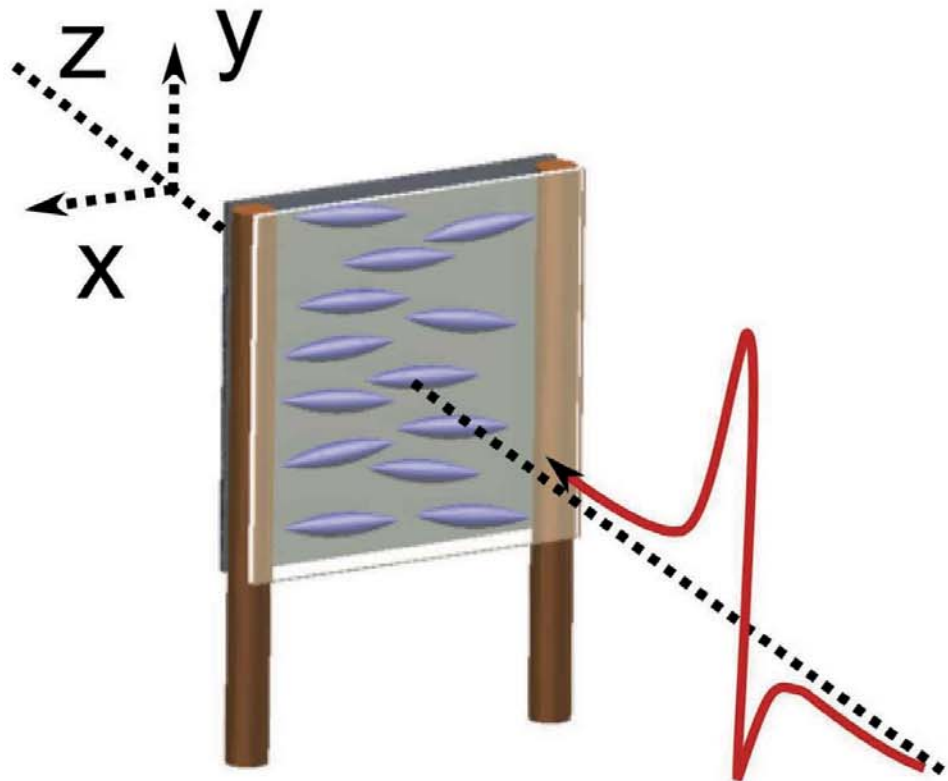


Nico Vieweg

# Eigenschaften und Anwendungen von Flüssigkristallen im Terahertz-Frequenzbereich



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



# **Eigenschaften und Anwendungen von Flüssigkristallen im Terahertz-Frequenzbereich**

Von der  
Fakultät für Elektrotechnik, Informatik, Physik  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines  
**Doktoringenieurs (Dr. Ing)**  
genehmigte

## **Dissertation**

von  
Nico Vieweg,  
geboren am 04.11.1976  
in Ueckermünde

Eingereicht am	04.04.2011
mündliche Prüfung am	29.04.2011
Berichterstatter	Prof. Dr. rer. nat. Martin Koch Prof. Dr. Ing. Jörg Schöbel Prof. Dr. Ing. Ludwig Wetenkamp

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2011

Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2011

978-3-86955-828-8

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2011

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2011

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-828-8

*In Gedenken an meinen Vater*

*“It’s a long way to the top if you wanna Rock ’n Roll”*

AC/DC, High Voltage, 1976



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Studie der Ferninfrarot (FIR)-Eigenschaften von Flüssigkristallen und der Entwicklung schaltbarer Bauteile für diesen Frequenzbereich. Die Ergebnisse aus dieser Arbeit sind zu Teilen während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hochfrequenztechnik (IHF) der TU Braunschweig und am Fachbereich Physik der Universität Marburg entstanden.

