



Elektronisches Papier

Technik, Nutzen und Anwendungen



Den Trend der Zeit folgend versucht der Computer, auch dem Buch seinen angestammten Platz in der digitalen Informationsvermittlung streng zu halten. Und es ist auch verständlich, eine mangelnde Bibliothek jenseits auf einem Laptop oder Tablet zu setzen wird. Der wichtigste Grund dafür ist, dass sich das Lesen auf dem Computerdisplay häufiger als auf dem Papier ablesen lässt. Das liegt an der Erhellung im Vergleich mit dem Buch. Ein Buch hat eine gewisse Helligkeit, die durch das Papier selbst erzeugt wird. Ein Computerdisplay hingegen ist ein reines Lichtemittierendes Element, das nur durch die Helligkeit des Displays leuchtet. Das führt dazu, dass das Buch im Vergleich zum Computerdisplay eine höhere Lesekomfort hat. Ein Computerdisplay ist ein reines Lichtemittierendes Element, das nur durch die Helligkeit des Displays leuchtet. Das führt dazu, dass das Buch im Vergleich zum Computerdisplay eine höhere Lesekomfort hat.

Die Entwicklung des elektronischen Papiers (E-Paper) ist ein absolutes Highlight für die Zukunft der Lesegeräte. Es handelt sich um ein Display, das wie ein Blatt Papier aussieht und sich wie ein Blatt Papier verhalten kann. Es ist ein Display, das wie ein Blatt Papier aussieht und sich wie ein Blatt Papier verhalten kann. Es ist ein Display, das wie ein Blatt Papier aussieht und sich wie ein Blatt Papier verhalten kann.

Das E-Paper basiert auf dem Prinzip der Elektrophorese. Damit wird die Wandlung von elektrischer Energie in optische Energie ermöglicht. Die Elektrophorese ist ein physikalisches Phänomen, bei dem sich feine Partikel in einem flüssigen Medium unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes bewegen. In einem E-Paper-Display sind diese Partikel in einer Schicht zwischen zwei Elektroden angeordnet. Durch die Anwesenheit der Elektroden wird ein elektrisches Feld erzeugt, das die Partikel in die gewünschte Position bewegt. Dies ermöglicht die Darstellung von Text und Bildern auf dem Display.



(nicht nur) für das E-Book



Dem Trend der Zeit folgend versucht der Computer, auch dem Buch seinen angestammten Platz in der visuellen Informationsvermittlung streitig zu machen. Und es ist auch verlockend, eine umfangreiche Bibliothek jederzeit auf einem Laptop oder Tablet zur Hand zu haben. Aber es gibt eine Reihe von Gründen dafür, dass sich das Lesen auf dem Computerdisplay heutiger Prägung nicht durchsetzen wird. Der wichtigste davon liegt in der geringen Akkulaufzeit mobiler Computer aller Art, zu der nicht zuletzt der hohe Energieverbrauch aktiver Displays beiträgt. Hinzu kommt, dass bei einer hohen Umgebungshelligkeit die Displayinhalte nur mühsam oder gar nicht zu erkennen sind. Dadurch ist der Einsatz im Freien, insbesondere bei Sonnenschein, praktisch nicht möglich. Für den Liegestuhl am Urlaubsstrand ist deshalb das gute alte Taschenbuch immer noch die beste Wahl. Aber seit einigen Jahren ist das „elektronische Buch“ (E-Book), mit dem echten Buch in Wettbewerb getreten – mit zunehmendem Erfolg. Der Hauptgrund dafür liegt in dem eingesetzten Displaytyp, der auf der pixelgenauen gesteuerten Reflexion von Umgebungslicht beruht. Damit sind schwarze Buchstaben auf weißem Hintergrund so darstellbar, wie wir es von einer Buchseite gewohnt sind. Hinzu kommen ein äußerst geringer Stromverbrauch und ein absolut ruhiges Bild für ein lang anhaltendes, ermüdungsfreies Lesevergnügen.

