

# **Adaptive Strahlungstransmission von Verglasungen mit Flüssigkristallen**

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Walter Haase

geboren in Neubeuern am Inn

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Werner Sobek

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. Dr. E. h. mult. Karl Gertis  
Prof. Dr.-Ing. Norbert Frühauf

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Juli 2004

Zentrallabor des Konstruktiven Ingenieurbaus

2004





## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrallabor des Konstruktiven Ingenieurbaus der Universität Stuttgart.

Herrn Professor Dr.-Ing. Werner Sobek, Direktor des Zentrallabor des Konstruktiven Ingenieurbaus, danke ich für seine Anregung, eine Arbeit auf dem Gebiet der adaptiven Gebäudehüllen aufzunehmen, für seine Bereitschaft die interdisziplinäre Aufgabenstellung zu betreuen und für seine kontinuierliche Förderung während des Entstehens. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. Dr. E. h. mult. Karl Gertis gilt mein Dank für sein großes Interesse an dieser Arbeit, für die Übernahme des Mitberichtes sowie für die gründliche und kritische Durchsicht. Herrn Prof. Dr.-Ing. Norbert Frühauf, Direktor am Lehrstuhl für Bildschirmtechnik, danke ich für seine Bereitschaft, mir Zugang zu seinen Laborräumen zu gewähren. Auch für die Mühen, die mit der Übernahme des Mitberichts verbunden waren sowie für die profunde Durcharbeitung meiner Arbeit, gilt mein Dank.

An dieser Stelle möchte ich auch den Kollegen am Zentrallabor des Konstruktiven Ingenieurbaus, am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, am Lehrstuhl für Bildschirmtechnik, am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik sowie am Institut für Physikalische Chemie für die mir in vielfältiger Weise gewährte Unterstützung besonders danken. Ohne die Bereitschaft zur kostenlosen Überlassung von Materialproben, die Gewährung der Nutzung von Fertigungseinrichtungen oder auch die Herstellung von Proben wäre die Arbeit im vorliegenden Umfang nicht möglich gewesen. Daher gilt mein besonderer Dank den der Firmen GLASFISCHER, Optiva Inc., TEC-DIS S. p. A., CODIXX AG sowie Merck KGaA.

Meiner Familie und vor allem meiner Ehefrau danke ich für die gewährten Freiräume und für die Erduldung, der mit der Erstellung der Arbeit verbundenen Entbehungen. Ohne die Unterstützung durch meine Familie wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.



<b>Verzeichnis der wichtigsten Symbole und Abkürzungen</b>	IX
<b>Abstrakt</b>	XV
<b>Abstract</b>	XVII
<b>1. Einleitung</b>	1
<b>2. Derzeitiger Wissensstand adaptiver Systeme</b>	4
2.1 Thermotrope Systeme	4
2.2 Gasotrope Elemente	6
2.3 Elektrotrope Elemente	8
2.3.1 Elemente auf Wolframtrioxidbasis	8
2.3.2 Systeme auf Basis von "polymer dispersed liquid crystals" (PDLC).	9
2.3.3 Systeme auf der Basis von "suspended-particles" (SP)	10
2.4 Weitere Systeme	12
2.4.1 Photoelektrochrome Elemente	12
2.4.2 Photochrome Gläser	12
2.5 Vergleichende Bewertung	13
<b>3. Verdrillt nematische und lyotrope Flüssigkristall-Systeme</b>	15
3.1 Grundlagen der Funktion, Wirkungsweise und Beurteilung	15
3.1.1 Strahlungsphysik	15
3.1.2 Farbmetrik	18
3.1.3 Polarisation und Polarisatoren	23
3.1.4 TN-Zelle	28
3.2 Eigenschaften von Flüssigkristallen	31
3.3 Herstellung von Flüssigkristall-Testzellen	35
<b>4. Komponenten einer Flüssigkristall-Zelle.</b>	42
4.1 Glasscheiben	42
4.1.1 Beschreibung der optischen Eigenschaften	42
4.1.2 Farbmaßzahlen	50
4.2 Flächenpolarisatoren	51
4.2.1 Folienpolarisatoren	52
4.2.2 Glaspolarisatoren	55
4.3 Polarisierende Beschichtungen aus lyotropen Flüssigkristallen	57
4.3.1 Untersuchte Flüssigkristallmischungen und deren Besonderheiten.	57
4.3.2 Verfahren zur Herstellung einer Polarisatorschicht	58
4.3.3 Schichtdickenabhängigkeit der Transmission und des Schalthubes	59
4.3.4 Zelleninterner Polarisator mit orientierender Wirkung.	61
4.3.5 Optische Kenndaten	63
4.3.6 Transmissionsmessung	65
4.3.7 Farbmaßzahlen	66
4.3.8 Temperaturbeständigkeit der untersuchten Polarisatorarten	66
4.3.9 Beschreibungsmodell für den Strahlungsdurchgang bei LLC-Polarisatoren.	67
4.3.10 Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile	72
4.4 Funktionsbeschichtungen	73
4.4.1 Indium-Zinn-Oxidschicht	74
4.4.2 Silizium-Dioxid-Schicht	77
4.4.3 Orientierungsschicht aus Polyimid	79
4.5 Flüssigkristall	80

<b>5.</b>	<b>Adaptive Eigenschaften einer LLC-TP-Zelle als Einheit</b>	83
5.1	Strahlungstransmissions-Eigenschaften	84
5.1.1	TN-Zellen mit internem LLC-TP-Nr.15 und PI-Orientierungsschicht	84
5.1.2	TN-Zellen mit internem LLC-TP-Nr.15 ohne PI-Orientierungsschicht	91
5.1.3	TN-Zelle mit internem LLC-TP bei optimierter Mischung	92
5.1.4	TN-Zelle mit Regelung	93
5.2	Farbeeigenschaften	94
5.3	Schalteeigenschaften und Energieverbrauch	95
5.3.1	Schaltzeiten	95
5.3.2	Temperaturabhängigkeit der Schaltzeiten	97
5.3.3	Ansteuerung	99
5.3.4	Energieverbrauch einer TN-Zelle	99
<b>6.</b>	<b>Kurzzeit- und Langzeitverhalten einer Flüssigkristall-Zelle und deren Komponenten</b>	101
6.1	Temperaturverhalten im Freiland	101
6.1.1	Proben	101
6.1.2	Extremwerte der Temperaturen an den Proben	105
6.2	Temperaturverhalten im Sonnensimulator	110
6.2.1	Die Proben	110
6.2.2	Der Sonnensimulator	114
6.2.3	Messergebnisse	115
6.3	Transmissionsänderung durch Alterung	116
6.3.1	Folienpolarisatoren aus Freilandversuch	117
6.3.2	Glaspolarisatoren aus Freilandversuch	120
6.3.3	LLC-TPolarisatoren aus Freilandversuch	122
6.4	Komponenten im Klimaschrank	123
<b>7.</b>	<b>Implementierungsmöglichkeiten von LLC-TP-Zellen in adaptive Verglasungen</b>	125
7.1	Prinzipieller Aufbau der Isolierglasvarianten	125
7.2	Optische Eigenschaften der untersuchten Isolierglaseinheiten	127
7.3	Farbmaßzahlen	132
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	135
	<b>Literaturverzeichnis</b>	142
	<b>Anhang A</b>	149
	<b>Anhang B</b>	152
	<b>Anhang C</b>	153
	<b>Anhang D</b>	154
	<b>Anhang E</b>	155
	<b>Lebenslauf</b>	156

## Verzeichnis der wichtigsten Symbole und Abkürzungen

A	Absorptionsgrad; Fläche [ $m^2$ ]
$A_{n,SOL}$	Absorptionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im solaren Spektrum (300 nm 2500 nm, 380 nm 780 nm)
$A_{n,VIS}$	Absorptionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im sichtbaren Spektrum (380 nm 780 nm)
a	optische Kenngröße, z.B. A,R,T; Absorptionskoeffizient
$a_h$	hemisphärischer, spektraler Wert der Größe a
a	Rot-Grün-Anteil einer Farbe im $L a b$ -Farbraum CIE 1976
b	Breite [mm], [cm]
b	Gelb-Blau-Anteil einer Farbe im $L a b$ -Farbraum CIE 1976
$C_{ab}$	Buntheit oder Chroma einer Farbe
$C_{ab,  }$	Buntheit eines matt weißen Körpers unter Beleuchtung mit transmittiertem Licht nach Durchgang durch zwei parallele Polarisatoren
$C_{ab,}$	Buntheit eines matt weißen Körpers unter Beleuchtung mit transmittiertem Licht nach Durchgang durch zwei gekreuzte Polarisatoren
c	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum [m/s]
$D_{65}$	Normlichtart mit spektraler Strahlungsflußverteilung entsprechend dem Tageslicht
d	Dicke [mm]; Dicke der Flüssigkristallschicht [ m]
$\vec{E}$	Feldvektor des elektrischen Feldes [V/m]
$E_{e,1,2}$	Betrag des Feldvektors des einfallenden Strahles [V/m]
$E_0$	Amplitude des E-Feldes [V/m]
$\vec{E}_0$	elektrische Feldstärke im Vakuum [V/m]
$E_{r,1,2}$	Betrag des reflektierten Feldvektors [V/m]
$E_{t,1,2}$	Betrag des transmittierten Feldvektors [V/m]
$\vec{F}$	Vektor der Kraft [N]
$f=1/T$	Frequenz [Hz]
g	Gesamtenergiedurchlassgrad
h	Höhe [cm]
$h_i$	Besetzungszahl für das Auftreten von Temperaturmaxima in einem bestimmten Temperaturintervall i
I S	Bestrahlungsstärke [ $W / m^2$ ]
K	spektrale Bestrahlungsdichte [ $W / (m^2 nmsr)$ ]
$k_x, k_y, k_z$	Absorptionskoeffizienten für die Richtung X,Y und Z
$K_{11}$	elastische Konstante, Spreizung [ $10^{12}$ N]
$K_{22}$	elastische Konstante, Verdrehung [ $10^{12}$ N]
$K_{33}$	elastische Konstante, Biegung [ $10^{12}$ N]
k	Multiplikator
$k \cdot 2 \cdot 1$	Wellenzahl [rad/m]
$\vec{k} \cdot c \cdot 1 \cdot \vec{n} \cdot \vec{s}$	Wellenvektor [rad]
L	Leuchtdichte [ $cd / m^2$ ]
L	Helligkeitswert einer Farbe im $L a b$ -Farbraum CIE 1976
n	Brechungsindex, Realteil

$\vec{n}$	Richtungsvektor entlang der Längsachse des Flüssigkristalls, Direktor
$n_e$	Brechungsindex für den außerordentlichen Strahl, Realteil
$\tilde{n}$	komplexer Brechungsindex, homogenes isotropes Material
$n_j$	Häufigkeit des Auftretens bestimmter Temperaturwerte
$\tilde{n}_i$	komplexer Brechungsindex für die Richtung $i=X,Y,Z$ oder $i=e,o$
$n_o$	Brechungsindex für den ordentlichen Strahl, Realteil
$n_x, n_y, n_z$	Brechungsindex für die Richtung X, Y und Z, Realteil
$n$	optische Anisotropie
$n_e$	
$n_o$	
P	elektrische Leistung [W]
Q	elektrische Ladung [C]
R	Reflexionsgrad
$R_{n,SOL}$	Reflexionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im solaren Spektrum (300 nm 2500 nm, 380 nm 780 nm)
$R_{n,SOL  }$	Reflexionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im solaren Spektrum (300 nm 2500 nm, 380 nm 780 nm) von parallelen Polarisatoren
zwei	
$R_{n,SOL}$	Reflexionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im solaren Spektrum (300 nm 2500 nm, 380 nm 780 nm) von zwei gekreuzten Polarisatoren
$R_{n,h,SOL}$	gerichtet-hemisphärischer Reflexionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im solaren Spektrum (300 nm 2500 nm, 380 nm 780 nm). Definiert den Anteil der Strahlung, der Element in den vorderen Halbraum reflektiert wird.
vom	
$R_{n,VIS}$	Reflexionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im sichtbaren Spektrum
$R_{n,VIS  }$	Reflexionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im sichtbaren Spektrum von zwei parallelen Polarisatoren
$R_{n,VIS}$	Reflexionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im sichtbaren Spektrum von zwei gekreuzten Polarisatoren
$R_{n,h,VIS}$	gerichtet-hemisphärischer Reflexionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im sichtbaren Spektrum. Definiert den Anteil der Strahlung, der vom Element in den vorderen Halbraum reflektiert wird.
$R_{1,2}$	Reflexionsgrad am Übergang vom Medium 1 ins Medium 2
$R_{2,3}$	Reflexionsgrad am Übergang vom Medium 2 ins Medium 3
$R_{1,3}$	Reflexionsgrad für den Übergang vom Medium 1 ins Medium 3
$R_{1,5}$	Reflexionsgrad für den Übergang vom Medium 1 ins Medium 5
$R_{1,7}$	Reflexionsgrad für den Übergang vom Medium 1 ins Medium 7
$\vec{r}$	Stützvektor auf die Wellenebene [m]
$r_{  ,i,j}$	Amplituden-Reflexionskoeffizient der parallelen Komponente des $\vec{E}$ -Vektors nach Fresnel
$r_{\perp,i,j}$	Amplituden-Reflexionskoeffizient der senkrechten Komponente des $\vec{E}$ -Vektors nach Fresnel
S	bestrahlte Fläche [ $m^2$ ]
s	Gewichtungsfunktion
$\vec{s}$	Einheitsvektor in Strahlrichtung
S	normierte, spektrale, relative Strahlungsflußverteilung nach EN 410 Tabelle 2 [ $W / (m^2 nm)$ ]

