Kontrolle nicht einbezogen (Lernkurve). Im Einzelfall erhielt der Doktorand Unterstützung bei den Messungen durch die Betreuer Professor A. Viestenz und Fr. Dr. A. Viestenz.

Im Rahmen dieser Arbeit kam das Goldmann-Applanations-Tonometer AT 900® (Haag-Streit) zum Einsatz. Der Patient saß dazu aufrecht und möglichst entspannt an der Spaltlampe (Abbildung 12). Damit eine Applanation der Hornhaut seitens des Patienten toleriert wird und um einen reflektorischen Lidschluss zu vermeiden, wurde die Hornhaut mit Proparackain Augentropfen® (Ursapharm Arzneimittel GmbH) betäubt. Zur Anfärbung wurde ein Tropfen Fluoreszein SE Thilo® (Alcon) auf die Hornhaut gegeben (Abbildung 13). Der Kobaltblaufilter wird in den Strahlengang gebracht und in einem Winkel von ca.  $45^\circ$ - $60^\circ$  gegen das Tonometerköpfchen gerichtet. Das Prisma wird manuell mit der Spaltlampe vorgeschoben, bis es zentral die Hornhaut berührt. Jetzt kann durch die Spaltlampe unter blauem Fluoreszenzlicht die applanierte Fläche begutachtet werden. Ein Verstellrädchen an der Messtrommel variiert die Kraft mit der die Hornhaut applaniert wird, bis sich die beiden inneren Ränder der Fluoreszeinbänder gerade überlappen (Abbildung 7). Durch Ablesen des Skalenwertes an der Messtrommel erhält man den aktuellen IOD in mmHg. Eine Hornhautverkrümmung von über 3,0 Dioptrien kann zu Verzerrungen der Halbkreise und somit zu falsch abgelesenen IOD Werten führen. Um das auszugleichen haben wir eine zweite Messung durchgeführt, vor der das Tonometerköpfchen um 90 Grad rotiert wurde. Anschließend wurde der Mittelwert aus beiden Druckwerten errechnet [96].

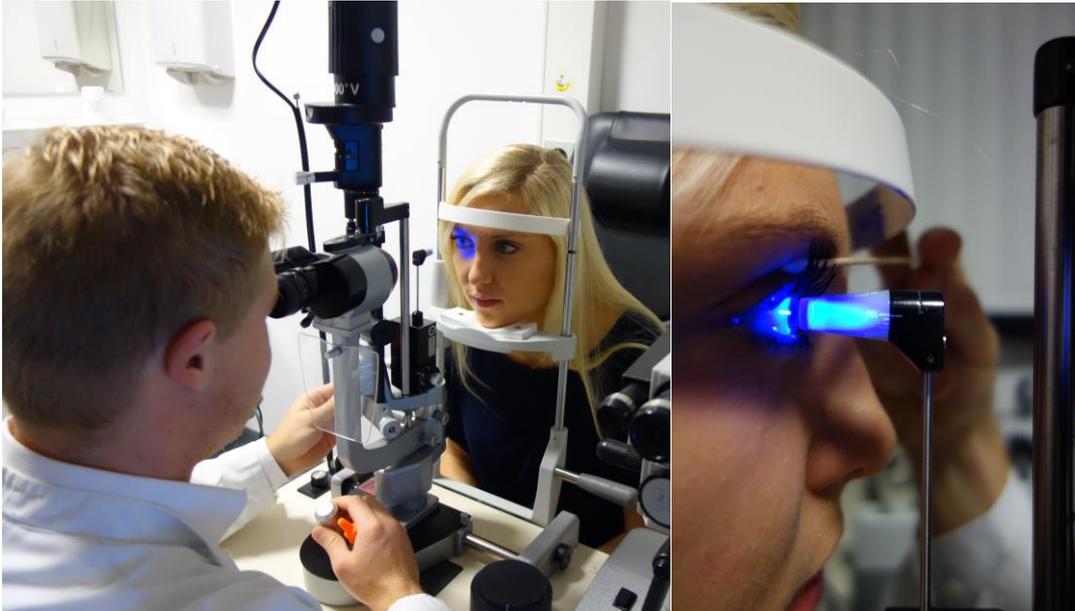


Abbildung 12: Die Patientin sitzt aufrecht dem Unterscher an der Spaltlampe gegenüber (links); vorsichtige Applanation der Hornhaut unter Sichtkontrolle mit dem GAT (rechts).



Abbildung 13: Verwendete Augentropfen zur Betäubung der Hornhaut (links) und Anfärbung des Tränenfilms (rechts); GAT-Tonometerköpfchen (oben).

Nach erfolgreicher IOD-Bestimmung mittels GAT wird das DCT an die Spaltlampe montiert. Eine, für den einmaligen Gebrauch entwickelte, „Sensor-Cap“ aus Silikon wird über den Tonometerkopf gezogen. Nach Einschalten des Gerätes wird unter Spaltlampendurchsicht durch vorsichtiges Vorschieben der piezoresistive Drucksensor exakt auf das Zentrum der Hornhaut geführt und dort gehalten (Abbildung 14 und 15). Das DCT gibt ein zum IOD proportionales akustisches Signal wieder, welches über die gesamte Messdauer von ca. 5 Sekunden zu hören ist. Nach erfolgreicher Messung ertönt ein zweites akustisches Signal und der Untersucher fährt das DCT wieder zurück. Zusätzlich errechnet das DCT einen Wert Q für die Messqualität von Q1 bis Q5. Bei Werten von  $Q = 5$  wurde die Messung wiederholt.



Abbildung 14: Spaltlampenmontiertes DCT mit Einmal-Silikonüberzug.

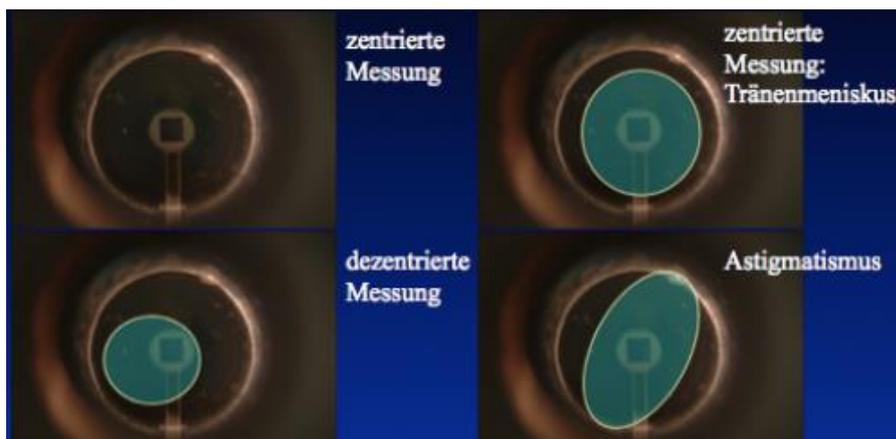


Abbildung 15: Korrekte Positionierung des Sensors auf der Hornhaut [96].

## 2.7 Intraoperative Messung

Zusätzlich zu den prä- und postoperativen IOD-Messungen wurde im Rahmen dieser Arbeit bei 62 Patienten der IOD unmittelbar nach Beendigung der durchgeführten Vitrektomie noch auf dem Operationstisch durchgeführt. Die Genehmigung der Ethikkommission des Saarlandes für die Messung in ITN lag vor. Zu dem Zeitpunkt waren alle operativen Zugänge verschlossen und das Auge als dicht befunden. Zum Einsatz kam als erstes das handgehaltene Perkins-Tonometer. Bei noch eingesetztem Lidsperrerr wurde die Augenoberfläche mit einem Tropfen Fluoreszein angefärbt. Das Perkins-Tonometer wurde senkrecht auf die Hornhaut gesetzt und der IOD über das Regler-Rädchen an der linken Geräteseite vom Operateur abgelesen (Abbildung 16). Im Anschluss kam das handgehaltene DCT zum Einsatz (Abbildung 17). Der Operateur drehte dazu den Kopf des

Patienten zur Seite, sodass das Tonometerköpfchen und der Bulbus in einem Winkel von  $90^\circ$  zueinander standen. Knecht et al. bestätigten, dass das freigehaltene DCT im Vergleich zur spaltlampenmontierten Variante, ebenfalls verlässliche IOD-Werte ermittelt [48]. Zusätzlich wurde der IOD palpatorisch durch vorsichtiges Tasten mit beiden Zeigefingern über das geschlossene Augenlid oder direkt gegen den Bulbus abgeschätzt. Die palpatorische Druckabschätzung sowie die Messung mit dem Perkins-Tonometer blieben hauptsächlich dem Operateur vorbehalten. Die Kontrollmessung mit dem DCT erfolgte durch beide Untersucher (Doktorand und Prof. Viestenz).



Abbildung 16: Unmittelbar postoperative IOD-Messung mit dem handgehaltenen Perkins-Tonometer.



Abbildung 17: IOD-Messung mit dem handgehaltenen DCT mit sterilem Sensor-Cap (intraoperatives Setting UKS).

## 2.8 Postoperative Messungen während des stationären Aufenthaltes

Postoperativ wurden die Patienten nach der Überwachung im anästhesiologischen Aufwachraum zurück auf die Augenstation verlegt und noch am selben Tag wurde die erste Druckkontrolle durchgeführt. Die erste Messung fand zwischen 4 und 9 Stunden (Mittel 5,9) nach Operationsende statt. Es kam erneut zuerst das GAT zum Einsatz, um einen Mess-Bias zu vermeiden. Es wurden zwei Messungen im Versatz um 90° Grad gemacht. Danach wurde der IOD mittels DCT bestimmt. Abhängig vom postoperativen Allgemeinzustand des Patienten, konnte bei 58 Patienten eine Vorderabschnitts-OCT angefertigt werden um zu ermitteln, ob ein postoperatives Hornhautödem vorlag.

Gleiche Messungen wurden am ersten postoperativen Tag durchgeführt. Es wurde ebenfalls eine Vorderabschnitt-OCT zur Bestimmung der zentralen Hornhautdicke angefertigt.

## 2.9 Ambulante Wiedervorstellung

Mit der Entlassung der Patienten wurde ein Wiedervorstellungstermin in der Hochschulambulanz der Universitätsaugenklinik Homburg (Saar) zur postoperativen Kontrolle vereinbart. Dieser Termin wurde in der Regel 4-8 Wochen postoperativ angesetzt. 72 Patienten kamen im Rahmen dieser Arbeit zur postoperativen Kontrolle. Neben der ophthalmologischen Untersuchung des vorderen und hinteren Augenabschnittes, wurden auch apparative Verlaufsuntersuchungen wie ein OCT des vorderen und hinteren Augenabschnittes durchgeführt. Dokumentiert wurde die zentrale Hornhautdicke und am hinteren Augenpol die Stelle des schärfsten Sehens. Der IOD wurde wie präoperativ vergleichend zuerst mit dem GAT und dann mit dem DCT gemessen.

## 2.10 Statistische Datenanalyse

Die statistische Datenanalyse erfolgte mit Hilfe des Statistik-Programms SPSS 20.0 für Mac OS (SPSS Inc.; USA). Zuvor wurden sämtliche Daten aus dem Protokollbogen pseudonymisiert in Tabellenform in Microsoft Excel überführt und anschließend zur weiteren Datenanalyse in eine SPSS-Tabelle importiert. Die Datenerhebung wurde eigenständig durch den Doktoranden durchgeführt.

Im Rahmen der deskriptiven Statistik wurden die Messwerte als Mittelwerte mit entsprechender Standardabweichung und Minimum und Maximum angegeben. Nicht normalverteilte Variablen wurden als Median mit Minimum und Maximum angegeben.

Zur Überprüfung der Unterschiedshypothese zwischen den Mittelwerten von normalverteilten Variablen wurde der t-Test für gepaarte und unabhängige Stichproben durchgeführt. Bei der Unterschiedshypothese werden eine Nullhypothese und eine Alternativhypothese gegenübergestellt. Ist kein Unterschied zwischen den Hypothesen erkennbar, so trifft die Nullhypothese zu. Ist ein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten feststellbar, trifft die Alternativhypothese zu. Mit dem Signifikanzniveau wird angegeben, zu wie viel Prozent die Alternativhypothese fälschlicherweise angenommen wird, also ein Unterschied zwischen den beiden Gruppen angenommen wird, obwohl es keinen gibt (Fehler 1. Art.). Die Irrtumswahrscheinlichkeit  $p$  für diese Studie wurde auf 5% festgelegt [80]. Bei nicht normalverteilten Variablen kam der Mann-Whitney U-Test oder bei verbundenen Stichproben der Wilcoxon-Test zum Einsatz [80]. Die Signifikanztestung durch SPSS erfolgte zweiseitig. P-Werte von  $p < 0,05$  wurden als statistisch signifikant festgelegt.

Um zu errechnen, ob die Ergebnisse von Parametern wie Alter oder Geschlecht abhängig waren oder eine Abhängigkeit zwischen IOD und verwendeter Endotamponade bestand, wurde der Korrelationskoeffizienten (KOR) nach Pearson errechnet [80]. Er rangiert von -1 bis + 1 wobei die Werte +1 und -1 einer vollständigen linearen positiven oder negativen Korrelation der Variablen entsprechen. Bei einem Wert von 0 liegt eine vollständige Unabhängigkeit der Variablen voneinander vor.

Um die beiden Tonometer miteinander zu vergleichen, wurde die Intertonometerdifferenz zwischen den IOD-Werten des DCT und des GAT gebildet und deren Mittelwert errechnet.

Zur optischen Darstellung wurde ein Bland-Altman-Diagramm angefertigt. Dabei handelt es sich um eine Sonderform eines Punktdiagramms um zwei Messmethoden miteinander zu vergleichen. Dadurch lässt sich optisch beurteilen, wie hoch die Abweichung ist oder ob ein Tonometer höher oder niedriger misst als das andere. Zusätzlich lässt sich erkennen, ob die Intertonometerdifferenz abhängig von der absoluten IOD-Höhe ist [6,89].

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Das Patientenkollektiv

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden 100 Augen von 54 Männern und 46 Frauen eingeschlossen. Das Patientenalter betrug im Mittel  $66,3 \pm 13,3$  Jahre (Spanne 25-92 Jahre). Gemessen wurden 49 rechte und 51 linke Augen. An 57 Augen wurde bisher noch keine ppV durchgeführt, die restlichen 43 Augen wurden dementsprechend als voroperiert definiert. 27 Augen wurden im Rahmen einer vorausgegangenen ppV mit einer Silikonöl-Endotamponade versorgt und stellten sich jetzt zur geplanten Silikonölexplantation vor. Bezüglich der OP-Indikation zur ppV war das Patientenkollektiv heterogen gemischt. Eine Übersicht über die Indikationen zur ppV gibt die folgende Tabelle 3.

OP-Indikation	Anzahl der Patienten
Epiretinale Gliose	29
Silikonöl-Explantation	27
Netzhautablösung	14
Intraokuläre Blutung	12
Netzhautloch / -riss	9
(Sub-)Luxation der künstlichen Linse	7
Sonstige	5

Tabelle 3: Primäre Indikation zur ppV an der Universitätsaugenklinik des Saarlandes Homburg / Saar (UKS) (Doppelnennung möglich).

### 3.2 Präoperative Untersuchungen

Wie im Methodikteil beschrieben, wurden alle Augen umfangreich vor der Operation untersucht. Der Visus am zu operierenden Auge lag bei knapp der Hälfte der Patienten (48%) bei 0,16 oder schlechter (Median 0,2; Spanne 0,001 – 1,0; nach Snellen). 37 Augen waren phak, besaßen also noch ihre eigene Linse. Bei 51 Augen war bereits eine Kunstlinse implantiert worden und 7 Augen waren ohne Linse (aphak).

Der IOD wurde vergleichend hintereinander mit den beiden Tonometern GAT und DCT erfasst. Beim GAT wurde der Mittelwert aus zwei Messungen in unterschiedlicher Ausrichtung (Null Grad und 90 Grad) errechnet, um mögliche Fehlmessungen, bedingt durch einen starken Hornhautastigmatismus, zu minimieren.

Präoperativ lag der mittlere IOD mit dem GAT gemessen bei  $15,8 \pm 5,3$  mmHg und mit dem DCT bei  $17,5 \pm 5,9$  mmHg (Tabelle 4). Aufgrund der Tatsache, dass 27 Patienten zur geplanten Silikonölexplantation kamen, unterschieden sich diese Augen bereits präoperativ bezüglich ihrer

Bulbusfüllung. Diese Augen waren voroperiert und silikongefüllt. Bei ihnen fiel im Vergleich zu den restlichen Patienten ein höherer IOD auf. Dieser lag mit dem DCT gemessen im Mittel bei 19,8 mmHg. Der präoperative IOD-Spitzenwert wurde ebenfalls bei einem silikonölgefüllten Auge gemessen (39 mmHg). Die 57 nicht vorvitrektomierten Augen wiesen im Mittel den niedrigsten IOD auf ( $16,9 \pm 4,8$  mmHg, gemessen mit dem DCT) (Tabelle 6). Insgesamt lag die Inertonometerdifferenz zwischen DCT und GAT präoperativ bei 1,8 mmHg. Zusätzlich errechnete das DCT bei allen Augen die OPA. Diese lag im Mittel bei  $2,5 \text{ mmHg} \pm 1,3 \text{ mmHg}$  (Tabelle 4).

