

Vloeibaar Kristal Displays

*P. Goldhoorn en Th. Welzen; Procesontwikkeling LCD's
N.V. Philips, Jan Campertstraat 5, 6416 SG Heerlen*

1. Inleiding

Dit jaar is het honderd jaar geleden dat de vloeibaar kristallijne fase voor het eerst werd waargenomen. In 1888 werd door de Oostenrijkse botanicus Friedrich Reinitzer optische anisotropie waargenomen met een polarisatie microscoop aan gesmolten cholesteryl benzoaat. Het verschijnsel trad op in een bepaald temperatuur traject en werd toegeschreven aan het bestaan van een vloeibaar kristallijne fase. Met deze term wordt aangeduid dat we te maken hebben met een fase die op de temperatuur schaal ligt tussen de kristallijne vaste fase en de isotrope vloeistof fase. Deze eigenschappen van de vloeibaar kristallijne fase vormen een soort van mengeling van de vaste vloeistof fase enerzijds vertoont een vloeibaar kristal een stromingsgedrag vergelijkbaar met dat van een vloeistof, anderzijds bezit de vloeibaar kristallijne fase ook eigenschappen die kenmerkend zijn voor de vaste kristallijne fase, zoals dubbele breking van licht.

Hoewel een groot aantal organische verbindingen een dergelijke fase laten zien, bestond er tot in de zestiger jaren relatief weinig belangstelling voor vloeibare kristallen. De grote doorbraak kwam met de ontdekking door Schadt en Helfrich³ in 1971 van het gedraaid nematisch effect, ook wel de Twistor of het TN (Twisted Nematic) effect genoemd. Met het TN-effect was het mogelijk geworden om op relatief eenvoudige wijze een spanningsgestuurde lichtsluiter te maken met een extreem laag vermogen in de orde van enkele microwatts per vierkante centimeter. De werking van deze lichtsluiter zal worden beschreven in sectie 4. De eerste toepassing van het TN-

effect was in eenvoudige cijferdisplays voor bijvoorbeeld horloges en rekenmachines. De behoefte aan weergeefinrichtingen met grotere beeldinhoud (geschikt als computermonitor of zelfs als televisie) leidde tot de introductie van de zgn. dot-matrix displays. Het gebruik van optische effecten, zoals het TN-effect, in vloeibaar kristal displays (LCD = Liquid Crystal Display) zoals het dot-matrix display is aan strenge eisen gebonden. De mogelijkheden en beperkingen van een dot-matrix display zullen worden toegelicht in sectie 5. Het zal blijken dat de realiseerbare informatiedichtheid in dot-matrix displays met gebruik van het TN-effect vrij beperkt zal blijven. De zgn. Super Twisted Nematische (STN)⁴⁻⁶ effecten, die recentelijk ontdekt zijn, blijken in dit opzicht veel van deze beperkingen te kunnen wegnemen.

Een andere aanpak om beeldschermen met een groot aantal beeldelementen te verkrijgen, met nog steeds de Twistor als lichtmodulerend medium, is gebaseerd op het gebruik van actieve, elektronische miniatuur schakelaars die bij ieder afzonderlijk beeldelement geplaatst worden²; zulke schakelaars kunnen bijv. 'Dunne Film Transistoren' zijn.

Momenteel worden dergelijke actieve dot-matrix LCD's hoofdzakelijk gebruikt voor kleine televisie ontvangers. In dit artikel zal niet verder ingegaan worden op de techniek van actieve matrix LCD's.

Het valt niet te verwachten dat de komende jaren de ontwikkeling op het gebied van hoog-informatieve LCD's (zowel gebaseerd op het STN-effect, als gebruikmakend van actieve miniatuur schakelaars)

stormachtig zullen verlopen. De groeiende behoefte aan informatiesystemen schept een enorme markt voor displays met een grote verscheidenheid aan afmetingen en informatie-inhoud. De LCD's kunnen door hun grote flexibiliteit en compactheid een toonaangevende rol gaan spelen op deze markt.

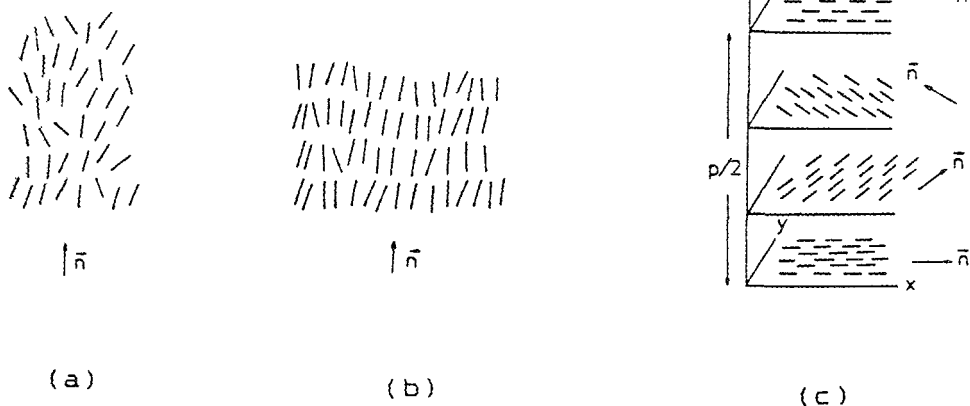
2. De vloeibaar kristallijne fase

De vloeibaar kristallijne fase treedt op bij verbindingen waarvan de moleculen een zekere vorm-anisotropie^{7,8} bezitten. Veelal zijn deze moleculen staafvormig en hebben ze een voorkeur om met hun lange as parallel aan elkaar te gaan liggen. Macroscopisch gezien wordt aldus een voorkeursrichting gedefinieerd. Diverse symmetriën kunnen als gevolg hiervan optreden. In figuur 1 zijn de drie meest voorkomende vloeibaar kristallijne fasen schematisch weergegeven: de nematische fase, de smectische fase en de cholesterische of

