

**Proseminar „Technische Informatik“
Wintersemester 2009/2010**

Elektrophorese

Martin Lenders

mlenders@inf.fu-berlin.de

Betreuer: Michael Baar

15. Januar 2010

Diese Arbeit beschreibt den Vorgang der Elektrophorese und erläutert dessen physikalische Hintergründe. Sie umfasst kurz die chemische Anwendung und geht dann näher auf die technische Anwendung in der Unterhaltungsindustrie in Form von elektronischem Papier und dessen Herstellung ein.

1 Einleitung

Elektrophorese (gr. *elektron*, der Bernstein; gr. *phoresis*, das Tragen) bezeichnet die Wanderung elektrisch geladener Teilchen in einer Lösung, Suspension¹ oder kolloidalen Lösung² unter Einfluss eines elektrischen Feldes [1, S. 1], [2, S. 1] [6, 8, 14] [16, S. 407]. Sie wurde erstmals durch den Chemiker F. F. Reuß im Jahr 1809 [2, S. 1], anhand von in Wasser suspendierten Tonpartikeln beobachtet [14].

Während elektrophoretische Verfahren in der Chemie und Molekularbiologie schon lange eine bewährte Methode zur Trennung hochmolekularer Verbindungen, wie etwa Proteinen oder der DNA, sind [1, 16] und auch in der Industrie – zum Beispiel bei der Tauchlackierung [8, 14] – einen festen Platz hat, ist die technische Anwendung noch relativ jung. Ich stelle hier die *elektrophoretischen Displaytechnologien* – kurz: EPD [17] oder EPID [14] für Electrophoretic (Image) Display – vor, die in ihrer flexiblen Form auch als *elektronisches Papier* bekannt sind. Bei ihrem ersten Aufkommen Anfang der 1970er Jahre waren sie vor allem als Nachfolger der damals noch sehr schlechten Computerbildschirme gedacht [11].

Im Folgenden werde ich zunächst auf die chemische Anwendung eingehen, die die molekularbiologische Anwendung mit einschließt, da die Verfahren in etwa die gleichen sind. Im Abschnitt danach werde ich mich mit den verschiedenen Technologien auseinandersetzen, die in der Entwicklungsgeschichte des elektronischen Papiers entstanden sind. Dabei werde ich mit den damals noch als unflexible Bildschirme gedachten EPID-Panels der frühen 1970er Jahre beginnen und im Folgenden auf die E-Papier-Technologien Gyricon, E-Ink und SiPix eingehen. Anschließend werde ich die Herstellungsverfahren für EPDs erläutern, wobei der Hauptfokus auf den Prototypen des EPID-Panels und des E-Ink-Papiers und das Roll-to-Roll-Verfahren zur Herstellung von E-Papier der Firma SiPix gelegt wurde. Der nächste Abschnitt soll dann die physikalischen Grundlagen der Elektrophorese erklären. Abschließend will ich einen Vergleich der einzelnen EPD-Technologien und auch mit anderen Bildschirmtechnologien wagen und die weitere Entwicklung des elektronischen Papiers bewerten und analysieren.

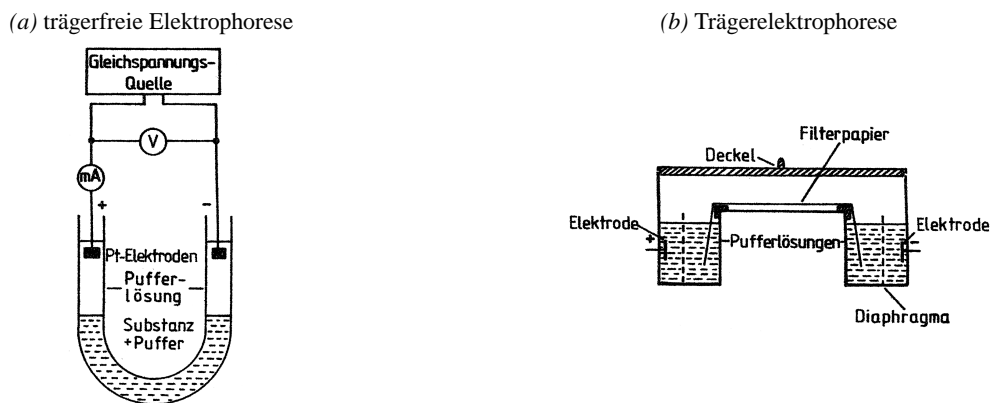
2 Chemische und molekularbiologische Anwendung

Elektrophorese wird in der Chemie und Molekularbiologie seit Langem zur Trennung unterschiedlicher Teilchenarten in Gemischen und Lösungen verwendet, wobei dies meist nur bei makromolekularen Strukturen – also vor allem Eiweißen oder Erbgut – Sinn macht. Die Anwendung beschränkt sich daher fast ausschließlich auf die Biochemie und die Molekularbiologie. Häufig wird die Elektrophorese in Kombination mit anderen Trennverfahren, wie etwa der Chromatographie [16, S. 407, 413] verwendet. In der Genanalyse wird Elektrophorese bei der Sequenzierung von DNA und RNA [1, S. 166–173] benutzt.