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
IOD DCT	100	4,1	39,0	17,5	5,9
IOD GAT	100	2,5	32,5	15,8	5,3
OPA DCT	100	0,6	6,9	2,5	1,3

Tabelle 4: Die präoperativen IOD-Werte (in mmHg) gemessen mit dem DCT, dem GAT und die, vom DCT angegebene OPA.

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard-abweichung
Keine vorherige ppV	57	10,3	36,9	16,9	4,8
Vorvitrektomiert	43	4,1	39	18,4	7,1
Silikonöl-Explantation	27	12	39	19,8	7,4

Tabelle 5: Gemessene IOD-Werte mit dem DCT bei nicht voroperierten Augen, vitrektomierten Augen und silikonölgefüllten Augen.

### 3.3 Biometrische Messwerte

Mit Hilfe des Vorderabschnitts-OCT wurden präoperativ einige biometrische Daten der zu operierenden Augen erfasst. Folgende Tabelle 6 fasst die Ergebnisse der Untersuchungen zusammen.

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Achslänge (in mm)	87	17,0	31,2	23,7	2,0
Ks (in Dioptrien)	99	40,7	51,5	44,3	1,8
Kf (in Dioptrien)	99	20,4	47,4	43,0	2,8
CCT (in $\mu\text{m}$ )	99	451	813	554	47
Vorderkammertiefe (in mm)	82	2,3	6,3	3,8	0,8

Tabelle 6: Biometrische Werte der zu operierenden Augen präoperativ.

### 3.4 Postoperativer Verlauf

Der postoperative Verlauf begann mit Wiedereintreffen der Patienten auf Station und erstreckte sich über die folgenden 1-2 Tage. Noch am Tag der Vitrektomie wurden die Patienten erstmalig nachkontrolliert. Augenmerk lag auf der Erfassung des IOD zum frühzeitigen Erkennen hypo- oder hypertoner Phasen. Am Folgetag wurden die Patienten im Rahmen der morgendlichen Visite untersucht. Erfasst wurden neben des Spaltlampenbefundes des vorderen und hinteren Augenabschnittes, der postoperative IOD mittels GAT und DCT.

### 3.5 Erste Nachuntersuchung am Operationstag

Wenn möglich, erfolgte noch am Tag der OP die erste Kontrollmessung. 90 von 100 Augen wurden dabei postoperativ erfasst. Im Schnitt erfolgte die erste Nachuntersuchung 6 Stunden nach der Vitrektomie. 32 Augen waren nach den ersten Stunden eher hypoton. Dieser Zustand wurde definiert als ein IOD von kleiner oder gleich 5 mmHg oder wenn der Bulbus bereits beim palpatrischen Tasten fühlbar weich war. Kontrollmessungen mit dem DCT an hypotonen Augen ergaben oft fehlerhafte Werte mit niedriger Qualitätsstufe (Q4 und Q5) und somit erwies sich eine vergleichende IOD-Bestimmung in Einzelfällen als nicht durchführbar.

Das DCT kam in 90 Fällen zum Einsatz. Bei 28 Augen konnte auch durch wiederholtes Messen keine erfolgreiche Messung durchgeführt werden. Bei 26 dieser 28 nicht erfolgreichen Messungen handelte es sich um vorher als hypoton definierte Augen. Bei den restlichen 62 Augen wurde im Mittel ein IOD von  $15,8 \pm 6,9$  mmHg (Spanne 4,7–35 mmHg) gemessen (Abbildung 18). Die OPA lag bei  $1,97 \pm 1,3$  mmHg (Spanne 0,5 – 8,1 mmHg).

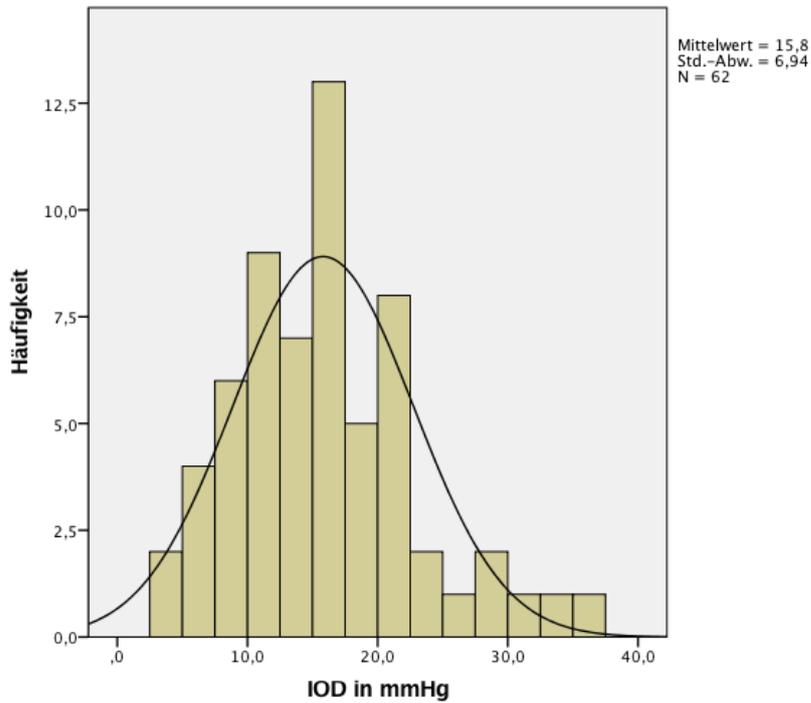


Abbildung 18: Gauß'sche Verteilungskurve: Erste postoperative Messung mit dem DCT (in mmHg).

Mit dem GAT wurden 76 Augen erfasst. Im Mittel lag der Druck bei  $11,9 \pm 7,2$  mmHg (Spanne 1- 42 mmHg) (Abbildung 19).

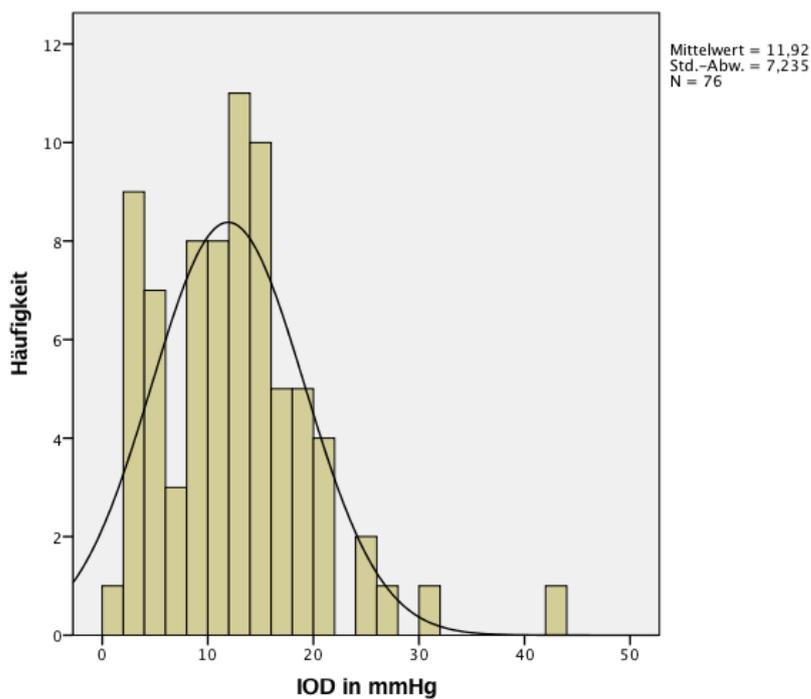


Abbildung 19: Gauß'sche Verteilungskurve: Erste postoperative Messung mit dem GAT (in mmHg).

Von den 62 mit dem DCT gemessenen Patienten wiesen 6 Patienten (9,7%) bereits nach ca. 6 Stunden nach ppV erhöhte IOD-Werte von  $\geq 25$  mmHg. Vereinzelt konnten Druckspitzen bis 35 mmHg gemessen werden. Die Patienten erhielten Acetacolamid 250 mg oder 500 mg systemisch als Kurzinfusion zur IOD-Senkung.

Bei 58 Patienten wurde eine Vorderabschnitt-OCT durchgeführt um die Hornhautdicke und eine eventuelle postoperative Ödembildung zu dokumentieren. Die CCT lag bei  $616 \pm 63,1$   $\mu\text{m}$  (Spanne 502 - 852  $\mu\text{m}$ ). Im Vergleich zur Aufnahmeuntersuchung hatte die CCT im Schnitt um 62  $\mu\text{m}$  zugenommen.

### 3.6 Zweite postoperative Untersuchung Folgetag

Die zweite Kontrollmessung erfolgte in der Regel am Tag nach der OP. Die folgende Tabelle 7 (a; b) fasst die IOD Werte gemessen mit GAT und DCT zusammen.

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
GAT IOD	97	1	45,5	15,7	7,0
DCT IOD	94	7,7	56	18,5	8,4
DCT OPA	94	0,3	7	1,8	1,3

Tabelle 7a: IOD-Werte am ersten postoperativen Tag gemessen mit dem GAT und dem DCT in mmHg.

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
GAT IOD	94	5	45,5	15,9	6,9
DCT IOD	94	7,7	56	18,5	8,4
DCT OPA	94	0,3	7	1,8	1,3

Tabelle 7b: IOD-Werte am ersten postoperativen Tag gemessen mit dem GAT und dem DCT in mmHg.

Mit dem DCT gemessen, stieg der Druck am ersten postoperativen Tag im Schnitt um 1,2 mmHg auf insgesamt  $18,5 \pm 8,4$  mmHg an. Mit dem GAT betrug der IOD am ersten postoperativen Tag im Mittel  $15,7 \pm 7,0$  mmHg (Tabelle 7a).

Eine Differenzierung zwischen den einzelnen Endotamponaden diente zur Überprüfung ob manche Endotamponaden einen stärkeren Einfluss auf den IOD hatten als andere. Dazu wurde die Differenz der Mittelwerte gebildet (IOD präoperativ minus IOD postoperativ). Der p-Wert resultiert aus dem t-Test für verbundene Stichproben und gibt die statistische Relevanz der postoperativen IOD Veränderung an. Die Messung mit dem DCT zeigte bei Augen, die mit Gas versorgt

wurden, einen signifikanten postoperativen Druckanstieg im Mittel um 2,5 mmHg ( $p=0,035$ ). Der stärkste mittlere Druckanstieg innerhalb der ersten 24 Stunden wurde bei Augen beobachtet, die SF6 als Endotamponade erhielten. Hier wurde am ersten postoperativen Tag mit dem DCT ein Druckanstieg um 3,6 mmHg gemessen.

Mit beiden Tonometern konnten am ersten postoperativen Tag IOD-Spitzen erfasst werden. Der höchste mit dem GAT gemessene IOD lag bei 45,5 mmHg (Mittel aus Messung in  $0^\circ$  und  $90^\circ$ ), mit dem DCT wurde maximal 56 mmHg gemessen (Delta: 10,5 mmHg).

Unmittelbar vor der geplanten IOD Kontrolle fiel bei 4 Patienten auf, dass sie sich entgegen der ärztlichen Empfehlung einer direkten Sonnenexposition ausgesetzt hatten. Aus den Wetterdaten konnte entnommen werden, dass an diesen Tagen die Außentemperatur bei über 20 Grad Celsius lag. Abbildung 20 zeigt, dass postoperativ alle vier Patienten einen erhöhten IOD von  $>25$  mmHg aufwiesen (gemessen mit dem DCT). Das GAT maß nur bei einem der vier Patienten einen IOD von  $>25$  mmHg. Abbildung 20 zeigt, dass die IOD-Werte der vier Patienten über dem Mittel (18,5 mmHg gemessen mit dem DCT) lagen

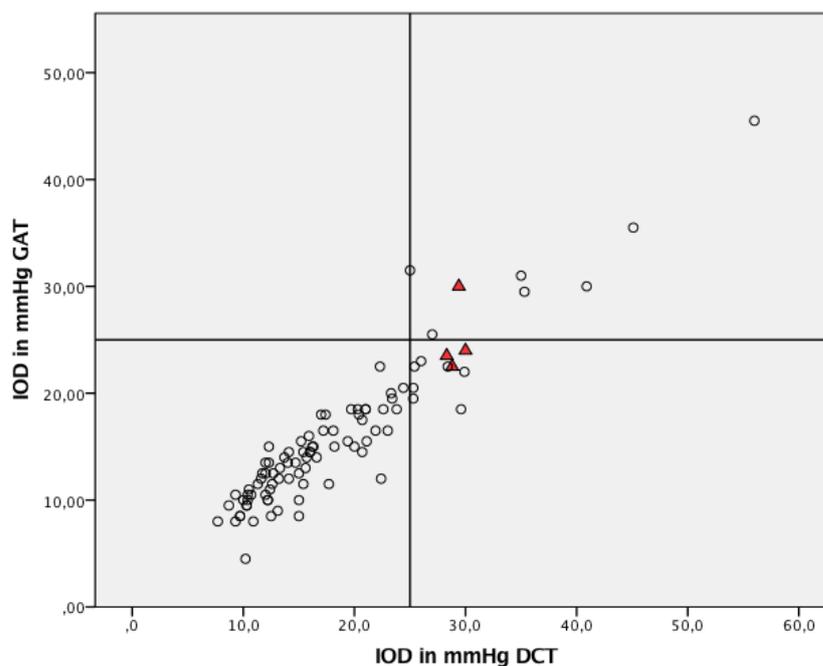


Abbildung 20: Gegenüberstellung der vier IOD-Anstiege nach Sonnenexposition (Dreieck). Die beiden Linien sind jeweils bei 25 mmHg gezogen (Bezugslinie zur X-Achse entspricht DCT; zur Y-Achse GAT). Alle vier Punkte liegen rechts der 25 mmHg (DCT) Linie. Drei von den vier Patienten wurden mit dem GAT als  $< 25$  mmHg gemessen. Die Kreise entsprechen den restlichen IOD-Werten.

	N	Differenz der Mittelwerte	95% Konfidenzintervall der Differenz		p-Wert
			Obere	Untere	
Gesamt	94	1,2	2,8	-0,4	0,15
Gas (Gesamt)	58	2,5	4,8	1,8	0,04
Gas (SF6)	22	3,6	8,4	-1,1	0,13
Gas (Gemisch)	36	1,6	3,9	-0,8	0,18
Silikonöl	9	3,6	8,1	-1,0	0,11
Silikonöl Ex.	20	0,1	3,7	-3,6	0,97

Tabelle 8: postoperativer Tensioanstieg (in mmHg) zwischen der präoperativen und der postoperativen Messung am Tag nach der OP, gemessen mit dem DCT (IOD postoperativ – IOD präoperativ).

Augen, die Silikonöl als Endotamponade erhielten, wiesen sogar einen mittleren Tensioanstieg von 3,6 mmHg auf (gemessen mit dem DCT). Bei Silikonölexplantationen gab es kaum Druckveränderungen postoperativ (+0,1 mmHg). Bei gasgefüllten Augen stieg der IOD signifikant (gemessen mit dem DCT) um im Mittel 2,5 mmHg an ( $p=0,04$ ) (Tabelle 8).

Auch am Tag nach Vitrektomie wurde bei 93 Patienten wieder eine Vorderabschnitt-OCT durchgeführt. Die mittlere CCT lag bei  $601 \pm 62 \mu\text{m}$  (Spanne 468 – 929  $\mu\text{m}$ ). Die CCT hatte im Mittel um 47  $\mu\text{m}$  ( $p<0,001$ ) zugenommen.

### 3.7 Intertonometerdifferenz präoperativ

Zentraler Teil dieser Arbeit ist der Vergleich der Druckmessung zwischen GAT und DCT. Zu den prä- und postoperativen Druckmessungen wurden beide Geräte nacheinander eingesetzt und die Differenz ermittelt (IOD DCT minus IOD GAT).

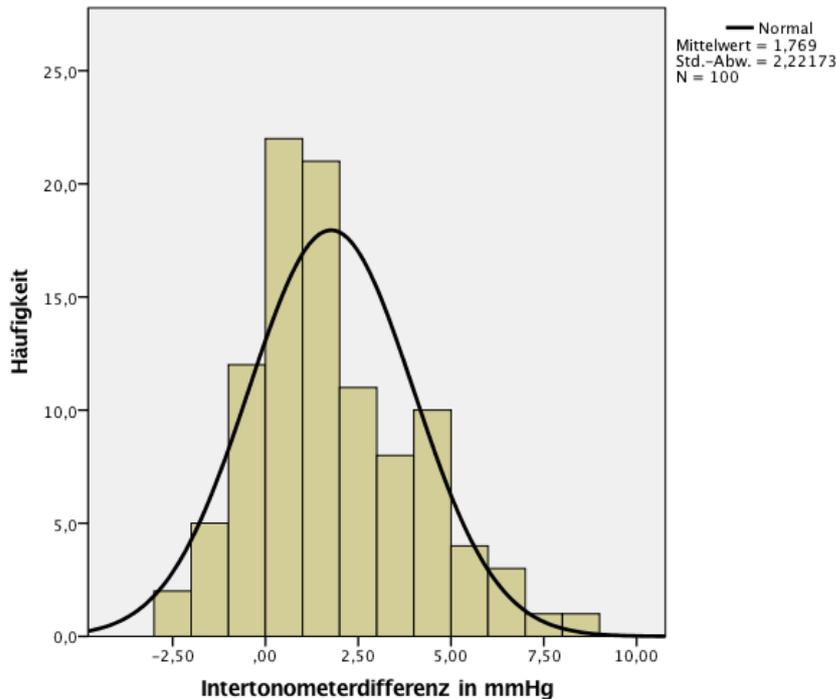


Abbildung 21: Intertonometerdifferenz zwischen DCT und GAT (IOD DCT minus IOD GAT in mmHg) präoperativ

Insgesamt maß das DCT den Druck präoperativ 1,8 mmHg höher als das GAT (Abbildung 21). Tabelle 9 fasst die Häufigkeitsverteilung der Intertonometerdifferenz zusammen. Während bei 62% die Intertonometerdifferenz unter 2,0 mmHg lag, hat das GAT in 5% den IOD über 6,0 mmHg niedriger gemessen.

