



Evaluation von Korrekturformeln für die Tonometrie

Die Goldmann-Appplanationstonometrie in Annäherung zur dynamischen Contour-Tonometrie

Hintergrund

Eine möglichst exakte Bestimmung des Augeninnendrucks ist für das Management von Glaukompatienten essenziell und ist meist der Schlüssel zur korrekten Diagnose, damit ein progredienter Sehverlust aufgehalten oder zumindest verlangsamt werden kann.

Bis heute ist der Goldstandard zur Messung des Intraokularsdrucks (IOD) die Appplanationstonometrie nach Goldmann (GAT), welche vor über 60 Jahren eingeführt wurde [10]. Die GAT ist aufgrund ihres Messprinzips von den spezifischen Eigenschaften der Hornhaut abhängig. So ist allgemein bekannt, dass Faktoren wie die zentrale Hornhautdicke („central corneal thickness“, CCT) oder die Hornhautrigidität den applikatorisch gemessenen Augeninnendruck beeinflussen [15, 22]. Es wird davon ausgegangen, dass die GAT den wahren Augendruck bei Patienten mit dicker Hornhaut überschätzt und bei dünner Hornhaut unterschätzt [9, 10, 15]. Letzteres – die Unterschätzung des wahren IOD – ist klinisch besonders relevant und sollte zwingend vermieden werden.

Zur Eliminierung des Messfehlers und Annäherung der GAT an den wahren Augeninnendruck sind verschiedene Korrekturformeln und -faktoren entwickelt worden [4–7, 15, 17, 20, 21]. Die 5 in dieser Studie untersuchten Korrekturformeln, welche aufgrund ihrer klinischen Relevanz und Bekanntheit ausgewählt wurden, beziehen neben der Hornhautdicke je nach

Formel auch Alter und Hornhautradius (R) mit ein [5–7, 15, 21].

Nachdem bereits Goldmann die Abhängigkeit seiner Appplanationstonometrie von der Hornhautdicke bemerkt hatte, entwickelten Ehlers et al. 1975 eine lineare Korrekturformel, um den nachgewiesenen Effekt der CCT auf den applikatorisch gemessenen Druck zu korrigieren [5]. Es folgten weitere Korrekturformeln, darunter auch die im deutschsprachigen Raum wohl bekannteste und in ihrer Anwendung einfachste, die Dresdner Korrekturtabelle [Tab. 1]. Diese wurde 2006 von Kohlhaas et al. vorgestellt und schlägt eine Korrektur von ca. 1 mmHg pro 25 µm Abweichung der CCT von 550 µm vor. Der Korrekturfaktor wird addiert bei dünner und subtrahiert bei dicker Hornhaut, um so der Abhängigkeit der GAT von der CCT entgegenzuwirken [15]. Elsheikh, Alhasso und Pye untersuchten 2009 den Einfluss verschiedener kornealer Eigenschaften auf die GAT und entwickelten einen Korrekturfaktor K, welcher neben der CCT auch Hornhautkrümmungsradien und Patientenalter mit einbezieht [6]. Die Definition von Korrekturfaktor und Variablen zeigt [Tab. 2]. 2011 publizierten Elsheikh et al. eine Modifizierung oben genannter Formel [7]. Spoerl et al. machten 2012 darauf aufmerksam, dass die veröffentlichten Korrekturfaktoren in erster Linie aufgrund der verschiedenen Altersverteilungen der jeweiligen Studien variierten. Die daraus entwickelte Gleichung soll dementsprechend den

Einfluss von Alter und CCT korrigieren [21].

Im Gegensatz zur GAT ermöglicht die dynamische Contour-Tonometrie (DCT, Pascal ©, Ziemer Ophthalmics, Port, Schweiz) eine von den kornealen Eigenschaften weitgehend unabhängige und kontinuierliche Bestimmung des Augendrucks [12, 14, 16, 19]. Dass die DCT sowohl in vitro wie auch am Patientenauge sehr nahe am tatsächlich vorherrschenden Augendruck misst, konnten verschiedene Studien anhand intrakameraler manometrischer Referenzsonden bestätigen [2, 3, 14, 16]. Aus diesem Grund verwenden wir in dieser Studie die DCT-Messung als Referenz- und Vergleichswert.

Die Vielzahl und Uneinheitlichkeit der publizierten Korrekturansätze einerseits und die fehlende klinische Evaluation andererseits waren die Motivation zu dieser Studie mit dem Ziel, die Genauigkeit und den klinischen Nutzen der 5 publizierten Korrekturformeln zu evaluieren.

