

Aus der Universitätsaugenklinik  
der Medizinischen Fakultät  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

**Validierung des  
tensionssenkenden Effekts einer Kataraktoperation  
im Quer- und Längsschnitt  
anhand vergleichender Messungen mit  
Goldmann-Applanations- und  
dynamischer Konturtonometrie**

**Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades

Dr. med.

(doctor medicinae)

an der Medizinischen Fakultät  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

vorgelegt von      Mitja Alexander Heinrich  
geboren in          Bielefeld

Magdeburg, 2016

## **Bibliographische Beschreibung**

Heinrich, Mitja Alexander:

Validierung des tensionssenkenden Effekts einer Kataraktoperation im Quer- und Längsschnitt anhand vergleichender Messungen mit Goldmann-Applanations- und dynamischer Konturtonometrie – 2016 – 67 Bl., 14 Abb., 19 Tab., 4 Anl.

## **Kurzreferat**

Diese Dissertation dient der Validierung des tensionssenkenden Effekts einer Kataraktoperation und hinterfragt damit ein ungeschriebenes Gesetz der Ophthalmologie.

Die zugrunde liegende prospektive Studie schloss 50 Patienten ein, die einseitig an einer Katarakt operiert wurden. Zentrale Messgrößen waren der Augeninnendruck mit Goldmann-Applanations- und dynamischer Konturtonometrie mit Blick auf die Abweichung voneinander. Anhand einer Subpopulation von 29 Patienten mit schon operiertem Partnerauge erfolgte ein Querschnittsvergleich. Als Längsschnitt wurden zunächst Messungen innerhalb der 48 prä- und postoperativen Stunden betrachtet. Mehrere Monate später wurden 35 der 50 Patienten nachkontrolliert und mit ihren Ausgangswerten verglichen. Um mögliche Gründe für die erwartete Diskrepanz zwischen den Tonometern zu identifizieren, wurde der Augenvorderabschnitt mit einem Spaltlampen-OCT vermessen.

Nach einer ausführlichen statistischen und graphischen Analyse werden die Ergebnisse anhand der Fachliteratur diskutiert. Auf Basis der Konkordanz und der Validität beider Tonometer wird schließlich der eingangs genannte Effekt zwischen Fakt und Mythos eingeordnet und ein Fazit für die Praxis gezogen.

## **Schlüsselwörter**

Augeninnendruck – intraokularer Druck – (antiglaukomatöse) Kataraktoperation – tensionssenkender Effekt – Querschnitt – Längsschnitt – Goldmann-Applanationstonometrie – dynamische Konturtonometrie – optische Kohärenztomographie – Spaltlampen-OCT – Konkordanz – Validität – Streudiagramm – Bland-Altman-Plot – t-Test bei gepaarten Stichproben – Paardifferenzentest – Hornhautdicke – korneale Biomechanik

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
<b>1 Einleitung</b>	<b>8</b>
1.1 Allgemeines	8
1.2 Goldmann-Appplanationstonometrie	9
1.3 Dynamische Konturtonometrie	11
1.4 Spaltlampen-OCT	12
<b>2 Zielstellung</b>	<b>13</b>
<b>3 Material und Methoden</b>	<b>14</b>
3.1 Studiendesign und Patientenkollektiv	14
3.2 Material	15
3.2.1 Goldmann-Appplanationstonometer	16
3.2.2 Dynamisches Konturtonometer	16
3.2.3 Spaltlampen-OCT	17
3.3 Methoden	18
3.3.1 Zeitpunkt der Messungen	18
3.3.2 Statistische Methoden	19
3.3.2.1 Deskriptive Statistik	19
3.3.2.2 Längs- und Querschnittsbetrachtungen	19
3.3.2.3 Analytische Statistik	20
3.3.2.4 Hornhautdicke	20
3.3.2.5 Konkordanz beider Tonometer	21
3.3.2.6 Weitere Betrachtungen	25
<b>4 Ergebnisse</b>	<b>26</b>
4.1 Deskriptive Statistik	26
4.1.1 Demographie, Gruppen	26
4.1.2 Ophthalmochirurgie	26
4.1.3 Hornhautdicke	27
4.1.4 Augeninnendruck	27
4.1.4.1 Prä- gegen postoperativ	27
4.1.4.2 Phakes gegen pseudophakes Partnerauge	28
4.1.4.3 Präoperativ gegen Follow-Up	29
4.1.5 Augeninnendruck (unkorrigiert)	30
4.1.5.1 Prä- gegen postoperativ	30
4.1.5.2 Phakes gegen pseudophakes Partnerauge	31

4.1.5.3	Präoperativ gegen Follow-Up	31
4.2	Analytische Statistik	31
4.2.1	Hornhautdicke	32
4.2.2	Augeninnendruck	33
4.2.2.1	Prä- gegen postoperativ	33
4.2.2.2	Phakes gegen pseudophakes Partnerauge	34
4.2.2.3	Präoperativ gegen Follow-Up	34
4.2.3	Augeninnendruck (unkorrigiert)	35
4.2.3.1	Prä- gegen postoperativ	35
4.2.3.2	Phakes gegen pseudophakes Partnerauge	35
4.2.3.3	Präoperativ gegen Follow-Up	36
4.3	Graphische Analyse	36
4.3.1	Prä- gegen postoperativ	37
4.3.2	Phakes gegen pseudophakes Partnerauge	39
4.3.3	Präoperativ gegen Follow-Up	42
4.4	Korrelationen	45
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>47</b>
5.1	Konkordanz beider Tonometer	47
5.2	Validität beider Tonometer	49
5.3	Tensionssenkender Effekt einer Kataraktoperation	51
5.4	Erklärungsansätze	53
5.4.1	Dicke der Hornhaut	54
5.4.2	Biomechanik der Hornhaut	55
5.5	Fazit und Ausblick	57
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>Publikationen</b>	<b>64</b>
<b>9</b>	<b>Danksagung</b>	<b>65</b>
<b>10</b>	<b>Ehrenerklärung</b>	<b>66</b>
<b>11</b>	<b>Lebenslauf</b>	<b>67</b>

## Abkürzungsverzeichnis

$\Delta$	„Delta“, Differenz
$\Delta$ Tono	Inter-Tonometer-Differenz
CCT	Zentrale Hornhautdicke
DCT	Dynamische(s) Konturtonometrie/-tonometer
dpt	Dioptrien
GAT	Goldmann-Appplanationstonometrie/-tonometer
IOD	Intraokularer Druck
KI	Konfidenzintervall
LASEK	Laser Epitheliale Keratomileusis
LASIK	Laser In Situ Keratomileusis
LoE	Line of Equality
MD	Mittlere Differenz
mmHg	Millimeter Quecksilbersäule
MW	Mittelwert
OCT	Optische(r) Kohärenz-Tomograph(ie)
OPA	Okuläre Pulsamplitude
p	Signifikanzniveau
PEX	Pseudoexfoliation
POWG	Primäres Offenwinkelglaukom
r ( $\rho$ )	Korrelationskoeffizient nach Pearson
r <sub>ccc</sub> ( $\rho_c$ )	Konkordanz-Korrelationskoeffizient nach Lin
SD	Standardabweichung
SL-OCT	Spaltlampen-OCT

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Messung des Augeninnendrucks mit einem Goldmann- Applanationstonometer [Quelle: <a href="http://www.gemclinic.ca">http://www.gemclinic.ca</a> ]	9
Abbildung 2:	Messung des Augeninnendrucks mit einem dynamischen Konturtonometer [Quelle: <a href="http://www.ziemergroup.com">http://www.ziemergroup.com</a> ]	11
Abbildung 3:	Spaltlampen-OCT mit optionalem Druckertisch [Quelle: Heidelberg Engineering 2009: Slitlamp-OCT Installation Instructions]	12
Abbildung 4:	SL-OCT-Scan mit Funktion „Auto Biometry“ inkl. zentraler Hornhautdicke, Programm Heidelberg Eye Explorer	17
Abbildung 5:	SL-OCT-Scan nach Kataraktoperation in clear cornea-Technik, Pfeilspitzen = Schnittenden, Programm EyselabGlobal	18
Abbildung 6:	Fälle, in denen der Korrelationskoeffizient nach Pearson bei der Erfassung einer Nichtreproduzierbarkeit versagt [Quelle: Lin 1989]	23
Abbildung 7:	Bland-Altman-Plot [Quelle: Bland und Altman 1983]	24
Abbildung 8:	Streudiagramm GAT gegen DCT, 50 Messpaare blau/+/ $\dots$ = präoperativ rot/x/--- = postoperativ	37
Abbildung 9:	Bland-Altman-Plot von GAT und DCT, 50 Wertepaare blau/+/ $\dots$ = präoperativ rot/x/--- = postoperativ	39
Abbildung 10:	Streudiagramm GAT gegen DCT, 29 Messpaare blau/+/ $\dots$ = phake Augen rot/x/--- = pseudophake Augen	40
Abbildung 11:	Bland-Altman-Plot von GAT und DCT, 29 Wertepaare blau/+/ $\dots$ = phake Augen rot/x/--- = pseudophake Augen	42
Abbildung 12:	Streudiagramm GAT gegen DCT, 35 Messpaare blau/+/ $\dots$ = präoperativ rot/x/--- = Follow-Up	43
Abbildung 13:	Bland-Altman-Plot von GAT und DCT, 35 Wertepaare blau/+/ $\dots$ = präoperativ rot/x/--- = Follow-Up	45
Abbildung 14:	Diagramm von IOD-Messungen mit Referenz (grau) und DCT (schwarz) [Quelle: Boehm et al. 2008]	51

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ein- und Ausschlusskriterien	14
Tabelle 2:	Verwendete Materialien	15
Tabelle 3:	Dresdner Korrekturtabelle [Quelle: <a href="http://augen.uniklinikum-dresden.de/seite.asp?ID=150">http://augen.uniklinikum-dresden.de/seite.asp?ID=150</a> ]	21
Tabelle 4:	Zentrale Hornhautdicken (CCT) der einzelnen Gruppen	27
Tabelle 5:	Messwerte beider Tonometer, Vergleich prä- gegen postoperativ	28
Tabelle 6:	Messwerte beider Tonometer, Vergleich phakes gegen pseudophakes Partnerauge	29
Tabelle 7:	Messwerte beider Tonometer, Vergleich präoperativ gegen Follow-Up	30
Tabelle 8:	Messwerte beider Tonometer (native GAT-Werte), Vergleich prä- gegen postoperativ	30
Tabelle 9:	Messwerte beider Tonometer (native GAT-Werte), Vergleich phakes gegen pseudophakes Partnerauge	31
Tabelle 10:	Messwerte beider Tonometer (native GAT-Werte), Vergleich präoperativ gegen Follow-Up	31
Tabelle 11:	t-Test bei gepaarten Differenzen von $CCT_{prä}$ und $CCT_{post}$	32
Tabelle 12:	t-Test bei gepaarten Differenzen von $CCT_{phak}$ und $CCT_{pseu}$	32
Tabelle 13:	t-Test bei gepaarten Differenzen von $CCT_{prä}$ und $CCT_{Foll}$	32
Tabelle 14:	t-Test bei gepaarten Differenzen von $\Delta Tono_{prä}$ und $\Delta Tono_{post}$	33
Tabelle 15:	t-Test bei gepaarten Differenzen von $\Delta Tono_{phak}$ und $\Delta Tono_{pseu}$	34
Tabelle 16:	t-Test bei gepaarten Differenzen von $\Delta Tono_{prä}$ und $\Delta Tono_{Foll}$	34
Tabelle 17:	t-Test bei gepaarten Differenzen von $\Delta Tono_{prä}$ und $\Delta Tono_{post}$ (native GAT-Werte)	35
Tabelle 18:	t-Test bei gepaarten Differenzen von $\Delta Tono_{phak}$ und $\Delta Tono_{pseu}$ (native GAT-Werte)	35
Tabelle 19:	t-Test bei gepaarten Differenzen von $\Delta Tono_{prä}$ und $\Delta Tono_{Foll}$ (native GAT-Werte)	36

# 1 Einleitung

---

## 1.1 Allgemeines

Die Katarakt und das Glaukom sind weltweit die zwei häufigsten Ursachen für Erblindung (Resnikoff et al. 2004, Pascolini und Mariotti 2012). Angesichts ihrer häufigen Koinzidenz erscheint eine gemeinsame operative Intervention attraktiv, um sprichwörtlich zwei Fliegen mit einer Klappe zu schlagen. Tatsächlich werden der Kataraktoperation neben ihrem offenkundigen Effekt auf das Sehvermögen von zahlreichen Studien Auswirkungen auf den intraokularen Druck (IOD) zugeschrieben:

Einige Quellen berichten von einem signifikant niedrigeren postoperativen IOD, korreliert nach präoperativem IOD (Poley et al. 2008), sklerokornealer oder clear cornea-Schnitttechnik (Schwenn et al. 2001) und Komorbiditäten wie Pseudoexfoliationssyndrom (Merkur et al. 2001) oder verschiedenen Glaukomformen (Shingleton et al. 2006). Klink und Mitarbeiter konzentrierten sich auf das chronische Offenwinkelglaukom und fanden bei 36 zuvor unoperierten Augen einen mittleren IOD-Abfall von 2,01 mmHg 12 Monate nach Kataraktoperation (Klink et al. 2005). Andere Studien maßen entsprechend niedrigere Tensionslagen bei pseudophaken als bei phaken Augen (Jahn 1997).

Als Faustregel bei gleichzeitigem Vorliegen eines Glaukoms empfahlen Grehn und Klink die primäre Kataraktoperation für solche Augen, bei denen der Zieldruck mit ein bis zwei Sorten Antiglaukomatosa erreicht werden konnte (Grehn und Klink 2004). Einen ähnlichen Standpunkt vertraten Pillunat et al. mit ihrem Fazit, dass bei moderat erhöhtem IOD eine clear cornea-Phakoemulsifikation zu einer suffizienten Augeninnendrucksenkung führte (Pillunat et al. 2000).

Unklar bleibt der genaue Mechanismus, wie der IOD durch eine alleinige Kataraktoperation ohne einen dedizierten Eingriff wie eine Trabekulektomie gesenkt werden soll. Diverse Thesen sind zur Erklärung postuliert worden, aber ein allgemeingültiges Modell fehlt.



Andere Quellen lassen Zweifel aufkommen, ob es den genannten Effekt überhaupt gibt. Suzuki et al. beobachteten fast 500 Patienten über zehn Jahre nach Kataraktoperation und fanden mehrheitlich keine signifikanten Effekte im IOD-Verlauf (Suzuki et al. 1997). Im klinischen Alltag wundert man sich immer wieder, warum ein Glaukom nach Kataraktoperation unverändert fortschreitet, obwohl eine niedrigere Tensionslage gemessen wird.

Wenn eine Messgröße von dermaßen zentraler Bedeutung ist wie der Augeninnendruck in all den genannten Studien, dann stellt sich die Frage, wie diese Größe denn genau bestimmt wird.

## 1.2 Goldmann-Applanationstonometrie



Abbildung 1: Messung des Augeninnendrucks mit einem Goldmann-Applanationstonometer  
[Quelle: <http://www.gemclinic.ca>]

Naheliegenderweise bedient man sich fast ausnahmslos der Goldmann-Applanationstonometrie, stellt diese doch bis heute den Goldstandard der Tensionsbestimmung dar.

Dieses Verfahren wurde 1965 von Goldmann und Schmidt dem Fachpublikum vorgestellt (Goldmann und Schmidt 1965). Unbestritten hat dieses Tonometer in den vergangenen fünf Jahrzehnten hervorragende Dienste geleistet. Unbestritten ist aber auch seine Anfälligkeit für Messfehler. Zwar lassen sich einige durch einen erfahrenen Anwender vermeiden oder zumindest minimieren, andere hingegen liegen im Prinzip des Tonometers begründet (Whitacre und Stein 1993).

Von entscheidender Bedeutung ist dabei die Tatsache, dass streng genommen gar kein Druck gemessen wird, sondern nur eine Kraft, um die Hornhaut auf einem definierten Areal abzuflachen. Das Goldmann-Applanationstonometer ist damit wie viele andere auch ein Krafttonometer. Für das namensgebende Messprinzip, die Applanation, spielen neben dem Druck hinter der Hornhaut die Eigenschaften der Hornhaut selbst eine gewichtige Rolle.

Diese Eigenschaften unterliegen interindividuell teils erheblichen Schwankungen: So konnte gezeigt werden, dass die zentrale Hornhautdicke (CCT) allein (Ehlers et al. 1975, Stodtmeister 1998) und mit der vorderen Krümmung kombiniert (Harada et al. 2008), aber auch biomechanische Größen (Liu und Roberts 2005) und das Vorliegen eines Hornhautödems (Whitacre und Stein 1993) deutliche Messfehler in der Applanationstonometrie erzeugen können.

Als Reaktion hierauf entwickelten Orssengo und Pye ein mathematisches Modell, das einen Korrekturfaktor angibt, mit welchem der applanatorisch bestimmte in den tatsächlichen IOD umgerechnet werden kann (Orssengo und Pye 1999). Dieser Korrekturfaktor hängt von einigen der oben erwähnten Hornhautparameter, nämlich dem vorderen Radius und der CCT, sowie der applanierten Fläche ab. Eine weitere Arbeit zur Umrechnung des applanatorisch gemessenen in den tatsächlichen IOD wurde 2006 publiziert und genießt in Form der Dresdner Korrekturtabelle inzwischen breite klinische Akzeptanz (Kohlhaas et al. 2006). Hier findet sich erneut die CCT als wichtige, wenngleich diesmal alleinige Korrekturgröße.

### 1.3 Dynamische Konturtonometrie



Abbildung 2: Messung des Augeninnendrucks mit einem dynamischen Konturtonometer  
[Quelle: <http://www.ziemergroup.com>]

Ein halbes Jahrhundert nach Goldmann und Schmidt präsentierten Kanngiesser und Mitarbeiter mit der dynamischen Konturtonometrie (dynamic contour tonometry = DCT) ein gänzlich neues Messverfahren (Kanngiesser et al. 2005). Auf dem Pascalschen Gesetz basierend eröffnet die DCT erstmals die Möglichkeit, den IOD mittels eines piezoresistiven Drucksensors direkt und nicht von anderen Größen (wie einer Kraft bei der GAT) abgeleitet zu messen (Kanngiesser und Kniestedt 2005). Das DCT ist also tatsächlich ein Druck- und kein Krafttonometer. Sein Messkopf ist der Kontur der Hornhaut so angepasst, dass der IOD in einem praktisch kräftefreien Zustand, sprich ohne Applanation, Indentation oder sonstige Verformungen der Hornhaut, gemessen wird. Damit beeinflussen Variablen wie die CCT, die Krümmung oder der Hydrationsgrad der Hornhaut die DCT in einem bis dato unerreicht niedrigen Maße (Boehm et al. 2008, Kniestedt et al. 2005b). Mit einer Frequenz von 100 Hz wird die Messung des IOD dynamisch und erfasst auch dessen zeitliche Schwankungen als okuläre

Pulsamplitude (OPA). Insgesamt kommt dieses Tonometer dem tatsächlichen Augeninnendruck wohl am nächsten (Kanngiesser und Kniestedt 2005, Boehm et al. 2008).

## 1.4 Spaltlampen-OCT



Abbildung 3: Spaltlampen-OCT mit optionalem Druckertisch

[Quelle: Heidelberg Engineering 2009: Slitlamp-OCT Installation Instructions]

Die optische Kohärenztomographie (OCT) ist ein berührungsfreies Verfahren zur Darstellung des Augenvorder- und -hinterabschnitts. Kombiniert mit einer Spaltlampe erlaubt sie als Spaltlampen-OCT (SL-OCT) die visuelle Verifikation des Scan-Bereichs. Das kohärente Licht eines Infrarot-Lasers mit einer Wellenlänge von 1310 nm liefert ein hochauflösendes Bild, das elektronisch weiterverarbeitet werden kann (Heidelberg Engineering 2006: SL-OCT brochure). Außer an diversen anderen Strukturen lässt sich ein SL-OCT ideal an der Hornhaut einsetzen. Dabei können deren Morphologie, Dicke und Krümmung, aber auch postinterventionelle Veränderungen exakt beurteilt bzw. vermessen werden (Wirbelauer et al. 2001, Eppig et al. 2011).