$T$	Transmissionsgrad; Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ], Periodendauer [s]
$T_n$	Transmissionsgrad bei flächennormalem Strahleinfall
$T_{n,SOL}$	Transmissionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung solaren Spektrum (300 nm 2500 nm, 380 nm 780 nm)
$T_{n,SOL  }$	Transmissionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im solaren Spektrum (300 nm 2500 nm, 380 nm 780 nm) von zwei parallelen Polarisatoren
$T_{n,SOL}$	Transmissionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im solaren Spektrum (300 nm 2500 nm, 380 nm 780 nm) von zwei gekreuzten Polarisatoren
$T_{n,h,SOL}$	gerichtet-hemisphärischer Transmissionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im solaren Spektrum (300 nm 2500 nm, 380 nm 780 nm). Definiert den Anteil der Strahlung, der vom Element in den dahinter liegenden Halbraum transmittiert wird.
$T_{n,VIS}$	Transmissionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im sichtbaren Spektrum
$T_{n,VIS  }$	Transmissionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im sichtbaren Spektrum von zwei parallelen Polarisatoren
$T_{n,VIS}$	Transmissionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im sichtbaren Spektrum von zwei gekreuzten Polarisatoren
$T_{n,h,VIS}$	gerichtet-hemisphärischer Transmissionsgrad bei flächennormaler Bestrahlung im sichtbaren Spektrum. Definiert den Anteil der Strahlung, der vom Element in den dahinter liegenden Halbraum transmittiert wird.
$T_{1\ 2}$	Transmissionsgrad am Übergang vom Medium 1 ins Medium 2
$T_{2\ 3}$	Transmissionsgrad am Übergang vom Medium 2 ins Medium 3
$T_{1\ 3}$	Transmissionsgrad für den Übergang vom Medium 1 ins Medium 3
$T_{1\ 5}$	Transmissionsgrad für den Übergang vom Medium 1 ins Medium 5
$T_{1\ 7}$	Transmissionsgrad für den Übergang vom Medium 1 ins Medium 7
$T_{  }$	Transmissionsgrade von zwei Polarisatoren in paralleler Anordnung
$T$	Transmissionsgrade von zwei Polarisatoren in gekreuzter Anordnung
$T$	Differenz zweier Transmissionsgrade
$T\ T_{  }\ T$	Differenz der Transmissionsgrade von Polarisatoren in paralleler und gekreuzter Anordnung
$T_{n,SOL}$	Differenz der Transmissionsgrade im gesamten solaren Spektrum
$T_{n,VIS}$	Differenz der Transmissionsgrade im sichtbaren Spektrum
$T_{TE,i}\ TE,j$	Temperaturdifferenz zweier Temperatursensoren i und j [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$t$	zeitliche Variable [s]
$t_{  ,i\ j}$	Amplituden-Transmissionskoeffizient der parallelen Komponente des $\vec{E}$ -Vektors nach Fresnel
$t_{\perp,i\ j}$	Amplituden-Transmissionskoeffizient der senkrechten Komponente des $\vec{E}$ -Vektors nach Fresnel
$U$	Wärmedurchgangskoeffizient [ $\text{W} / (\text{m}^2\text{K})$ ]; Spannung [V]
$U_{th}$	Schaltspannung (zu englisch "threshold"=Grenzwert) [V]
$v$	Phasengeschwindigkeit der elektromagnetischen Strahlung [m/s]

$x$	zurückgelegte Wegstrecke [m]
$X_i$	Normfarbwert
$X_n$	Normfarbwert des vollkommen matt weißen Körpers
$\bar{x}(\lambda)$	Normspektralwertfunktion nach DIN 5033 Teil 2
$Y_i$	Normfarbwert
$Y_n$	Normfarbwert des vollkommen matt weißen Körpers
$\bar{y}(\lambda)$	Normspektralwertfunktion nach DIN 5033 Teil 2
$Z_i$	Normfarbwert
$Z_n$	Normfarbwert des vollkommen mattweißen Körpers
$\bar{z}(\lambda)$	Normspektralwertfunktion nach DIN 5033 Teil 2

## Griechische Symbole

		Winkel zur Hauptrichtung [°]
		Verdrehwinkel [rad,°]
$\gamma$		Drehviskosität des nematischen Flüssigkristalls [ $10^{-3} \text{ Nm}^{-2} \text{ s}$ ]
$d$	$E_2 / E_1$	Abschwächung der Bestrahlungsstärke beim Durchlaufen einer dünnen Schicht
$dd$	$2 / 1$	Abschwächung der Strahlungsleistung beim Durchlaufen einer dicken Schicht
		Permittivität [ $\text{C}/(\text{Vm})=\text{F}/\text{m}$ ]
$\epsilon_0$	$8.854 \cdot 10^{-12}$	elektrische Feldkonstante [ $\text{C}/(\text{Vm})=\text{F}/\text{m}$ ]
$\epsilon_{\parallel}$	$\parallel$	Permittivitätszahl parallel zum Direktor
$\epsilon_{\perp}$		Permittivitätszahl senkrecht zum Direktor
	$\parallel$	dielektrische Anisotropie
		Elevationswinkel, Einfallswinkel zur Flächennormalen [rad, °]
$e$		Einfallswinkel [rad,°]
$r$		Reflexionswinkel [rad,°]
$t$		Transmissionswinkel [rad,°]
		Streckung, Verhältnis von Länge zu Breite [-]
		Wellenlänge [nm]
$d$		Wellenlängenintervall [nm]
		Schaltzeit [ms,s]
$off$		Ausschaltdauer [ms]
$on$		Einschaltdauer [ms]
		Strahlungsfluss [W]; Azimutwinkel [rad,°]
		Farbreizfunktion
$\omega$	$2 \pi T^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit [rad/s]

## Abkürzungen

AF	Abkürzung für Alterungsproben im Freiland
AM	Maß für die Weglänge des direkten Sonnenlichts durch die Atmosphäre auf eine Fläche in Meereshöhe (zu englisch "air mass"). Als AM 1 wird der kürzeste Weg durch die Atmosphäre auf die Fläche bezeichnet. AM 1 wird erreicht bei zenitalem Sonnenstand also bei einem Flächenstandort am Äquator.
AT	Abkürzung für Alterungsproben unter Temperaturlast
CAB	Celluloseacetobutyrat



$CeO_2$	$TiO_2$	Cerdioxid-Titandioxid-Schicht
CP		Produktabkürzung für Glaspolarisatoren (s. Anhang D-h)
EN		Europäische Norm
ESG		Einscheibensicherheitsglas
FTO		Flour dotiertes Zinnoxid
HM		reflektierend für Wärmestrahlung (zu englisch "heat mirror")
HN		Produktabkürzung für Linearpolarisatoren auf Folienbasis
HNCP		Produktabkürzung für Zirkularpolarisatoren auf Folienbasis
$H_2$		Wasserstoff
$H_2O$		Wasser
IR		Infrarote(-Strahlung)
ITO		Indium-Zinnoxid (zu englisch "indium-tin-oxid")
LCD		Flüssigkristall-Anzeige (zu englisch "liquid crystal display")
LDR		lichtempfindlicher Widerstand (zu englisch "light dependent resistor")
LLC		Lyotroper Flüssigkristall (zu englisch "lyotropic liquid crystal")
LLCP		Lyotroper Flüssigkristall-Polarisator (zu englisch "lyotropic liquid crystal polarizer")
Low-E		Beschichtung zur Verringerung der Emissivität (von englisch "low emissivity"=geringe Emissivität)
N		Abkürzung für Proben mit LLC
NB		"normally black"
NW		"normally white"
O		Abkürzung für TN-Zellen Muster
OP		Abkürzung für Proben mit LLC
PA		Abkürzung für Proben zur praktischen Anwendung
PDLC		Flüssigkristall, der in winzigen kugelförmigen Tröpfchen in einer Polymerschicht eingelagert ist (zu englisch "polymer dispersed liquid crystals")
PET		Polyethylenterephthalat
PI		Polyimid
Pt		Platin
PVA		Polyvinylalkohol
RKM		Rasterkraftmikroskop
$SiO_2$		Siliziumdioxid
SO		Abkürzung für Sonnensimulator-Proben
SP		Suspension mit Partikeln (zu englisch "suspended-particle")
SPD		Funktionselement basierend auf einer Suspension von strahlungsabsorbierenden, gleichartigen Feststoffpartikeln in einer Lösung (zu englisch "suspended-particle devices")
STN		zu englisch "super twisted nematic", Flüssigkristallzelle mit Drehung des Direktors in der Flüssigkristallschicht zwischen 180° und 270° (üblicherweise zwischen 210° und 270°)
SW		Abkürzung für TN-Zellen Muster
SZR		Scheibenzwischenraum
T		Abkürzung für TN-Zellen Muster
TE		Thermoelement
$TiO_2$		Titandioxid
TN		Verdrillt nematisch (zu englisch "twisted nematic")

TN-LC	Verdrillt nematischer Flüssigkristall (zu englisch "twisted nematic liquid crystal")
TTSB	Produktabkürzung für ein Polymerblend
UV	Ultraviolette(-Strahlung)
VI	Abkürzung für Proben in verschlossenem Isolierglas
VSG	Verbundsicherheitsglas
WI	Abkürzung für Proben in wiederverschließbarem Isolierglas
WO <sub>2</sub>	Wolframdioxid
WO <sub>3</sub>	Wolframtrioxid
YH <sub>2</sub>	Yttriumhydrid
Z	Abkürzung für TN-Zellen Muster
ZLI	Produktabkürzung für Flüssigkristalle (s. Anhang D-a)
ZP	Abkürzung für Zellen-Proben

## Abstrakt

Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu untersuchen, ob und mit welchem Aufbau sich verdrillt-nematische Flüssigkristallzellen (zu englisch "twisted nematic", TN-Zellen) eignen, um als Licht- und Energiestrom regelnde Fensterelemente am Gebäude eingesetzt werden zu können. Es wurden hierzu Muster solcher TN-Zellen in diversen Aufbauten hergestellt, die Einwirkungen, resultierend aus der Bestrahlung auf ein solches Element qualitativ und quantitativ spezifiziert und die optischen Eigenschaften für ausgewählte Aufbauten der Funktionselemente charakterisiert. Versuche zur kurzzeitigen thermischen Belastung sowie Langzeit-Freilandversuche dienten zur Verifizierung der Schädigung der Funktionsschichten und der Elemente. Die Ergebnisse der Versuche waren Grundlage für die Auswahl geeigneter und langzeitstabiler Komponenten eines stufenlos schaltbaren Elementes.

Eine TN-Zelle benötigt zur Funktion zwei Polarisatoren. Wegen der bekannten Temperatur- und Feuchteempfindlichkeit der Folienpolarisatoren (PVA/CAB) dienten Versuche zur kurzzeitigen thermischen Belastung sowie Langzeit-Freilandversuche zur Verifizierung der Schädigung dieser Polarisatoren. Wie gezeigt werden konnte, führt bereits eine kurzzeitige thermische Einwirkung von 85°C zu einer Verschlechterung der Polarisationswirkung. Dass solch hohe Temperaturen an den Polarisatoren auftreten können, wurde ermittelt durch entsprechende Messungen an Folienpolarisatorproben in paralleler und gekreuzter Anordnung, die in Isoliergläser eingebracht waren und im Freiland ausgesetzt wurden. Als einziger anwendbarer Polarisatortyp hat sich eine polarisierenden Schichten aus dichroitischen, lyotropen Flüssigkristallen (zu englisch "lyotropic liquid crystal", LLC) herausgestellt. Diese wird beispielsweise durch Aufrollen mit einer Rakel auch großflächig hergestellt. Durch die Mischung des LLC lässt sich die spektrale Transmission beeinflussen. Es ist so möglich, bunte wie auch weitgehend neutrale, graue Polarisationschichten herzustellen. Durch die Schichtdicke wird die maximale Transmission wie auch der Schaltnub, die Differenz zwischen nicht angesteuerter und angesteuerter Zelle, festgelegt. Durch die geringe Dicke einer solchen Polarisatorschicht ist diese für eine interne Anordnung im Schichtaufbau der TN-Zelle selbst hervorragend geeignet. Für entsprechend hergestellte TN-Zellen konnte die Funktionsfähigkeit durch Muster nachgewiesen werden. Auch gelang es die Molekülhlausrichtung des LLC-Polarisators zur Orientierung des TN-Flüssigkristalls heranzuziehen. Selbst ohne dass der LLC-Polarisator zur Orientierung verwendet wird, lässt sich eine licht- und energieregelnde TN-Zellen-Einheit in kompakter Bauweise mit lediglich vier Beschichtungsgängen (leitfähige Beschichtung, Haftschicht, LLC-Polarisator-Schicht, Orientierungsschicht) herstellen.

Um sowohl die Transmissions- als auch die Farbeigenschaften der einzelnen Komponenten der TN-Zelle bewerten zu können, dienten spektrometrische Messungen an den diversen Proben sowie Berechnungen zum Transmissionsverhalten. Die Bestimmung des Einflusses der Schichtdicke auf die Eigenschaften wurde ermittelt für Schichtdicken des LLC-Polarisators von 100 nm bis 400 nm. Es ergeben sich Transmissionsgrade zwischen 0.3 und 0.49 (Zelle ungeschaltet) beziehungsweise von 0.04 bis 0.41 (Zelle geschaltet) im Bereich sichtbaren Lichtes bei senkrechtem Lichteinfall auf die TN-Zellen. Für eine Schichtdicke von 100 nm ist dabei zwar die maximale Durchlässigkeit groß (0.49) aber der Schaltnub gering (0.08). Eine Schichtdicke von 200 nm weist bei einem Transmissionsgrad von 0.37 bereits einen Schaltnub

von 0.2 auf. Die farbverändernde Wirkung der untersuchten Polarisatoren lässt sich an Hand der Buntheit nach dem  $L^*a^*b^*$ -Farbsystem beurteilen. Der LLC-Polarisator weist bezüglich kleiner Farbwertänderungen besseres Verhalten auf als Glaspolarisatoren, jedoch sind sie diesbezüglich schlechter als Folienpolarisatoren.

Eine entsprechende TN-Zelle (LLC-Polarisator-Schichtdicke 200 nm) im Zwischenraum einer Isolierverglasung eingebettet weist einen Transmissionsgrad von 0.33 (ungeschaltet) bei einem Schalhub von 0.2 auf. Für übliche Sonnenschutzverglasungen liegen die Transmissionwerte zwischen 0.15 und 0.66.

Zur Verifizierung des Alterungsverhaltens des Flüssigkristalls der TN-Zellen sowie der drei Polarisatorarten (Folien-, Glas- und LLC-Polarisator) unter Umwelteinfluss waren diese, eingebettet in einen Isolierglasaufbau, im Freilandversuch ausgebracht worden. Die Freilandproben der Folienpolarisatoren zeigten nach der Exposition eine deutlich geringere Polarisationswirkung verbunden mit einer ausgeprägten Veränderung der spektralen Transmission. Auf die Glaspolarisatoren hatte der Freilandaufenthalt keine messbar schädigende Wirkung. Bei den LLC-Polarisatoren erfolgte keine wesentliche Veränderung der optischen Eigenschaften. Auf den Flüssigkristall innerhalb der TN-Zellen hatte die Freilandaussetzung keinen messbaren Einfluss.

Neue Technologien zur Herstellung preiswerter und effektiver Polarisatoren lassen die TN-Zellen als Licht- und Energiestrom regelnde Bestandteile der Gebäudehülle als interessante Alternative zu herkömmlichen Sonnenschutzmaßnahmen oder auch zu den regelbaren Verglasungen auf der Basis "smarter Werkstoffe" erscheinen. Die favorisierte LLC-Polarisator-Technologie bietet gegenüber anderen Systemen wesentliche Vorteile dadurch, dass das Transmissionsspektrum beeinflusst werden kann bis hin zu einer Verschiebung des absorbierenden Bereiches in das Spektrum der infraroten Strahlung. Auch eine gleichzeitige Absorption im sichtbaren wie auch im IR-Bereich ist möglich. Um das Potential, das sich hierdurch erschließen ließe, bestimmen zu können sind weitergehende Arbeiten in enger Kooperation mit dem Hersteller des LLC-Flüssigkristalls nötig. Zusätzliches Potential zur Kostensenkung und Vereinfachung der Herstellung bietet die Nutzung der Ausrichtungswirkung der LLC-Schicht auf den TN-Flüssigkristall nach entsprechender Verbesserung dieses Effektes.

Die Effizienz der vorgestellten TN-Zellen im Hülleneinsatz kann mit den, in der Arbeit dokumentierten Kenndaten bestimmt werden und wird bei der Entscheidung für oder gegen die Umsetzung der TN-Technologie für architektonische Anwendungen eine gewichtige Rolle einnehmen. Die Darstellung der physikalischen Grundlagen der Bewertung und Funktion, die Umsetzungs- und Verbesserungsmöglichkeiten sowie das Aufzeigen des Potentials zur kostengünstigen Herstellung eines innovativen Elementes zukünftiger Fassadengestaltung auf der Basis von Flüssigkristall-Zellen sind wesentliches Ergebnis der vorliegenden Arbeit.