Ich danke zuallererst meinem Doktorvater Prof. Martin Koch, für die Unterstützung in den lehrreichen Jahren, das geschenkte Vertrauen, die stets fördernde Kritik und den gemeinsamen Weg zu meiner Promotion. Bei Dir habe ich unter anderem eine wichtige Lektion gelernt: Es bleibt nicht genug Zeit alle Ideen zu verwirklichen. Man sollte deshalb auch zwischen durch mal „*einen Ball ins Tor schießen*“. Als Du mir 2006 das Thema Flüssigkristalle als Promotionsthema vorschlugst, hatte ich nur eine vage Vorstellung, wo mich dieses Thema mal hinführt. Umso mehr freut es mich heute zu sehen, dass daraus ein paar wissenschaftliche Veröffentlichungen geworden sind. Durch Deine Mithilfe wurde mir unter anderem die Ehre einer Förderung durch die Studienstiftung des Deutschen Volkes, den Deutschen Akademischen Austauschdienst und die Braunschweig International Graduate School of Metrology zu teil, die ich an dieser Stelle insbesondere würdigen möchte. Zudem hast Du mir unvergessliche Aufenthalte am Deutschen Luft- und Raumfahrt-Zentrum (DLR) in Berlin und an der Universität Kyoto in Japan ermöglicht.

Herrn Prof. Heinz-Wilhelm Hübers und seinen Mitarbeitern möchte ich ebenfalls für die schöne Zeit am DLR danken. Koichiro Tanaka und seinen Mitarbeitern bleibe ich für die Unterstützung und unvergessliche Zeit in Japan in Dankbarkeit verbunden.

Weiterhin gilt mein Dank Prof. Tim Fingscheidt, Prof. Jörg Schöbel und Prof. Ludwig Wetenkamp für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bzw. der Korreferate und der damit verbundenen Arbeit.

Mit Blick auf meine Arbeit zur Entwicklung von THz-Emittern und Detektoren im Rahmen des Forschungsprojekts FWF danke ich Dr. Karin Wiesauer und Dr. Stefan Katletz vom RECENDT-Center in Linz für die gute Zusammenarbeit.

Insbesondere möchte ich mich bei Dr. Sabine Zakel für die Betreuung und Unterstützung an der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt während meiner Messungen mit dem FTIR-Spektrometer bedanken.

Einige Ergebnisse dieser Arbeit wären nicht zustande gekommen ohne die Hilfe auf dem Gebiet der Computerchemie von Prof. Gernot Frenking und Dr. Mehmet Ali Celik.

## VI

Mein Dank gebührt weiterhin der Firma Merck, Prof. Roman Dabrowski und Dr. Przemyslaw Kula von der Military University of Technology in Warschau sowie Prof. Danuta Baumann von der Poznan University of Technology für die Flüssigkristalle und zahlreichen Informationen.

Für das angenehme Arbeitsumfeld gebührt den Mitarbeitern um Prof. Wolfgang Kowalsky von der TU Braunschweig und den Mitarbeitern des Fachbereichs Physik der Universität Marburg große Anerkennung. Die ersten lehrreichen Jahre bereicherten meine ehemaligen Kollegen Frank Rutz, Rafal Wilk, Mohammed Salhi, Tomasz Hasek, Ibraheem Al Naib, Sarah Ghattan, Kai Baaske, Carola Baaske, Christian Jördens, Katrin Tonndorf und Kamran Ezdi. Vielen Dank auch an Martin Mikulics für die gute Zusammenarbeit und die Herstellung der Halbleiterantennen.

Ein besonderer Dank geht an Norman Krumbholz für die Betreuung meiner Masterarbeit und die großartige gemeinsame Zeit in Japan. Dank sagen möchte ich für ihre Hilfe aber auch den Kollegen Ole Peters, Matthias Stecher, Steffen Wietzke, Matthias Wichmann, Bernd Heinen, Michael Schwerdtfeger, Thorsten Probst, Benjamin Ewers, Mehdi Ahmadi-Boroujeni, Kapil Kohli und Bernd Fischer. In dieser Reihe sind auch Justyna Kloc, Volker Bartels, Norman Born, Ajanthkrishna Velauthapillai und die vielen anderen Studenten zu nennen, die einen Beitrag zu meiner Arbeit geleistet haben. Ein besonderer Dank gebührt Christian Jansen und Maik Scheller für die fachlichen Beiträge zu meiner Arbeit. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen und Freunden Mohammad Khaled Shakfa und Dalia Al Nakdali für die gemeinsame Zeit und die Unterstützung bei den Messungen. Ein ganz großes Dankeschön für das freundschaftliche Verhältnis, das stets offene Ohr und das Lösen meiner Computerprobleme geht an meinen Bürokollegen Benedikt Scherger. Meinen Nachfolgern Marco Reuter und Kristian Altmann wünsche ich weiterhin viel Erfolg mit den Flüssigkristallen.