Man unterscheidet grob zwischen der heute seltener angewendeten trägerfreien Elektrophorese und der Trägerelektrophorese. Bei der *trägerfreien Elektrophorese* wird die zu untersuchende Lösung in einem U-

¹ Eine *Suspension* bezeichnet ein Gemisch von festen Partikeln größer als 10^{-4} cm in einer Flüssigkeit [8]

² Ein *Kolloid* bezeichnet ein Gemisch aus Teilchen vom Durchmesser zwischen 10^{-4} und 10^{-6} cm und einer Flüssigkeit [8]

Abbildung 1: Versuchsanordnung: trägerfreie Elektrophorese und Trägerelektrophorese [16, Abb. 26-1]

Rohr mit einer Pufferlösung überdeckt, in die dann zwei Elektroden getaucht werden (s. Abb. 1a). Die elektrophoretische Wanderung zeigt sich daraufhin in der Pufferlösung und es bilden sich für die verschiedenen Teilchenarten wandernde Fronten aus.

Bei der *Trägerelektrophorese*, die unter anderem die Gel- und auch die Papierelektrophorese mit einschließt, wandern die Teilchen auf einem mit der Untersuchungslösung getränkten Trägermaterial, das in der Elektrodenpufferlösung endet (s. Abb. 1b). Die Probe wird strichförmig auf den Träger aufgetragen und es bilden sich je nach Teilchenart wandernde Zonen. Durch diesen Aufbau bestimmen neben der Elektrophorese auch andere elektrische und nicht-elektrische Kräfte die Teilchenwanderung. Sind die Substanzen farblos, können sie durch weitere chemische Analyseverfahren optisch unterscheidbar gemacht werden.

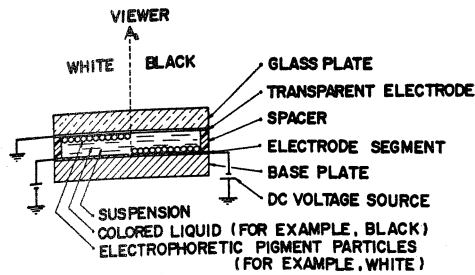
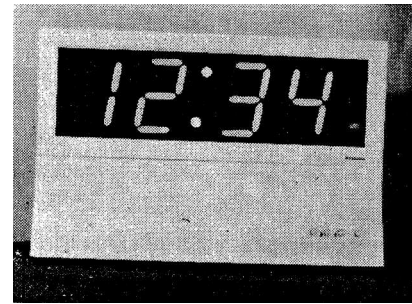
3 Technische Anwendung: Elektronisches Papier

Die Idee, Elektrophorese für Displaygeräte zu verwenden, kam erstmals in den frühen 1970er Jahren auf. Die damaligen Computerbildschirme waren eher von schlechter Qualität und zeichneten sich besonders durch mangelhafte Kontrastdarstellung aus. Obwohl erste experimentelle elektrophoretische Displays bereits damals entwickelt worden waren, erreichten sie erst Ende der 1990er Jahre in Form von elektronischen Papier (E-Papier) erstmals Marktreife [4, 11, 14].

Neben den elektrophoretischen Technologien gibt es für elektronisches Papier noch weitere Entwicklungen, wie zum Beispiel ein Produkt der Firma Siemens, das elektrochrome Stoffe verwendet [11]. Diese basieren jedoch nicht auf elektromechanischen Prozessen wie die Elektrophorese, sondern sind beispielsweise chemischer Natur.

3.1 Grundlegender Aufbau von E-Papier

Heute wie damals bestehen elektrophoretische Displays aus einer bildgebenden Frontplane und einer steuernden Backplane [4, 5]. Zur Backplane sei an dieser Stelle nur gesagt, dass man zwischen *passiver* und *aktiver Leiter-Matrix* unterscheidet, wobei Erstere sich durch geringere Kosten und höhere Flexibilität und

Abbildung 2: Aufbau eines EPID-Panels [14, Abb. 1]**Abbildung 3:** Experimentelle EPID-Digitaluhr [14, Abb. 2]

Letztere durch höhere Schaltgeschwindigkeit und bessere Kontrastdarstellung auf der Frontplane ausgezeichnet [4]. In der Frontplane spielt sich jedoch die Elektrophorese ab und je nach Technologie unterscheidet sich ihr Aufbau. Sie haben allerdings die Gemeinsamkeit, dass geladene Teilchen, in einer Flüssigkeit suspendiert, sich in Kammern zwischen zwei Folien oder Glasplatten befinden und durch eine oder mehrere Elektroden angesteuert werden. Im Folgenden wollen wir diese Technologien betrachten.

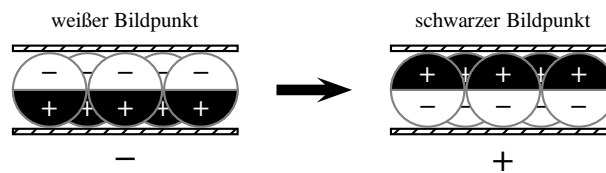
3.2 EPID-Panel [14]

1973 reichten Ota et al. ein Paper ein, in dem sie eine Displaytechnologie vorschlugen, die auf Elektrophorese basiert. Im Grunde wurde ein elektrophoretisches Gemisch zwischen zwei Elektroden im Abstand von 25 – 100 μm gegeben. Durch zwei Glasplatten wurden die Elektroden jeweils an der Außenseite gegen fremde Einflüsse versiegelt (s. Abb. 2). Aufgrund des eher experimentellen Charakters wurde hier, im Gegensatz zu späteren Herangehensweisen, das elektrophoretische Gemisch nicht in mikroskopisch kleinen Kammern, sondern in großen Kammern, die eine Sieben- oder Vierzehnsegmentanzeige bildeten, gelagert (s. Abb. 3).

