

**6. Workshop  
Automatisierungstechnische  
Verfahren für die Medizin vom  
24.-25. März 2006 in Rostock-  
Warnemünde**



**„Untersuchung der Eignung einer Electrowettinglinse zur  
Wiederherstellung der Akkommodationsfähigkeit“**

Mark Bergemann, Georg Bretthauer  
Forschungszentrum Karlsruhe, Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland  
E-Mail: mark.bergemann@iai.fzk.de

Band: Abstracts der Vorträge des 6. Workshops der Automed 2006  
Editors: T. Ellerbrock  
ISBN: 3-86009-296-0  
Pages: 74-75

## Untersuchung der Eignung einer Electrowettinglinse zur Wiederherstellung der Akkommodationsfähigkeit

Mark Bergemann, Georg Bretthauer  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
76021 Karlsruhe

mark.bergemann@iai.fzk.de

### EINLEITUNG

Ein implantierbares mechatronisches Mikrosystem stellt einen neuartigen Ansatz zur Wiederherstellung der Akkommodationsfähigkeit des menschlichen Auges nach einer Kataraktoperation oder im Falle der Presbyopie dar [Gengenbach2005]. Zur Veränderung der Scheitelbrechkraft des dioptrischen Apparates können zahlreiche Wirkprinzipien zum Einsatz kommen [Bergemann2006]. In diesem Beitrag wird die Eignung von auf dem Electrowettingprinzip basierenden Linsen variabler Fokusslänge untersucht.

### MODELLBILDUNG

Unter Electrowetting versteht man die Beeinflussung des Benetzungsverhaltens eines elektrisch leitfähigen Fluides (L) auf einer Festkörperoberfläche (S) in Gegenwart eines zweiten, isolierenden, nicht mischbaren Fluides (G) durch ein elektrisches Feld. Das Prinzip kann u.a. für Linsen variabler Fokusslänge eingesetzt werden, indem der Meniskus der beiden Flüssigkeiten als lichtbrechende Grenzfläche verwendet wird [Berge2000], [Kuiper2004]. Eine zylindrische Elektrodenanordnung ist im Hinblick auf minimalen radialen Bauraum vorteilhafter. Für Fluide gleicher Dichte stellt sich dabei eine von der Erdgravitation unabhängige sphärische Meniskusform ein.

*Elektromechanische Modellbildung:* Der von der Elektrodenspannung abhängige Benetzungswinkel  $\Theta(U)$  im thermodynamischen Gleichgewicht stellt das Minimum der freien Enthalpie des elektrischen Feldes und der spezifischen Grenzflächenenergien  $\gamma$  dar.  $\Theta_0$  bezeichnet den Ausgangsbenetzungswinkel im spannungslosen Zustand,  $v = \Theta_0 - \Theta(U) > 0$  die Benetzungswinkeländerung. Axiale Lage  $x_S(v)$  und Krümmung des Meniskus  $R(v)$  (Abb. 1) können aus der Forderung nach Volumenkonstanz beider Fluide bestimmt werden.

*Optische Modellbildung:* Um das Verhalten einer Electrowettinglinse im Strahlengang des menschlichen Auges zu untersuchen, wird ein paraxiales Optikmodell verwendet. Es berücksichtigt, dass präoperativ erhobene Biometriedaten (Hornhautkrümmungsradien  $R_1$ ,  $R_2$ , Lage des Implantates  $s_L$ , Augapfellänge  $s_A$ ) patientenindividuell variieren (repräsentiert durch drei Fälle:

Extremfall 1 erfordert ein stark, Extremfall 2 ein schwach brechendes Implantat, der Standardfall ist der am häufigsten auftretende). Die Meßwerte können mit bestimmten Größtfehlern von den unbekannt wahren Werten abweichen, woraus sich die Anforderung ergibt, die Refraktion postoperativ durch Änderung des Stellparameters  $v$  ausgleichen zu können [Bergemann2006]. Abb. 1 zeigt die Anordnung einer Electrowettinglinse im Strahlengang des Auges ( $s_L = 3,25$  mm). Das Electrowettingmodul (optischer Durchmesser  $2 \cdot r_0 = 5$  mm) ist mit Plankonvexzusätzen versehen (Mittendicke  $s_{43} = s_{76} = 0,5$  mm, Brechungsindex  $n_{43} = n_{76} = 1,49$ ), um über den Krümmungsradius  $R_0 = R_3 = -R_7$  die Anpassung an patientenindividuelle Biometriedaten zu ermöglichen.

