

Sicherheit moderner Zweilinsensysteme

I. Untersuchung der Auswirkung von Lagetoleranzen anhand eines computersimulierten Modellsystems

Jeremy Wernli¹, Michael Mrochen¹, Friedemann Kimmich²
Zürich, Pfinztal

→ Zusammenfassung: Moderne Zweilinsensysteme stellen eine interessante Möglichkeit dar, problemlos z. B. einen postoperativen myopen Shift zu korrigieren. Hierbei befindet sich die Basislinse im Kapselsack, während die AddOn[®] Linse in den davor liegenden Sulkus implantiert wird. Mit Hilfe einer computergestützten Simulation wurde geprüft, ob ein Zweilinsensystem (A4W, 1stQ, Mannheim, Deutschland) hinsichtlich Lagetoleranzen entlang der optischen Achse Unterschiede bezüglich der optischen Bildqualität zu kapselsackimplantierten Einzellinsen aufweist. Das Zweilinsensystem erwies sich dabei als nicht anfälliger als kapselsackimplantierte Einzellinsen. Insbesondere Lageverschiebungen der sulkusimplantierten AddOn-IOL hatten praktisch keine Auswirkungen auf die geprüften optischen Parameter. Die Daten belegen ein hohes Maß an Lagetoleranz des Zweilinsensystems. Die Implantation der Sulkus-AddOn-IOL ist dabei vergleichsweise unkritisch. Sie eignet sich daher ebenfalls zur Korrektur von möglichen Refraktionsabweichungen nach Implantation von Kapselsacklinsen. Durch die Kombinationsmöglichkeit von jeweils nur wenigen unterschiedlichen Basis- sowie AddOn-Linsen können dabei sehr viele verschiedene Gesamtbrechkraftwerte erreicht werden, was das praktische Handling insgesamt vereinfachen kann.

→ Summary: Modern two lens systems represent an interesting opportunity to for example easily correct a postoperative myopic shift. Here, the basis IOL is located in the capsular bag, whilst the AddOn[®] lens is implanted in the sulcus. An innovative AddOn IOL system (A4W, 1stQ, Mannheim, Germany) and a single IOL were analysed using a computer simulated model eye. We evaluated the effects of location tolerances along the optical axis on the quality of the optical image. The AddOn IOL system was compared with a single IOL implanted into the capsular bag. The location tolerances of the AddOn system were comparable to that of the single capsular bag implanted IOL. Particularly, changes in the position of the sulcus implanted AddOn IOL had virtually no effect on the tested parameters. The data demonstrate a high degree of location tolerance of the AddOn system. The implantation of the sulcus IOL is comparatively simple. Therefore it is also suitable to correct residual refractive errors after implantation of the capsular bag IOLs. By combining a few basis and AddOn lenses a big variety of different refractive powers can be achieved which may simplify practical handling.

¹ IROC Science to Innovation, Zürich

² eyecons, Pfinztal

→ Seit den 1990er Jahren werden AddOn-Intraokularlinsen unter anderem bei Kindern mit Katarakt [2], zum Erzielen einer Emmetropie in anatomisch extrem kurzen Augen [8], sowie zur Korrektur von postoperativen Refraktionsfehlern [1, 5, 7] verwendet. Anfangs wurde die zweite, sogenannte Piggy-Back-Linse zusammen mit der Basislinse in den Kapselsack der Hinterkammer implantiert [4]. Diese Methode erwies sich allerdings als sehr problembehaftet, da sie häufig zu Komplikationen, wie einem hyperopen Shift und/oder zu einer interlenticulären Opazifikation führte [3, 11]. Neue Linsendesigns von AddOn-IOL-Systemen (A4W, 1stQ, Mannheim, Deutschland) ermöglichen die räumliche Trennung zwischen der Basislinse im Kapselsack