In einer interessanten wissenschaftlichen Studie wurde nachgewiesen, dass die Bettlektüre über ein LC-Display mit LED-Hintergrundbeleuchtung einen Verlust an Schlafqualität nach sich

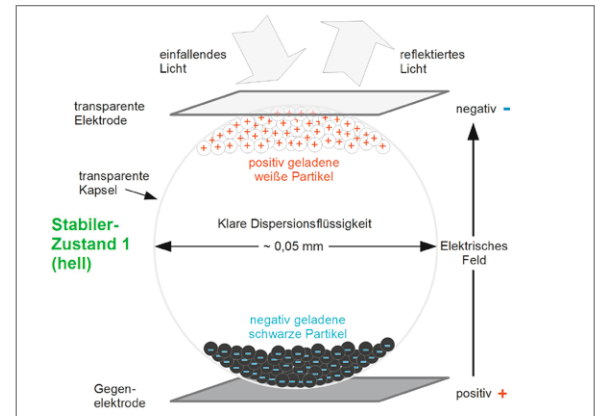


Bild 1: In einer mit Flüssigkeit gefüllten Kapsel schwebende negativ geladene schwarze und positiv geladene weiße Partikel bewegen sich unter dem Einfluss eines elektrischen Felds in entgegengesetzte Richtungen.

zieht. Vergleichsstudien am Brigham and Women's Hospital in Boston (www.brighamandwomens.org) haben einen negativen Einfluss auf die erholungswichtigen REM-Phasen (REM: Rapid Eye Movement) im Schlaf des Lesers festgestellt. Der Grund dafür liegt in dem kurzwelligen Spektralanteil im Licht der Rückbeleuchtung des LCDs, der die Produktion des Schlafhormons Melatonin verringert. Lesegeräte mit Displays auf E-Paper-Basis dagegen haben – wie echte Bücher – naturgemäß keinerlei Einfluss auf die Schlafqualität.

Noch ein Wort zur Nomenklatur: Als E-Paper werden heute auch elektronisch veröffentlichte Publikationen aller Art wie Zeitungen, Magazine, wissenschaftliche Arbeiten usw. bezeichnet. Das ist in diesem Artikel natürlich nicht gemeint. Hier geht es ausschließlich um Displaytechnologien. Wir wollen im Folgenden die Begriffe E-Paper, E-Ink und EPD (Electronic Paper Display) synonym verwenden.

Funktionsprinzip Elektrophorese. E-Paper basiert auf dem Prinzip der Elektrophorese. Damit wird die Wanderung von Teilchen in einem Dispersionsmedium (meistens eine Flüssigkeit) unter dem Einfluss eines elektrischen Felds bezeichnet.

Das Prinzip eines E-Paper-Displays (EPD) ist in **Bild 1** dargestellt. Sie zeigt eine transparente Kapsel mit etwa 0,05 mm Durchmesser (das entspricht in etwa der Hälfte der Stärke eines menschlichen Haares) zwischen zwei Elektroden, eine lichtdurchlässige, auf die der Blick des Betrachters gerichtet ist und eine gegenüberliegende. Die Kapsel ist gefüllt mit einem klaren, zähflüssigen Polymer als Disper-

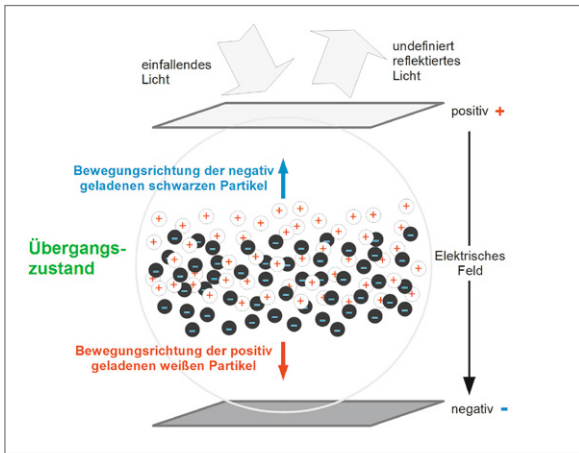


Bild 2: Nach einem Umpolen des elektrischen Felds wechseln in der Übergangsphase die weißen und schwarzen Partikel innerhalb der Kapseln ihren Platz.

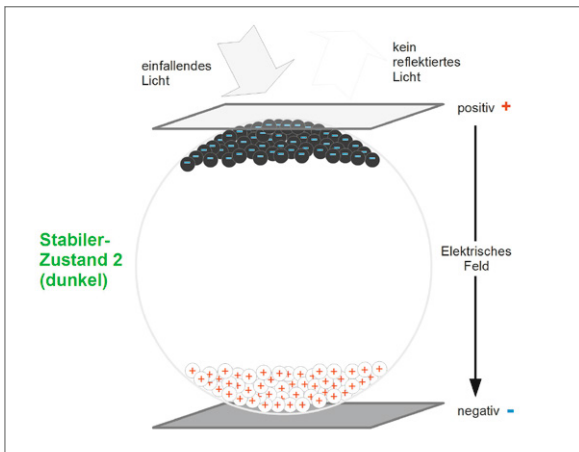


Bild 3: Nach abgeschlossener Wanderung in die inverse Position ist kein Feld mehr erforderlich. Ohne treibende Kraft verharren die Teilchen stabil in ihrer Lage beim Abschalten des Felds.