Methodik

Diese Studie folgt der Deklaration von Helsinki und wurde von der Kantonalen Ethikkommission des Kanton Zürich bewilligt (KEK-ZH-Nr. 2011-0311). Eingeschlossen wurden Patienten, welche zwischen Juli 2011 und Mai 2016 aufgrund ihrer Glaukomerkrankung oder dem Verdacht auf eine Glaukomerkrankung die ambulanten Sprechstunden der

Tab. 1 Dresdner Korrekturtabelle nach Kohlhaas et al. [15]

Hornhautdicke (μm)	475	500	525	550	575	600	625	650	675
Tensio-Korrektur (mmHg)	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4	-5

Korrekturformel: $\Delta\text{IOD} = (-0,0423 \times \text{CCT}) + 23,28$
 IOD Intraokulardruck; CCT zentrale Hornhautdicke

Tab. 2 Definition der Korrekturformel nach Elsheikh, Alhasso und Pye [6]

$K = \text{IOPG}/\text{IOP}_{\text{true}} = A_{\text{CCT}} \cdot A_{\text{R}} \cdot A_{\text{Alter}} \cdot A_{\text{IOPG}}$
$A_{\text{CCT}} = \text{Einfluss Variation CCT [mm]} = 2,0 (\text{CCT}-0,520)^2 + 1,4 (\text{CCT}-0,520) + 0,47$
$A_{\text{R}} = \text{Einfluss Variation R [mm]} = 1 - 0,1 (R-7,8)$
$A_{\text{Alter}} = \text{Einfluss Variation Alter [Jahre]} = 0,00555 (\text{Alter}-50)^2 - 0,0266 (\text{Alter}-50) + 14,52$
$A_{\text{IOPG}} = \text{Einfluss Variation IOPG [mmHg]} = (\text{IOPG} + 38,9)^{-0,487}$

K Korrekturfaktor, IOP Intraokulardruck, IOPG IOP nach Goldmann, CCT zentrale Hornhautdicke, R Hornhautradius, A Einfluss der Variation des entsprechenden Faktors

Tab. 3 Demografische und okuläre Charakteristika

Anzahl Patienten (Augen)	112 (44 % OD und 56 % OS)
Geschlecht	40,2 % M, 59,8 % W
Mittleres Alter \pm SD (Jahre)	66,3 \pm 13,1
Glaukomdiagnose	60,7 % primäres Offenwinkelglaukom 21,4 % Sekundärglaukom 17,9 % okuläre Hypertension
Medianer Visus (min, max, IQR)	1 (0,01, 1, 0,2)
Linsenstatus	37,5 % Katarakt 24,1 % Pseudophakie 38,4 % andere
St. n. Trabekulektomie (%)	14,3 %
Myopie ≤ -3 (dpt, %)	14,3 %
Anzahl Glaukommedikamente (n)	24,1 % keine 20,5 % 1 25,9 % 2 23,2 % 3 5,4 % 4

SD Standardabweichung, IQR Interquartilbereich, OD rechtes Auge, OS linkes Auge, dpt Dioptrie

Augenklinik des UniversitätsSpitals Zürich oder des Talacker Augen Zentrum Zürich aufsuchten. Die Studienpatienten wurden mehrheitlich mittels Ausschlusskriterien definiert: Patientenalter < 18 Jahre, Astigmatismus $> 2,0$ dpt, Kontaktlinsenträger, Status nach refraktiven oder anderen kornealen Eingriffen sowie akuten oder chronischen Hornhauterkrankungen.

Alle Studienpatienten wurden vollständig ophthalmologisch untersucht: Refraktion, Visusprüfung, Untersuchung an der Spaltlampe inklusive Fundoskopie, Biometrie, Pachymetrie (optisch und sonographisch), peripapilläre optische Kohärenztomographie (OCT; CirrusTM HD-OCT 5000, Carl Zeiss Meditec AG, Jena, Deutschland) und Octopus-Peri-

metrie (Haag-Streit Octopus 900, Haag-Streit, Koenitz, Schweiz) mit der dynamischen Strategie. Der Augendruck wurde von 2 erfahrenen Untersuchern (CK, MT) in randomisierter Reihenfolge je 2-mal mittels Goldmann-Appplanationstonometrie und 2-mal mit dem Pascal-Tonometer (DCT) gemessen. Die DCT-Messung musste einer Qualitätsstufe Q1 entsprechen.