Für das elektrophoretische Gemisch machten sie gleich mehrere Vorschläge. Zum einen könnte man Systeme entwickeln, die nur eine Art von Partikel haben (*one-particle systems*), die entweder in einer gefärbten Flüssigkeit schwimmen oder in einer farblosen Flüssigkeit, sich aber zwischen zwei Unterkammern bewegen, die durch eine gefärbte poröse Wand getrennt sind. Abb. 2 illustriert die Variante mit der gefärbten Flüssigkeit. Eine andere Variante wäre es, zwei Partikelarten in verschiedenen Farben zu verwenden. Diese könnten entweder entgegengesetzte Ladungen oder unterschiedliche elektrophoretische Mobilität³ aufweisen und würden sich dadurch im elektrischen Feld jeweils anders in der Kammer ausrichten.

Da die Dichte der Partikel mithilfe einer Polymerschicht um die Partikel an die der Flüssigkeit angepasst wurde [15] und da die Van-der-Waals-Kräfte zwischen Elektrode und Partikel beide zusammenhalten, bleibt die Ausrichtung des Displays sogar erhalten, wenn der Strom ausgeschaltet wird.

³ s. Abschnitt 5

Abbildung 4: Aufbau: Gyricon [11, nach Abb. 1]

3.3 Gyricon

Einem anderen Ansatz folgten Sheridan et. al. beim Xerox Palo Alto Research Center ebenfalls Anfang der 1970er Jahre. Seine Gyricon-Technologie basiert nicht auf einzelnen Partikeln in einer Flüssigkeit, sondern mikroskopisch kleinen Kunststoffkugeln, die auf der einen Seite schwarz und auf der anderen Seite weiß sind und einen elektrischen Dipol haben (s. Abb. 4). Je nach Polarisierung der Elektroden drehen sich die Kugeln so mal auf die eine und mal auf die andere Seite, daher auch der Name – Gyricon ist ein Kofferwort aus den griechischen Wörtern für „drehen“ und „Bild“. Anders als die Arbeit von Ota et al. war seine Arbeit gleich auf die Entwicklung eines elektronischen Papiers ausgelegt, und so wurden Kunststofffolien statt Glasplatten für die Abgrenzung verwendet, um eine gewisse Flexibilität zu gewährleisten [4, 9].

Im Gegensatz zu den anderen E-Papiertechnologien ist Gyricon nicht zwangsläufig so konzipiert, mit im E-Papier integrierten Elektroden zu laufen. Stattdessen sollen nach Idee der Erfinder sollen die Kugeln mit elektrisch geladenen „Druckern“ oder Stiften justiert werden [9]. Gyricon ist somit eher als ein wiederverwendbares Papier, denn eine Bildschirmtechnologie zu sehen. Daraus können wir aber auch implizieren, dass auch hier, ebenso wie beim EPID-Panel, die Anzeige bei abgeschaltetem Strom persistent bleibt [4, 9, 11].

Da die Markteinführung der Technologie einige Probleme mit sich zog, wurde die Firma Gyricon Media – ein Spin-Off-Unternehmen von Xerox – erst 1998 gegründet und der Vertrieb 2000 begonnen.

Aufgrund ihres Aufbaus kann man diese Technologie auch nicht direkt in die Gruppe der EPD-Technologien einordnen, da es sich bei der Farbänderung nicht um eine elektrophoretische Wanderung handelt [6]. Anders als zum Beispiel die Technologie von Siemens handelt es sich hierbei aber immer noch um einen elektromechanischen Prozess und sie ist außerdem von fundamentaler Bedeutung für die Entwicklung des elektronischen Papiers. Sie ist deshalb der Vollständigkeit halber und zu Vergleichszwecken hier genannt worden.

3.4 E-Ink

Ein Ansatz, der die „two particle“-Variante der EPIDs verfolgt, ist die E-Ink-Technologie, die am MIT von Comiskey et al. entwickelt wurde. Anders als beim EPID werden bei E-Ink jedoch nicht auf den Zweck angepasste Kammern verwendet, sondern Kugeln, die zwischen 30 – 300 µm im Durchmesser groß sind, die Mikrokapseln getauft wurden. Sie stellen die „Pixel“ des Displays dar. Die Partikel in der Kapsel haben entgegengesetzte Ladungen, und werden daher von der jeweils entgegengesetzt geladenen

Abbildung 5: Aufbau einer E-Ink-Mikrokapsel [6, nach Abb. 1a]

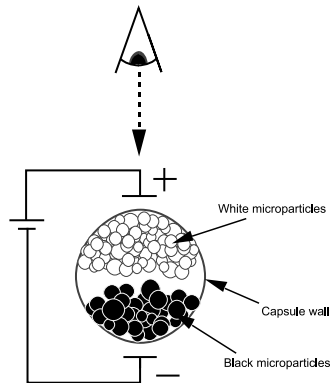
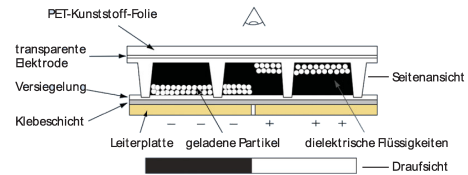


Abbildung 6: Aufbau eines SiPix-Microcups [4, Abb. 3]



Elektrode angezogen (s. Abb. 5).