## Abstract

The aim of the reported work is to investigate whether and which construction of twisted nematic liquid crystal cells (TN-cells) is suitable to be installed in buildings as a functional element for light and energy current regulation. In addition, various samples of TN-cells were produced. The effects resulting from the illumination and outdoor exposure on these samples are qualitatively and quantitatively specified. The optical properties for selected constructions of the functional elements are presented. To verify the aging of the components and the complete TN-cells short term temperature tests and long term outdoor tests were undertaken. Based on the results of these tests suitable and long term stable components could be chosen to assemble a continuously adjustable element.

TN-cells need two polarizers to control light transmission. Due to the well known temperature and humidity sensibility of foil polarizers (PVA/CAB), short term temperature tests and long term outdoor tests were undertaken to verify the sample damage. It is shown that the short term influence of 85°C causes a degradation of the polarizing effect of foil polarizers. Measurements on samples of foil polarizers in parallel and crossed position, placed inside a double glazing and exposed outdoors, showed that high temperatures may occur. Polarizing layers made of dichroic lyotropic liquid crystals (LLC) are very suitable for large area applications. The temperature stability of LLC polarizers is sufficient. This material undergoes shear alignment while being coated onto a plastic or glass substrate using for example a doctor blade. The mixture of the LLC dyes affects the spectral transmission of the polarizer. Therefore, it is possible to produce colored or nearly neutral gray layers. The maximum transmission as well as the transmission range is controlled by the thickness of the dye layers. By increasing the thickness, the maximum transmission decreases. Because of the thinness of these polarizer films, they are very suitable for use inside a TN-cell assembly. Samples of TN-cells which use internal polarizer films were produced. They are particularly promising. The idea of using the LLC layer to align the TN liquid crystal at the boundaries is obvious. Without a conventional PI-orientation layer, samples proved that the LLC film aligns the nematic liquid. Even if the LLC layer is not used for orienting the nematic liquid crystal, a light and energy regulating TN-cell-element with a compact construction using only four layers (conducting layer, adhesive layer, LLC polarizer, orientation layer) can be produced.

In order to estimate transmission and color properties of the separate components of a TN-cell, spectrometric measurements of several samples were done. The components' transmission and reflection properties were also calculated using the derived algorithms. According to thicknesses of the LLC layer in the range of 100 nm up to 400 nm, transmission values between 0.3 and 0.49 (off-state) and 0.04 to 0.41 (on-state) occur. These values correspond to perpendicular transmission of visible light through TN-cells. With a sheet thickness of 100 nm, the maximum transmission is high (0.49) however, the transmission range is low (0.08). With a LLC layer thickness of 200 nm, a transmission of 0.37 and a range of 0.2 is calculated. The effect of the polarizers on color changes can be estimated by the chroma,  $C_{ab}^*$ , according to the  $L^*a^*b^*$ -color system. When compared with glass polarizers, the LLC polarizer leads to smaller chroma changes and is therefore superior. However, the LLC type is still not as good as foil polarizers.

A TN-cell with LLC polarizer (LLC-polarizer thickness 200 nm) placed between a double glazing, exhibits a transmission value of 0.33 (off-state) and a range of 0.2. Conventional sunscreen glazings show values of 0.15 to 0.66.

To verify the aging of the liquid crystal inside the TN-cell, as well as the three polarizer types under outdoor conditions, samples placed inside a double glazing were used. The foil polarizer samples showed a clear reduction in polarizing efficiency after exposure as well as distinct changes in the spectral transmission. Measured optical properties of the glass polarizers were not changed after outdoor exposure. The aging of the LLC samples could not be detected directly by transmission measurements because of inhomogeneities in the LLC layer thickness. Nevertheless, as a result of indirect detection no significant changes in the optical properties were measured.

New technologies to produce low cost and efficient polarizers present TN-cell elements as an interesting alternative to conventional sun shading systems or even other smart material based systems for use as light and energy regulating windows in buildings. LLC based polarizer systems exhibit many advantages, such as adjustable spectral transmission. Even an adjustment of the absorption of the IR-spectrum seems to be possible. A combined absorption in both the visible and the IR range can be achieved. Further work in conjunction with the LLC producer is necessary to be able to estimate the full potential of these options. If, after more detailed investigations, the LLC layer could be used to align the TN liquid crystal by improving this effect, this could lead to further cost reduction.

The efficiency of the introduced TN-cells for building facades can be estimated by using the presented properties, and will be a critical factor in the decision whether the architectural application of TN-technology makes sense.

The description of the physical basics of evaluation and function, as well as the representation of options to improve production of an innovative element of future facade design using liquid crystal cells, are the essential results of the present work.



# 1. Einleitung

Die Aufgabe einer Gebäudehülle ist es, die Innenwelt von der Außenwelt zu trennen. Dabei sollte der größtmögliche Nutzerkomfort erreicht werden bei gleichzeitiger Minimierung des Ressourcen- und Energieverbrauchs für den Bau des Gebäudes und dessen Nutzung. Da weder die von außen einwirkenden klimabedingten Energieströme konstante, gleichbleibende Größen darstellen noch die Erwartungen der Nutzer an das Gebäude und dessen Innenraumklima unveränderlich sind, darf folglich auch die Hülle keine konstanten Eigenschaften aufweisen. Gefordert ist vielmehr eine anpassungsfähige "Gebäudehaut", die im Bereich der Energietransmission, der Energieabsorption sowie der Außenwirkung, um nur einige zu benennen, wirksam ist [1.1 bis 1.3].

Systeme, die die doppelbrechende Eigenschaft verdrillter, nematischer Flüssigkristalle (zu englisch "twisted nematic liquid crystal", TN-LC) nutzen und in der Lage sind, den Strahlungsdurchgang aktiv und schnell zu regulieren, erschienen bisher für eine entsprechende Anwendung im Gebäudeaußenbereich nicht geeignet zu sein. Gründe hierfür waren zum einen die Empfindlichkeit der im System notwendigen Komponenten, besonders der Polarisatoren, gegenüber den äußeren Einflüssen wie zum Beispiel Temperaturbelastungen und UV-Bestrahlung, zum anderen aber auch die kostenintensiven Erfordernisse des Herstellungsprozesses in einer Reinraumumgebung und die hohen Kosten für die erforderlichen Einzelkomponenten. Aktuelle Entwicklungen vor allem im Bereich polarisierender Beschichtungen aus lyotropen Flüssigkristallschichten (zu englisch "lyotropic liquid crystal polarizer", LLCP), hin zu beständigen und kostengünstig herstellbaren Bestandteilen lassen es interessant erscheinen, die TN-Zellen-Technologie in modifizierter Bauart beispielsweise für regelbare Fenstersysteme einzusetzen. Die Vorzüge eines Flüssigkristallfensters gegenüber den Elementen mit thermotropem, elektrotropem oder gasotropem Funktionsprinzip sind gewichtig [1.4]. Abgeleitet von den bekannten Flüssigkristallzellen der Anzeigentechnik sind die geringe Schaltzeit, der geringe Energieverbrauch, die stufenlose Einstellbarkeit des Strahlungsdurchganges innerhalb der möglichen Grenzen, eine geringe Farbverfälschung sowie ein geringer Installations- und Versorgungsaufwand als Eigenschaften eines solchen Elementes anzuführen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zu klären, ob und mit welchem Aufbau sich nematische Flüssigkristallzellen eignen um als adaptive Funktionselemente den Strahlungseintrag in ein Gebäude der Zukunft zu regeln.

Dazu werden die nachfolgenden Fragen im Rahmen dieser Arbeit geklärt:

- Welche Eigenschaften weisen die Komponenten einer Flüssigkristallzelle auf?
- Wo sind die Grenzen des Anwendungsbereiches für die verwendeten Werkstoffe beispielsweise bezüglich der thermischen Stabilität oder der UV-Stabilität?
- Welchen Einwirkungen ist ein adaptives Fensterelement mit entsprechenden Eigenschaften einer TN-Zelle ausgesetzt?
- Wie kann ein Flüssigkristall-Element demzufolge aufgebaut sein und welche Komponenten kommen für den Aufbau in Frage?
- Wie können gegebenenfalls der Herstellungsprozess und auch der Zellaufbau vereinfacht werden, um den Aufwand zum Bau eines schaltbaren Flüssigkristallfensters zu minimieren?

- Welches sind die Eigenschaften einer modifizierten Flüssigkristalleinheit?
- Wie und in welchem Bereich lassen sich die Eigenschaften einer TN-Zelle verändern, um unterschiedlichen Anforderungen beispielsweise nach großer Transparenz oder optimalem Sonnenschutz zu genügen?
- Wie kann ein adaptives Fensterelement mit integrierter Flüssigkristallschicht sinnvoll aufgebaut sein?
- Welche Eigenschaften weist ein solches adaptives Fenster auf?
- Verändern sich die Eigenschaften der Komponenten oder auch der TN-Zelle unter den Einwirkungen im Einsatz beispielsweise durch Alterung?

Um diese Fragen fundiert und detailliert beantworten zu können, sind vom Autor Muster von Komponenten und von kompletten Testzellen unterschiedlicher Art hergestellt worden. Versuche im Freiland, unter künstlicher Bestrahlung im Sonnensimulator oder auch im Klimaschrank lieferten die Ergebnisse zur Beurteilung des Verhaltens der Proben unter diversen Einflussparametern. Durch Messungen der spektralen Transmission und der Schichtdicken, um nur einige Messgrößen zu benennen, konnten die notwendigen Daten zur analytischen Beschreibung des Strahlungsdurchganges oder der Farbwirkung der untersuchten TN-Zellen-Systeme bestimmt werden. Mittels numerischer Berechnungen und entsprechender Parameterstudien war es möglich, ausgewählte Flüssigkristallzellen in Bezug auf deren Eigenschaften als Einzelzelle oder auch als Bestandteil einer Isolierverglasung zu optimieren und zu charakterisieren.

Wesentlicher Bestandteil der Arbeit ist die erstmalige Anwendung großflächiger, polarisierender Beschichtungen aus lyotropem Flüssigkristall innerhalb des TN-Zellaufbaus. Zahlreiche Modifikationen am Systemaufbau, an den Komponenten sowie am Herstellungsprozess der Testzellen während der Entwicklungsphase führten zu einem TN-Zellen-System, das den vorgenannten Anforderungen an ein anpassungsfähiges, transmissionsregelndes System eines zukünftigen Fensterelementes in vielerlei Hinsicht entspricht, dessen fertigungstechnischer Aufwand jedoch nicht unerheblich ist.

Für den, in dieser Arbeit vorgestellten Zellenaufbau einer TN-Flüssigkristalleinheit mit LLC-Polarisator ist die Eignung als adaptives Element einer Sonnenschutzverglasung nachgewiesen worden. Bei Optimierung auf maximale Durchlässigkeit ergibt sich für ein Isolierglas mit LLCP-TN-Zelle im Zwischenraum eine flächennormale Transmission für das sichtbare Lichtspektrum von  $T_{n,VIS}$  44% bei einem Schalhub von  $T_{n,VIS}$  8%. Ist es das Ziel, einen möglichst großen Schalhub zu erzielen, so liegt die maximale Transmission für ein Isolierglas mit einer entsprechenden LLCP-TN-Zelle bei  $T_{n,VIS}$  26% mit einem Schalhub von  $T_{n,VIS}$  23% (vgl. Tab. 7.2). Verfügbare absorbierende oder reflektierende Sonnenschutzisoliergläser weisen je nach Ausführung Transmissionswerte im Bereich von 15%  $T_{n,VIS}$  66% auf [1.5].

Unberücksichtigt bleibt bei den Betrachtungen dieser Arbeit der Kostenaspekt der Herstellung der Funktionszellen. Die hierfür notwendigen Prozesskostenermittlungen sprengen durch den dafür notwendigen Aufwand in Hinsicht auf die Anlagennutzung und -belegung vor allem der Reinraumtechnologien den zeitlichen und finanziell gegebenen Rahmen der Möglichkeiten dieser Arbeit. Von Bildschirmen, deren Abmessungen kleiner sind als großflächige Verglasungselemente im Fensterbau, weiß man aber, dass die Herstellungskosten hoch sind. Entsprechende kommerziell verfügbare Flüssigkristall-Bildschirme belegen in der Praxis, dass großflächige Flüssigkristallzel-



len die statischen Lasten aus Eigengewicht und die hydrostatischen Belastungen, resultierend aus der Flüssigkristallfüllung, abtragen können (z. B. BenQ 46" LCD-Fernseher,  $b \ h \ 102cm \ 57cm$ ). Daher sind statische Betrachtungen an den TN-Zellen ebenfalls nicht Gegenstand des Interesses dieser Arbeit.

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert: Kapitel 2 beinhaltet die Dokumentation des aktuellen Standes der Entwicklungen im Bereich adaptiver Systeme. In Kapitel 3 folgt die Vorstellung der allgemeinen Grundlagen zur Funktion und Beurteilung einer Flüssigkristallzelle sowie die Beschreibung des Aufbaus und der Herstellung der Muster und der Testzellen. Die Beschreibung der Eigenschaften der Einzelkomponenten einer schaltbaren Zelle bilden den Inhalt von Kapitel 4. Den Schwerpunkt des Kapitels 5 bildet die Charakterisierung einer kompletten TN-Zelle in Bezug auf deren optische sowie funktionale Eigenschaften. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen unter wechselnden Umweltbedingungen sowie der Alterung unter Kurz- und Langzeitbelastungen der Komponenten des Systems finden sich in Kapitel 6 wieder. Einige Implementierungsmöglichkeiten von LLCN-TN-Zellen als adaptives Element in eine Verglasung werden in Kapitel 7 vorgestellt. Dargelegt sind dort die radiometrischen, fotometrischen und auch farbmétrischen Charakterisierungen zusammen mit den entsprechenden Systemaufbauten. Die Zusammenfassung der Ergebnisse und eine Darstellung der Verbesserungs- und Modifikationsmöglichkeiten schließen die Arbeit in Kapitel 8 ab.

## 2. Derzeitiger Wissensstand adaptiver Systeme

Bereits seit geraumer Zeit forschen und entwickeln sowohl universitäre Einrichtungen als auch Firmen auf dem Gebiet der adaptiven Hüllenelemente. Die hierbei bereits vorgestellten adaptiven Systeme lassen sich in zwei Kategorien gliedern. Zum einen sind dies selbstreagierende Elemente zum anderen sind es induziert reagierende Systeme. Die selbstreagierenden Komponenten verändern ihre Elementeigenschaften in Verbindung mit Änderungen der physikalischen oder chemischen Umgebungsgrößen. Zu dieser Gruppe zählen die thermochromen sowie die photoelektrochromen Systeme. Zur Begriffsklärung sei an dieser Stelle angemerkt, dass bei der Benennung der Elementtypen die Ursache der Veränderung im Element an erster Stelle der Wortbildung steht und die sich verändernde Eigenschaft danach folgt. Bei einer thermochrom (von griechisch "therme" = Wärme, Hitze) reagierenden Einheit wird durch eine Temperaturänderung eine Farbänderung (von griechisch "chroma" = Farbe) hervorgerufen. Auch die Bezeichnung "thermotrop" hat sich eingebürgert. Sie kommt ebenfalls aus dem Griechischen (von "trepein" = sich drehen, ändern). Die Bezeichnungen "thermochrom" und "thermotrop" werden oftmals synonym verwendet. Bei den induziert reagierenden Elementen ist eine, über eine Steuerung oder Regelung veranlasste Änderung einer Einwirkung am Element die Ursache der Systemveränderung. Zu dieser Gruppe gehören die elektrochromen Elemente, bei denen ein elektrischer Strom zu einer Veränderung der Farbeigenschaft führt. Auch die gasotropen Anordnungen sind fremdgesteuert und verändern ihre Farbe durch eine chemische Reaktion mit einem in das Element einströmenden Gas. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten elektrooptischen Elemente auf der Basis der "twisted nematic"-Zelle sowie die Anordnungen unter Anwendung der "polymer dispersed liquid crystals" gehören ebenfalls in die Gruppe der induziert reagierenden Anordnungen; es sind also elektrochrome Elemente.