Nach einer Literaturrecherche der bis anhin publizierten Korrekturformeln wurden in einem Konsensusverfahren der 2 Glaukomexperten (CK, MT) 5 Korrekturformeln ausgewählt, welche die Experten als klinisch relevant und einfach anwendbar einschätzten. Die Messungen der GAT wurden daraufhin gemäß den 5 Korrekturformeln nach

Ehlers ($\text{IOP}_{\text{Ehlers}}$), Dresdner Korrekturtabelle ($\text{IOP}_{\text{Dresdner}}$), Elsheikh & Pye ($\text{IOP}_{\text{Elsheikh\&Pye}}$), Elsheikh ($\text{IOP}_{\text{Elsheikh}}$) und Spoerl ($\text{IOP}_{\text{Spoerl}}$) angepasst [5–7, 15, 21]. Für die statistische Auswertung wurde pro Patient jeweils ein Auge nach dem Zufallsprinzip ausgewählt.

Primärer Studienendpunkt war die Beurteilung der Konkordanz der 5 korrigierten Druckwerte der GAT und dem Messwert der DCT. Eine Druckdifferenz von ≥ 2 mmHg wurde als klinisch signifikant erachtet. Als sekundärer Studienendpunkt wurde der Zusammenhang zwischen Hornhautdicke und Diskordanz (Abweichung) der Druckwerte, korrigiert und unkorrigiert, untersucht.

Statistische Auswertung

Die Fallzahlberechnung erfolgte in einer Pilotstudie von 35 Patienten und ergab bei einer Standardabweichung von 3,9 mmHg für die Diskordanz zwischen GAT und DCT, Signifikanzniveau 0,005 und 99 % Power, eine optimale Fallzahl von 105 Patienten (unabhängige Beobachtungen/Augen). Die statistische Auswertung wurde mit SPSS Version 22 (IBM Corporation, New York, NY, USA) durchgeführt. Es erfolgte die Berechnung von deskriptiven Statistiken wie Mittelwert, Standardabweichung, Median und Interquartilbereich sowie relativen und absoluten Häufigkeiten. Der Zusammenhang zwischen den Diskordanzen zur DCT und verschiedenen Faktoren (Alter, CCT, Achsenlänge, R) wurde anhand des nichtparametrischen Korrelationskoeffizienten nach Spearman und einfacher sowie multipler linearer Regression analysiert. Ein p -Wert kleiner als 0,05 wurde als statistisch signifikant gewertet.

Ergebnisse

Es wurden 112 Patienten (112 Augen) in die Studie eingeschlossen, 45 Männer (40 %) und 67 Frauen (60 %). Das Durchschnittsalter betrug 66 ± 13 Jahre (26 bis 90 Jahre). Als Hauptdiagnose bestand bei 61 % der Augen eine Form des primären Offenwinkelglaukoms, 21 % hatten ein Sekundärglaukom und 18 % eine okuläre Hypertension (OHT). Die demografi-

J. Wachtl · M. Töteberg-Harms · S. Frimmel · C. Kniestedt

Evaluation von Korrekturformeln für die Tonometrie. Die Goldmann-Appplanationstonometrie in Annäherung zur dynamischen Contour-Tonometrie

Zusammenfassung

Hintergrund. Die exakte Bestimmung des Augendruckes (IOD) ist für das Management des Glaukoms essenziell. Die Applanationstonometrie nach Goldmann (GAT) ist bis heute Goldstandard zur IOD-Messung, jedoch aufgrund ihres Prinzips von den Eigenschaften der Hornhaut abhängig. Das Wissen um die Ungenauigkeit der GAT war Anlass für die Entwicklung verschiedener Korrekturformeln.

Ziel der Arbeit. Ziel der Studie war die objektive Evaluation von 5 Korrekturformeln der GAT mit Beurteilung von Genauigkeit und klinischer Relevanz.

Material und Methoden. Prospektive Studie mit 112 Glaukompatienten. Messung des IOD in randomisierter Reihenfolge mittels GAT und dynamischer Contour-Tonometrie (DCT)

und Anwendung der 5 Korrekturformeln. Primärer Studienendpunkt: Beurteilung der Konkordanz der korrigierten Druckwerte mit der DCT-Messung. Eine Druckdifferenz von ≥ 2 mmHg galt als klinisch signifikant. Sekundärer Studienendpunkt: Assoziation zwischen Diskordanz und Hornhautdicke (CCT).