und der AddOn-Linse im Sulkus (Abbildung 1). Das Design der beiden Linsen vermeidet einen direkten Kontakt der beiden Linsen und somit eine Opazifikation durch die Einwanderung von Zellen in den interlenticulären Raum [10]. Die optische Qualität (geringe optische Aberrationen) eines Linsensystems wird auch durch die Lage der Linsen zueinander bestimmt. Mögliche axiale Positionsfehler (Defokus), Dezentrierungen oder Verkippungen (Astigmatismus und Coma) können zu optischen Aberrationen höherer Ordnungen führen. Somit ist die optische Lagetoleranz von AddOn-Linsen entscheidend. Verschiebungen der AddOn sollten gegenüber Einzellinsen keine Nachteile darstellen. Zielsetzung dieser Arbeit war es, die Lagetoleranz von AddOn-Linsensyste-

men mit denen von Einzellinsen in einem computersimulierten Augenmodell von Schwierling [6, 9] zu vergleichen.

Implementierung von Einzel-linse und Zweilinsensystem im Schwierling-Augenmodell

Auf Basis des Schwierling-Augenmodells [6, 9] lassen sich Messungen an intraokularen Linsensystemen unter dem Einfluss verschiedener Parameter objektiv durchführen. Für die Simulation unterschiedlicher Szenarien der Lageverschiebung im Einzel- und Zweilinsensystem wurden anhand dieses Modells Parameter wie Krümmungsradien und Brechungsindizes von Hornhaut und Linse festgelegt (Tabelle 1). Diese entsprechen den Angaben für ein durch-



Abbildung 1a: Die A4W AddOn®

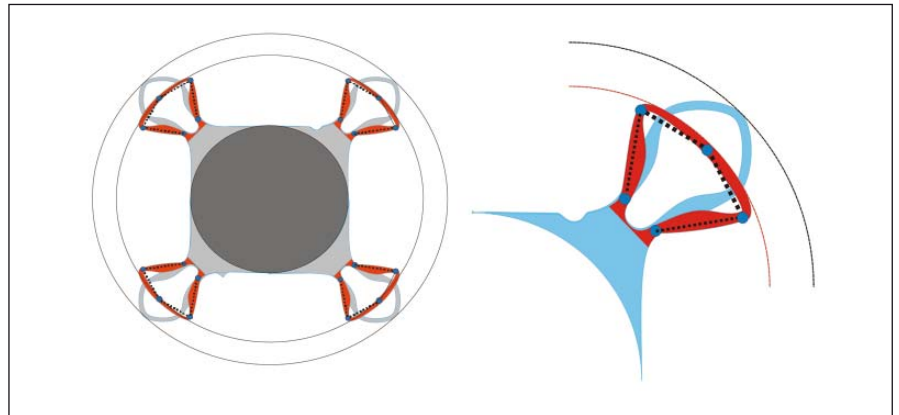


Abbildung 1b: Funktionsweise des speziellen 4-Haptiksystems der A4W

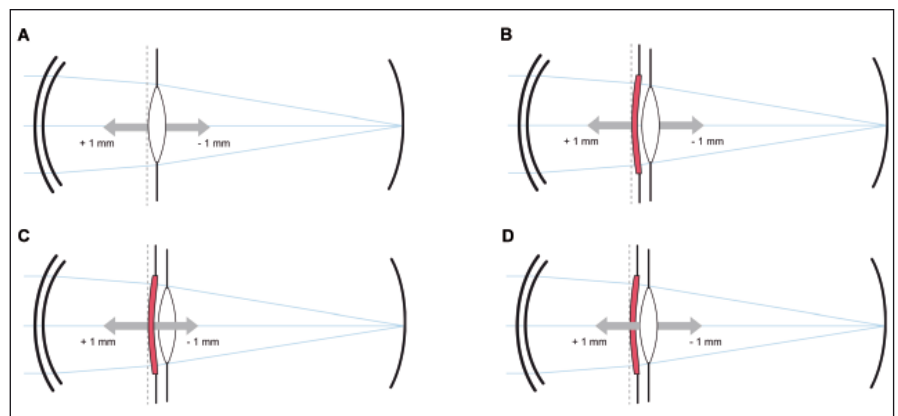
Abbildung 2: Verwendete Verschiebungsszenarien zur Untersuchung von Lage-toleranzen