## 2 Zielstellung

---

Hauptziel der vorliegenden klinischen Studie war es, den Effekt einer alleinigen, nicht mit glaukomchirurgischen Eingriffen kombinierten Kataraktoperation auf den Augeninnendruck zu validieren.

Dazu wurde ein prospektives Studiendesign entworfen, das Messungen diverser Parameter in einem Zeitfenster von 48 Stunden vor und nach Operation vorsah. Zentrale Größe war die Differenz zwischen dem mittels Goldmann-Appplanationstonometrie und dem mittels dynamischer Konturtonometrie gemessenen IOD, die sog. Inter-Tonometer-Differenz.

Eingeschlossen wurden 50 Patienten, die zu einer einseitigen Kataraktoperation stationär aufgenommen worden waren. 29 dieser Patienten hatten eine solche Operation auf dem Partnerauge bereits im Vorfeld erhalten und bildeten damit eine besonders interessante Subpopulation. 35 der 50 Patienten konnten für Nachuntersuchungen mehrere Monate nach der Kataraktoperation gewonnen werden.

Folgende Fragestellungen sollten mit Hilfe dieser Studie beantwortet werden:

1. Hat eine Kataraktoperation tatsächlich einen augeninnendrucksenkenden Effekt?
2. Ist dies ein kurzfristiger oder ein mittel- bis langfristiger Effekt? Stellt sich dieser Effekt bereits innerhalb der ersten 48 postoperativen Stunden ein – oder eher in oben genannten Subgruppen, also zwischen phakem und pseudophakem Auge ein- und desselben Patienten bzw. bei den Follow-Up-Messungen?
3. Wie fällt dieser Effekt einerseits in der GAT, andererseits in der DCT aus, gemessen zum selben Zeitpunkt und auf demselben Auge?
4. Wo liegt der Fehler, falls sich signifikante Unterschiede zwischen beiden Tonometern zeigen?

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Studiendesign und Patientenkollektiv

In diese prospektive klinische Studie wurden 50 Patienten der Augenklinik des Universitätsklinikums Magdeburg eingeschlossen. Diese Patienten waren zwischen Januar 2008 und Februar 2010 zu einer elektiven unilateralen Kataraktoperation aufgenommen worden. Eine solche auf dem Partnerauge war die einzige zugelassene Voroperation. Sämtliche anderen stattgehabten Eingriffe führten zum Ausschluss aus der Studie. Ebenso exkludiert wurden Patienten mit einer Engwinkelsituation oder einem Engwinkelglaukom. Ein weiteres wichtiges Ausschlusskriterium war das Vorliegen eines Pseudoexfoliationssyndroms oder Pseudoexfoliationsglaukoms (PEX-Syndrom oder -Glaukom), weil sich bei solcherart Augen signifikant höhere Werte für die zentrale Hornhautdicke und den Augeninnendruck messen ließen (Puska et al. 2000). Patienten mit einem primären Offenwinkelglaukom (POWG) wurden hingegen eingeschlossen.

Tabelle 1 listet alle Ein- und Ausschlusskriterien auf.

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alter &gt; 18 Jahre</li> <li>- geplante Kataraktoperation innerhalb der nächsten 48 h</li> <li>- primäres Offenwinkelglaukom (fakultativ)</li> <li>- Pseudophakie am Partnerauge (fakultativ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- akute oder chronische Erkrankungen der Bindehaut, der Hornhaut oder des Iris-Linsen-Diaphragmas</li> <li>- Zustand nach Bulbustrauma</li> <li>- Cataracta complicata</li> <li>- Engwinkelsituation oder -glaukom</li> <li>- Pseudoexfoliationssyndrom oder -glaukom</li> <li>- sonstige Glaukome, ausgenommen primäres Offenwinkelglaukom</li> <li>- Voroperationen, ausgenommen Kataraktoperation am Partnerauge</li> </ul>

Alle Patienten nahmen freiwillig an der Studie teil und unterschrieben eine Einverständniserklärung im Sinne der Deklaration von Helsinki.

Die Patienten wurden durch einen von vier erfahrenen Ophthalmochirurgen operiert. Die Operation erfolgte als Phakoemulsifikation mit sklerokornealem oder clear cornea-Zugang und Implantation einer Hinterkammerlinse in den Kapselsack.

Nachdem die ersten Ergebnisse hochsignifikant ausgefallen waren, wurde das ursprüngliche Studiendesign um Verlaufsmessungen mehrere Monate nach der Operation erweitert. Diese Untersuchungen fanden zwischen März und Mai 2010 statt. Hiermit sollte ausgeschlossen werden, dass die beobachteten Effekte nur kurzfristiger Natur waren. Für dieses sog. Follow-Up konnten 35 der 50 Patienten rekrutiert werden.

## 3.2 Material

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die in der vorliegenden Studie verwendeten Materialien.

Tabelle 2: Verwendete Materialien

Kategorie	Gerät/Hersteller
Goldmann- Applanationstonometer	AT 900, Modell BQ, Haag-Streit
Thilorbin Augentropfen	Oxybuprocainhydrochlorid 4,0 mg/ml, Fluorescein-Natrium 0,8 mg/ml, Alcon Pharma
Dynamisches Konturtonometer	PASCAL Dynamic Contour Tonometer, SMT Swiss Microtechnology
Messkappen für Dynami- sches Konturtonometer	PASCAL Sensor Caps, SMT Swiss Microtechnology
Spaltlampen-OCT	SL-OCT, Version B01, Heidelberg Engineering
Software für Spaltlampen-OCT	Heidelberg Eye Explorer, Heidelberg Engineering EyelabGlobal, 4Optics

### **3.2.1 Goldmann-Appplanationstonometer**

Ganz bewusst wurden die Tensionsbestimmungen mit dem Goldmann-Appplanationstonometer begonnen. Der Messkopf wurde zunächst so eingesetzt, dass seine Symmetrieachse mit der 0°-Achse übereinstimmte. An diese erste schloss sich eine zweite Messung mit um 90° rotiertem Messkopf an.

Hintergrund ist der Einfluss der Hornhautkrümmung auf die bekannten Appplanationstonometer. Mit Tonometern dieses Typs wird der tatsächliche IOD bei stärker gekrümmten Hornhäuten über-, bei flacheren Hornhäuten unterschätzt (Liu und Roberts 2005). Für die statistischen Untersuchungen wurde das arithmetische Mittel aus beiden Messungen gebildet, um den Effekt eines etwaigen Astigmatismus, zumindest eines regulären, auf die Appplanationstonometrie zu minimieren.

### **3.2.2 Dynamisches Konturtonometer**

Als zweites kam das dynamische Konturtonometer zum Einsatz. Zum Schutz des Auges vor Infektionen und des Drucksensors vor Beschädigungen wurde für jeden Patienten eine eigene Gummikappe (sog. Sensor Cap) verwendet. Deren ordnungsgemäßer Sitz wurde vor Aufsetzen auf die Hornhaut überprüft, insbesondere auf etwaige störende Luftblasen. Um auch die okuläre Pulsamplitude (OPA) zu erfassen, wurde mindestens fünf Sekunden lang gemessen. Während dieses Vorgangs wurde auf die akustische Rückkopplung, danach auf die Qualitätseinstufung (Q) des DCT geachtet. Messungen wurden nur bei Stufe 1–3 verwendet, bei Stufe 4–5 wiederholt. Notiert wurden die Werte IOD, OPA und Q (SMT Swiss Microtechnology 2004: Pascal Dynamic Contour Tonometer – Operating Manual).

Diese Reihenfolge der Tonometrie hat den Vorteil eines unvoreingenommenen Untersuchers. Neutralität ist hier deswegen wichtig, weil beim GAT eine gewisse Intraobserver-Variabilität nicht gänzlich auszuschließen ist. Hingegen gibt das DCT den gemessenen IOD per Display als eindeutigen Wert aus und bietet somit keinerlei Spielraum beim Ablesen des Messwertes.



Zum Ausschluss einer Interobserver-Variabilität benutzte ein- und derselbe erfahrene Ophthalmologe stets dieselben beiden ordnungsgemäß kalibrierten Tonometer (Dielemans et al. 1994).

### 3.2.3 Spaltlampen-OCT

Mittels Spaltlampen-OCT wurde eine Biometrie des vorderen Augenabschnitts erstellt. Die Analyse erfolgte semiautomatisch mit dem Programm Heidelberg Eye Explorer der Firma Heidelberg Engineering. Von besonderem Interesse war der Parameter der zentralen Hornhautdicke (CCT). Abbildung 4 zeigt die Biometrie des Vorderabschnittes eines Studienpatienten mit einer CCT von 520  $\mu\text{m}$ .

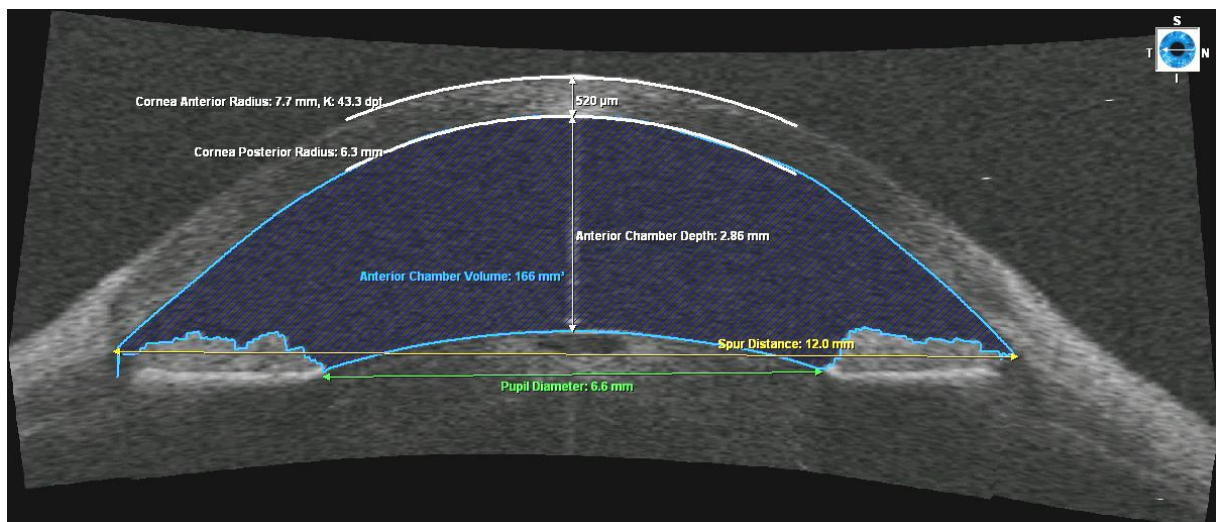


Abbildung 4: SL-OCT-Scan mit Funktion „Auto Biometry“ inkl. zentraler Hornhautdicke, Programm Heidelberg Eye Explorer

Die postoperativen Untersuchungen umfassten zusätzlich eine Vermessung des sklerokornealen bzw. clear cornea-Schnittes in horizontaler und vertikaler Richtung. Hier kam das Programm EyselabGlobal der Firma 4Optics zum Einsatz. Beide Analyseprogramme wurden von Viestenz et al. evaluiert (Viestenz et al. 2009). In Abbildung 5 ist ein Vertikal-Scan bei maximalem Abblick zu sehen. Die Pfeilspitzen markieren die Enden eines clear cornea-Schnittes.

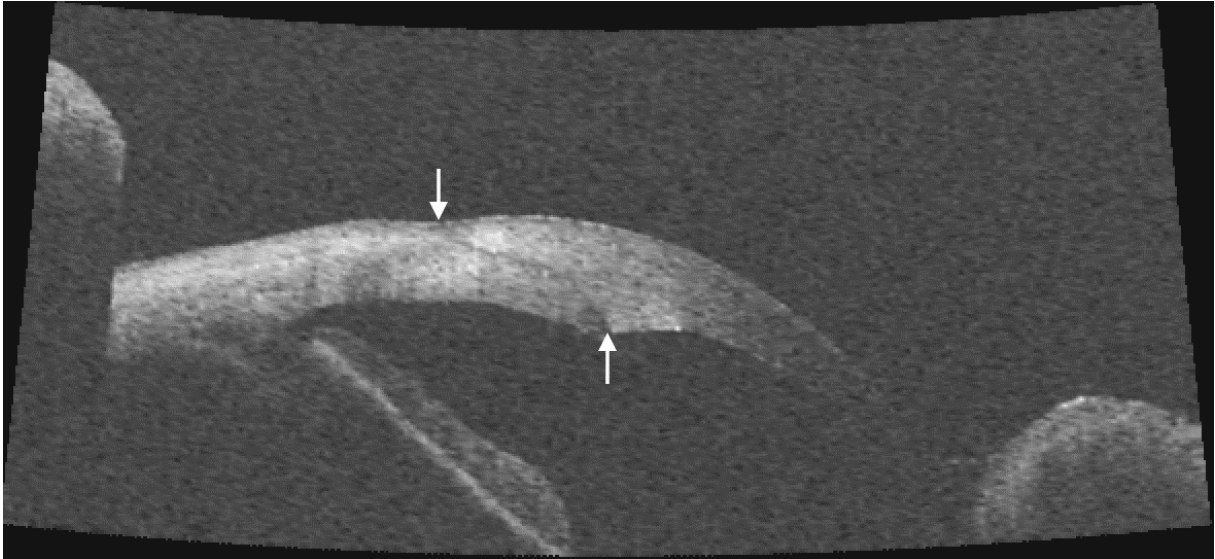


Abbildung 5: SL-OCT-Scan nach Kataraktoperation in clear cornea-Technik, Pfeilspitzen = Schnittenden, Programm EyelabGlobal

## 3.3 Methoden

### 3.3.1 Zeitpunkt der Messungen

Mit Blick auf die bekannte zirkadiane Rhythmik des Augeninnendrucks und der zentralen Hornhautdicke (Fogagnolo et al. 2006) wurden die Messungen in die Nachmittagsstunden gelegt, sofern dies mit dem Klinikalltag zu vereinbaren war.

Die präoperativen Untersuchungen fielen in fast allen Fällen auf den Vortag der Operation. Einzige Ausnahme waren unabsehbare Verschiebungen aus Gründen der Operationskapazität, die aber einen Tag nicht überschritten.

Für die postoperativen Messungen wurde der erste Tag nach erfolgter Operation angestrebt. In begründeten Ausnahmefällen musste unter Einhaltung des Zeitfensters von 48 Stunden auf den Folgetag ausgewichen werden.

Beide Augen eines Patienten wurden immer direkt hintereinander untersucht. Dies ist für den Vergleich phakes gegen pseudophakes Partnerauge wichtig (Näheres in Abschnitt 3.3.2.2).

Die Follow-Up-Messungen fanden mindestens zwei Monate nach der Operation statt.

### 3.3.2 Statistische Methoden

Sämtliche Patientendaten wurden pseudonymisiert in eine Datenbank eingegeben, die mit dem Programm SPSS für Windows erstellt wurde. Verwendet wurden die Version 15 der Firma SPSS Inc. und die Version 21 der Firma IBM unter Windows-Betriebssystemen der Firma Microsoft.

#### 3.3.2.1 Deskriptive Statistik

Als Werkzeuge kamen zunächst solche der deskriptiven Statistik zum Einsatz. Hiermit wurden Häufigkeiten eines Merkmals ermittelt und Mittelwerte (MW) mitsamt Standardabweichung (SD) berechnet, angegeben als  $MW \pm SD$ .

Die statistische Auswertung zielte in dieser Arbeit vor allem auf etwaige Unterschiede zwischen Augeninnendrücken ab. Besonderer Fokus wurde auf Abweichungen zwischen dem Goldmann-Applanations- und dem dynamischen Konturtonometer gerichtet, die sog. Inter-Tonometer-Differenz. Diese wird als  $\Delta Tono$  abgekürzt, formal gilt  $\Delta Tono = GAT - DCT$ . Eine solche Wahl von Minuend und Subtrahend berücksichtigt den Status des Goldmann-Applanationstonometers als Goldstandard: Eine positive Differenz entspricht höheren, eine negative Differenz niedrigeren Messwerten mit GAT als mit DCT.

#### 3.3.2.2 Längs- und Querschnittsbetrachtungen

Grundsätzlich erlaubte das Studiendesign drei Vergleichsansätze, die sich in den betrachteten Effekten zum Teil unterschieden:

1. prä- gegen postoperativ ( $n = 50$ ):  
Längsschnitt: dasselbe Auge, verschiedene Zeitpunkte  
kurzfristige Effekte einer Kataraktoperation
2. phak gegen pseudophak ( $n = 29$ ):  
Querschnitt: derselbe Zeitpunkt, verschiedene Augen (aber Partneraugen)  
mittel- bis langfristige Effekte einer Kataraktoperation (intraindividueller Vergleich)

3. präoperativ gegen Follow-Up (n = 35):  
Längsschnitt: dasselbe Auge, verschiedene Zeitpunkte  
mittel- bis langfristige Effekte einer Kataraktoperation

Festzustellen ist dabei Folgendes:

Zwar unterliegen die absoluten Tensionswerte durch verschiedene Zeitpunkte oder verschiedene Augen einer gewissen Verzerrung. Die relativen Werte in Form der Inter-Tonometer-Differenz sind davon jedoch unberührt, da hier Messwerte desselben Auges und praktisch desselben Zeitpunktes verrechnet werden. Damit ist die Betrachtung etwaiger Abweichungen zwischen beiden Tonometern in jedem Falle legitim, sowohl im Längs- als auch im Querschnitt.

### **3.3.2.3 Analytische Statistik**

Alle drei genannten Vergleichsansätze generierten eine Vielzahl von Daten paariger Natur: Bei Ansatz 1 und 3 ergaben sich Wertepaare aus Zeitpunkt A und Zeitpunkt B, bei Ansatz 2 Wertepaare aus Auge A und Auge B. Der Art dieser Daten entsprechend wurden Unterschiede zwischen A und B mit dem t-Test bei gepaarten Stichproben (auch Paardifferenzentest) auf Signifikanz überprüft.

Die Unterschiede wurden anhand ihres p-Wertes nach statistischer Aussagekraft aufgegliedert:

- $p < 0,1$ : tendenzieller Unterschied
- $p < 0,05$ : signifikanter Unterschied
- $p < 0,01$ : sehr signifikanter Unterschied
- $p < 0,001$ : hoch signifikanter Unterschied

### **3.3.2.4 Hornhautdicke**

Wie in der Glaukomdiagnostik heutzutage üblich und in Tabelle 3 nachzulesen, wurden die mittels GAT gemessenen Augeninnendrucke – sofern nicht anders angegeben – nach der sog. Dresdner Korrekturtabelle angepasst. Diese basiert auf der Formel  $\Delta IOD = (-0,0423 \times CCT) + 23,28$  (Kohlhaas et al. 2006).

Tabelle 3: Dresdner Korrekturtabelle

[Quelle: <http://augen.uniklinikum-dresden.de/seite.asp?ID=150>]

Hornhautdicke ( $\mu\text{m}$ )	475	500	525	550	575	600	625	650	675
Korrektur (mmHg)	+3	+2	+1	$\pm 0$	-1	-2	-3	-4	-5

Zwecks größtmöglicher Präzision wurde der Korrekturwert mit der oben genannten Formel berechnet und nicht einfach als ganze Zahl der Dresdner Korrekturtabelle entnommen.