Ergebnisse. Die Patienten (60 % weiblich; 56 % OS) waren durchschnittlich 66 ± 13 Jahre alt. Der mittlere IOD war 17,0 mmHg mit GAT und 20,3 mmHg mit DCT. Die mittlere Diskordanz zwischen GAT und DCT betrug 3,3 mmHg. Die korrigierten Druckwerte ergaben Diskordanzen zwischen 2,7 und 5,4 mmHg. Die CCT korrelierte positiv mit den

korrigierten Diskordanzen und negativ mit der unkorrigierten Differenz DCT und GAT.

Diskussion. Die Anwendung von Korrekturformeln sollte vermieden werden. Dies zeigt die erhebliche Streuung, welche alle untersuchten Korrekturformeln verursachten, sowie die fehlende Annäherung an den DCT-Wert. Die Korrektur zu tieferen Druckwerten widerspricht einer sinnvollen Korrektur und birgt umso mehr das Risiko einer verpassten Diagnosestellung des Glaukoms.

Schlüsselwörter

Goldmann-Appplanationstonometrie · Intraokulardruck · Glaukom · Dynamische Contour-Tonometrie · Korrekturformel

Evaluation of correction formulas for tonometry. The Goldmann applanation tonometry in approximation to dynamic contour tonometry

Abstract

Background. Accurate determination of intraocular pressure (IOP) is essential for correct management of glaucoma. Goldmann applanation tonometry (GAT) is the gold standard for measuring IOP despite its limitations due to its dependence on corneal properties. With the aim of improving the accuracy of GAT readings, several correction formulas have been developed.

Objective. The aim of this study was to investigate the accuracy and clinical relevance of five correction equations for GAT.

Material and methods. Prospective study of 112 glaucoma patients at the University Hospital and Talacker Eye Center, Zurich, Switzerland. The IOP was measured with GAT and dynamic contour tonometry (DCT) in

randomized order. The GAT readings were adjusted with five correction equations. The primary study endpoint was the degree of concordance between corrected GAT and DCT readings. A discordance of ≥ 2 mm Hg was defined as significant. The association between discordant IOP measurements and central corneal thickness (CCT) was the secondary study endpoint.

Results. The mean patient age was 66 ± 13 years (60% females and 56% left eyes). The mean IOP was 17.0 mm Hg for GAT and 20.3 mm Hg for DCT, with a discordance of 3.3 mm Hg between GAT and DCT. The discordances between DCT and the corrected values ranged from 2.7 to 5.4 mm Hg. Spearman's rank testing showed a positive

correlation between CCT and the discordances of all correction equations and a negative correlation between CCT and the discordance of DCT and GAT.

Conclusion. The use of GAT correction formulas involves the risk of creating significant error. The correction equations examined showed extensive scatter and resulted in mean IOP values that were lower than the IOP initially measured by GAT. Thus the use of any correction equation may delay diagnosis of glaucoma and should be avoided.

Keywords

Goldmann Applanation Tonometry · Intraocular Pressure · Glaucoma · Dynamic Contour Tonometry · Correction formula

schen Charakteristika der Studienpopulation sind in **Tab. 3** zusammengefasst.

Die durchschnittliche CCT betrug $537 \pm 36 \mu\text{m}$ und die Achsenlänge $23,9 \pm 1,9 \text{ mm}$. Der mittlere Augendruck nach Goldmann betrug $17,0 \pm 4,1 \text{ mmHg}$. Mittels DCT wurde ein mittlerer IOD von $20,3 \pm 4,5 \text{ mmHg}$ gemessen. Dies entspricht einem Druckunterschied von durchschnittlich $3,3 \pm 1,9 \text{ mmHg}$. Die 5 Korrekturformeln er-

gaben mittlere Druckwerte zwischen minimal $14,9 \text{ mmHg}$ (Elsheikh & Pye) und maximal $17,6 \text{ mmHg}$ (Dresdner Korrekturtabelle). Nur die Korrekturwerte nach der Dresdner Tabelle resultierten in einer Annäherung an die DCT-Werte (**Abb. 1**). Alle Differenzen waren $\geq 2 \text{ mmHg}$ und statistisch signifikant ($p < 0,001$). Die mittleren Druckwerte für jede Korrekturformel und Differenzen zur DCT sind in **Tab. 4** wiedergegeben.

Eine multiple Regressionsanalyse ergab keinen Einfluss durch das Alter, die Achsenlänge oder die Hornhautkrümmungsradien auf die Diskordanz zwischen DCT und GAT bzw. korrigierten GAT-Werten. Nur die CCT zeigte einen signifikanten Einfluss auf den Grad der Diskordanzen (**Tab. 5**).