Die ganze Arbeit wäre selbstverständlich nicht möglich gewesen ohne die Förderung, Unterstützung und das Verständnis meiner Familie und meiner Freundin Verena. Ihnen gebührt mein herzlichster Dank.

Marburg, im April 2011



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Historischer Rückblick</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Klassifizierung und Aufbau</b>	<b>6</b>
2.2.1	Lyotrope und thermotrope Flüssigkristalle	6
2.2.2	Flüssigkristallphasen	7
2.2.3	Molekulare Geometrien	8
2.2.4	Das Elektronensystem	8
2.2.5	Nematen mit positiver und negativer dielektrischer Anisotropie	9
2.2.6	Reine Flüssigkristalle und Mischungen	10
<b>2.3</b>	<b>Der Ordnungsparameter</b>	<b>11</b>
<b>2.4</b>	<b>Dielektrische Eigenschaften</b>	<b>12</b>
<b>2.5</b>	<b>Temperaturabhängigkeit der optischen Eigenschaften</b>	<b>19</b>
<b>2.6</b>	<b>Molekulare Polarisierbarkeiten</b>	<b>20</b>
<b>2.7</b>	<b>Orientierung von Flüssigkristallen</b>	<b>21</b>
2.7.1	Wandverankerungsverfahren	21
2.7.2	Magnetische Methoden	22
2.7.3	Elektrische Methoden	22
<b>2.8</b>	<b>Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in Flüssigkristallen</b>	<b>29</b>
2.8.1	Wellenplatten	30
<b>3</b>	<b>Experimentelles</b>	<b>36</b>
<b>3.1</b>	<b>THz-Zeitbereichsspektrometer</b>	<b>36</b>
3.1.1	Vermessung der Flüssigkristalle	40
3.1.2	Polarisationsfilter	44
3.1.3	Temperaturgeregelter Küvettenhalter	48
3.1.4	Instrumente zur elektrischen Ansteuerung der Küvetten	49
3.1.5	Datenauswertung	50
<b>3.2</b>	<b>THz-Spektrometer mit Dauerstrichstrahlung</b>	<b>56</b>
<b>3.3</b>	<b>FTIR-Spektrometer</b>	<b>58</b>
3.3.1	Küvette für die FTIR-Spektroskopie	61
<b>4</b>	<b>Terahertz-Eigenschaften von Flüssigkristallen</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Makroskopische Eigenschaften</b>	<b>63</b>

## VIII

4.1.1	5CB, 6CB und 7CB	63
4.1.2	5OCB	66
4.1.3	PCH5 und PCH7	67
4.1.4	BL037	69
4.1.5	I52	71
4.1.6	7CP7BOC	72
4.1.7	MLC7029	73
4.1.8	1808	74
4.1.9	Fazit	76
<b>4.2</b>	<b>Molekulare Eigenschaften von 5CB, 6CB und 7CB</b>	<b>77</b>
4.2.1	Die molekulare Struktur von 5CB, 6CB und 7CB	78
4.2.2	Der Zusammenhang zwischen makroskopischen und molekularen Daten	81
4.2.3	Prinzipielle Polarisierbarkeit von 5CB, 6CB und 7CB	82
4.2.4	Ordnungsparameter S von 5CB, 6CB und 7CB	84
4.2.5	Hauptpolarisierbarkeiten von 5CB, 6CB und 7CB	86
<b>4.3</b>	<b>Molekulare Eigenschaften von PCH5 und PCH7</b>	<b>87</b>
4.3.1	Molekulare Struktur von PCH5 und PCH7	87
4.3.2	Polarisierbarkeiten von PCH5 und PCH7	88
<b>4.4</b>	<b>Molekulare Eigenschaften von 5OCB</b>	<b>89</b>
4.4.1	Molekulare Struktur von 5OCB	89
4.4.2	Polarisierbarkeiten von 5OCB	90
<b>4.5</b>	<b>Absorptionsverhalten im Frequenzbereich von 1,5 THz -15 THz</b>	<b>91</b>
4.5.1	Absorptionsverhalten von 5CB, 6CB, 7CB und 8CB	92
4.5.2	Absorptionsverhalten von PCH5 und PCH7	96
<b>5</b>	<b>Anwendungen</b>	<b>101</b>
5.1	Schaltbares THz-Filter	101
5.2	Phasenschieber	105
5.3	Prismenmodulator	109
5.4	Potentielle Anwendungsfelder der vorgestellten Bauteile	115
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>120</b>