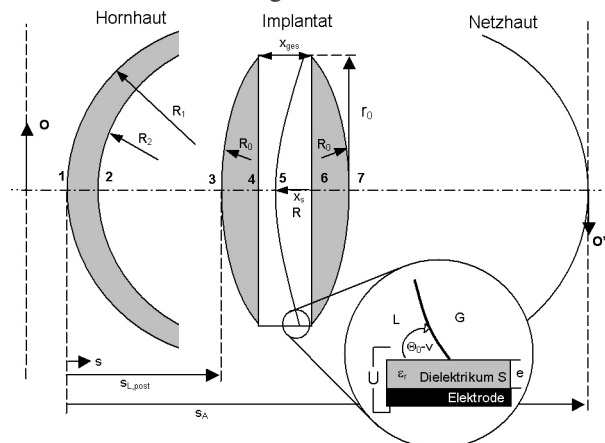


Abb. 1: Auf dem Electrowettingprinzip basierendes Implantat im Strahlengang des menschlichen Auges

### ERGEBNISSE

*Bauraumbeschränkungen:* Da die Dicke des Implantates 2 mm nicht überschreiten darf, um durch die Hornhaut in den Kapselsack eingeführt zu werden, ergeben sich aus  $x_{ges} < 1$  mm notwendige Beschränkungen für den zulässigen Ausgangsbenetzungswinkel  $\Theta_0$  (Abb. 2)

*Anpaßbarkeit an patientenindividuelle Biometriedaten:* Der Krümmungsradius  $R_0$  der Plankonvexzusätze muß im Wertebereich  $\infty > R_0 > 6,5$  mm liegen. Daraus ergibt sich eine weitere notwendige

Bedingung für den zulässigen Ausgangsbenetzungswinkel. Für Brechungsindizes  $n_L = 1,4$  und  $n_G = 1,5$  der beiden Fluide ist der Bereich in Abb. 2 exemplarisch eingetragen. Für beispielsweise  $\Theta_0 = 1,50$  rad ergibt sich die geometrisch maximal mögliche Benetzungswinkeländerung zu  $v_{max} = 0,69$ .

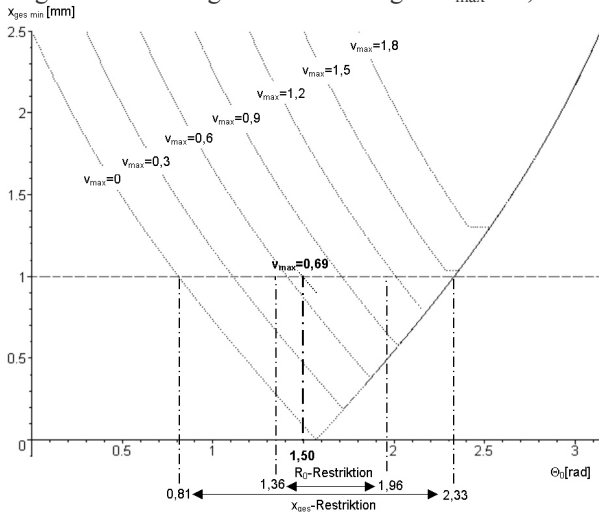


Abb. 2: Restriktionen für Ausgangsbenetzungswinkel  $\Theta_0$  und maximal erzielbare Änderung  $v_{max}$

**Akkommodationsfähigkeit:** Mittels des optischen Modells kann für die drei Biometriedatenfälle der notwendige Krümmungsradius  $R_0$ , die notwendige Benetzungswinkeländerung  $v_{erf,wc}$  um eine Akkommodation von  $\Delta D = 3$  dpt ausgehend vom postoperativen Refraktionsausgleich zu erzielen, die erforderliche dimensionslose Spannung  $\bar{U}_{erf,wc}$  sowie die sich bei einem Systemausfall höchstens einstellende Ametropie  $\Delta D_{wc}(0)$  berechnet werden (Tab. 1).