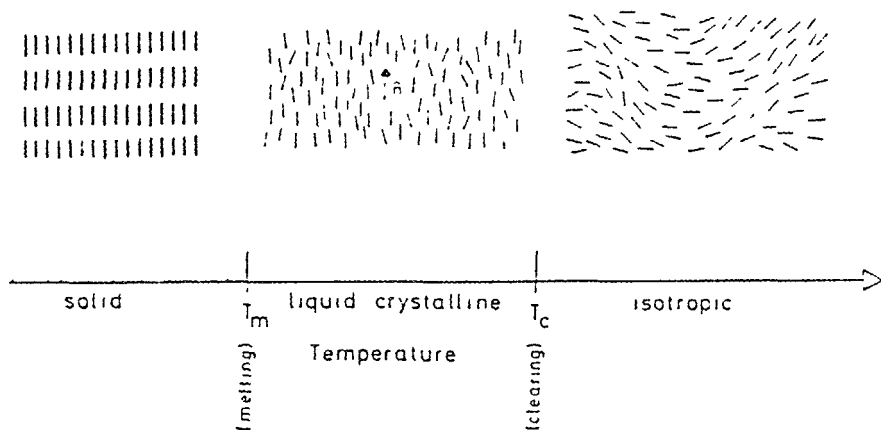
chirale fase. In de nematische fase is slechts sprake van een axiaalsymmetrische gemiddelde voorkeursrichting. De mate van ordening wordt weergegeven met de orde-parameter S die gedefinieerd is als^{7,8}

$$S = \frac{1}{2} \langle 3 \cdot \cos^2\theta - 1 \rangle$$

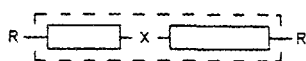
waarbij θ de hoek voorstelt tussen de voorkeursrichting en de lange moleculaire as. De voorkeursrichting wordt aangeduid met de director n , die mathematisch gezien een axiale eenheidsvector is. Wanneer er sprake is van een willekeurige verdeling van de lange moleculaire assen zoals in de isotrope vloeistof fase, dan is het gemiddelde $\langle \cos^2\theta \rangle = \frac{1}{3}$, hetgeen resulteert in $S = 0$. De waarde $S = 1$ correspondeert met de toestand waarbij de moleculen perfect gericht zijn. In de praktijk varieert S tussen waarden van 0.3-0.4 bij temperaturen vlakbij het zogenaamde helderheidspunt T_c tot



Figuur 1
De meest voorkomende vloeibaar kristallijne fasen. (a) nematische, (b) smectische en (c) cholesterische fase.

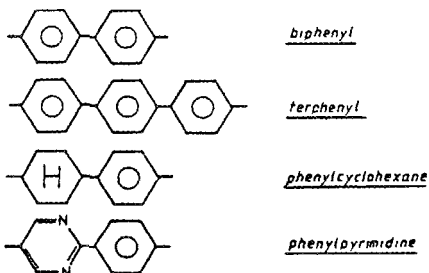


Figuur 2
De faseovergangen van de kristallijne fase naar de vloeistof fase



R R' = alkyl, alkoxy cyano

X = -CH=N- schiffs base
 -C(O)-O- ester
 -NO₂-N- azoxy
 -N=N- azo



Figuur 3
De samenstelling van een vloeibaar kristal molecuul met enkele voorbeelden

ongeveer 0.7 bij veel lagere temperaturen. Dit betekent dat afwijkingen van een perfecte ordening aanzienlijk zijn. In figuur 2 wordt schematisch weergegeven welke fase-overgangen voor een nematisch vloeibaar kristal optreden. De vaste kristallijne fase gaat bij de smelttemperatuur T_m over in de nematische fase. Naarmate de temperatuur hoger wordt zal de mate van ordening in deze fase kleiner worden. Bij het helderheidspunt T_c verdwijnt de vloeibaar kristallijne fase volledig en gaat over in de isotrope vloeistof fase.

In tegenstelling tot de nematische fase bezit de smectische fase een één-dimensionale afstands orde die aanleiding geeft tot de typische laag-structuur zoals weergegeven in figuur 1. Een groot aantal smectische fasen treden in de praktijk op, afhankelijk van de orderingsgraad in de afzonderlijke lagen en van de mate waarin deze laagordes onderling gecorreleerd zijn. Daarnaast is er een verschil in deze

smectische fasen tussen de oriëntatie van de director t.o.v. de normaal van deze lagen-structuur. Dit laatste geeft aanleiding tot al dan niet zgn 'getilde' smectische fasen.

De cholesterische, ofwel chiraal nematische fase bezit niet alleen de lange-drachts oriëntatieordening van de nematische fase, maar ook een ruimtelijke variatie van de director die leidt tot een helix structuur

Wanneer een aantal doorsnijdingen loodrecht op de helixas beschouwd worden, dan vinden we in elk vlak de orientatieorde van de nematische fase. De lokale director ondergaat een zekere rotatie in opeenvolgende vlakken. De afstand waarover een volledige rotatie heeft plaatsgevonden, wordt de 'pitch' genoemd. In de praktijk is de pitch in de orde grootte van de golflengte van het zichtbare licht en dus veel groter dan de moleculaire dimensies. Dit betekent dat voor opeenvolgende moleculen het verschil in voorkeursrichting buitengewoon klein is. Zowel links- als rechtsdraaiende cholesterische configuraties komen voor.