Nachfolgend werden einige Elemente, die sich in einem fortgeschrittenen Stadium der Entwicklung befinden oder bereits kommerziell erhältlich sind, im Detail vorgestellt. Systeme, die noch nicht zur Prototypenreife entwickelt sind oder systembedingt nicht im Gebäudehüllen- oder Gebäudeinnenbereich einsetzbar sind, werden kurz am Kapitelende beschrieben. Eingegangen wird jedoch ausschließlich auf Systeme, die die Wechseleigenschaften so genannter "smart materials" zur Eigenschaftsänderung heranziehen und nicht beispielsweise auf mechanischen Funktionskomponenten beruhen.

### 2.1 Thermotrope Systeme

Als thermotrope Schichten wurden entweder Hydrogele oder Polymerblends untersucht. Die Entwicklung von Systemen auf der Basis von Hydrogelen wurde bald wegen unlösbarer Schwierigkeiten eingestellt.

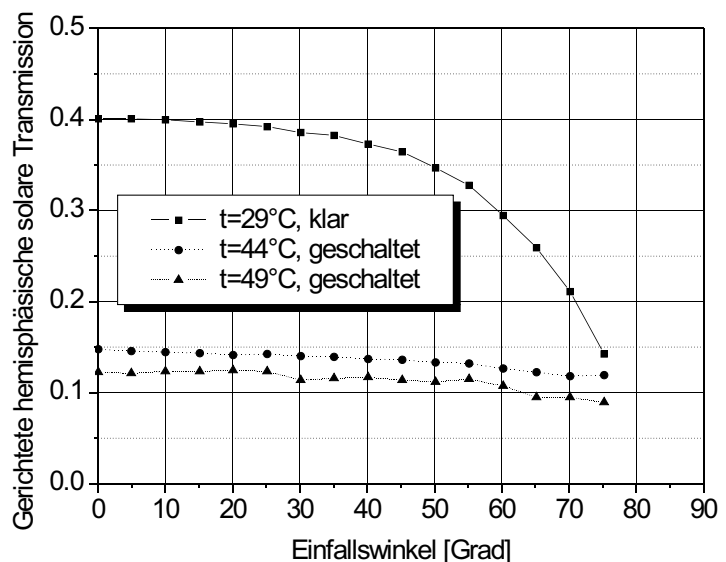
Ein Polymerblend besteht aus zwei Polymeren, die unterhalb der Schalttemperatur in einer einphasigen Mischung vorliegen. In beiden Fällen weisen die Einzelkomponenten einen unterschiedlichen Brechungsindex auf [2.1 bis 2.4]. Bei tiefen Temperaturen, unterhalb der sogenannten Schalttemperatur, sind die Komponenten auf molekularer Ebene vermischt und weisen optisch homogene Eigenschaften auf. Das Material ist klar und transparent. Steigt die Temperatur über die materialspezifische Schalttemperatur hinaus an, so entmischen sich die Komponenten, so dass es auf

Grund der unterschiedlichen Brechungsindizes der Einzelmaterialien zu einer Streuung des Lichtes kommt. Die Schicht wird dadurch milchig trübe und es dominiert im Idealfall die diffuse Reflexion. Dieser Vorgang ist temperaturabhängig und reversibel.

Die thermotropen Materialien werden üblicherweise zum Schutz vor mechanischer Beschädigung zwischen Glasscheiben oder auch zwischen Folienlagen eingebracht. Thermotrope Schichten können zur Selbstregelung der solaren Energieeinträge von Fassadenelementen eingesetzt werden, indem sie ihre Transmission in Abhängigkeit von der Temperatur der Schicht deutlich reduzieren. Im geschalteten Zustand bleibt die Durchsicht nicht erhalten, was beim Einsatz in Verglasungen zu berücksichtigen ist. Durch die Veränderung der Zusammensetzung der Schichten kann die Schalttemperatur in gewissen Grenzen variiert werden. Da der Schaltvorgang des Systems durch die Außenlufttemperatur induziert werden soll, ist es notwendig, die thermotrope Komponente so in die Fassadenelemente zu integrieren, dass ihre Temperatur möglichst stark von der Außenlufttemperatur beeinflusst wird.

In Diagramm 2.1 ist die Abhängigkeit der gerichtet-hemisphärischen solaren Transmission von der Temperatur in der thermotropen Schicht und vom Einfallswinkel der solaren Strahlung einer entsprechenden Wärmeschutzverglasung dargestellt. Diese besteht aus einer Verbundglasscheibe (zwei Floatglasscheiben mit je 3.8 mm Dicke) und einer dazwischenliegenden 800  $\mu$ m dicken thermotropen Schicht (TTSB2066), einem Zwischenraum von 16 mm mit einer Argongasfüllung sowie einer Low-E (von englisch "low emissivity"=geringe Emissivität) beschichteten Innenscheibe mit der Dicke von 3.8 mm [2.2]. Der Elevationswinkel benennt den Einfallswinkel zur Flächennormalen.

Diagramm 2.1:  
Abhängigkeit der gerichtet-hemisphärischen solaren Transmission einer thermotropen Wärmeschutzverglasung von der Temperatur in der thermotropen Schicht und vom Einfallswinkel der solaren Strahlung. Aus [2.2, 2.6].



Die gerichtet-hemisphärische Transmission ist definiert als der Anteil der Strahlung, der vom Element in den dahinter liegenden Halbraum transmittiert wird. Der Strahl fällt dabei unter einem Winkel  $\theta$  auf die Probe. Die normal-hemisphärische Transmission ergibt sich bei  $\theta = 0$ , also bei senkrechtem Strahleinfall. Im klaren Zustand zeigen thermotrope Verglasungen dieselbe Winkelabhängigkeit der solaren Transmission wie übliche Wärmeschutzverglasungen mit ausgeprägtem Abfall erst bei Winkel

größer als 50 , bezogen auf die Flächennormale. Im geschalteten Zustand dominiert die Mehrfachstreuung in der thermotropen Schicht, so dass die transmittierte Strahlung einen hauptsächlich diffusen Charakter annimmt. Die thermischen Kenngrößen einer analog aufgebauten Isolierglaseinheit jedoch mit einem anderen Polymerblend (TTSB1625) sind in Tabelle 2.1 dargestellt und [2.5] entnommen.

Temp. d. Probe [°C]	$T_{n,h,vis}$ [-]	$T_{n,h,sol}$ [-]	$R_{n,h,vis}$ [-]	$R_{n,h,sol}$ [-]	U [Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	g [-]
20	0.73	0.44	0.13	0.21	1.28	0.55
30	0.60	0.37	0.20	0.24	1.28	0.46
40	0.27	0.18	0.52	0.37	1.28	0.28
50	0.21	0.13	0.59	0.41	1.28	0.18

Tabelle 2.1:

Optische und thermische Kenngrößen einer Isolierglaseinheit bei Einstrahlung unter 0°. Das System besteht aus einer VSG Außenscheibe (d=2 x 3.8 mm Floatglas) einem Argon gefüllten Scheibenzwischenraum (SZR=16 mm) sowie einer Low-E beschichteten Floatglasinnenscheibe (d=3.8 mm). Die Werte sind [2.5] entnommen. Es handelt sich um normal-hemisphärische Kenndaten.

## 2.2 Gasotrope Elemente

Bei den gasotropen Elementen basiert die Anpassungsfähigkeit auf einer reversiblen chemischen Reaktion zwischen der Funktionsschicht und einem in das System eingeleiteten Gas definierter Zusammensetzung. Der Elementaufbau entspricht dabei grundsätzlich dem einer Isolierglaseinheit (Abbildung 2.1) wobei auf einer der Glasscheiben die Funktionsbeschichtung aufgebracht ist.

In den Zwischenraum wird das Reaktionsgasgemisch eingeleitet. Dies kann eine Mischung aus Luft und Wasserstoffgas oder auch eine Mischung aus Argon und Wasserstoffgas sein. Es genügt dabei bereits ein Wasserstoffgasvolumenanteil von 0.1%, um die Veränderung der optischen Eigenschaften zu bewirken [2.7]. Untersucht werden derzeit Funktionsschichten, die vorwiegend eine Absorptionsänderung hervorrufen [2.7 bis 2.10] und Schichten, die darauf abzielen, die Reflexionseigenschaften zu verändern. Zu den erstgenannten Systemen gehören beispielsweise die Elemente mit Wolframtrioxidsschicht ( $WO_3$ ). Bei Systemen auf Basis von Yttriumhydrid ( $YH_2$ ) kann der zweitgenannte Effekt beobachtet werden [2.11].

Bei den Elementen auf Wolframtrioxidbasis wird zunächst das Wasserstoffgas ( $H_2$ ) in zwei Wasserstoffatome (2H) am Platinkatalysator dissoziiert. Die Wasserstoffatome diffundieren anschließend zur Wolframtrioxidsschicht und reagieren dort zu  $H_2O$  unter Fehlstellenbildung in der Wolframtrioxidsschicht ( $WO_3$  zu  $WO_2$ ). Das entstandene Wasser diffundiert langsam aus der Funktionsschicht heraus, was mit einem Nachdunkeln der Scheibe verbunden ist. Der geringe Wasseranteil wird durch den Gasstrom aus dem System entfernt. Im Gaskreislauf muß aus diesem Grunde ein Trocknungsmechanismus integriert sein. Die Wolframschicht verändert sich bei der be-

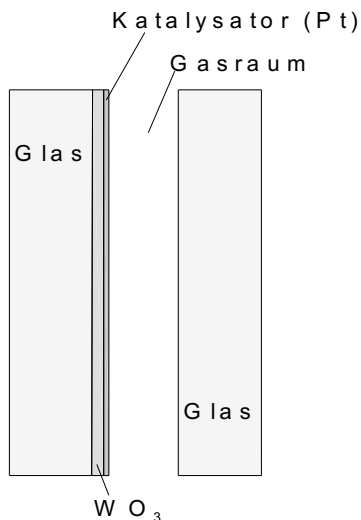


Abbildung 2.1:  
Prinzipieller Aufbau eines gasotropen Elementes im Schnitt. Bei einer Isolierverglasung befindet sich das Element außen. Es wird dann kombiniert mit einem weiteren SZR und einer Innenscheibe.

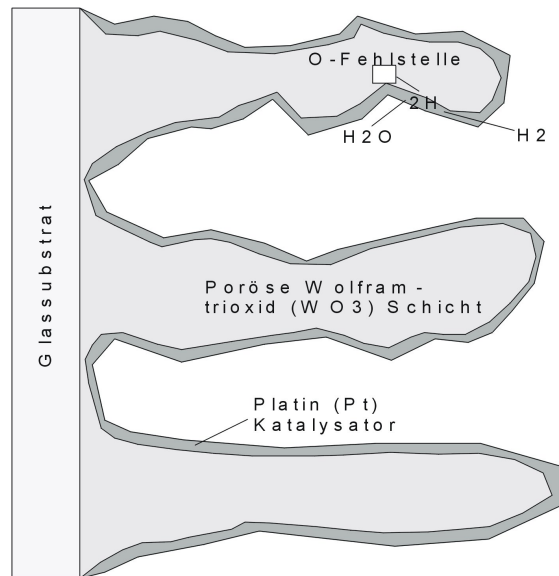


Abbildung 2.2:  
Darstellung des Funktionsprinzipes anhand eines Oberflächenausschnittes. Auf dem Glassubstrat befindet sich eine poröse  $WO_3$ -Schicht mit einem Platinüberzug.

schriebenen Reaktion von einem farblosen in einen bläulich transparenten Zustand. Der Vorgang ist in Abbildung 2.2 grafisch veranschaulicht. Die derzeit in der Entwicklung befindlichen Systeme verwenden einen geschlossenen Gaskreislauf mit einer Elektrolytkammer zur Wasserstoff Elektrolyse.

Die Schaltzeiten der beschriebenen Elemente sind abhängig von der Konzentration des Wasserstoffes im Gasgemisch, der Temperatur, dem Gasdruck, der relativen Feuchte des Gases sowie dem Systemaufbau. Durch die geringe Wasserstoffkonzentration im Luft-Wasserstoffgemisch kommt es nicht zu einer Knallgasreaktion. Ein vom Autor untersuchtes System auf Wolframbasis (vgl. Abb. 2.1; quadratisches Element mit Kantenlänge 260 mm) weist Schaltzeiten im Sekundenbereich auf.

In Abhängigkeit von den Schichtdicken im Systemaufbau kann für eine Isolierglaseinheit mit einem Scheibenzwischenraum die Transmission von ca. 72 % im entfärbten Zustand bis auf ca. 5 % im eingefärbten Zustand verändert werden [2.9]. Die thermischen Kenngrößen für ein gasotropes Isolierglaselement mit zwei Scheibenzwischenräumen sind der Tabelle 2.2 zu entnehmen.

Zustand	$T_{n,VIS}$ [-]	$T_{n,SOL}$ [-]	$R_{n,VIS}$ [-]	$R_{n,SOL}$ [-]	U [ $Wm^{-2}K^{-1}$ ]	g [-]
Entfärbt	0.64	0.43	0.18	0.34	1.05	0.53
Gefärbt	0.15	0.09	0.07	0.08	1.05	0.15

Tabelle 2.2:  
Optische und thermische Kenngrößen einer Isolierglaseinheit mit zwei Gaszwischenräumen. Aus [2.7] entnommen und ermittelt unter terrestrischem Strahlungsspektrum bei AM 1.5.

Das Element besteht aus einem eisenarmen Außenglas (Weißglas) mit der Dicke von 6 mm, einer Wolframtrioxidschicht mit Platin-Katalysator, einem Scheibenzwischenraum für die Schaltgasfüllung von 6 mm Breite, einer eisenarmen Zwischenscheibe mit der Dicke 6 mm, einem Scheibenzwischenraum mit einer Breite von 16 mm mit Argonfüllung, sowie einer außenseitig Low-E beschichteten Floatglasscheibe der Dicke 4 mm. Die Kenngrößen sind der Literatur [2.7] entnommen.

