

# Zur Herkunft der Hornhautdaten des Gullstrand-Auges

W. Haigis

## Zusammenfassung

Die numerischen Werte für die optischen Größen (Brechungsindices, Dicke, Krümmungsradien) des Hornhautsystems des Gullstrand-Auges stammen im Wesentlichen aus der wissenschaftlichen Literatur des späten 19. Jahrhunderts. Nur wenige Messungen wurden von Gullstrand selbst durchgeführt. Insbesondere die Bestimmung des hinteren kornealen Krümmungsradius basiert nur auf einer sehr kleinen Anzahl von Messungen.

Die Eignung des Hornhautsystems des schematischen Gullstrand-Auges als realistisches biometrisches Modell für die Hornhaut erscheint daher fraglich. Unbeeinflusst davon spielt das Gullstrand-Auge auch weiterhin eine wichtige Rolle als selbstkonsistentes Augenmodell für die physiologische Optik.

## Summary

The numerical values for the optical properties (refractive indices, thickness, radii of curvatures) of the corneal system of the Gullstrand eye were mainly derived from the scientific literature of the late 19th century. Only few measurements were performed by Gullstrand himself. Particularly the determination of the posterior corneal curvature is based on a very small number of measurements.

The corneal system of the schematic Gullstrand eye does therefore not seem to be apt to serve as a realistic biometrical model of the cornea. The Gullstrand eye will continue to play an important role as a self-consistent theoretical model eye in visual optics – irrespective of the present findings.

## Einleitung

Das Gullstrand-Auge [1, 2] ist – wie auch die schematischen Augen von Le Grand, Bennett und Rabbetts, Navarro, Liou und Brennan etc. [3] – ein idealisiertes theoretisches Modellauge. Es liegt in verschiedenen Modifikationen als „exaktes“ oder „vereinfachtes“ schematisches Auge in Akkommodationsruhe oder unter maximaler Akkommodation vor. Als theoretisches Auge stellt es exakte Daten für alle Komponenten des optischen Systems „Auge“ zur Verfügung: intraokulare Distanzen, Brechungsindices der okularen Medien, Krümmungsradien der kornealen und lenticulären Grenzflächen wie auch die Kardinalpunkte des Auges (jeweils vordere und hintere Haupt-, Brenn- und Knotenpunkte) und weitere Größen. All diese Daten beschreiben zusammen ein selbstkonsistentes Modellauge, das seit vielen Jahrzehnten für die verschiedensten optischen Berechnungen eingesetzt wird – z. B. auch bei der Entwicklung moderner Intraokularlinsen. Dies gilt für das Gullstrand-Auge ebenso wie auch für andere theoretische Augen.

Besondere Bedeutung kommt dem Gullstrand-Auge auch als Grundlage der Kalibrierung augenoptischer Instrumente zu, z. B. von Keratometern.