Voor de huidige LCD's zijn vooral de nematische fase en de cholesterische fase van belang. Figuur 3 toont, heel algemeen, de samenstelling van een staafvormig vloeibaar kristal molecuul. Het min of meer starre gedeelte is opgebouwd uit aromatische of niet-aromatische ringsystemen. De substituenten R en R' kunnen eenvoudige alifatische koolwaterstof verbindingen zijn; ook worden wel speciale substituties gebruikt, bijvoorbeeld wanneer een sterke moleculaire dipool langs de lange moleculaire as gewenst is, vindt vaak substitutie van de cyanide groep plaats⁹. De koppeling X tussen de ringsystemen kan rechtstreeks zijn of via additionele moleculaire groepen zoals carboxyl (esterverbindingen). De keuze van de al dan niet verzadigde ringsystemen, alsmede van de groepen R, R' en X wordt bepaald door de eisen die

gesteld worden aan de eigenschappen van de vloeibaar kristallijne fase voor praktische toepassingen in LCD's^{1,10}. Veelal zijn deze eisen zo complex (en soms ook conflicterend t.a.v. de moleculaire structuur) dat in de praktijk niet meer volstaan kan worden met het gebruik van een één-component vloeibaar kristal (LC); de vloeibaar kristallijne materialen die in de huidige LCD's gebruikt worden zijn steeds mengsels van een groot aantal (>10) componenten^{1,10}

3. Eigenschappen van de nematische fase

Relevante eigenschappen van de nematische fase voor toepassingen in een LCD zijn de anisotropie in de elektrische en optische eigenschappen. Met name de dielectrische anisotropie $\Delta\epsilon$ is belangrijk⁸. Deze is gedefinieerd als het verschil tussen de dielectrische constante parallel aan en loodrecht op de nematische director: $\Delta\epsilon = \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}$. Er bestaan LC mengsels met positieve waarden voor $\Delta\epsilon$, dan wel negatieve. Het TN-effect (en ook het STN-effect) maakt gebruik van LC's met positieve $\Delta\epsilon$. Dit betekent dat bij het aanleggen van een elektrisch veld de moleculen zich evenwijdig aan dit veld zullen gaan richten. Behalve deze dielectrische anisotropie is er ook een anisotropie in de brekingsindex⁸. In de nematische fase valt de optische as samen met de director. De snelheid van het licht dat zich voortplant langs de lange as van het molecuul is langzamer dan de voortplantingssnelheid langs de korte as. Dit leidt tot een optische anisotropie Δn , welke gelijk is aan

$$\Delta n = n_{//} - n_{\perp} > 0,$$

waarbij $n_{//}$ en n_{\perp} de brekingsindices voorstellen, respectievelijk evenwijdig aan en loodrecht op de directorrichting.

Naast deze optische en dielectrische anisotropie vertonen vloeibare kristallen anisotroop vloeigedrag, dat gekarakteriseerd kan worden met een vijftal viscositeitscoëfficiënten⁸. Deze grootheden zijn medebepalend voor het dynamisch gedrag van de optische effecten. De director kan macroscopisch gedeformeerd worden middels externe elektrische velden, maar ook via krachten die hun oorsprong vinden in het contact tussen het LC-materiaal en de omhullende wanden van de ruimte waar het LC zich in bevindt. Zo blijken de LC-moleculen op uniform geweven substraten zich te oriënteren in de wrijfinrichting; dit gebeurt met name aan polymeer

oppervlaktes¹. Dit gegeven kan gebruikt worden om speciale structuren te induceren in nematische vloeibare kristallen; bijvoorbeeld kan een getwiste configuratie verkregen worden door verschillende wrijfrichtingen toe te passen op het onderen bovsubstraat waartussen het LC zich bevindt. Aldus ontstaat een directorprofiel. Dit profiel kan bepaald worden m.b.v. een mechanische continuümtheorie⁹, ook wel de elasticiteitstheorie van LC's genoemd. De elastische (deformatie) vrije energie F_d van de nematische director wordt hierbij gegeven door:

$$F_d = \frac{1}{2} k_1 (\nabla \cdot \vec{n})^2 + \frac{1}{2} k_2 (\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n})^2 + \frac{1}{2} k_3 (\vec{n} \times \nabla \times \vec{n})^2$$

De constanten k_i zijn gerelateerd aan de drie mogelijke deformaties die een LC kan ondergaan.

k_1 de 'splay' elastische constante
 k_2 de 'twist' elastische constante, en
 k_3 de 'bend' elastische constante (zie figuur 4)

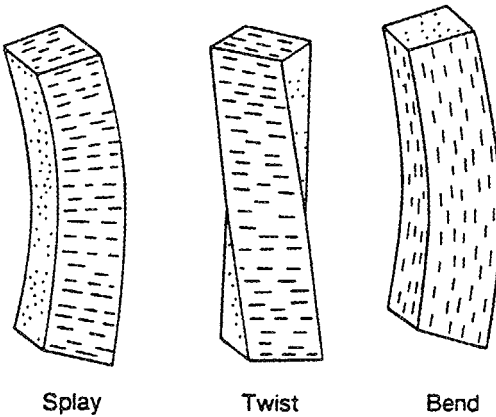
Bij toepassing van een elektrisch veld wordt de totale vrije energie beschreven als som van de bovenstaande elastische energie en een elektrische energie bijdrage F_{el} die gegeven wordt door:

$$F_{el} = -\frac{1}{2} \epsilon_{\perp} E^2 - \frac{1}{2} (\epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}) (\vec{n} \cdot \vec{E})^2$$

Minimalisatie van de totale vrij energie-inhoud

$$F_{tot} = \int_V (F_{el} + F_d)$$

van het systeem resulteert in een veldafhankelijk directorprofiel. Het blijkt dat het induceren van deformaties via een elektrisch veld plaatsvindt vanaf een zekere drempelwaarde⁹ die voldoende groot moet zijn om de elastische krachten te overwinnen die, in dit geval, de helixstructuur sta-