Ähnlich wie bei den absoluten Druckwerten zeigen sich auch bei der Intertonometerdifferenz Unterschiede, wenn man das Patientenkollektiv in vor- und nicht vorvitrektomierte Augen unterteilt. Bei den 57 Patienten, die noch nicht vorvitrektomiert waren, maß das DCT im Schnitt 1,4 mmHg höher als das GAT. Die Intertonometerdifferenz bei vorvitrektomierten Augen lag bei im Schnitt 2,25 mmHg. Patienten, die zur Silikonölexplantation aufgenommen wurden, zeigten präoperativ die höchste Intertonometerdifferenz. Bei den 27 silikonölgefüllten Augen hat das DCT im Schnitt einen 2,8 mmHg höheren IOD gemessen als das GAT.

Bereich	N	In %
$\Delta\text{IOD} < 2,0$	62	62
$2,0 \leq \Delta\text{IOD} < 4,0$	19	19
$4,0 \leq \Delta\text{IOD} < 6,0$	14	14
$6,0 \leq \Delta\text{IOD}$	5	5

Tabelle 9: Häufigkeitsverteilung der Intertonometerdifferenz  $\Delta\text{IOD}$  zwischen DCT und GAT (IOD DCT minus IOD GAT in mmHg) von  $\Delta\text{IOD}$  kleiner 2 mmHg bis  $\Delta\text{IOD}$  größer 6,0 mmHg präoperativ.

### 3.8 Intertonometerdifferenz postoperativ

Am Tag der Operation konnte bei 62 Augen das DCT erfolgreich mit dem GAT verglichen und eine Intertonometerdifferenz ermittelt werden. 14 Augen, bei denen eine GAT-Messung aber keine erfolgreiche DCT-Messung durchgeführt werden konnte, waren deutlich hypoton. Dies entsprach ebenfalls der palpatorischen Einschätzung. Bei den 62 Patienten unterschätzte das GAT den IOD noch im Schnitt um 1,8 mmHg. Sechs Patienten wiesen nach DCT-Messung einen erhöhten IOD von mehr als 25 mmHg auf. Zwei Patienten hatten sogar einen IOD von über 30 mmHg. Die OPA lag bei diesen Patienten im Mittel bei 3,1 mmHg (Spanne 2 – 5,5 mmHg). Diese 6 hypertensiven Augen unterschätzte das GAT im Mittel um 4,0 mmHg. Bei zwei Patienten hat das GAT den IOD sogar um mehr als 8 mmHg unterschätzt.

Der Unterschied zwischen den beiden Tonometern vergrößerte sich postoperativ. Am Folgetag wurden 94 Patienten vergleichend mit dem DCT und GAT gemessen. Bei 6 Patienten gelang eine Messung mit dem DCT nicht. Mit dem GAT wurden bei diesen sechs Patienten hypotone IOD-Werte ( $<5,0$  mmHg) gemessen. Während das GAT im Mittel präoperativ noch 1,8 mmHg unter den Werten des DCT lag, maß das GAT am ersten postoperativen Tag im Mittel 2,5 mmHg niedriger als das DCT ( $p < 0,001$ ) (Abbildung 22). Bei 12,7% der gemessenen Augen unterschätzte das GAT den IOD um mindestens 6 mmHg (Tabelle 11). Bei Gas-Endotamponaden maß das GAT im Schnitt 2,9 mmHg niedriger als das DCT ( $p < 0,001$ ). Auch die absolute Zunahme der Intertonometerdifferenz, also um wie viel niedriger das GAT nach Vitrektomie den IOD gemessen hat, war signifikant ( $+0,9$  mmHg,  $p = 0,02$ ). Bei Augen mit Gas-Endotamponade war die Zunahme der Intertonometerdifferenz noch deutlicher ( $+1,3$  mmHg,  $p < 0,01$ ) (Tabelle 12). Neun Augen erhielten eine Ölfüllung. Hier wurde der geringste Unterschied zwischen GAT und DCT gemessen. Das GAT hat den Druck im Mittel 1,2 mmHg niedriger gemessen. 28 Patienten erhielten nur Luft oder BSS als Endotamponade. Hier unterschätzte das GAT den IOD im Mittel um 2,1 mmHg. Die Häufigkeitsverteilung in Tabelle 10 zeigt, dass insgesamt bei 12 Patienten das GAT den IOD mehr als 6,0 mmHg niedriger gemessen hat. Das sind doppelt so viele Patienten wie präoperativ.

Bereich	N	In %
$\Delta IOD < 2,0$	48	51,1
$2,0 \leq \Delta IOD < 4,0$	19	20,2
$4,0 \leq \Delta IOD < 6,0$	15	16,0
$6,0 \leq \Delta IOD$	12	12,7

Tabelle 10: Häufigkeitsverteilung der Intertonometerdifferenz  $\Delta IOD$  zwischen DCT und GAT (IOD DCT minus IOD GAT in mmHg) von  $\Delta IOD$  kleiner 2 mmHg bis  $\Delta IOD$  größer 6,0 mmHg am 1. Tag post-operativ.

	N	Differenz der 95% Konfidenzintervall der Differenz			p-Wert
		Mittelwerte	Untere	Obere	
Gesamt	94	2,5	1,8	3,1	<0,001
Gas	58	2,9	2,1	3,7	<0,001
Silikonöl	9	1,2	-2,1	4,4	0,43

Tabelle 11: postoperative Intertonometerdifferenz zwischen DCT und GAT (in mmHg).

	N	Differenz der 95% Konfidenzintervall der Differenz			p-Wert
		Mittelwerte	Untere	Obere	
Gesamt	94	0,9	0,2	1,6	0,02
Gas	58	1,3	0,4	2,1	<0,001
Keine Silikonölex-plantation	74	1,2	0,5	1,9	0,02

Tabelle 12: Zunahme der Intertonometerdifferenz am Tag nach Vitrektomie.

	$\Delta IOD$ präoperativ			$\Delta IOD$ postoperativ		
	N	MW; SD	p-Wert	N	MW; SD	p-Wert
Gesamt	100	1,8; $\pm 2,2$	<0,001	94	2,5; $\pm 3,1$	<0,001
Gas	60	1,8; $\pm 2,3$	<0,001	58	2,9; $\pm 3,0$	<0,001
Silikonölex-plantation	25	2,8; $\pm 2,2$	<0,001	20	2,3; $\pm 3,8$	0,015

Tabelle 13: Gegenüberstellung der Intertonometerdifferenz zwischen DCT und GAT (in mmHg) präoperativ und 1.Tag postoperativ.

Der Unterschied zwischen GAT und DCT lag präoperativ noch bei 1,8 mmHg. Bei Augen, die präoperativ noch mit Silikonöl gefüllt waren, maß das GAT den IOD 2,8 mmHg niedriger ( $p < 0,001$ ). Der Unterschied zwischen GAT und DCT war insbesondere bei gasgefüllten Augen postoperativ am größten (2,9 mmHg;  $p < 0,001$ ) (Tabelle 13).

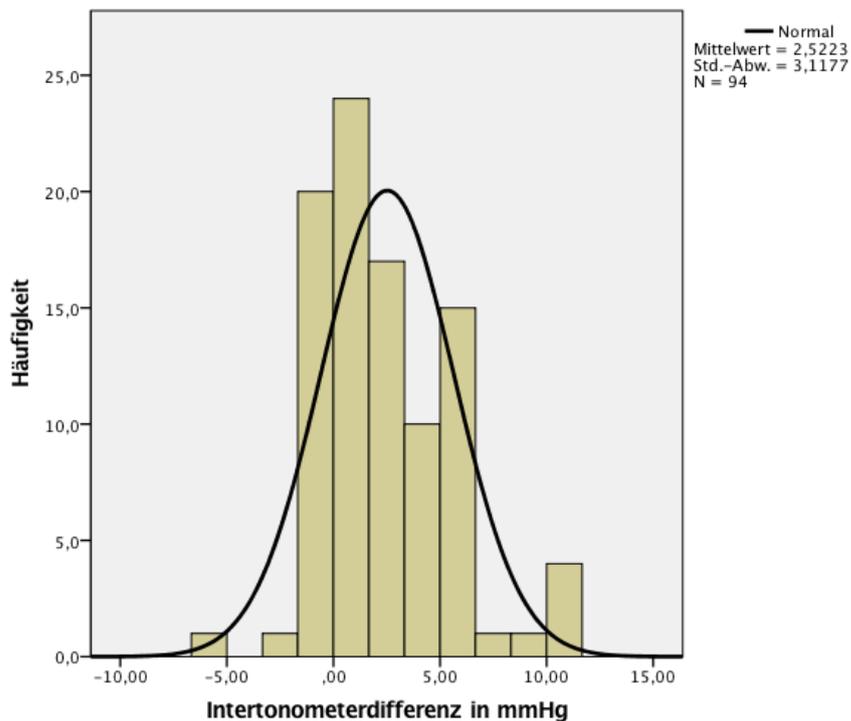


Abbildung 22: Gauß'sche Verteilungskurve: Intertonometerdifferenz zwischen DCT und GAT (IOD DCT minus IOD GAT in mmHg) postoperativ am Tag nach der OP.

Insgesamt gab es eine positive Korrelation zwischen dem postoperativen IOD und der Intertonometerdifferenz (Abbildung 23). Das bedeutet, je höher der absolute IOD postoperativ war, desto größer war die Differenz zwischen den beiden Tonometern. Bei Augen die postoperativ mit dem DCT gemessen, einen IOD von über 20 mmHg aufwiesen, maß das GAT im Schnitt um 4,7 mmHg niedriger. Sowohl mit dem DCT als auch mit dem GAT konnten einige Augen mit einem kritisch hypertensiven IOD von  $\geq 25$  mmHg erfasst werden. Das DCT maß bei 18 Augen (19,1%) postoperativ einen Wert von  $\geq 25$  mmHg. Da das GAT besonders bei höheren IOD-Werten zunehmend niedrigere Werte als das DCT maß, wurden nur 10 Augen mit einem IOD von  $\geq 25$  mmHg postoperativ erfasst. Im Extremfall betrug die Intertonometerdifferenz 12 mmHg, d.h. bei Augen mit Gas-Endotamponade wurde im Einzelfall der IOD mit dem GAT um 12 mmHg gegenüber dem DCT unterschätzt. Im Einzelfall lag der IOD postoperativ absolut bei 56 mmHg (DCT), was unbehandelt zur Erblindung führen kann.

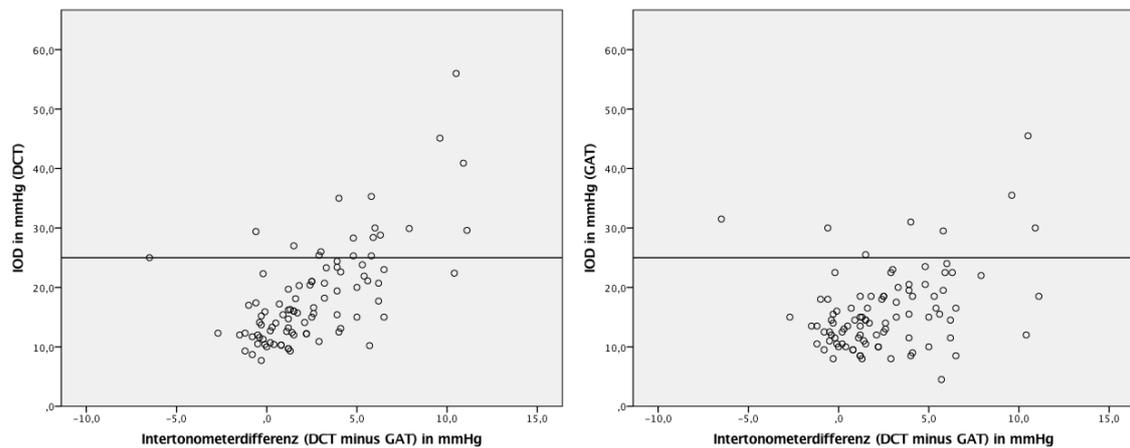


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen dem postoperativen IOD und der Intertonometerdifferenz (in mmHg). Die Linie wurde bei 25 mmHg gezogen. Die Punkte auf oder über der Linie stehen für die Augen die postoperativ durch das DCT (links; 18 von 94) oder GAT (rechts; 10 von 94) als hypertensiv erfasst wurden.

Zur grafischen Gegenüberstellung der mit beiden Tonometern gemessenen IOD-Werten dient unten aufgeführtes Bland-Altman-Diagramm (Abbildung 24). Darin ist zu erkennen, dass die Schwankungsbreite der Abweichungen der Tonometer erheblich ist und das GAT tendenziell niedrigere IOD-Werte gemessen hat. Eine lineare Regressionsanalyse ergibt, dass die Intertonometerdifferenz abhängig von dem mittleren IOD ist ( $p < 0,001$ ).

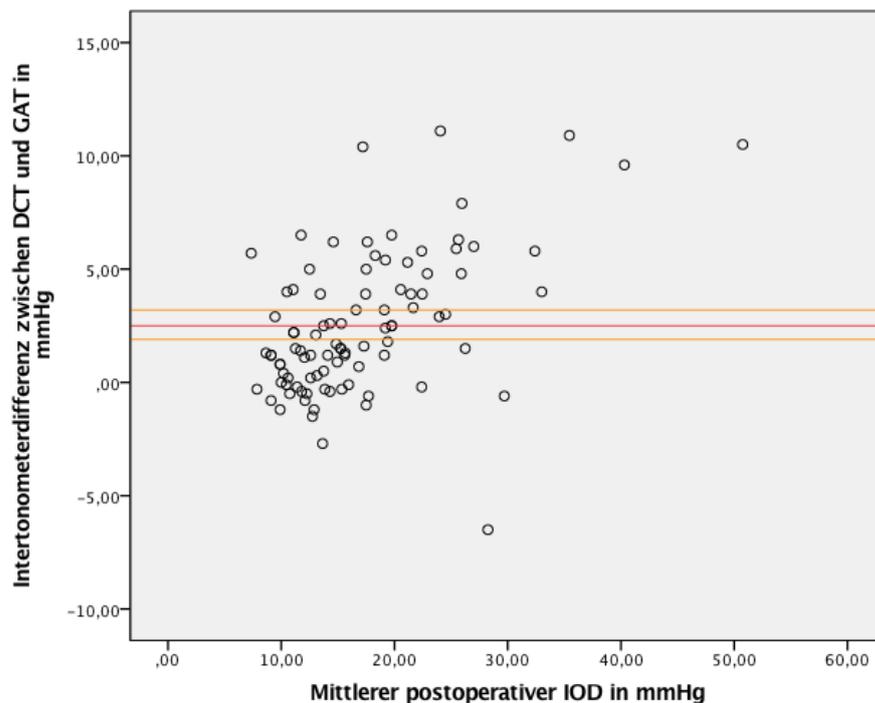


Abbildung 24: Bland-Altman-Diagramm. Die rote Linie markiert die mittlere Differenz der IOD-Werte zwischen dem DCT und GAT (2,5 mmHg) und die beiden orangenen Linien begrenzen das 95% Konfidenzintervall.

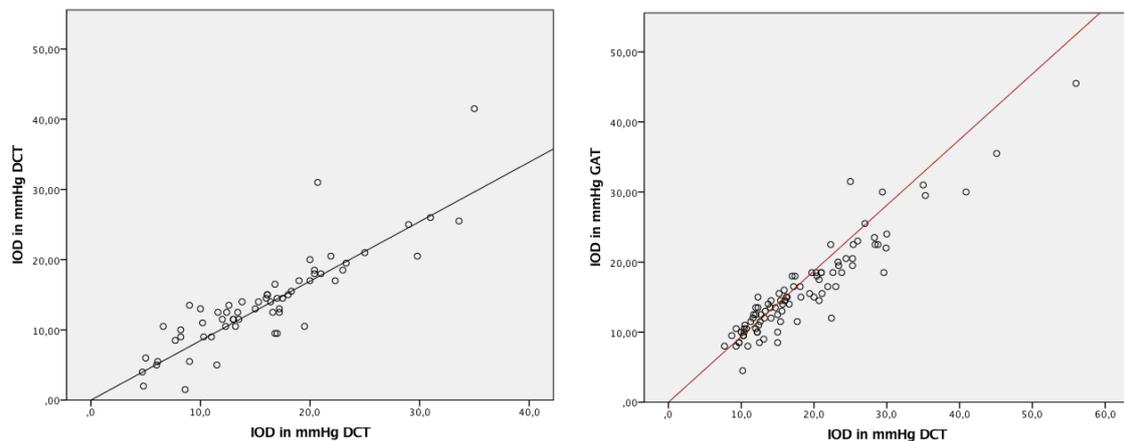


Abbildung 25: Streudiagramm mit der IOD-Messungen am ersten postoperativen Tag (links) und am Folgetag (rechts). Die eingezeichnete Regressionsgerade zeigt den Zusammenhang zwischen den beiden Tonometern.