A: Lageverschiebung der Einzellinse um ± 1 mm

B: Lageverschiebung von Basislinse und Sulkus-AddOn-Linse gemeinsam um ± 1 mm (Abstand fix)

C: Lageverschiebung der Basislinse im Zweilinsensystem um ± 1 mm

D: Lageverschiebung der Sulkus-AddOn-Linse im Zweilinsensystem um ± 1 mm



schnittliches, natürliches Auge. Die Auswahl der Werte für die Simulation von AddOn-IOL und Basis-IOL erfolgte auf Basis der Vorgaben des Herstellers. Sämtliche Daten wurden innerhalb der Softwareumgebung (OSLO – Optics Software for Layout and Optimization; Sinclair Optics, USA) in das computer-simulierte Modell implementiert. Im Modell wird eine typische Pupillenweite von 6 mm verwendet. Alle Berechnungen wurden monochromatisch mit einer Wellenlänge von 546 nm durchgeführt. Zunächst wurde die natürliche Linse in diesem Modell durch eine einzelne IOL sowie durch das Zweilinsensystem ersetzt. Hierbei wurde für die Einzellinse eine Brechkraft von +22,0 D festgelegt. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurde beim Zweilinsensystem die Kombination einer Basislinse mit +19,0 D und einer Sulcus-AddOn-Linse mit +3,0 D gewählt. Der Abstand der beiden Linsen im Zweilinsensystem wurde mit 1 mm modelliert, dem Mittelwert der vom Hersteller angegebenen Spannweite von 0,5 bis 1,5 mm. Die Rückseite der Basislinse sollte in beiden Systemen die gleiche Lage wie die natürliche Linse nach Schwiegerling einnehmen (16,6 mm gemessen von der Linsenrückseite bis zur Netzhaut). Ausgehend von den so konfigurierten Modellen wurden die optimalen Positionen der IOL-Systeme anhand von drei Kriterien bestimmt (Tabelle 2). Die genannten Kriterien wurden anschließend für folgende Untersuchungen verwendet. Anhand des entwickelten Modells wurde die Lagetoleranz von Ein- und Zweilinsensystemen analysiert. Des Weiteren wurde überprüft, ob eine Verschiebung der Basislinse mit Hilfe einer geeigneten Sulcus AddOn-IOL korrigiert werden kann.

Tabelle 1: In OSLO implementierte Parameter (nach J. T. Schwiegerling sowie 1stQ)

Optische Fläche	Hornhaut vorne	Hornhaut hinten	Linse vorne	Linse hinten
Krümmungsradius [mm]	7,80	6,50	11,03	-5,72
Konische Konstante [-]*	-0,25	-0,25	-4,30	-1,17
Form	Ellipsoid	Ellipsoid	Hyperboloid	Paraboloid
Zentrale Dicke [mm]	0,55	3,05	4,00	16,60
Brechungsindex (interpoliert@546 nm) [-]	1,38	1,34	1,42	1,34

* Parameter einer asphärischen Linse: für $k < -1$ Hyperbel; für $k = -1$ Parabel; für $-1 < k < 0$ Ellipse

Tabelle 2: Definitionen der drei geprüften Kriterien für die optische Abbildungsqualität