## 2.3 Elektrotrope Elemente

### 2.3.1 Elemente auf Wolframtrioxidbasis

Die Veränderung der Transmission und der Absorption bei den elektrochromen Elementen wird durch einen reversiblen elektrochemischen Prozeß verursacht. Wegen seiner hohen Einfärbeeffizienz eignet sich hierbei Wolframtrioxid von allen anorganischen elektrochromen Materialien besonders gut zur Umsetzung in schaltbare Systeme [2.12 bis 2.14]. Neben den Metalloxiden weisen auch einige organische Materialien elektrochrome Eigenschaften auf [2.15 bis 2.16]. Das Hauptproblem bei diesen ist jedoch ihre mangelhafte Langzeitstabilität, insbesondere unter dem Einfluß von UV-Bestrahlung und bei höheren Temperaturen. Allerdings weisen sie geringere Schaltzeiten beim Wechsel des Transmissionszustandes auf. Eine Übersicht elektrochromer Stoffe ist bei Monk [2.17] zu finden. Mögliche Farbveränderungen sind je nach eingesetztem elektrochromem Werkstoff Übergänge von farblos nach blau, grün, gelb, rot oder grau, um nur einige zu nennen.

Der prinzipielle Aufbau eines elektrochromen Elementes auf Wolfram-Basis ist in Abbildung 2.3 dargestellt [2.12 bis 2.14]. Es setzt sich aus zwei mehrfach beschichteten Glasscheiben mit dazwischenliegender Polymerfolie zusammen. Die Gläser sind dabei mit transparenten, elektrisch leitenden Elektroden versehen, für die üblicherweise entweder eine Indium-Zinn-Oxidschicht (ITO) oder eine Fluor-dotierte Zinnoxidschicht (FTO) eingesetzt wird. Als Funktionsschicht ist auf der einen Glasscheibe eine Wolframtrioxidlage aufgebracht. Sie verursacht die Transmissionsänderung. Auf der zweiten Glasscheibe befindet sich eine Ionenspeicherschicht. Sie wird bei dem beschriebenen System aus einer Cerdioxid-Titandioxid-Schicht ( $CeO_2$   $TiO_2$ ) gebildet. Die Polymerfolie fungiert als Elektrolyt und als Verbundfolie zwischen den Glasscheiben. Sie ist ionenleitend aber für Elektronen nahezu undurchlässig. Beim Anlegen einer elektrischen Gleichspannung von ca. 1.5 V bis ca. 3 V wandern bei ent-

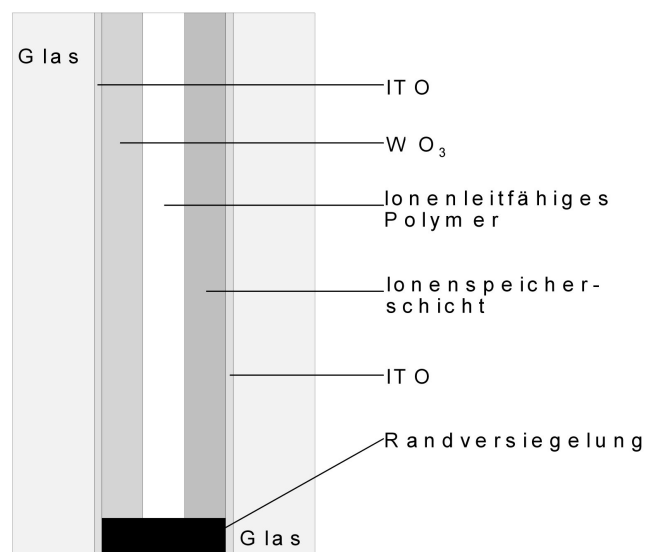


Abbildung 2.3:  
Prinzipieller Aufbau eines elektrochromen Elementes.



sprechender Polung die positiv geladenen Lithiumionen zur Wolframtrioxidschicht. Dabei kommt es in dieser zu einer Reduktion der Oxidationsstufe unter gleichzeitiger Interkalation von Lithiumionen. Im Ausgangszustand enthält die elektrochrome Schicht ausschließlich Wolfram der Oxidationsstufe +6. Die Schicht erscheint farblos. Beim Wandern der Lithiumionen in die Wolframtrioxidschicht wird durch teilweise Reduktion Wolfram der Oxidationsstufe +5 gebildet. Liegen beide Oxidationsstufen nebeneinander vor, so wird durch Elektronenübergänge Licht im sichtbaren Bereich absorbiert. Dem Betrachter erscheint das Element blau gefärbt. Durch die entsprechende Umpolung der Spannung erfolgt die Entfärbung. Wird die Spannungsversorgung während dieses Vorganges bei beliebigem Zustand des Systemes unterbrochen, so ist jeder Zwischenzustand schaltbar. Dieser bleibt über längere Zeit erhalten.

Für eine Isolierverglasung mit elektrochromer Einheit können die optischen und thermischen Kenngrößen der Tabelle 2.3 entnommen werden [2.12]. Das Isolierglas besteht aus einer Low-E beschichteten Innenscheibe der Dicke von 4 mm (K-Glas), einem Scheibenzwischenraum von 16 mm Breite sowie einer ca. 9 mm dicken elektrochromen Einheit.

Zustand	$T_{n,VIS}$ [-]	$T_{n,SOL}$ [-]	$R_{n,VIS}$ [-]	$R_{n,SOL}$ [-]	U [ $Wm^{-2}K^{-1}$ ]	g [-]
Entfärbt	0.50	0.35	0.12	-	1.6	0.44
Gefärbt	0.15	0.09	0.09	-	1.6	0.15

Tabelle 2.3:

Optische und thermische Kenngrößen einer Isolierglaseinheit mit elektrochromem Element. Ermittlung des U-Wertes nach DIN 52619. Ermittlung der optischen Kennwerte sowie des Gesamtenergiedurchlassgrades nach DIN 67507. Aus [2.12].

Die Umschaltzeiten zwischen den verschiedenen Zuständen sind stark von der Größe des Elementes und der Leitfähigkeit der Elektroden abhängig. Bei einer Probenfläche von ca.  $2.4 m^2$  kann der Umschaltvorgang bis zu 30 Minuten andauern. Die notwendige Energie für den vollständigen Umschaltvorgang wird vom Hersteller mit weniger als  $0.5 Wh/m^2$  angegeben. Die beschriebene elektrochrome Verbundglasscheibe ist sowohl für den Einsatz in Vertikal- als auch in Überkopfverglasungen geeignet. Die ersten Gebäude wurden bereits mit entsprechenden Verglasungselementen ausgerüstet.

### 2.3.2 Systeme auf Basis von “polymer dispersed liquid crystals” (PDLC)

Im Bereich architektonischer Anwendungen werden derzeit schaltbare Verbundglas-systeme mit Flüssigkristallen vorwiegend als Trennwandelemente im Gebäudeinneren eingesetzt. Die verwendete Funktionsschicht ermöglicht es hierbei, die Lichtdurchlässigkeit von einem transluzenten, milchigen auf einen transparenten Zustand zu schalten. Dieser Schaltvorgang erfolgt durch das Anlegen einer elektrischen Wechselspannung an das System.

Der bei dieser Anordnung verwendete Flüssigkristall ist in winzigen kugelförmigen Tröpfchen in einer Polymerschicht eingelagert. Ein solches flüssigkristalldotiertes

Polymernetzwerk wird als "polymer dispersed liquid crystal" (PDLC) bezeichnet. Dieses liegt zwischen zwei Folien, die jeweils mit einer transparenten, elektrisch leitfähigen Metalloxidschicht versehen sind. Die elektrisch leitfähige Schicht ermöglicht das Anlegen eines elektrischen Feldes, in dem die Flüssigkristalltropfen gegenüber dem Zustand ohne elektrischem Feld durch Umorientierung der Molekülachsen die optischen Eigenschaften des Elementes ändern. Das gesamte System der Folien ist zum mechanischen Schutz zwischen zwei Glasscheiben eingebettet. Im ausgerichteten Zustand der Moleküle des Flüssigkristalles ist der Brechungsindex im Tropfen annähernd identisch mit dem Brechungsindex in der umgebenden Polymerfolie. Diese Übereinstimmung bewirkt die transparente Durchsicht, da die Lichtstrahlen auf ihrem Weg durch die flüssigkristalldotierte Folie nicht wesentlich abgelenkt werden. Ohne das äußere elektrische Feld liegen die Moleküle des Flüssigkristalls in statistischer Anordnung gleichmäßig in alle Richtungen orientiert vor und streuen hierbei das durchfallende Licht, was die Transluzenz zur Folge hat. In diesem Zustand weisen die Brechungsindizes im Tropfen und in der umgebenden Vernetzungsfolie eine Differenz der Brechungszahlen auf. Die Anordnung kommt ohne spezielle polarisierende Folien aus, wie sie im LCD-Display-Bau im Allgemeinen nötig sind und gewährleistet hierdurch eine große Transluzenz im geschalteten Zustand [2.18 bis 2.20].

Die wichtigste optische Eigenschaft der hier besprochenen Materialien ist die Lichttransmission. Sie liegt laut Herstellerangabe [2.21] für den transparenten Zustand bei ca. 75 % und beim transluzenten Zustand bei ca. 74 % (VSG 8/2 aus Klarglas). Die geringe Differenz ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass das Licht auch im milchigen Zustand der Scheibe nicht wesentlich stärker reflektiert wird als im durchsichtigen Zustand. Die durchlaufenden Lichtstrahlen werden lediglich gebrochen, d.h. aus ihrer direkten Laufrichtung einfach oder mehrfach abgelenkt, gelangen jedoch hindurch. Die Umschaltdauer beträgt lediglich Millisekunden. Die elektrische Wechselspannung von ca. 120 Volt, die für das elektrische Feld sorgt, ist nötig, um ein "Einbrennen" der Molekülorientierung und damit einen Verlust an Beweglichkeit im Flüssigkristall durch Anlagerungseffekte an den Oberflächen zu verhindern. Sie bewirkt ein ständiges Umorientieren der Dipole der Moleküle des Flüssigkristalles. Das Molekül selber orientiert sich dabei nicht um, lediglich die elektrische Polarität ändert sich. Der angegebene Leistungsbedarf im klaren Zustand beträgt ca. 50 Watt pro Quadratmeter Schaltfläche [2.21].

Wegen der geringen Differenzen der Lichttransmissionswerte zwischen dem klaren und dem milchigen Zustand eignet sich das untersuchte Funktionsglas nicht zur Regelung der in ein Gebäude einfallenden Strahlungsenergiemenge. Da allerdings bei den verwendbaren Flüssigkristallen auch solche mit einem größeren Reflexionsanteil für den milchigen Zustand bereits in der Literatur beschrieben werden, ist die Herstellung effektiver PDLC-Verglasungen in Aussicht. Die derzeitige Hauptanwendung der PDLC-Funktionselemente liegt noch im Bereich des Gebäudeinneren als schaltbare Wandelemente oder auch als Projektionsfläche. Im Bereich von Überkopfverglasungen ermöglichen diese eine blendreduzierte Innenraumbeleuchtung.

### **2.3.3 Systeme auf der Basis von "suspended-particles" (SP)**

Elemente in der Ausführung als "suspended-particle devices" (SPD) basieren auf einer Suspension von strahlungsabsorbierenden, gleichartigen Feststoffpartikeln in einer Lösung. Die Feststoffteilchen sind von stäbchenartiger oder scheibenförmiger



Gestalt [2.22]. Ihre Absorption ist von der Richtung der eintreffenden Strahlung bezüglich der Teilchenachsen abhängig. Es handelt sich also um anisotrope Stoffe, die beispielsweise auf der Basis von Polyjodiden hergestellt werden [2.23]. Verwendung finden SP-Lösungen als dünner Film eingebettet zwischen Glas- oder Folienlagen oder aber auch als feinverteilte Töpfchen in einer Folie eingebettet. Die Ausrichtung der Teilchen erfolgt in einem elektrischen Feld, das mittels transparenter elektrischer Elektroden erzeugt wird. Im Feld richten sich die als elektrisch induzierte Dipole wirksamen Moleküle aus. In diesem Zustand weist die Scheibenanordnung die geringste Absorption für auftreffende Strahlung auf. Der Grad der Ausrichtung kann über die angelegte Spannung und damit über die Feldstärke geregelt werden. Liegt keine Spannung an, so bewirkt die Brownsche Bewegung der Moleküle in der Suspension eine zufällige Verteilung der Ausrichtung der absorbierenden Partikel und damit eine gleichmäßige Absorption der Strahlung aus allen Richtungen. Über die Partikelkonzentration und die Filmdicke der Schicht kann der Schaltheub zwischen dem Hell- und dem Dunkelzustand eingestellt werden.

Die Schaltzeiten einer SPD-Einheit hängen stark von der Konzentration der Teilchen in der Suspension, der Temperatur sowie der angelegten Spannung ab. Für die Einschaltzeiten wird ein Bereich von 5 ms bis 20 ms zur Ausrichtung angegeben wohingegen der Abschaltvorgang mit Werten von 100 ms bis 250 ms charakterisiert wird [2.22]. Die maximale Transmission im sichtbaren Bereich für senkrecht auftreffende Strahlung einer Isolierglaseinheit mit SPD-Zelle wird herstellerseitig angegeben zu  $T_{n,VIS} = 44.5\%$  [2.24]. Die geringste Transmission unter gleichen Einstrahlbedingungen für dasselbe Funktionselement beträgt  $T_{n,VIS} = 9.1\%$ . Wird eine möglichst geringe Dunkeltransmission angestrebt, so sinkt damit auch die Helltransmission. Ein entsprechendes Isolierglas weist dann eine größte Durchlässigkeit von  $T_{n,VIS} = 17\%$  bei einer Minimaldurchlässigkeit von  $T_{n,VIS} = 0.4\%$  auf (vgl. Tabelle 2.4). Eine große Winkelabhängigkeit der Transmission ist anzunehmen. Damit verbunden ist die Tatsache, dass für schrägen Strahlungseinfall die Durchlässigkeiten erheblich geringer ausfallen als für senkrecht Auftreffen. Für die hemisphärischen optischen Kenndaten bedeutet dies eine vermutlich deutliche Reduktion der Transmissionsgrade gegenüber der flächennormalen Einstrahlung.

	$T_{n,VIS}$ [-]	$T_{n,SOL}$ [-]	$R_{n,VIS}$ [-]	$R_{n,SOL}$ [-]
U=0, Typ 1	0.091	0.18	0.07	0.091
$U = U_{th}$	0.445	0.344	0.108	0.157
U=0, Typ 2	0.004	0.11	0.07	0.08
$U = U_{th}$	0.17	0.23	0.07	0.11

Tabelle 2.4:

Optische Kenngrößen von SPD-Isolierglaseinheiten bestehend aus einem Verbundglas mit SPD-Schicht (außen) und einem Floatglas (innen). Typ 1 mit maximaler Transmission, Typ 2 mit minimaler Transmission im angesteuerten Zustand. Entnommen aus [2.24].

## 2.4 Weitere Systeme

Neben den bereits ausführlicher beschriebenen Elementen mit Wechselfähigkeit, die entweder bereits die Einsatzreife erreicht haben oder zumindest in der Entwicklung relativ weit fortgeschritten sind, werden nachfolgend verschiedenartige Elemente und Systeme beschrieben bei denen die Entwicklung derzeit noch am Anfang steht (Photoelektrochrome Elemente) oder bei denen eine Anwendung im Hüllbereich derzeit eigenschaftsbedingt noch nicht vorgesehen oder sinnvoll erscheint (Photochrome Gläser).