Die beiden Streudiagramme (Abbildung 25) zeigen die Abhängigkeit der beiden Tonometer zueinander. Die Regressionsgerade steht dabei für den Korrelationskoeffizienten nach Pearson welcher am ersten postoperativen Tag bei  $KOR = 0,87$  und am Folgetag bei  $KOR = 0,94$  lag.

### 3.9 Zentrale Hornhautdicke und Intertonometerdifferenz

Wie in den vorangegangenen Abschnitten ausgeführt, konnte bei den operierten Augen eine postoperative Zunahme der zentralen Hornhautdicke (CCT) um im Mittel 46 Mikrometer auf 600  $\mu\text{m}$  beobachtet werden ( $p < 0,001$ ). Vereinzelt kam es auf zu ausgeprägten postoperativen Hornhautödemen mit einer CCT von bis zu 928  $\mu\text{m}$ . Ob die CCT an sich oder die Zunahme dieser einen Einfluss auf die Intertonometerdifferenz hat, kann durch die Korrelationsbestimmung der Variablen gezeigt werden. Dabei ergab sich für  $KOR$  (CCT Zunahme, Intertonometerdifferenz) = 0,042;  $p = 0,696$  und  $KOR$  (CCT postoperativ, Intertonometerdifferenz) = -0,047;  $p = 0,657$  (Abbildung 26). Es zeigt sich also keine signifikante Korrelation zwischen der absoluten Hornhautdicke und der Differenz der IOD-Werte zwischen DCT und GAT. Auch konnte keine signifikante Korrelation zwischen der CCT-Zunahme, als Maß für ein postoperatives Hornhautödem, und einer möglichen IOD-Unterschätzung seitens des GAT nachgewiesen werden.

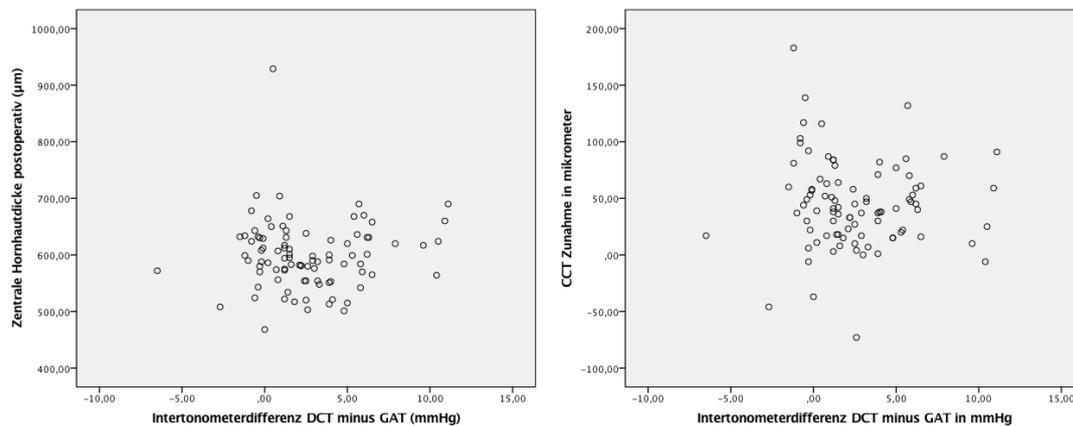


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen der CCT (links) / CCT-Zunahme (rechts) und der Interonometerdifferenz

### 3.10 Ambulante Wiedervorstellung

Von anfangs 100 eingeschlossenen Patienten und operierten Augen konnten 71 postoperativ in der ambulanten Netzhautsprechstunde nachuntersucht werden. Der Wiedervorstellungstermin lag dabei im Mittel 7 Wochen nach der OP. Durchgeführt wurden, wie im Methodik-Teil beschrieben, die gleichen Untersuchungen wie bei Aufnahme der Patienten mit anschließender vergleichender IOD-Bestimmung zuerst mit dem GAT und dann dem DCT.

Dadurch konnten Langzeitauswirkungen der Vitrektomie auf die intraokulare Druckentwicklung, die Interonometerdifferenz und die Hornhautgeometrie gezeigt werden. Folgende Tabelle 14 fasst die biometrischen Daten der Hornhaut zusammen und vergleicht diese mit den Aufnahmebefunden präoperativ.

	N	Präoperativ	Bei ambulanter Vor- stellung	Zu- / Abnahme der Mit- telwerte	In %
CCT (in µm)	70	557	547	-10	-1,8
Ks (in D)	70	44,4	44,5	0,1	+0,2
Kf (in D)	70	43,0	42,8	-0,1	-0,3

Tabelle 14: Veränderungen der Hornhautpachymetrie nach im Schnitt 7 Wochen postoperativ nach vitreoretinalem Eingriff. Ks = Hornhautkrümmung in Dioptrien auf dem steilen Meridian. Kf = Hornhautkrümmung in Dioptrien auf dem flachen Meridian.

Sowohl die Hornhautdicke als auch die Keratometriewerte erreichten bei der ambulanten Wiedervorstellung der Patienten fast ihre Ausgangswerte von der präoperativen Untersuchung.

Folgende Tabelle 15 zeigt den gemessenen IOD bei ambulanter Wiedervorstellung der Patienten und die Differenz zu den Ausgangswerten bei Aufnahme. Gemessen wurde mit dem DCT und dem GAT.

	N	Präoperativ	Bei ambulanter Vorstellung	Zu- / Abnahme der Mittelwerte
IOD GAT (in mmHg)	71	15,8	16,3	+0,5
IOD DCT (in mmHg)	71	17,9	18,3	+0,4
OPA (in mmHg)	71	2,6	2,5	-0,05

Tabelle 15: GAT, DCT im Vergleich. Präoperativ gegen postoperativ bei der ambulanten Wiedervorstellung.

In der Gesamtheit hat sich der IOD bei ambulanter Wiedervorstellung nach ca. sieben Wochen, sowohl gemessen mit dem DCT als auch dem GAT, nur gering verändert gegenüber den präoperativen Ausgangswerten. Bei 6 von 71 der Patienten (8,5%) lag ein IOD von  $\geq 25$  mmHg vor. Auch die Interonometerdifferenz zeigt ähnliche Werte zwischen prä- und postoperativer Messung. Bei 70 Patienten konnte das DCT vergleichend gegen das GAT eingesetzt werden um die Interonometerdifferenz zu berechnen. Es zeigte sich, dass das GAT im Schnitt 1,9 mmHg niedriger gemessen hat als das DCT (Abbildung 27). Präoperativ lag die Differenz zwischen den beiden Tonometern bei 1,8 mmHg. Insgesamt hat das GAT den IOD bei 6 Patienten (8,5%) immer noch um mehr als 6 mmHg niedriger als das DCT gemessen (Tabelle 16)

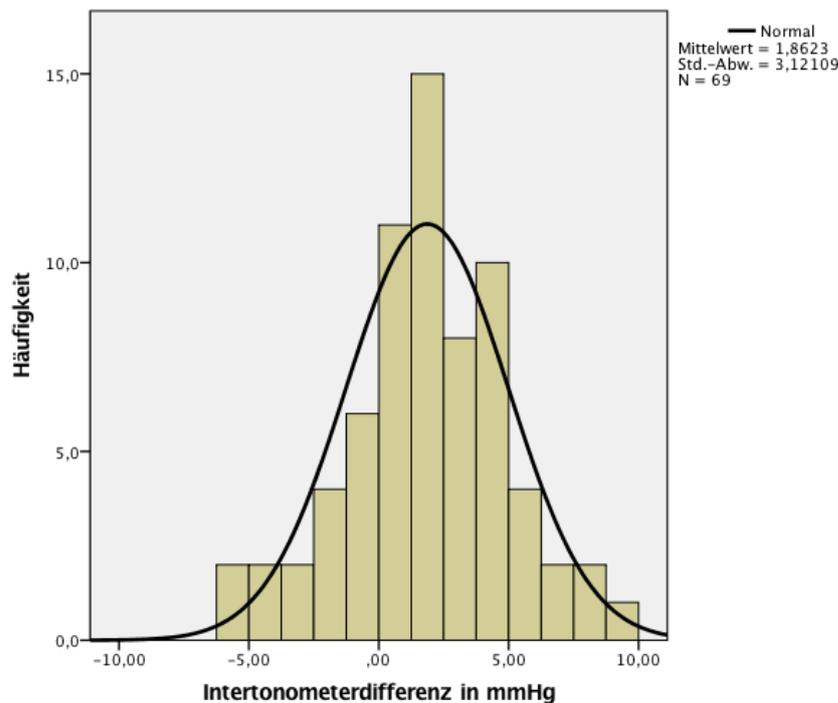


Abbildung 27: Gauß'sche Verteilungskurve: Interonometerdifferenz zwischen dem DCT und GAT (IOD DCT minus IOD GAT in mmHg) bei der ambulanten Wiedervorstellung.

Bereich	n=	in %
$\Delta\text{IOD} < 2,0$	32	45,1
$2,0 \leq \Delta\text{IOD} < 4,0$	21	29,6
$4,0 \leq \Delta\text{IOD} < 6,0$	12	17,0
$6,0 \leq \Delta\text{IOD}$	6	8,5

Tabelle 16: Häufigkeitsverteilung der Intertonometerdifferenz  $\Delta\text{IOD}$  zwischen DCT und GAT (IOD DCT minus IOD GAT in mmHg) von  $\Delta\text{IOD}$  kleiner 2 mmHg bis  $\Delta\text{IOD}$  größer 6,0 mmHg bei der ambulanten Wiedervorstellung.

Unterteilt man das Patientenkollektiv in einzelne Subgruppen, fallen Unterschiede auf (Tabelle 17). Von den 27 Augen, die zur geplanten Silikonölexplantation erschienen, konnten 17 Patienten bei der Wiedervorstellung erneut gemessen werden. Anstatt Silikonöl hatten diese Augen postoperativ Gas (7) oder BSS / Luft (10) als Endotamponade erhalten. Mit dem GAT gemessen, fiel der Druck von präoperativ im Schnitt 17,2 mmHg auf 15,4 mmHg. Beim DCT sank der mittlere IOD von 21,1 mmHg präoperativ auf 16,9 mmHg bei ambulanter Wiedervorstellung. Eine Änderung zeigt sich auch bei der Intertonometerdifferenz. Während bei den 27 ölgefüllten Augen das GAT noch 2,9 mmHg niedriger maß, so lag der IOD (GAT) bei Wiedervorstellung nur noch 1,5 mmHg unter dem DCT.

Acht Augen, die mit einer Silikonöl-Endotamponade versorgt wurden, konnten auch beim Wiedervorstellungstermin in der Ambulanz erfasst werden. Mit dem GAT wurde bei diesen Augen vor OP ein Druck von im Mittel 16,9 mmHg gemessen und bei Wiedervorstellung mit silikongefülltem Auge ein IOD von 18,3 mmHg. Mit dem DCT wurde ein Druckanstieg von 17,5 mmHg auf 20,0 mmHg gemessen. Die Intertonometerdifferenz stieg auch an. Während das GAT den Druck präoperativ um 0,6 mmHg unterschätzte, so maß das GAT nach Silikonölfüllung bei ambulanter Wiedervorstellung den IOD 1,71 mmHg niedriger. Die Intertonometerdifferenz hatte sich durch die Silikonölexplanation halbiert ( $p=0,015$ ) und bei Augen, die Silikonöl als Endotamponade erhielten, postoperativ erhöht ( $p=0,426$ ).

Der Großteil der Patienten (62%) erhielt Gas-Endotamponaden. Zunächst werden alle Formen der Gas-Endotamponade betrachtet. Nicht einbezogen werden initial silikonölgefüllte Augen, da diese im oberen Abschnitt separat betrachtet werden und dies zu Verfälschungen führen kann, da sich diese Augen bereits präoperativ deutlich hypertoner präsentierten. 40 Augen, die mit einer Gas-Endotamponade versorgt wurden, konnten bei der ambulanten Wiedervorstellung erfasst werden. Mit dem GAT gemessen, lag der IOD bei Wiedervorstellung 1,3 mmHg höher, bei im Mittel 16,2 mmHg. Mit dem DCT wurde bei ambulanter Wiedervorstellung im Schnitt 18,7 mmHg gemessen, was 1,6 mmHg mehr war als präoperativ. Die Differenz zwischen den beiden Tonometern ist leicht angestiegen von präoperativ 1,9 mmHg auf 2,3 mmHg ( $p=0,085$ ). Das GAT hat den Druck im Schnitt 2,3 mmHg niedriger gemessen als das DCT.

25 Augen, die ein Gasgemisch (C3F8 und SF6) erhielten, lagen postoperativ 2,4 mmHg höher bei insgesamt 16,7 mmHg (GAT). Mit dem DCT wurden bei ambulanter Wiedervorstellung 19,1 mmHg gemessen und somit 2,3 mmHg höher als präoperativ ( $p=0,035$ ). Die Intertonometerdifferenz ist um lediglich 0,1 mmHg gestiegen.

Bei den 15 Patienten mit SF6-Endotamponade wurde mit dem GAT ein IOD von 15,3 mmHg gemessen. Das ist ein Druckabfall um 0,7 mmHg gegenüber dem präoperativen Ausgangswert. Mit dem DCT lag der Druck im Mittel bei 18,1 mmHg, was 0,4 mmHg höher ist als der mittlere präoperative IOD. Dementsprechend ist die Intertonometerdifferenz um 1,1 mmHg auf 2,8 mmHg gestiegen. Das GAT hat also den Druck postoperativ 2,8 mmHg niedriger gemessen. Schnell expansive Gase scheinen auch noch in postoperativen Nachkontrollen einen Einfluss auf die Intertonometerdifferenz zu haben. Die folgende Tabelle 17 fasst die IOD-Entwicklung bis zur ambulanten Wiedervorstellung zusammen:

Endotamponade	N	GAT (in mmHg)	DCT (in mmHg)	Intertonometer-differenz (in mmHg)
Gesamt	70	+0,5	+0,4	-0,1
Silikonölexplantation	17	-1,7	-3,2	-1,4
Silikonöl-Endotamponade	8	+1,4	+2,6	+1,1
Gas (alle Sorten)	41	+1,3	+1,6	+0,4
Gas (SF6)	15	-0,7	+0,4	+1,1
Gas (SF6 + C3F8)	25	+2,4	+2,3	+0,01
Luft / BSS	16	-0,2	-1,3	-1,1

Tabelle 17: Druckveränderungen (in mmHg) zwischen dem präoperativen Status und der ambulanten Wiedervorstellung im Schnitt 7 Wochen nach Vitrektomie.

### 3.11 Intraoperative IOD-Messung

Unmittelbar nach Operationsende wurde noch im Operationssaal, vor Anlegen des Augenverbandes, der IOD vergleichend mit dem handgehaltenen Perkins-Tonometer und dem DCT gemessen. Verglichen wurden die gemessenen Drücke mit der palpatorischen Einschätzung des IOD durch den Operateur.

An 65 Augen kam das DCT zum Einsatz wobei bei 13 Augen unmittelbar nach Vitrektomie keine Messung möglich war. Im Mittel lag der IOD bei  $19,0 \pm 10,1$  mmHg (Spanne 4,4 – 50,0 mmHg). Die OPA lag im Durchschnitt bei  $2,0 \pm 2,2$  mmHg (Spanne 0,5 – 10,2 mmHg) (Abbildung 28).

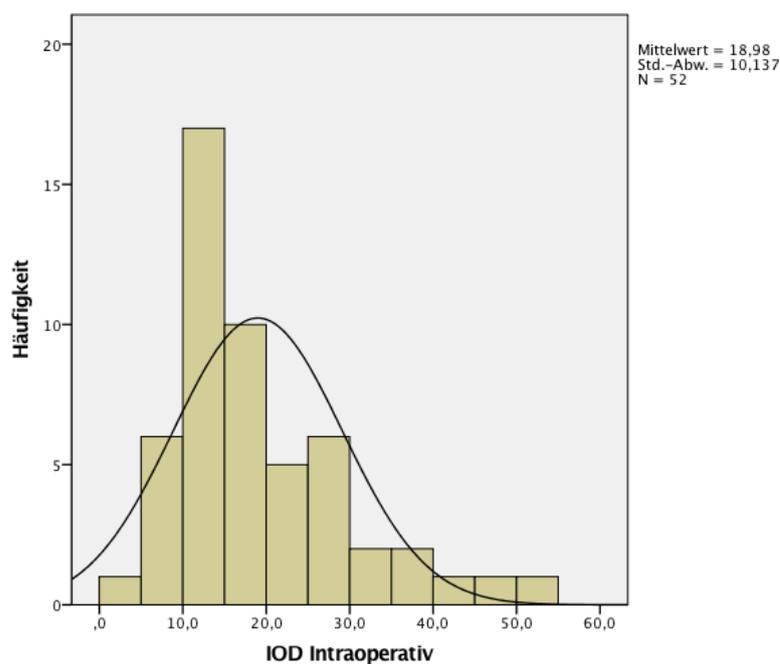


Abbildung 28: IOD-Werte gemessen mit dem DCT (in mmHg) unmittelbar nach ppV.