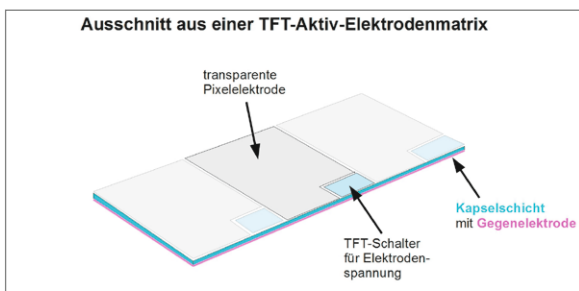


Bild 4: Arrayförmig angeordnete transparente Elektroden mit TFTs (Thin Film Transistors = Dünnschichttransistoren) bewirken, dass die von ihnen beeinflussten Kapseln sich dem Betrachter hell oder dunkel präsentieren.

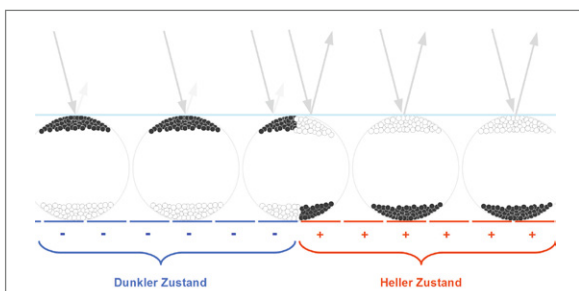


Bild 5: Wenn die felderzeugenden Elektroden an der Unterseite und die transparente Gegenelektrode an der Oberseite angeordnet sind, ergeben sich die gleichen Beeinflussungen der Kapseln mit den weißen und schwarzen Partikeln.

sionsflüssigkeit, in der eine Vielzahl negativ geladener schwarzer und positiv geladener weißer Partikel schwimmt. Beim Anlegen einer Gleichspannung an die Elektroden entsteht ein elektrisches Feld, an dessen Feldlinien entlang die Partikel sich so weit wie möglich bewegen, also bis zur Kapselwandung. In der Abbildung ist die transparente Elektrode negativ. Hier sammeln sich die positiv geladenen weißen Partikel, was zur Reflexion von aufgestrahltem Licht führt. Für den Betrachter scheint die Kapsel hell (stabiler Zustand 1).

Wird die Polarität der an die Elektroden angelegten Spannung umgekehrt, wandern die hellen Partikel in der Kapsel flüssigkeit zur Rückelektrode und die negativ geladenen schwarzen Partikel zur transparenten, auf das Betrachterauge gerichteten Frontelektrode. Bild 2 zeigt, wie sich in der Übergangsphase die Partikelwolken auf dem Weg in ihre stabile Endlage durchdringen (Übergangszustand).

Dort angekommen (Bild 3), wird an der transparenten Elektrode auf fallendes Licht von den schwarzen Partikeln absorbiert und die Kapsel erscheint nun dunkel (stabiler Zustand 2).

Man kann sich vorstellen, dass die Geschwindigkeit des Wandlungsvorgangs der Partikel im Dispersionsmedium von einer Vielzahl von Parametern abhängt wie z. B. Partikelgröße, Feldstärke, Viskosität der Dispersionsflüssigkeit und Abmessungen der Kapseln. Dadurch ist eine vergleichsweise lange Umschaltzeit zwischen dem hellen und dem dunklen Zustand der Kapsel vorgegeben, wodurch sich dieser Displaytyp für schnell veränderliche Inhalte weniger gut eignet. Allerdings bleibt ein stabiler Endzustand (hell oder dunkel) auch nach Abschalten des bewegenden elektrischen Felds erhalten (bistabile Eigenschaft). Er ist gewissermaßen „eingefroren“, denn ohne elektrisches Feld wirkt auf die Partikel keine Kraft mehr ein und sie verharren deshalb in ihrem Zustand beim Abschalten der Elektroden-Spannung. Genau betrachtet wird den Partikeln nur während ihrer Transportphase Energie zugeführt, also solange sie sich von einer Endlage in die andere bewegen. Dies ist der Grund für den außerordentlich geringen Energiebedarf von E-Paper-Displays (EPDs). Ein einmal eingeschriebenes Bild bleibt ohne jede weitere Energiezufuhr über Wochen und Monate absolut flackerfrei erhalten.

