



Electrowetting – altes Prinzip in neuen Anwendungen

In Teil 1 haben wir uns überwiegend mit den physikalischen Grundlagen des EW-Effekts beschäftigt. Er besteht darin, das Benetzungsverhalten von Flüssigkeiten an Grenzflächen durch deren elektrisch steuerbare Oberflächenspannung zu beeinflussen. Jetzt geht es mit der Beschreibung ausgewählter Anwendungen weiter.

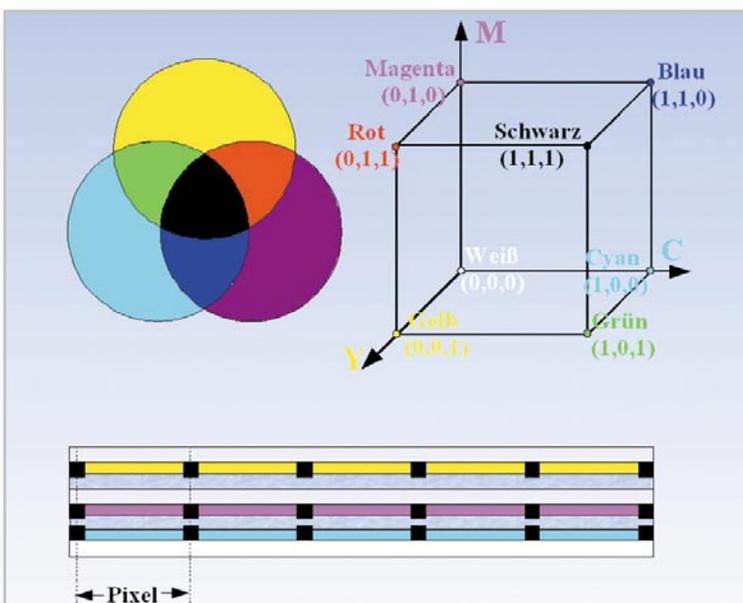


Bild 9: Mit der Dreischichtenarchitektur benötigt man keine Subpixel. Jedes Pixel kann jede Farbe annehmen.

Prinzipaufbau eines Dreischicht-EWDs

Dreischicht-EWD-Strukturen bestehen aus drei gestapelten monochromen Schichten (Abbildung 9 unten). Dem einfallenden weißen Licht wird hierbei in jeder Schicht eine Farbe mehr oder weniger stark entzogen. Deshalb spricht man von subtraktiver Farbmischung. Aus der Farbenlehre ist bekannt, dass sich aus weißem Licht nahezu alle Farben erzeugen lassen, wenn man ihm die Farben Cyan, Magenta und Gelb (Cyan-Magenta-Yellow = CMY) mehr oder weniger stark ausfiltert. Davon wird bei Farb-Tintenstrahldruckern Gebrauch gemacht. Abbildung 9 oben links zeigt, dass, wenn aus weißem Licht der Gelbanteil entfernt wird, Cyan und Magenta verbleiben. Diese überlagern sich zu Blau. Der resultierende Farbeindruck wird von den verbleibenden CMY-Komponenten, also dem nicht ausgefilterten Licht in den Farben Cyan und Magenta, bestimmt. Schwarz ergibt sich demnach, wenn jede Schicht die ihr zugeordnete Farbe (C, M oder Y) vollständig ausfiltert.

Es bleibt dann nichts mehr zum Reflektieren übrig, die Netz-

haut des Betrachters wird nicht angeregt, was dieser als den „Farbeindruck“ Schwarz empfindet. Die gleiche Aussage enthält die Darstellung als Farbwürfel in Abbildung 9 oben rechts.

Weil mit der Dreischicht-Displayarchitektur jedes Pixel den vollen Farbumfang darstellen kann, ist der Farbumwandlungsfaktor CCF verglichen mit der Einschicht-Struktur mit ihren RGB-Subpixeln annähernd dreimal so groß. Auf die Herstellungskosten wirkt es sich günstig aus, dass keine Farbfilter vor den Pixeln erforderlich sind. Diese werden ja durch die farbig-transparenten Ölfilme gebildet.

Allerdings wird die Treiberelektronik für ein Pixel in dreifacher Ausführung erforderlich, was letztlich den Preis dominiert.