Bei 76 Augen erfolgte eine Messung mit dem Perkins Tonometer. Im Mittel lag der IOD bei  $10,6 \pm 8,1$  mmHg (Spanne 1 – 39 mmHg) (Abbildung 29).

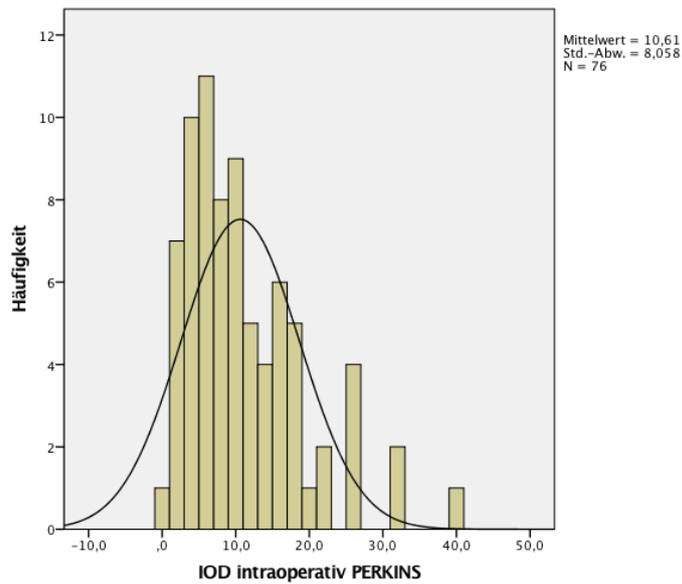


Abbildung 29: IOD-Werte gemessen mit dem Perkins (in mmHg) unmittelbar nach ppV.

Palpatorisch schätzte der Operateur den IOD bei 59 Patienten. Dabei wurde der Druck im Mittel auf  $13,5 \pm 6,5$  mmHg (Spanne 2 – 40 mmHg) geschätzt (Abbildung 30).

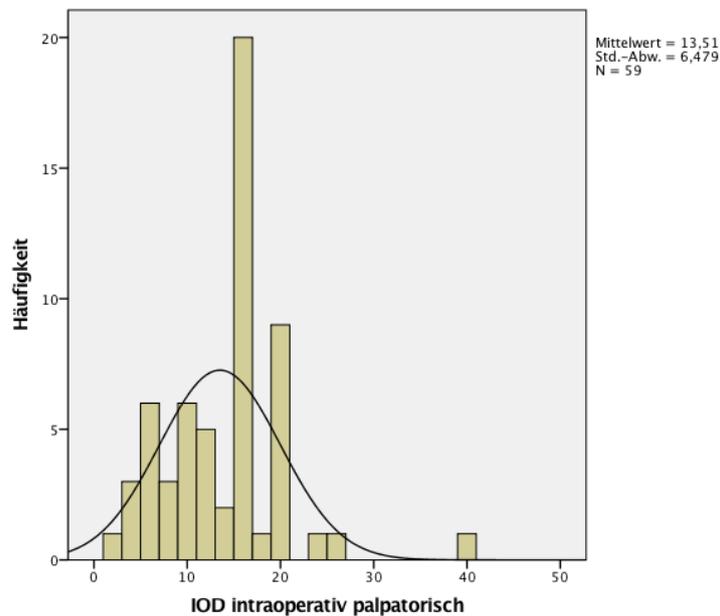


Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der intraoperativen IOD-Werte palpatorisch abgeschätzt (in mmHg).

Es wurde die Interonometerdifferenz zwischen den beiden Tonometern errechnet und mit dem palpatorisch abgeschätzten IOD verglichen (Tabelle 18).

	N	Mittelwert; $\pm$ SD	Minimum	Maximum	p-Wert
DCT minus Perkins	52	7,0; $\pm$ 6,6	-7,0	27,0	<0,001
DCT minus palpatorischem IOD	35	2,3, $\pm$ 5,8	-7,0	19,0	0,025

Tabelle 18: Interonometerdifferenz unmittelbar nach der OP im Operationsaal (in mmHg).

Es fallen erhebliche Interonometerdifferenzen auf. Das Perkins unterschätzte den IOD im Schnitt um 7 mmHg. Verließ der Operateur sich hingegen auf seine palpatorische Einschätzung des IOD unmittelbar nach der OP, so lag er im Schnitt 2,3 mmHg unter dem, mit dem DCT gemessenen IOD.

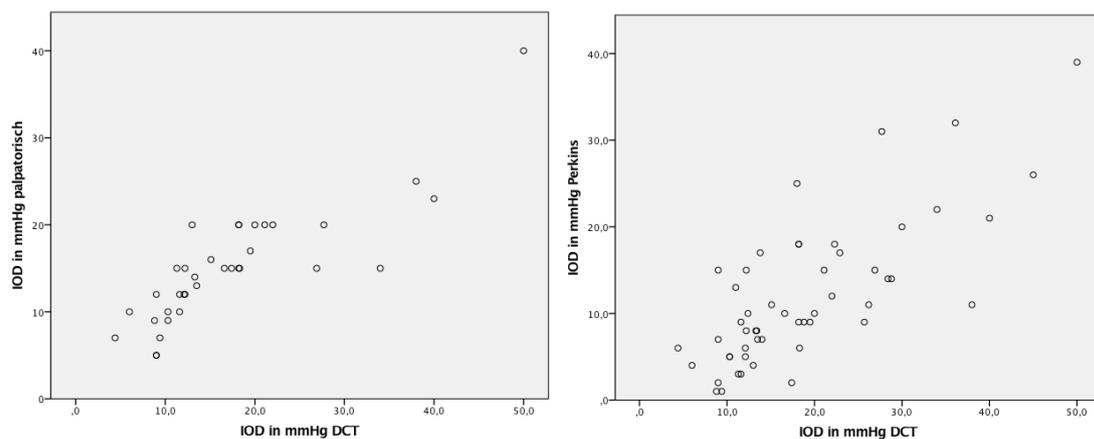


Abbildung 31: Gegenüberstellung der palpatorisch geschätzten IOD-Werte (links) und der mit dem Perkins gemessenen IOD-Werte (rechts) mit den IOD-Werten gemessen mit dem DCT.

In Abbildung 31 kann man erkennen, dass die mit dem DCT gemessenen IOD-Werte stärker mit den palpatorisch abgeschätzten IOD-Werten korrelieren (KOR = 0,85;  $p < 0,001$ ) als die mit dem Perkins-Tonometer ermittelten IOD-Werte (KOR = 0,76;  $p < 0,001$ ).

## 4 Diskussion

In der ophthalmologischen Fachliteratur findet sich eine Vielzahl von Arbeiten, die sich in Zeiten der modernen Netzhautchirurgie seit Einführung der ppV mit deren Einfluss auf den IOD auseinandersetzen. Dem Untersucher stehen dabei unterschiedliche Methoden zur IOD-Bestimmung zur Verfügung. In diversen Arbeiten wurde die Goldmann-Applanationstonometrie mit der dynamischen Konturtonometrie in verschiedenen Szenarien verglichen. Die vorliegende Arbeit vereint beide Ansätze und ordnet die Ergebnisse in den aktuellen Stand der Forschung ein.

### 4.1 IOD-Entwicklung im Rahmen der durchgeführten ppV

Über die Problematik des postoperativen Druckanstiegs nach ppV wird seit Beginn der modernen Netzhautchirurgie in mehreren Studien berichtet.

Erste Studien von Weinberg et al. konnten zeigen, dass bei 28% der Augen nach ppV ein postoperativer Druckanstieg von mehr als 10 mmHg beobachtet werden konnte [101]. Folgeuntersuchungen von Han et al. konnten moderate Druckanstiege von mindestens 5 mmHg bei 61% nachweisen, berichten aber auch von einzelnen Druckanstiegen um 22 mmHg. Bei 35,6% der Patienten lag ein absoluter Augendruck von 30 mmHg oder höher vor [30]. Neuere Studien wie die von Anderson et al. konnten zeigen, dass in den ersten 5–12 Stunden 8,4% der Patienten und am ersten Tag nach Vitrektomie 14,8% einen IOD von über 29 mmHg aufwiesen [2].

In unserer Studie konnten wir mit dem DCT einen moderaten Druckanstieg am ersten Tag nach ppV von ca. 1,2 mmHg (+6,9%) nachweisen. Jedoch zeigte sich bei der Verwendung von Gas-Endotamponaden ein höherer Druckanstieg um im Mittel 2,5 mmHg (+14,3%). Im Einzelfall beobachteten wir eine Druckspitze von 56 mmHg (DCT). 18 Patienten (19,1%) wiesen einen postoperativen IOD von  $\geq 25$  mmHg auf.

Der Mechanismus hinter dem IOD-Anstiegen kann vielfältig sein. Hauptfaktoren sind dabei die Gasexpansion, eine Trabekulitis und Druckanstiege durch Verlegung des Kammerwinkels durch Silikonöl, Erythrozyten, Fibrin in der Vorderkammer/Hinterkammer oder das Entstehen eines akuten Winkelblocks [11,30].

Die postoperative Druckentwicklung kann durch Variieren der Konzentration der eingegebenen expansiven Gase und der Eingabemenge beeinflusst werden. Auch die postoperative Gabe drucksenkender Medikation wie Acetazolamid hilft Druckspitzen abzupuffern [5,19].

Es bleiben dennoch schwer beeinflussbare Faktoren wie das individuelle Verhalten des Auges oder das Patientenverhalten in Bezug auf Lagerung und Compliance. Das wird auch durch die Einzelfallbeobachtung in der vorliegenden Arbeit deutlich. Vier Patienten hatten sich nachweislich einer direkten Sonneneinstrahlung bei Außentemperaturen von über 20 Grad ausgesetzt und haben damit vermutlich eine stärkere Expansion der Gas-Endotamponade mit Anstieg des IOD auf bis zu 30 mmHg (Mittelwert: 28,9 mmHg) provoziert.

Da 80% des vorliegenden Patientenkollektivs in den kälteren Monaten (Oktober – März) erfasst wurden und es sich bei den vier Einzelfällen eher um eine interessante Nebenerkenntnis handelt, konnte auf diese Fragestellung bei geringer Fallzahl nicht genauer eingegangen werden. Zukünftige Untersuchungen könnten herausfinden, ob saisonale Unterschiede und damit verbundene erhebliche Temperaturunterschiede zwischen Operationsaal und Station Einfluss auf die Gasexpansion und somit den IOD-Anstieg haben.

Trotz komplikationslosem OP-Verlauf und dem physiologischen Verständnis über die Mechanismen hinter IOD-Anstiegen bleibt in manchen Fällen der postoperative Visusverlust ungeklärt. Unter anderem wurden postoperative Druckspitzen vermutet [40].

Fang et al. beschrieben einen Fall, bei dem ein Aufstieg in große Höhe zu einer übermäßigen Gasexpansion mit einem Anstieg des IOD auf 54 mmHg und zu einem Zentralarterienverschluss mit irreversiblen Visusverlust führte [21].

Mills et al. konnten zeigen, dass es bei Reisen in eine Höhe von 2264 m durch die Expansion intraokularer Gase zu einem durchschnittlichen IOD Anstieg um 109% kommt [65]. Ähnliche dramatische Verläufe sind bei Patienten beschrieben, bei denen Lachgas im Rahmen der Narkose zum Einsatz kam. Lachgas (N<sub>2</sub>O) besitzt einen höheren Blut-Gas-Verteilungskoeffizienten als Stickstoff und führt durch verstärkte Diffusion in den Glaskörper zu einer übermäßigen Expansion des intraokularen Gasvolumens [98].

Hart et al. beschrieben drei Fälle, in denen die Kombination aus Lachgasnarkose und C3F8 zu irreversiblen Visusverlust geführt hatten. Vermutet wurden Zentralarterienverschlüsse in Folge von postoperativem Druckanstieg durch intraokulare Gasexpansion [31].

Alle oben aufgeführten Fallberichte haben gemeinsam, dass bereits kurzfristige postoperative IOD-Anstiege zu irreversiblen Visusverlust geführt hatten. Die vorliegende Arbeit bestätigt, dass erhebliche Druckanstiege auch heutzutage zu den postoperativen Komplikationen nach ppV gehören. Das liegt u.a. am individuellen Vorbefund und der Reaktion des Auges, an der Gasexpansion sowie am postoperativen Verhalten der Patienten. Insbesondere regelmäßige postoperative Druckmessungen am Tag der ppV und darüber hinaus sowie eine optimale postoperative Lagerung der Patienten sind dabei essentiell.

## 4.2 Intertonometerdifferenz zwischen DCT und GAT

Der vergleichende Einsatz des GAT und DCT führt zur zweiten Problematik, der sich die vorliegende Arbeit annimmt.

Mehrere Studien haben die beiden Tonometer GAT und DCT in diversen Szenarien miteinander verglichen und konnten zeigen, dass das DCT im Vergleich zum GAT eher einen höheren Augendruck misst und unter verschiedenen Bedingungen eine unabhängigere Messung durchführt [8,29,34,44,84,96].

Die vorliegende Arbeit kombiniert die oben aufgeführten Problematiken und untersucht den Zusammenhang zwischen dem Auftreten postoperativer Druckspitzen und einer möglichen Unterschätzung des IOD durch das GAT. Als Maß dafür gilt die Intertonometerdifferenz (DCT minus GAT in mmHg). Die vorliegende Arbeit unterscheidet dabei postoperativ zwischen unmittelbaren IOD Veränderungen im Rahmen des stationären Aufenthaltes und längerfristigen IOD Veränderungen bis zu 8 Wochen nach ppV.

Lag präoperativ die Intertonometerdifferenz noch bei 1,7 mmHg, so maß das GAT den IOD am ersten postoperativen Tag ca. 2,5 mmHg niedriger. Abhängig von der verwendeten Endotamponade, lag die Unterschätzung des IOD mit dem GAT bei Gas-Endotamponaden bei durchschnittlich 2,9 mmHg. Es zeigt sich ein positiver Zusammenhang zwischen dem absolut gemessenen IOD, sowohl mit dem DCT (KOR=0,66;  $p < 0,001$ ) als auch mit dem GAT (KOR=0,35;  $p = 0,01$ ) gemessen, und der Intertonometerdifferenz DCT minus GAT. D.h., dass bei höherem IOD das GAT im Vergleich zum DCT zunehmend niedriger maß. Das legt die Vermutung nahe, dass besonders bei höheren Augeninnendrücken das GAT den IOD unterschätzt. In Einzelfällen maß das GAT den IOD bis zu 12 mmHg niedriger als das DCT. Dies hatte zur Konsequenz, dass von 18 Patienten, die mit dem DCT gemessen einen IOD von  $\geq 25$  mmHg hatten, das GAT nur 10 Patienten erfasste und somit 8 Patienten womöglich eine unzureichende drucksenkende Therapie erhielten. Das führte zu einem zu niedrig gemessenen Augeninnendruck bei 9% der vitrektomierten Patienten mit Gasfüllung. Insbesondere bei Patienten mit zusätzlichen Risikofaktoren (arterielle Hypertonie, Blutdruck-Dippen) oder vorbestehendem Glaukomschaden kann eine IOD-Unterschätzung visusverschlechternde Folgen haben. Besonders in diesen Fällen ist eine engmaschige und exakte IOD-Bestimmung wichtig.