Die Elektrode auf der Außenseite (also der dem Betrachter zugewandten Seite) wird hier aus einem transparenten, leitfähigen Material – wie zum Beispiel Indiumzinnoxid (kurz: *ITO*) – hergestellt [4, 6, 11].

Die Auflösung der Bilder ist nicht von der Auflösung der Kapseln sondern der Auflösung der Elektroden abhängig, da die Partikel sich selbstverständlich in der Kapsel teilen können, wenn zwei entgegengesetzt gepolte elektrische Felder sich in der Kammer treffen (vergl. dazu Abb. 2). Die Kapseln sind also partiell schaltbar.

Da auch hier zur Isolation der Elektroden keine Glasplatten, sondern Folien verwendet werden und durch die Kapseln eine höhere Robustheit erreicht wird, sind E-Ink-Displays biegsam, wie die Gyricon-Technologie, und werden daher auch dem elektronischen Papier zugeordnet [6].

Die 1997 gegründete MIT-Tochter E-Ink vermarktet diese E-Papier-Technologie seit 1999 [4], wurde aber 2009 vom taiwanesischen Bildschirmhersteller Prime View International übernommen [12].

3.5 SiPix

Eine andere Weiterentwicklung der EPID-Technologie für den E-Papiermarkt ist die von Zang und Liang im Jahr 2003 vorgestellte Microcup-Technologie der Firma SiPix. Sie kann als Erbe der „one particle“-Variante des EPID-Panels verstanden werden. Die elektrophoretische Flüssigkeit besteht aus weißen TiO_2 in einer gefärbten dielektrischen Flüssigkeit (meistens schwarz). Sie ist in die sogenannten Microcups, kleinen viereckigen oder – je nach Produktionsform – auch mehreckigen Waben, zwischen zwei Elektroden eingelagert (s. Abb. 6) [4, 17]. Die Partikel wandern so je nach angelegter Spannung entweder an die Oberfläche der Microcups oder deren Grund.

Die Waben haben eine Abmessung von 60 – 180 μm in Breite und Länge, sind 12 – 40 μm hoch und mit 5 – 25 μm breiten Wänden voneinander getrennt. Zusammen mit der Eigenschaft der Waben partiell schaltbar zu sein, garantiert dies eine hohe Auflösung bei geringer Dicke und hoher Flexibilität. Da man die einzelnen Microcups leicht mit verschiedenen gefärbten Flüssigkeiten füllen kann, sind so auch leicht mehrfarbige Displays denkbar [4, 17].

Laut ihren Entwicklern bleiben sie bei abgeschalteten Strom selbst in einer 1000-G-Zentrifuge persistent [17].

Der taiwanesischer LCD-Hersteller AU Optotronics ist derzeit Mehrheitseigner der Firma SiPix [12].

4 Herstellungsverfahren für elektronisches Papier

Da die meisten Produktionsverfahren für elektronisches Papier geheim sind, kann ich hier nur vorrangig die Herstellung der Prototypen der jeweiligen Technologie beschreiben. Bei der E-Ink-Technologie ist jedoch anzunehmen, dass sie in ähnlicher Weise wie hier beschrieben auch industriell produziert wird. Die industrielle Fabrikation von SiPix-Papier, das sich speziell durch ihre leichtere und damit günstigere Herstellung [4] auszeichnet, wurde in der wissenschaftlichen Fachpresse expliziter beschrieben.

4.1 Herstellung der elektrophoretischen Flüssigkeit [6]

Für ein elektrophoretisches Display wird zunächst die elektrophoretische Flüssigkeit selbst benötigt. Da sie beim EPID-Panel, der E-Ink-Technologie und der SiPix-Technologie im Großen und Ganzen recht ähnlich sind, werde ich hier zunächst die Herstellung am Beispiel des Prototypen von Comiskey et al. beschreiben. Als Partikel wird rutiles Titan(IV)-oxid (TiO_2) verwendet, das eine spezifische Dichte⁴ von 4,2 hat. Da die Dichte der umgebenden Flüssigkeit und die der Partikel in etwa die gleiche sein muss, werden die Partikel in ein geschmolzenes Polyethylen gegeben und zusammen mit dieser zerstäubt. Die ausgehärteten Tröpfchen werden dann feingranular gesiebt um Partikel von höchstens 5 μm Durchmesser zu erhalten. Alternativ können die größeren auch auf chemische Weise ausgesondert werden, womit wir Teilchen von 1 μm Durchmesser erhalten. Die so resultierenden Teilchen haben eine spezifische Dichte von etwa 1,5. Wenn schwarze Partikel benötigt werden, geht man bei ihnen ähnlich vor.

Die Partikel werden mit einem Gemisch aus Tetrachloroethylen ($d = 1,6$) und einem aliphatischen⁵ Kohlenwasserstoff mit einer spezifischen Dichte von 0,8 vermischt. Durch diese Mischung ist die spezifische Dichte der Flüssigkeit in etwa die gleiche der behandelten Partikel. Wird noch ein Farbstoff zur Flüssigkeit hinzugegeben, muss evtl. mehr vom leichteren Kohlenwasserstoff oder dem schwereren Tetrachloroethylen hinzugegeben werden, je nach dem, ob die spezifische Dichte des Farbstoffs größer oder kleiner 1,5 ist.

Je nach Hersteller und Voraussetzung für die Eigenschaften der Flüssigkeit werden dem Gemisch dann noch weitere Stoffe zur Dichteangleichung oder zur Anpassung der Ladungen hinzugegeben, wie etwa Harze, Öle oder Tenside (*surface active agents*) zugesetzt [14].