# 1 Einleitung

Der ferne Infrarotbereich, der auch als Submillimeter- oder Terahertz (THz)-Frequenzbereich bezeichnet wird, umfasst nach der deutschen Industrienorm DIN 5031 elektromagnetische Wellen mit Frequenzen zwischen 0,3 THz und 6 THz. In andere Einheiten konvertiert, entspricht dieser Bereich 1 mm – 50  $\mu\text{m}$  langen Wellenlängen bzw.  $10\text{ cm}^{-1}$  –  $200\text{ cm}^{-1}$  großen Wellenzahlen. In der Literatur findet man aber auch andere Angaben [1-4], wobei der spektrale Umfang dann häufig durch die Bandbreite der verwendeten Spektrometer bzw. anhand charakteristischer Eigenschaften von Materialien definiert wird [5].

Das Universum als größte THz-Strahlquelle hat Forscher schon vor über hundert Jahren dazu angetrieben spezielle ferninfrarotsensitive Geräte zu entwickeln, um den kosmischen Geheimnissen auf die Spur zu kommen [6,7]. Die ersten Experimente mit Ferninfrarotstrahlen machten Rubens und Nichols [8,9]. Von wissenschaftlich anwendbaren Geräten kann man aber erst seit der Entwicklung der FTIR-Spektroskopie (engl. fourier transform infrared) in den 1950er Jahren sprechen [10,11].

Mit der Entwicklung der Femtosekundenlaser und der Einführung der THz-Zeitbereichsspektroskopie [12,13] zu Beginn der 90er Jahre, keimte auch bald die Hoffnung auf eine industrielle Nutzbarkeit der THz-Wellen. Durch das kohärente Detektionsverfahren können Amplituden- und Phaseninformationen der gepulsten THz-Signale bestimmt und der Brechungsindex  $n$  und der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  eines Materials über einen großen Frequenzbereich präzise aus den Messdaten berechnet werden. Das ermöglichte die Untersuchung verschiedener Materialien aus einem ganz neuen Blickwinkel und eröffnete der THz-Spektroskopie weitere Anwendungsfelder [3,4,14]. Heute, 20 Jahre nach ihrer Einführung, steht die THz-Zeitbereichsspektroskopie an der Schwelle zur Industrietauglichkeit.

Neben der THz-Zeitbereichsspektroskopie wurden auch zahlreiche alternative Technologien entwickelt. Dazu gehört z.B. die Photomischung [15,16], bei der kontinuierliche THz-Wellen mit Hilfe von photoleitenden Antennen generiert und detektiert werden. Die Photoleiter lassen sich z.B. durch die Strahlen eines Zweifarben-Lasers anregen, wobei die Differenz der beiden Laserlinien die Frequenz der abgestrahlten THz-Welle bestimmt.

Eine Brücke zwischen den beiden Techniken, Photomischung und Zeitbereichsspektroskopie, schlägt die Quasi-THz-Zeitbereichsspektroskopie [17]. Die Methode basiert auf einer Multimode-Halbleiter-Laserdiode (MMSLD), die ähnlich wie der Zweifarben-Laser in einen Photomischbau integriert ist. Durch die vielen äquidistanten Moden der Laserdiode werden jedoch wie in der THz-Zeitbereichsspektrosko-

pie pulsartige THz-Signale erzeugt. Quasi-Zeitbereichsspektrometer bieten zwar bisher nur eine begrenzte spektrale Bandbreite, sind aber dafür sehr kosteneffizient.