Mamas et al. haben ebenfalls das DCT vergleichend mit dem GAT nach Vitrektomie mit Eingabe verschiedener Endotamponaden eingesetzt. Es konnte eine Zunahme der Intertonometerdifferenz auf 3,1 mmHg unter der Verwendung von SF<sub>6</sub>-Gas gezeigt werden und es zeigte sich auch eine positive Korrelation mit dem absoluten IOD. In der Studie von Mamas et al. maß das DCT den IOD 3,1 mmHg niedriger. Dies wirft die Frage auf, ob das DCT nach ppV mit Verwendung von Gas-Endotamponaden und postoperativen Druckanstiegen den IOD unterschätzt [62]. Donaldson et al. konnten zeigen, dass das GAT postoperativ nach Eingabe von Endotamponaden den IOD im Schnitt 5,1 mmHg niedriger maß. Ein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Endotamponaden (Luft, Gas und Silikonöl) konnte in deren Studie nicht nachgewiesen werden [15]. In der Studie von Kovacic et al. wurde der IOD-Anstieg nach Vitrektomie mit und ohne kombinierte Katarakt-Operation verglichen und das GAT dem DCT gegenübergestellt. Präoperativ lag das DCT bei 12,0 mmHg und im Mittel 4,3 mmHg unter dem GAT (16,3 mmHg). Postoperativ fiel der IOD mit dem GAT auf 14,3 mmHg und stieg mit dem DCT auf 12,7 mmHg. Auch wenn sich die postoperative Intertonometerdifferenz verringert hat, zeigte sich nur bei dem DCT ein absoluter IOD-Anstieg. Das lässt vermuten, dass postoperative Druckanstiege eher mit dem

DCT erfasst werden. Eine signifikante IOD-Änderung in Abhängigkeit, ob zusätzlich noch eine Katarakt-OP durchgeführt wurde, konnte ebenfalls nur mit dem DCT nachgewiesen werden [55]. Vergleicht man diese Ergebnisse mit der Studie von Heichrich et al., bestätigt sich die Aussage, dass das GAT den postoperativen IOD eher niedriger misst. Die Studie wies ebenfalls einen IOD-Abfall mit dem GAT nach, während das DCT postoperativ den IOD höher maß [34]. In der vorliegenden Arbeit wird eine Intertonometerdifferenz mit Werten von  $\geq 4$  mmHg bei 28,7 % und  $\geq 6$  mmHg bei 12,7 % der Patienten gefunden. Der seltene Fall von einer Differenz von  $\geq 10$  mmHg fanden wir bei 5 von 94 Patienten (5,3%). Trotzdem ist die Messung mit dem GAT nicht als obsolet anzusehen und da in der täglichen Praxis jede Messung auch einer Messungengenauigkeit unterliegt, benötigt es weiterhin klinischer Erfahrung diese individuell zu beurteilen.

Bei der ersten postoperativen IOD-Messung unserer Patienten auf Station fiel auf, dass bei 28 von 90 Augen (31%) mit dem DCT kein verwendbarer IOD-Wert ermittelt werden konnte. Es kann vermutet werden, dass Einflussfaktoren wie ein starker Salbenfilm auf der Hornhaut oder eine eingeschränkte Patientencompliance nach Vollnarkose, eine erfolgreiche Messung über 5 Sekunden erschwerten. Bei 26 dieser 28 Augen wurde mit dem GAT ein IOD von kleiner oder gleich 5 mmHg gemessen. Es ist also unwahrscheinlich, dass durch die Fehlmessungen des DCT postoperative Druckspitzen in der Frühphase nach einer ppV übersehen wurden. Bei normotonen Augen maß das DCT zuverlässig und erkannte in der Frühphase bei sechs Augen (10%) hypertone IOD-Werte ( $\geq 25$  mmHg). Bei zwei Augen unterschätzte das GAT den IOD um mehr als 8 mmHg bei der ersten IOD Kontrolle nach ca. sechs Stunden postoperativ. Ein Vergleich mit anderen Studien, in denen das DCT mit dem GAT nach ppV verglichen wurden, ist nicht ideal, da dort die beiden Tonometer frühestens einen Tag nach ppV zum Einsatz kamen [15,62]. Frühe postoperative hypotone Phasen oder unmittelbare Druckanstiege innerhalb der ersten Stunden nach OP finden hier keine Erwähnung. Mitra et al. berichten innerhalb der ersten vier bis sechs Stunden nach ppV jedoch von hypertonen IOD Werten ( $\geq 25$  mmHg) bei 52,4% [66]. Damit verglichen, traten postoperative hypertone IOD-Werte in der vorliegenden Arbeit mit 10% seltener auf, stellen aber dennoch ein Risiko für eine postoperative Schädigung dar. Auch wenn das DCT bei anfänglich postoperativ hypotoneren Augen nicht fehlerfrei maß, ist es trotzdem empfehlenswert bereits in der Frühphase bei Verdacht auf Druckanstieg das DCT vergleichend einzusetzen um postoperative Druckspitzen rechtzeitig zu erkennen.

Wie in den oben aufgeführten Studien fehlt unserer Studie ebenfalls der Vergleich des Augen-drucks mit einem objektiven manometrisch intraokulär abgeleiteten IOD, was im postoperativen Setting zu invasiv für die Patienten gewesen wäre. Deshalb kann die vorliegende Arbeit nicht abschließend klären, ob das GAT den Augendruck wirklich unterschätzt, sondern zeigt in erster Linie, dass das GAT insbesondere bei höherem IOD im Vergleich zum DCT niedrigere Werte misst. Da aber Vorstudien eine hohe Genauigkeit des DCT im Vergleich zu einem manometrisch

abgeleiteten IOD auch in verschiedenen Szenarien gezeigt haben und das GAT bei in der Biomechanik veränderten Hornhäuten den IOD falsch zu niedrig gemessen hat, liegt die Vermutung einer systematischen Unterschätzung seitens des GAT nahe, sofern eine Intertonometerdifferenz vorliegt [64,67].

In Einzelfällen können postoperative Druckanstiege bei alleiniger Verwendung der Applanationsometrie unterschätzt werden und unentdeckt bleiben. In Einzelfällen könnten unklare Visusverluste bei ansonsten guter Prognose dadurch erklärt werden.

### 4.3 Langfristiger postoperativer IOD-Verlauf und Einfluss auf die Intertonometerdifferenz

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich nicht nur mit dem unmittelbaren IOD-Anstieg nach ppV, sondern lässt auch Rückschlüsse auf längerfristige IOD-Änderungen zu. Da 27 Patienten im Rahmen einer geplanten Silikonölexplantation in diese Arbeit eingeschlossen wurden, kann schon aus den präoperativen IOD-Werten Rückschluss auf einen langfristigen IOD-Anstieg nach vorausgegangener ppV mit Silikonölinstallation gezogen werden. Diese 27 Augen, bei denen eine Silikonölexplantation durchgeführt wurde, wiesen mit im Mittel 19,8 mmHg präoperativ einen höheren IOD auf als nicht vorvitrektomierte Augen (16,0 mmHg) und es wurden Spitzenwerte bis 39 mmHg gemessen. 19% der anfänglich mit Silikonöl gefüllten Augen wiesen einen IOD von größer oder gleich 25 mmHg auf.

Weiterhin untersucht die Arbeit die langfristige IOD-Veränderung anhand von 71 Patienten, die im Schnitt sieben Wochen nach ppV ambulant nachuntersucht werden konnten.

Sofern Gas oder Silikonöl verwendet wurden, konnte auch noch Wochen nach der ppV ein höherer IOD im Vergleich zu den präoperativen Werten gemessen werden. Der stärkste IOD-Anstieg wurde bei Silikonöl-Endotamponaden (+2,6 mmHg gemessen mit dem DCT) beobachtet. Analog dazu konnte bei den Silikonölexplantationen ein IOD-Abfall um 3,2 mmHg beobachtet werden. Insgesamt war der IOD mit einer Zunahme von +0,5 mmHg (GAT) bzw. +0,4 mmHg (DCT) gegenüber den präoperativen IOD-Werten nur gering angestiegen. Absolut betrachtet, lag bei 6 von 71 Patienten (8,5%) ein erhöhter IOD von  $\geq 25$  mmHg vor (gemessen mit dem DCT). Mit dem GAT wurden nur 3 von 71 Patienten (4,3%) mit einem IOD von  $\geq 25$  mmHg erfasst.

Wu et al. konnten zeigen, dass 19,2 % der vitrektomierten Patienten längerfristig einen erhöhten Augendruck entwickelten [106]. Toyokakawa et al. konnten bei 4,2% ihrer vitrektomierten Patienten noch 31 Monate nach Operation eine okuläre Hypertension nachweisen [93]. Christensen et al. konnten in postoperativen Nachuntersuchungen bei einem Drittel der Patienten, die eine Silikonöl-Endotamponade erhielten, trotz initial gutem Potential, einen Visusverlust mit Reduktion der retinalen Nervenfaserschicht nachweisen [12]. Solche Veränderungen können auch mit einem moderaten, über einige Wochen bestehenden erhöhten IOD assoziiert sein. Dieser kann

unter Umständen mit den herkömmlichen Messmethoden wie dem GAT unterschätzt worden sein. Eine langfristige korrekte Druckkontrolle ist folglich entscheidend, um glaukomatöse Schädigungen zu vermeiden [93].

Deshalb gilt es, auch im längeren Verlauf nach ppV den Unterschied der beiden Tonometer zu untersuchen. Insbesondere bei Verwendung längerfristiger Endotamponaden wie C3F8-Gas oder Silikonöl kann das diagnostisch hilfreich sein [106]. Diese Erkenntnis wird durch die Ergebnisse dieser Arbeit unterstützt. Die Verwendung von Silikonölen birgt das Risiko für langfristige okuläre Hypertonien. Ebenso konnte eine systemische Unterschätzung des GAT gegenüber dem DCT langfristig gezeigt werden.

Eine Kontrollmessung zur korrekten IOD-Bestimmung mittels DCT kann auch noch Wochen nach durchgeführter ppV, insbesondere wenn Silikonöl oder Gasgemische verwendet wurden, sinnvoll sein. Diese Erkenntnis ist insbesondere hilfreich, wenn es um therapeutische Entscheidungen bei glaukomgeschädigten Augen geht, um langfristig ein Fortschreiten der Erkrankung zu verhindern.

#### 4.4 Intertonometerdifferenz unmittelbar nach Operationsende

Die vorliegende Arbeit untersuchte den vorliegenden IOD unmittelbar nach Operationsende und vergleicht dabei das DCT mit dem Perkins-Tonometer. Die gemessenen IOD-Werte wurden der palpatorischen Abschätzung des IOD seitens des Operateurs gegenübergestellt. Durch falsche Zusammensetzung der Gasgemische oder auch technische und operative Komplikationen (z.B. Undichtigkeit der Sklerotomien) können postoperative Hypotonien auftreten, welche wiederum eine Schwellung der Aderhaut oder Nachblutungen nach sich ziehen können [57,104]. Andererseits kann ein postoperativ übermäßig tonisierter Bulbus zu kurzfristigen IOD-Anstiegen führen. In unserer Arbeit zeigte sich eine Unterschätzung des IOD mit dem Perkins Tonometer um im Mittel 7,0 mmHg gegenüber dem DCT. Die palpatorische Abschätzung lag im Durchschnitt 2,3 mmHg unter den IOD-Werten des DCT. Auch wenn der wahre IOD nicht manometrisch abgeleitet vorliegt, so kann die Aussage gemacht werden, dass insofern kein Tonometer zur Hand ist, der erfahrene Operateur sich durchaus auf seine palpatorische IOD-Einschätzung verlassen kann. Im Zweifel sollte zur Kontrollmessung das DCT dem Perkins-Tonometer vorgezogen werden. Dieser Aspekt wurde in Rahmen der vorliegenden Arbeit nur am Rande untersucht und bedarf noch weiterführender Untersuchungen. Interessant wäre zum Beispiel der Vergleich eines wahren manometrisch abgeleiteten IOD unmittelbar nach ppV mit den ersten postoperativen IOD-Messungen. Dadurch könnten Erkenntnisse gewonnen werden, inwiefern Faktoren wie Temperatur im Operationssaal, Lagerungstemperatur der verschiedenen Endotamponaden oder auch die Art der Narkose einen Einfluss auf kurzfristige Druckveränderungen haben.

## 4.5 Beantwortung der eigenen Fragestellung

Postoperative Druckerhöhungen nach ppV gehören zu den häufigen postoperativen Komplikationen. Da durch Weiterentwicklung der Technologie, Etablierung neuer operativer Verfahren und Zugewinn an Erfahrung, die Inzidenzen sich ändern, lohnt sich eine regelmäßige Re-Evaluation dieser Fragestellung. Bereits in den ersten Stunden nach ppV wiesen 9,7% der Patienten erhöhte IOD-Werte ( $\geq 25$  mmHg) auf. Am Folgetag erhöhte sich der Anteil der hypertonen Augen auf 19,1%. Vereinzelt konnten Druckspitzen bis 56 mmHg registriert werden. Der mittlere IOD-Anstieg betrug im Schnitt 1,2 mmHg.

Dabei konnten Unterschiede zwischen den einzelnen Endotampoanden gemessen werden. Insbesondere wenn expansive Gasgemische oder Silikonöl als Endotamponade zum Einsatz kamen, konnten größere IOD-Anstiege beobachtet werden. Dabei konnte insbesondere bei schnell expansiven Gasen innerhalb des ersten Tages ein mittlerer Druckerhöhung um 3,6 mmHg erfasst werden.

Oben angegebene IOD-Werte wurden mit dem DCT erhoben. In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass das GAT sowohl präoperativ aber insbesondere postoperativ bei hypertonen Augen niedrigere IOD Werte misst. Die Interometerdifferenz  $\Delta$ IOD (DCT minus GAT in mmHg) lag anfangs noch im Mittel bei 1,8 mmHg und stieg im postoperativen Verlauf auf 2,5 mmHg an. Bei hypertonen Augen, insbesondere wenn expansive Gase verwendet wurden, konnte eine Zunahme der Interometerdifferenz beobachtet werden und das GAT unterschätzte den IOD teilweise um bis zu 12 mmHg.

Die vorliegende Arbeit konnte auch längerfristig postoperative IOD-Veränderungen zeigen. Insgesamt lag der IOD sieben Wochen nach durchgeführter ppV mit einer Zunahme von nur 0,4 mmHg fast identisch zu seinem Ausgangswert. Wurde aber Silikonöl verwendet, konnte eine Zunahme um 2,6 mmHg beobachtet werden. Nach Silikonölexplantation sank hingegen der IOD um 3,2 mmHg. Hypertone IOD-Werte konnten noch bei 8,5% der Patienten gemessen werden. Ebenfalls bei 8,5% unterschätzte das GAT den IOD auch Wochen nach ppV um mehr als 6 mmHg gegenüber der Messung mit dem DCT. Dieser Effekt zeigte sich insbesondere bei Verwendung von Silikonöl oder expansiven Gasen.

Durch die operative Intervention konnte eine Zunahme der CCT um im Schnitt 46  $\mu$ m auf 600  $\mu$ m beobachtet werden. Vereinzelt kam es auch zu ausgeprägten postoperativen Hornhautödemen mit einer CCT von 928  $\mu$ m. Jedoch hatten weder die absolute Hornhautdicke, noch die postope-

rative CCT-Zunahme einen Einfluss auf die Intertonometerdifferenz. Der Grund für niedriger gemessene IOD-Werte durch das GAT konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht auf eine Fehlmessung durch ein postoperatives Hornhautödem zurückgeführt werden.

#### 4.6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegende Studie bestätigt, dass erhebliche Druckanstiege auch in der heutigen Zeit zu den postoperativen Komplikationen nach ppV gehören und schwer vorherzusagen sind. Das liegt unter anderem am individuellen Vorbefund und Reaktion des Auges und am expansiven Verhalten eingegebener Gase aber auch am postoperativen Verhalten der Patienten. Besonders bei stark expansiven Gas-Endotamponaden ist das frühzeitige und präzise Erkennen von postoperativen Druckspitzen wichtig. Regelmäßige IOD-Kontrollen (inklusive auch abendlicher Druckmessungen) unter stationären Bedingungen über einen Zeitraum von ca. 48 Stunden nach ppV ist hierzu essentiell. Dies empfehlen wir insbesondere bei Patienten mit arterieller Hypertonie, Blutdruck-Dipfern, und Patienten mit bestehendem Schaden der Papille / des N. opticus.

Insgesamt misst das DCT höhere Druckwerte als das GAT, wobei die Differenz mit ansteigendem Augendruck zunimmt. Besonders bei Augen mit postoperativen Druckspitzen, die mit expansiven Gasen versorgt wurden, kommt es im Einzelfall zu großen Unterschieden zwischen den Tonometern. Das DCT stellt eine zuverlässige Alternative zum etablierten GAT dar, welches durch eine hohe Genauigkeit und Unabhängigkeit von vielen Einflussfaktoren visusbedrohende postoperative Druckanstiege eher erkennen kann, sodass therapeutische Maßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden können. Auch im längerfristigen postoperativen Verlauf, insbesondere wenn bereits ein fortgeschrittenes Glaukom vorliegt, ist das DCT die bevorzugte Messmethode um ein Fortschreiten des Glaukomschadens durch eine mögliche dauerhafte Unterschätzung des IOD zu vermeiden.

Für weiterführende Untersuchungen in der Zukunft bieten sich diverse Ansätze. Langfristig bleibt die Ermittlung des wahren IOD durch nichtinvasive Messung und anschließender Vergleich mit Tonometern wie dem GAT oder dem DCT das Ziel. Insbesondere in Fällen, in denen eine ausgeprägte Intertonometerdifferenz vorliegt oder bei Patienten mit fortgeschrittenem Glaukom, könnte so eruiert werden um wie viel mmHg das GAT den IOD konkret unterschätzt. Interessant wäre eine Implantation von Drucksensoren wie dem ARGOS-Sensor nach ppV [53]. Es gilt herauszufinden, wie sich die Messwerte bei verschiedenen Endotamponaden gegenüber der IOD-Messung mit dem GAT verhalten. Weiterführend stünde dann ein Vergleich mit dem DCT an. Insgesamt bleibt das IOD-Management nach ppV auch weiterhin ein aktuelles Thema und das nicht abbrechende Nachrücken von neuen Tonometerverfahren wird auch in Zukunft weiteren Raum für Forschung bieten.