Nun tritt nach einer Phakoemulsifikation nicht selten ein vorübergehendes Hornhautödem auf, das mit einem Anstieg der zentralen Hornhautdicke einhergeht. Wie schon Kniestedt und Mitarbeiter beschrieben, kann man annehmen, dass die Rigidität einer Hornhaut verschieden ausfallen wird, wenn sie einerseits durch ein Ödem, andererseits als hereditäre Eigenschaft verdickt ist (Kniestedt et al. 2005b). Nur für letzteren Fall hat die Dresdner Korrekturtabelle Gültigkeit. Anders formuliert: Benützte man die postoperative CCT, korrigierte man die postoperativen GAT-Werte sehr wahrscheinlich zu stark nach unten, erhielt also falsch niedrige Werte.

Um einen solchen systematischen Fehler zu vermeiden, wurde die postoperative CCT zwar gemessen, um das von der Phakoemulsifikation induzierte Hornhautödem zu quantifizieren, nicht aber zur Korrektur der GAT-Werte benutzt. Stattdessen wurden auch die postoperativen GAT-Werte anhand der präoperativen CCT korrigiert. Anders formuliert: Beide GAT-Werte, prä- wie postoperativ, wurden um denselben Korrekturwert angepasst. Zur Sicherheit erfolgte zusätzlich eine Betrachtung mit den nativen, gänzlich unkorrigierten GAT-Werten.

Abschließend ist zu betonen, dass diese Problematik für den Vergleich zwischen phakem und pseudophakem Partnerauge genauso wenig eine Rolle spielt wie für die Verlaufsmessungen Monate nach Operation, da in beiden Szenarien kein Hornhautödem zu erwarten ist. Diese Annahme wurde statistisch verifiziert.

### 3.3.2.5 Konkordanz beider Tonometer

Die Übereinstimmung zwischen Goldmann-Applanations- und dynamischem Konturtonometer wurde zunächst graphisch beurteilt. Eine anschauliche Methode ist ein x-y-

Diagramm mit GAT als Ordinate und DCT als Abszisse (oder vice versa). Jedes Paar aus „Messwert mit GAT“ und „Messwert mit DCT“ liefert einen Punkt mit ersterem als x- und zweiterem als y-Koordinate (oder vice versa), alle Paare zusammen ergeben eine Punktwolke. Die Streubreite dieser Punktwolke ist der eine wesentliche Aspekt für Konkordanz: Je weniger die Punkte um eine Gerade streuen, desto linearer hängen beide Tonometer zusammen.

Bemerkenswert ist nun der Fall, dass die Punkte nicht nur nahe, sondern sogar auf einer Geraden liegen, diese aber nicht der ersten Winkelhalbierenden entspricht. Abweichungen sind bei der Steigung und/oder dem Achsenschnittpunkt denkbar. Dann besteht zwar ein linearer Zusammenhang, aber trotzdem keine Übereinstimmung zwischen beiden Tonometern. Dieser sog. scale und/oder location shift ist der andere wesentliche Aspekt für Konkordanz.

Vor diesem Hintergrund wurde die Übereinstimmung zwischen Goldmann-Applations- und dynamischer Konturtonometrie formal mit dem sog. Konkordanz-Korrelationskoeffizienten überprüft. Lin führte diesen Koeffizienten 1989 ein und benutzte in seiner Originalarbeit die Schreibweise  $\rho_c$  (Lin 1989). Ebenso verbreitet ist die Schreibweise  $r_{ccc}$ . Dieser Koeffizient ist gegenüber dem Korrelationskoeffizienten nach Pearson  $r$  (auch  $\rho$ ) weniger gebräuchlich, bei Konkordanzbetrachtungen aber weit überlegen. Denn gerade im Falle eines scale und/oder location shift versagt  $r$  als Maß der Übereinstimmung. In die Berechnung von  $r_{ccc}$  gehen derartige Abweichungen hingegen ein. Abbildung 6 entstammt Lins Originalarbeit.

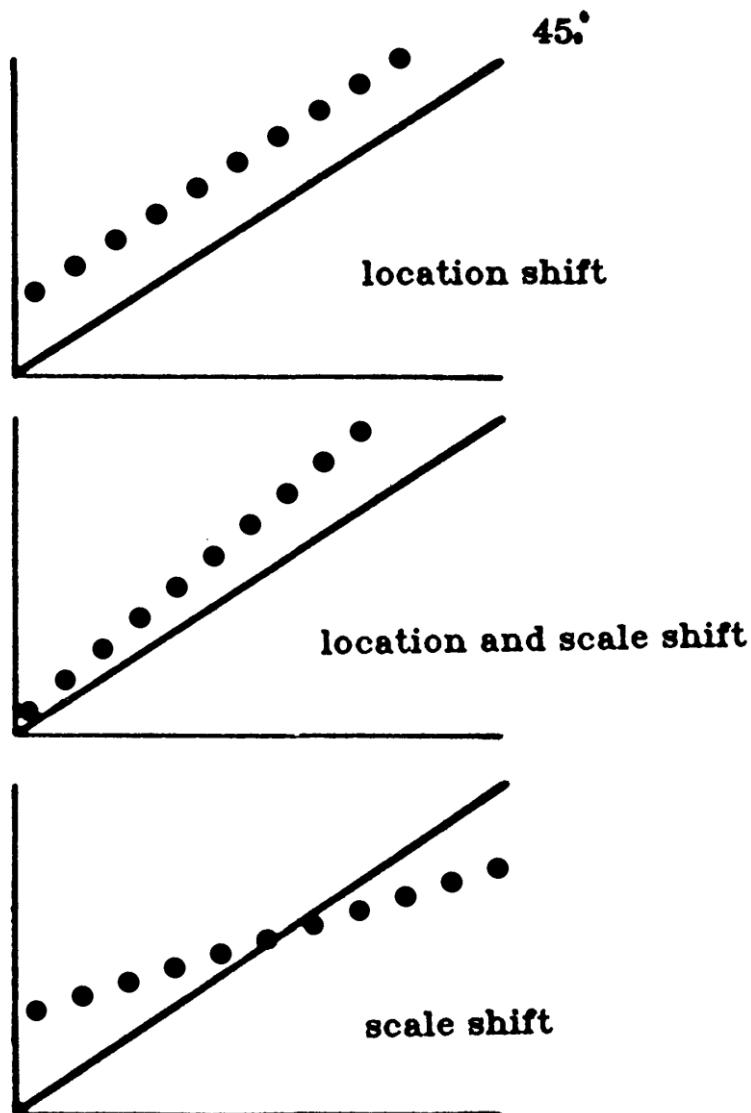


Abbildung 6: Fälle, in denen der Korrelationskoeffizient nach Pearson bei der Erfassung einer Nichtreproduzierbarkeit versagt [Quelle: Lin 1989]

Formal ausgedrückt überprüft  $r$  nur die sog. Präzision, den Grad der linearen Assoziation.  $r_{ccc}$  berücksichtigt zusätzlich die sog. „Accuracy“, hinter der sich scale und/oder location shifts verbergen.  $r_{ccc}$  ist wie auch  $r$  auf den Bereich zwischen  $-1$  und  $+1$  normiert (Gressner und Arndt 2013). Heuristisch lässt sich einem gegebenen  $r_{ccc}$  ein bestimmter Grad an Übereinstimmung zuordnen:  $< 0,10$  keine,  $0,10-0,40$  schwache,  $0,41-0,60$  deutliche,  $0,61-0,80$  starke,  $0,81-1,00$  fast vollständige Übereinstimmung (Koch und Spoerl 2007).

Ein ergänzendes Verfahren zur Beurteilung der Konkordanz ist ein sog. Bland-Altman-Plot. Von den Medizinalstatistikern Bland und Altman erstmals 1983 beschrieben (Bland und Altman 1983) und ab 1986 weithin bekannt (Bland und Altman 1986), werden hierbei die Differenzen zweier Messmethoden gegen die Mittelwerte beider Methoden aufgetragen. Wie bei Streudiagrammen erhält man also auch hier Punktwolken, bei perfekter Übereinstimmung aber entlang der Nulllinie und nicht der ersten Winkelhalbierenden (Line of Equality = LoE). Komplettiert wird ein Bland-Altman-Plot durch drei horizontale Linien: Die eine markiert die mittlere Differenz (MD), die anderen beiden das 95 %-Konfidenzintervall (KI) der Differenz (auch Grenzen der Übereinstimmung). Dieses berechnet sich als 95 %-KI =  $[MD - 1,96 SD; MD + 1,96 SD]$ . Abbildung 7 ist der erstgenannten Arbeit von Bland und Altman entnommen.

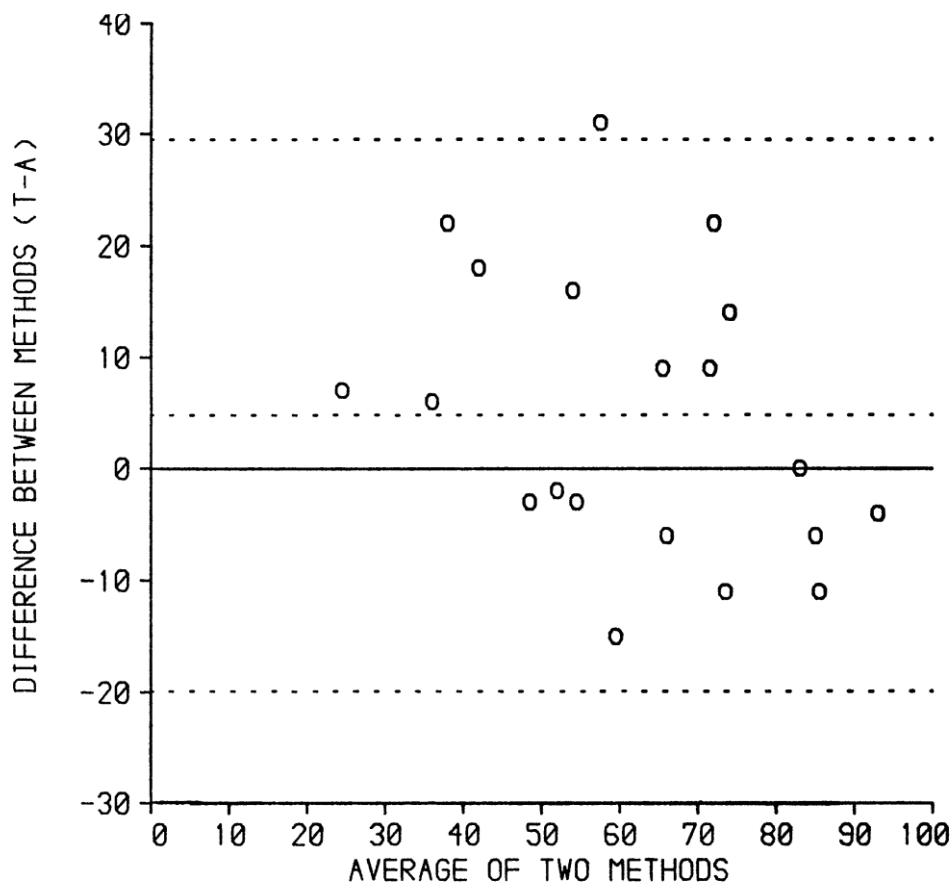


Abbildung 7: Bland-Altman-Plot [Quelle: Bland und Altman 1983]



### **3.3.2.6 Weitere Betrachtungen**

Mit den eben erläuterten Korrelationskoeffizienten eng verwandt ist die Regressionsanalyse. Mittels linearer Regression wurden Anpassungslinien durch die Punktwolken der Streudiagramme gelegt und der formale Zusammenhang zwischen beiden Tonometern untersucht.

Um etwaige Effekte der Schnitttechnik zu beurteilen, wurden die Gruppe mit sklerokornealer und die Gruppe mit clear cornea-Inzision mittels t-Test bei unabhängigen Stichproben miteinander verglichen.

Abschließend wurden Parameter, welche die beobachteten Charakteristika und Abweichungen beider Tonometer erklären könnten, gesucht und auf Plausibilität überprüft. Dabei standen die gewonnenen Erkenntnisse über die Inzisionen im Zentrum.

## 4 Ergebnisse

---

### 4.1 Deskriptive Statistik

#### 4.1.1 Demographie, Gruppen

Die 50 in diese Studie eingeschlossenen Patienten waren zwischen 39 und 86 Jahren, im Mittel  $72,3 \pm 9,2$  Jahre alt. Frauen machten 60 %, Männer 40 % der Patienten aus. Entsprechend dem Einschlusskriterium einer geplanten Kataraktoperation waren alle 50 Patienten auf mindestens einem Auge phak.

In 21 Fällen traf dies auch auf das Partnerauge zu, die übrigen 29 Patienten waren dort bereits pseudophak. Letztere bildeten damit eine interessante Untergruppe, die noch einmal separat betrachtet wurde. Die Kataraktoperation auf dem Partnerauge lag zwei Monate bis 16 Jahre zurück, der Median betrug sechs Monate.

35 der 50 Patienten konnten für Nachuntersuchungen rekrutiert werden und stellten damit die Follow-Up-Gruppe. Diese Nachuntersuchungen fanden zwei bis 15 Monate nach erfolgter Kataraktoperation mit einem Median von ebenfalls sechs Monaten statt. Acht Patienten hatten ein primäres Offenwinkelglaukom, die übrigen 42 waren in dieser Hinsicht augengesund.

#### 4.1.2 Ophthalmochirurgie

Die zu operierenden Augen teilten sich in 26 rechte und 24 linke auf. In allen 50 Fällen konnte die eingetrübte Linse mittels Phakoemulsifikation entfernt werden, eine extrakapsuläre Kataraktextraktion (ECCE) mit entsprechend größerem Schnitt war bei keinem Patienten erforderlich. Bei 29 Augen wählte der Operateur einen sklerokornealen, bei 21 Augen einen clear cornea-Zugang. Alle 50 Patienten erhielten eine kapselsackfixierte Hinterkammerlinse mit einer Brechkraft zwischen +9,0 und +28,0 dpt, im Mittel  $+21,7 \pm 3,3$  dpt. Komplikationen gab es bei keiner der 50 Operationen.

### 4.1.3 Hornhautdicke

Die zentrale Hornhautdicke (CCT) der 50 Augen betrug präoperativ  $555,2 \pm 34,3 \mu\text{m}$ , postoperativ  $581,5 \pm 44,3 \mu\text{m}$ . Wie in 3.3.2.4 erläutert, wurde die postoperative CCT nicht zur Korrektur der GAT-Werte verwendet. Die 29 pseudophaken Partneraugen kamen auf eine CCT von  $552,2 \pm 34,7 \mu\text{m}$ . Die 35 Augen mit vorliegendem Follow-Up hatten bei diesen Messungen eine CCT von  $550,3 \pm 33,0 \mu\text{m}$ . Alle Werte sind in Tabelle 4 nebeneinandergestellt.

Tabelle 4: Zentrale Hornhautdicken (CCT) der einzelnen Gruppen

	<b>präoperativ</b>	<b>postoperativ</b>	<b>pseudophak</b>	<b>Follow-Up</b>
n	50	50	29	35
CCT	$555,2 \pm 34,3 \mu\text{m}$	$581,5 \pm 44,3 \mu\text{m}$	$552,2 \pm 34,7 \mu\text{m}$	$550,3 \pm 33,0 \mu\text{m}$

### 4.1.4 Augeninnendruck

Die Messwerte der Goldmann-Appplanationstonometrie wurden nach der Dresdner Korrekturtabelle angepasst, Näheres unter 3.3.2.4.

#### 4.1.4.1 Prä- gegen postoperativ

Der Augeninnendruck (IOD) vor Kataraktoperation wurde mit Goldmann-Appplanationstonometrie (GAT) als  $17,4 \pm 4,5 \text{ mmHg}$ , mit dynamischer Konturtonometrie (DCT) als  $16,6 \pm 2,9 \text{ mmHg}$  gemessen. Damit ergab sich als Inter-Tonometer-Differenz:

$$\Delta\text{Tono}_{\text{prä}} = \text{GAT}_{\text{prä}} - \text{DCT}_{\text{prä}} = +0,80 \pm 2,70 \text{ mmHg}$$

Postoperativ kehrte sich das Bild um. Nun wurden mittels GAT mit  $16,5 \pm 6,5 \text{ mmHg}$  die niedrigeren, mittels DCT mit  $17,1 \pm 4,1 \text{ mmHg}$  die höheren Werte gemessen. Einem Abfall um  $-0,98 \text{ mmHg} \pm 4,67 \text{ mmHg}$  mit ersterem stand also ein Anstieg um  $+0,47 \text{ mmHg} \pm 3,17 \text{ mmHg}$  mit zweitem Tonometer gegenüber. Die Inter-Tonometer-Differenz wechselte das Vorzeichen und betrug nun:

$$\Delta\text{Tono}_{\text{post}} = \text{GAT}_{\text{post}} - \text{DCT}_{\text{post}} = -0,65 \pm 3,78 \text{ mmHg}$$

Insgesamt änderte sich die Inter-Tonometer-Differenz damit wie folgt:

$$\Delta(\Delta\text{Tono}) = \Delta\text{Tono}_{\text{prä}} - \Delta\text{Tono}_{\text{post}} = +0,80 \pm 2,70 \text{ mmHg} - (-0,65 \pm 3,78) \text{ mmHg}$$

$$= +1,45 \pm 2,97 \text{ mmHg}$$

Tabelle 5 fasst die Ergebnisse des Vergleichs prä- gegen postoperativ zusammen.

Tabelle 5: Messwerte beider Tonometer, Vergleich prä- gegen postoperativ

n = 50	präoperativ	postoperativ
GAT	17,4 ± 4,5 mmHg	16,5 ± 6,5 mmHg
ΔGAT	-0,98 ± 4,67 mmHg	
DCT	16,6 ± 2,9 mmHg	17,1 ± 4,1 mmHg
ΔDCT	+0,47 ± 3,17 mmHg	
ΔTono = GAT – DCT	+0,80 ± 2,70 mmHg	-0,65 ± 3,78 mmHg
Δ(ΔTono) = ΔTono <sub>prä</sub> – ΔTono <sub>post</sub>	+1,45 ± 2,97 mmHg	

#### 4.1.4.2 Phakes gegen pseudophakes Partnerauge

In der 29 Patienten umfassenden Untergruppe mit einem bereits pseudophaken Partnerauge wurde der IOD auf dem zu operierenden, also noch phaken Auge mit GAT als 18,1 ± 4,9 mmHg, mit DCT als 17,0 ± 3,3 mmHg gemessen. Dies entsprach folgender Inter-Tonometer-Differenz:

$$\Delta\text{Tono}_{\text{phak}} = \text{GAT}_{\text{phak}} - \text{DCT}_{\text{phak}} = +1,10 \pm 2,82 \text{ mmHg}$$

Am pseudophaken Partnerauge stellte sich mit beiden Tonometern eine erniedrigte Tensionslage ein, und zwar 13,5 ± 4,3 mmHg mit GAT und 14,8 ± 2,4 mmHg mit DCT. Damit war der augeninnendrucksenkende Effekt nicht konsistent, stand einem Abfall um -4,54 ± 4,15 mmHg mit GAT eine Abnahme um nur -2,12 ± 3,36 mmHg mit DCT gegenüber. Die Inter-Tonometer-Differenz wechselte erneut das Vorzeichen und betrug nun:

$$\Delta\text{Tono}_{\text{pseu}} = \text{GAT}_{\text{pseu}} - \text{DCT}_{\text{pseu}} = -1,31 \pm 2,77 \text{ mmHg}$$

Insgesamt änderte sich die Inter-Tonometer-Differenz damit wie folgt:

$$\begin{aligned} \Delta(\Delta\text{Tono}) &= \Delta\text{Tono}_{\text{phak}} - \Delta\text{Tono}_{\text{pseu}} = +1,10 \pm 2,82 \text{ mmHg} - (-1,31 \pm 2,77) \text{ mmHg} \\ &= +2,41 \pm 1,92 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

Tabelle 6 fasst die Ergebnisse des Vergleichs phakes gegen pseudophakes Partnerauge zusammen.

