

Untersuchungen zum Mechanismus und zur Modellierung elektrooptischer Schaltvorgänge in ferroelektrischen Flüssigkristallphasen

Im Zeitalter der modernen Mikroelektronik hat sich der Einsatz von nematischen Flüssigkristallen in optoelektrischen Anzeigeelementen (LCDs: „Liquid Crystal Displays“) zu einer wichtigen Schlüsseltechnologie entwickelt. Mit steigenden Anforderungen werden die Grenzen dieser konventionellen Flüssigkristalltechnologie deutlich: Jeder Anwender eines Laptops weiß um die vergleichsweise langsame Schaltzeit und schlechte Blickwinkelcharakteristik eines LCD-Bildschirms. Die heute favorisierte Lösung dieser Probleme liegt in der Entwicklung von Displays auf der Basis ferroelektrischer Flüssigkristalle.

Flüssigkristalle sind partiell geordnete, fluide Phasen zumeist organisch-chemischer Verbindungen, die eine Anisotropie ihrer physikalischen Eigenschaften aufweisen. Die Fluidität verbindet die Flüssigkristalle mit den eigentlichen, isotropen Flüssigkeiten, während ihre Anisotropie ein gemeinsames Charakteristikum mit den kristallinen Festkörpern (mit Ausnahme der kubischen Phasen) ist.

Aus der Verbindung von Fluidität und dielektrischer Anisotropie resultiert die Möglichkeit, durch Anlegen elektrischer Felder weitgreifende Umorientierungen der Flüssigkristallmoleküle zu induzieren, die wiederum zu einer makroskopischen Umorientierung der optischen Achsen der Flüssigkristallphase führen. Diese Umorientierung liefert dann – bei Betrachtung zwischen geeignet orientierten Polarisationsfiltern – den elektrooptischen Effekt. Alle konventionellen LCD-Technologien beruhen im Prinzip auf eben dieser, dielektrisch induzierten Umorientierung. Typische Schaltzeiten nematischer Phasen liegen im Millisekundenbereich.

Die Möglichkeit der Existenz ferroelektrischer Flüssigkristallphasen wurde lange Zeit ausgeschlossen, da es als äußerst unwahrscheinlich galt, daß in einer beweglichen, fluiden Phase eine spontane Parallelorientierung permanenter Dipolmomente auftritt. Erst 1975 zeigte der US-amerikanische Physiker Robert B. Meyer mit Hilfe von Symmetriebetrachtungen, daß in bestimmten Flüssigkristallphasen Ferroelektrizität auftreten muß, wenn diese aus chiralen Molekülen mit einem permanenten Dipolmoment aufgebaut sind (1). Die Überlegungen Meyers wurden inmittelbar darauf von der „Orsay-Gruppe“, einer Arbeitsgruppe um den französischen Nobelpreisträger Pierre Gilles de Gennes, experimentell bestätigt (1).

Ferroelektrische Flüssigkristallphasen weisen eine weitgehende Analogie zu kristallinen Ferroelektrika und Ferromagnetika auf. Auffallendstes Kennzeichen dieser Analogie ist, daß sie bei Präparation in dünnen Schichten (1 bis 10 μm) eine charakteristische Domänentextur, vergleichbar den Weißschen Bezirken der Ferromagnetika, ausbilden. Aufgrund unterschiedlicher Orientie-

rungen ihrer optischen Achsen lassen sich diese Domänen äußerst einfach mit Hilfe eines Polarisationsmikroskopes visualisieren. Bild 1 zeigt eine typische Domänentextur einer ferroelektrischen Flüssigkristallphase. In den dunklen Bereichen des Bildes weist der Vektor der spontanen Polarisation senkrecht zur Papierebene auf den Betrachter hin, während er in den hellen Bereichen entgegengesetzt orientiert ist. Bei Anlegen eines elektrischen Feldes in Richtung des Betrachters kehrt sich die spontane Polarisation der hellen Bereiche um, so daß die gesamte Probe dunkel erscheint; bei Umkehr der elektrischen Feldrichtung erscheint dann die gesamte Probe hell. Dieser elektrooptische Effekt wurde 1980 von Sven T. Lagerwall und Noel A. Clark in der chiralen smektischen C-Phase (S_C^* -Phase) entdeckt (2).