Kriterium für Abbildungsqualität	Prozedur zur Optimierung
Encircled Energy	Optimierung der IOL-Lage so, dass beim abgebildeten Punkt auf der Netzhaut, in dem 80% der Lichtenergie liegen, der minimale Radius vorliegt. Je größer dieser abgebildete Lichtpunkt auf der Netzhaut ausfällt, desto eher kommt es zu Überlappungen und das Bild wird unscharf.
Wellenfront	Optimierung der IOL-Lage so, dass bei der eintreffenden Wellenfront auf der Netzhaut die Abweichungen über deren Fläche (RMS) minimal werden. Solche Wellenfrontfehler (optische Abbildungsfehler) entstehen durch unregelmäßige Lichtbrechung an der Hornhaut, der Linse sowie im Glaskörper.
Modulations-transferfunktion	Optimierung der IOL-Lage so, dass die Übertragung einer Frequenz von 17,2 cycles/mm (entspricht einem Visus von 1,0) maximal wird. Je tiefer die Übertragung bei einer bestimmten Frequenz ausfällt, desto schlechter ist die Bildqualität in Bezug auf die Sehschärfe.

Tabelle 3: Abstimmung der Sulcus-AddOn-IOL zur Kompensation von Lageabweichungen der Basislinse

Abweichung der Basislinse vom Optimum („Wellenfront“) [mm]	Optimierter Vorderflächenradius der Sulcus-AddOn-Linse für den tiefsten RMS-Wert [mm]	Erreichte RMS
0	8,61 (Standard)	0,4482
+ 0,5	8,14	0,4512
+ 1	7,72	0,4562
- 0,5	9,14	0,4445
- 1	9,75	0,4425

Verbesserte Lagetoleranz durch die Verwendung von Zweilinsensystemen

Um die Lagetoleranzen von Einzel- und Zweilinsensystemen zu vergleichen, wurden vier verschiedene Verschiebungsszenarien entlang der optischen Achse verwendet (Abbildung 2). Die Auflösungsschritte betrugen hierbei 100 μm .

Encircled Energy

Der Verlauf des Abbildungskreises, in dem 80 % der Energie liegen, ist bei der Lageverschiebung für die Einzellinse und beide Linsen des Zweilinsensystems nahezu identisch. Hierbei verschlechtert sich die Abbildungsqualität bei einer Verschiebung in Richtung Vorderkammer stärker. Ein ähnlicher Verlauf zeigt sich bei der

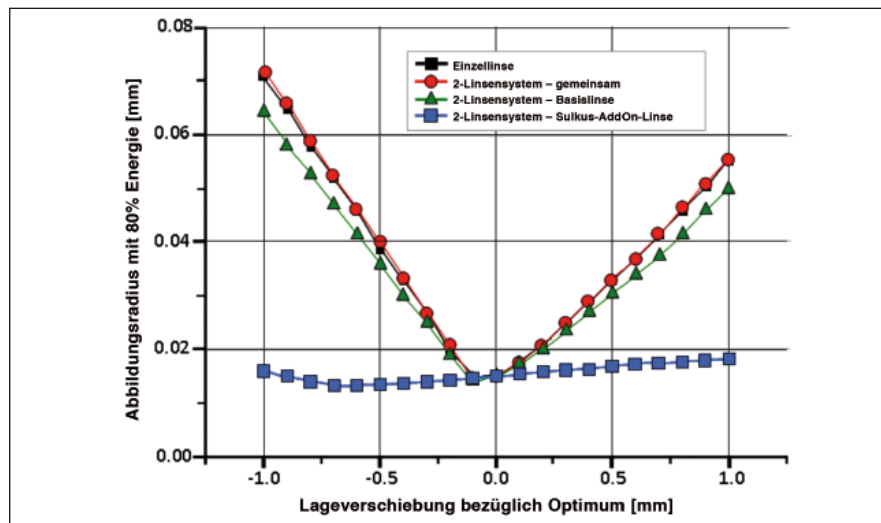


Abbildung 3: Ergebnisse der vier Verschiebungsszenarien hinsichtlich des Kriteriums „Encircled Energy“: Eine Lageverschiebung der AddOn hat praktisch keine Auswirkungen auf die Abbildungsqualität gemessen über die Größe der Abbildungsradien mit 80 % Lichtenergie (blaue Kurve).