### 2.4.1 Photoelektrochrome Elemente

Ein photoelektrochromes System ist eine Kombination aus einer elektrochemischen Solarzelle und einer elektrochromen Einheit [2.25 bis 2.27]. Das Schichtsystem besteht aus einer Glasscheibe mit leitfähiger transparenter Beschichtung, auf die eine Wolframtrioxidschicht aufgebracht ist. Die  $WO_3$ -Schicht dient als elektrochromer Träger für eine nanoporöse Titandioxidschicht ( $TiO_2$ ), welche mit einer Monolage eines Farbstoffes bedeckt ist. Die Poren sowie der Zwischenraum zur abschließenden Glasscheibe, die mit einer transparenten Platinschicht sowie einer transparenten, leitfähigen Elektrode versehen ist, wird von einem Elektrolyten ausgefüllt. Das Elektrolyt enthält Lithiumjodid ( $LiJ$ ) in gelöster Form, welches die notwendigen Ionen für den Schaltvorgang liefert. Unter Lichteinfluss gibt der Farbstoff ein Elektron frei, das über die  $TiO_2$ -Schicht in die Wolframtrioxidschicht wandert. Dort reduziert das  $WO_3$  zu  $WO_2$  unter der bereits beschriebenen Blaufärbung. Zum Ladungsausgleich in der Wolframschicht diffundiert ein  $Li$ -Ion aus dem Elektrolyten in diese Schicht. Der Farbstoff erhält sein abgegebenes Elektron von einem J-Ion zurück. Der Entfärbeprozess wird durch das Schließen eines externen Stromkreises hervorgerufen. Dabei katalysiert das Platin nun die Rückreaktion in Jod unter gleichzeitiger Rückwanderung der  $Li$ -Ionen. In der Wolframschicht kommt es dabei zur entsprechenden Oxidation des Wolframs zu  $WO_3$  unter Entfärbung der Schicht. Dieser Prozess kann sowohl bei Bestrahlung als auch ohne zur Steuerung der Transmission herangezogen werden. Dabei wird in den externen Stromkreis ein regelbarer Widerstand eingebracht.

Der Vorteil dieses Systems gegenüber den im Kapitel 2.3.1 beschriebenen elektrochromen Systemen liegt in der Tatsache begründet, dass nun die Schaltzeit unabhängig von der Systemfläche und der Leitfähigkeit der transparenten Elektroden ist. Allerdings wird dieser Vorteil erkaufte mit einem komplexeren Systemaufbau. Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass zur Einfärbung keine äußere Spannungsquelle erforderlich ist.

### 2.4.2 Photochrome Gläser

Als Phototropie wird die durch elektromagnetische Strahlung verursachte Änderung der Absorption bezeichnet. Von Photochromie spricht man dabei, wenn mindestens einer der Zustände sichtbares Licht absorbiert [2.28 und 2.29]. Photochrome Gläser ändern also unter Bestrahlung mit Licht ihre Farbe und damit auch ihre Transmission. Die Einfärbung ist reversibel und verschwindet bei entsprechender Strahlungsreduktion. Als Basisglas für photochrome Gläser kommen Borosilikat- und Alumo-Boro-Silikatgläser zur Anwendung. Als Zusätze dienen Silber und Kupfer in Form von Nitraten oder Chloriden sowie Silberhalogenide (etwa 0.4 bis 0.7 Gewichtsprozente),

also Verbindungen aus Silber und einem Halogen (Flour, Chlor, Brom oder Jod). Das Silberhalogenid ist für die phototrope Reaktion verantwortlich. Das Kupfer erhöht dabei die Reaktionsgeschwindigkeit. Nach dem Erstarren der Glasschmelze und einer entsprechenden Wärmebehandlung entstehen im Glas Silberhalogenid-Kristalle, die kleine Mengen Kupfer enthalten [2.30]. Diese Kristalle weisen typischerweise Durchmesser im Bereich von 5 bis 30 nm auf [2.30]. Sie sind damit zu klein, um sichtbares Licht zu absorbieren oder zu streuen. Allerdings reagieren sie auf die Bestrahlung mit ultraviolettem Licht. Dabei erhalten einige der Silber-Ionen, die positiv geladen und über Ionenbindungen an negative Halogenid-Ionen gebunden sind, von einem Kupfer-Ion ein Elektron und werden dadurch zu neutralen Silberatomen (Hinreaktion). Viele dieser so entstandenen Silberatome lagern sich in Form von kleinen Silberkörnchen zusammen. Sie sind auf Grund ihrer Größe in der Lage, sichtbares Licht zu absorbieren und damit die Transmission des Glases zu verändern [2.30]. Da die Größe und die Form der Körnchen stark variiert, kommt es zu einer näherungsweise gleichmäßigen Absorption aller Wellenlängenbereiche im Absorptionsspektrum. Das Glas erscheint in der Durchsicht grau. Der Sättigungsabsorptionsgrad ist erreicht, wenn die Rückreaktion mit der Hinreaktion im Gleichgewicht steht. Es lassen sich dabei Änderungen der Transmission im sichtbaren Bereich um  $T = 35\%$  erreichen.

Als großen Nachteil der beschriebenen phototropen Gläser hat es sich erwiesen, dass bei tiefen Temperaturen eine größere Absorption erreicht werden kann als bei höheren Temperaturen. Übersteigen die Glastemperaturen den Wert von ca.  $85^{\circ}\text{C}$ , dann ist der phototrope Effekt fast vollständig inaktiv [2.30]. Die Geschwindigkeit des Eindunkelns ist durch die Glaszusammensetzung und durch die Wärmebehandlung in gewissen Grenzen variierbar. Allerdings ist eine Beschleunigung des Vorganges mit einer Verringerung der Absorptionsänderung verbunden. Nachteilig ist ebenfalls die Reaktionsgeschwindigkeit. So erfolgt in den ersten 10 bis 15 Sekunden der Anregung eine Änderung der Absorption auf ca. 50 % des erreichbaren Endwertes und innerhalb einer Minute eine Änderung auf ca. 70 % der maximalen Absorption. Die Aufhellung der Gläser erfolgt wesentlich langsamer. Ein phototropes Glas benötigt bei einer Glastemperatur von ca.  $20^{\circ}\text{C}$  mehr als 30 Minuten um die ursprüngliche Durchlässigkeit zu erreichen.

## 2.5 Vergleichende Bewertung

Sofern die Problematik der Langzeitstabilität der enthaltenen Polymere gelöst wird und die Anschaffungskosten akzeptabel sind, werden thermotrope Elemente sicherlich Eingang in die Architektur finden. Auch als Überhitzungsschutz vor einer transparenten Wärmedämmung erscheint ein Einsatz unter diesen Bedingungen sinnvoll zu sein. Die Behinderung der klaren Durchsicht im geschalteten Zustand jedoch schränkt weitere Einsatzmöglichkeiten ein.

Elemente auf der Basis von absorptionsveränderlichen Materialien im Zwischenbereich einer Isolierverglasung eignen sich zur aktiven Regelung des Licht- und Energieeintrages in den Gebäudeinnenraum. Es ist jedoch fraglich, ob die besonders mit den Systemen auf Wolframtrioxidbasis verbundene Farbveränderung des eingelassenen Lichtes die volle Akzeptanz des Nutzers finden wird, oder ob sich hiermit verbunden eine Einschränkung der Anwendungsbereiche ergibt. Auch das geringe Reaktionsvermögen bedingt durch die langen Schaltzeiten bei größeren Scheiben kann als hinderlich empfunden werden.

Wegen der geringen Veränderung des Energieeintrages beim Schalten derzeitiger PDLC-Systeme werden diese Elemente bis zur Verfügbarkeit geeigneter Flüssigkristallmischungen mit wesentlich höherem Reflexionsanteil der einfallenden Strahlung im ungeschalteten Zustand nicht zur aktiven Energieeintragsregelung einsetzbar sein. Da diese Systeme im Übrigen auch die Durchsicht behindern, unterliegen sie denselben Beschränkungen in der Einsetzbarkeit wie die thermotropen Elemente. Mit der SP-Technologie ausgestattete Fensterelemente gewährleisten auch im Zustand geringer Transmission durch das System eine klare Durchsicht. Da sie zudem durch die Zusammensetzung der SP-Schicht in der maximalen Transmission, dem spektralen Verlauf der Transmission sowie im Schalhub in gewissen Grenzen variabel festlegbar sind, verfügen diese Elemente, bei entsprechender Langzeitstabilität und Kostenakzeptanz, über ein gewisses Potential zur sinnvollen Einbindung in eine innovative anpassungsfähige Fassade.

### 3. Verdrillt nematische und lyotrope Flüssigkristall-Systeme

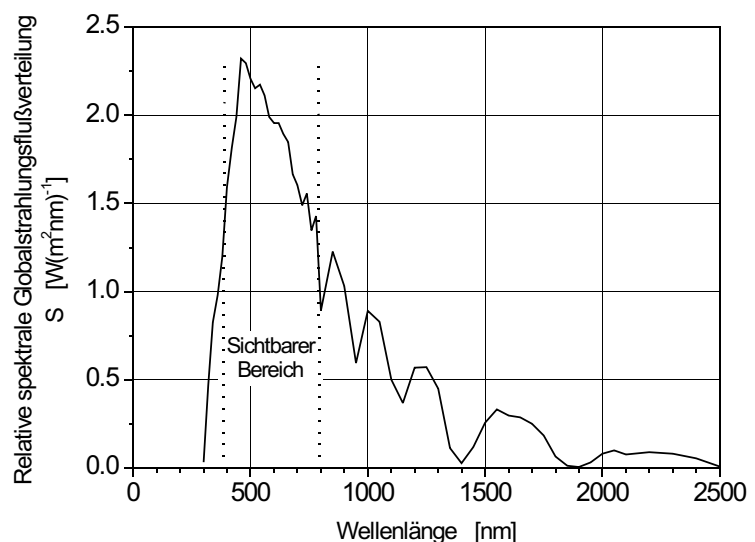
#### 3.1 Grundlagen der Funktion, Wirkungsweise und Beurteilung

##### 3.1.1 Strahlungsphysik

Physikalisch betrachtet handelt es sich bei Licht um eine elektromagnetische, transversale Welle, bei der das elektrische Feld mit seiner Feldstärke  $\vec{E}$  immer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingt und das von einem magnetischen Feld der Feldstärke  $\vec{H}$  begleitet wird, dessen Feldvektor senkrecht zum elektrischen Feld schwingt. Die optischen Wirkungen des Lichtes werden vorwiegend durch den elektrischen Anteil bestimmt. Charakterisiert wird eine solche Welle durch die Wellenlänge  $\lambda$ , die Periodendauer  $T$  (bzw. die Frequenz  $f=1/T$ ), die Ausbreitungs- oder auch Phasengeschwindigkeit  $v$  sowie die Amplitude  $E_0$  [3.1 und 3.2]. Auf den Teilchencharakter der Strahlung wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Bei der Vielzahl lichtaussendender Teilchen an der Sonnenoberfläche und der damit verbundenen wahllosen Verteilung der Schwingungsrichtungen der ausgesandten Strahlung ergibt sich in der Gesamtheit eine gleichmäßige Verteilung der Schwingungsrichtungen. Das Licht ist unpolarisiert.

Die mit dem Sonnenlicht transportierte Energie verteilt sich nicht gleichmäßig über alle Wellenlängen. Die relative spektrale Verteilung der Globalstrahlung in Bodennähe, gegeben in der europäischen Norm EN 410, ist in Diagramm 3.1 dargestellt. Durch die Integration der Strahlung für die einzelnen Wellenlängenintervalle ergeben sich Bestrahlungsstärkeanteile von ca. 5 % im UV-Spektrum, ca. 57 % im sichtbaren Spektrum sowie ein Anteil von ca. 41 % im IR-Bereich [3.3]. Beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre und beim Durchlaufen der Lufthülle werden Teile der Strahlung reflektiert, gestreut oder auch absorbiert. Durch die spektral unterschiedliche Absorption an den verschiedenen Gasbestandteilen der Luft und der leider zunehmenden Luftverschmutzung kommt es dabei zu einer Veränderung der spektralen Energieverteilung im Licht gegenüber der von der Sonne abgesandten Strahlung. Dies ist erkennbar an den Schwankungen in der Spektralverteilungskurve nach Diagramm 3.1. Der Anteil des Sonnenlichtes, der den Erdboden erreicht, weist Wellenlängen von 300 nm bis 3000 nm auf [3.1 und 3.4].

Diagramm 3.1:  
Relative spektrale Globalstrahlungsflußverteilung nach EN 410, Tabelle 2. Normiert auf  $S_d$  1353 W/m<sup>2</sup>.  
2500nm  
300nm



Der Mensch ist in der Lage, aus dem großen Wellenlängenbereich lediglich einen kleinen Ausschnitt wahrzunehmen. Die Lichtrezeptoren im Auge reagieren auf Licht des Wellenlängenbereiches zwischen  $380 \text{ nm}$  und  $780 \text{ nm}$ . Auch ist das Auge nicht für alle Wellenlängen gleich empfindlich, sondern hat ein Empfindlichkeitsmaximum bei einer Wellenlänge von  $555 \text{ nm}$ , was dem Farbempfinden von grün-gelb entspricht. Um der menschlichen Wahrnehmung Rechnung zu tragen, werden in der Optik neben den radiometrischen Größen (=strahlungsphysikalische Größen) auch fotometrischen Größen (=lichttechnische Größen) verwendet. Die fotometrischen Größen kennzeichnen sich dadurch, dass sie mit der Empfindlichkeit des menschlichen Auges gewichtet sind. Der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad für Tagsehen  $V(\lambda)$  findet hierzu Eingang [3.5].