Die Treiber- und Adressierungselektronik gleicht im Prinzip der anderer pixelbasierter Displaytechnologien. Man unterscheidet die Passivmatrix- und die Aktivmatrix-Adressierung. Erstere ist preiswert und für langsame bzw. statische Anwendungen mit geringerer Auflösung geeignet. Für hochauflösende Videozwecke kommt gewöhnlich die Aktivmatrix-Adressierung zum Einsatz.

Der Farbumfang, den Dreischicht-EWDs heute schon wiedergeben können, ist beachtlich (Abbildung 10). Er ist auf jeden Fall erheblich größer als der eines reflektiven LCDs. Es ist im Zuge der weiteren Entwicklung der EWD-Technik damit zu rechnen, dass sie die Wiedergabequalität hochwertiger selbstleuchtender Displaytypen (OLED, SED, Plasma ...) erreicht.

Die Schaltzeiten eines EWDs mit Pixelgrößen unter $500\ \mu\text{m}$ sind heute schon kurz genug, um Video-Inhalte ohne Nachzieheffekte wiederzugeben. In (1) wird für ein Subpixel mit $250 \times 80\ \mu\text{m}$ Kantenlänge eine Aktivierungszeit (Zeit zum Verdrängen des Ölfilms = helles Pixel) von typisch 3 ms angegeben. Nach dem Abschalten der dazu erforderlichen Spannung von etwa 20 V dauert es ca. 9 ms, bis der Ölfilm sich wieder verteilt hat und den reflektierenden Zellhintergrund abdeckt (dunkles Pixel).

Einer der größten Vorteile von EWDs ist ihr niedriger Energieverbrauch, der laut (1) bei etwa einem Fünftel eines LCDs liegt. Auch bei 100 Millionen Hell-Dunkel-Schaltzyklen ist keine Bildqualitätsminderung feststellbar. Mit den heute verwendeten Materialien ist ein Betriebstemperaturbereich von $-30\ ^\circ\text{C}$ bis $+80\ ^\circ\text{C}$ möglich, dem Einsatz der Displays im Freien steht also nicht im Wege.



Bild 11: Ein einfaches, starres monochromes EWD zum Anzeigen der Uhrzeit (Quelle: LiquaVista)

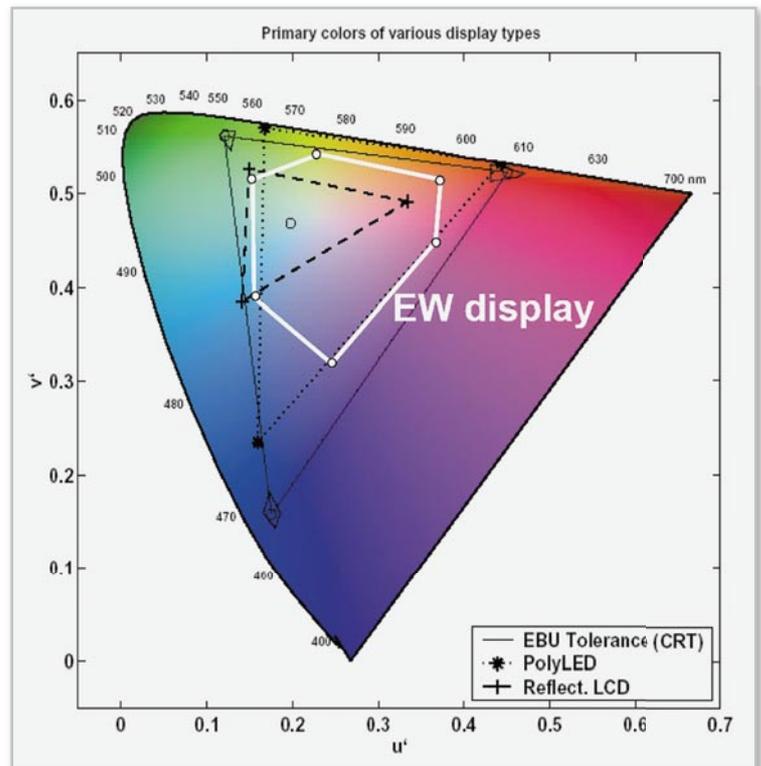


Bild 10: Ein EWD hat einen erheblich größeren Farbumwandlungsfaktor (CCF) als ein reflexives LCD, wie das weiße Sechseck im Norm-Farbdiaagramm beweist (1976 IEC chromaticity diagram). (Quelle: LiquaVista)

Anwendungen

Die Electrowetting-Displaytechnologie wird in allen Bereichen Anwendungen finden, wo es auf niedrigen Stromverbrauch ankommt und genügend Umgebungslicht vorhanden ist (Abbildung 11).