⁴ Die *spezifische* oder *relative Dichte* d (dimensionslos) ist definiert $d = \frac{\rho}{\rho_0}$, wobei ρ die Dichte des betrachteten Stoffes ist und ρ_0 die Dichte eines Referenzstoffes (z. B. Wasser) ist.

⁵ *Aliphatischer Verbindungen* schließen alle organischen Stoffe mit ein, die man ausschließlich von offenkettigen Kohlenwasserstoffen ableiten kann [8].

Abbildung 7: Schematischer Prozessverlauf des Roll-to-Roll-Herstellungsverfahrens [17, Abb. 3]

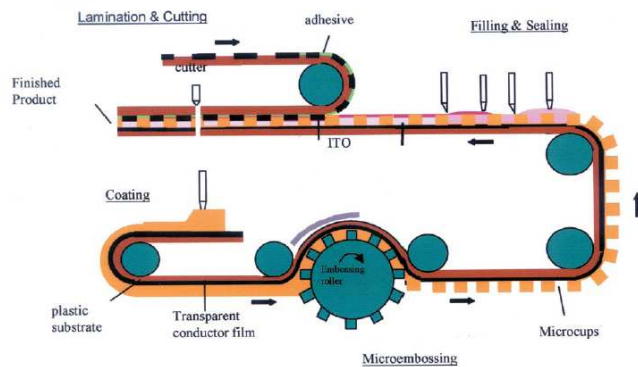
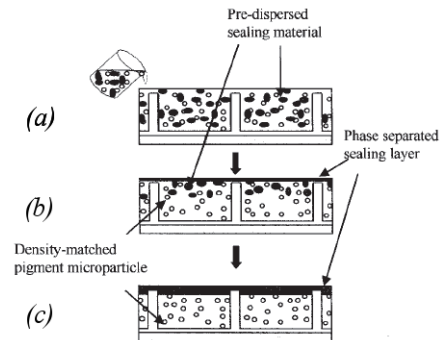


Abbildung 8: SiPix 1-pass top-sealing process [17, Abb. 4]



4.2 Herstellung eines experimentellen EPID-Panels [14]

Für den Prototyp des EPID-Panel wurden zunächst zwei Glasplatten mit Indium(III)-Oxid (In_2O_3) in der Form der späteren Elektroden überzogen. Um die spätere elektrophoretische Kammer wird nun ein 25 – 200 μm dicker Film aus Polyester aufgetragen und die beiden Glasplatten zusammengelegt. Nach dem Aushärten des Kunststoffes wird dann mit einer Spritze das elektrophoretische Gemisch durch einen Einlass am Rand der Panels eingegeben.

4.3 Herstellung von E-Ink-Papier [6]

Für die E-Ink-Technologie wird die elektrophoretische Suspension in Mikrokapseln eingeschlossen. Dazu wird sie mit einer wässrigen Flüssigkeit vermischt. Da das Gemisch stark hydrophob – also wasserabstoßend – ist, bilden sich kleine Tröpfchen des elektrophoretischen Gemisches aus. Durch Polykondensation⁶ von Urea und Formaldehyd schließt sich in situ um diese Tröpfchen eine mechanisch widerstandsfähige, transparente Polymerschicht. Je nach Wunsch können die so entstandenen Mikrokapseln gesiebt werden. Für den Prototypen wurden Kapseln von max. $(40 \pm 10) \mu\text{m}$ verwendet, wodurch eine Kapselauflösung von 600 dpi erreicht werden konnte. Die Mikrokapseln werden dann in ein UV-härtendes Urethan gegeben und zusammen mit diesem auf einen Film aus ITO aufgetragen und gehärtet. Die rückseitige Elektrode wird mit einer silberdotierten⁷ Polymertinte aufgetragen.

4.4 Roll-to-Roll-Verfahren der SiPix-Technologie [17]

Das E-Papier der Firma SiPix wird in einem lithographischen Roll-to-Roll-Prozess hergestellt (s. Abb. 7). Zunächst wird eine zweischichtige PET/ITO-Folie auf einem Fließband mit einem strahlungshärtenden Kunststoff überzogen. Unter einer UV-Fotomaske wird das Wabenmuster der Microcups ausgehärtet und die nichtgehärteten Teile ausgespült (s. auch [4]). Alternativ lassen sich die Waben auch im sogenannten *Microembossing*-Verfahren prägen. Danach werden die Waben mit der elektrophoretischen Flüssigkeit

⁶ Schrittweise Reaktion von zwei oder mehr Ausgangsstoffen zu einem Polymer unter Abspaltung kleinerer Moleküle [8].

⁷ *Dotierung* bezeichnet das Einfügen von Fremdatomen in ein reines Halbleitendermaterial [8].

befüllt und versiegelt. Zuletzt wird auf das Ganze die rückseitige Elektrodenschicht laminiert (s. auch [4]).

Bei der Versiegelung wurden zwei Verfahren entwickelt, die weitaus schneller funktionieren als die Versiegelung, die damals für LCD-Zellen verwendet wurde. Diese kann wegen Luftpneinschlüssen bis zu 20 Stunden dauern. Durch die folgenden Verfahren wurde die Produktionsgeschwindigkeit auf mehr als 30 ft/min erhöht.