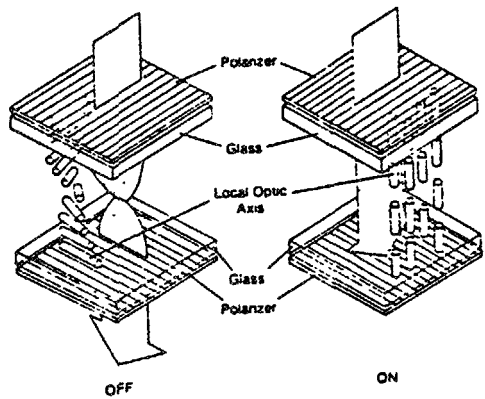
Figuur 4
 De mogelijke deformaties van een vloeibaar kristal waaraan de elasticiteitsconstanten zijn gerelateerd.

biliseren. De elasticiteitsconstantes bepalen samen met de dielectrische en optische anisotropie, én met de visceuze eigenschappen de bruikbaarheid van een LCD

4. Het gedraaid nematisch effect

Het werkingsprincipe van het TN-effect wordt weergegeven in figuur 5. De situatie geschetst in het linker deel van deze figuur beschrijft de toestand waarbij géén elektrische spanning over de LC laag is aangebracht. Het LC bevindt zich tussen twee glasplaten (dikte ~ 1 mm) die voorzien zijn van transparante electrodes¹; een vaak gebruikt electrode materiaal is Indium-Tin-Oxide (ITO). De ITO lagen hebben een dikte van enkele honderden Å tot 1000 Å. Tussen het LC en de ITO bevindt zich een polymere laag (dikte $\leq 0.1 \mu\text{m}$). Deze laag duidt men ook wel aan met oriënterende laag: een wrijfprocédé is toegepast op deze lagen, en wel zodanig dat de respectievelijke wrijfrichtingen onderling een hoek van 90° maken. Het resultaat is dat er een 90° getwist nematische configuratie ontstaat zoals schetsmatig in deze figuur is weergegeven. In principe zou het mogelijk zijn dat in plaats van de getekende linksdraaiende 90° twist een rechtsdraaiing over 270° ontstaat. Dit laatste wordt voorkomen door een geringe hoeveelheid cholesterische LC toe te voegen ($\sim 0.1\%$) dat de juiste draairichting bezit. De dikte d van de LC laag ligt in de orde van $5\text{-}10 \mu\text{m}$. Om over het gehele display oppervlak de glasplaten op gelijke afstand te houden worden veelal afstandhouders in de vorm van plastic bolletjes of glazen fibertjes toegevoegd. Beide glasplaten zijn voorzien van een polarisatiefolie waarvan de polarisatie-richtingen samenvallen met de aanliggende directors aan de wand.

Wanneer nu het produkt van d en Δn voldoende groot gekozen wordt^{3,11}, dan zal het invallend lineair gepolariseerd licht niet gedepolariseerd worden bij doorgang door de LC laag; het polarisatievlak ondergaat



Figuur 5
Het werkingsprincipe van een gedraaid nematisch display

een rotatie gelijk aan die van de getwiste structuur. Het resultaat is dat de getekende toestand met gekruiste polarisatoren het licht doorlaat. De eigenschap van deze structuur om lineair gepolariseerd licht te roteren wordt vaak aangeduid met 'waveguiding'.

De situatie in het rechtergedeelte van figuur 5 beschrijft wat er gebeurt bij het aanleggen van een voldoende groot elektrisch veld c.q. elektrische spanning. Boven een zekere drempelspanning (grootte-orde: enkele volts) zullen de moleculen ($\Delta\epsilon > 0$) langs het E-veld gaan liggen, de helixstructuur zal naarmate de aangelegde spanning hoger wordt steeds meer ontwonden worden. Afgezien van een relatief klein gebied vlakbij de wand, waar de director min of meer gefixeerd blijft evenwijdig aan het substraat oppervlak, wordt uiteindelijk een optisch uniaxiale nematische laag gevormd die de polarisatie richting van het invallende licht niet meer roteert. Het resultaat is dat de tweede polarisator nu de lichtdoorgang blokkeert: de aangestuurde toestand is donker.

De configuratie met gekruiste polarisatoren resulteert in een positief contrast effect, waarmee bedoeld wordt dat donkere informatie ingeschreven wordt op een heldere achtergrond. Wanneer gekozen wordt voor een evenwijdige positionering van de polarisatierichtingen van de twee polarisatoren, dan zal de spanningsloze toestand donker zijn. De 'aan'-toestand is in dit geval helder; per definitie wordt deze configuratie de negatief contrast mode genoemd. In figuur 5 is een LCD weergegeven dat als transmissief display gebruikt wordt. Daarnaast kunnen LCD's ook reflectief gebruikt worden wanneer achter de tweede polarisator een diffuse reflector geplaatst wordt. LCD's zijn passieve, licht modulerende displays, in tegenstelling tot bijvoorbeeld de actieve, lichtgenererende displays zoals de kathodestraalbuis (CRT), of de licht-emitterende diodes (LED's). Om deze reden zal de afleesbaarheid van LCD's toenemen bij toenemende omgevingshelderheid, dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld de CRT. Omdat het optisch beeld van een LCD gegenereerd wordt via director orientaties onder invloed van lage spanningen zal het energieverbruik van deze beeldschermen aanzienlijk geringer zijn dan van welk actief display dan ook. LCD's kunnen ook als quasi-actieve displays gebruikt worden door ze in transmissie te gebruiken in combinatie met een belichtingsunit (backlight). Uiteraard wordt met een dergelijke uitvoering het opgenomen vermogen van het totaal systeem aanzienlijk vergroot. Omdat bij LCD's het gebruik van polarisatoren noodzakelijk is, zal de transmissie op zijn hoogst 50% zijn. De eigenschap van TN-LCD's om zwart/wit beelden te genereren biedt tevens de mogelijkheid om kleurbeelden weer te geven wanneer kleurfilters gecombineerd worden met TN-LCD's: een beeldscherm wordt dan opgebouwd uit afzonderlijk aanstuurbare elementen, en wel zodanig dat 3 naast elkaar liggende beeld-elementen ieder voorzien zijn van een kleurfilter met één van de drie basiskleuren. Bij

een correcte dimensionering van deze beeldelementen kunnen dan mengkleuren gevormd worden via passende aansturing van de afzonderlijke beeld-elementen