Tabelle 6: Messwerte beider Tonometer, Vergleich phakes gegen pseudophakes Partnerauge

n = 29	phakes Auge	pseudophakes Auge
GAT	18,1 ± 4,9 mmHg	13,5 ± 4,3 mmHg
ΔGAT	-4,54 ± 4,15 mmHg	
DCT	17,0 ± 3,3 mmHg	14,8 ± 2,4 mmHg
ΔDCT	-2,12 ± 3,36 mmHg	
ΔTono = GAT – DCT	+1,10 ± 2,82 mmHg	-1,31 ± 2,77 mmHg
Δ(ΔTono) = ΔTono <sub>phak</sub> – ΔTono <sub>pseu</sub>	+2,41 ± 1,92 mmHg	

#### 4.1.4.3 Präoperativ gegen Follow-Up

In der 35 Patienten umfassenden Follow-Up-Gruppe wurde der präoperative IOD mittels GAT als 17,6 ± 4,5 mmHg, mittels DCT als 16,5 ± 2,9 mmHg gemessen. Damit ergab sich als Inter-Tonometer-Differenz:

$$\Delta Tono_{\text{prä}} = GAT_{\text{prä}} - DCT_{\text{prä}} = +1,09 \pm 2,90 \text{ mmHg}$$

Bei den Nachuntersuchungen kam die GAT auf 13,1 ± 3,8 mmHg, die DCT auf 15,5 ± 2,7 mmHg. Damit wurde der mittel- bis langfristige augeninnendrucksenkende Effekt von beiden Tonometern stark unterschiedlich gemessen, nämlich als -4,54 ± 4,10 mmHg mit GAT und nur -1,07 ± 2,71 mmHg mit DCT. Konsistent war hingegen der abermalige Vorzeichenwechsel bei der Inter-Tonometer-Differenz:

$$\Delta Tono_{\text{Foll}} = GAT_{\text{Foll}} - DCT_{\text{Foll}} = -2,39 \pm 2,57 \text{ mmHg}$$

Insgesamt änderte sich die Inter-Tonometer-Differenz damit wie folgt:

$$\begin{aligned} \Delta(\Delta Tono) &= \Delta Tono_{\text{prä}} - \Delta Tono_{\text{Foll}} = +1,09 \pm 2,90 \text{ mmHg} - (-2,39 \pm 2,57) \text{ mmHg} \\ &= +3,48 \pm 3,00 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

Tabelle 7 fasst die Ergebnisse des Vergleichs präoperativ gegen Follow-Up zusammen.

Tabelle 7: Messwerte beider Tonometer, Vergleich präoperativ gegen Follow-Up

n = 35	präoperativ	Follow-Up
GAT	17,6 ± 4,5 mmHg	13,1 ± 3,8 mmHg
$\Delta$ GAT	-4,54 ± 4,10 mmHg	
DCT	16,5 ± 2,9 mmHg	15,5 ± 2,7 mmHg
$\Delta$ DCT	-1,07 ± 2,71 mmHg	
$\Delta$ Tono = GAT – DCT	+1,09 ± 2,90 mmHg	-2,39 ± 2,57 mmHg
$\Delta(\Delta$ Tono) = $\Delta$ Tono <sub>prä</sub> – $\Delta$ Tono <sub>Foll</sub>	+3,48 ± 3,00 mmHg	

#### 4.1.5 Augeninnendruck (unkorrigiert)

Zur Sicherheit werden nun analoge Berechnungen, jedoch mit den nativen, unkorrigierten GAT-Werten durchgeführt. Es wird sich auf die tabellarische Darstellung beschränkt (Tabellen 8 bis 10).

##### 4.1.5.1 Prä- gegen postoperativ

Tabelle 8: Messwerte beider Tonometer (native GAT-Werte), Vergleich prä- gegen postoperativ

n = 50	präoperativ	postoperativ
GAT <sub>nativ</sub>	17,6 ± 4,8 mmHg	16,7 ± 6,7 mmHg
$\Delta$ GAT <sub>nativ</sub>	-0,98 ± 4,67 mmHg	
DCT	16,6 ± 2,9 mmHg	17,1 ± 4,1 mmHg
$\Delta$ DCT	+0,47 ± 3,17 mmHg	
$\Delta$ Tono = GAT <sub>nativ</sub> – DCT	+1,01 ± 3,24 mmHg	-0,45 ± 3,80 mmHg
$\Delta(\Delta$ Tono) = $\Delta$ Tono <sub>prä</sub> – $\Delta$ Tono <sub>post</sub>	+1,46 ± 2,97 mmHg	

### 4.1.5.2 Phakes gegen pseudophakes Partnerauge

Tabelle 9: Messwerte beider Tonometer (native GAT-Werte), Vergleich phakes gegen pseudophakes Partnerauge

n = 29	phakes Auge	pseudophakes Auge
GAT <sub>nativ</sub>	18,1 ± 5,4 mmHg	13,6 ± 4,4 mmHg
ΔGAT <sub>nativ</sub>	-4,53 ± 4,19 mmHg	
DCT	17,0 ± 3,3 mmHg	14,8 ± 2,4 mmHg
ΔDCT	-2,12 ± 3,36 mmHg	
ΔTono = GAT <sub>nativ</sub> - DCT	+1,18 ± 3,43 mmHg	-1,23 ± 3,09 mmHg
Δ(ΔTono) = ΔTono <sub>phak</sub> - ΔTono <sub>pseu</sub>	+2,41 ± 1,92 mmHg	

### 4.1.5.3 Präoperativ gegen Follow-Up

Tabelle 10: Messwerte beider Tonometer (native GAT-Werte), Vergleich präoperativ gegen Follow-Up

n = 35	präoperativ	Follow-Up
GAT <sub>nativ</sub>	17,8 ± 4,8 mmHg	13,1 ± 3,7 mmHg
ΔGAT <sub>nativ</sub>	-4,67 ± 4,26 mmHg	
DCT	16,5 ± 2,9 mmHg	15,5 ± 2,7 mmHg
ΔDCT	-1,07 ± 2,71 mmHg	
ΔTono = GAT <sub>nativ</sub> - DCT	+1,21 ± 3,38 mmHg	-2,39 ± 2,57 mmHg
Δ(ΔTono) = ΔTono <sub>prä</sub> - ΔTono <sub>Foll</sub>	+3,61 ± 3,11 mmHg	

Wie der Vergleich mit Abschnitt 4.1.4 ergibt, stimmen alle drei Δ(ΔTono) als zentrale Ergebnisse überein oder fallen sogar noch deutlicher aus.

## 4.2 Analytische Statistik

Nachdem im vorherigen Abschnitt Unterschiede zwischen diversen Größen als Mittelwert ± Standardabweichung angegeben wurden, folgt nun die Überprüfung auf statis-

tische Signifikanz. Der Art der zugrunde liegenden Daten entsprechend kommt der t-Test bei gepaarten Stichproben (auch Paardifferenzentest) zum Einsatz.

### 4.2.1 Hornhautdicke

Die Tabellen 11 bis 13 zeigen die Ergebnisse der Signifikanztests für die Prüfgröße CCT.

Tabelle 11: t-Test bei gepaarten Differenzen von  $CCT_{prä}$  und  $CCT_{post}$

n = 50	<b>präoperativ</b>	<b>postoperativ</b>
CCT	555,2 ± 34,3 µm	581,5 ± 44,3 µm
gepaarte Differenzen ( $CCT_{post} - CCT_{prä}$ )		
MW	+26,3 µm	
95 %-KI der Differenz	[+17,6 µm; +35,1 µm]	
Signifikanz p	< 0,000001	

Tabelle 12: t-Test bei gepaarten Differenzen von  $CCT_{phak}$  und  $CCT_{pseu}$

n = 29	<b>phakes Auge</b>	<b>pseudophakes Auge</b>
CCT	552,1 ± 36,4 µm	552,2 ± 34,7 µm
gepaarte Differenzen ( $CCT_{pseu} - CCT_{phak}$ )		
MW	+0,1 µm	
95 %-KI der Differenz	[-6,4 µm; +6,7 µm]	
Signifikanz p	0,974	

Tabelle 13: t-Test bei gepaarten Differenzen von  $CCT_{prä}$  und  $CCT_{Foll}$

n = 35	<b>präoperativ</b>	<b>Follow-Up</b>
CCT	553,3 ± 33,9 µm	550,3 ± 33,0 µm
gepaarte Differenzen ( $CCT_{Foll} - CCT_{prä}$ )		
MW	-3,1 µm	
95 %-KI der Differenz	[-8,3 µm; +2,1 µm]	
Signifikanz p	0,240	



Wie unter 3.3.2.4 erläutert, kam es in der postoperativen Gruppe zu einem Anstieg der CCT als Folge eines operationsbedingten Hornhautödems. Der Unterschied zur präoperativen CCT war mit  $p < 0,000001$  statistisch hoch signifikant. Es sei daran erinnert, dass die postoperative CCT nicht zur Korrektur von Augeninnendrücken verwendet wurde (siehe ebenfalls 3.3.2.4).

Beide anderen Vergleichsbetrachtungen zeigten mit  $p = 0,974$  bzw.  $p = 0,240$  keinen statistisch signifikanten, noch nicht einmal einen tendenziellen Unterschied in der CCT.

## 4.2.2 Augeninnendruck

Nun werden die drei zentralen Ergebnisse aus Abschnitt 4.1.4, nämlich die Diskrepanzen in der Inter-Tonometer-Differenz zwischen prä- und postoperativ, zwischen phakem und pseudophakem Partnerauge und zwischen präoperativ und Follow-Up, auf Signifikanz überprüft. Dies entspricht einer Testung der drei  $\Delta(\Delta\text{Tono})$  aus 4.1.4.1 bis 4.1.4.3. Dazu werden Differenzen von gepaarten Inter-Tonometer-Differenzen gebildet, nicht Differenzen von gepaarten GAT- und DCT-Werten an sich. Der Hintergrund ist in Abschnitt 3.3.2.2 erläutert. Klarheit schafft zusätzlich der Blick auf die Tabellen 14 bis 16, in denen die gepaarten Differenzen konkret genannt sind.

### 4.2.2.1 Prä- gegen postoperativ

Tabelle 14: t-Test bei gepaarten Differenzen von  $\Delta\text{Tono}_{\text{prä}}$  und  $\Delta\text{Tono}_{\text{post}}$

n = 50	<b>präoperativ</b>	<b>postoperativ</b>
$\Delta\text{Tono} = \text{GAT} - \text{DCT}$	+0,80 ± 2,70 mmHg	-0,65 ± 3,78 mmHg
gepaarte Differenzen ( $\Delta\text{Tono}_{\text{prä}} - \Delta\text{Tono}_{\text{post}}$ )		
MW	+1,45 mmHg	
95 %-KI der Differenz	[+0,61 mmHg; +2,29 mmHg]	
Signifikanz p	0,0011	

### 4.2.2.2 Phakes gegen pseudophakes Partnerauge

Tabelle 15: t-Test bei gepaarten Differenzen von  $\Delta\text{Tono}_{\text{phak}}$  und  $\Delta\text{Tono}_{\text{pseu}}$

n = 29	phakes Auge	pseudophakes Auge
$\Delta\text{Tono} = \text{GAT} - \text{DCT}$	$+1,10 \pm 2,82 \text{ mmHg}$	$-1,31 \pm 2,77 \text{ mmHg}$
gepaarte Differenzen ( $\Delta\text{Tono}_{\text{phak}} - \Delta\text{Tono}_{\text{pseu}}$ )		
MW	$+2,41 \text{ mmHg}$	
95 %-KI der Differenz	$[+1,69 \text{ mmHg}; +3,14 \text{ mmHg}]$	
Signifikanz p	$< 0,000001$	

### 4.2.2.3 Präoperativ gegen Follow-Up

Tabelle 16: t-Test bei gepaarten Differenzen von  $\Delta\text{Tono}_{\text{prä}}$  und  $\Delta\text{Tono}_{\text{Foll}}$

n = 35	präoperativ	Follow-Up
$\Delta\text{Tono} = \text{GAT} - \text{DCT}$	$+1,09 \pm 2,90 \text{ mmHg}$	$-2,39 \pm 2,57 \text{ mmHg}$
gepaarte Differenzen ( $\Delta\text{Tono}_{\text{prä}} - \Delta\text{Tono}_{\text{Foll}}$ )		
MW	$+3,48 \text{ mmHg}$	
95 %-KI der Differenz	$[+2,45 \text{ mmHg}; +4,51 \text{ mmHg}]$	
Signifikanz p	$< 0,000001$	

In allen drei Vergleichsansätzen fielen die Ergebnisse statistisch signifikant aus:

Beim Vergleich zwischen prä- und postoperativ ergab sich ein sehr, fast hoch signifikanter Unterschied von  $+1,45 \text{ mmHg}$  in der Inter-Tonometer-Differenz ( $p = 0,0011$ ). Der Vergleich zwischen phakem und pseudophakem Auge wie auch zwischen präoperativ und Follow-Up lieferte nicht nur hoch signifikante Ergebnisse, sondern unterbot diese Grenze vom p-Wert abermals um das Tausendfache ( $p < 0,000001$ ). Zudem fiel die Inter-Tonometer-Differenz auch vom Betrag noch deutlicher aus und erreichte Werte von  $+2,41 \text{ mmHg}$  und sogar  $+3,48 \text{ mmHg}$ .

### 4.2.3 Augeninnendruck (unkorrigiert)

Der Vollständigkeit halber folgen nun noch Signifikanztests mit den nativen, unkorrigierten GAT-Werten. Der zugrunde liegende statistische Ansatz ist derselbe wie im Abschnitt zuvor. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt allein tabellarisch (Tabellen 17 bis 19).

#### 4.2.3.1 Prä- gegen postoperativ

Tabelle 17: t-Test bei gepaarten Differenzen von  $\Delta\text{Tono}_{\text{prä}}$  und  $\Delta\text{Tono}_{\text{post}}$  (native GAT-Werte)

n = 50	<b>präoperativ</b>	<b>postoperativ</b>
$\Delta\text{Tono} = \text{GAT}_{\text{nativ}} - \text{DCT}$	+1,01 ± 3,24 mmHg	-0,45 ± 3,80 mmHg
gepaarte Differenzen ( $\Delta\text{Tono}_{\text{prä}} - \Delta\text{Tono}_{\text{post}}$ )		
MW	+1,46 mmHg	
95 %-KI der Differenz	[+0,61 mmHg; +2,30 mmHg]	
Signifikanz p	0,0011	

#### 4.2.3.2 Phakes gegen pseudophakes Partnerauge

Tabelle 18: t-Test bei gepaarten Differenzen von  $\Delta\text{Tono}_{\text{phak}}$  und  $\Delta\text{Tono}_{\text{pseu}}$  (native GAT-Werte)

n = 29	<b>phakes Auge</b>	<b>pseudophakes Auge</b>
$\Delta\text{Tono} = \text{GAT}_{\text{nativ}} - \text{DCT}$	+1,18 ± 3,43 mmHg	-1,23 ± 3,09 mmHg
gepaarte Differenzen ( $\Delta\text{Tono}_{\text{phak}} - \Delta\text{Tono}_{\text{pseu}}$ )		
MW	+2,41 mmHg	
95 %-KI der Differenz	[+1,68 mmHg; +3,14 mmHg]	
Signifikanz p	< 0,000001	

### 4.2.3.3 Präoperativ gegen Follow-Up

Tabelle 19: t-Test bei gepaarten Differenzen von  $\Delta\text{Tono}_{\text{prä}}$  und  $\Delta\text{Tono}_{\text{Foll}}$  (native GAT-Werte)

n = 35	präoperativ	Follow-Up
$\Delta\text{Tono} = \text{GAT}_{\text{nativ}} - \text{DCT}$	$+1,21 \pm 3,38 \text{ mmHg}$	$-2,39 \pm 2,57 \text{ mmHg}$
gepaarte Differenzen ( $\Delta\text{Tono}_{\text{prä}} - \Delta\text{Tono}_{\text{Foll}}$ )		
MW	$+3,61 \text{ mmHg}$	
95 %-KI der Differenz	$[+2,54 \text{ mmHg}; +4,68 \text{ mmHg}]$	
Signifikanz p	$< 0,000001$	

Wie der Vergleich zu 4.2.2 zeigt, beeinflusst eine fehlende Korrektur der GAT-Werte die Signifikanz in keinsten Weise. Ob korrigiert oder nativ, mit GAT-Werten beider Art ergeben alle drei Vergleichsansätze sehr bis hoch signifikante Ergebnisse.

## 4.3 Graphische Analyse

Die Kapitel 4.1 und 4.2 haben sowohl vom Betrag als auch von der Signifikanz z.T. erhebliche Unterschiede zwischen beiden Tonometern demonstriert. In diesem Abschnitt wird die mehr oder weniger gute Übereinstimmung graphisch dargestellt. Die theoretischen Hintergründe sind in Abschnitt 3.3.2.5 erläutert.

Konkret wurden Streudiagramme erstellt, die beide Gruppen eines jeden der drei Vergleichsansätze beinhalten. Als Abszisse wurde das dynamische Konturtonometer, als Ordinate das Goldmann-Appplanationstonometer gewählt. Eine derartige Zuordnung von Tonometern und Achsen trägt dem Status des Goldmann-Appplanationstonometers als Goldstandard Rechnung: Liegt ein Punkt unterhalb der ersten Winkelhalbierenden entsprechend der Line of Equality (LoE), so liegt auch der Messwert mit GAT unterhalb dessen mit DCT. Komplettiert wurden die Streudiagramme durch Regressionsgeraden für beide jeweiligen Punktwolken.

Als ergänzende Darstellung der Übereinstimmung beider Tonometer folgen Bland-Altman-Plots.

### 4.3.1 Prä- gegen postoperativ

Im Streudiagramm aus Abbildung 8 stellt die blaue Punktwolke (+) die 50 präoperativen, die rote Punktwolke (x) die 50 postoperativen Messpaare dar.

