

Raytracing zur Intraokularlinsenberechnung

- Die Genauigkeit der refraktiven Vorhersage klassischer IOL-Berechnungsformeln ist *im Durchschnitt* zufriedenstellend. Eine Notwendigkeit, andere Methoden zu verwenden, ist daher nicht unmittelbar evident.
- Die refraktive Vorhersagegenauigkeit klassischer Formeln wird aber umso schlechter, je weiter die optischen Parameter eines Auges vom Durchschnitt abweichen:
 - Sehr lange Augen weisen einen systematischen Hyperopisierungsfehler auf. Diese Augen sollten eigentlich besonders genau vorherberechenbar sein, denn in ihnen ist die Näherung der Gaußschen Optik noch am ehesten erfüllt, und der Fehler der IOL-Position hat nur einen sehr geringen Einfluß. Es liegt also offensichtlich ein erheblicher systematischer Fehler vor, der im Kurs erklärt wird.
 - Bei sehr kurzen Augen weisen die verschiedenen IOL-Formeln mit abnehmender Achsenlänge zunehmende Unterschiede auf. Die Formeln unterscheiden sich also offensichtlich systematisch. Hinzu kommt allerdings auch der stärkere Fehlereinfluß der Unkenntnis der IOL-Position sowie der IOL-Herstellungsfehler, die beide zu einem großen Teil als stochastische (zufällige und somit unvermeidbare) Fehler anzusehen sind. Der Fehlereinfluß der i.a. unbekanntenen Pupillenweite auf die Refraktion ist zumindest bei sphärischen IOLs ebenfalls größer als bei längeren Augen.
 - Augen nach Hornhautchirurgie lassen sich durch die klassischen IOL-Formeln ebenfalls nur sehr ungenau beschreiben. Nach Myopiekorrektur kommt es meist zu einer Hyperopisierung, deren Ausmaß von den genaueren Details der vorangegangenen Laserbehandlung abhängt.
- Die Genauigkeit in der Berechnung optischer Systeme (hier: Augen) sollte bei physikalischer Problembetrachtung nicht von deren optischen Details und Variationen in der Größe abhängen. Daß es doch so ist, liegt daran, daß die IOL-Formeln nicht physikalisch, sondern statistisch optimiert wurden. Naturgemäß führt dies zu einer Benachteiligung für die Individuen, deren Parameter stärker vom Durchschnitt abweichen.
- Die IOL-Formeln verwenden zwei Näherungen: die Gaußsche Optik, also die Betrachtung nur paraxialen Lichtes, und innerhalb der Gaußschen Optik die Näherung der „dünnen Linsen“. Beide Näherungen sind gerade für das menschliche Auge mit seinen starken Wölbungen, weiten Öffnungswinkeln und keineswegs vernachlässigbaren Linsendicken recht ungenau. Zur Kompensation dieser Ungenauigkeiten

wird bei den IOL-Formeln eine statistische Optimierung als Korrektur mittels vorangegangener Ergebnisse („Optimierung variabler Konstanten“) verwendet.