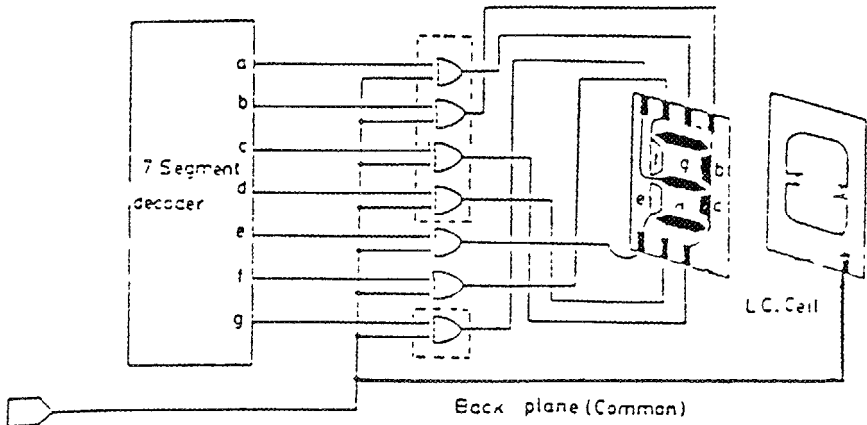
Een nadeel van LCD's vormt de kijkhoekafhankelijkheid van het contrast. Deze kijkhoekafhankelijkheid wordt veroorzaakt door het verschil in retardatie welke een lichtstraal ondervindt bij loodrechte doorgang, danwel schuine doorgang door de LC-laag. Onder bepaalde omstandigheden kan deze kijkhoekafhankelijkheid zó zijn dat bij bepaalde hoeken de informatie geïnverteerd wordt waargenomen. De huidige LCD's bezitten een ruim kijkhoekgebied waar voldoende hoge contrasten gerealiseerd kunnen worden.

Niettemin, deze afhankelijkheid zal voor LCD's altijd blijven bestaan; actieve displays vertonen een dergelijke eigenschap niet of in veel mindere mate. Een groot voordeel van LCD's ten opzichte van bijvoorbeeld CRT's is de relatieve eenvoud van constructie en de dimensionering ('plat' versus 'diep'). Bovendien kan met LCD' een breed scala van display afmetingen bestreken worden. Het lage energieverbruik is reeds genoemd; een en ander maakt LCD's meer geschikt voor 'portable' toepassingen dan CRT's

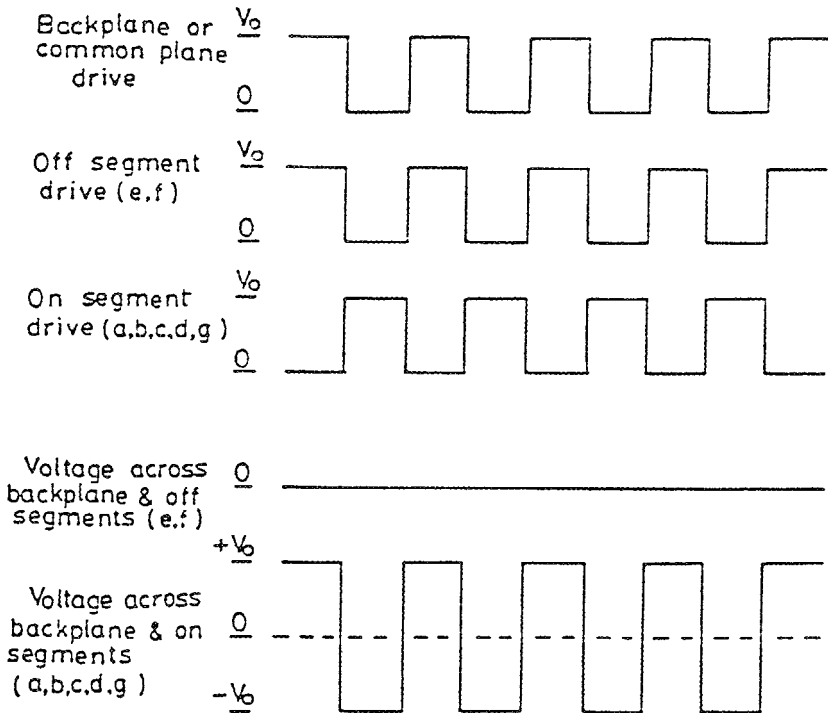
5. Aansturing van LCD's

Beeldweergave met LCD's kan plaatsvinden door één van de electrodes te structureren op zodanige wijze dat afzonderlijk aanstuurbare beeldelementen ontstaan (de tweede electrode is dan gemeenschappelijk voor alle elementen). Ieder element heeft zijn eigen interconnectie naar een spanningsbron. Deze techniek wordt gebruikt o.a. bij de relatief eenvoudige 7-segment cijferdisplays. Dit is schetsmatig weergegeven in figuur 6^a. Bijvoorbeeld, wanneer het cijfer 3 getoond moet worden, zullen de segmenten a, b, c, d en g in de

(a)



(b)



Figuur 6

De aansturing van een eenvoudig 7-segment display: (a) schetsmatige weergave van de aanstuurlijnen, en (b) de spanningen op de verschillende electrodes