---

## 5 Literatur

1. Adachi M, Takahashi K, Nishikawa M, Miki H, Uyama M (1996) High intraocular pressure-induced ischemia and reperfusion injury in the optic nerve and retina in rats. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 234:445–451
2. Anderson NG, Fineman MS, Brown GC (2006) Incidence of Intraocular Pressure Spike and Other Adverse Events after Vitreoretinal Surgery. *Ophthalmology* 113:42–47
3. Atanassov MA, Konareva MI (2002) Reproducibility and agreement between three methods of intraocular pressure measurement. *Folia Med (Plovdiv)* 44:19–22
4. Barr CC, Lai MY, Lean JS, Linton KL, Trese M, Abrams G, Ryan SJ, Azen SP (1993) Postoperative intraocular pressure abnormalities in the Silicone Study. Silicone Study Report 4. *Ophthalmology* 100:1629–1635
5. Benz MS, Escalona-Benz EM, Murray TG, Eifrig CWG, Yoder DM, Moore JK, Schiffman JC (2004) Immediate Postoperative Use of a Topical Agent to Prevent Intraocular Pressure Elevation After Pars Plana Vitrectomy With Gas Tamponade. *Arch Ophthalmol* 122:705–709
6. Bland JM, Altman DG (1986) Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet (London, England)* 1:307–310
7. Blodi CF (2016) David Kasner and the Road to Pars Plana Vitrectomy. *Ophthalmol Eye Dis* 8:1–4
8. Bochmann F, Kaufmann C, Becht C, Bachmann LM, Thiel MA (2009) Comparison of dynamic contour tonometry with goldmann applanation tonometry following descemet's stripping automated endothelial keratoplasty (DSAEK). *Klin Monbl Augenheilkd* 226:241–244
9. Boehm AG, Weber A, Pillunat LE, Koch R, Spoerl E (2008) Dynamic contour tonometry in comparison to intracameral IOP measurements. *Investig Ophthalmol Vis Sci* 49:2472–2477
10. Bowling B (2017) *Kanskis Klinische Ophthalmologie*. Elsevier Urban & Fischer Verlag München
11. Chang S (2006) LXII Edward Jackson Lecture: Open Angle Glaucoma After Vitrectomy. *Am J Ophthalmol* 141:1033–1043
12. Christensen C, La Cour M (2012) Visual loss after use of intraocular silicone oil associated with thinning of inner retinal layers. *Acta Ophthalmol* 90:733–737
13. Cibis P, Becker B, Okun E, Canaan S (1962) The use of liquid silicone in retinal detachment surgery. *Arch Ophthalmol* 68:590–599
14. Desai UR, Alhalel AA, Schiffman RM, Campen TJ, Sundar G, Muhich A (1997) Intraocular Pressure Elevation after Simple Pars Plana Vitrectomy. *Ophthalmology* 104:781–786
15. Donaldson MJ, Bhatnagar P, Dhrami-Gavazi E, Santos RA V, Barile GR, Priore LV Del, Iranmanesh R, Schiff WM, Chang S (2009) Pascal Dynamic Contour Tonometry Versus Goldmann Applanation Tonometry in Gas and Air-Filled Eyes After Vitrectomy Surgery. *Retina* 29:481–486
16. Doyle A, Lachkar Y (2005) Comparison of dynamic contour tonometry with goldman applanation tonometry over a wide range of central corneal thickness. *J Glaucoma* 14:288–92

17. Draeger J (1967) Principle and clinical application of a portable applanation tonometer. *Invest Ophthalmol* 6:132–134
18. Duba I, Wirthlin AC (2004) Dynamic contour tonometry for post-LASIK intraocular pressure measurements. *Klin Monbl Augenheilkd* 221:347–350
19. Edmunds B, Canning CR (1996) The effect of prophylactic acetazolamide in patients undergoing extensive retinal detachment repair. *Eye* 10:328–330
20. Erickson DH, Goodwin D, Rollins M, Belaustegui A, Anderson C (2009) Comparison of dynamic contour tonometry and Goldmann applanation tonometry and their relationship to corneal properties, refractive error, and ocular pulse amplitude. *Optometry* 80:169–174
21. Fang I-M, Huang J-S (2002) Central retinal artery occlusion caused by expansion of intraocular gas at high altitude. *Am J Ophthalmol* 134:603–605
22. Faude F (2008) Geschichte der Behandlung der Amotio retinae. *Klin Monbl Augenheilkd* 225:225
23. Fineberg E, Machemer R, Sullivan P, Norton EW, Hamasaki D, Anderson D (1975) Sulfur hexafluoride in owl monkey vitreous cavity. *Am J Ophthalmol* 79:67–76
24. Forsaa VA, Raeder S, Hashemi LT, Krohn J (2013) Short-term postoperative non-supine positioning versus strict face-down positioning in macular hole surgery. *Acta Ophthalmol* 91:547–551
25. Goldmann H, Schmidt T (1957) Über Applanationstonometrie. *Ophthalmologica* 134:221–242
26. Goldmann H, Schmidt T (1961) Weiterer Beitrag zur Applanationstonometrie. *Ophthalmologica* 141:441–456
27. Golnik KC, Miller NR (1992) Diagnosis of cavernous sinus arteriovenous fistula by measurement of ocular pulse amplitude. *Ophthalmology* 99:1146–1152
28. Grehn F (2008) *Augenheilkunde*. Springer, Berlin Heidelberg New York
29. Grieshaber MC, Schoetzau A, Zawinka C, Flammer J, Orgul S (2007) Effect of central corneal thickness on dynamic contour tonometry and Goldmann applanation tonometry in primary open-angle glaucoma. *Arch Ophthalmol (Chicago, Ill 1960)* 125:740–744
30. Han DP, Lewis H, Lambrou FH, Mieler WF, Hartz A (1989) Mechanisms of Intraocular Pressure Elevation after Pars Plana Vitrectomy. *Ophthalmology* 96:1357–1362
31. Hart RH, Vote BJ, Borthwick JH, McGeorge AJ, Worsley DR (2002) Loss of vision caused by expansion of intraocular perfluoropropane (C3F8) gas during nitrous oxide anesthesia. *Am J Ophthalmol* 134:761–763
32. Hayreh SS, Kolder HE, Weingeist TA (1980) Central Retinal Artery Occlusion and Retinal Tolerance Time. *Ophthalmology* 87:75–78
33. Heimann H, Zou X, Jandek C, Kellner U, Bechrakis NE, Kreusel K-M, Helbig H, Krause L, Schuler A, Bornfeld N, Foerster MH (2006) Primary vitrectomy for rhegmatogenous retinal detachment: an analysis of 512 cases. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 244:69–78
34. Heinrich MA, Eppig T, Langenbacher A, Walter S, Behrens-Baumann W, Viestenz A (2012) Comparison of Goldmann applanation and dynamic contour tonometry before and after cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 38:683–689

- 
35. Herdener S, Pache M, Lautebach S, Funk J (2007) Dynamic contour tonometry (DCT) versus Goldmann applanation tonometry (GAT) - A comparison of agreement and reproducibility. *Graefe's Arch Clin Exp Ophthalmol* 245:1027–1030
  36. Herr A, Remky A, Hirsch T, Rennings C, Plange N (2013) Tonometry in corneal edema after cataract surgery: Dynamic contour tonometry versus Goldmann applanation tonometry. *Clin Ophthalmol* 7:815–819
  37. Hoerauf H, Wirbelauer C, Scholz C, Engelhardt R, Koch P, Laqua H, Birngruber R (2000) Slit-lamp-adapted optical coherence tomography of the anterior segment. *Graefe's Arch Clin Exp Ophthalmol* 238:8–18
  38. Honavar SG, Goyal M, Majji AB, Sen PK, Naduvilath T, Dandona L (1999) Glaucoma after pars plana vitrectomy and silicone oil injection for complicated retinal detachments. *Ophthalmology* 106:169–176
  39. Jackson TL, Thiagarajan M, Murthy R, Snead MP, Wong D, Williamson TH (2001) Pupil block glaucoma in phakic and pseudophakic patients after vitrectomy with silicone oil injection. *Am J Ophthalmol* 132:414–416
  40. Jain N, Mccuen Ii BW, Mruthyunjaya P (2012) Unanticipated Vision Loss After Pars Plana Vitrectomy. *Surv Ophthalmol* 57:91–104
  41. Kanclerz P, Grzybowski A (2018) Complications Associated with the Use of Expandable Gases in Vitrectomy. *J Ophthalmol* 28:465–468
  42. Kangas TA, Bennet SR, Flynn HW (1995) Reversible Loss of Light Perception After Vitreoretinal Surgery. *Am J Ophthalmol* 120:751–756
  43. Kanngiesser HE, Nee M, Kniestedt C, Inversini C, Stamper R (2003) Simulation of Dynamic Contour Tonometry compared to in-vitro study revealing minimal influence of corneal radius and astigmatism The theoretical Foundations of Dynamic Contour Tonometry. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 44:2641
  44. Kanngiesser HE, Kniestedt C, Robert YC a (2005) Dynamic contour tonometry: presentation of a new tonometer. *J Glaucoma* 14:344–50
  45. Kaufmann C, Bachmann LM, Thiel MA (2003) Intraocular pressure measurements using dynamic contour tonometry after laser in situ keratomileusis. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 44:3790–3794
  46. Kaufmann C, Bachmann LM, Thiel MA (2004) Comparison of dynamic contour tonometry with Goldmann applanation tonometry. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 45:3118–3121
  47. Klöti R (1983) Indications for vitrectomy. *Dtsch Med Wochenschr* 108:308–309
  48. Knecht PB, Bosch MM, Menke MN, Bachmann LM, Funk J, Kaufmann C (2009) Dynamic Contour Tonometry: Handheld versus Slit-lamp-Mounted. *Ophthalmology* 116:1450–1454
  49. Knecht PB, Menghini M, Bachmann LM, Baumgartner RW, Landau K (2012) The ocular pulse amplitude as a noninvasive parameter for carotid artery stenosis screening: a test accuracy study. *Ophthalmology* 119:1244–1249
  50. Kniestedt C, Nee M, Stamper RL (2005) Accuracy of dynamic contour tonometry compared with applanation tonometry in human cadaver eyes of different hydration states. *Graefe's Arch Clin Exp Ophthalmol* 243:359–366
  51. Kniestedt C, Kanngiesser HE (2006) Dynamische Konturtonometrie. *Ophthalmologie* 103:713–723
  52. Kniestedt C, Punjabi O, Lin S, Stamper RL (2008) Tonometry Through the Ages. *Surv Ophthalmol* 53:568–591

53. Koutsonas A, Walter P, Plange N (2016) Self-tonometry with a Telemetric Intraocular Pressure Sensor in Patients With Glaucoma. *Klin Monbl Augenheilkd* 233:743–748
54. Kovacic H, Wolfs RCW, Kılıç E, Ramdas WD (2019) Changes in intraocular pressure after intraocular eye surgery—the influence of measuring technique. *Int J Ophthalmol* 12:967–973
55. Kovacic H, Wolfs RCW, Kılıç E, Ramdas WD (2019) The effect of multiple vitrectomies and its indications on intraocular pressure. *BMC Ophthalmol* 19:175
56. Krieglstein GK (2007) *Glaukom*. Springer, Berlin Heidelberg New York
57. Kuhn F (2006) *Vitreoretinal Surgery: Strategies and Tactics*. Springer, Berlin Heidelberg New York
58. Lang GK (2000) *Augenheilkunde*. Thieme Verlag Stuttgart
59. Lincoff H, Weinberger D, Reppucci V, Lincoff A (1989) Air travel with intraocular gas. I. The mechanisms for compensation. *Arch Ophthalmol (Chicago, Ill 1960)* 107:902–906
60. Machemer R, Buettner H, Norton EW, Parel JM (1971) Vitrectomy: a pars plana approach. *Trans Am Acad Ophthalmol Otolaryngol* 75:813–20
61. Madjlessi F, Marx W, Reinhard T, Althaus C, Sundmacher R (2000) Impressions- und Applanationstonometrie bei pathologischen Hornhäuten im Vergleich mit der intraokularen Nadeldruckmessung. *Ophthalmologie* 97:478–481
62. Mamas N, Fuest M, Koutsonas A, Roessler G, Mazinani BE, Walter P, Plange N (2016) Goldmann Applanation Tonometry Versus Dynamic Contour Tonometry After Vitrectomy. *J Glaucoma* 25:663–668
63. McCuen BW 2nd, Azen SP, Stern W, Lai MY, Lean JS, Linton KL, Ryan SJ (1993) Vitrectomy with silicone oil or perfluoropropane gas in eyes with severe proliferative vitreoretinopathy. *Silicone Study Report 3. Retina* 13:279–284
64. Milla E, Duch S, Buchacra O, Masuet C (2008) Poor agreement between Goldmann and Pascal tonometry in eyes with extreme pachymetry. *Eye* 23:536–542
65. Mills MD, Devenyi RG, Lam WC, Berger AR, Beijer CD, Lam SR (2001) An assessment of intraocular pressure rise in patients with gas-filled eyes during simulated air flight. *Ophthalmology* 108:40–44
66. Mitra RA, Pollack JS, Dev S, Han DP, Mieler WF, Connor TB (1998) The use of topical aqueous suppressants in the prevention of postoperative intraocular pressure elevation following pars plana vitrectomy with long-acting gas tamponade. *Trans Am Ophthalmol Soc* 96:143–144
67. Moses RA (1958) The Goldmann applanation tonometer. *Am J Ophthalmol* 46:865–869
68. Naumann GOH (1997) *G.O.H. Naumann- Pathologie des Auges II*. Springer, Berlin Heidelberg New York
69. Norton EW Intraocular gas in the management of selected retinal detachments. *Trans Am Acad Ophthalmol Otolaryngol* 77:85–98
70. Orssengo GJ, Pye DC (1999) Determination of the true intraocular pressure and modulus of elasticity of the human cornea in vivo. *Bull Math Biol* 61:551–572
71. Pache M, Wilmsmeyer S, Lautebach S, Funk J (2005) Dynamic contour tonometry versus Goldmann applanation tonometry: A comparative study. *Graefe's Arch Clin Exp Ophthalmol* 243:763–767

- 
72. Pepose JS, Feigenbaum SK, Qazi MA, Sanderson JP, Roberts CJ (2007) Changes in corneal biomechanics and intraocular pressure following LASIK using static, dynamic, and noncontact tonometry. *Am J Ophthalmol* 143:39–47
  73. Perkins ES (1965) Hand-held applanation tonometer. *Br J Ophthalmol* 591–593
  74. Perkins ES (1981) The ocular pulse. *Curr Eye Res* 1:19–24
  75. Pfeiffer N (1998) Moderne medikamentöse Glaukomtherapie. *Dtsch Arztebl Int* 95:51–52
  76. Pfeiffer N (2005) Glaukom und okuläre Hypertonie. Thieme Verlag Stuttgart
  77. Punjabi OS, Kniestedt C, Stamper RL, Lin SC (2006) Dynamic contour tonometry: principle and use. *Clin Experiment Ophthalmol* 34:837–840
  78. Rosengren B (1938) Results of treatment of detachment of the retina with diathermy and injection of air into the vitreous. *Acta Ophthalmol* 16:573–579
  79. Sabates WI, Abrams GW, Swanson DE, Norton EWD (1981) The Use of Intraocular Gases. *Ophthalmology* 88:447–454
  80. Sachs L (1999) Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden. Springer Verlag Berlin Heidelberg
  81. Schiøtz H (1905) Ein neues Tonometer. *Arch für Augenheilkd* 52:401
  82. Schmutzler J (2008) Seminarvortrag: Optische Kohärenztomographie. Universität Regensburg.
  83. Schnabel J (1900) Die glaukomatöse Sehnervenatrophie. *Wien klin Wschr* 20:25
  84. Schneider E, Grehn F (2006) Intraocular pressure measurement-comparison of dynamic contour tonometry and goldmann applanation tonometry. *J Glaucoma* 15:2–6
  85. Seaberg R, Freeman WR, Goldbaum MH, Manecke GR (2002) Permanent Postoperative Vision Loss Associated with Expansion of Intraocular Gas in the Presence of a Nitrous Oxide-Containing Anesthetic. *Anesthesiology* 97:1309–1310
  86. Silvanus M-T, Moldzio P, Bornfeld N, Peters J (2008) Erblindungsgefahr nach intraokularer Gasinjektion durch Lachgas und bei Reisen. *Dtsch Arztebl Int* 105:108–112
  87. Smith RB, Carl B, Linn JGJ, Nemoto E (1974) Effect of nitrous oxide on air in vitreous. *Am J Ophthalmol* 78:314–317
  88. Stamper RL (2011) A History of Intraocular Pressure and Its Measurement. *Optom Vis Sci* 88:16–28
  89. Stodtmeister R (1998) Applanation tonometry and correction according to corneal thickness. *Acta Ophthalmol Scand* 76:319–324
  90. Stürmer JPE, Kniestedt C (2015) Stellenwert der okulären Pulsamplitude beim Glaukom. *Klin Monbl Augenheilkd* 232:162–168
  91. Thompson JT (1989) Kinetics of intraocular gases: Disappearance of air, sulfur hexafluoride, and perfluoropropane after pars plana vitrectomy. *Arch Ophthalmol* 107:687–691
  92. Touboul D, Roberts C, Kérautret J, Garra C, Maurice-Tison S, Saubusse E, Colin J (2008) Correlations between corneal hysteresis, intraocular pressure, and corneal central pachymetry. *J Cataract Refract Surg* 34:616–622