Als Trägermaterialien eignen sich hervorragend Polymerfolien. Die Technologie ist deshalb gut nutzbar für die Herstellung von „Elektronischem Papier“ (Abbildung 12). Wenn derartige bildgebende Folien an einer Kante mit ihren Inhalten versorgt werden, sind elektronische Bücher möglich. Dazu werden die Folien wie bei Papierseiten in einer Art Buchrücken fixiert und kontaktiert, worüber sie sich mit beliebigen Inhalten füllen, löschen und wieder beschreiben lassen. Auch Displays für hochauflösende farbige Video-Inhalte, die

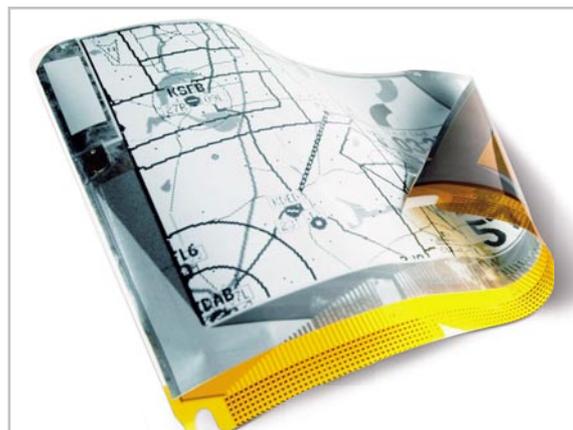


Bild 12: Flexible papierähnliche Displays auch für farbige Bewegtbilder sind keine Utopie. (Quelle: PolymerVision)



Bild 13: Kleines Gehäuse – großes Display: Mit flexiblen EWDs kann die Quadratur des Kreises gelingen. (Quelle: PolymerVision)

sich auf- und abrollen lassen, sind prinzipiell möglich (Abbildung 13).

Mikrofluidische Systeme

Der Begriff Mikrofluidik beschreibt die Technologien (Methoden und Komponenten), die geeignet sind, kleinste Flüssigkeitsmengen im Submillimeterbereich zu bewegen, zu dosieren und zu analysieren. Eine weit verbreitete Anwendung hat die Mikrofluidik heute in den Druckköpfen von Tintendruckern mit Inkjet-Technologie, wo winzigste farbige Tintentröpfchen mit wenigen Pikoliter Inhalt ($1 \text{ Pikoliter} = 10^{-12} \text{ Liter} = 10^{-6} \text{ mm}^3$) auf eine Papieroberfläche geschleudert werden, um dort zu einem hoch aufgelösten Farbbild zu verschmelzen. Neue Anwendungen sind winzige biochemische Analysatoren (Lab on a Chip), Dosiereinrichtungen, Pumpen, Aktoren und vieles mehr. Aber auch in der Materialsynthese vermögen mikrofluidische Systeme eine wichtige Rolle zu spielen.

Für die statische Darstellung von Displayinhalten stehen EWD-Varianten mit Speicherverhalten zur Verfügung. Dabei werden Flüssigkeitströpfchen durch Steuerimpulse in eine neue Lage gebracht, in der sie das Reflexionsverhalten der Displays dauerhaft verändern, auch wenn die Impulse nicht mehr anliegen. Das Funktionsprinzip zeigt Abbildung 14. In der Phase „Stabiler Zustand 1“ hat der Wassertropfen eine feste Position zwischen Elektrode 1 und der gemeinsamen

Gegenelektrode eingenommen. Beim Anlegen einer Spannung an Elektrode 2 wird der Tropfen mit seiner Unterseite in den Bereich der Elektrode 2 gezogen (Transferphase) und verdrängt dort das Öl. Nach dem Abtrennen der Spannung zieht er sich wieder zu seiner energieärmsten Ausgangsform (Stabiler Zustand 2) zusammen. Ist das Substrat mit einem Elektrodenarray beschichtet, kann man den Tropfen durch sukzessives Aktivieren von Elektroden über einen bestimmten Weg von einem Start- zu einem Zielpunkt führen. Dies ist eine im „Lab on a Chip“ benötigte Basisfunktion.