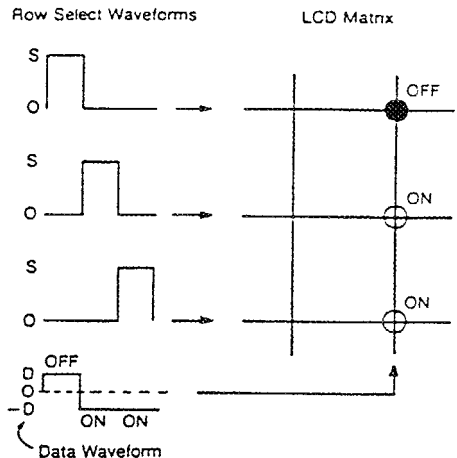
'aan'-toestand moeten zijn, en de andere in de 'uit'-toestand. De gemakkelijkste manier om dit te bewerkstelligen is om zowel de 'backplane' electrode als de segment electrodes e en f op spanning 0 Volt te zetten en de andere elementen te voorzien van een voldoende hoge spanning. Om het optreden van electro-chemische degradatie te voorkomen onder gelijkspanningsbelasting, worden in de praktijk de wisselspanningsvormen gebruikt die getekend zijn in figuur 6^b. De spanningen op de gemeenschappelijke electrode en de 'uit'-segment electrode zijn in fase terwijl de wisselspanningen voor de 'aan'-segmenten 180° uit fase is. Het eindresultaat is dat het potentiaalverschil over de beeldelementen die 'uit' moeten zijn precies gelijk is aan nul en de spanning die de 'aan'-elementen voelen gelijk is aan $\pm V_0$ zonder een DC-component. Het LC-optisch effect is niet afhankelijk van de polariteit van V_0 (het elektrisch veld werkt op het LC via $\Delta\epsilon$), en dus wordt de 'aan'-toestand feitelijk gerealiseerd door $|V_0|$. In principe kan dan, afhankelijk van de actuele waarde van de amplitude V_0 het contrast ingesteld worden.

Om dit eenvoudige display aan te sturen zijn 8 verbindinglijnen nodig. Problemen ontstaan wanneer een groter aantal van zulke 7-segment cijfers in één display getoond moeten worden. Bijvoorbeeld, voor een N cijfer display zijn $7 \times N$ verbindingen naar de afzonderlijke segmenten nodig. Bovendien, wanneer de beeldinhoud ook in de verticale richting uitgebreid zou worden, dan wordt het zelfs vrijwel onmogelijk een zodanige lay-out te construeren dat ieder individueel element nog steeds zijn eigen interconnectie heeft. Om deze interconnectie problematiek te reduceren voor LCD's met een groot aantal beeldelementen, zijn de zogenaamde dot-matrix displays geïntroduceerd. Bij deze displays zijn op beide substraten lijnvormige electrode patronen aangebracht. De samenstelling van het display geschiedt dan zodanig dat

de geleiders op de bovenplaat de geleiders op de onderplaat loodrecht kruisen

De vierkante of rechthoekige oppervlaktes waar de electrode strips overlappen definiëren de individuele pixels. Op deze wijze wordt een matrix array van $N \times M$ pixels gerealiseerd met $N + M$ interconnecties. Een dergelijke matrix is evenwel niet meer aanstuurbaar met de methode die gebruikt wordt voor de eenvoudige segment displays, omdat een groot aantal pixels een gemeenschappelijke electrode hebben

Aanstuurmethodes die wél geschikt zijn voor dot-matrix displays maken gebruik van zogenaamde tijdmultiplex technieken^{12,13}. Het principe van deze multiplex aansturing kan met behulp van figuur 7 begrepen worden. In deze figuur wordt een 3 lijnen matrix met een willekeurig aantal verticale kolommen weergegeven. De lij-



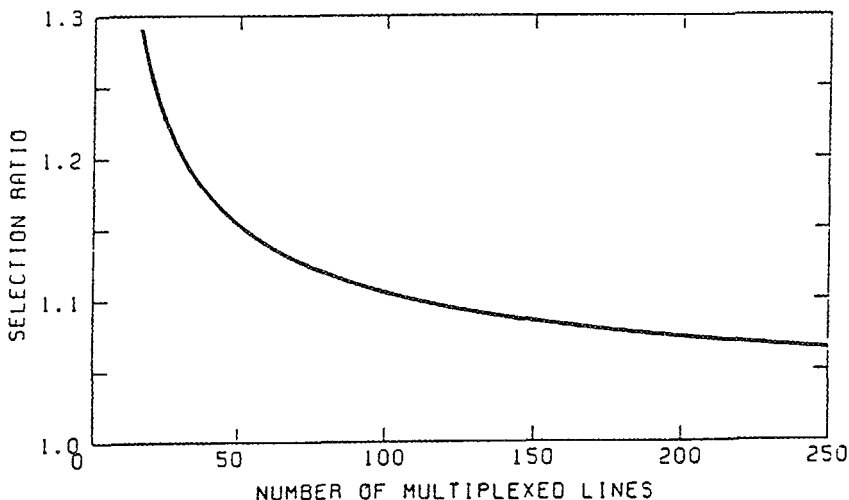
Figuur 7
Principe van een multiplexaansturing voor een 3-lijnen matrix

nen worden sequentieel gescand; gedurende een zeker tijdsinterval t_f (ook wel lijntijd genoemd) wordt een bepaalde lijn geselecteerd m.b.v. de lijnselectie spanning S . Tijdens deze lijntijd staan alle andere lijnen op spanning 0 Volt. Synchroon met deze lijnscan wordt de af te beelden informatie via de kolom- of data-electrodes toegevoerd middels de dataspanning $\pm D$, d.w.z. wanneer een element op de betreffende lijn in de 'aan'-toestand gebracht moet worden, wordt via de kolomelectrode de spanning $-D$ toegevoerd. Het spanningsverschil over het betreffende element is dan gelijk aan $S+D$. Voor een 'uit'-element wordt daarentegen $+D$ gekozen: dit element ziet dan gedurende een lijntijd de spanning $S-D$. Wanneer aldus de laatste rij geselecteerd is geweest, begint de scan-

procedure opnieuw. De duur van een enkele lijnscan procedure wordt de frametijd t_f genoemd. Voor een N -lijnen matrix zijn lijnen- en frame-tijd gecorreleerd via:

$$t_f = N \times t_l$$

Essentieel bij deze multiplex aansturing is dat de elektronische discriminatie tussen 'aan' en 'uit' slechts plaatsvindt binnen de lijntijd (spanningsniveaus $S+D$ versus $S-D$), omdat gedurende de rest van de frametijd over beide elementen de spanning $|D|$ staat. Het zal duidelijk zijn dat D niet groter mag zijn dan de drempelspanning van het optisch effect. Ter voorkoming van DC-componenten dienen na iedere fra-



Figuur 8
Het verband tussen de selectieverhouding en het maximum aantal te multiplexen lijnen

me zowel de select- als de data-spanning geïnverteerd te worden.