Tab. 1: Ergebnisse für  $n_L = 1,4$ ,  $n_G = 1,5$ ,  $\Theta_0 = 1,50$  rad

Fall	Extrem1	Standard	Extrem2
$R_0$ [mm]	10,47	18,92	54,21
$v_{erf,wc}$ [rad]	0,16	0,15	0,14
$\bar{U}_{erf,wc}$ [-]	0,40	0,39	0,37
$\Delta D_{wc}(0)$ [dpt]	-1,67	-1,34	-1,13

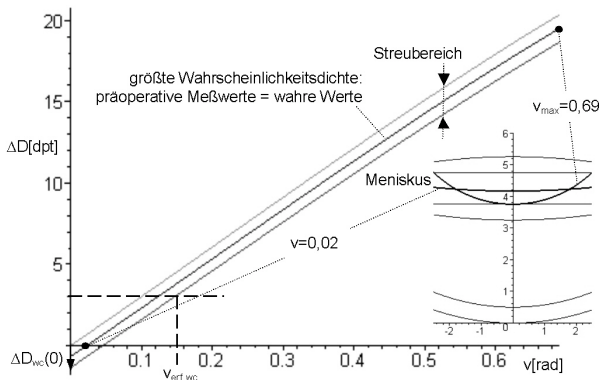


Abb. 3: Scheitelbrechkraftänderung  $\Delta D(v)$  für den Standardfall infolge Meniskusbewegung

Abb. 3 zeigt die berechnete Funktion  $\Delta D(v)$  exemplarisch für den Standardfall der Biometriedaten,

den zu erwartenden Streubereich der Scheitelbrechkraft infolge der Meßunsicherheiten bei der präoperativen Biometriedatenbestimmung und veranschaulicht die Meniskuslage. Die erforderliche elektrische Spannung ergibt sich für typische Werte ( $\gamma_{LG} = 0,03$  J/m<sup>2</sup>,  $e = 1$   $\mu$ m,  $\epsilon_r = 3$ ) annähernd biometriedatenunabhängig zu  $U_{erf,wc} \approx 20$  V.

## DISKUSSION

Mittels der an einem realistischen Beispiel vorgestellten Methodik können unterschiedlichste Fluid-Fluid-Festkörper-Paarungen auf ihre Eignung hin untersucht werden.

Vorteile des Wirkprinzips sind die hohe Dynamik ( $\tau \approx 50$  ms - 100 ms) und der sehr geringe Energiebedarf ( $\approx 1$  mW) [Kuiper2004].

Offene Fragen stellen die Realisierbarkeit von Electrowettingmodulen sehr kurzer Baulänge, die Langzeitstabilität der eingesetzten Materialien und die physiologische Verträglichkeit der erforderlichen elektrischen Spannungen dar. Eine Verformbarkeit des Implantates im Hinblick auf die Reduzierung der Schnittlänge in die Hornhaut unter den maximal vertretbaren Wert von 6 mm erscheint problematisch.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse zeigen, daß ein auf dem Electrowettingprinzip beruhendes Implantat prinzipiell geeignet ist, um die Akkommodationsfähigkeit in ausreichendem Maße wiederherzustellen. Zukünftige Arbeiten werden sich auf die Auswahl geeigneter Fluid-Fluid-Festkörper-Paarungen anhand von Materialdatenbanken mit dem Ziel möglichst geringer erforderlicher Spannungen konzentrieren.

## LITERATURHINWEISE

[Berge2000]

B. Berge, J. Peseux, „Variable focal lens controlled by an external voltage– an application of electrowetting“, *Europ. Phys. J. E* Vol 3, p 159, 2000

[Bergemann2006]

M. Bergemann, G. Bretthauer, R. Guthoff, „Untersuchung der Eignung von axialverschiebbaren Linsensystem zur Wiederherstellung der Akkommodationsfähigkeit durch ein mechatronisches Mikrosystem“ in *20. Jahrestagung der DGII*, Heidelberg, 2006

[Gengenbach2005]

U. Gengenbach, G. Bretthauer, R. Guthoff, „Künstliches Akkommodationssystem auf Basis von Mikro- und Nanotechnologie“ in *Mikrosystemtechnik Kongress*, Freiburg, 2005

[Kuiper2004]

S. Kuiper, B. Hendriks, „ Variable-focus liquid lens for miniature cameras “, *Appl. Phys. Lett.* Vol 85, p 1128, 2000