Zum Einen wäre da das der *SiPix 1-pass filling and top-sealing process* (s. Abb 8). Hierbei wird die elektrophoretische Flüssigkeit zunächst mit den Ausgangsstoffen des Versiegelungspolymers (im folgenden vereinfacht als „die Versiegelung“ bezeichnet) vermischt und in die Microcups gefüllt (Abb. 8a). Die Versiegelung wurde dahingehend optimiert, dass ihre Ausgangsstoffe im Microcup eine schnelle Phasentrennung vollführen und sich an der Oberfläche zu einem gleichmäßigen Film sammeln (Abb. 8b). Dieser Film wird unter UV-Strahlung ausgehärtet und bildet so die Versiegelung (Abb. 8c). Der 1-pass-Prozess ist sehr einfach umzusetzen, allerdings bietet sich eher der *SiPix 2-pass top-sealing process* wenn die elektrophoretische Flüssigkeit und die Versiegelung nur teilweise miteinander kompatibel⁸ sind oder man die Kapseln mit verschiedenen elektrophoretischen Flüssigkeiten – etwa für mehrfarbige Displays – bestücken will. Hierbei werden die nur teilweise mit dem elektrophoretischen Gemisch gefüllten Microcups mit der Versiegelung überdeckt, die dann gehärtet wird.

5 Physikalische Grundlagen

In einem elektrischen Feld wirkt eine Kraft F auf jedes Teilchen:

$$F = Eze$$

wobei E die elektrische Feldstärke ($[E] = V \cdot m^{-1}$, $e \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) die Elementarladung und z die Anzahl der Elementarladungen ist. Wir können auch zusammenfassen, dass das Teilchen eine Ladung $q = ze$ besitzt. Laut dem dritten Newtonschen Axiom besitzt diese Kraft eine Gegenkraft in Form der Reibung. Auf ein kugelförmiges Teilchen des Radius r wirkt nach dem Stokes'schen Gesetz eine Reibungskraft F_R – auch Strömungskraft genannt, wenn es sich mit einer Geschwindigkeit v durch ein Medium der Viskosität η bewegt:

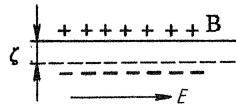
$$F_R = 6\pi r\eta v$$

Da sich Kraft und Gegenkraft aufheben, sind diese beiden Kräfte von gleicher Größe. Sie wird daher zur Wanderungsgeschwindigkeit v des Teilchens zusammengefasst [16]:

$$v = \frac{Eq}{6\pi r\eta}$$

Da sowohl die Ladung und Radius für ein bestimmtes Teilchen, als auch die Viskosität für ein bestimmtes Medium konstant sind, bedeutet das, dass für ein bestimmtes Teilchen in einer bestimmten Flüssigkeit allein von der elektrischen Feldstärke abhängt. Die „konstanten“ Werte bezeichnet man zusammengenom-

⁸ Die *Kompatibilität* zweier Stoffe gibt an, wie gut sie vermischtbar sind ohne dabei zu reagieren

Abbildung 9: Elektrolytische Doppelschicht [2, Abb. 1]

men als die *elektrophoretischen Mobilität* m [1, S. 2].

$$v = Em \iff m = \frac{q}{6\pi r\eta} = \frac{v}{E}$$

Da die elektrophoretische Mobilität aber maßgeblich von den oben genannten Parametern abhängt (Ladung, Radius und Viskosität), stellt sich die Frage, wieso sich ein scheinbar ladungsfreies Teilchen wie etwa TiO_2 elektrophoretisch fortbewegen kann.

Die Antwort hierauf bietet uns das Phänomen der (elektrolytischen) Doppelschicht, der sich in einer elektrolytischen Flüssigkeit um feste Körper bildet. Diesen kann man in etwa mit einem Plattenkondensator vergleichen bei dem eine Platte starr mit dem festen Partikel verbunden ist und mit dessen Oberfläche eine gleiche Ebene bildet. Die andere Platte sind Teilchen⁹, die sich im elektrischen Feld parallel zur Oberfläche des Partikels bewegen. Wenn wir nun annehmen, dass es sich bei der Oberfläche um eine Ebene und nicht um eine gekrümmte Fläche handelt, können wir die Oberflächenladungsdichte¹⁰ σ des Teilchens bestimmen:

$$\sigma = \zeta \epsilon \epsilon_0$$

wobei $\epsilon \epsilon_0$ die Dielektrizitätskonstante der umgebenen Flüssigkeit und ζ das elektrokinetische Potential oder einfach ζ -Potential ist, das durch die beschriebene Bewegung an der Oberfläche des Partikels entsteht [2, S. 1f].

Wenn wir nun $F = \sigma E$ für die Kraft auf das Teilchen setzen, erhalten wir für die elektrophoretische Mobilität nach Smoluchowski [13]:

$$m = \frac{\zeta \epsilon \epsilon_0}{\eta}$$

Bildlich kann man dies so darstellen, dass sich die Teilchen einer Ladung am Partikel „binden“ und und so Teilchen der entgegengesetzten Ladung anziehen, wodurch die entstehende Doppelschicht eine Oberflächenladung nach außen erzeugt, die der Ladung der angezogenen Teilchen entspricht [6, 14].

6 Vergleich

6.1 Vergleich zu anderen Bildschirmtechnologien

Im Vergleich zu anderen modernen Bildschirmtechnologien wie OLED, LCD oder TFT teilt das elektronische Papier viele Vorteile mit herkömmlichem Papier: So zeichnet es sich durch ein hohes Kontrastverhalten zwischen schwarz und weiß aus, das ihm besonders bei der Darstellung von Text zugute kommt.