Weiterhin gibt es eine Reihe weiterer Quellen wie frequenzvervielfachte Gunn- und IMPATT-Dioden [18,19], Quantenkaskadenlaser [20,21],  $\text{CH}_2\text{F}_2$  [22,23] bzw.  $\text{CH}_3\text{OH}$ -Laser [24] und Synchrotrone [25]. Ein Überblick über verschiedene Techniken ist auch in [2] zu finden.

Neben der Entwicklung verschiedenster Quellen und Detektoren gehört auch die Untersuchung der Wechselwirkungen der THz-Wellen mit Materie zum Arbeitsalltag der Wissenschaftler und Ingenieure. Zu den interessanten Materialien gehören z.B. Gase, Plasmen, Halbleiter, Kunststoffe, Biomoleküle, DNA, Sprengstoffe und eben auch Flüssigkristalle [4,26,27].

Generell liegt der Grund für das wissenschaftliche Interesse an den Flüssigkristallen in der einzigartigen Kombination eines Ordnungsgrades, den man sonst nur bei Kristallen findet, und der Fluidität, die man nur von Flüssigkeiten kennt. Darüber hinaus weisen viele Flüssigkristalle eine dielektrische bzw. magnetische Anisotropie auf und reagieren sehr sensitiv auf magnetische und elektrische Felder. Daher eignen sich Flüssigkristalle hervorragend als Kernmaterial in schaltbaren Bauteilen.

Die Verknüpfung zwischen der Struktur der Moleküle und ihren dielektrischen Eigenschaften ist für den Radiofrequenz- und den optischen Frequenzbereich umfassend erforscht. Die dielektrischen Eigenschaften flüssigkristalliner Substanzen bei diesen Frequenzen können deshalb heute für nahezu beliebige Anwendungen optimiert werden. Für den THz-Frequenzbereich ist diese Verknüpfung nur begrenzt möglich, da umfangreiche systematische Untersuchungen bisher fehlen. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an, deren Ziel es ist fundierte Kenntnisse über die makroskopischen und mikroskopischen Eigenschaften verschiedener Flüssigkristalle zu vermitteln und die wirkenden physikalischen Mechanismen aufzudecken. Außerdem, soll anhand verschiedener Bauteile das Anwendungspotential der Flüssigkristalle für den THz-Frequenzbereich demonstriert werden.

Schon in den frühen 1970er Jahren studierten Forscher die Ferninfrarot- (FIR) Eigenschaften von Flüssigkristallen [22,23,28-42]. Mit den verfügbaren Messinstrumenten, hatte man jedoch nur begrenzten Zugriff auf die FIR-Eigenschaften der Flüssigkristalle. So wurde z.B. der Absorptionskoeffizient mit Hilfe eines FTIR-Spektrometers oder einem  $\text{CH}_2\text{F}_2$ - bzw.  $\text{CH}_3\text{OH}$ -basierendem FIR-Laser bestimmt [22,23]. Ergebnisse zum Brechungsindex der Flüssigkristalle bei einzelnen Frequenzen wurden jedoch nur mit der zuletzt genannten Technik erzielt [22].

Durch den großen Durchbruch der THz-Zeitbereichsspektrometer in den 1990er Jahren [13] rückten auch die Flüssigkristalle wieder mehr in den Fokus des Interesses und ihr Potential für schaltbare Terahertz (THz)- Bauteile wurde entdeckt. Um dieses Potential

zu nutzen, ist eine fundierte Kenntnis der dielektrischen Eigenschaften der Flüssigkristalle im THz-Frequenzbereich erforderlich und ein Verständnis der darunterliegenden physikalischen Mechanismen muss erlangt werden.