Mit Ausnahme der Korrekturformel nach Elsheikh [7] ($p = 0,367$) zeigten alle Korrekturen eine signifikante posi-

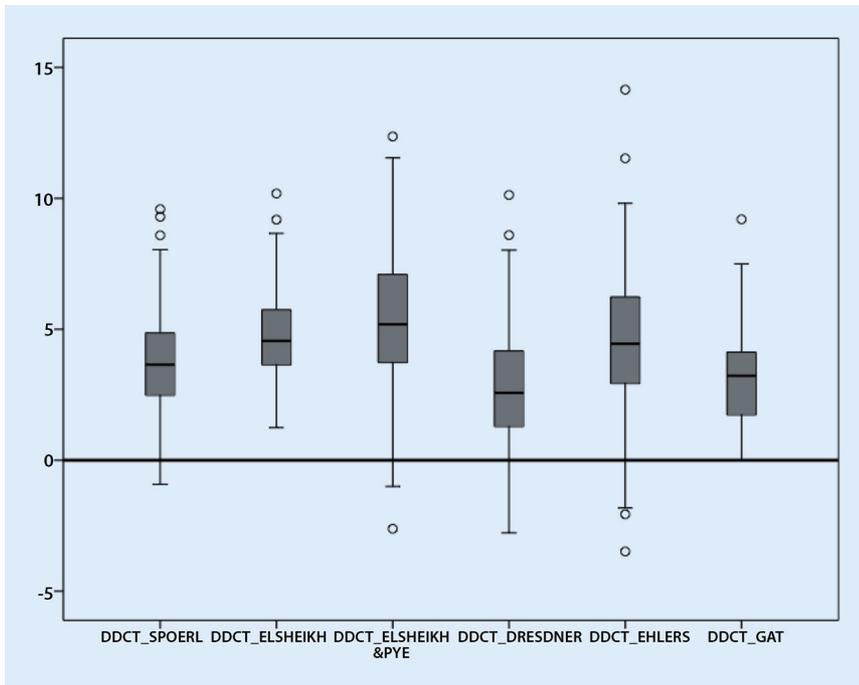


Abb. 1 ▲ Diskordanzen der korrigierten Druckwerte zur DCT-Messung (*DDCT_Korrekturformel* [z. B. *DDCT_SPOERL*] Differenz zwischen DCT-Messwert und entsprechender Korrekturformel bzw. IOD nach Goldmann). *DDCT_SPOERL* Differenz von DCT-Messwert und Korrekturwert nach Spoerl, *DDCT_ELSHEIKH* Differenz von DCT-Messwert und Korrekturwert nach Elsheikh, *DDCT_ELSHEIKH&PYE* Differenz von DCT-Messwert und Korrekturwert nach Elsheikh&Pye, *DDCT_DRESDNER* Differenz von DCT-Messwert und Korrekturwert nach Dresdener Formel, *DDCT_EHLERS* Differenz von DCT-Messwert und Korrekturwert nach Ehlers, *DDCT_SPOERL* Differenz von DCT-Messwert und GAT-Messwert