Eine praktische Anwendung dieses Effekts findet man in „droplet-driven displays“. Dabei befindet sich eine farbige Flüssigkeit in einer in Richtung des Betrachters abgedeckten Reservoirkammer, die über einen dünnen Kanal mit einer zweiten

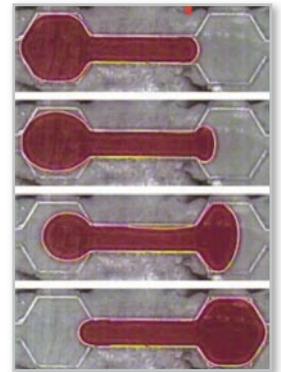


Bild 15: Droplet-driven Displays speichern ein Bild auch ohne Energiezufuhr, hier ein Pixel. (Quelle: ADT-GmbH)

unabgedeckten Kammer mit weiß reflektierendem Hintergrund verbunden ist (Abbildung 15). Über Elektroden, die an den Kammer anliegen, lässt sich die Flüssigkeit zwischen den Kammer hin und her bewegen und verbleibt auch ohne angelegte Spannung in einer stabilen Lage. Je nach Füllungsgrad der unabgedeckten Kammer hinterlässt diese einen mehr oder weniger hellen Eindruck. Mit der bewirkten Helligkeitsmodulation der sichtbaren Kammer lassen sich stehende und bewegte Bilder in starren oder flexiblen, monochromen oder farbigen Displays aller Größenordnungen erzeugen – für das Armaturenbrett im Auto genauso wie für elektronische Plakatwände, Verkehrsleitschilder oder Informationstafeln aller Art.

Linien mit veränderlicher Brennweite

Während im Bereich der elektronischen Schaltungen die Miniaturisierung ständig fortschreitet, stößt sie im Bereich optischer Objektive mit veränderlicher Brennweite an physikalische Grenzen. Einerseits in der mechanischen Länge, weil

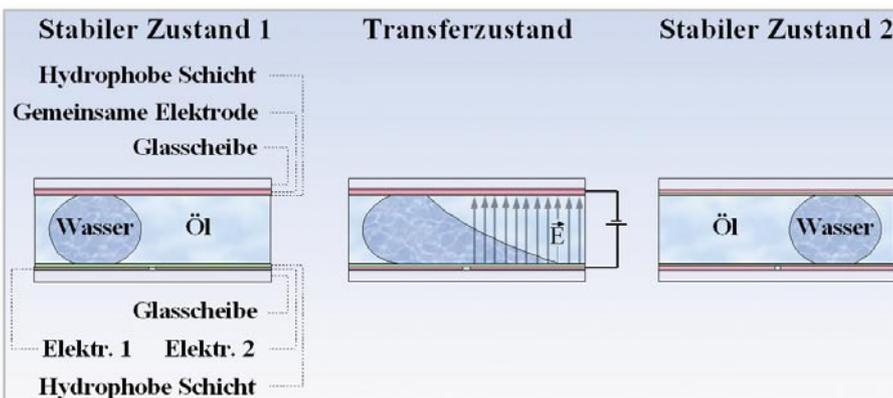


Bild 14: Tropfen lassen sich von einer aktiven Elektrode zur nächsten „verschieben“.

die Linse(n) mit fester Brennweite in ihren Abständen zueinander verschoben werden müssen. Andererseits spielt auch ein geringer Stromverbrauch eine wichtige Rolle, denn in miniaturisierten Anwendungen steht naturgemäß nur wenig Betriebsenergie zur Verfügung. Das ist der Grund, warum in modernen, superflachen Handys mit integrierter Fotofunktion bisher fast nur Objektive mit fester Brennweite (Fixfokus) anzutreffen sind, die sich nicht auf das gewünschte Objekt optimal scharfstellen lassen. Aber es gibt einen Ausweg: Der „Electrowetting Effect“ macht heute Flüssiglinsen möglich, deren Krümmung und damit Brennweite elektrisch steuerbar ist. Damit sind kleinste Optiken mit hervorragenden Abbildungseigenschaften ohne mechanisch bewegte Teile realisierbar. Die Linse im menschlichen Auge funktioniert exakt auf die gleiche Weise, nur dass ihre Verformung durch den Ziliarmuskel (und nicht durch elektrostatische Kräfte) bewirkt wird.