Die erste Flüssigkristallmessung mit einem THz-Zeitbereichsspektrometer machte Turchinovich et al. an PCH5 [43]. Dieser Messung folgten bald verschiedene Untersuchungen der Arbeitsgruppe von Prof. Pan an 5CB, 6CB, 7CB, 8CB [44-49], PCH5 [44,46], E7 [50,51] und einem ferroelektrischen Flüssigkristall [52]. Daten über 5CB präsentierten auch Bonn et al. [53]. Einen Flüssigkristall mit scheibchenförmiger Molekülstruktur untersuchten hingegen Xia et al. [54]. Mit anderen Spektroskopietechniken erzielten Takanishi et al. und Nishizawa et al. Ergebnisse zu P-8-PIMB bzw. MBBA [55,56]. Messungen zu einem Polymer-Flüssigkristall veröffentlichten Rutz und Mitarbeiter [57]. Jüngst publizierten Trushkevych et al. Resultate zur nematischen Mischung LCMS-107 [58]. Die Ergebnisse, die im Rahmen dieser Dissertation zu den Flüssigkristallen 5CB, 6CB, 7CB, 8CB, 5OCB, PCH5, PCH7, BL037, MLC7029, I52 und 1808 entstanden sind, lassen sich auch in [59-62] nachlesen.

Die THz-Systemtechnik ist noch ein sehr junges Forschungsfeld und an vielen Stellen bedarf es noch geeigneter Bauteile wie z.B. Filter, Phasenschieber oder Modulatoren zur Beeinflussung der THz-Strahlen. Um den Mangel an diesen Bauelementen zu beseitigen, wurden für den THz-Frequenzbereich unter anderem verschiedene Konzepte zur Entwicklung schaltbarer Flüssigkristallbauteile vorgeschlagen. Die Gruppe von Pan et al. stellten magnetisch und elektronisch schaltbare Phasenschieber [46,50,63-65], verschiedene Filter [46,66,67], einen Polarisator [68] und ein optisches Gitter vor [69]. Ghattan und Mitarbeiter entwickelten einen flüssigkristallbasierenden photonischen Kristall für den Sub-THz-Bereich [70]. Die Umsetzung eines ähnlichen Konzepts gelang Zhang et al. für den THz-Bereich [71]. Einen schaltbaren dielektrischen Spiegel präsentierten Wilk et al. [72]. Zudem sind eine Reihe von Arbeiten zu schaltbaren THz-Bauteilen entstanden, bei denen Flüssigkristalle mit einem Metamaterial kombiniert wurden [73-78]. Außerdem schlugen Yuan et al. ein neues Konzept zur elektrischen Steuerung eines THz-Schalters auf Flüssigkristallbasis vor [79].

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Nach dieser Einleitung folgen zwei Grundlagenkapitel zur Einführung in die Thematik der Flüssigkristalle und die THz-Spektroskopie. In den daran anschließenden Kapiteln werden die experimentellen Ergebnisse vorgestellt. Im letzten Kapitel folgt eine Zusammenfassung der wesentlichen Resultate und ein Ausblick.

Kapitel 2 gibt eine grundlegende Einführung in die Thematik der Flüssigkristalle. Nach einem kurzen historischen Überblick folgt eine Einteilung der Flüssigkristalle hinsichtlich physikalischer und struktureller Merkmale. Daran schließt sich eine Beschreibung wesentlicher Eigenschaften wie des Ordnungsparameters, der

dielektrischen Kenngrößen, des Temperaturverhaltens, molekularer Polarisierbarkeiten und der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Flüssigkristallen an.

Zur Charakterisierung der Flüssigkristalle und der Bauteile werden in dieser Arbeit ein THz-Zeitbereichsspektrometer, ein Spektrometer zur Erzeugung von THz-Dauerstrichstrahlung und ein FTIR-Spektrometer verwendet. In Kapitel 3 werden deshalb die verwendeten Spektrometer und experimentelle Details vorgestellt. Dazu gehören z.B. eine ausführliche Beschreibung des Aufbaus der Spektrometer und der Mechanismen zur Erzeugung und Detektion der THz-Strahlung. Für Messungen im THz-Zeitbereichsspektrometer und im FTIR-Spektrometer kommen verschiedene Küvetten zum Einsatz. Dem Aufbau und der Herstellung der Küvetten sowie den dazu benötigten Materialien sind daher eigene Abschnitte gewidmet. Besonderer Wert wird auf die Auswertung der im Zeitbereichsspektrometer zur Charakterisierung der Flüssigkristalle erzielten Daten gelegt.