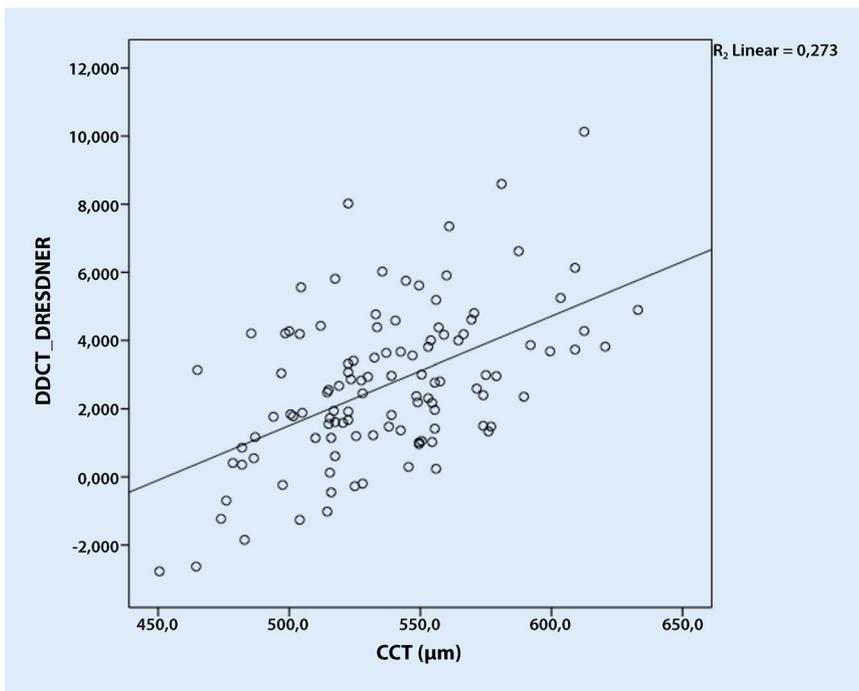


Abb. 2 ▲ Korrelation von Hornhautdicke und Diskordanz zwischen DCT und Dresdener Korrekturformel (*DDCT_DRESDNER* Differenz zwischen DCT-Messwert und dem nach Dresdener Formel korrigierten Augendruck, *CCT* Zentrale Hornhautdicke)

ve Korrelation zwischen Diskordanz und CCT ($p < 0,001$) im Spearman-Rank-Test: Je dicker die Hornhaut, desto größer die Diskordanz zu den korrigierten Druckwerten. Somit korrigierten alle Formeln besser im Kollektiv der dünnen Hornhäute als in dem der dickeren Hornhäute (Abb. 2). Im Gegensatz dazu zeigte der GAT-Messwert eine negative Korrelation mit der CCT ($r_s = -0,22$, $p = 0,02$). Dementsprechend nimmt die Diskordanz zwischen DCT und GAT mit steigender Hornhautdicke ab.

Diskussion

Das Wissen um die Ungenauigkeit der Goldmann-Applanationstonometrie bei der Bestimmung des Augendrucks war Anlass für die Entwicklung verschiedener Korrekturansätze. Die erhebliche Streuung der Werte der untersuchten Korrekturformeln wurde im Rahmen dieser Studie klar ersichtlich. Der Versuch der Bestimmung des tatsächlichen Augendrucks mittels Korrekturformeln erscheint deshalb nicht sinnvoll.

Es ist naheliegend, dass simple lineare Korrekturformeln wie diejenigen von Ehlers oder Kohlhaas das Verhältnis zwischen IOD und CCT zu stark zu vereinfachen versuchen. Jedoch erreichten auch die komplexeren Formeln in unserer Studie keine akkuraten Korrekturen. Übereinstimmend mit unseren Resultaten erreichten Ang et al., welche retrospektiv andere Korrekturformeln untersuchten, ebenfalls keine Verbesserung durch die Anwendung von Korrekturformeln [1, 8, 11, 13, 18].

Erstaunlicherweise korrigierten alle Formeln in die falsche Richtung, mit Ausnahme der Dresdener Korrekturabelle (Abb. 1). Das Ergebnis war entgegen unseren Erwartungen keine Annäherung an den DCT-Wert mit Korrektur des Druckwerts nach oben, sondern umgekehrt nach unten zu tieferen Druckwerten. Dies widerspricht einer sinnvollen Korrektur und birgt umso mehr das Risiko einer verpassten Diagnosesstellung des Glaukoms.

Die Formel nach Elsheikh [7] ist die einzige Korrektur, die eine Unabhängigkeit von der CCT zeigte. Bei den übrigen Formeln konnte ein signifikanter Einfluss

Tab. 4 IOD_{GAT}, IOD_{korrigiert} und Diskordanz zur DCT-Messung

IOD _{GAT}	Mittlerer IOD _{GAT} (mmHg)	Mittlere Diskordanz (mmHg) IOD _{DCT} – IOD _{GAT} (±SD)	p-Wert
	17,0	3,3 (±2,0)	<0,001
Korrekturformel	Mean IOD _{korrigiert} (mmHg)	Mittlere Diskordanz (mmHg) IOD _{DCT} – IOD _{korrigiert} (±SD)	p-Wert
Ehlers	15,8	4,5 (±2,9)	<0,001
Dresdner	17,6	2,7 (±2,3)	<0,001
Elsheikh & Pye	14,9	5,4 (±2,8)	<0,001
Elsheikh	15,5	4,8 (±2,0)	<0,001
Spoerl	16,6	3,7 (±2,1)	<0,001

IOD_{GAT} IOD nach Goldmann, IOD_{DCT} IOD nach dynamischer Contour-Tonometrie, SD Standardabweichung

Tab. 5 Einfluss der Hornhautdicke auf die Differenz zwischen DCT und Goldmann (korrigiert und unkorrigiert)