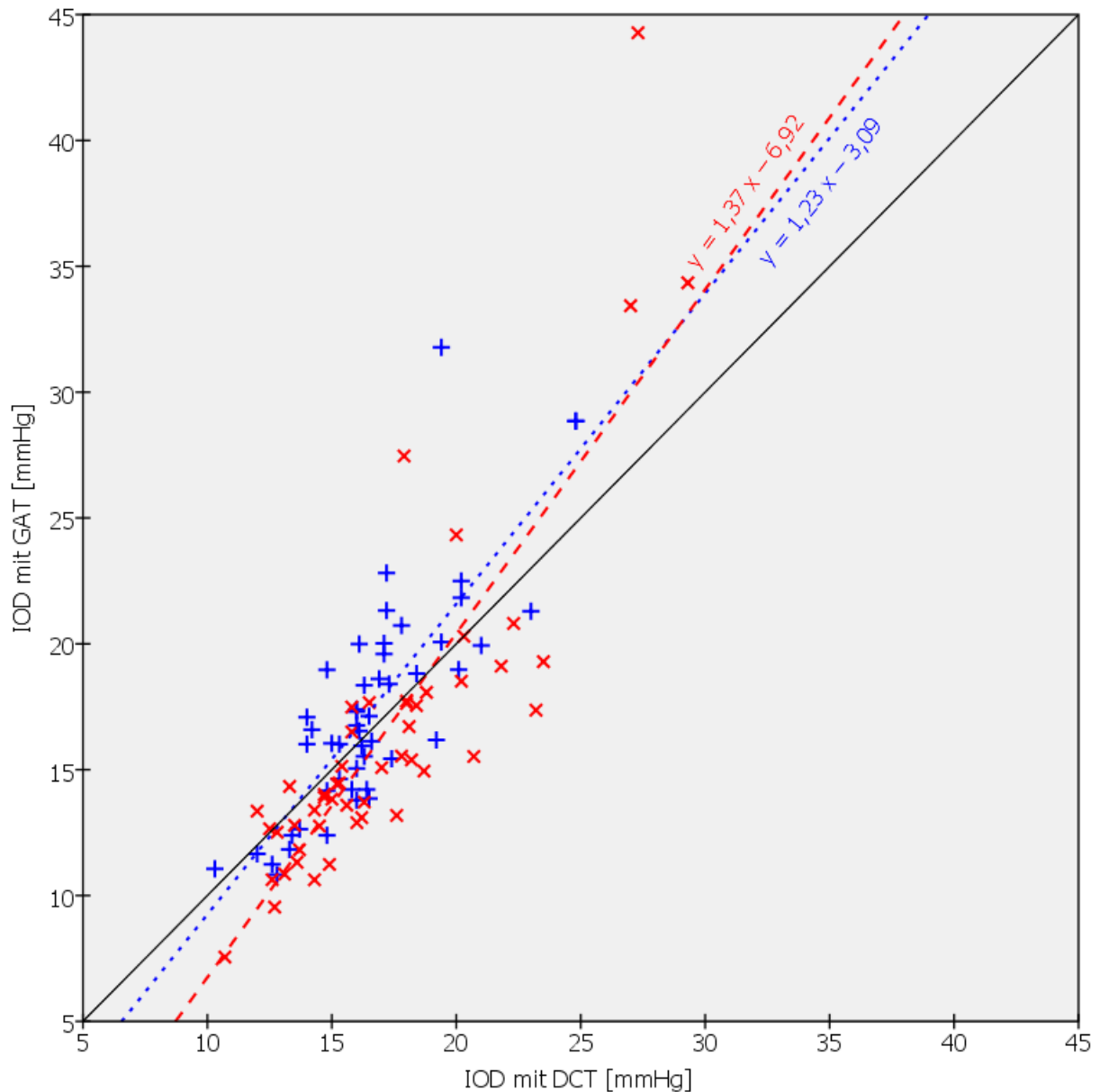


Abbildung 8: Streudiagramm GAT gegen DCT, 50 Messpaare  
 blau/+/... = präoperativ    rot/x/--- = postoperativ

Die Verteilung der Punkte war in zweierlei Hinsicht auffällig:

Erstens war die blaue Punktwolke insgesamt weiter oben und links lokalisiert als die rote. Zweitens lag die Mehrheit der blauen Punkte oberhalb, die große Mehrheit der

roten Punkte unterhalb der LoE. Dies entsprach präoperativ höheren, postoperativ niedrigeren GAT- als DCT-Werten.

Objektivieren lässt sich dieser Eindruck mittels linearer Regression: Beide Anpassungslinien schnitten sich bei einem Augeninnendruck von 28,8 mmHg mit DCT und 32,5 mmHg mit GAT. Bei niedrigeren und damit fast allen gemessenen Werten verlief die rote Regressionsgerade (---) unterhalb der blauen (···), was einen Abfall der GAT-Werte nach Kataraktoperation widerspiegelte.

Absolute Werte lassen sich unter Berücksichtigung der LoE berechnen, indem deren Schnittpunkt mit beiden Regressionsgeraden bestimmt wird: Präoperativ wurden bis auf einige wenige Fälle unterhalb von 13,2 mmHg mit GAT höhere Werte als mit DCT gemessen. Nach Kataraktoperation kehrte sich das Bild um: Nun dominierten entsprechend einem Schnittpunkt bei 18,8 mmHg die Fälle mit niedrigeren GAT- als DCT-Werten.

Der Konkordanz-Korrelationskoeffizient  $r_{ccc}$  stieg von 0,728 präoperativ auf 0,754 postoperativ. Die stärkere Abweichung der postoperativen Regressionsgeraden von der LoE wird durch eine geringere Streubreite der zugehörigen Punktwolke überkompensiert.

Im Bland-Altman-Plot aus Abbildung 9 lassen sich die wesentlichen Ergebnisse ebenfalls ablesen: Die mittlere Differenz (MD) zwischen GAT und DCT betrug präoperativ +0,80 mmHg, postoperativ hingegen -0,65 mmHg. Diese mittleren Differenzen sind nichts anderes als die Inter-Tonometer-Differenzen aus Abschnitt 4.1.4.1. Die Grenzen der Übereinstimmung lagen für die blauen bei -4,49 mmHg und +6,10 mmHg, für die roten Wertepaare bei -8,05 mmHg und +6,76 mmHg. Postoperativ streuten die Messwerte also mehr. Diese Streuung nahm mit höheren IOD-Werten zu.

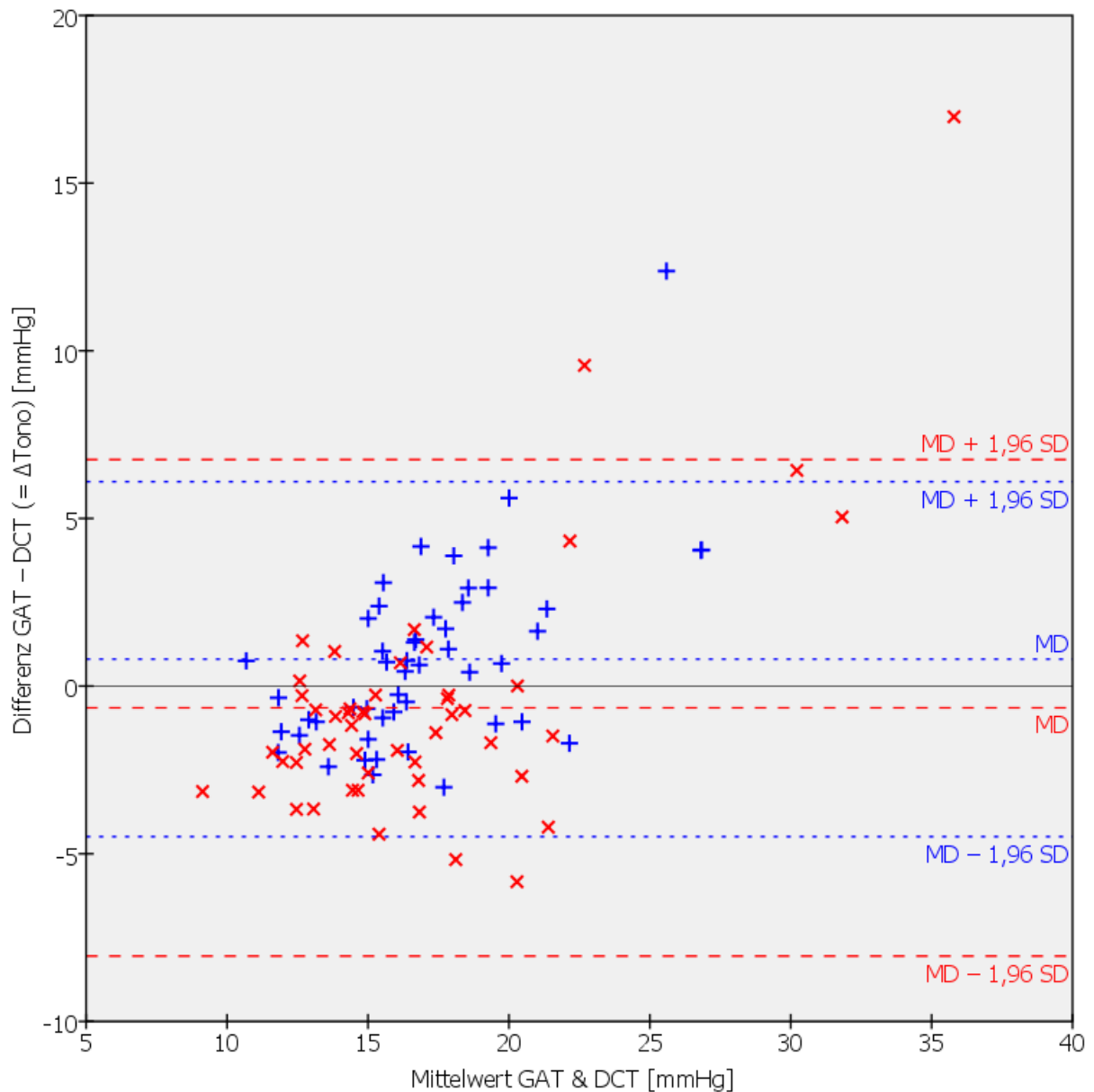


Abbildung 9: Bland-Altman-Plot von GAT und DCT, 50 Wertepaare  
 blau/+/ $\dots$  = präoperativ      rot/x/--- = postoperativ

### 4.3.2 Phakes gegen pseudophakes Partnerauge

Im Streudiagramm aus Abbildung 10 repräsentiert die blaue Punktwolke die 29 zu operierenden, also noch phaken Augen, die rote Punktwolke die 29 bereits pseudophaken Partneraugen.

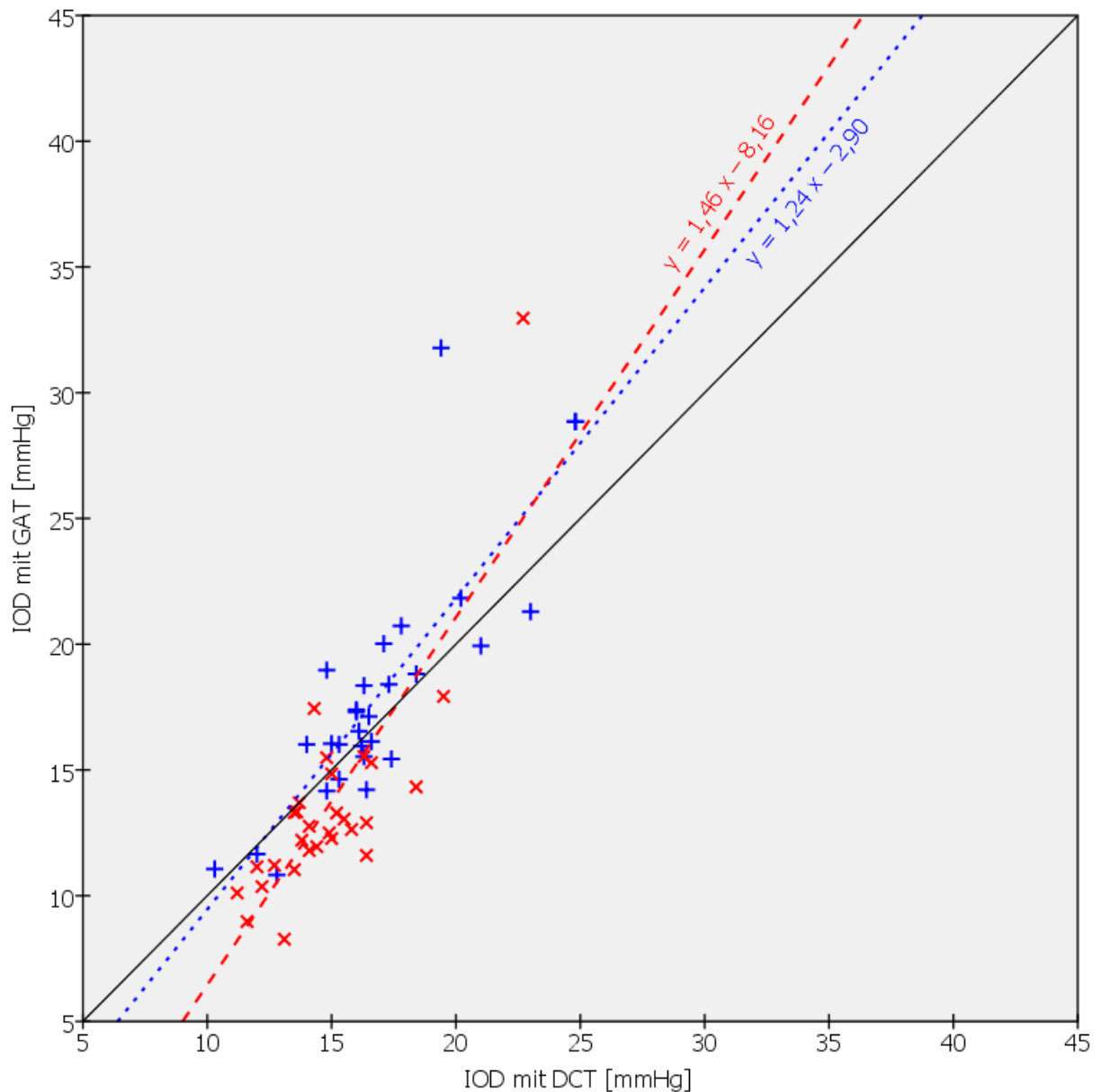


Abbildung 10: Streudiagramm GAT gegen DCT, 29 Messpaare

blau/+/... = phake Augen    rot/x/--- = pseudophake Augen

Die Verteilung der Punkte war auch in diesem Vergleichsansatz bemerkenswert:

Zum einen waren die Punktwolken wieder schräg zueinander versetzt, diesmal aber deutlicher voneinander separiert. Zum anderen orientierten sie sich strenger an der LoE: War die Position der blauen Wolke noch nicht allzu charakteristisch, so lagen die roten Punkte bis auf wenige Ausnahmen unterhalb der LoE. Letzteres entsprach niedrigeren GAT- als DCT-Werten in der Gruppe der pseudophaken Augen.

Beide Regressionsgeraden schnitten sich bei einem Augeninnendruck von 23,3 mmHg mit DCT und 25,9 mmHg mit GAT. Bei niedrigeren und damit fast allen gemessenen



Werten verlief die rote Anpassungslinie unterhalb der blauen, was niedrigeren GAT-Werten bei pseudophaken als bei phaken Augen gleichkam.

Als Schnittpunkte mit der LoE ließ sich für die blaue Regressionsgerade ein IOD von 12,3 mmHg, für die rote von 17,7 mmHg berechnen. Absolut betrachtet lagen damit die meisten phaken Augen im Bereich höherer und die meisten pseudophaken Augen im Bereich niedrigerer GAT- als DCT-Werte.

Der Konkordanz-Korrelationskoeffizient  $r_{CCC}$  betrug 0,752 bei phaken und nur 0,645 bei pseudophaken Augen. Der Grund ist im höheren scale und location shift der roten Regressionsgeraden mit einer besonders deutlichen Abweichung von der LoE bei niedrigen Augeninnendrücken zu sehen.

Der Bland-Altman-Plot aus Abbildung 11 bestätigt den frappierend hohen Anteil pseudophaker Augen mit niedrigeren GAT- als DCT-Werten: 25 der 29 roten Punkte lagen im Bereich negativer Differenzen, wohingegen die blauen Punkte sich neutraler und insgesamt oberhalb der Nulllinie verteilten. Dies deckte sich mit einer MD von  $-1,31$  mmHg für erstere und  $+1,10$  mmHg für letztere Augen, die den Inter-Tonometer-Differenzen aus Abschnitt 4.1.4.2 entsprechen. Die Grenzen der Übereinstimmung lagen für die roten bei  $-6,74$  mmHg und  $+4,12$  mmHg, für die blauen Wertepaare bei  $-4,42$  mmHg und  $+6,63$  mmHg. Die Streuung der Messwerte war damit in beiden Gruppen ähnlich breit, aber gegeneinander verschoben.

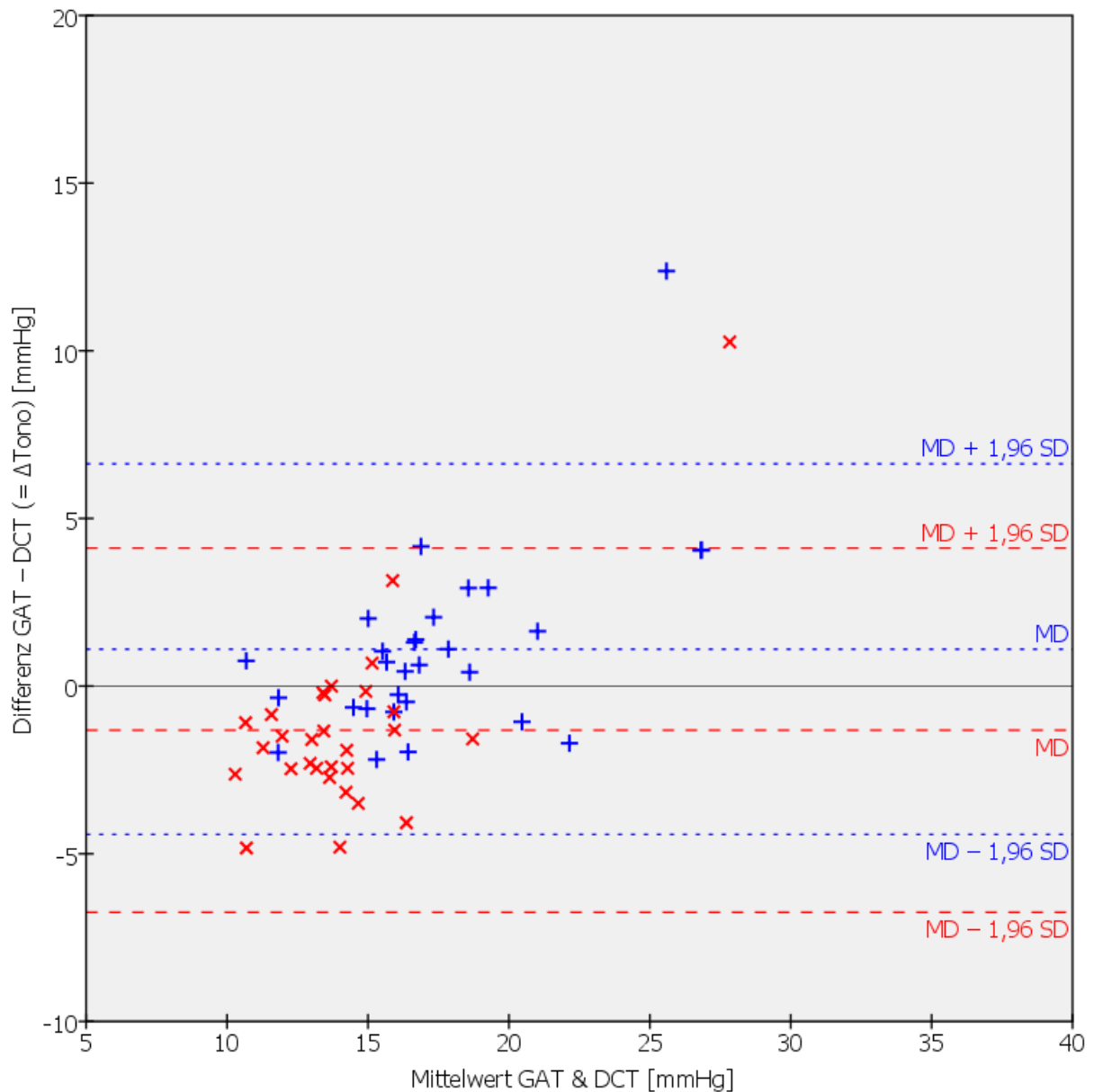


Abbildung 11: Bland-Altman-Plot von GAT und DCT, 29 Wertepaare

blau/+/-... = phake Augen    rot/x/-... = pseudophake Augen

### 4.3.3 Präoperativ gegen Follow-Up

Im Streudiagramm aus Abbildung 12 steht die blaue Punktwolke für die präoperativen, die rote Punktwolke für die Verlaufsmessungen der 35 Patienten umfassenden Follow-Up-Gruppe.