Die S_C^* -Phase weist eine Schichtstruktur kalamitischer (stäbchenförmiger) Moleküle auf, in der die molekularen Längsachsen weitgehend parallel zu einer gemeinsamen Vorzugsrichtung (Direktor) orientiert sind, die ihrerseits einen charakteristischen Neigungswinkel (Direktorneigungswinkel) zur Schichtnormalen aufweist. Die spontanen Polarisationen von S_C^* -Phasen liegen im Bereich von ca. 10 bis 200 nC cm^{-2} und sind damit um mehr als eine Größenordnung kleiner als die der Festkörper-Ferroelektrika. Andererseits sind sie bei anwendungsrelevanten Feldstärken um ein Vielfaches größer als die dielektrisch induzierte Polarisation, mit der konventionelle Flüssigkristallanzeigen arbeiten. Infolgedessen ist die Kopplung zwischen Feld und Flüssigkristall im ferroelektrischen Fall wesentlich stärker, was zu deutlich verkürzten Schaltzeiten im Bereich einiger Mikrosekunden führt.

In der 1992 fertiggestellten Dissertation wurde ein elektrooptisches Meßverfahren entwickelt, das es erstmals erlaubt, die Trajektorie, die der Direktor bzw. ein Molekül der S_C^* -Phase während der feldinduzierten Umorientierung („Schaltvorgang“) beschreibt, zeitaufgelöst zu bestimmen (3). Mit diesem Verfahren konnte der bislang nur postulierte Mechanismus des Schaltvorgangs in S_C^* -Phasen, demzufolge sich der Direktor bei konstantem Schichtneigungswinkel um die Schichtnormale dreht („Kegelmantelbewegung“), experimentell bestätigt werden (4). Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, daß bei den häufig auftretenden geeigneten Schichtgeometrien eine zusätzliche, reversible Umorientierung der smektischen Schichten (Schichtbewegung) stattfindet, die die Elektrooptik des Systems signifikant beeinflusst (4).

Bei Kenntnis der Direktortrajektorie eröffnet sich die Möglichkeit einer Analyse der Schaltdynamik auf der Grundlage der computerunterstützten Lösung der Bewegungsgleichungen des Systems. Hierzu wurde eine geeignete Modellierung des Systems vorgenommen. Ausgehend vom chemischen Potential der S_C^* -Phase in Form einer Landau-Entwicklung des primären Ordnungsparameters, berücksichtigt der Ansatz die ferroelektrische und dielektrische Wechselwirkung mit dem elektrischen Feld, elastische Deformationen der Direktor- und Schichtkonfiguration während des Schaltvorgangs sowie viskose Dissipationseffekte. Aus der Potentialfunktion erhält man die Bewegungsgleichungen des Systems als partielles, nichtlineares Differentialgleichungssystem, dessen numerische Lösungen eine Simulation der Schaltdynamik von S_C^* -Phasen erlauben (4). Bild 2 zeigt exemplarisch einen Vergleich zwischen gemessener und simulierter Transmissionsantwort einer ferroelektrischen Flüssigkristallzelle. Es zeigt sich, daß der gemessene Transmissionsverlauf nahezu perfekt von der Simulation wiedergegeben wird. Alle wichtigen technischen Kenndaten, wie Kontrast, Schaltzeit und „optical overshoot“ werden exakt reproduziert. Im Sinne einer weitergehenden Bestätigung des entwickelten Schaltmodells wurden Messungen und Simulationen bei verschiedenen Temperaturen der Flüssigkristallphase sowie verschiedenen Amplituden, Frequenzen und Funktionen des anregenden elektrischen Feldes durchgeführt (5).