- Raytracing (Strahldurchrechnung) als physikalisch exaktes Verfahren benutzt solche Näherungen nicht.
- Raytracing war das erste Berechnungsverfahren für optisch brechende Flächen. Seine Grundlagen wurden im 17. Jahrhundert, also ca. 150 Jahre vor der Gaußschen Optik entwickelt. Das zunächst von Willebroord Snellius heuristisch gefundene Brechungsgesetz wurde wenige Jahrzehnte später von Pierre de Fermat theoretisch aus dem sehr allgemeingültigen Prinzip abgeleitet, daß Licht denjenigen Weg nimmt, „auf dem es am schnellsten vorankommt“.
- Obwohl das Raytracing also schon im 17. Jahrhundert verstanden war, konnte es praktisch nicht angewendet werden, weil es nicht in mathematisch geschlossenen Formeln durchführbar ist, und der Rechenaufwand für die nötige iterative, numerische Rechnung mangels Rechenkapazität nicht geleistet werden konnte.
- Karl-Friedrich Gauß fand als erster eine praktikable Lösung zur Berechnung von optischen Systemen: er approximiert den Sinus des Snellius'schen Brechungsgesetzes durch das erste Element seiner Potenzreihenentwicklung, was natürlich nur für sehr kleine Öffnungswinkel richtig ist. Damit konnte Gauß aber geschlossene Formeln ableiten, mit denen auch die Eigenschaften von Optiken mit mehreren brechenden Flächen analytisch berechnet werden konnten.
- Nach Einführung des Computers hat die Gaußsche Optik wegen ihrer Beschränkungen in fast allen Bereichen der Optik ihre Bedeutung verloren. Optische Geräte werden heute praktisch ausschließlich mittels Raytracing berechnet. Die Ophthalmologie ist eine Ausnahme, die nicht sachlich begründet ist, sondern ausschließlich auf Tradition beruht.
- Für die IOL-Berechnung mittels Raytracing sind folgende Aspekte relevant:
 - Die Daten der IOLs müssen im Detail bekannt sein: vordere und hintere Scheitelkrümmungsradien, Asphärizitäten, Brechungsindex und Mittendicke für jede Brechkraftstufe.
 - Anders als in Gaußscher Optik ist die wirksame Brechkraft im „besten Fokus“ eine Funktion des Aperturdurchmessers (z.B. Pupillenweite). Die bekannte Nachtmyopie läßt sich somit individuell bestimmen.

- Darauf basierend läßt sich für das individuelle Auge herausfinden, welche Asphäre, also welches IOL-Modell, zu diesem Auge „paßt“.
 - Die Restrefraktion kann für jede Brechkraftstufe jedes IOL-Modells als Funktion der Pupillenweite nicht nur sphärisch, sondern auch astigmatisch vorherberechnet werden.
 - Sind aus der Biometrie nur die äußeren Hornhautradien und die Achsenlänge bekannt, so müssen alle anderen Parameter im Raytracing modellhaft angenommen werden. Je mehr von diesen Parametern gemessen wurden, umso realistischer wird das Auge modelliert, und umso eher entspricht die Rechnung dem individuellen Auge.
 - Zur Vereinfachung der Handhabung kann das Raytracing direkt aus den Meßgeräten aufgerufen werden (z.B. Topo- oder Tomographiegeräte), mit denen die zahlreichen Daten gemessen wurden. Die Genauigkeit der primär gemessenen Daten weist dabei zwischen den Geräten durchaus deutliche Unterschiede auf.
 - Die postoperative IOL-Position kann prinzipiell nicht exakt aus präoperativen Meßdaten vorherbestimmt werden. Insofern unterscheidet sich das Raytracing nicht von den IOL-Formeln. Anders als in diesen wird aber nicht eine „effektive Linsenposition“ (ELP) angenommen, die von der wirklichen Linsenposition deutlich abweicht, sondern es wird die tatsächliche, geometrische Position verwendet, die postoperativ auch nachmeßbar ist. Für diese wird eine auf präoperativen Parametern beruhende Schätzung vorgenommen.
- Augen nach Hornhautchirurgie weichen in Ihren Eigenschaften von „normalen“ Augen deutlich ab.
 - Nach myopiekorrigierender Lasik oder PRK ist die Hornhautvorderfläche oft deutlich oblat-asphärisch, während eine normale Hornhaut sphärisch oder leicht prolat-asphärisch ist. Nach einer Hyperopiekorrektur ist die Hornhaut oft stärker prolat-asphärisch als eine normale Hornhaut. Keratometrisch bestimmte Zentralradien werden nach Myopiekorrektur dadurch eher als zu klein, nach Hyperopiekorrektur eher als zu groß bestimmt. Dies führt nach Myopiekorrektur eher zu einer Hyperopisierung, nach Hyperopiekorrektur eher zu einer Myopisierung bei der IOL-Berechnung.
 - Lasik oder PRK verändern die Hornhautvorderfläche, die Rückfläche bleibt annähernd erhalten oder ändert sich jedenfalls deutlich weniger. IOL-Berechnungen, die ein konstantes Verhältnis von Hornhautvorder- zu Rückradien annehmen, werden dadurch systematisch falsch. Ein solches konstantes Verhältnis wird immer implizit in sogenannten „fiktiven Hornhautbrechungsindices“

(z.B. 1.3375) angenommen, in denen die optische Wirkung der Hornhautrückseite auf die Vorderseite umgerechnet wird. Damit wird dann so getan, als bestehe die Hornhaut optisch nur aus ihrer Vorderfläche. Der aus den falschen Annahmen zum Verhältnis der Krümmungsradien von Vorder- und Rückseite resultierende Fehler führt nach cornealer Myopiekorrektur wieder zu einer Hyperopisierung, nach Hyperopiekorrektur wieder zu einer Myopisierung in der IOL-Berechnung.