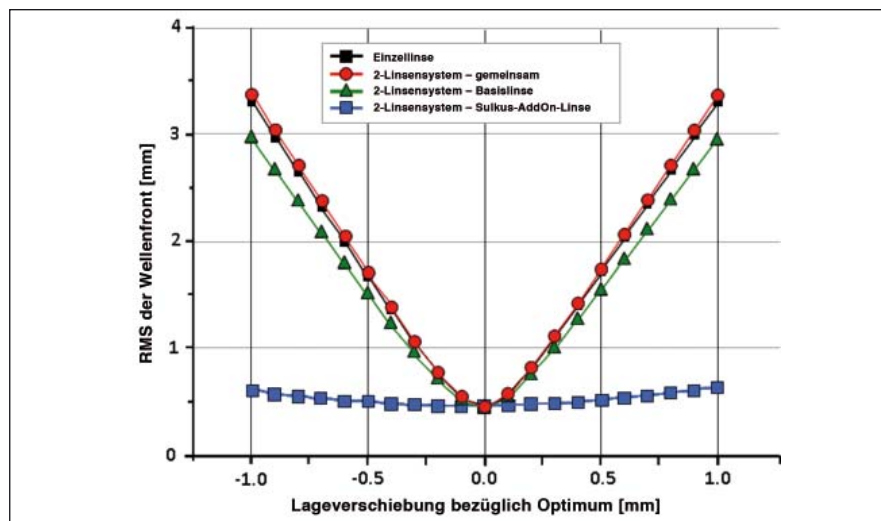


Abbildung 4: Ergebnisse der vier Verschiebungsszenarien hinsichtlich des Kriteriums „Wellenfront“: Eine Lageverschiebung der AddOn verursacht praktisch keine Abbildungsfehler (blaue Linie).

Verschiebung der Basislinse, wobei die Zunahme des Abbildungsradius im Vergleich zum Ausgangswert durchgehend niedriger ist. Wird dagegen die Sulkus-AddOn-Linse verschoben, so verändert sich der Radius des Abbildungskreises nur sehr geringfügig. Die Ergebnisse zu den Lagetoleranzen bei den vier verschiedenen Verschiebungsszenarien hinsichtlich des Kriteriums „Encircled Energy“ sind in Abbildung 3 dargestellt. Lageverschiebungen der Basislinse haben demnach einen deutlichen Effekt auf die Abbildungsqualität (gemessen anhand des Kriteriums „Encircled Energy“). Der Radius, in dem 80 % der Lichtenergie liegen, wird bei Lageverschiebung der Basislinse deutlich größer. Lageverschiebungen der AddOn-IOL haben demgegenüber nur einen sehr begrenzten Einfluss auf die Abbildungsqualität (gemessen anhand des Kriteriums „Encircled Energy“).

Wellenfront

Die Untersuchungen der Wellenfront zeigen vergleichbare Ergebnisse (Abbildung 4). Die Verläufe des RMS der Wellenfront für die Einzellinse und das Zweilinsensystem sind nahezu identisch. Ähnlich verhält sich der Verlauf bei einer Verschiebung der Basislinse, wobei hier die Veränderung in Bezug auf die Ausgangslage etwas geringer ist. Die Verschiebung der Sulkus-AddOn-Linse hat nur einen sehr geringen Einfluss auf die Wellenfrontfehler. Die Ergebnisse zu den Lagetoleranzen bei den vier verschiedenen Verschiebungsszenarien hinsichtlich des Kriteriums „Wellenfront“ sind in Abbildung 4 dargestellt. Selbst geringe Verschiebungen der Basislinse entlang der optischen Achse haben optische Abbildungsfehler zur Folge (gemessen anhand des Kriteriums „Wellenfront“). Lageverschiebungen der AddOn-IOL haben dagegen praktisch keine Auswirkungen (gemessen anhand des Kriteriums „Wellenfront“).