Bild 1: Polarisationsmikroskopische Aufnahme der Domänentextur der ferroelektrischen S_C^* -Phase des MCBDBPE in einer 4 μm dicken Zelle bei 40 $^\circ\text{C}$ zwischen gekreuzten Polarisatoren (10 Skt. entsprechen 60 μm).

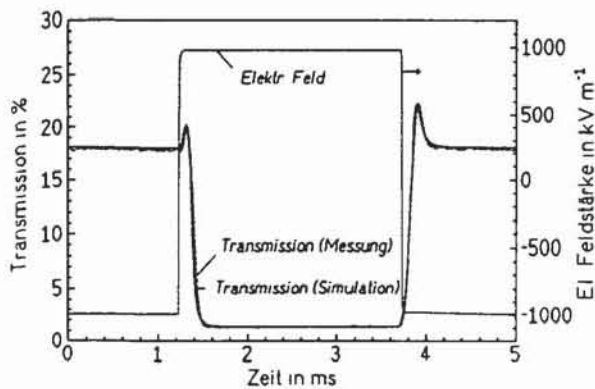


Bild 2: Gemessene und simulierte Transmissionsantworten einer $3,9 \mu\text{m}$ dicken Flüssigkristallzelle, gefüllt mit MCBDBPE, auf ein $200 \text{ Hz}/1 \text{ MV m}^{-1}$ elektrisches Rechteckfeld bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Vakuum-Lichtwellenlänge von $\lambda_0 = 546 \text{ nm}$.

Alle Messungen lassen sich konsistent simulieren. Aus der Anpassung der Simulationsrechnungen an die entsprechenden Messungen wurden verschiedene fundamentale Materialparameter ermittelt, deren Werte mit unabhängigen Meßverfahren überprüft wurden (5). Alle diesbezüglichen experimentellen Untersuchungen wurden an der niedermolekularen S_C^* -Phase des 4-(Decyloxy)benzoesäure-4-[(S)-(+)-(2-chlor-3-methylbutyryloxy)]-phenyl-

esters (Abkürzung: MCBDBPE) durchgeführt, dessen für das Auftreten der Ferroelektrizität essentielle Chiralität aus dem „chiral pool“ über die natürliche Aminosäure S-Valin präparativ zugänglich ist.

Darüber hinaus wurden analoge Untersuchungen an der S_C^* -Phase eines flüssigkristallinen Seitengruppenpolymers durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, daß das häufig zu beobachtende phänomenologisch antiferroelektrische Verhalten dieser Systeme mit dem zusätzlichen, symmetriebrechenden Einfluß der Polymerhauptkette erklärt und simuliert werden kann (6). Ferner wurde ein ungewöhnlich starker elektroakustischer Effekt der S_C^* -Phase des MCBDBPE beobachtet, der sich deutlich vom linearen piezoelektrischen Effekt, wie er in allen ferroelektrischen Systemen auftritt, unterscheidet (7). Eine elektrohydrodynamische Erklärung des gefundenen elektroakustischen Effekts wurde jüngst von H. R. Brand und H. Pleiner publiziert (8).

Literatur:

- (1) R. B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki, P. Keller, J. de Phys. Lett. 36, L-69 (1975).
- (2) N. A. Clark, S. T. Lagerwall, Appl. Phys. Lett. 36, 899 (1980).
- (3) F. Gießelmann, P. Zugenmaier, Liq. Cryst. 8, 361 (1990).
- (4) F. Gießelmann, P. Zugenmaier, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 237, 121 (1993).
- (5) F. Gießelmann, P. Zugenmaier, Liq. Cryst. 14, 389 (1993).
- (6) F. Gießelmann, P. Zugenmaier, G. Scherowsky, K. Kühnpast, J. Springer, Makromol. Chem. Rapid Commun. 13, 489 (1992).
- (7) F. Gießelmann, I. Dierking, P. Zugenmaier, Mol. Cryst. Liq. Cryst. Letters 8, 105 (1992).
- (8) H. R. Brand, H. Pleiner, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 226, 189 (1993).