Die Ergebnisse der spektroskopischen Untersuchungen sind Thema des vierten Kapitels. Zunächst werden die makroskopischen Eigenschaften wie der Brechungsindex und der Absorptionskoeffizient verschiedener Flüssigkristalle präsentiert. Diese Materialien wurden mit dem THz-Zeitbereichsspektrometer im Frequenzbereich zwischen 0,2 THz und 3 THz charakterisiert. Daran schließt sich die Bestimmung mikroskopischer Eigenschaften wie des Ordnungsparameters und der Polarisierbarkeiten aus den makroskopischen Daten einiger ausgewählter Strukturen an. Abschließend folgen die Resultate von Messungen mit einem FTIR-Spektrometer zur Charakterisierung der Flüssigkristalle im Frequenzbereich zwischen 1,5 THz und 15 THz.

Im Fokus von Kapitel 5 steht die Demonstration eines THz-Filters und Phasenschiebers. Darüber hinaus wird das Konzept eines schaltbaren Prismas vorgestellt. Abschließend folgt eine Diskussion der potentiellen Anwendungsfelder dieser Bauteile.

## 2 Grundlagen

Das folgende Kapitel dient der Einführung in das Feld der Flüssigkristalle (engl. liquid crystal, LC). Die dafür gewählten Schwerpunkte sind eine Auswahl aus diesem Forschungsbereich und sollen das Verständnis der vorliegenden Arbeit erleichtern. Weiterführende Informationen sind in zahlreichen Fachbüchern und Journalen nachzulesen [80-91].

### 2.1 Historischer Rückblick

Die Erfolgsgeschichte der Flüssigkristalle könnte man auch mit „*Von der Karotte zum Flachbildschirm*“ betiteln [92]. Anno 1888 arbeitete der österreichische Botaniker Friedrich Reinitzer an der Charakterisierung von Derivaten des Cholesterins [93], welche er aus Karotten gewann. Er entdeckte, dass einige seiner Präparate zwei Schmelzpunkte aufwiesen. Mit Hilfe eines Mikroskops erkannte er zwischen dem festen und flüssigen Aggregatzustand eine bis dahin unbekannte Phase, in welcher der Stoff milchig trüb erschien und mit Licht auf eine für ihn unerklärlich Weise wechselwirkte. Um weiteres Licht auf seine Entdeckung zu werfen, wandte er sich mit folgenden Worten an Otto Lehmann, einem Spezialisten auf dem Gebiet der Mikroskopie und Kristallographie [83,94]:

*„Die Substanz zeigt zwei Schmelzpunkte, wenn man sich so ausdrücken darf. Bei 145,5 Grad Celsius schmilzt sie zunächst zu einer trüben, jedoch völlig flüssigen Flüssigkeit. Dieselbe wird erst bei 178,5 Grad Celsius plötzlich völlig klar.“*

Lehmann bestätigte Reinitzers Beobachtungen. Die entdeckte Phase war weder eindeutig den Kristallen noch den Flüssigkeiten zuzuordnen, sondern vereinte Eigenschaften beider Aggregatzustände. In einem seiner Briefe an Reinitzer bemerkte Lehmann [95]:

*„Für den Physiker ist es jedenfalls von hohem Interesse, daß Kristalle existieren, deren Weichheit eine so bedeutende ist, daß man sie beinahe flüssig nennen könnte“*

Der Name Flüssigkristall geht also letztendlich auf Lehmann zurück [80,96]. Mit der Entdeckung der Flüssigkristalle begann ein neues Zeitalter für das Verständnis der Aggregatzustände der Materie [93]. Vor dieser Entdeckung waren nur die klassischen Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig bekannt [97]. Die Resultate Reinitzers und Lehmanns stießen zunächst nicht überall auf Anerkennung, standen sie doch im Gegensatz zur allgemeinen Lehrmeinung. Sehr schnell wurden jedoch immer neue Flüssigkristalle entdeckt und auch die hartnäckigsten Gegner mussten nach und nach umdenken. Um dem Status eines eigenständigen Aggregatzustandes gerecht zu werden,