Prinzip der Flüssiglinsen

Am einfachsten zu verstehen und zu berechnen ist das optische Verhalten eines Flüssigkeitstropfens auf einer hydrophoben, ebenen Substratfläche, wie in Abbildung 4 (s. Teil 1) dargestellt.

Verwendet man anstelle der in den Tropfen eingeführten (invasiven) Elektrode eine transparente flächenhafte (planare) Elektrodenringstruktur unter dem Tropfen und gestaltet das Substrat ebenfalls transparent, ist die Form des Tropfens nach wie vor beeinflussbar. Er ist nun aber als planar-konvexe Linse nutzbar, weil die Transparenz von Elektroden und Substrat und die Eliminierung der invasiven Elektrode den ungestörten Lichtdurchtritt erlauben. Die Brennweite f eines von Luft umgebenen Wassertropfens, wie ihn Abbildung 16 zeigt, ist über seine Breite w und Höhe h näherungsweise durch Gleichung 4 beschrieben. Dabei ist n der optische Brechungsindex.

$$f = \frac{1}{n_{\text{Wasser}} - n_{\text{Luft}}} \left[\left(\frac{w}{2} \right)^2 + h^2 \right] \quad (4)$$

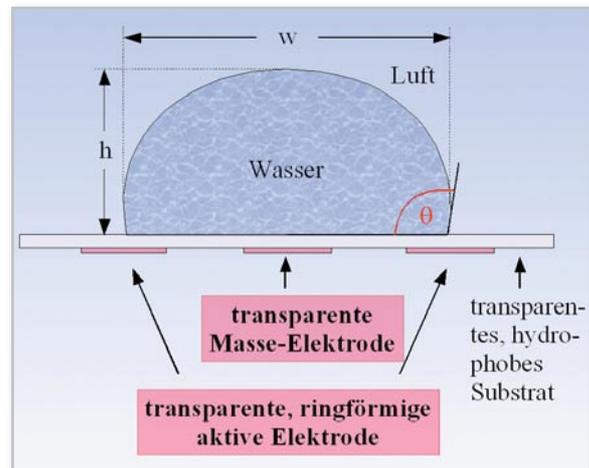


Bild 16: Die Brennweite solcher planar-konvexer Tropfenlinsen lässt sich recht einfach über ihre Geometrie bestimmen.

Alternativ lässt sich f über den Kontaktwinkel θ und das Tropfenvolumen V_d (d : droplet) gemäß Gleichung 5 ausdrücken.

$$f = \frac{1}{n_{\text{Wasser}} - n_{\text{Luft}}} \cdot \frac{\sqrt[3]{3V_d}}{\pi(1 - \cos \theta)(2 - \cos^2 \theta - \cos \theta)} \quad (5)$$

Technische Realisierung eines Objektivs mit Flüssiglinsen

Abbildung 17 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer elektrisch einstellbaren Flüssiglinsen des französischen Herstellers Varioptic (<http://www.varioptic.com/en/tech/technology01.php>). Im Wesentlichen besteht die Anordnung aus zwei Glasscheiben, zwischen die zwei unermischbare Flüssigkeiten – Wasser und Öl – mit gleichen optischen Brechungsindizes eingebracht sind. An die linke Glasscheibe schließt sich ein metallischer Elektrodenring an, der mit der Wasserschicht in Berührung steht. Es folgt eine sich kegelförmig verjüngende Elektrode, die mit einer Isolierschicht überzogen und deshalb elektrisch von den Flüssigkeiten und dem ersten Elektrodenring getrennt ist. Im Anschluss daran sehen wir die ölige Flüssigkeit und die rechte Glasscheibe. Im spannungslosen Zustand (Abbildung 17 links), d. h. ohne elektrostatische Kräfte