Wie bereits angedeutet, tritt das Licht bei seinem Durchgang durch die Atmosphäre und beim Auftreffen auf jegliche Art von Objekten in Wechselwirkung mit diesen. Die Interaktion zwischen einem Medium und der auftreffenden Strahlung kann mit Hilfe von drei Kennzahlen beschrieben werden. Es gilt folgende Gleichung [3.6 und 3.7]:

$$R(\lambda) + A(\lambda) + T(\lambda) = 1. \quad (3.1)$$

Der Reflexionsgrad, der Transmissionsgrad und der Absorptionsgrad werden definiert über das Verhältnis der entsprechenden reflektierten, transmittierten oder auch absorbierten Strahlungsanteile der einfallenden Strahlungsleistung, auch Strahlungsfluss genannt. Unter Verwendung der flächenbezogenen Strahlungsleistung, der sogenannten Bestrahlungsstärke  $I_e / S$  ergibt sich unter Berücksichtigung, dass  $I_{e,r} = I_{e,t}$  gilt, für die reflektierte und transmittierte Strahlungsleistung am Übergang vom Medium 1 in das Medium 2

$$R(\lambda)_{1,2} = \frac{I_{r,1,2} \cdot \text{Acos}_r}{I_{e,1,2} \cdot \text{Acos}_e} = \frac{I_{r,1,2}}{I_{e,1,2}} \quad (3.2)$$

$$T(\lambda)_{1,2} = \frac{I_{t,1,2} \cdot \text{Acos}_t}{I_{e,1,2} \cdot \text{Acos}_e} = \frac{I_{t,1,2} \cdot \text{Acos}_2}{I_{e,1,2} \cdot \text{Acos}_1} \quad (3.3)$$

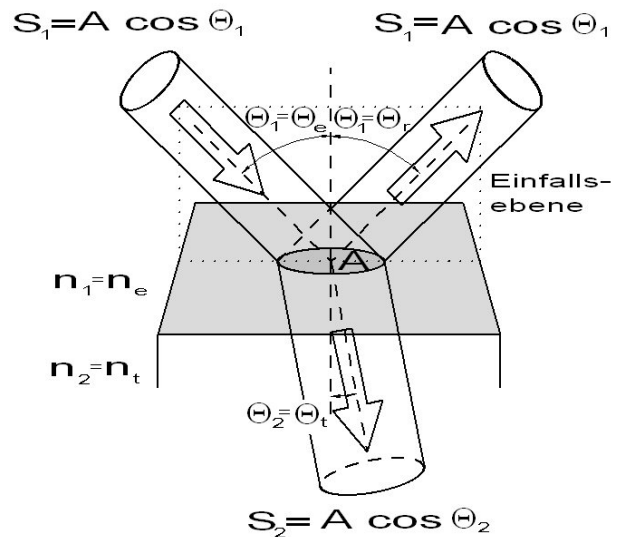
Für homogene, isotrope, nichtleitende Stoffe (Dielektrika) ist der Brechungswinkel  $\theta_2$  über das Snelliussche Gesetz mit dem Einfallswinkel  $\theta_1$  des einfallenden Strahles verknüpft. Abbildung 3.1 verdeutlicht den Zusammenhang:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.4)$$

Aus den spektralen Werten der Kennzahlen lassen sich durch gewichtete Mittelwertbildung über den jeweiligen Wellenlängenbereich die lichttechnischen ( $\lambda_1 = 380 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 780 \text{ nm}$ ) und die radiometrischen ( $\lambda_1 = 300 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 2500 \text{ nm}$ ) Größen bestimmen. Verwendung findet hierbei die spektrale relative Strahlungsflußverteilung,  $S_\lambda$ , nach EN 410 Tabelle 2 [3.3]:



Abbildung 3.1:  
 Reflexion und Brechung eines Strahlenbündels beim Auftreffen auf eine Grenzfläche. Das einfallende und das reflektierte Bündel weisen die Fläche  $S_1$  auf, wohingegen das in das Medium 2 gebrochene Strahlenbündel die Fläche  $S_2$  aufweist.



$$a = \frac{S_2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} s(\Theta) \sin(\Theta) d\Theta d\phi}{S_1 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} s(\Theta) \sin(\Theta) d\Theta d\phi} \quad (3.5)$$

Für  $a(\lambda, \Theta_e)$  ist die entsprechende interessierende Größe  $R(\lambda, \Theta_e)$ ,  $T(\lambda, \Theta_e)$  beziehungsweise  $A(\lambda, \Theta_e)$  einzusetzen. Bei der Berechnung der lichttechnischen Größen wird als Gewichtungsfunktion  $s(\Theta)$  der Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagsehen  $V(\lambda)$  eines 10°-Normalbeobachters wie er in der DIN 5033 Teil 2 Tabelle 2 gegeben ist, eingesetzt [3.8]. Sollen die radiometrischen Größen bestimmt werden, so ist als Gewichtungsfunktion  $s(\Theta) = 1$  zu verwenden. Die Integrale zur Mittelwertbestimmung werden durch entsprechende Summen ersetzt, wobei die Schrittweite  $5 \text{ nm}$  beträgt. Die Definition der Größen ist der DIN 5036 entnommen [3.7].

Die Reflexion und der Strahlungsdurchgang weisen eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Einfallswinkel auf. Wichtig für klimatechnische Simulationen ist beispielsweise die Kenntnis der Gesamttransmission durch ein transparentes Element, wobei sich die einfallende Strahlung aus der direkten und der diffusen Einstrahlung zusammensetzt und aus verschiedenen Richtungen einfällt. Daher werden aus den optischen Kenndaten bei einer bestimmten Wellenlänge und der Einfallsrichtung durch entsprechende Integration über den gesamten Einfallsbereich der Strahlung die hemisphärischen, spektralen Kenngrößen berechnet [3.9]. Die zu Grunde liegende Gleichung hierfür lautet

$$a_h(\lambda, \Theta_e) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} a(\lambda, \Theta_e, \Theta) K(\lambda, \Theta_e, \Theta) \cos(\Theta) \sin(\Theta) d\Theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} K(\lambda, \Theta_e, \Theta) \cos(\Theta) \sin(\Theta) d\Theta d\phi} \quad (3.6)$$

Die Funktion  $a(\lambda, \Theta_e, \Theta)$  bezeichnet die interessierende optische Größe. Die spektrale

Bestrahlungsdichte  $K(\theta, \varphi)$  beschreibt die Verteilung des einfallenden Strahlungsflusses auf die Wellenlängen und die Richtungen des Halbraumes über dem bestrahlten Flächenelement. Unter der Annahme einer Gleichverteilung des Strahlungsflusses im Halbraum, d. h., dass aus allen möglichen Einfallrichtungen der Strahlungsfluss gleich groß ist, kann die spektrale Bestrahlungsdichte aus der Gleichung gekürzt werden. Die Werte  $a(\lambda, \theta, \varphi)$  liegen vor bei diskreten Elevations- und Azimutwinkel  $\theta_i$  und  $\varphi_j$ . Mit Hilfe eines Trapez-Kubatur-Verfahrens lassen sich mit nachfolgendem Formalismus die hemisphärischen, spektralen Werte der Größe  $a_h$ , numerisch bestimmen [3.10]:

$$a_h = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f(\lambda, \theta_j, \varphi_i) f(\lambda, \theta_{j+1}, \varphi_i) f(\lambda, \theta_j, \varphi_{i+1}) f(\lambda, \theta_{j+1}, \varphi_{i+1}) (\theta_{i+1} - \theta_i) (\varphi_{j+1} - \varphi_j) \quad (3.7)$$

Die so erhaltenen Werte beschreiben das optische Verhalten bei einer bestimmten Wellenlänge, jedoch mit Berücksichtigung des Strahleneinfalls aus der gesamten Hemisphäre.

Wie von verschiedenen Stoffen bekannt ist, sind manche ihrer Eigenschaften richtungsabhängig. So weisen diverse durchsichtige Kristalle optisch anisotropes Verhalten auf. Dies bedeutet, dass die Phasengeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen in ihnen von der Ausbreitungsrichtung bezüglich der Kristallachsen abhängt. Bei der Brechung an der Grenzfläche zwischen einem optisch isotropen und einem optisch anisotropen Stoff entstehen im Allgemeinen zwei Wellen. Beide laufen mit unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten in unterschiedliche Richtungen und sind senkrecht zueinander polarisiert. Es tritt Doppelbrechung mit Polarisation auf. In Kristallen gibt es im Allgemeinen zwei Richtungen der Energieausbreitung, in denen sich eine Welle wie im isotropen Stoff verhält. Diese Richtungen werden optische Achsen genannt. Bei optisch einachsigen Stoffen entsteht dabei die ordentliche und die außerordentliche Welle. Der einfallende Lichtstrahl wird im doppelbrechenden Material in einen ordentlichen (zu englisch "ordinary beam", o) und einen außerordentlichen (zu englisch "extraordinary beam", e) Strahl geteilt. Lediglich die Brechung des ordentlichen Strahles lässt sich mit dem Snelliussches Gesetz beschreiben. Die Eigenschaft zur Doppelbrechung findet sich bei Kristallen (Kalkspat, Quarz, Glimmer u. a.) sowie unter der Einwirkung innerer und äußerer Kräfte bei vielen transparenten Stoffen (Glas, Kunstharz u. A.). Unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes werden sogar einige ansonsten isotrope Stoffe doppelbrechend. Werden nun der ordentliche und der außerordentliche Strahl unterschiedlich stark beim Durchgang durch einen Stoff absorbiert, so wird dieser Effekt als Dichroismus bezeichnet.

### 3.1.2 Farbmatrik

Für jedes im architektonischen Bereich eingesetzte transparente Element ist dessen Einfluss auf die Farbempfindung der Umwelt außerhalb und innerhalb des Bauwerkes von Bedeutung. Gewünscht ist allgemein eine möglichst farbverfälschungsfreie Lichttransmission durch das Verglasungselement. Dies gilt auch für Systeme adaptiver Art, die den Licht- und Energiedurchgang beeinflussen. Um den Einfluss der Elemente auf das Farbempfinden verstehen zu können, ist es notwendig, die wesentlichen Grundlagen der Farbmatrik zu erläutern.



Eine Farbempfindung beim Menschen entsteht, wenn sichtbares Licht in das Auge gelangt. In der Netzhaut wird der Farbreiz durch lichtempfindliche Rezeptoren in elektrische Impulse umgewandelt, die im Gehirn den Farbeindruck hervorrufen. Die Zapfen der Netzhaut liefern für das farbige Sehen bei Tage, das helladaptive Sehen, die entsprechenden Impulse. Für die Farben Rot, Grün und Blau gibt es jeweils eigene Zapfen mit unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten. Die ebenfalls in der Netzhaut enthaltenen Stäbchen liefern keinen Beitrag zum Farbsehen sondern dienen der Hell-Dunkel-Empfindlichkeit. In der DIN 5033 Teil 2 sind in Anlehnung an die physiologischen Gegebenheiten beim Menschen drei spektrale Bewertungsfunktionen, die Normspektralwertfunktionen  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  definiert [3.8]. Diese wurden aus dem Verhalten des Auges beim Farbsehen abgeleitet. Dargestellt sind die entsprechenden Funktionen in Diagramm 3.2 für den 10°-Normalbeobachter. Die statistische Verteilung der Zapfen und der Stäbchen auf der Netzhaut ist nicht gleichmäßig. So befinden sich die Zapfen eher im inneren Bereich, also gegenüber der Pupille, wohingegen die Stäbchen bevorzugt im Außenbereich anzufinden sind. Dies hat zur Folge, dass es bei unterschiedlicher Probengröße in gleicher Entfernung vom Be-

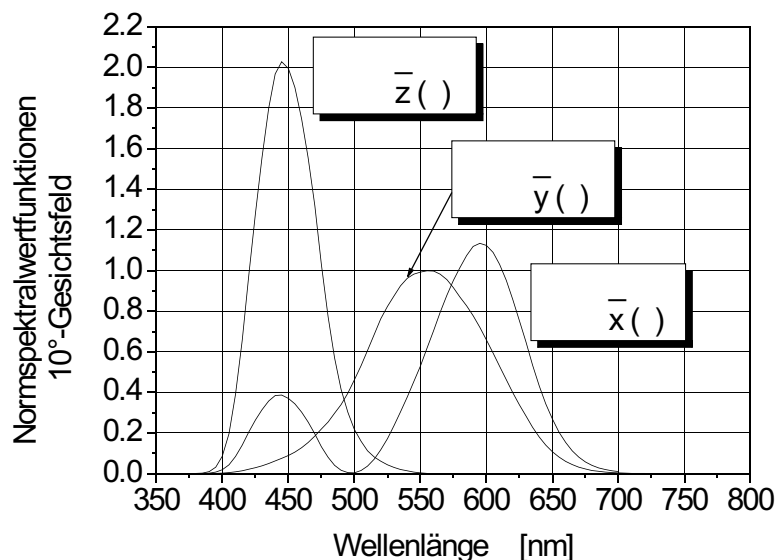


Diagramm 3.2:  
Normspektralwertfunktionen für den 10°-Normalbeobachter nach DIN 5033 Teil 2.

trachter zu unterschiedlichen Farbeindrücken bei identischer Probenart kommt. Dieser Umstand findet bei der Definition des sogenannten Normalbeobachters Berücksichtigung. Jedem Normalbeobachertyp ist eine bestimmte Probengröße bei einem bestimmten Probenabstand zugeordnet. Gebräuchlich sind der 2°-Normalbeobachter gemäß CIE 1931 sowie der 10°-Normalbeobachter gemäß CIE 1961. Auch die Eigenschaften der Lichtquelle spielen bei der Farbbeurteilung eine wichtige Rolle. Deshalb wurden bestimmte Normlichtarten mit definierten spektralen relativen Strahlungsflußverteilungen festgelegt:

$$S(\lambda) = k \frac{d(\lambda)}{d} \quad (3.8)$$

Der Index  $\lambda$  bezeichnet den differenziell auf die Wellenlänge bezogenen Wert. Der Multiplikator  $k$  dient der Normierung der spektralbezogenen Funktion der Strahlungs-

leistung auf den Wert  $S(\lambda = 560 \text{ nm}) = 100$ . Dem natürlichen Tageslicht entsprechend ist die Normlichtart D65 in seiner spektralen Strahlungsflußverteilung definiert.

Zur Durchführung der farbmetrischen Berechnungen wird auf die tabellierten Werte der Normlichtart D65 zurückgegriffen. Neben der Beleuchtung sowie den beobachterspezifischen Eigenheiten spielt für die Farbwahrnehmung auch der Strahlengang eine entscheidende Rolle. Beispielsweise bewirkt Tageslicht, das durch eine Glasscheibe in ein Gebäude eintritt, durch die spektral unterschiedliche Transmission durch das Glas und damit durch die Veränderung des spektralen Strahlungsflusses eine Veränderung des Farbeindrucks gegenüber der Betrachtung derselben Probe im Freien. Um diesen Effekt bestimmen zu können, wird der Strahlengang d) nach Abbildung 3.2 betrachtet. Zur Beurteilung der Farbwirkung einer Verglasung in der Außenansicht ist der Strahlengang b) von Relevanz.