### Bedeutung des Gullstrand-Auges für die Keratometrie

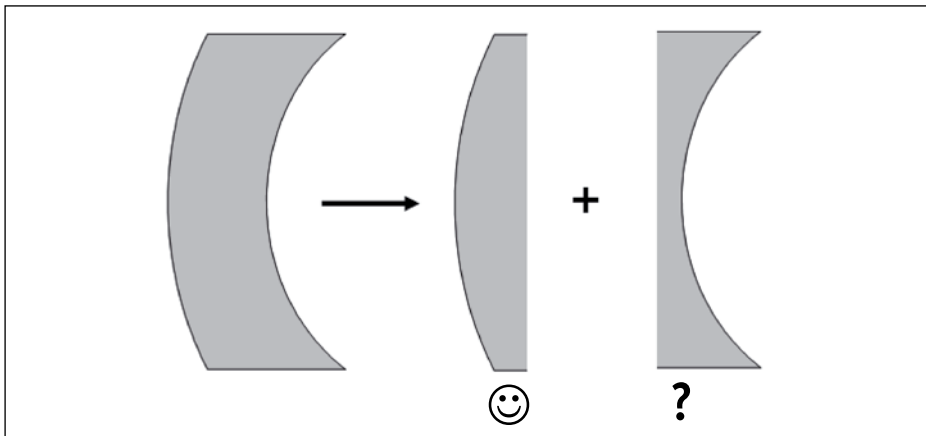
Der Gesamtbrechwert der Hornhaut als Meniskuslinse (Abb. 1) setzt sich aus dem vorderen und hinteren Flächenbrechwert zusammen, wofür jeweils die entsprechenden Krümmungsradien bekannt sein müssen. Keratometrisch oder topografisch gemessen wird aber nur der vordere Hornhautradius. Um dennoch den Gesamtbrechwert der Hornhaut angeben zu können, wird im Allgemeinen angenommen, dass Hinter- und Vorderradius des zu messenden Auges im selben Verhältnis ( $6.8/7.7 = 0.883$ ) stehen wie beim Gullstrand-Auge. In diesem Fall lässt sich der Hornhautbrechwert  $K$  auf einfache Weise aus dem Vorderradius  $R$  berechnen gemäß

$$K = \frac{KI - 1}{R} \quad (1)$$

wobei  $KI$  den sog. Keratometerindex darstellt.

Man kann leicht zeigen [4], dass die Rechnung nach (1) mit einem Keratometerindex von  $KI = 1.3315$  den Gesamtbrechwert, mit  $KI = 1.3375$  den Scheitelbrechwert für  $KI$  ergibt. So werden etwa Zeiss-Geräte im deutschsprachigen Raum mit einem Keratometerindex von  $1.332 \approx 1.3315$  ausgeliefert, Hornhauttopografen und Keratometer aus USA mit einem Wert von 1.3375.

Nach dem Vorangegangenen wird leicht verständlich, dass die Hornhautbrechwertbestimmung nach refraktiver Chirurgie mittels klassischer Keratometrie oder Topografie zwingend zu fehlerhaften Resultaten führen muss, da der refraktive Eingriff das Radienverhältnis vorsätzlich ändert.



**Abb. 1:** Hornhautbrechwertbestimmung: nur der korneale Vorderradius ist der keratometrischen oder topografischen Messung zugänglich; der Hinterradius muss hergeleitet werden

Während Keratometer und Topografen lediglich die Bestimmung des kornealen Vorderradius erlauben, ist es zum Beispiel mit modernen Scheimpflug- oder Scanning-slit-Verfahren möglich, auch den Hinterradius zu messen. Dabei ergeben sich jedoch immer wieder Messwerte, die kleiner sind als der von Gullstrand verwendete Wert von 6.8 mm – z. B. 6.4 mm [5].

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit die Hornhautdaten des Gullstrand-Auges auf biometrischen Messungen beruhen. Mehr noch: Liefern auf dem Gullstrand-Auge basierende Anwendungen und Instrumente realistische Ergebnisse?

### Material und Methoden

Zur Klärung des biometrischen Hintergrundes des Gullstrand-Auges wurde in einer Literaturrecherche versucht, die individuellen Ursprünge der numerischen Werte der einzelnen optischen Elemente des Gullstrand-Auges zurückzuverfolgen. Dabei wurde im Wesentlichen von Hermann von Helmholtz's berühmten „Handbuch der Physiologischen Optik“ [6] Gebrauch gemacht, in dem Allvar Gullstrand in einem eigenen Kapitel mit dem Titel „Die Dioptrik des Auges“ sein schematisches Auge beschreibt.

Abbildung 2 zeigt eine Tabelle aus diesem Kapitel, in dem die im aktuellen Zusammenhang relevanten Größen markiert sind: Brechungsindices von Hornhaut und Kammerwasser, korneale Mittendicke sowie Krümmungsradien von Hornhautvorder- und -rückfläche.