Praktischer Aufbau. In einem E-Paper-Display sind nun Millionen von Kapseln zwischen den felderzeugenden Elektroden eingeschlossen. Bildpunkte (Pixel: Picture Element) entstehen mithilfe einer TFT-Aktiv-Elektrodenmatrix, wie sie auch bei Flüssigkristalldisplays eingesetzt wird (Bild 4). Natürlich ist es auch möglich, die TFT-Elektrodenmatrix auf der Unterseite des Displays anzuordnen. Das hat den Vorteil, dass diese dann nicht mehr transparent zu sein braucht und die transparente Deckelektrode durchgängig homogen ausgeführt werden kann (Bild 5).



Bild 6: Am Beispiel eines E-Paper-Displays eines Kindle-Lesegeräts sind in der Vergrößerung bei genauer Betrachtung die Kapseln als kleinste Bildelemente zu erkennen.

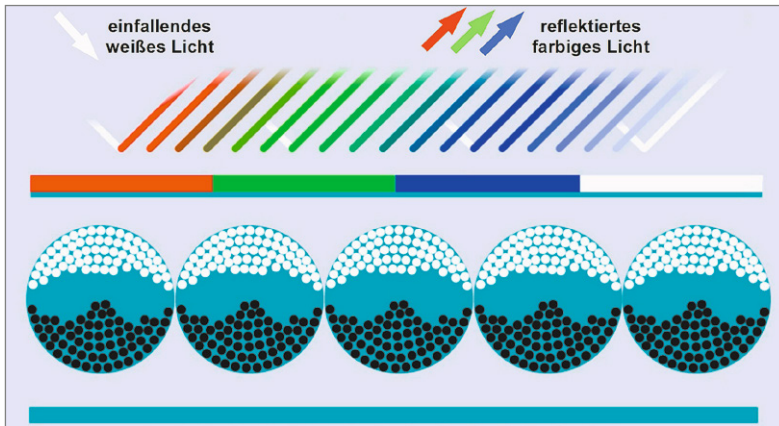


Bild 8: Farbfilter über den Kapseln erzeugen eine Farbe, wenn die darunter liegenden Kapseln an der Vorderseite weiß sind. Zeigen sie sich schwarz, ist das Pixel dunkel (Quelle: E Ink).



Abbildung 10: Im Dunkeln sind EPDs ohne Beleuchtung dunkel. Eine auf das Display aufgetragene transparente Leuchtfolie schafft Abhilfe (Quelle: FLEx LLC).



Abbildung 11: Ein flexibles Display von der taiwanesischen Firma E Ink Holdings Inc.

Grauwerte als Abstufungen zwischen weißen und schwarzen Pixelzuständen werden durch den zeitlichen Verlauf der angelegten Spannung erzeugt. Die heute üblichen Displays arbeiten mit 16 Graustufen. Durch Anwendung der aus der Drucktechnik bekannten Rasterverfahren lassen sich aber scheinbar unendlich viele Graustufen erzeugen. Die Bildrasterung geht auf Georg Meisenbach zurück, der mit unterschiedlich großen Rasterpunkten ein Bild halbtongerecht zerlegte (Anmeldung zum Patent 1882).

Die detaillierte Betrachtung eines E-Paper-Displays eines Lesegeräts der Firma Amazon vom Typ Kindle Model D01100 (quasi der Urahn der Lesegeräte auf E-Paper-Basis) in Bild 6 offenbart dessen endliche, letztlich durch die Größe einer Mikrokapsel vorgegebene Auflösung. Sie ist allerdings noch so hoch, dass bei normaler Betrachtung ohne Zuhilfenahme vergrößernder Instrumente keinerlei Granularität auffällt. Der Leseindruck ist praktisch gleichwertig mit dem einer echten Buchseite.

Funktionsprinzip Rotation. Die amerikanischen Unternehmen Xerox und 3M hatten schon in den 1970er-Jahren das erste E-Paper mit der Bezeichnung Gyricon entwickelt (Bild 7). Dafür wurden ebenfalls kugelförmige Mikrokapseln eingesetzt, deren Halbsphären jeweils mit positiv geladenen schwarzen und negativ geladenen weißen Partikeln beschichtet waren und so zum elektrischen Dipol wurden. Abhängig von der Ladung der Elektroden drehten sich die Dipole im elektrischen Feld so, dass entweder ihre schwarze oder ihre weiße Hälfte zum Betrachter zeigten. Die Rotation um volle 180° bewirkte den Übergang von Schwarz nach Weiß oder umgekehrt. Kleinere Drehwinkel erlaubten die Wiedergabe von Grautönen. Auch dieser Displaytyp war bistabil und behielt seinen Inhalt ebenfalls nach Abschalten der Elektrodenspannung.