Outcome	Prädiktor	R ²	ANOVA p-Wert	α-Konstante („Y intercept“)	p-Wert	„β-slope“	p-Wert
DCT – GAT	CCT	0,04	0,042	8,76	0,001	-0,01	0,042
DCT – EHLERS	CCT	0,56	<0,001	-26,97	<0,001	0,06	<0,001
DCT – DRESDNER	CCT	0,27	<0,001	-14,5	<0,001	0,03	<0,001
DCT – ELSH & PYE	CCT	0,13	<0,001	-8,6	0,016	0,026	<0,001
DCT – ELSHEIKH	CCT	0,02	0,2	1,35	0,6	0,006	0,2
DCT – SPOERL	CCT	0,13	<0,001	-7,12	0,008	0,02	<0,001

DCT dynamische Contour-Tonometrie, GAT Goldmann-Appplanationstonometrie, DCT-GAT Differenz zwischen DCT und GAT, DCT-Korrekturformel (z. B. DCT-Ehlers) Differenz zwischen DCT und jeweiliger Korrekturformel, CCT zentrale Hornhautdicke

der Hornhautdicke auf den korrigierten Druck nachgewiesen werden. Dementsprechend korrelierten die Diskordanzen jener Formeln positiv mit der CCT. Je dicker die Hornhaut, desto grösser die Diskordanz. Diesen Zusammenhang stellten auch Park et al. fest [18]. Die Dresdner Korrekturabelle erreichte bei einer Hornhautdicke von 450 µm eine Diskordanz von ca. 0 µm zwischen korrigiertem Wert und DCT (Abb. 2). Jedoch ist der Nutzen einer Formel, welche sich nur bei sehr dünner CCT akkurat zeigt, fraglich. Zudem ist die Aussagekraft aufgrund der kleinen Fallzahl von Patienten mit CCT um 450 µm sowie der Tatsache, dass mit der Dresdner Formel andererseits Diskordanzen von über 10 mmHg resultierten, stark eingeschränkt. Der nicht korrigierte GAT-Messwert korrelierte negativ mit der CCT. Je dicker die Hornhaut, desto kleiner die Diskordanz zwischen GAT und DCT. Diese Abhängigkeit ist bereits bekannt [13, 16].

Limitierend an dieser Studie ist, dass nicht alle bis anhin publizierten Korrek-

turformeln untersucht wurden. Für den klinischen Gebrauch durch die Autoren als zu kompliziert erachtete Korrekturansätze wurden nicht berücksichtigt [4, 17, 20]. Durch die in dieser Studie klar demonstrierten Fehlerquellen der untersuchten Korrekturformeln stellt sich die Frage, ob eine Korrektur mittels Korrekturformeln überhaupt möglich ist.

Die dynamische Contour-Tonometrie wird gegenwärtig in erster Linie von Glaukomspezialisten verwendet. Aus klinischer Erfahrung erreicht die DCT bei Patienten mit sehr trockener, rauer oder vernarbter Hornhaut nicht die gewünschte Qualitätsstufe. Die DCT ist zudem eher ungeeignet bei Patienten mit ungenügender Fixation oder Kooperation (Kinder), v. a. da die Messung länger dauert als bei der GAT. Während für einen routinierten Untersucher mit der GAT ein Hornhautkontakt von 1–2 s genügt, sind mit der DCT mindestens 5 s notwendig [19]. Einflussfaktoren, die das Messergebnis der DCT beeinflussen, sind bis anhin wenig untersucht.

Es ist jedoch bekannt, dass die DCT weitgehend unabhängig von der Hornhautdicke misst. Wie die mittels DCT gemessenen durchwegs höheren Augen-druckwerte interpretiert werden müssen und ob eine Anpassung des Zieldrucks erfolgen sollte, ist unklar. Wir gehen jedoch davon aus, dass die DCT-Werte dem wahren Augendruck deutlich besser entsprechen als die applanatorisch gemessenen GAT-Werte, insbesondere bei Patienten mit dünner Hornhaut. Die Schwächen der Goldmann-Appplanationstonometrie, der gegenwärtige Goldstandard, dürfen nicht unterschätzt werden. Eine Aussage darüber, welche Korrekturformel der GAT am besten ist, erübrigt sich in Anbetracht der Resultate dieser Studie. Die Anwendung von Korrekturformeln ist riskant und sollte vermieden werden.