Brechungsindex	der Hornhaut . . . . .	1,376	←.....
„	des Kammerwassers und Glaskörpers . .	1,336	←.....
„	der Linse . . . . .	1,386	
„	der äquivalenten Kernlinse . . . . .	1,406	
Ort der vorderen	Hornhautfläche . . . . .	0.	
„ „ hinteren	„ . . . . .	0,5	mm ←.....
„ „ vorderen	Linienfläche . . . . .	3,6	„
„ „ „	Fläche der äquivalenten Kernlinse . .	4,146	„
„ „ hinteren	„ „ „ . . . . .	6,565	„
„ „ „	Linienfläche . . . . .	7,2	„
Krümmungsradius	der vorderen Hornhautfläche . . . . .	7,7	←.....
„	„ hinteren Hornhautfläche . . . . .	6,8	←.....
„	„ vorderen Linienfläche . . . . .	10,0	„
„	„ „ Fläche der äquiv. Kernlinse	7,911	„
„	„ hinteren „ „ „ . . . . .	-5,76	„
„	„ „ Linienfläche . . . . .	-6,0	„
Brechkraft	der vorderen Hornhautfläche . . . . .	48,83	D.
„	„ hinteren „ . . . . .	-5,88	„
„	„ vorderen Linienfläche . . . . .	5,0	„
„	„ äquivalenten Kernlinse . . . . .	5,985	„
„	„ hinteren Linienfläche . . . . .	8,33	„

Abb. 2: Tabelle zum schematischen Gullstrand-Auge in Akkommodationsruhe (aus [7])

## Ergebnisse

Bei der Zusammenstellung der Daten für sein schematisches Auge bezog sich Gullstrand sowohl auf eigene Messungen als auch auf Ergebnisse aus der ihm vorliegenden zeitgenössischen Literatur. Die einzelnen Beiträge werden im Folgenden beschrieben.

### Brechungsindex der Hornhaut

Aubert und Matthiesen [8] hatten an einem 50-jährigen Mann und einem zwei Tage alten Kind refraktometrisch Brechungsindices von 1.3770 und 1.3721 gemessen. Von Lohnstein [9] war ein Mittelwert von 1.3746 aus den einzelnen kornealen Segmenten bestimmt worden. Schließlich lag Gullstrand aus der letzten Zusammenstellung von Matthiesen [10] ein Wert von 1.3763 vor. Auf der Grundlage dieser Daten verwendete Gullstrand fortan einen Brechungsindex der Hornhaut von 1.376.

### Brechungsindex von Kammerwasser und Glaskörper

In eigenen Messungen [11] hatte Gullstrand den Brechungsindex von Kammerwasser und Glaskörper zu 1.3365 bestimmt. Messungen von Chossat, Brewster und Krause (zit. in [11]) hatten Werte von 1.338, 1.3366 und 1.3420 ergeben. Vergleichbare Ergebnisse waren aus einer Zusammenstellung zahlreicher refraktometrischer Untersuchungen in [12] zitiert worden, sodass Gullstrand fortan von einem Wert von 1.336 für den Brechungsindex von Kammerwasser und Glaskörper ausging.

### Mittendicke der Hornhaut

In eigenen Messungen [6] bestimmte Gullstrand an zwei Augen verschiedener Individuen in vivo Hornhautdicken zwischen 0.46 und 0.51 mm. Blix [13] hatte in vivo Werte von 0.482 bis 0.668 mm ophthalmometrisch an zehn Augen gemessen; bei Ausschluss eines Auges mit Extremwerten ergab sich ein Bereich von 0.506 bis 0.576 mm.

Unter Berücksichtigung dieser Messwerte entschloss sich Gullstrand für 0.5 mm als Hornhautmittendicke.