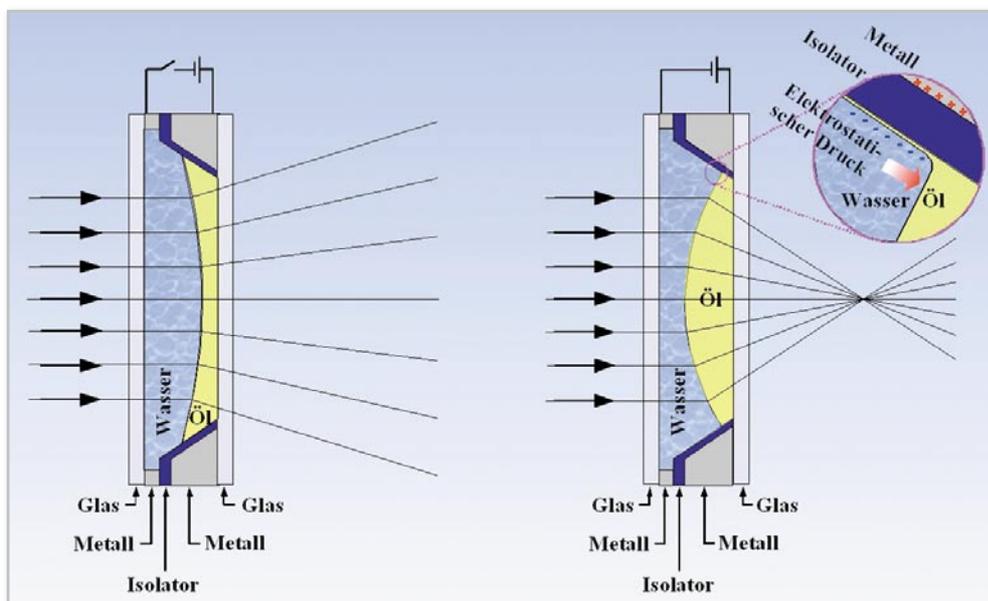


Bild 17: Schnittzeichnung durch ein Objektiv mit Flüssiglinsen im passiven und im angeregten Zustand (Quelle: Varioptic)



Bild 18: Eine Flüssiglinse, kleiner als ein Cent-Stück (Quelle: Varioptic)

te, nimmt das Öl eine konkave Form an, indem es die konische Isolationsschicht benetzt. Unter dem Einfluss einer Spannung zwischen den Elektroden bewirkt ein elektrostatischer Druck vom Wasser auf das Öl in dessen Randbereich seine Verdrängung (Abbildung 17 rechts). Damit ändert sich die Krümmung der Grenzfläche zwischen Öl und Wasser – die Ölschicht wölbt sich gewissermaßen zu einer konvexen Form auf. Die Linse hat ihre Brennweite verändert und zwar proportional zur Höhe der angelegten Spannung. Eine praktisch ausgeführte Linse mit ca. 3 mm Öffnungsweite (Apertur) und 1,5 mm Stärke zeigt Abbildung 18. Ihre technischen Kennwerte sind beeindruckend. Der Brechkraftbereich erstreckt sich von -5 bis $+15$ Dioptrien bei einem Spannungshub von 35 bis 55 V. Damit lassen sich die Objektive auf Motive im Abstand von Unendlich bis 5 cm scharf stellen. Das Fehlen jeglicher beweglicher Teile sorgt für eine extreme Robustheit und schnelles Ansprechen. Die Transparenz im Bereich des sichtbaren Lichts liegt bei 97 %, der Arbeitstemperaturbereich zwischen -20 °C und 60 °C.

Der Leistungsbedarf liegt unter 0,1 mW. Für das volle Durchfahren des Schärfebereichs in typisch 100 ms ist eine Energie von 10 μ Ws erforderlich – erheblich weniger als bei einer mechanisch verstellbaren Anordnung aus Glaslinsen mit vergleichbaren Eigenschaften. Das Autofokus-Objektiv im schlanken Handy der Zukunft kann mit dieser Technik zum Standard werden. Mit einer Flüssiglinse allein ist ein Bildwandler (z. B. CCD- oder CMOS-Sensor) noch nicht korrekt ausleuchtbar. Dazu benötigt man eine weitere feste Abbildungslinse aus Glas. Abbildung 19 zeigt die einzelnen Teile eines fokussierbaren Objektivs in Explosionsdarstellung. Man erkennt den verhältnismäßig einfachen Aufbau, der zudem ein hohes Maß an Robustheit und Zuverlässigkeit bei günstigen Kosten garantiert. Mit dieser Technik wurden be-