Nicholas K. Sheridon, damals noch Mitarbeiter im Xerox Palo Alto Research Center (PARC), gründete zur weiteren Entwicklung der Grundidee 1998 die Firma Gyricon Media. Diesem Xerox-Spin-off gelang es jedoch nicht, das Gyricon-EP ausreichend preiswert zu produzieren. Deshalb

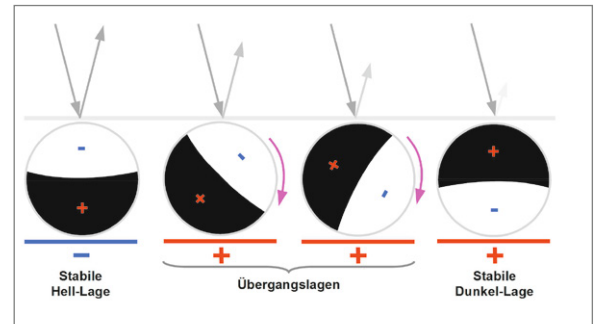


Bild 7: Im Prinzip sind halb schwarze und halb weiße Drehkapseln eine überzeugende Idee, die in der Praxis aber an den Schwierigkeiten bei der Herstellung und den Kosten scheiterte.



Bild 9: Die Leuchtfolie der amerikanischen Firma FLEx LLC wird direkt auf die Vorderseite eines reflektiven Displays gebondet.

löste Xerox die zur Vermarktung gegründete Firma Gyricon LLC Ende 2005 auf und überließ dem Wettbewerber E Ink den Markt.

Farbige E-Paper-Displays. Der Übergang vom S/W zum farbigen E-Paper ist im Prinzip einfach. Dazu muss man nur die TFT-Matrixelektroden abwechselnd mit transparenten Rot-, Grün- und Blaufiltern belegen (Bild 8). Sie agieren dann als RGB-Subpixel, von denen je drei benachbarte zusammengehören und Intensität und Helligkeit der Mischfarbe des Summenpixels erzeugen.

E-Paper-Displays ohne Licht? Weil EPDs das aufgestrahlte Licht lokal mehr oder weniger reflektieren, benötigen sie externes Licht wie ein Fisch das Wasser. Ohne weitere Maßnahmen würde ein EPD im Dunkeln ebenso unsichtbar sein wie alle anderen nicht strahlenden Objekte. Um dem abzuwehren, kann man Displays mit einer leuchtenden Folie beschichten. Das amerikanische Unternehmen FLEx Lighting LLC (<http://flexlighting.com>) hat eine solche entwickelt, die abgeschaltet nahezu unsichtbar ist und im aktiven Zustand mit minimaler Stromaufnahme das EPD homogen beleuchtet (Bild 9). Die Wirkung ist in Bild 10 am Beispiel einer Smartwatch zu sehen: links ohne, rechts mit Leuchtfolie beschichtetes EPD.

Ausführungsformen. E-Paper-Displays müssen nicht starr sein. Anstelle von Glassubstraten können auch flexible Trägermaterialien für die E-Ink-Mikrokapseln eingesetzt werden. Die daraus resultierenden flexiblen Displays haben extrem vielfältige Anwendungsmöglichkeiten (Bild 11 und Bild 12). So lassen sich Lesegeräte mit Displayseiten realisieren, die ein Vor-

und Zurückblättern erlauben und damit dem haptischen Erlebnis eines echten Buchs deutlich näherkommen. Auch platzsparend aufgerollte Displays mit großen Nutzflächen nach dem Ausrollen sind ohne Weiteres möglich. Eine schöne Anwendung könnten Navigationssysteme in Form einer Landkarte sein, die den Standort und die Umgebung und evtl. eine vorgegebene Route zeigen. Nicht zuletzt im Wachstumsmarkt der „Wearables“ wird E-Paper eine wichtige Rolle spielen. Aufgrund ihres extrem niedrigen Energiebedarfs eignen sich E-Paper-Displays ideal für Low-Power-Energy-Harvesting-Applikationen.