In de praktijk worden frame frequenties van 50-100 Hz gebruikt. Onder deze omstandigheden zal het LC, gelet op zijn relatief trage dynamica^{12,13}, geen momentane optische respons vertonen op de snel variërende spanningen. Met andere woorden, er zal RMS-gedrag optreden, waarmee bedoeld wordt dat uiteindelijk die optische toestand zich zal instellen welke correspondeert met de RMS spanningswaarde die de 'aan'- en 'uit'-elementen voelen. Deze RMS-spanningswaarden V_{aan} en V_{uit} kunnen voor een N-lijnen matrix geschreven worden als

$$V_{aan} = \left[\frac{(S+D)^2}{N} + \frac{(N-1)}{N} \cdot D^2 \right]^{1/2}$$

$$V_{uit} = \left[\frac{(S-D)^2}{N} + \frac{(N-1)}{N} \cdot D^2 \right]^{1/2}$$

Deze vergelijkingen laten zien dat naarmate N groter wordt de selectie verhouding V_{aan}/V_{uit} de waarde 1.0 steeds meer benadert en daarmee het te realiseren spanningsverschil tussen de 'aan'- en 'uit'-elementen steeds kleiner wordt. Ten aanzien van het LC-optisch effect betekent dit kleiner worden van het spanningsverschil dat steeds kleinere spannings sprongen toegestaan zijn waarbinnen de 'aan'- en 'uit'-transmissies bereikt worden. Het LC-optisch effect dient daarom een steile transmissie-versus-spanning karakteristiek te hebben. Is deze karakteristiek niet voldoende steil, dan zal het contrast verlies optreden. Het is mogelijk een relatie¹² af te leiden die het verband geeft tussen deze steilheid en het aantal lijnen dat maximaal gemultiplext kan worden zonder verlies aan contrast. Deze relatie luidt als volgt

$$N_{max} = \left[\frac{V_{aan}^2/V_{uit}^2 + 1}{V_{aan}^2/V_{uit}^2 - 1} \right]^2$$

Bovenstaande uitdrukking is slechts geldig wanneer S en D gekozen worden als:

$$S/D = \sqrt{N_{max}}, \text{ en}$$

$$D = V_{drempel} \cdot (1/2 N_{max} / (N_{max} - \sqrt{N_{max}}))^{1/2},$$

waarbij $V_{drempel}$ de drempelspanning van het LC-effect voorstelt waarboven optische veranderingen plaatsvinden. In figuur 8 wordt het verband tussen de selectie verhouding (c.q. steilheid van de transmissie-versus-spanningskarakteristiek) en het maximum aantal te multiplexen lijnen grafisch weergegeven. Wanneer 100 lijnen gemultiplext worden is de V_{aan}/V_{uit} verhouding bij gebruik van S en D volgens bovenstaande vergelijkingen gelijk aan ~ 1.1 . Dit betekent dat een 'aan'-element slechts zo'n 10% hogere RMS-spanning voelt dan een 'uit'-element. Dit is wezenlijk verschillend met de aansturing van het 7-segment display met 0 Volt voor de 'uit'-elementen en een voldoende hoge spanning voor de 'aan'-elementen.

Een aantal andere consequenties van hoog gemultiplexte dot-matrices kunnen nog genoemd worden. Op de eerste plaats betreft dit de hoogte van de aanstuurspanningen. Naarmate N_{max} groter wordt zal de benodigde dataspanning de waarde $0.7 \times V_{drempel}$ benaderen. De selectiespanning S wordt dan $\sim 0.7 \times V_{drempel} \times \sqrt{N_{max}}$. Typische $V_{drempel}$ waarden liggen rond 2 Volt; voor $N_{max} = 400$ leidt dit tot $S \sim 28$ Volt. Dus hoog gemultiplexte dot-matrices vereisen speciale aanstuur IC's. Wanneer veel lijnen gemultiplext worden, dienen strenge eisen gesteld te worden

aan de uniformiteit van de transmissie karakteristiek over het display oppervlak. In de beschouwing t.a.v. realiseerbare N_{\max} -waarden is verondersteld dat alle beeld-elementen dezelfde karakteristiek hebben. In de praktijk is dit niet zo, en zullen afwijkingen van een gemiddelde optreden (bijvoorbeeld, als gevolg van dikte variaties in de LC-laag, of als gevolg van spanningsverliezen veroorzaakt door de niet perfecte geleiding van het electrode materiaal). Deze afwijkingen zullen leiden tot een reductie van N_{\max} .

Stel, er is sprake van een maximum variatie van 2% in V^2_{drempel} over het display oppervlak. Wanneer het display moet worden gemultiplext met $N_{\max} = 200$ zal de karakteristiek ten gevolge van de variatie in de drempelspanning een steilheid moeten bezitten voor $N_{\max} = 388$ om nog over het totale oppervlak hetzelfde contrast te hebben.