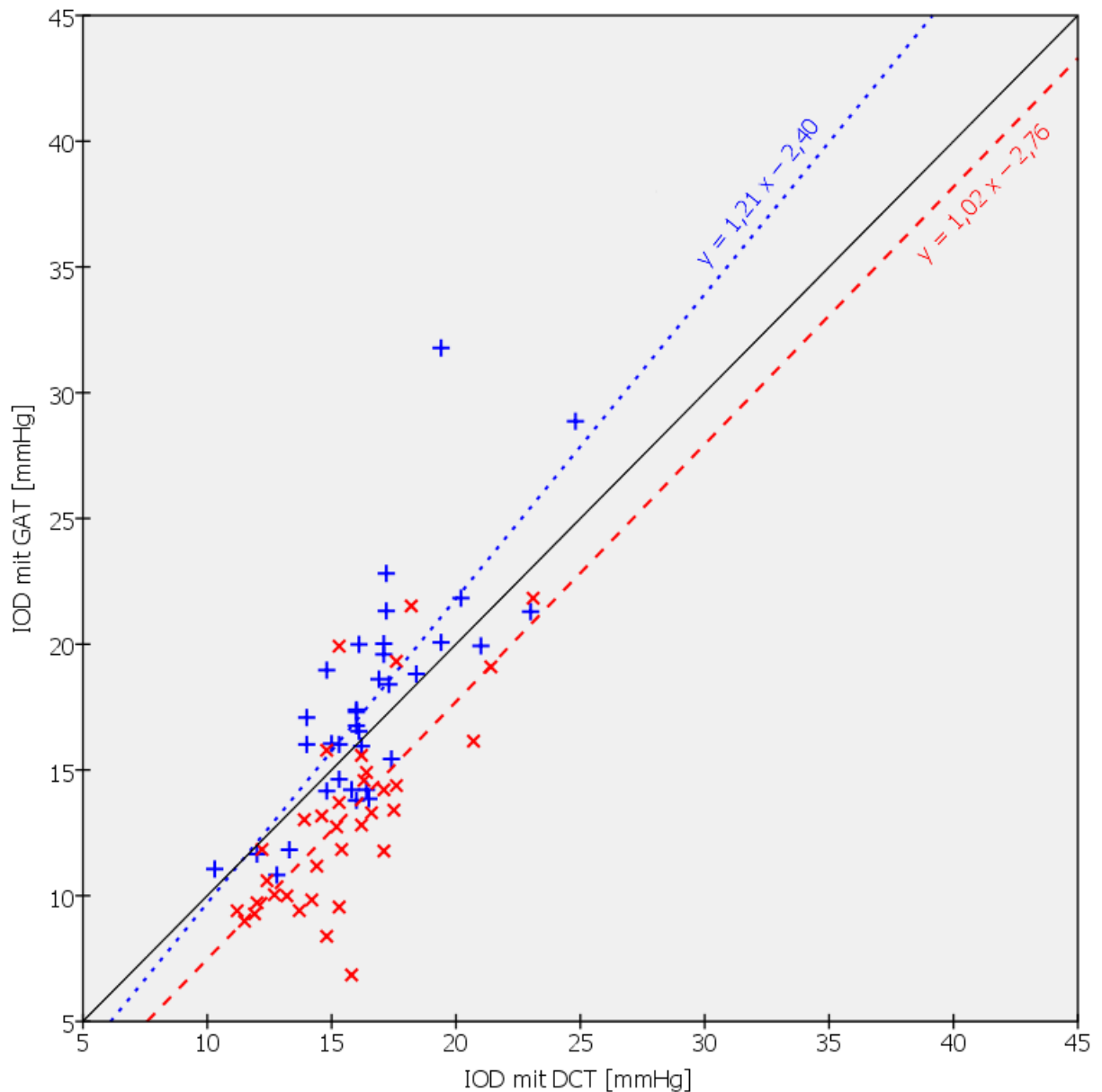


Abbildung 12: Streudiagramm GAT gegen DCT, 35 Messpaare

blau/+/-... = präoperativ      rot/x/--- = Follow-Up

Die auffällige Verteilung der Punkte war nun unübersehbar:

Während die blaue Punktwolke sich tendenziell oberhalb der LoE erstreckte, lag die rote Punktwolke insgesamt klar unterhalb der LoE. Letzteres entsprach klar niedrigeren GAT- als DCT-Werten in der Follow-Up-Gruppe. Besonderes Augenmerk verdienen in dieser Hinsicht die elf roten Punkte mit GAT-Werten  $\leq 10$  mmHg, denen ausnahmslos DCT-Werte  $> 10$  mmHg bis hinauf zu 15,8 mmHg gegenüberstanden.

Bemerkenswert war der fehlende Schnittpunkt beider Regressionsgeraden. Stattdessen lag die rote im gesamten Messbereich unterhalb der blauen Anpassungslinie. Innerhalb der statistischen Grenzen einer linearen Regression kam dies stets niedrigeren GAT-Werten bei den Verlaufs- als bei den präoperativen Messungen gleich.

Ein Schnittpunkt mit der LoE ließ sich innerhalb des Messbereichs nur für die blaue Regressionsgerade berechnen, er entsprach einem IOD von 11,4 mmHg. Die rote Anpassungslinie verlief im gesamten Messbereich nicht nur unterhalb der blauen, sondern auch unterhalb der LoE. Insgesamt lagen also die weitaus meisten präoperativen Werte im Bereich höherer und – rein die Regression betrachtend – alle Werte der Follow-Up-Gruppe im Bereich niedrigerer GAT- als DCT-Werte.

Auffällig war zudem eine fast perfekte Parallelität von roter Regressionsgeraden und LoE, welche die Frage nach einer verborgenen Systematik aufwarf.

Der Konkordanz-Korrelationskoeffizient  $r_{ccc}$  betrug 0,673 präoperativ und lediglich 0,553 im Follow-Up. Hintergrund sind die zunehmende Streuung und die Parallelverschiebung der roten Regressionsgeraden im Sinne eines location shift, gerade auch durch die oben genannten elf Punkte mit besonders niedrigen GAT-Messwerten.

Tatsächlich spiegelt sich das suspekte Verhalten des Goldmann-Applanationstonometers im niedrig-normalen Tensionsbereich der Follow-Up-Gruppe auch im Bland-Altman-Plot aus Abbildung 13 wider: In diesem Bereich streuten die roten Punkte überwiegend unterhalb der MD von  $-2,39$  mmHg, während das gegenläufige Streuverhalten eher bei höheren IOD-Werten vorkam. Insgesamt lagen angesichts einer derart negativen MD fast alle roten Punkte unterhalb der Nulllinie. Die MD der blauen Punkte hingegen hatte mit  $+1,09$  mmHg im Einklang mit den Inter-Tonometer-Differenzen aus Abschnitt 4.1.4.3 ein entgegengesetztes Vorzeichen. Die Grenzen der Übereinstimmung lagen für die roten bei  $-7,43$  mmHg und  $+2,64$  mmHg, für die blauen Wertepaare bei  $-4,60$  mmHg und  $+6,77$  mmHg. Damit war das 95 %-Konfidenzintervall der Follow-Up-Gruppe von allen am weitesten zu negativen Differenzen verschoben.

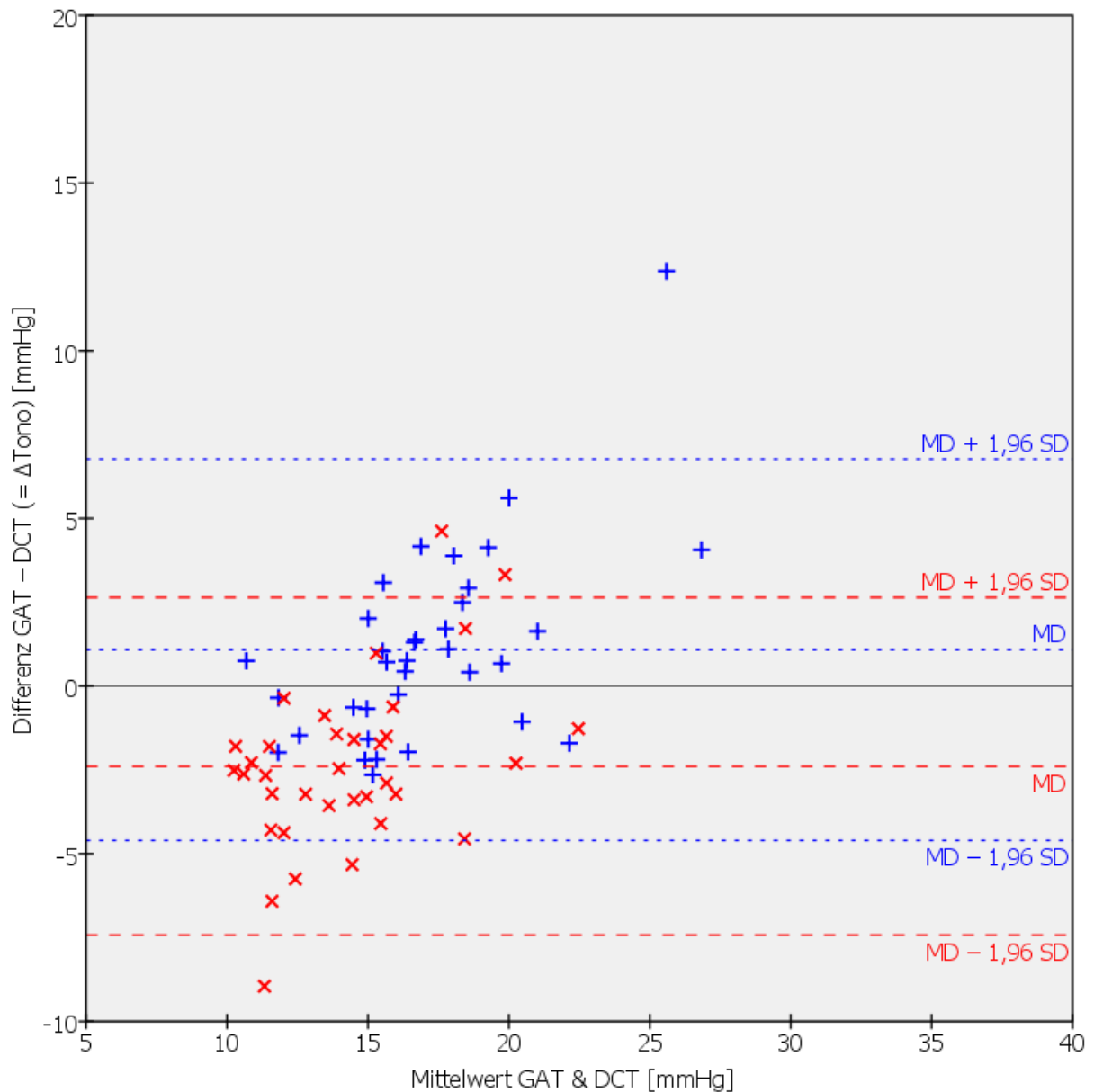


Abbildung 13: Bland-Altman-Plot von GAT und DCT, 35 Wertepaare

blau/+/-... = präoperativ      rot/x/--- = Follow-Up

## 4.4 Korrelationen

Kapitel 2 endete mit der Frage „Wo liegt der Fehler, falls sich signifikante Unterschiede zwischen beiden Tonometern zeigen?“. Dementsprechend dient dieser Abschnitt der Suche nach dem Fehler im Sinne möglicher Erklärungen für die beschriebenen Charakteristika und Abweichungen beider Tonometer.

Einführend wurde der Einfluss der Hornhaut auf die Goldmann-Applanationstonometrie erläutert. Nun geht mit einer Kataraktoperation unweigerlich ein je nach Technik größerer oder kleinerer Eingriff an der Hornhaut einher: Ein sklerokornealer Schnitt verläuft seinem Namen nach von der Lederhaut bis zur (peripheren) Hornhaut, ein clear cornea-Schnitt liegt ausschließlich in der Hornhaut. Zwar ist ersterer meistens absolut länger, befindet sich dabei aber nur partiell in der Hornhaut. Zweiterer beeinflusst die Hornhaut in seinem gesamten, wenn auch kürzeren Verlauf.

Die Vermessung der sklerokornealen und clear cornea-Inzisionen ergab entsprechende Unterschiede. So betrug die mittlere Länge und Breite der sklerokornealen Inzisionen  $3,82 \pm 0,99$  mm und  $3,99 \pm 0,55$  mm. Effektiv wurden damit auf einer Fläche von  $15,45 \pm 5,31$  mm<sup>2</sup> die Leder- und Hornhautlamellen voneinander separiert. Die clear cornea-Inzisionen waren im Mittel  $2,42 \pm 0,73$  mm lang und  $3,13 \pm 0,42$  mm breit, entsprechend einer Fläche von  $7,61 \pm 2,84$  mm<sup>2</sup>.

Tatsächlich hatte beim Vergleich prä- zu postoperativ die Schnitttechnik einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Messungen mit dem Goldmann-Applanationstonometer ( $p = 0,036$ ), nicht aber mit dem dynamischen Konturtonometer ( $p = 0,089$ ): Mit GAT verzeichnete die sklerokorneale Gruppe einen geringen Anstieg um  $+0,19$  mmHg, die clear cornea-Gruppe hingegen einen deutlichen Abfall um  $-2,6$  mmHg. Die DCT-Werte stiegen um  $+1,12$  mmHg in ersterer und fielen um  $-0,42$  mmHg in zweiterer Gruppe. Dieser Effekt ließ sich beim Vergleich präoperativ zu Follow-Up nicht mehr nachweisen.

Die Inzisionen korrelierten in ihren Abmessungen nur schwach mit  $\Delta$ GAT oder  $\Delta(\Delta$ Tono): Mit  $p = 0,074$  noch am ehesten signifikant korrelierte die Schnittlänge mit  $\Delta$ GAT beim Vergleich prä- gegen postoperativ ( $r = 0,255$ ).

Eine multiple lineare Regressionsanalyse mit den Schnittgrößen als unabhängigen und  $\Delta$ GAT und  $\Delta(\Delta$ Tono) als abhängigen Variablen fand keinen signifikanten linearen Zusammenhang.

## 5 Diskussion

---

Die ophthalmologische Fachliteratur bietet eine Vielzahl von Arbeiten, welche die Goldmann-Appplanationstonometrie und die dynamische Konturtonometrie in verschiedensten Szenarien miteinander vergleichen. Ähnlich oft sind die Effekte einer Kataraktoperation auf den Augeninnendruck untersucht worden.

Diese Studie vereint nun beide Ansätze. Mangels direkt vergleichbarer Publikationen erfolgt die Einordnung in den aktuellen Stand der Forschung in Teilaspekten.

### 5.1 Konkordanz beider Tonometer

Das zentrale Ergebnis dieser Arbeit ist eine charakteristische Abweichung zwischen Goldmann-Appplanations- und dynamischer Konturtonometrie: Vor einer Kataraktoperation, d.h. bei phaken Augen, misst ersteres Tonometer höhere, nach dem Eingriff, d.h. bei pseudophaken Augen, niedrigere Augeninnendrucke als zweiteres. Formal wechselt die Inter-Tonometer-Differenz – in Kapitel 3.3.2.1 als  $\Delta\text{Tono} = \text{GAT} - \text{DCT}$  definiert – von einem positiven zu einem negativen Vorzeichen. Dieses Ergebnis lässt sich in allen drei Vergleichsansätzen dieser Studie (Näheres in Abschnitt 3.3.2.2) beobachten und fällt sehr bis hoch signifikant aus:

1. prä- gegen postoperativ: von  $+0,80 \pm 2,70$  mmHg zu  $-0,65 \pm 3,78$  mmHg
2. phak gegen pseudophak: von  $+1,10 \pm 2,82$  mmHg zu  $-1,31 \pm 2,77$  mmHg
3. präoperativ gegen Follow-Up: von  $+1,09 \pm 2,90$  mmHg zu  $-2,39 \pm 2,57$  mmHg

In der Fachliteratur finden sich mehrheitlich Quellen mit niedrigeren GAT- als DCT-Werten. Manche Autoren nennen zuerst die Ergebnisse der DCT und sprechen somit von höheren Werten im Vergleich zur GAT:

Kniestedt et al. konnten bei sechszehn frisch enukleierten Augen durch Ausnutzung der Gesetze der Hydrostatik den Augeninnendruck manometrisch festlegen und diesen mit Goldmann-Appplanationstonometrie, dynamischer Konturtonometrie und Pneumotonometrie vergleichen. Dabei lagen die mittleren Werte des DCT knapp über denen

des Manometers ( $+0,58 \pm 0,70$  mmHg), die des GAT deutlich darunter ( $-4,01 \pm 1,76$  mmHg) und damit noch deutlicher unter denen des DCT (Kniestedt et al. 2004).

In einer Folgestudie untersuchte dieselbe Arbeitsgruppe anhand zehn frisch enukleierter und später dehydrierter Augen, welchen Effekt der Hydratationsgrad der Hornhaut auf die genannten Tonometer hatte. Ob nativ oder dehydriert, die Ergebnisse deckten sich weitgehend mit der vorherigen Studie (Kniestedt et al. 2005b).

Nochmals Kniestedt et al. verglichen 258 Augen von Patienten mit Verdacht auf oder einem manifesten Glaukom. Gemessen wurde mit den gleichen drei Tonometern wie zuvor. Im Mittel lag der IOD mit GAT bei  $16,0 \pm 3,0$  mmHg und mit DCT bei  $18,3 \pm 4,2$  mmHg (Kniestedt et al. 2005a).

Viestenz et al. führten an 323 Augen vergleichende Messungen mit einem Goldmann-Appanationstonometer, einem dynamischen Konturtonometer und einem TonoPenXL durch. Augen mit einem IOD über 23 mmHg (GAT) wurden ausgeschlossen. Die DCT-Werte waren mit  $17,7 \pm 3,4$  mmHg signifikant höher als die GAT-Werte von  $14,5 \pm 3,1$  mmHg (Viestenz et al. 2006b).

Kaufmann et al. fanden eine hohe Konkordanz zwischen den Messungen mit DCT und GAT. Dabei lagen die Werte mit DCT beständig über denen mit GAT (mittlere Differenz  $+1,7$  mmHg) (Kaufmann et al. 2004).

Pache et al. bestimmten bei 100 Augen den IOD als  $16 \pm 3$  mmHg mit DCT und  $15 \pm 3$  mmHg mit GAT. Dieser Effekt war mit  $p < 0,01$  signifikant (Pache et al. 2005).

Schneider und Grehn maßen mit der DCT generell höhere Tensionslagen als mit der GAT. Der Unterschied betrug im Median  $1,8$  mmHg und im arithmetischen Mittel  $2,34$  mmHg (Schneider und Grehn 2006).

Hoffmann et al. schließlich kamen zu dem Fazit, dass bei niedrigem IOD mit DCT geringfügig höhere Drücke im Vergleich zur GAT gemessen wurden, während bei hohen Drücken GAT höhere IOD-Werte lieferte als DCT (Hoffmann et al. 2006).

Nun machen die wenigsten Autoren konkrete Angaben zu einer etwaigen vorausgegangenen Kataraktoperation oder zum Linsenstatus. Noch weniger lassen sich Studien finden, die Patienten unter diesen Aspekten in Vergleichsgruppen einteilen. Um trotzdem eine Einordnung in die genannten Publikationen zu treffen, könnte man sämtliche Messpaare beider Tonometer dieser Studie betrachten. Dann erhielte man auch hier



das typische Ergebnis niedrigerer GAT- als DCT-Werte, wenngleich mit eher geringer Differenz zwischen den Tonometern.