Anwendungsbeispiele. Die nachfolgenden Beispiele gehen auf Unterlagen der taiwanesischen Firma E Ink Corporation (www.eink.com) zurück. Das Unternehmen wurde 1997 als Spin-off des MIT Media Labs (MIT: Massachusetts Institute of Technology) gegründet, um elektronische Tinte marktfähig zu machen und wirtschaftlich zu verwerten. Heute ist E Ink der führende Innovationstreiber für elektronische Preisschilder, digitale Werbetafeln und Displaytechnik basierend auf Electronic Paper. Konsequenterweise ist E Ink deshalb der weltweit größte Lieferant von Displays für elektronische Lesegeräte wie z. B. den Kindle von Amazon.

Bild 13 zeigt neun Anwendungsbeispiele aus einer schier unerschöpflichen Vielfalt. Dies gilt insbesondere dann, wenn es gelingt, die Geschwindigkeit der Displays, ihren Kontrast und die Farbtreue weiter zu verbessern. Dann stünde auch einem Einsatz als Display für Laptops, Tablets, Smartphones, Computermonitore usw. nichts mehr im Weg.

Gehen wir die Beispiele kurz durch. Die Bilder zeigen: Bild 1 „Wanduhr mit großen 7-Segment-Ziffern“, Bild 2 „Armbanduhr mit gekrümmtem Display“, Bild 3 „Smart Credit-Card mit integriertem Taschenrechner“, Bild 4 „YotaPhone – Handy mit AMOLED- und EP-Display“, Bild 5 „Kompass in der Kufe eines Snowboards“, Bild 6 „Preisschild mit Barcode“, Bild 7 „Kleines Werbedisplay“, Bild 8 „Große Informations-tafel“, Bild 9 „Display eines mobilen Wi-Fi-Hotspots“.

Eine Innovation, die Mitte 2016 auf den Markt kommen soll, ist das Wove-Band von Polyera (www.polyera.com). Dieses smarte, flexible Armband verwendet für die Elektronik die OTFT-Technologie (Organic TFT) des Unternehmens und zur optischen Ausgabe ein E-Ink-Display (Bild 14). Nach Angaben des Unternehmens hätten seine Produkte eine Flexibilität, die mit anderen Technologien nicht erreichbar sei.



Bild 12: Ein flexibles Display des deutschen Herstellers Plastic Logic (www.plasticlogic.com), beruhend auf organischer Elektronik



Bild 13: Inzwischen gibt es bereits eine Vielzahl von Geräten, in denen EPDs verbaut sind. Die Zukunftsanwendung der „tragbaren“ Elektronik (Wearables) könnte eine boomende Nachfrage nach diesem Displaytyp auslösen (Quelle: E Ink Corp).

Vor- und Nachteile von E-Paper. Beim heutigen Entwicklungsstand bieten EPDs gegenüber herkömmlichen aktiven Displays eine Reihe von Vorteilen:

- Blickwinkelunabhängigkeit
- durch statische Anzeige völlige Flimmerfreiheit
- dünne, leichte und biegsame Bauformen
- in allen Größen und Formen herstellbar
- Energiebedarf nur beim Wechsel des Bildinhalts
- Lesbarkeit auch bei direkter Sonneneinstrahlung
- preisgünstige, ressourcenschonende und umweltfreundliche Produktion

e-Papers Displays
im Web-Shop!



Dagegen gibt es (noch) einige wenige Nachteile:

- stärker reflektierende Oberfläche im Vergleich zu Papier
- geringere Auflösung als hochwertige aktive Displays
- kein Reinweiß und Tiefschwarz (mäßiger Kontrast)
- Trägheit erlaubt keine Bewegtbilder
- bei farbigen Displays eingeschränkter Farbraum

Fazit. Schon heute eignen sich elektronische Displays als Anzeigeelemente für Textverarbeitung, Navigationssysteme, Lesegeräte, Digital Signage, Cockpitinstrumentation und ähnliche Applikationen, bei denen es nicht auf eine hohe Bildwechselfrequenz ankommt. Hier können sie ihren Vorteil des geringen Energieverbrauchs und eines völlig flimmerfreien Bilds ohne Blickwinkelabhängigkeit voll ausspielen. Einen schnellen Fortschritt bei Entwicklung und Produktion von EPD vorausgesetzt, sind viele weitere innovative Anwendungen denkbar. **ELV**



Bild 14: Das Polyera Wove soll ab Mitte 2016 als Armband mit vielfältigen Funktionen seinem Träger das Leben erleichtern (Quelle: Polyera).