Fazit für die Praxis

- Eine möglichst exakte Bestimmung des Augendrucks ist für das Management von Glaukompatienten essenziell.
- Die Resultate der evaluierten Korrekturformeln streuen sehr stark, v. a. bei dicken Hornhäuten.
- Eine Annäherung an den wahren Augendruck mittels Korrekturformeln scheint riskant zu sein.
- Die Korrektur zu tieferen Druckwerten birgt das Risiko einer Fehlinterpretation des klinischen Bildes.
- In unklaren Fällen empfiehlt sich die Anwendung eines alternativen Druckmessverfahrens wie die dynamische Contour-Tonometrie.

Korrespondenzadresse



PD Dr. C. Kniestedt, FEBO
 Talacker Augen Zentrum
 Zürich, TAZZ
 Pelikanstr. 18, 8001 Zürich,
 Schweiz
 kniestedt@tazz.ch

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. J. Wachtl, M. Töteberg-Harms, S. Frimmel und C. Kniestedt geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Alle im vorliegenden Manuskript beschriebenen Untersuchungen am Menschen wurden mit Zustimmung der zuständigen Ethik-Kommission, im Einklang mit nationalem Recht sowie gemäß der Deklaration von Helsinki von 1975 (in der aktuellen, überarbeiteten Fassung) durchgeführt. Von allen beteiligten Patienten liegt eine Einverständniserklärung vor.

Literatur

- Ang GS, Nicholas S, Wells AP (2011) Poor utility of intraocular pressure correction formulae in individual glaucoma and glaucoma suspect patients. *Clin Exp Ophthalmol* 39:111–118
- Boehm AG et al (2008) Dynamic contour tonometry in comparison to intracameral IOP measurements. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 49:2472–2477
- Ceruti P et al (2009) Comparison of Goldmann applanation tonometry and dynamic contour tonometry in healthy and glaucomatous eyes. *Eye (Lond)* 23:262–269
- Chihara E (2008) Assessment of true intraocular pressure: the gap between theory and practical data. *Surv Ophthalmol* 53:203–218
- Ehlers N, Bramsen T, Sperling S (1975) Applanation tonometry and central corneal thickness. *Acta Ophthalmol (Copenh)* 53:34–43
- Elsheikh A, Alhasso D, Pye D (2009) Goldmann tonometry correction factors based on numerical analysis. *J Biomech Eng* 131:111013
- Elsheikh A et al (2011) Multiparameter correction equation for Goldmann applanation tonometry. *Optom Vis Sci* 88:E102–E112
- 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
- Francis BA et al (2007) Effects of corneal thickness, corneal curvature, and intraocular pressure level on Goldmann applanation tonometry and dynamic contour tonometry. *Ophthalmology* 114:20–26
- Goldmann H, Schmidt T (1957) Applanation tonometry. *Ophthalmologica* 134:221–242
- Gunvant P et al (2005) Evaluation of tonometric correction factors. *J Glaucoma* 14:337–343
- Kanngiesser HE, Kniestedt C, Robert YC (2005) Dynamic contour tonometry: presentation of a new tonometer. *J Glaucoma* 14:344–350
- Kniestedt C et al (2005) Clinical comparison of contour and applanation tonometry and their relationship to pachymetry. *Arch Ophthalmol* 123:1532–1537
- 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
- Kohlhaas M et al (2006) Effect of central corneal thickness, corneal curvature, and axial length on applanation tonometry. *Arch Ophthalmol* 124:471–476
- Ku JY et al (2006) Comparison of intraocular pressure measured by Pascal dynamic contour tonometry and Goldmann applanation tonometry. *Eye (Lond)* 20:191–198
- Orsengo 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
- Park SJ et al (2012) The effect of thin, thick, and normal corneas on Goldmann intraocular pressure measurements and correction formulae in individual eyes. *Ophthalmology* 119:443–449
- Schneider E, Grehn F (2006) Intraocular pressure measurement-comparison of dynamic contour tonometry and goldmann applanation tonometry. *J Glaucoma* 15:2–6
- Shimmyo M et al (2003) Intraocular pressure, Goldmann applanation tension, corneal thickness, and corneal curvature in Caucasians, Asians, Hispanics, and African Americans. *Am J Ophthalmol* 136:603–613
- Spoerl E, Terai N, Pillunat LE (2012) Age-dependent correction factors for goldmann tonometry. *J Glaucoma* 21:276–277
- Velten IM, Wisse M (1998) Central corneal thickness in normal tension glaucoma. 96. German Ophthalmological Society Meeting