- 
93. Toyokawa N, Kimura H, Matsumura M, Kuroda S (2015) Incidence of Late-onset Ocular Hypertension Following Uncomplicated Pars Plana Vitrectomy in Pseudophakic Eyes. *Am J Ophthalmol* 159:727–732
  94. Tranos P, Bhar G, Little B (2004) Postoperative intraocular pressure spikes: the need to treat. *Eye* 18:673
  95. Vaziri K, Schwartz SG, Kishor KS, Flynn HW, Jr (2016) Tamponade in the surgical management of retinal detachment. *Clin Ophthalmol* 10:471–476
  96. Viestenz A, Langenbacher A, Viestenz A (2006) Reproduzierbarkeit der dynamischen Kontur-Tonometrie. Vergleich mit dem TonoPenXL und dem Goldmann-  
Applanationstonometer - eine klinische Studie an 323 gesunden Augen. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 223:813–819
  97. Viestenz A, Langenbacher A, Seitz B, Viestenz A (2006) Evaluierung der dynamischen Konturtonometrie nach penetrierender Keratoplastik. *Ophthalmologe* 103:773–776
  98. Vote BJ, Hart RH, Worsley DR, Borthwick JH, Laurent S, McGeorge AJ (2002) Visual Loss after Use of Nitrous Oxide Gas with General Anesthetic in Patients with Intraocular Gas Still Persistent Up to 30 days after Vitrectomy. *Anesthesiol J Am Soc Anesthesiol* 97:1305–1308
  99. Wallace J, Lovell HG (1968) Perkins hand-held applanation tonometer. A clinical evaluation. *Br J Ophthalmol* 52:568–572
  100. Wang AS, Alencar LM, Weinreb RN, Tafreshi A, Deokule S, Vizzeri G, Medeiros FA (2013) Repeatability and reproducibility of Goldmann applanation, dynamic contour, and ocular response analyzer tonometry. *J Glaucoma* 22:127–32
  101. Weinberg RS, Peyman GA, Huamonte FU (1976) Elevation of intraocular pressure after pars plana vitrectomy. *Albr Von Graefes Arch Klin Exp Ophthalmol* 200:157–161
  102. Whitacre MM, Stein R (1993) Sources of error with use of Goldmann-type tonometers. *Surv Ophthalmol* 38:1–30
  103. Wiedemann P (2016) Die proliferative Vitreoretinopathie. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 233:1012–1015
  104. Williamson TH (2011) *Vitreoretinal Surgery*. Springer, Berlin Heidelberg New York
  105. Wirbelauer C, Hoerauf H, Roeder J, Laqua H, Wirbelauer C, Hoerauf H, Roide J, Augenklinik HL (1998) Corneal shape changes after pars plana vitrectomy. *Graefe's Arch Clin Exp Ophthalmol* 98:151–156
  106. Wu L, Berrocal MH, Rodriguez FJ, Maia M, Morales-Canton V, Figueroa M, Serrano M, Roca JA, Arevalo JF, Navarro R, Hernandez H, Salinas S, Romero R, Alpizar-Alvarez N, Chico G (2014) Intraocular pressure elevation after uncomplicated pars plana vitrectomy: results of the Pan American Collaborative Retina Study Group. *Retina* 34:1985–1989

## 6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipien der einfachen, der akuten und der chronischen glaukomatösen Optikusatrophie. Bei akuten IOD Ansteigen wird Hyaluronsäure aus dem Glaskörper in den Sehnervenkopf gepresst [73]	10
Abbildung 2: Ficks handgehaltenes Tonometer (links) und ein Schiøtz-Eindrucktonometer aus dem Jahre 1905 (rechts) [57].	12
Abbildung 3: 3-Port-pars-plana-Vitrektomie an der Universitätsaugenklinik UKS Homburg (Saar). Die Sklerotomie ist bei 5 Uhr mit der Infusion verbunden. Bei 11 Uhr und 2 Uhr befinden sich die Sklerotomien für das Vitrektom und die Lichtquelle (links). Entfernen der selbstdichtenden 23 Gauge Trokare nach Operationsende (rechts).	22
Abbildung 4: Aufziehen der Gas-Endotamponade als Luft-Gasgemisch (links) und Eingabe in den Bulbus über einen Dreiwege-Hahn und den Infusionsschlauch während des Luft-Gasaustauschs (rechts)	26
Abbildung 5: Goldmann Applanationstonometer 1955 (Goldmann und Schmidt 1957 (links) und 2015 (rechts) aus der Universitätsaugenklinik Homburg (Saar) montiert an der Spaltlampe	27
Abbildung 6: Physikalisches Prinzip der Goldmann-Tonometrie (links). Durch die zwei Prismen erzeugt Bild des Tränenfilms (rechts). Bei einer Überlappung (b) ist die Hornhaut auf einer Fläche mit einem Durchmesser von 3,06 mm exakt applaniert [49].	28
Abbildung 7: Das DCT inklusive Zubehöres (rechts) und montiert angeschraubt auf die Metallplatte zur Anbringung an die Spaltlampe (links).	29
Abbildung 8: Physikalisches Prinzip der dynamischen Konturtonometrie. Durch den IOD (P) wirkt eine Kraft (F) auf die Kornea. F ist die Kraft des Drucks P (IOD) auf die Kornea mit einem Krümmungsradius $R_c$ . Darauf liegt das Tonometerköpfchen mit einem Krümmungsradius von $R_c'$ auf und passt die Kontur der Hornhaut auf einer Fläche mit dem Durchmesser (d) an. Rings um diesen Bereich bestehen weiterhin die Tangentialspannungen ( $\alpha_1$ ) durch die auf die Hornhaut wirkenden Kräfte [56].	30
Abbildung 9: Zeichnerische Darstellung des Prototypen des Perkins Tonometer in Aufsicht (oben) und Seitenansicht (unten) [79].	32
Abbildung 10: Von uns verwendetes Perkins Tonometer Mk2 im Operationssaal (UKS)	32
Abbildung 11: Hornhautpachymetrie mittels Vorderabschnitt-OCT bei postoperativem Hornhautödem nach ppV. Links eine regelrechte Hornhautkonfiguration mit einer CCT von 593 $\mu\text{m}$ und rechts ein postoperatives Hornhautödem mit einer CCT von 929 $\mu\text{m}$ .	33
Abbildung 12: Die Patientin sitzt aufrecht dem Unterscher an der Spaltlampe gegenüber (links); vorsichtige Applanation der Hornhaut unter Sichtkontrolle mit dem GAT (rechts)	35
Abbildung 13: Verwendete Augentropfen zur Betäubung der Hornhaut (links) und Anfärbung des Tränenfilms (rechts); GAT-Tonometerköpfchen (oben)	35
Abbildung 14: Spaltlampenmontiertes DCT mit Einmal-Silikonüberzug	36
Abbildung 15: Korrekte Positionierung des Sensors auf der Hornhaut [101]	36
Abbildung 16: Unmittelbar postoperative IOD Messung mit dem handgehaltenen Perkins-Tonometer	37
Abbildung 17: IOD-Messung mit dem handgehaltenen DCT mit sterilem Sensor Cap (intraoperatives Setting UKS)	37
Abbildung 18: Gauß'sche Verteilungskurve: Erste postoperative Messung mit dem DCT (in mmHg)	43

---

Abbildung 19: Gauß'sche Verteilungskurve: Erste postoperative Messung mit dem GAT (in mmHg) ....	43
Abbildung 20: Gegenüberstellung der vier IOD-Anstiege nach Sonnenexposition (Dreieck). Die beiden Linien sind jeweils bei 25 mmHg gezogen (Bezugslinie zur X-Achse entspricht DCT; zur Y-Achse GAT). Alle vier Punkte liegen rechts der 25 mmHg (DCT) Linie. Drei von den vier Patienten wurden mit dem GAT als < 25 mmHg gemessen Die Kreise entsprechen den restlichen IOD-Werten .....	45
Abbildung 21: Intertonometerdifferenz zwischen DCT und GAT (IOD DCT minus IOD GAT in mmHg) präoperativ .....	47
Abbildung 22: Gauß'sche Verteilungskurve: Intertonometerdifferenz zwischen DCT und GAT (IOD DCT minus IOD GAT in mmHg) postoperativ am Tag nach der OP .....	50
Abbildung 23: Zusammenhang zwischen dem postoperativen IOD und der Intertonometerdifferenz (in mmHg). Die Linie wurde bei 25 mmHg gezogen. Die Punkte auf oder über der Linie stehen für die Augen die postoperativ durch das DCT (links; 18 von 94) oder GAT (rechts; 10 von 94) als hypertensiv erfasst wurden.....	51
Abbildung 24: Bland-Altman-Diagramm. Die rote Linie markiert die mittlere Differenz der IOD-Werte zwischen dem DCT und GAT (2,5 mmHg) und die beiden orangenen Linien begrenzen das 95% Konfidenzintervall.....	51
Abbildung 25: Streudiagramm mit der IOD-Messungen am ersten postoperativen Tag (links) und am Folgetag (rechts). Die eingezeichnete Regressionsgerade zeigt den Zusammenhang zwischen den beiden Tonometern .....	52
Abbildung 26: Zusammenhang zwischen der CCT (links) / CCT-Zunahme (rechts) und der Intertonometerdifferenz .....	53
Abbildung 27: Gauß'sche Verteilungskurve: Intertonometerdifferenz zwischen dem DCT und GAT (IOD DCT minus IOD GAT in mmHg) bei der ambulanten Wiedervorstellung.....	54
Abbildung 28: IOD-Werte gemessen mit dem DCT (in mmHg) unmittelbar nach ppV .....	57
Abbildung 29: IOD-Werte gemessen mit dem Perkins (in mmhg) unmittelbar nach ppV .....	58
Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der intraoperativen IOD-Werte palpatorisch abgeschätzt (mmHg) 58	
Abbildung 31: Gegenüberstellung der palpatorisch geschätzten IOD-Werte (links) und der mit dem Perkins gemessenen IOD-Werte (rechts) mit den IOD-Werten gemessen mit dem DCT .....	59

## 7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verhalten intraokularer Gase: Expansionsfaktor im Glaskörperraum mit dem Maximum der Expansion nach 1 – 4 Tagen (T) und einer Verweildauer der Gase von 5 Tagen bis 8 Wochen(W) [100]	24
Tabelle 2: Studienüberblick über IOD-Anstiege nach Verwendung von expansiven Gasen in %. Die Studien unterscheiden sich dabei in Ihrer Definition von IOD-Anstieg und verwendeter Gase und Konzentrationen [45].	24
Tabelle 3: Primäre Indikation zur ppV an der Universitätsaugenklinik des Saarlandes Homburg / Saar (UKS)	40
Tabelle 4: Die präoperativen IOD-Werte (in mmHg) gemessen mit dem DCT, dem GAT und die, vom DCT angegebene OPA	41
Tabelle 5: Gemessene IOD-Werte mit dem DCT bei nicht voroperierten Augen, vitrektomierten Augen und silikonölgefüllten Augen	41
Tabelle 6: Biometrische Werte der zu operierenden Augen präoperativ	41
Tabelle 7a: IOD-Werte am ersten postoperativen Tag gemessen mit dem GAT und dem DCT in mmHg	44
Tabelle 8: postoperativer Tensioanstieg (in mmHg) zwischen der präoperativen und der postoperativen Messung am Tag nach der OP, gemessen mit dem DCT (IOD postoperativ – IOD präoperativ)	46
Tabelle 9: Häufigkeitsverteilung der Intertonometerdifferenz $\Delta$ IOD zwischen DCT und GAT (IOD DCT minus IOD GAT in mmHg) von $\Delta$ IOD kleiner 2 mmHg bis $\Delta$ IOD größer 6,0 mmHg präoperativ	48
Tabelle 10: Häufigkeitsverteilung der Intertonometerdifferenz $\Delta$ IOD zwischen DCT und GAT (IOD DCT minus IOD GAT in mmHg) von $\Delta$ IOD kleiner 2 mmHg bis $\Delta$ IOD größer 6,0 mmHg am 1. Tag postoperativ	49
Tabelle 11: postoperative Intertonometerdifferenz zwischen DCT und GAT (in mmHg)	49
Tabelle 12: Zunahme der Intertonometerdifferenz am Tag nach Vitrektomie	49
Tabelle 13: Gegenüberstellung der Intertonometerdifferenz zwischen DCT und GAT (in mmHg) präoperativ und 1.Tag postoperativ	49
Tabelle 14: Veränderungen der Hornhautpachymetrie nach im Schnitt 7 Wochen postoperativ nach vitreoretinalem Eingriff. Ks = Hornhautkrümmung in Dioptrien auf dem steilen Meridian. Kf = Hornhautkrümmung in Dioptrien auf dem flachen Meridian.	53
Tabelle 15: GAT, DCT im Vergleich. Präoperativ gegen postoperativ bei der ambulanten Wiedervorstellung	54
Tabelle 16: Häufigkeitsverteilung der Intertonometerdifferenz $\Delta$ IOD zwischen DCT und GAT (IOD DCT minus IOD GAT in mmHg) von $\Delta$ IOD kleiner 2 mmHg bis $\Delta$ IOD größer 6,0 mmHg bei der ambulanten Wiedervorstellung	55
Tabelle 17: Druckveränderungen (in mmHg) zwischen dem präoperativen Status und der ambulanten Wiedervorstellung im Schnitt 7 Wochen nach Vitrektomie	56
Tabelle 18: Intertonometerdifferenz unmittelbar nach der OP im Operationssaal (in mmHg)	59

## 8 Publikationen und Vorträge

### Publikationen

Bäurle, Seitz, Viestenz, Viestenz (2021) Intraokularer Druckanstieg nach Vitrektomie – Applikationstonometrie nach Goldmann misst niedriger als dynamische Konturtonometrie.

Ophthalmologe, DOI 10.1007/s00347-021-01443-z

### Vorträge

Bäurle, Fiorentzis Seitz, Viestenz, Viestenz (2018) Druckanstieg nach Pars-plana-Vitrektomie – Goldmann-Tonometrie misst niedriger als dynamische Contour Tonometrie,

116. Kongress der DOG Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft Bonn

Bäurle, Fiorentzis Seitz, Viestenz, Viestenz (2018) Druckanstieg nach Pars-plana-Vitrektomie – Goldmann-Tonometrie misst niedriger als dynamische Contour Tonometrie,

26. Jahrestagung der Gesellschaft der Augenärzte Sachsen-Anhalts und Thüringens e.V.

## 9 Danksagung

Mein erster und besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Professor Dr. Arne Viestenz und seiner Frau und meiner Betreuerin Dr. Anja Viestenz. Ich danke für das anfängliche Überlassen des Themas und anschließender langjähriger Unterstützung bei allen Schritten dieser Arbeit. Ich fühlte mich stets sehr persönlich und kompetent betreut. Sowohl bei der Ausarbeitung dieser Arbeit aber auch bei meinem Weg in die Ophthalmologie standen Sie mir immer mit Rat und Tat zur Seite. Auch über die Betreuung dieser Arbeit hinaus waren Sie mir eine stetige Begleitung, gaben mir berufliche Orientierung und halfen mir in den ersten Jahren als Assistenzarzt Fuß zu fassen.

Herrn Professor Dr. Berthold Seitz, Universitätsprofessor und Direktor der Klinik für Augenheilkunde Homburg Saar, danke ich für die Möglichkeit, die Arbeit unter exzellenten Bedingungen durchführen zu können. Insbesondere möchte ich erwähnen, dass die herausragende Lehre an der Universitätsaugenklinik Homburg mein Interesse für die Augenheilkunde geweckt hat und die persönliche studentische Betreuung im Verlauf mir die Arbeit erheblich erleichtert hat.

Ich danke allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Universitätsaugenklinik Homburg, die mir bei der Durchführung einzelner Arbeitsschritte geholfen haben. Trotz der tagtäglichen Arbeitsbelastung wurde sich immer Zeit genommen und man war stets hilfsbereit und freundlich.

Außerdem danke ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und medizinische Informatik der Universität des Saarlandes für die Bereitstellung der Statistik-Programme SPSS und für die Hilfestellungen zum methodischen Vorgehen bei Planung, Auswertung und statistischer Interpretation meiner Ergebnisse.

Meiner Familie danke ich herzlichst dafür, dass sie mich jederzeit unterstützt und gefördert haben und dabei immer ein offenes Ohr hatten. Meine Mutter stand mir dabei immer ermutigend zur Seite und mein Vater hat oft meinen inneren Antrieb gestärkt und mir sowohl fachlich als auch freundschaftlich zur Seite gestanden.

Mein letzter Dank gilt allen Freunden, Wegbegleitern und lieben Kollegen, die mir in der Zeit mit Rat und Tat zur Seite standen, Korrektur gelesen haben oder sich meine Sorgen angehört haben.

Vielen Dank und jede Unterstützung bei dieser Arbeit wird mir in Erinnerung bleiben.

## 10 Curriculum vitae

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird der Lebenslauf in der elektronischen Fassung der Dissertation nicht veröffentlicht.