Een derde aspect van hoog gemultiplexte systemen dat aandacht verdient betreft de schakeltijd, in het bijzonder de aanschakeltijd t_{aan} . Bij benadering geldt de volgende vereenvoudigde relatie^{8,13} tussen t_{aan} en de aangelegde spanning V :

$$t_{\text{aan}} \sim (V^2 - V^2_{\text{drempel}})^{-1}.$$

Omdat onder multiplex condities S en D zodanig gekozen kunnen worden dat $V_{\text{uit}} = V_{\text{drempel}}$ en $V_{\text{aan}} = V$, kan deze uitdrukking herleidt worden tot:

$$t_{\text{aan}} \sim \left| \frac{V^2_{\text{aan}} - 1}{V^2_{\text{uit}}} \right|^{-1}.$$

Met andere woorden, langere schakeltijden treden op bij hoog gemultiplexte dotmatrices. Fysisch kan dit begrepen worden omdat de effectief drijvende kracht (= verschil tussen 'aan'- en 'uit'-spanning) kleiner wordt.

Een vierde aspect van RMS-matrixaansturing betreft het vermogen om grijsniveaus

te maken. Grijsschalen (optische toestanden met transmissie waarden tussen volledig 'aan' en 'uit') kunnen bij multiplex aansturing gemaakt worden via fase-modulatie technieken. Met deze techniek wordt tijdens de lijntijd de polariteit van de dataspansing veranderd gedurende een fractie x van t_1 staat de spanning $S+D$ over het betreffende element en gedurende $(1-x) \cdot t_1$ de spanning $S-D$. Uiteindelijk zal, afhankelijk van het tijdstip x , een RMS-spanning ontstaan tussen V_{aan} en V_{uit} . Echter, naarmate N_{\max} groter wordt, zal het verschil tussen V_{aan} en V_{uit} kleiner worden, en daarmee ook het aantal te realiseren grijswaarden.

Uit het voorgaande is duidelijk geworden dat displays met een groot aantal pixels alleen gerealiseerd kunnen worden met een optisch effect waarvan de karakteristiek een grote steilheid bezit. De steilheid van de karakteristiek wordt bepaald door o.a. de elasticiteitsconstanten en de dielectrische constante van het vloeibaar kristal. Het TN-effect met de huidige LC-mengels is niet geschikt om te worden gebruikt in hoog gemultiplexte systemen. Beter daartoe geschikt is het STN-effect. In dit effect wordt de draaihoek van de director groter dan 90° genomen en bij voorkeur minstens 180° . De beschikbare LC-mengels geven bij een dergelijke draaihoek een steilheid die een effectieve $N_{\max} = 200$ haalbaar maakt. De eigenschappen waaraan dit LC-mengsel moet voldoen zijn niet meer eenvoudig in te zien, maar volgen uit een tamelijk complexe berekening van het director patroon in de LC-laag, gevolgd door een berekening van het resulterende optische effect.

Een belangrijk bijkomend voordeel van het STN-effect is dat de kijkhoekafhankelijkheid minder sterk is aangezien het systeem meer rotatiesymmetrisch is. Daarom wordt er gestreefd naar een zo groot mogelijke draaihoek. Momenteel kan met dezelfde

de technologie als voor een TN-LCD een draaihoek van ongeveer 200° worden bereikt. Voor grotere draaihoeken treden zgn. dislocaties op, d.w.z. gebieden op het display waar de draaiing verstoort is.

Dit kan worden voorkomen door de hoek welke de director maakt met het substraat oppervlak te verhogen, hetgeen echter een volledig andere behandeling van het substraat vereist

Met het TN-effect kan door de eigenschap van waveguiding op eenvoudige wijze een zwart/wit schakelend display worden gemaakt. Bij het STN-effect echter is er geen

sprake meer van waveguiding, maar begint de dubbele breking de overhand te krijgen. Dat betekent dat in het algemeen het STN-effect een gekleurd display oplevert en bij een gekozen draaihoek slechts bij een bepaalde waarde van het product $d \Delta n$ een zwart/wit systeem oplevert. Ondanks deze beperking is het STN-effect dankzij zijn grote steilheid bij uitstek geschikt om te worden gebruikt voor hoog gemultiplexte systemen, zoals ook blijkt uit de dot-matrix STN-LCD's die momenteel verkrijgbaar zijn.

Referenties:

1. P. van Loan, "LCD's: Materials and Fabrication Processes", SID Seminar Lecture Notes S-7.1, june 1984 (Overzicht technologie LCD's)
2. P. Migliorato, "Progress in active matrix addressing of LCD's", Proceedings Eurodisplay Conference SID, september 1987, p 44-55
3. M. Schadt, W. Helfrich, Appl Phys. Lett. **18** (1971) 127
4. Y. Kando, T. Nakagomi, S. Hasegawa, German Patent DE 3503259 AL (1985)
5. T. Scheffer, J. Nehring, Appl. Phys. Lett. **45** (1984) 1021
6. M. Schadt, F. Leenhouts, Appl Phys. Lett. **50** (1987) 236
7. W. Maier, A. Saupe, Z. Naturforsch. A14 (1959) 882
8. P. de Gennes, "The Physics of Liquid Crystals", Clarendon Press, Oxford (1974)
9. A. Boller, H. Scherrer, German Patent DE 2306739 (1972)
10. Bijvoorbeeld:
M. Schadt e a , Mol Cryst. Liq Cryst **122** (1985) 241 en IEEE Trans Electron Devices **33** (1986) 1187
B. Scheuble e.a., Mol. Cryst Liq. Cryst. **68** (1981) 57
B. Scheuble, "Present Status and Future Progress in LC materials", Proceedings Eurodisplay Conference SID, september 1987, p.88
11. C. Gooch, H. Tarry, J Phys. D8 (1975) 1575
12. P. Alt, P. Pleshko, IEEE Trans. Electron. Devices **21** (1974) 146
13. A. Kmetz, "Non-emissive Electrooptic Displays", Plenum Press, New York (1976)