### Hornhautvorderradius

Bei Messungen des kornealen Vorderradius hatte Donders [14] bei 110 Männern einen Mittelwert von 7.858 mm (Bereich: 8.396 bis 7.280 mm), bei 46 Frauen 7.799 mm (Bereich: 8.487 bis 7.115 mm) erhalten. Aufgrund dieser Daten verwendete Helmholtz [6] fortan einen über die Geschlechter gemittelten Wert von 7.829 mm. Steiger [15] hatte bei 1916 Augen einen Mittelwert von 7.843 gefunden, Sulzer (zit. in [6]) bei einer kleineren Population 7.723 mm.

Im Licht dieser Ergebnisse entschied sich Gullstrand, von einem mittleren Wert von 7.80 und einem Schwankungsbereich von 7.00 bis 8.50 mm für den Krümmungsradius der Hornhautvorderfläche auszugehen. Diesen Wert reduzierte er aber auf 7.70 mm für sein schematisches Auge, wie im Folgenden noch dargestellt wird.

### Hornhauthinterradius

Von Tscherning et al. [16] war 1904 ein Wert von 6.5 mm für den hinteren Hornhautradius angegeben worden. Gullstrand selbst untersuchte zwei Augen mit einem Keratometer nach Blix „vollständig“, wie er schrieb [17], und weitere vier Augen – wegen des hohen Zeitaufwands bei der Messung – „nach einer approximativen Methode“. In jedem Fall bestimmte er das Verhältnis Vorderradius/Hinterradius ( $Ra/Rp$ ) und daraus – unter der Annahme eines Vorderradius  $Ra$  von 7.8 mm – den hinteren Hornhautradius  $Rp$ . Seine Messergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Wie ersichtlich, ergab sich aus Gullstrands sechs Messungen ein Mittelwert für den hinteren Hornhautradius von  $6.67 \pm 0.11$  mm. Wie schon der Vorderradius wurde auch dieses Ergebnis für den Hinterradius zur Verwendung in seinem schematischen Auge noch modifiziert (auf 6.80 mm).

Messung Nr.	$Ra/Rp$	$\Rightarrow Rp/Ra$	$\Rightarrow Rp$ [mm]
1	1.1822	0.846	6.60
2	1.1811	0.847	6.60
3	1.1864	0.843	6.57
4	1.1734	0.852	6.65
5	1.1486	0.871	6.79
6	1.1427	0.875	6.83
MW±sd	1.169±0.019	0.856±0.014	6.67±0.11

**Tab. 1:** Gullstrands Messergebnisse des Verhältnisses  $Ra/Rp$  mit einem Keratometer nach Blix.  $Ra$ : Hornhautvorderradius,  $Rp$ : Hornhauthinterradius

### Hornhautradien im Gullstrand-Auge

Wie ausgeführt hatte sich Gullstrand für einen Wert von 7.80 mm für den vorderen Krümmungsradius entschieden und aus eigenen Messungen 6.67 mm für den hinteren Radius erhalten, woraus sich ein Radienverhältnis von  $Rp/Ra = 6.67/7.80 \approx 6.70/7.80 = 0.859$  ergibt. Tatsächlich wählte er aber zur Definition seines schematischen Auges 7.70 mm für den Vorder- und 6.80 mm für den Hinterradius entsprechend einem Verhältnis von  $Rp/Ra = 6.80/7.70 = 0.883$ . Gullstrand erklärt [18] diese Wahl dadurch, dass die Messungen des Radienverhältnisses in der optischen Zone der Hornhaut und nicht im Schnittpunkt mit der Visierlinie vorgenommen wurden, wodurch das Verhältnis  $Rp/Ra$  zu klein bestimmt wurde. Er führt weiter aus [18]: „Es muss deshalb für die Berechnung des Strahlengangs ein etwas kleinerer Radius der vorderen, ein etwas größerer Radius der hinteren Fläche angewendet werden als die schematischen Werte der optischen Zone angeben.“ Gullstrand berücksichtigt dies durch entsprechende Modifikation seiner Präferenzwerte (6.7 und 7.8 mm) um jeweils 0.1 mm und erhält so die Hornhautradien seines schematischen Auges:

$$Rp = \text{Messwert } 6.7 \text{ mm} + 0.1 \text{ mm} = 6.8 \text{ mm}$$

$$Ra = \text{Messwert } 7.8 \text{ mm} - 0.1 \text{ mm} = 7.7 \text{ mm.}$$

## Literatur

1. SIEBECK R: Optik des menschlichen Auges. Berlin Göttingen Heidelberg: Springer Verlag 1960
2. LE GRAND Y, EL HAGE SG: Physiological Optics. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag 1980
3. ATCHISON DA, SMITH G: Optics of the human eye. Edinburgh: Butterworth Heinemann 2000
4. HAIGIS W: Corneal power after refractive surgery with myopia: the contact lens method. J Cataract Refract Surg 2003;29(7):1397–1411
5. DUBBELMAN M, WEEBER HA, VAN DER HEIJD RGL, VÖLKER-DIEBEN HJ: Radius and asphericity of the posterior corneal surface determined by corrected Scheimpflug photography. Acta Ophthalmol Scand 2002;80:379–383
6. VON HELMHOLTZ H: Handbuch der Physiologischen Optik. 3. Auflage, ergänzt und herausgegeben in Gemeinschaft mit Prof. Dr. A. Gullstrand und Prof. Dr. J. von Kries von Prof. Dr. W. Nagel. Verlag von Leopold Voss 1909, 1. Band
7. VON HELMHOLTZ H: Handbuch der Physiologischen Optik. 3. Auflage, ergänzt und herausgegeben in Gemeinschaft mit Prof. Dr. A. Gullstrand und Prof. Dr. J. von Kries von Prof. Dr. W. Nagel. Verlag von Leopold Voss 1909, 1. Band: 300
8. AUBERT H: Grundzüge der physiologischen Optik, Leipzig 1876
9. LOHNSTEIN TH: Über den Brechungsindex der menschlichen Hornhaut. Arch. f. d. ges. Physiologie. LXVI, 1897
10. MATTHIESSEN L: Die neueren Fortschritte in unserer Kenntnis von dem optischen Baue des Auges der Wirbeltiere. Hamburg 1891
11. VON HELMHOLTZ H: Handbuch der Physiologischen Optik. 3. Auflage, ergänzt und herausgegeben in Gemeinschaft mit Prof. Dr. A. Gullstrand und Prof. Dr. J. von Kries von Prof. Dr. W. Nagel. Verlag von Leopold Voss 1909, 1. Band: 87
12. FREYTAG G: Vergleichende Untersuchungen über die Brechungsindizes der Linse und der flüssigen Augenmedien des Menschen und höherer Tiere in verschiedenen Lebensaltern. Wiesbaden 1907
13. BLIX M: Oftalmometriska studier. Upsala Läkareförenings Förhandlingar XV, 1880
14. DONDERS FC: On the anomalies of accommodation and refraction. London 1864
15. STEIGER A: Beiträge zur Physiologie und Pathologie der Hornhautrefraktion. Wiesbaden 1895
16. TSCHERNING M, LAGRANGE F, VALUDE E: Encyclopédie d' Ophthalmologie. III S.109, Paris 1904
17. VON HELMHOLTZ H: Handbuch der Physiologischen Optik. 3. Auflage, ergänzt und herausgegeben in Gemeinschaft mit Prof. Dr. A. Gullstrand und Prof. Dr. J. von Kries von Prof. Dr. W. Nagel. Verlag von Leopold Voss 1909, 1. Band: 283–284
18. VON HELMHOLTZ H: Handbuch der Physiologischen Optik. 3. Auflage, ergänzt und herausgegeben in Gemeinschaft mit Prof. Dr. A. Gullstrand und Prof. Dr. J. von Kries von Prof. Dr. W. Nagel. Verlag von Leopold Voss 1909, 1. Band: 285