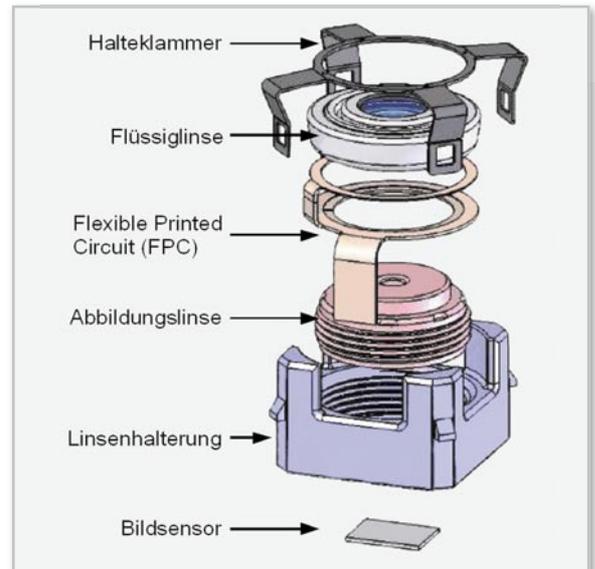


Bild 19: Wenige Bauteile ergänzen die Flüssiglinse zum kompletten Autofokus-Objektiv. (Quelle: Varioptic)

reits Vario-Objektive mit elektrisch einstellbarem Vergrößerungsfaktor (Zoom) und Fokus entwickelt und in Handy eingesetzt. Auch die elektronisch steuerbaren Blenden zur Lichtmengendosierung auf der Grundlage des Electrowetting-Effekts lassen sich in solche Objektive integrieren.

Ausblick

Der Electrowetting-Effekt wird Anwendungen finden, die über die vorstehend geschilderten weit hinausgehen. Schon heute gibt es vielfältige Anwendungen, z. B. in optoelektronischen Schaltern für die optische Signalverarbeitung, in den Life Sciences (Pharma, Pflanzenschutz auf molekularer Ebene, biologische und chemische Wirkstoffentwicklung, in den Bereichen nachhaltige Systeme, Lebensmittel und Landwirtschaft ...), Nano-Technologien usw. Mit den zunehmend fachübergreifenden Forschungen und Kooperationen werden sicherlich noch viele Einsatzfelder erschlossen, die wir uns heute selbst mit viel Fantasie noch nicht vorstellen können. **ELV**

Quellen:

1. Johan Feenstra, Rob Hayes: „Electrowetting Displays“, <http://www.liquavista.com/files/LQV060828XYR-15.pdf>
2. Wolfgang Mönch, Florian Krogmann, Hans Zappe: „Variable Brennweite durch flüssige Mikrolinsen“, Photonik 4/2005
3. Karl-Heinz Blankenbach, Andreas Schmolz: „Elektrowetting – von der Physik zu Displays“, horizonte 30, Juli 2007
4. Jihwan Park: „A Liquid Lens Based on Electrowetting“, Dissertation 1997, Louisiana State University
5. <http://en.wikipedia.org/wiki/Electrowetting>
6. J. Heikenfeld, A. J. Steckl: „Intense switchable fluorescence in light wave coupled electrowetting devices“, Applied Physics Letters 86, 011105 (2005)
http://www.ece.uc.edu/devices/Downloads/Documents/Heikenfeld_FluorELV_APL.pdf
7. adt GmbH, www.adt-gmbh.de
8. S. Kwon, L. P. Lee: „Focal length control by microfabricated planar electrodes-based liquid lens (muPELL)“, Proc. 11th International Conference on Solid State Sensors and Actuators Transducers, pp 1348–1351, vol. 1342, 2001
9. Fan-Yi Lin et al.: „Smart lens: tunable liquid lens for laser tracking“, Proc. of SPIE Vol. 6584 65840D7, Inst. of Photonics Technology, National Tsing Hua University & Inst. of Nanotechnology, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan
10. <http://www.ee.duke.edu/research/microfluidics/>
11. F. Mugele und J.-C. Baret: „Electrowetting: from basics to applications“, Journal of Physics: Condensed Matter 17 (2005), R705–R774