Modulationstransferfunktion

Die Ergebnisse für die Einzellinse und beide Linsen des Zweilinsensystems sind auch für dieses Kriterium fast identisch. Eine Verschiebung der Basislinse zeigt im Vergleich dazu eine geringere Auswirkung. Die Verschiebung der Sulkus-

AddOn-Linse hat praktisch keinen Einfluss auf die Übertragung der Frequenz, sodass die Bildqualität nur unwesentlich beeinflusst wird. Der Verlauf der „Modulationstransfer“-Funktion für die vier Verschiebungsszenarien ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Bildqualität in Bezug auf die Sehschärfe verschlechtert

sich bei Lageverschiebungen der Basislinse deutlich (gemessen anhand des Kriteriums „Modulationstransferfunktion“). Eine Lageverschiebung der AddOn-IOL hat auch hier nur einen geringen Einfluss (gemessen anhand des Kriteriums „Modulationstransferfunktion“).

Mit Hilfe des computersimulierten Modellsystems konnte gezeigt werden, dass es bei einer gemeinsamen Verschiebung des Zweilinsensystems zu gleichen Verlusten der Bildqualität wie bei einer Verschiebung der Einzellinse kommt. Beide Systeme sind also hinsichtlich ihrer Lagetoleranz gleichzusetzen. Bei der einzelnen Verschiebung der Linsen im Zweilinsensystem entspricht der Einfluss auf die Lagetoleranz in etwa jenem, den sie auf die Gesamtbrechkraft ausüben.

Sulkus-AddOn-Linse: Interessante Möglichkeit zur einfachen Korrektur von Lage- abweichungen der Basislinse

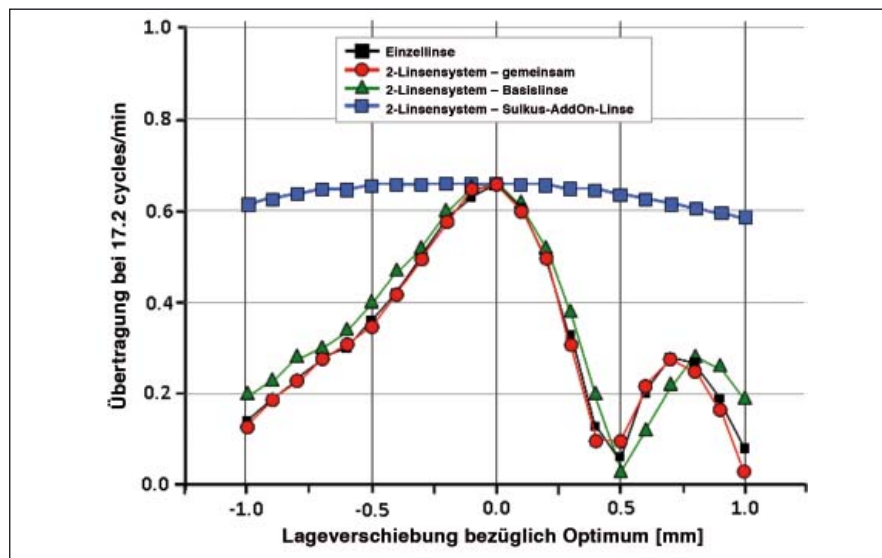


Abbildung 5: Ergebnisse der vier Verschiebungsszenarien hinsichtlich des Kriteriums „Modulationstransferfunktion“: Eine Lageverschiebung der AddOn hat praktisch keine Auswirkungen auf die Bildqualität in Bezug auf die Sehschärfe.