Der Zielstellung dieser Arbeit gerechter wird folgender Ansatz, der in Abschnitt 4.1.4 als  $\Delta(\Delta\text{Tono})$  eingeführt wurde:

Hinsichtlich der gemessenen Tension haben beide Tonometer zueinander eine bestimmte Lage, die durchaus von Interesse ist. Wesentlich wichtiger ist aber, wie sich diese Lage zueinander durch eine Kataraktoperation ändert. Dies entspricht nichts anderem als der Änderung der Inter-Tonometer-Differenz, formal  $\Delta(\Delta\text{Tono})$ :

1. prä- gegen postoperativ:  $\Delta(\Delta\text{Tono}) = +1,45 \pm 2,97$  mmHg
2. phak gegen pseudophak:  $\Delta(\Delta\text{Tono}) = +2,41 \pm 1,92$  mmHg
3. präoperativ gegen Follow-Up:  $\Delta(\Delta\text{Tono}) = +3,48 \pm 3,00$  mmHg

Bemerkenswert ist die sukzessive Zunahme von  $\Delta(\Delta\text{Tono})$  von 1. bis 3. Demnach hat eine Kataraktoperation nicht nur kurzfristige, sondern mehr noch mittel- bis langfristige Effekte auf die Tonometer – oder eher auf eines von beiden?

## 5.2 Validität beider Tonometer

In Kapitel 1.2 wurde angedeutet, dass das Goldmann-Appplanationstonometer ein Krafttonometer ist und damit zu den indirekten Tonometern gehört. Diese Typklasse unterliegt zwangsläufig gewissen Störfaktoren.

Whitacre und Stein listeten in einer umfassenden Arbeit eine ganze Reihe von möglichen Fehlerquellen im Umgang mit Tonometern vom Goldmann-Typ auf. Mit  $-30$  mmHg und  $+24$  mmHg fanden sich die Extremwerte in einer Gruppe von Faktoren, welche die Autoren unter dem Oberbegriff „Eigenschaften der Hornhaut“ zusammenfassten (Whitacre und Stein 1993).

Auch Kanngiesser und Kniestedt nannten diesen Faktor und betonten, dass bereits Goldmann und Schmidt in ihren Veröffentlichungen auf die Eigenschaften der Hornhaut hingewiesen hatten (Kanngiesser und Kniestedt 2005).

Auf die Rolle der Hornhaut und ihrer Eigenschaften wird in Abschnitt 5.4 näher eingegangen. An dieser Stelle genügt die Erkenntnis, dass die Goldmann-Appplanationstonometrie prinzipbedingt nicht unter allen Bedingungen zuverlässig messen kann, auch wenn sie nach wie vor den Status des Goldstandards innehat.

Das dynamische Konturtonometer ist ein direktes Drucktonometer. Dass ein solches einen Druck akkurater messen sollte als ein Krafttonometer, leuchtet bereits ohne Kenntnis der Literatur ein.

Kanngiesser et al. präsentierten dieses neue Tonometer mit einer in vitro-Studie, in der sie ein DCT gegen einen manometrischen Referenzdruck validierten. Die Abweichung der DCT-Messungen von der Referenz betrug bei 8 mmHg  $0,49 \pm 0,28$  mmHg, bei 16 mmHg  $0,19 \pm 0,18$  mmHg und bei 24 mmHg  $0,29 \pm 0,28$  mmHg. Die Autoren kamen zu folgendem Fazit: Die dynamische Konturtonometrie eliminiert die meisten der systematischen Fehler, die aus individuellen Veränderungen der Hornhauteigenschaften entstehen, die alle Typen von Applanationstonometern nachteilig beeinflussen. Sie sprachen vom „Vorteil, den wahren Druck zu messen“ (Kanngiesser et al. 2005).

Bereits in Abschnitt 5.1 wurden zwei weitere manometrische Studien von Kniestedt et al. zitiert. Bei beiden lagen die Messungen mit dynamischer Konturtonometrie signifikant näher am Referenzdruck als die Messungen mit Goldmann-Applanationstonometrie und Pneumotonometrie (Kniestedt et al. 2004, 2005b).

Ihre Arbeiten zusammenfassend, konnten Kniestedt und Kanngiesser zeigen, dass bei der dynamischen Konturtonometrie der systematische Messfehler im physiologisch relevanten Bereich von 5–40 mmHg immer unter 0,8 mmHg blieb (Kniestedt und Kanngiesser 2006).

Nun ist die Feuertaufer erst der erfolgreiche Transfer vom Labor in die Praxis. Tatsächlich kommt auch in vivo der mit dynamischer Konturtonometrie gemessene dem wahren IOD sehr nahe:

Boehm et al. untersuchten 75 Augen von 75 Patienten, die sich einer Phakoemulsifikation unterzogen und verglichen am Beginn der Operation die Messungen eines DCT mit einem per intrakameralem Präzisionssensor bestimmten Referenzdruck. Dabei lag die mittlere Differenz zwischen dem Wert des DCT und des Sensors zwischen  $-0,02 \pm 1,32$  mmHg und  $-0,84 \pm 1,90$  mmHg. Der Konkordanz-Korrelationskoeffizient nach Lin betrug 0,9763. Wie Abbildung 14 zeigt, waren die Graphen der Referenz (grau) und des DCT (schwarz) nach Beginn der eigentlichen Messung nahezu deckungsgleich (Boehm et al. 2008).



Stand der Fachliteratur ist folgender:

Poley et al. stratifizierten 588 Augen mit okulärer Normo- oder Hypertension nach dem präoperativen IOD und verglichen diesen mit dem 1-Jahres- und dem spätesten verfügbaren Wert. Die Autoren fanden eine Proportionalität zum Ausmaß der Drucksenkung. In der Gruppe, die dem Ausgangsdruck der vorliegenden Arbeit am nächsten kam, betrug die Tensionssenkung 1,6 mmHg. Dieser Effekt bestand über 10 Jahre fort (Poley et al. 2008).

In einer Folgestudie schlossen Poley et al. auch Augen von Glaukompatienten ein und fanden insgesamt konsistente Ergebnisse (Poley et al. 2009).

Shingleton et al. maßen bei insgesamt 158 Augen mit  $1,4 \pm 3,3$  mmHg,  $1,4 \pm 4,2$  mmHg und  $1,7 \pm 3,1$  mmHg sehr ähnliche Zahlen. Fazit war, dass eine Kataraktextraktion in einer kleinen, aber signifikanten Abnahme des IOD resultierte, aber kein Ersatz für einen kombinierten Eingriff (im glaukomchirurgischen Sinne) war (Shingleton et al. 2006).

Pillunat et al. ordneten 33 Patienten mit operationswürdiger primärer Katarakt und begleitendem primär chronischen Glaukom bzw. okulärer Hypertension mit einem IOD unter maximaler lokaler Therapie von 20–25 mm Hg randomisiert einem Operationsverfahren zu: entweder einer clear-cornea-Inzision mit Implantation einer Acryl-Faltlinse oder einem kombinierten Eingriff, d.h. Phakoemulsifikation mit Trabekulektomie. In ersterer Gruppe zeigte sich ein Abfall des IOD um 6 mmHg, in zweiterer um 8 mmHg. Der Unterschied im Ausmaß des Abfalls war signifikant (Pillunat et al. 2000).

In Analogie zu Vergleichsansatz 2 der vorliegenden Arbeit stellte Jahn die Augeninnendrucke von 120 phaken Augen ihren pseudophaken Partneraugen gegenüber und kam im Mittel auf Werte von 14 und 12 mmHg, entsprechend einer Differenz von 2 mmHg (Jahn 1997).

Gemeinsam ist all diesen Quellen, wie das Ausmaß der Tensionssenkung gemessen wurde, nämlich per Goldmann-Applanationstonometrie. Mit Blick auf dessen Status des Goldstandards ist dies verständlich, nach den starken Argumenten des vorherigen Abschnittes aber zumindest diskussionswürdig. Unter dem Aspekt der Validität spricht einfach zuviel gegen die Goldmann-Applanations- und für die dynamische Konturtonometrie. Auf die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit übertragen bedeutet dies nicht weniger als falsch niedrige GAT-Werte.

Besonders bedenklich ist Folgendes:

Wie in Kapitel 4.3 analysiert, erscheinen nach Kataraktoperation die GAT-Messungen im niedrig-normalen Tensionsbereich um 10 mmHg am suspektesten. Nun ist dieser Bereich gerade derjenige, den man in Kenntnis der sog. „Landmark Studies“, allen voran der „Advanced Glaucoma Intervention Study“, bei Patienten mit fortgeschrittenem Glaukom anstrebt (The AGIS Investigators 2000). Fatal wäre es, wenn man sich aufgrund eines Messfehlers in einer falschen Sicherheit wiegte und eine Glaukomprogression verpasste. Abschnitt 5.4.2 greift diesen Punkt nochmal auf.

Insgesamt muss man in weiten Teilen des physiologisch relevanten Bereichs von einer Überschätzung des tensionssenkenden Effekts einer Kataraktoperation ausgehen. Ruft man sich abschließend die oben genannte Größenordnung von  $\Delta(\Delta\text{Tono})$  in Erinnerung, so nähert sich für viele Studien die postulierte Tensionssenkung selbst bei vorsichtiger Rechnung Bereichen an, die im Rahmen der allgemein akzeptierten Intra- und Interobserver-Variabilität eines Tonometers liegen.

## 5.4 Erklärungsansätze

In diesem Kapitel sollen mögliche Antworten auf die finale Frage, wo nun – angesichts signifikanter Unterschiede zwischen den Tonometern nach Kataraktoperation – der Fehler liege, diskutiert werden.

Als Erklärung für reduzierte IOD-Werte nach Kataraktoperation fanden Saccà et al. in mehreren Publikationen einen verbesserten Kammerwasserabfluss (Saccà et al. 2001). Dieser – so wird oftmals behauptet – entstehe durch die im Vergleich zur Lens crystallina dünnere Intraokularlinse. Plausibel erscheint dies für Patienten mit engem, nicht aber mit ohnehin offenem Kammerwinkel. Nun schloss die vorliegende Studie ausschließlich Patienten mit letzterem ein. Diese Theorie kann die genannten Ergebnisse also nicht erklären.

Wo liegt der Fehler dann?

### 5.4.1 Dicke der Hornhaut

Einflüsse der zentralen Hornhautdicke auf die Goldmann-Appplanationstonometrie sind inzwischen weithin akzeptiert und in vielen Studien nachgewiesen worden (Ehlers et al. 1975, Kohlhaas et al. 2006, Kniestedt et al. 2005a, Tonnu et al. 2005, Milla et al. 2009). Konsens unter diesen ist, dass die Goldmann-Appplanationstonometrie nur auf durchschnittlich dicken Hornhäuten, genauer gesagt um eine CCT von 520 bis 550  $\mu\text{m}$  herum, neutral misst. Darunter kommt es zu einer Unter-, darüber zu einer Überschätzung der Tension. Dies lässt sich prinzipiell mit gegensinnigen Korrekturwerten ausgleichen. Etabliert hat sich die in Abschnitt 3.3.2.4 erläuterte Dresdner Korrekturtabelle auf Basis einer linearen Funktion (Kohlhaas et al. 2006). Einschränkend muss man Kniestedt und Mitarbeiter zitieren, die eine nichtlineare Korrelation zwischen CCT und GAT fanden (Kniestedt et al. 2005a).

Einige Arbeitsgruppen, etwa um Feltgen et al. und Barleon et al., halten eine Umrechnung der Messwerte für inadäquat, weil es mit zunehmender CCT keinen systematischen Fehler in der GAT gebe bzw. die Messungen mit dem GAT – wie auch dem DCT – nicht mit der CCT korreliert seien (Feltgen et al. 2001, Barleon et al. 2006).

Um beiden Standpunkten gerecht zu werden, finden sich in der vorliegenden Arbeit sowohl die per Dresdner Korrekturtabelle angepassten als auch die nativen GAT-Werte. In beiden Fällen sind die Abweichungen zwischen den Tonometern von ihrem Betrag und ihrer Signifikanz konsistent und nicht zu leugnen.

Einwände gegen eine Umrechnung der GAT-Werte wären dann legitim, wenn man postoperativ ebenjene CCT zur Korrektur heranzöge. Die Gründe, warum dies zu einer Verzerrung führen würde, und wie stattdessen vorgegangen wurde, sind in Abschnitt 3.3.2.4 erläutert. Dort wurde auch schon betont, dass diese Problematik für den Vergleich phakes gegen pseudophakes Partnerauge und präoperativ gegen Follow-Up ohnehin keine Rolle spielt, weil in beiden Szenarien nachweislich kein Hornhautödem besteht.

### 5.4.2 Biomechanik der Hornhaut

Die Hornhaut besitzt neben ihrer Dicke weitere wesentliche Parameter, welche die Goldmann-Appplanationstonometrie beeinflussen. Im einleitenden Kapitel wurde bereits auf das Modell von Orssengo und Pye eingegangen, das neben der zentralen Dicke auch den vorderen Radius der Hornhaut bzw. die applanierte Fläche als korrigierende Variablen einbezieht (Orssengo und Pye 1999).

Gemäß einer quantitativen Analyse von Liu und Roberts ist es aber noch ein anderer Faktor, welcher den größten Einfluss auf den Messfehler von Appplanationstonometern hat: die Biomechanik der Hornhaut, genauer der sog. Elastizitätsmodul. Diese Autoren entwarfen ein mathematisches Modell, das nach Wahl eines Referenzdruckes den Messwert eines Appplanationstonometers vorausberechnen konnte. In das Modell gingen die drei Parameter CCT, vordere Krümmung und Elastizitätsmodul ein. Variierte man je einen davon entsprechend seiner Schwankungsbreite in der Normalpopulation, hatte der vorausberechnete Messwert eine bestimmte Spannweite: 2,87 mmHg für die CCT, 1,76 mmHg für die vordere Krümmung und 17,26 mmHg für den Elastizitätsmodul (Liu und Roberts 2005).

Nun wurde der vorliegende Ansatz, GAT und DCT nach Kataraktoperation zu vergleichen, bisher selten gewählt. Mehr als genug Literatur findet sich zum Vergleich dieser Tonometer nach anderen Eingriffen mit Affektion der Hornhaut:

Viestenz et al. bestimmten bei 92 Augen nach penetrierender Keratoplastik mittlere Augeninnendrucke von  $18,3 \pm 4,0$  mmHg mit DCT, aber nur  $14,3 \pm 4,1$  mmHg mit GAT (Viestenz et al. 2006a).

Chou et al. ergänzten diesen Ansatz um den TonoPen XL und den Ocular Response Analyzer (ORA). Im Vergleich zum GAT maßen sie einen signifikant höheren IOD von +2,12 mmHg mit DCT und +6,29 mmHg mit ORA (Chou et al. 2012).

Kaufmann et al. stellten bei 62 Augen vor einer Laser In Situ Keratomileusis (LASIK) gute Übereinstimmung zwischen GAT und DCT fest. Die korneale Ablation reduzierte die Tensionsmessungen mit GAT um 3,0 mm Hg, wohingegen sich die mit DCT nicht signifikant änderten (Kaufmann et al. 2003).

Duba und Wirthlin fanden sehr ähnliche Daten und konnten deren Persistenz für mindestens drei Monate nachweisen (Duba und Wirthlin 2004).

Siganos et al. demonstrierten bei 118 Augen noch größere Abfälle in den GAT-Zahlen:  $-4,9 \pm 2,7$  mmHg nach einer Woche und  $-5,4 \pm 3,0$  mmHg nach drei Wochen (Siganos et al. 2004).

Bewusst modifizieren derartige Eingriffe die Form und damit auch die zentrale Dicke der Hornhaut. Unbewusst verändern sie aber auch die korneale Biomechanik:

Pepose et al. untersuchten genau diese bei 66 Augen vor und nach LASIK. Zusätzlich überprüften auch diese Autoren die Effekte auf Tensionsmessungen, hier mit GAT, ORA und DCT. Allein letzteres Tonometer schien gegen Änderungen in der kornealen Biomechanik relativ immun, obwohl jene Abfälle in der kornealen Hysterese (CH) von 16,2 % und im kornealen Resistenzfaktor (CRF) von 28,6 % zeigte (Pepose et al. 2007).

Qazi et al. weiteten ihre Studie auf Patienten mit einer Laser Epithelialen Keratomileusis (LASEK) aus und kamen zu dem Schluss, dass die Photoablation und die Anlage des Flap additive Effekte auf biomechanische Parameter wie die CH und den CRF zeigten (Qazi et al. 2009).

Noch bemerkenswerter war das Fazit von Gatinel et al., dass allein die Anlage eines stromalen Flaps die biomechanischen Eigenschaften der Hornhaut verändern konnte. Das schloss einen Abfall der CH ein (Gatinel et al. 2007).

Touboul et al. schließlich analysierten Korrelationen zwischen CH, CCT und GAT und schlossen, dass niedrige CH-Werte als möglicher Risikofaktor für die Unterschätzung des IOD mit GAT anzusehen sein könnten (Touboul et al. 2008).

Wenn es nun auch nach Kataraktoperation zu einer Unterschätzung des IOD mit GAT kommt, liegt es nicht allzu fern, der Biomechanik eine Beteiligung zuzusprechen. Man muss davon ausgehen, dass eine sklerokorneale bzw. clear cornea-Inzision die Hornhaut nachhaltig beeinflusst. Folgende Indizien lassen sich finden:

Die Schnitttechnik hatte in dieser Studie einen statistisch signifikanten Einfluss auf die postoperative Entwicklung der GAT-Messungen. Dabei stand ein leichter Anstieg in der sklerokornealen einem deutlichen Abfall in der clear cornea-Gruppe gegenüber. Eine denkbare Erklärung ist, dass eine clear-cornea-Inzision entsprechend ihrer Lage die korneale Biomechanik stärker alteriert.



Die Länge der Inzisionen korrelierte fast signifikant mit dem Abfall der GAT-Werte beim Vergleich prä- gegen postoperativ. Einschränkend muss man die Ergebnisse der Schnittbreite und -fläche erwähnen, die eine Signifikanz deutlich verfehlten.

Besonders suspekte GAT-Messungen fanden sich im niedrig-normalen Tensionsbereich um 10 mmHg. Wenn man bedenkt, dass hier die Applanation vergleichsweise wenig durch den Druck hinter der Hornhaut und viel durch diese selbst bestimmt wird, erscheint ein Einfluss der kornealen Biomechanik mehr als plausibel.

Insgesamt ist der Fehler nicht allein, aber auch auf diesem Feld zu suchen. Dabei sind die Zusammenhänge komplexer Natur, was die fehlende Signifikanz einer multiplen linearen Regressionsanalyse erklärt. Die zu Beginn dieses Abschnitts zitierten Arbeiten von Orssengo und Pye sowie Liu und Roberts lassen die weiteren Schritte erahnen.

## 5.5 Fazit und Ausblick

Eine Kataraktoperation hat im Mittel nur einen sehr begrenzten tensionsenkenden Effekt. Dieser wird mit der Goldmann-Applanationstonometrie offenbar als Folge eines systematischen Messfehlers dauerhaft überschätzt. Bei pseudophaken Patienten sollte der dynamischen Konturtonometrie der Vorzug gegeben, bei Patienten mit einem Offenwinkelglaukom die sog. antiglaukomatöse Kataraktoperation sorgfältig gegen therapeutische Alternativen abgewogen werden.

Für die Zukunft eröffnen sich zahlreiche Möglichkeiten und Ansatzpunkte. Fernziel ist und bleibt die nichtinvasive Messung des wahren Augeninnendrucks. Mittelfristig könnte dazu in der klinischen Forschung der Tensionsverlauf nach Kataraktoperation mit neuartigen implantierbaren Drucksensoren überwacht werden, etwa dem ARGOS-Sensor (Koutsonas et al. 2015). Deren Messwerte wären nicht nur der GAT, sondern auch der DCT gegenüberzustellen. In Anlehnung an die vorliegende wäre eine Studie interessant, welche die Effekte einer Kataraktoperation in modernster Kleinstschnitttechnik untersuchte. Nahe läge auch die weitergehende Betrachtung der kornealen Biomechanik und ihrer Alteration durch Ophthalmochirurgie. Hier wird dann endgültig das weite Feld der theoretischen Forschung betreten.