Die beiden genannten Fehler hängen in ihrem Ausmaß nicht nur annähernd linear von der Stärke der refraktiven Hornhautkorrektur ab, sondern außerdem von der Größe der optischen Zone, von der mit dem jeweiligen Gerät intendierten Hornhautsphärizität und von der Zeit zwischen dem Hornhauteingriff und der Kataraktoperation. Die zahlreichen Versuche, diesen Sachverhalt statistisch zu erfassen, haben erwartungsgemäß keine befriedigende Genauigkeit für die IOL-Berechnung erbracht. Sie sind allenfalls anwendbar bei sehr homogenen Patientenkollektiven, bei denen alle Augen in der selben Epoche mit dem selben Lasertyp bzw. -Algorithmus behandelt wurden. Das Problem läßt sich jedoch lösen, wenn man statt statistischer physikalische Methoden verwendet: die Hornhautvorder- und Rückseite werden vermessen, d.h. man führt eine Tomographie durch, und deren Meßdaten werden im Raytracing verwendet.

- Die klinischen Ergebnisse, d.h. die Vorhersagefehler der IOL-Berechnung nach Hornhautchirurgie, unterscheiden sich mit dieser physikalischen (d.h. nicht statistikbasierten) Methode praktisch nicht von denen unbehandelter Augen. Nicht einmal die Kenntnis des vorangegangenen hornhautchirurgischen Eingriffs ist erforderlich. Allerdings ist die Unsicherheit in der Refraktionsbestimmung zu beachten (oder die größere Pseudoakkommodationsbreite, was physikalisch das selbe ist), wenn die Hornhautoberfläche unregelmäßig und der Visus entsprechend schlecht ist.
- Vergleicht man die Vorhersagegenauigkeit des Raytracing in größeren Kollektiven mit der von klassischen IOL-Formeln, so findet man speziell an den Rändern der Verteilung einen Genauigkeitsvorteil des Raytracing, während in der Nähe der biometrischen Durchschnittswerte die Resultate annähernd gleich sind.
- Vor allem bei sehr langen Augen wird die von den Formeln bekannte Hyperopisierung vermieden. Das liegt allerdings weniger am Raytracing, sondern mehr an dem darin verwendeten Augenmodell, bei dem das Radiusverhältnis von Hornhautvorder- zu Rückfläche eher der Wirklichkeit entspricht.

- Durch Hinzunahme der Information der Position und Dicke der kristallinen Linse läßt sich die Vorhersagegenauigkeit der IOL-Position verbessern. Dieser Genauigkeitsgewinn ist vor allem für kurze Augen wichtig.
- Besonders genau lassen sich Augen mit sogenannten „aberrationskorrigierenden“ IOL berechnen, also mit Linsen, die die sphärische Aberration des Gesamtauges auf annähernd null korrigieren. Wenn bei solchen Augen auch ein sehr guter Visus von mindestens 1.0 erzielt wurde, resultiert wegen des dann sehr geringen Refraktionsfehlers ein ebenfalls sehr geringer Vorhersagefehler. Solche Augen haben aber als Nachteil auch nur eine geringe Pseudoakkommodationsbreite.
- Auch torische IOL lassen sich mittels Raytracing sehr einfach berechnen, insbesondere ohne „On-line-Kalkulatoren“. Die refraktive Vorhersagegenauigkeit läßt sich steigern, wenn die Berechnung auch die gemessene Information der Hornhautrückseite einbezieht. Ohne diese Zusatzinformation ergeben sich systematische Abweichungen, die für Astigmatismen mit der Regel anders sind als für Astigmatismen gegen die Regel, da die Hornhautdicke im Durchschnitt nicht rotationssymmetrisch ist.