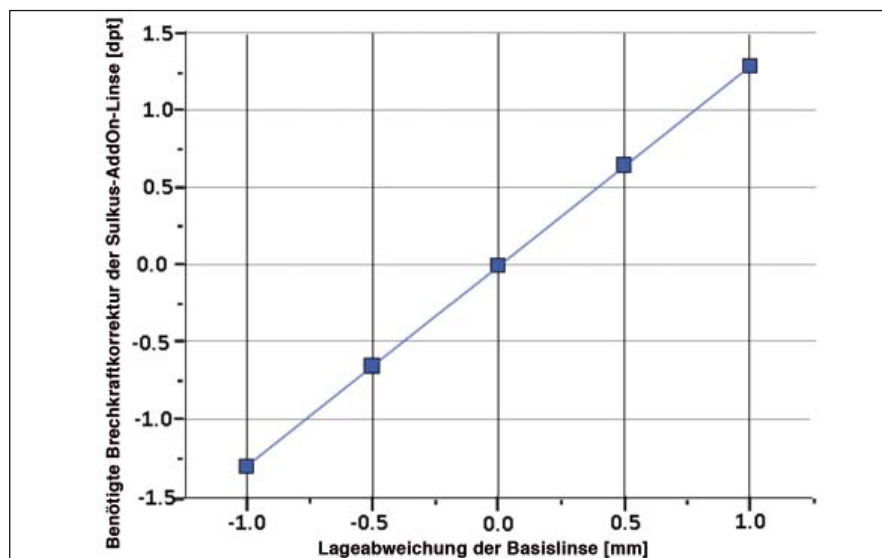


Abbildung 6: Brechkraftkorrekturen der Sulkus-AddOn-Linse als Kompensation für Lageabweichungen der Basislinse.

Des Weiteren wurde mit Hilfe dieser Simulation ein Szenario untersucht, bei dem die Basislinse nach der Implantation eine Abweichung von ihrer Sollposition aufwies. Anstelle einer aufwändigen und komplexen Korrektur einer Einzellinse sollte geprüft werden, inwiefern sich die Sulkus-AddOn-IOL zur Kompensierung der Verschiebung der Basislinse eignet. Hierfür wurde nach einer Lageverschiebung der Basislinse ($\pm 0,5$ mm und ± 1 mm) der Vorderflächenradius der Sulkus-AddOn-Linse so optimiert, dass sich wieder eine möglichst geringe RMS bezüglich des Wellenfrontkriteriums ergab. Anschließend wurden die Werte für den Radius über die Fokuslänge der Sulkus-AddOn-Linse in Brechkraftwerte umgerechnet (Tabelle 3).

Die Ergebnisse in Tabelle 3 zeigen, dass sich durch eine Anpassung des Vorder-

flächenradius der Sulkus-AddOn-Linse auch bei größeren Abweichungen der Basislinse eine nahezu identische RMS der Wellenfront wie bei der Null-Lage ergibt.

Kompensation für Lageabweichungen der Basislinse

Unsere Berechnungen zeigen, dass bei Abweichungen der Basislinse im Bereich von -1 mm bis +1 mm eine Brechkraftkorrektur der Sulkus-AddOn-Linse im Bereich von ca. -1,25 D bis 1,25 D erforderlich ist (Abbildung 6).

Dieses Szenario zeigt einen klaren Vorteil des Zweilinsensystems gegenüber einer Einzellinse: Durch den Einsatz einer Sulkus-AddOn-IOL ist eine Lagekorrektur der Basislinse bis zu einer Abweichung von ± 1 mm realisierbar. Außerdem kann eine Implantation im Sulkus wesentlich einfacher durchgeführt werden als im Kapselsack und ist dadurch mit geringem Komplikationsrisiko realisierbar.

Zusammenfassung und Diskussion

Mit Hilfe eines computergestützten Modellsystems konnte gezeigt werden:

- Die Abbildungsqualität hat bei einer Verschiebung der Einzellinse weg vom Optimum sowie bei einer gemeinsamen Verschiebung beider Linsen eines 2-Linsensystems praktisch die gleichen Verluste der Bildqualität hinsichtlich der geprüften Kriterien (Encircled Energy, Wellenfront und Modulationstransferfunktion) zur Folge. Zweilinsensysteme sind in Bezug auf Lagetoleranzen also nicht anfälliger als eine Einzellinse.
- Die Lagetoleranz der Sulkus-IOL ist hinsichtlich der 3 geprüften Kriterien sehr groß. Sie trägt mit 3 D aber auch nur geringfügig zur Gesamtbrechkraft bei.
- Der Einsatz von Sulkus-AddOn-Linsen zur Lagekorrektur von Basislinsen erscheint vielversprechend. Die Implantation einer Sulkus-AddOn-Linse ist darüber hinaus wesentlich unkomplizierter und

einfacher als eine nachträgliche Korrektur der kapselsackimplantierten Linse.