## 6 Zusammenfassung

---

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den tensionssenkenden Effekt einer alleinigen, nicht mit glaukomchirurgischen Eingriffen kombinierten Kataraktoperation zu validieren. Dazu wurden 50 Patienten im Alter von  $72,3 \pm 9,2$  Jahren eingeschlossen, die sich einer unilateralen Phakoemulsifikation mit Implantation einer Hinterkammerlinse in sklerokornealer oder clear cornea-Schnitttechnik unterzogen. 29 dieser Patienten hatten am Partnerauge bereits eine derartige Intervention erhalten, waren also bei Einschluss einseitig pseudophak. 35 der 50 Patienten konnten für Follow-Up-Messungen rekrutiert werden. Zentrale Messgrößen waren der Augeninnendruck mit Goldmann-Appanations- und dynamischer Konturtonometrie mit Blick auf die sog. Inter-Tonometer-Differenz  $\Delta\text{Tono} = \text{GAT} - \text{DCT}$ . Die Analyse erfolgte mit per Dresdner Korrekturtafel angepasst wie auch mit unkorrigierten GAT-Werten. Die für erstere nötige zentrale Hornhautdicke wurde mittels Spaltlampen-OCT erfasst, das auch der Vermessung der sklerokornealen bzw. clear cornea-Inzisionen diente. Oben genannte Patientengruppe und -subgruppen ermöglichten drei Vergleichsansätze: 1. prä- gegen postoperativ ( $n = 50$ ); 2. phak gegen pseudophak ( $n = 29$ ); 3. präoperativ gegen Follow-Up ( $n = 35$ ). In allen drei Ansätzen wichen die Tonometer in ihren gemessenen IOD-Änderungen mehr oder weniger deutlich voneinander ab: 1. GAT:  $-0,98 \pm 4,67$  mmHg  $\leftrightarrow$  DCT:  $+0,47 \pm 3,17$  mmHg; 2. GAT:  $-4,54 \pm 4,15$  mmHg  $\leftrightarrow$  DCT:  $-2,12 \pm 3,36$  mmHg; 3. GAT:  $-4,54 \pm 4,10$  mmHg  $\leftrightarrow$  DCT:  $-1,07 \pm 2,71$  mmHg. Als verberge sich dahinter eine Systematik, imponierte ein einheitlicher Vorzeichenwechsel bei der Inter-Tonometer-Differenz: 1.  $+0,80 \pm 2,70$  mmHg  $\leftrightarrow$   $-0,65 \pm 3,78$  mmHg; 2.  $+1,10 \pm 2,82$  mmHg  $\leftrightarrow$   $-1,31 \pm 2,77$  mmHg; 3.  $+1,09 \pm 2,90$  mmHg  $\leftrightarrow$   $-2,39 \pm 2,57$  mmHg. Die Rechnungen mit unkorrigierten GAT-Werten erbrachten konsistente Ergebnisse, die statistischen Tests fielen sehr bis hoch signifikant aus. Unter der Annahme, dass die DCT hinsichtlich der Validität der GAT überlegen ist, lautet das Fazit: Eine Kataraktoperation hat keinen solch hohen tensionssenkenden Effekt wie angenommen, denn offenbar unterliegt die GAT danach dauerhaft einem Messfehler. Die Gründe sind in operationsbedingten Veränderungen der kornealen Biomechanik zu vermuten, die genauen Zusammenhänge komplexer Natur.

## 7 Literaturverzeichnis

---

1. Barleon L, Hoffmann EM, Berres M, Pfeiffer N, Grus FH (2006): Comparison of dynamic contour tonometry and goldmann applanation tonometry in glaucoma patients and healthy subjects. *Am J Ophthalmol* 142: 583–590
2. Bland JM, Altman DG (1983): Measurement in medicine: the analysis of method comparison studies. *Statistician* 32: 307–317
3. Bland JM, Altman DG (1986): Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1: 307–310
4. Boehm AG, Weber A, Pillunat LE, Koch R, Spoerl E (2008): Dynamic contour tonometry in comparison to intracameral IOP measurements. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 49: 2472–2477
5. Chou CY, Jordan CA, McGhee CN, Patel DV (2012): Comparison of intraocular pressure measurement using 4 different instruments following penetrating keratoplasty. *Am J Ophthalmol* 153: 412–418
6. Dielemans I, Vingerling JR, Hofman A, Grobbee DE, de Jong PT (1994): Reliability of intraocular pressure measurement with the Goldmann applanation tonometer in epidemiological studies. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 232: 141–144
7. Duba I, Wirthlin AC (2004): Dynamic contour tonometry for post-LASIK intraocular pressure measurements. *Klin Monbl Augenheilkd* 221: 347–350
8. Ehlers N, Bramsen T, Sperling S (1975): Applanation tonometry and central corneal thickness. *Acta Ophthalmol (Copenh)* 53: 34–43
9. Eppig T, Gillner M, Langenbacher A, Seitz B, Viestenz A (2011): Contact free in-vivo imaging of cornea and anterior chamber of the human eye - a qualitative comparison of imaging techniques. *Klin Monbl Augenheilkd* 228: 1052–1059
10. Feltgen N, Leifert D, Funk J (2001): Correlation between central corneal thickness, applanation tonometry, and direct intracameral IOP readings. *Br J Ophthalmol* 85: 85–87
11. Fogagnolo P, Rossetti L, Mazzolani F, Orzalesi N (2006): Circadian variations in central corneal thickness and intraocular pressure in patients with glaucoma. *Br J Ophthalmol* 90: 24–28
12. Gatinel D, Chaabouni S, Adam PA, Munck J, Puech M, Hoang-Xuan T (2007): Corneal hysteresis, resistance factor, topography, and pachymetry after corneal lamellar flap. *J Refract Surg* 23: 76–84
13. Goldmann H, Schmidt T (1965): On applanation tonography. *Ophthalmologica* 150: 65–75
14. Grehn F, Klink T (2004): Combined glaucoma-cataract surgery. *Ophthalmologe* 101: 661–666
15. Gressner A, Arndt T (2013): *Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik*. 2. Auflage. Springer-Verlag. S. 803

16. Harada Y, Hirose N, Kubota T, Tawara A (2008): The influence of central corneal thickness and corneal curvature radius on the intraocular pressure as measured by different tonometers: noncontact and goldmann applanation tonometers. *J Glaucoma* 17: 619–625
17. Heidelberg Engineering (2006): SL-OCT brochure. © Heidelberg Engineering 2006
18. Heidelberg Engineering (2009): Slitlamp-OCT Installation Instructions. Version 001. Februar 2009. © Heidelberg Engineering 2009
19. Hoffmann EM, Pfeiffer N, Barleon L, Grus FH (2006): Goldmann applanation tonometry and dynamic contour tonometry. Comparison of intraocular pressure measurements in the course of product certification according to EN ISO 8612:2001. *Ophthalmologie* 103: 317–320
20. Jahn CE (1997): Reduced intraocular pressure after phacoemulsification and posterior chamber intraocular lens implantation. *J Cataract Refract Surg* 23: 1260–1264
21. Kanngiesser HE, Kniestedt C (2005): Tonometry in change. From indentation and applanation to contour adaptation. *Ophthalmologie* 102: 849–855
22. Kanngiesser HE, Kniestedt C, Robert YC (2005): Dynamic contour tonometry: presentation of a new tonometer. *J Glaucoma* 14: 344–350
23. 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
24. Kaufmann C, Bachmann LM, Thiel MA (2004): Comparison of dynamic contour tonometry with goldmann applanation tonometry. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 45: 3118–3121
25. Klink J, Schmitz B, Lieb WE, Klink T, Grein HJ, Sold-Darseff J, Heinold A, Grehn F (2005): Filtering bleb function after clear cornea phacoemulsification: a prospective study. *Br J Ophthalmol* 89: 597–601
26. Kniestedt C, Kanngiesser HE (2006): Dynamic contour tonometry. *Ophthalmologie* 103: 713–721
27. Kniestedt C, Lin S, Choe J, Bostrom A, Nee M, Stamper RL (2005): Clinical comparison of contour and applanation tonometry and their relationship to pachymetry. *Arch Ophthalmol* 123: 1532–1537
28. Kniestedt C, Nee M, Stamper RL (2004): Dynamic contour tonometry: a comparative study on human cadaver eyes. *Arch Ophthalmol* 122: 1287–1293
29. Kniestedt C, Nee M, Stamper RL (2005): Accuracy of dynamic contour tonometry compared with applanation tonometry in human cadaver eyes of different hydration states. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 243: 359–366
30. Koch R, Spoerl E (2007): Statistical Methods for Comparison of Two Measuring Procedures and for Calibration: Analysis of Concordance, Correlation and Regression in the Case of Measuring Intraocular Pressure. *Klin Monbl Augenheilkd* 224: 52–57

31. Kohlhaas M, Boehm AG, Spoerl E, Pürsten A, Grein HJ, Pillunat LE (2006): Effect of central corneal thickness, corneal curvature, and axial length on applanation tonometry. *Arch Ophthalmol* 124: 471–476
32. Koutsonas A, Walter P, Roessler G, Plange N (2015): Implantation of a novel telemetric intraocular pressure sensor in patients with glaucoma (ARGOS study): 1-year results. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 56: 1063–1069
33. Lin LI (1989): A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics* 45: 255–268
34. Liu J, Roberts CJ (2005): Influence of corneal biomechanical properties on intraocular pressure measurement: quantitative analysis. *J Cataract Refract Surg* 31: 146–155
35. Merkur A, Damji KF, Mintsioulis G, Hodge WG (2001): Intraocular pressure decrease after phacoemulsification in patients with pseudoexfoliation syndrome. *J Cataract Refract Surg* 27: 528–532
36. Milla E, Duch S, Buchacra O, Masuet C (2009): Poor agreement between Goldmann and Pascal tonometry in eyes with extreme pachymetry. *Eye (Lond)* 23: 536–542
37. 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
38. Pache M, Wilmsmeyer S, Lautebach S, Funk J (2005): Dynamic contour tonometry versus Goldmann applanation tonometry: a comparative study. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 243: 763–767
39. Pascolini D, Mariotti SP (2012): Global estimates of visual impairment: 2010. *Br J Ophthalmol* 96: 614–618
40. 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
41. Pillunat LE, Kamman J, Kohlhaas M (2000): Clear-Cornea-Phakoemulsifikation als Augeninnendruck-senkender Eingriff. Vortrag. 98. Tagung der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft (DOG), 21.–24. September 2000, Berlin
42. Poley BJ, Lindstrom RL, Samuelson TW (2008): Long-term effects of phacoemulsification with intraocular lens implantation in normotensive and ocular hypertensive eyes. *J Cataract Refract Surg* 34: 735–742
43. Poley BJ, Lindstrom RL, Samuelson TW, Schulze R Jr (2009): Intraocular pressure reduction after phacoemulsification with intraocular lens implantation in glaucomatous and nonglaucomatous eyes: evaluation of a causal relationship between the natural lens and open-angle glaucoma. *J Cataract Refract Surg* 35: 1946–1955
44. Puska P, Vasara K, Harju M, Setälä K (2000): Corneal thickness and corneal endothelium in normotensive subjects with unilateral exfoliation syndrome. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 238: 659–663

45. Qazi MA, Sanderson JP, Mahmoud AM, Yoon EY, Roberts CJ, Pepose JS (2009): Postoperative changes in intraocular pressure and corneal biomechanical metrics: Laser in situ keratomileusis versus laser-assisted subepithelial keratectomy. *J Cataract Refract Surg* 35: 1774–1788
46. Resnikoff S, Pascolini D, Etya'ale D, Kocur I, Pararajasegaram R, Pokharel GP, Mariotti SP (2004): Global data on visual impairment in the year 2002. *Bull World Health Organ* 82: 844–851
47. Saccà S, Marletta A, Pascotto A, Barabino S, Rolando M, Giannetti R, Calabria G (2001): Daily tonometric curves after cataract surgery. *Br J Ophthalmol* 85: 24–29
48. Schneider E, Grehn F (2006): Intraocular pressure measurement – comparison of dynamic contour tonometry and goldmann applanation tonometry. *J Glaucoma* 15: 2–6
49. Schwenn O, Dick HB, Krummenauer F, Krist R, Pfeiffer N (2001): Intraocular pressure after small incision cataract surgery: temporal sclerocorneal versus clear corneal incision. *J Cataract Refract Surg* 27: 421–425
50. Shingleton BJ, Pasternack JJ, Hung JW, O'Donoghue MW (2006): Three and five year changes in intraocular pressures after clear corneal phacoemulsification in open angle glaucoma patients, glaucoma suspects, and normal patients. *J Glaucoma* 15: 494–498
51. Siganos DS, Papastergiou GI, Moedas C (2004): Assessment of the Pascal dynamic contour tonometer in monitoring intraocular pressure in unoperated eyes and eyes after LASIK. *J Cataract Refract Surg* 30: 746–751
52. SMT Swiss Microtechnology (2004): Pascal Dynamic Contour Tonometer – Operating Manual. Version 1.4. Januar 2004. © SMT Swiss Microtechnology 2004
53. Stodtmeister R (1998): Applanation tonometry and correction according to corneal thickness. *Acta Ophthalmol Scand* 76: 319–324
54. Suzuki R, Kuroki S, Fujiwara N (1997): Ten-year follow-up of intraocular pressure after phacoemulsification and aspiration with intraocular lens implantation performed by the same surgeon. *Ophthalmologica* 211: 79–83
55. The AGIS Investigators (2000): The Advanced Glaucoma Intervention Study (AGIS): 7. The relationship between control of intraocular pressure and visual field deterioration. *Am J Ophthalmol* 130: 429–440
56. Tonnu PA, Ho T, Newson T, El Sheikh A, Sharma K, White E, Bunce C, Garway-Heath D (2005): The influence of central corneal thickness and age on intraocular pressure measured by pneumotonometry, non-contact tonometry, the Tono-Pen XL, and Goldmann applanation tonometry. *Br J Ophthalmol* 89: 851–854
57. 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
58. Viestenz A, Langenbacher A, Seitz B, Viestenz A (2006): Evaluation of dynamic contour tonometry in penetrating keratoplasties. *Ophthalmologie* 103: 773–776

59. Viestenz A, Langenbacher A, Viestenz A (2006): Reproducibility of dynamic contour tonometry. Comparison with TonoPenXL and Goldmann applanation tonometry - a clinical study on 323 normal eyes. *Klin Monbl Augenheilkd* 223: 813–819
60. Viestenz A, Vogt S, Langenbacher A, Walter S, Behrens-Baumann W (2009): Biometry of the anterior segment using optical coherence tomography: Evaluation of different devices and analysis programs. *Ophthalmologie* 106: 723–728
61. Whitacre MM, Stein R (1993): Sources of error with use of Goldmann-type tonometers. *Surv Ophthalmol* 38: 1–30
62. Wirbelauer C, Scholz C, Hoerauf H, Bastian GO, Engelhardt R, Birngruber R, Laqua H (2001): Examination of the cornea using optical coherence tomography. *Ophthalmologie* 98: 151–156

## 8 Publikationen

---

### Originalarbeiten

1. Heinrich MA, Eppig T, Langenbucher 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

### Vorträge

2. Heinrich MA, Langenbucher A, Behrens-Baumann W, Viestenz A (2010): Comparison of Dynamic Contour Tonometry vs. Goldmann Applanation Tonometry and Biometry of the Anterior Segment pre and post Cataract Surgery. Posterpräsentation. World Ophthalmology Congress (WOC) of the International Council of Ophthalmology (ICO) 2010, 05.–09.06.2010, Berlin
3. Viestenz A, Heinrich MA, Langenbucher A, Walter S, Behrens-Baumann W (2011): Antiglaukomatöse Kataraktoperation – Fakt oder Mythos? Vortrag. 25. Kongress der Deutschsprachigen Gesellschaft für Intraokularlinsen-Implantation, Interventionelle und Refraktive Chirurgie (DGII), 10.–12.03.2011, Frankfurt/Main
4. Heinrich MA, Wecke T, Thieme H (2015): Retinopathia solaris: Morphologie und Funktion im Verlauf. Posterpräsentation. 113. Kongress der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft (DOG), 01.–04.10.2015, Berlin
5. Heinrich MA, Wecke T, Thieme H (2014): Vergleich des Augeninnendrucks vor und nach Selektiver Lasertrabekuloplastik. Vortrag. 22. Jahrestagung der Gesellschaft der Augenärzte Sachsen-Anhalts und Thüringens (SATH), 05.–06.09.2014, Magdeburg
6. Heinrich MA, Wecke T, Thieme H (2014): Chronische (Chorio)retinopathia centralis serosa. Vortrag. Angio Kolleg der 22. Jahrestagung der Gesellschaft der Augenärzte Sachsen-Anhalts und Thüringens (SATH), 05.–06.09.2014, Magdeburg
7. Heinrich MA, Walter S (2012): Randfurchenkeratitis auf dem Boden einer systemischen Vaskulitis. Vortrag. 58. Magdeburger Augenärztliche Fortbildung (MAF), 22.02.2012, Magdeburg
8. Heinrich MA, Thieme H (2014): „Hornhautkalk“ aus Augentropfen. Vortrag. 65. Magdeburger Augenärztliche Fortbildung (MAF), 21.05.2014, Magdeburg
9. Heinrich MA, Thieme H (2016): Inkompletter gemischter retinaler Gefäßverschluss. Vortrag. 69. Magdeburger Augenärztliche Fortbildung (MAF), 16.03.2016, Magdeburg



## 9 Danksagung

---

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. Arne Viestenz für die Vergabe eines Dissertationsthemas, das sich als zu meinen Interessen denkbar passend erweisen sollte. Seine Weitsicht bei der Planung und sein Engagement während der Durchführung dieser Studie haben ihr Gelingen erst ermöglicht. Seine ausgezeichnete Betreuung ist in die oben genannte Originalarbeit und diese Dissertation gemündet.

Herrn Prof. Dr. med. Wolfgang Behrens-Baumann als Direktor der Universitätsaugenklinik Magdeburg bis zum Jahr 2011 und Herrn Prof. Dr. med. Hagen Thieme als seinem Nachfolger ab dem Jahr 2012 danke ich dafür, unter ihrer Leitung diese Studie durchgeführt und die prägenden Jahre der Weiterbildung zum Augenarzt verbracht haben zu dürfen.

Allen eingeschlossenen Patienten gebührt Dank für ihre Bereitschaft zur Teilnahme an dieser Studie.

## 10 Ehrenerklärung

---

Ich erkläre, dass ich die der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität zur Promotion eingereichte Dissertation mit dem Titel

**Validierung des  
tensionssenkenden Effekts einer Kataraktoperation  
im Quer- und Längsschnitt  
anhand vergleichender Messungen mit  
Goldmann-Applanations- und  
dynamischer Konturtonometrie**

in der Universitätsaugenklinik der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

mit Unterstützung durch    Herrn Prof. Dr. med. Arne Viestenz  
  Herrn Prof. Dr. med. Wolfgang Behrens-Baumann  
  Herrn Prof. Dr. med. Hagen Thieme

ohne sonstige Hilfe durchgeführt und bei der Abfassung der Dissertation keine anderen als die dort aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Bei der Abfassung der Dissertation sind Rechte Dritter nicht verletzt worden.

Ich habe diese Dissertation bisher an keiner in- oder ausländischen Hochschule zur Promotion eingereicht. Ich übertrage der Medizinischen Fakultät das Recht, weitere Kopien meiner Dissertation herzustellen und zu vertreiben.

Magdeburg, im Mai 2016

Unterschrift

## **11 Lebenslauf**

---

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Datenschutzgründen nicht enthalten.