⁹ in wässriger Lösung können dies durch die Autoprotolyse des Wassers etwa H_3O^+ - oder OH^- -Ionen sein, in unserer elektrophoretischen Flüssigkeit sind es maßgeblich die hinzugegebenen ionischen Tenside [6, 15]

¹⁰ die *Oberflächenladungsdichte* σ bezeichnet die Größe der elektrischen Ladung pro Fläche: $\rho = \frac{Q}{A}$ [7, S. 25]

Die Lesbarkeit wird auch nicht durch den Einfallwinkel des Lichts oder den Blickwinkel des Betrachters beeinflusst.

Im Vergleich zu LEDs, die schon als extrem stromsparend gelten, liegt der anzulegende Strom bei E-Papier im Mikroampere-Bereich, wo er bei Ersteren noch im Milliampere-Bereich lag [4]. Zusammen mit dem Fakt, dass sämtliche bisher entwickelten E-Papier-Technologien bei abgeschaltetem Strom ihre Anzeige behalten, spricht dies für einen sehr geringen Stromverbrauch [4, 11].

Da als Trägermaterial für die elektrophoretische Flüssigkeit eine große Bandbreite an Stoffen zur Verfügung steht, können sich durch die Verwendung von Kunststoffen, die für die Anwendung optimiert wurden, weitere Vorteile herauskristallisieren. Neben der Verwendung kostengünstiger Ausgangsstoffe konnten weitere produktionstechnische Vorteile erzielt werden. Außerdem haben sie ein geringeres Gewicht als die meisten anderen Displaytechnologien und sind dazu noch sehr flexibel und robust.

Man muss dabei erwähnen, dass auch Bildschirme mit organischen Leuchtdioden (OLED) viele dieser Eigenschaften, wie etwa das geringe Gewicht und den niedrigen Stromverbrauch, teilen, allerdings sind sie weder sehr flexibel, noch sehr widerstandsfähig [11].

6.2 Vergleich der E-Papier-Technologien

Während sie sehr viele Gemeinsamkeiten, wie etwa die persistente Bilddarstellung [14, 9, 6] und weitere der oben genannten Vorteile gegenüber anderen Technologien teilen, unterscheiden sich die einzelnen E-Papier-Technologien doch auch in einigen Punkten. So ist zum Beispiel die Produktion von E-Ink und SiPix deutlich einfacher, da sie „gedruckt“ [4, 6, 17] werden, während EPID und Gyricon eher „befüllt“ werden [6, 14], was sich in einem Mikrometermaßstab nur deutlich komplizierter bewerkstelligen lässt.

Durch ihre Einteilung in kleine Kapseln bzw. Waben, konnten E-Ink und SiPix den Nachteil der geringen Lebenszeit des EPID-Panels reduzieren. Beim EPID-Panel kam es durch Seitwärts-Wanderung der Partikel häufig zum Verklumpen [6].

Des Weiteren haben die elektrophoretischen Systeme den Vorteil, dass sie höhere Kontraste als die Gyricon-Technologie zeigen können, da es häufig vorkommt, dass die Kugeln keine komplette Rotation vollführen [6].

Mit einer Schichtdicke von 12 – 40 μm [17] in der elektrophoretischen Kammer (dem Microcup) ist die SiPix-Technologie eindeutig die dünnste. Die Mikrokapseln von E-Ink können bis zu 300 μm [6] im Durchmesser messen und die Kugeln von Gyricon und die elektrophoretischen Kammer des EPID-Panels besitzen beide eine Höhe von maximal 100 μm [9, 14].

7 Bewertung der Entwicklung

Obwohl farbiges E-Papier in Kürze erhältlich sein wird, ist es noch ein weiter Weg, bis es sich EPDs endgültig als Displaytechnologie etablieren werden. Da die farbigen Displays RGB-Farbfiler verwen-

den, die über die Schwarz-Weiß-Kammern des EPDs gelegt werden, leiden vor allem die Flexibilität und die Reflexionseigenschaften des E-Papiers [12]. E-Papier mit mehrfarbigen Flüssigkeiten (bei SiPix) bzw. Partikeln (bei E-Ink), statt nur schwarzen (und weißen), herzustellen scheint nach gegenwärtigem Stand einfach zu teuer zu sein.

Angesichts der Nähe zum bedruckbaren Papier wäre es beispielsweise denkbar, dass man bei der SiPix-Technologie je vier nebeneinanderliegende Microcups mit cyan-, magenta-, gelb- und schwarzgefärbten Dielektrika füllt, statt nur mit schwarzgefärbter Flüssigkeit. Auf diese Weise würde subtraktive anstelle von additiver Farbmischung angewandt werden, wie man sie im normalen Druck verwendet.

Außerdem ist die Entwicklung flexibler und widerstandsfähiger Backplanes immer noch ein Problem. Bei den meisten EPDs auf dem Markt wird die Steuerelektronik noch wegen der Robustheit in Glas eingefasst [4]. Darunter leidet natürlich die Flexibilität. Transistoren aus halbleitenden Kunststoffen könnten sich hierzu aber eventuell in Zukunft durchsetzen [10].

Alles in allem kann man sagen, dass trotz ihrer jetzt schon fast vierzigjährigen Entwicklung die elektrophoretischen Displaytechnologien noch am Anfang stehen. Besonders die ersten Generationen von E-Book-Readern, die zum größten Teil E-Ink-Displays verwenden [3] zeichneten sich durch sehr langsame Umschaltzeiten aus und Geräte zum Anzeigen von bewegten Bildern existieren bisher, wenn überhaupt, nur als Prototyp.