- Um Lageabweichungen der Basislinse von bis zu 1 mm in beide Richtungen zu kompensieren reicht eine Spannweite der benötigten Brechkraftkorrektur der Sulkus-AddOn-Linse von nur $\pm 1,25$ D aus.
 - Mit der Kombination von nur wenigen Basis- und AddOn-Linsen lässt sich eine große Bandbreite an Gesamtbrechkraftwerten erzielen, was das technische Handling stark vereinfachen kann.
- Um einen größeren Einblick in die Vor- und Nachteile von Zweilinsensystemen gegenüber einer Einzellinse zu gewinnen, sind außerdem die Einflüsse von Dezentrierung und Verkipfung der Linsen von Interesse. Es ist bekannt, dass diese Faktoren nur geringe Auswirkungen auf eine einzelne IOL haben. Ob dieses Ergebnis auch für ein Zweilinsensystem, bei dem durch die zweite Linse eine weitere Verkipfungs- und Dezentriermöglichkeit besteht gilt, muss in weiteren Untersuchungen geprüft werden.

Literatur

1. Basarir B, Kaya V, Altan C et al (2012) The use of a supplemental sulcus fixated IOL (HumanOptics AddOn IOL) to correct pseudophakic refractive errors. Eur J Ophthalmol 22: 898–903
2. Boisvert C, Beverly DT, McClatchey SK (2009) Theoretical strategy for choosing piggyback intraocular lens powers in young children. J AAPOS 13: 555–557
3. Eleftheriadis H, Marcantonio J, Duncan G, Liu C (2001) Interlenticular opacification in piggyback AcrySof intraocular lenses: Explanation technique and laboratory investigations. Br J Ophthalmol 85: 830–836.
4. Findl O, Menapace R, Rainer G, Georgopoulos M (1999) Contact zone of piggyback acrylic intraocular lenses. J Cataract Refract Surg 25: 860–862
5. Gayton JL, Sanders V, Van der Karr M, Ramanan MG (1999) Piggybacking intraocular implants to correct pseudophakic refractive error. Ophthalmology 106: 56–59
6. Greivenkamp JE, Schwiegerling J, Miller JM, Mellinger MD (1995) Visual acuity modeling using optical raytracing of schematic eyes. Am J Ophthalmol 120: 227–240
7. Habot-Wilner Z, Sachs D, Cahane M et al (2005) Refractive results with secondary piggyback implantation to correct pseudophakic refractive errors. J Cataract Refract Surg 31: 2101–2103
8. Holladay JT, Gills JP, Leidlein J et al (1996) Achieving emmetropia in extremely short eyes with two piggyback posterior chamber intraocular lenses. Ophthalmology 103: 1118–1123
9. Schwiegerling JT (1995) Visual performance prediction using schematic eye models. Dissertation submitted to the Faculty of the Committee on optical Sciences in the Graduate College of the University of Arizona
10. Shugar J, Schwartz T (1999) Interpseudophakos Elschnig pearls associated with late hyperopic shift: A complication of piggyback posterior chamber intraocular lens implantation. J Cataract Refract Surg 25: 863–867
11. Shugar JK, Keeler S (2000) Interpseudophakos intraocular lens surface opacification as a late complication of piggyback acrylic posterior chamber lens implantation. J Cataract Refract Surg 26: 448–455

Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. rer. medic. Michael Mrochen
IROC Science to Innovation
Technoparkstrasse 1
CH-8005 Zürich
Schweiz