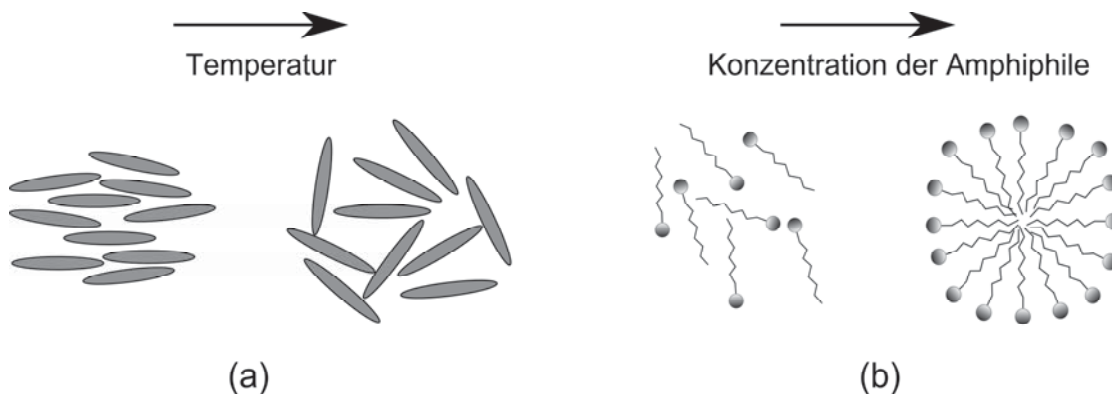
spricht man von der flüssigkristallinen Phase auch als Mesophase (griech. für Zwischenphase) oder bisweilen vom vierten Aggregatzustand [94].

Über die nächsten 80 Jahre hinweg blieben die Flüssigkristalle aber ein Phänomen ohne größere praktische Anwendung. Im akademischen Bereich wurden jedoch einige wegweisende Arbeiten zur theoretischen Beschreibung flüssigkristalliner Phasen veröffentlicht [83,98,99]. Der große technologische Durchbruch gelang Anfang der 1970er Jahre [100] mit der Entwicklung der verdrillten nematischen Zelle (engl. twisted nematic, TN) und dem Einzug der LCs in die Welt der Flachbildschirme. Heute kennt man bereits weit über 80000 flüssigkristalline Verbindungen und im Jahr 2003 überschritt in Deutschland die Anzahl der verkauften Flüssigkristallbildschirme erstmals die Menge der umgesetzten Röhrengeräte.

## 2.2 Klassifizierung und Aufbau

### 2.2.1 Lyotrope und thermotrope Flüssigkristalle

Eine erste Unterteilung der LC-Substanzen ist die in thermotrope und lyotrope Flüssigkristalle. Thermotrope Flüssigkristalle ändern ihren Aggregatzustand mit der Temperatur. Bei tiefen Temperaturen ist das Material fest und geht mit steigender Temperatur zunächst in die flüssigkristalline Phase und anschließend in die isotrope Phase über (Bild 2.1). Diese Klasse findet z.B. für Flachbildschirme Verwendung.



**Bild 2.1:** (a) Thermotroper Flüssigkristall: mit steigender Temperatur nimmt der Ordnungsgrad ab (b) Lyotroper Flüssigkristall: Amphiphile Molekülen ordnen sich mit steigender Anzahl der Moleküle in einer Lösung in Form einer Micelle an.

Lyotrope Moleküle wie z.B. Phospholipide und Seifen ändern ihre Phase mit der Konzentration der Moleküle in einer Lösung. Sie bestehen aus sogenannten amphiphilen Molekülen, die einen hydrophilen (wasserliebenden) Kopf und eine hydrophobe (wasserabweisende) Hydrocarbon-Kette besitzen. In Lösung (z.B. Wasser) und ab einer kritischen Anzahl an Amphiphilmolekülen rücken die wasserabweisenden Ketten zusammen und die wasserliebenden Köpfe zeigen in Richtung des Lösungsmittels. Die resultierende Form nennt man z.B. bei Seifen Micelle [88], die