8 Zusammenfassung

Mithilfe von Elektrophorese gelang es eine neue Bildschirmtechnologie zu entwickeln, die viele Eigenschaften mit beschriebenem oder bedrucktem Papier teilt. Was als Initiative gegen die schlechten Monitore der 1970er Jahre begann, soll nun heutige Probleme wie den hohen Stromverbrauch beheben und den Traum vom biegsamen Display erfüllen. Dabei entstanden die verschiedensten Ansätze, die sich jeweils in ihrem Aufbau und ihrer Produktion unterscheiden. Während Gyricon mit ihren rotierenden Kugeln komplett eigene Wege beschreitet, folgen E-Ink und SiPix in ihrem Aufbau dem experimentellen EPID-Panel der Frühphase. Die Herstellungsverfahren variieren dabei zwischen Methoden, die dem Drucken von Papier ähnlich sind und anderen, die dafür vorgesehene Schicht lediglich mit der „elektrophoretischen Tinte“ füllen.

Die Elektrophorese kann dabei in einer physikalischen Größe, die man als elektrophoretische Mobilität bezeichnet, gemessen werden. Sie gibt Auskunft darüber, wie schnell sich ein Partikel in Abhängigkeit von der Stärke des ihn umgebenden elektrischen Feldes in diesem bewegen kann. Diese Größe kann auch anhand einiger Parameter berechnet werden.

Trotz seiner Vorteile hat das elektronische Papier noch einen langen Weg vor sich, um mit den anderen Bildschirmtechnologien aufzuholen.

Literatur

- [1] ANDREWS, A. T.: *Electrophoresis: theory, techniques, and biochemical and clinical applications*. 2nd Ed. Clarendon Press Oxford, 1986
- [2] BABSKII, V. G. ; ZHUKOV, M. Y. ; YUDOVICH, V.I.: *Mathematical Theory of Electrophoresis*. 1st Ed. Consultants Bureau New York, 1989
- [3] BARCZOK, A.: Taschenbibliotheken. In: *c't* (2009), Nr. 25, S. 140–145
- [4] BORCHARD-TUCH, C.: Chemie Innovativ: Wettlauf zum E-Papier. In: *Chemie in unserer Zeit* 40 (2006), Nr. 1, S. 63–65
- [5] CHEN, Y. ; AU, J. ; KAZLAS, P. ; RITENOUR, A. ; GATES, H. ; MCCREARY, M.: Flexible active-matrix electronic ink display. In: *Nature* 423 (2003), Nr. 6936, S. 136
- [6] COMISKEY, B. ; ALBERT, J.D. ; YOSHIKAWA, H. ; JACOBSON, J.: An electrophoretic ink for all-printed reflective electronic displays. In: *Nature* 394 (1998), Nr. 6690, S. 253–255
- [7] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik*. Bd. 2. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004
- [8] GAEDE, P. M. (Hrsg.) ; BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT (Hrsg.) ; F. A. BROCKHAUS AG (Hrsg.): *GEO Themenlexikon, Bd. 6-8: Naturwissenschaften und Technik*. 1. Auflage. GEO Gruner + Jahr AG & Co. KG, Hamburg und Bibliographisches Institut, Mannheim, 2007
- [9] HOWARD, M. E. ; RICHLEY, E. A. ; SPRAGUE, R. ; SHERIDON, N. K.: Gyricon electric paper. In: *Journal of the Society for Information Display* 6 (1998), Nr. 4, S. 215 – 217
- [10] HUITEMA, H. E. A. ; GELINCK, G. H. ; VAN DER PUTTEN, J. ; KUIJK, K. E. ; HART, C. M. ; CANTATORE, E. ; HERWIG, P. T. ; VAN BREEMEN, A. ; DE LEEUW, D. M.: Plastic transistors in active-matrix displays. In: *Nature* 414 (2001), Nr. 6864, S. 599
- [11] KARLA, J.: Elektronisches Papier. In: *Informatik-Spektrum* 26 (2003), Nr. 5, S. 350–353
- [12] KUHLMANN, U.: *Ab 2010 farbiges E-Paper*. heise online News. November 2009. – URL <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Ab-2010-farbiges-E-Paper-872278.html>
- [13] LYKLEMA, J.: Electrokinetics after Smoluchowski. In: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 222 (2003), Nr. 1-3, S. 5–14
- [14] OTA, I. ; OHNISHI, J. ; YOSHIYAMA, M.: Electrophoretic image display (EPID) panel. In: *Proceedings of the IEEE* 61 (1973), Nr. 7, S. 832–836
- [15] PARK, B. J. ; SUNG, J. H. ; CHOI, H. J.: Electrophoretic TiO₂ nanoparticle modified with poly(methyl methacrylate). In: *Journal of Electroceramics* 17 (2006), Nr. 2-4, S. 1031–1033
- [16] RÜCKER, G. ; NEUGEBAUER, M. ; WILLEMS, G. G.: *Instrumentelle pharmazeutische Analyse*. S. 407–413, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart, 1992
- [17] ZANG, H. M. ; LIANG, R. C.: Microcup Electronic Paper by Roll-to-Roll Manufacturing Processes. In: *The Spectrum* 16 (2003), Nr. 2, S. 16–21