Von den drei Verfahren zur Farbwertbestimmung wird das Spektralverfahren zur Beurteilung der Farbveränderung durch das Verglasungselement herangezogen. Der Vorteil dieser Methode gegenüber den übrigen besteht darin, dass die Transmissions- und Reflexionsdatensätze aus den Berechnungsansätzen oder den Messungen beispielsweise für die unterschiedlichen TN-Zellentypen direkt zur Berechnung der Farbwerte herangezogen werden können. Zur Farbmessung wird bei diesem Verfahren die zu messende Farbvalenz als Summe spektraler Farbvalenzen berechnet. Unter Farbvalenz wird die Bewertung eines Farbreizes durch die drei Empfindlichkeitsfunktionen des Auges zu einer einheitlichen Farbwirkung verstanden. Bei bekannter Strahlungsfunktion der Lichtquelle sowie gemessenen oder entsprechend berechneten Transmissionswerten der Elemente kann unter Anwendung der Normspektralwertfunktionen für den Normalbeobachter eine sogenannte valenzmetrische Auswertung erfolgen. Bezeichnet

$$t(\lambda) = S(\lambda)T(\lambda)R(\lambda) \quad (3.9)$$

die Farbreizfunktion des transmittierten und anschließend von der Farbprobe reflektierten Lichtes entsprechend dem Strahlenweg d) sowie

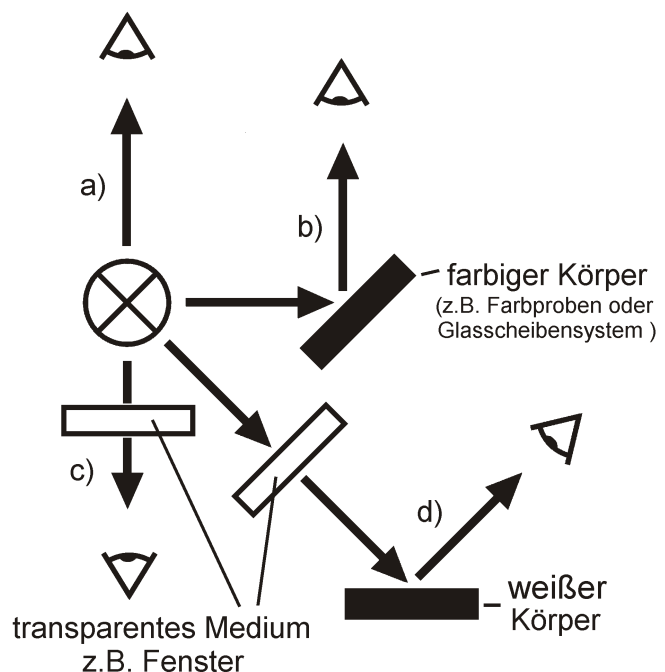


Abbildung 3.2:  
Strahlengang bei der Wahrnehmung.  
a) Strahlungsquelle  
b) Körperfarbe in der Reflexion  
c) Körperfarbe in der Transmission  
d) Körperfarbe in der Reflexion nach Transmission.

$$R(\lambda) = S(\lambda) R(\lambda) \quad (3.10)$$

die Farbreizfunktion des von der Farbprobe reflektierten Lichtes entsprechend dem Strahlenweg  $b$ ) und bezeichnen  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  die Normspektralwertfunktionen so werden die Normfarbwerte berechnet durch die folgenden Gleichungen:

$$X_i = k \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (3.11)$$

$$Y_i = k \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (3.12)$$

$$Z_i = k \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \quad i = t, r. \quad (3.13)$$

Die Normfarbwerte  $X_t, Y_t, Z_t$  bezeichnen die Farbwerte für die transmittierte und dann reflektierte Strahlung, wohingegen die Normfarbwerte  $X_r, Y_r, Z_r$  sich durch die alleinige Reflexion am Farbkörper ergeben. Um die Farbwirkung eines Fensterelementes bei Betrachtung von außen zu erfassen, wird dieses als farbiger Körper betrachtet und dessen Reflexionsgrad in Gleichung 3.10 eingesetzt. Für die Beurteilung der Veränderung der Farbwirkung von Körpern im Gebäude selbst durch die selektive Transmission durch das Fensterelement dient in dieser Arbeit ein matt weißer Körper mit einem konstanten Reflexionsgrad von  $R(\lambda) = 1$  in Gleichung 3.9. Die Integrale werden durch entsprechende Summen angenähert. Verwendet wird hierbei die Schrittweite von  $5 \text{ nm}$ . Die Normfarbwerte  $X_n, Y_n, Z_n$  sind die Normfarbwerte des vollkommen mattweißen Körpers unter der beleuchtenden Lichtart. Sie legen den Unbuntpunkt fest. Der Bezug auf den Unbuntpunkt soll näherungsweise den Einfluss der Umstimmung auf die beleuchtende Lichtart berücksichtigen. Die entsprechenden Normfarbwerte berechnen sich nach den folgenden Gleichungen zu:

$$X_n = k \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (3.14)$$

$$Y_n = k \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (3.15)$$

$$Z_n = k \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3.16)$$

Der Faktor  $k$  der Gleichungen 3.11 bis 3.16 dient zur Normierung des Normfarbwertes  $Y_n$  der Körperfarbe eines idealweißen Körpers ( $R(\lambda) = 1$ ) in Gleichung 3.15. Der Normfarbwert  $Y_n$  wird dabei für alle Normlichtarten und Normalbeobachterkombinationen zu  $Y_n = 100$  gesetzt.

$$k = \frac{100}{S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d} \quad (3.17)$$

780nm  
380nm

Seit der Festlegung der Grundlagen zur Farbbestimmung wurden fortlaufend Theorien über die menschliche Farbwahrnehmung erweitert und verfeinert. Darauf basierend konnten verschiedene Farbsysteme entwickelt werden, die mit Hilfe von Farbmaßzahlen eine eindeutige Kennzeichnung der Farbvalenz eines Körpers ermöglichen. Das in dieser Arbeit zur Anwendung kommende System wird als  $L a b$ -Farbraum gemäß CIE 1976 bezeichnet. Das  $L a b$ -Farbsystem ist ein dem subjektiven Farbempfinden des Menschen angepasstes Farbsystem. Der  $L$ -Wert gibt dabei die Helligkeit einer Farbe an, der  $a$ -Wert den Rot-Grün-Anteil und der  $b$ -Wert den Gelb-Blau-Anteil [3.8]. Dieses Verfahren ermittelt Farbwertverschiebungen sehr anschaulich und wird daher der Methode der Bestimmung des allgemeinen Farbwiedergabe-Index nach DIN 6169 vorgezogen [3.11]. Die Systematik des  $L a b$ -Farbraum-Diagramms ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Die entsprechenden Zahlenwerte errechnen sich aus den Normfarbwerten entsprechend der nachfolgend dargestellten Gleichungen:

$$L = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad (3.18)$$

$$a = 500 \left[ \sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right] \quad (3.19)$$

$$b = 200 \left[ \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \right] \quad (3.20)$$

Zu beachten ist hierbei, dass für kleine Werte der Normfarbwertterme diese ersetzt werden durch nachfolgende Ausdrücke:

$$\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} = 7.787 \left( \frac{X}{X_n} \right)^{\frac{16}{116}} \quad \text{für} \quad \left( \frac{X}{X_n} \right) < 8.856 \cdot 10^{-3} \quad (3.21)$$

$$\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} = 7.787 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{16}{116}} \quad \text{für} \quad \left( \frac{Y}{Y_n} \right) < 8.856 \cdot 10^{-3} \quad (3.22)$$

$$\sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} = 7.787 \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{16}{116}} \quad \text{für} \quad \left( \frac{Z}{Z_n} \right) < 8.856 \cdot 10^{-3} \quad (3.23)$$

Aus dem  $L a b$ -Farbraum-Diagramm ist ablesbar, dass rote Farbtöne einen positiven  $a$ -Wert besitzen und grüne Farbtöne entsprechend einen negativen  $a$ -Wert aufweisen. Gelbe Farbtöne sind durch einen positiven  $b$ -Wert gekennzeichnet und blaue Farbtöne durch einen entsprechend negativen  $b$ -Wert. Die  $L$ -Werte bewegen sich zwischen 0 für ideal Schwarz und 100 für ideal Weiß. Die als Buntheit oder international als "Chroma" bezeichnete Größe  $C_{ab}$  bestimmt sich zu:

$$C_{ab} = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (3.24)$$

Mit Hilfe der vorangehend definierten Größen ist eine anschauliche Bewertung der Beeinflussung der Farbwiedergabe eines Körpers durch verschiedene Transmissionspektren unterschiedlicher Gebäudeverglasungen gemäß Abbildung 3.4 möglich.

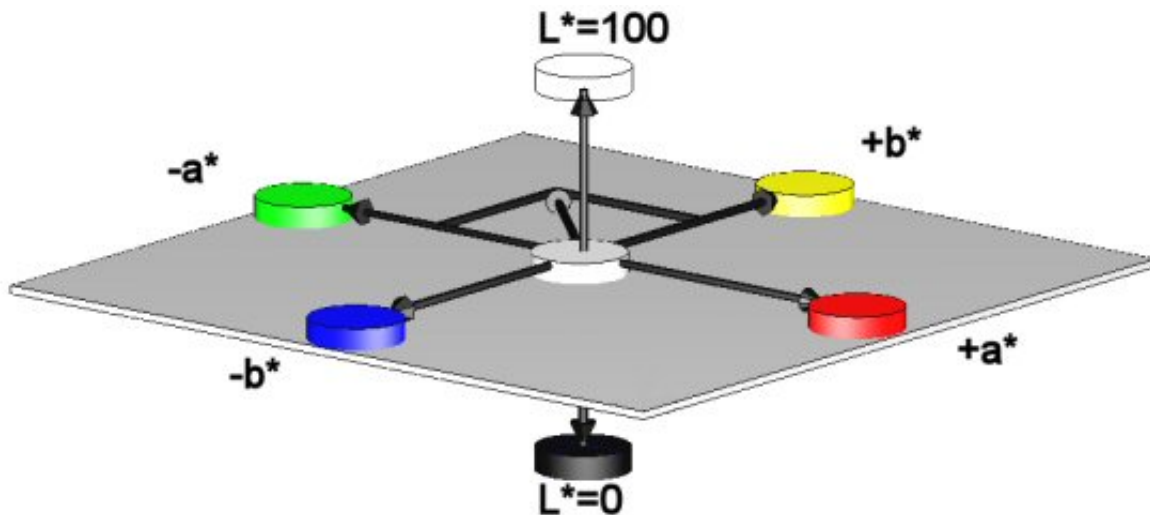


Abbildung 3.4:  
L a b -Farbraum-Diagramm

### 3.1.3 Polarisation und Polarisatoren

Die Quantentheorie erklärt die Erzeugung elektromagnetischer Strahlung durch den Elektronensprung von einem höheren Energieniveau auf ein niedrigeres. Bei diesem Vorgang wird im Atom oder Molekül eine gequantelte, also diskrete Energiemenge in Form der Strahlung ausgesandt. Entsprechend der Charakteristik des Quantensprunges wird bei diesem Vorgang entweder linear oder zirkular polarisierte Strahlung emittiert [3.12]. Eine makroskopische Lichtquelle stellt in der Regel eine ungeordnete Gesamtheit unzähliger solcher elementarer Emittenten dar, die keine Ausrichtung und Orientierung besitzen. Die Überlagerung der Strahlung aller dieser Elementarprozesse liefert daher eine insgesamt unpolarisierte Strahlung. Das bedeutet, dass in der so erzeugten Strahlung keine Richtung bevorzugt vorkommt. Strahlung dieser Charakteristik wird als natürliches Licht bezeichnet. Bei jeglicher elektromagnetischer Strahlung schwingt der Feldvektor des elektrischen Feldes  $\vec{E}$  in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die Richtung, in der er schwingt, wird dabei als Polarisationsrichtung bezeichnet. Unterschieden wird zwischen linear polarisiertem Licht, zirkular polarisiertem Licht und elliptisch polarisiertem Licht. Linear sowie zirkular polarisierte Strahlung sind als Sonderformen des elliptisch polarisierten Lichtes zu verstehen. Bei linear polarisiertem Licht ändert sich die Richtung des elektrischen Feldvektors entlang des Lichtstrahles nicht. Überlagern sich zwei linear polarisierte

Wellen, deren Feldvektoren senkrecht aufeinander stehen und die eine beliebige aber definierte Phasendifferenz sowie beliebige Amplituden aufweisen, so beschreibt der resultierende Feldvektor eine Bahn, die in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung betrachtet als Ellipse erscheint.

Sowohl linear polarisiertes Licht als auch zirkular polarisiertes Licht haben elementaren Charakter. Das bedeutet, dass Licht dieser Arten beispielsweise von entsprechenden Lichtquellen, wie bereits beschrieben, oder durch Polarisation erzeugt werden kann. Das Überlagerungsmodell ist an dieser Stelle lediglich eine Vorstellungshilfe. Im bisher vorgestellten Veranschaulichungsmodell wird stillschweigend von monochromatischen Lichtwellen ausgegangen. Es zeigt sich jedoch in der Praxis der Polarisierung, dass bei multichromatischem Licht eine Abweichung von der linearen oder zirkularen Polarisation auftritt, die um so größer ist, je größer das Spektrum der Strahlung ausfällt.

Aus natürlichem Licht lässt sich mit Hilfe von Funktionselementen polarisiertes Licht erzeugen. Die Polarisierung kann erfolgen durch

- Polarisationsprismen aus doppelbrechenden Kristallen,
- Polarisationsfilter auf der Basis dichroitischer Stoffe,
- Interferenzpolarisatoren mit Systemen aus dünnen Schichten,
- Reflexionspolarisatoren mit reflektierenden oder durchlässigen Grenzflächen.

Da die Polarisation des Lichtes bei der Funktionszelle auf Flüssigkristallbasis Grundlage der Schalteigenschaft ist, wird an dieser Stelle auf die dort einsetzbaren Polarisatorarten näher eingegangen.

Sogenannte Flächenpolarisatoren auf der Basis von Hochpolymeren stellen derzeit die in der Displaytechnologie üblichen, zur Anwendung kommenden dichroitischen Polarisatoren dar. Ausgangsstoffe sind beispielsweise Polyvinylalkohol, -ketal, -acetal mit langkettiger molekularer Struktur. Diese Stoffe werden in Form dünner Folien hergestellt und durch mechanische Beanspruchung gereckt. Bei diesem Vorgang richten sich die Kettenmoleküle aus, so dass die Folien doppelbrechend werden. Durch das Einfärben mit einem dichroitischen Farbstoff, etwa mit Jod oder organischen Farbstoffen, werden in der Folie die parallel und die senkrecht zur Reckrichtung schwingenden Wellen stark unterschiedlich absorbiert. Das Jod wird dabei nach dem Reckvorgang eingebracht wohingegen die Dotierung mit organischen Farbstoffen vor dem Strecken erfolgt. Die so hergestellten Polarisationsfolien sind vor allem im sichtbaren Bereich wirksam. Durch eine erhöhte Trocknungstemperatur, eine veränderte Jod-Konzentration sowie den Zusatz von Dehydrationsmittel lassen sich auch Polarisatoren für den IR-Strahlungsbereich bis ca. 2400 nm herstellen [3.2 und 3.14]. Entsprechend der verwendeten Farbstoffe zeigt sich in der Folie eine wellenlängenabhängige Polarisation und Absorption. Verfügbar sind solche Folienpolarisatoren in Breiten bis ca. 482 mm (s. Anhang D-f). Die maximale Transmission für einen solchen Folienpolarisator liegt bei etwa  $T_n = 0.46$ , bedingt durch Reflexionen an den beiden Folienoberflächen und durch die Absorption der einen Schwingungsrichtung.

Eine weitere Art der Flächenpolarisatoren wird auf der Basis von Glas durch Dotieren mit Fremdstoffen hergestellt [3.15 und 3.16]. Als Fremdstoffe kommen dabei Silber, Kupfer oder andere Metalle zur Verwendung. An Hand des silberdotierten Glaspolarisators soll nachfolgend die Funktionsweise dieses Typs erläutert werden. Nach dem Aufbringen einer silbersalzhaltigen Paste auf eine Flachglasprobe und anschließenden

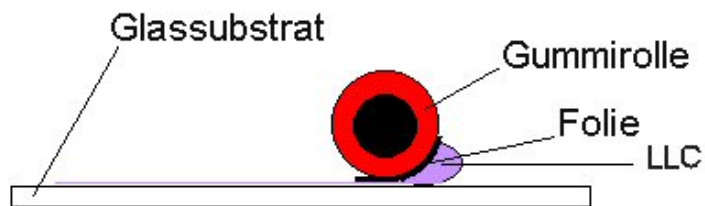


der Wärmebehandlung auf eine Temperatur kurz oberhalb der Glastransformationstemperatur  $T_g$  kommt es zwischen dem Glas und dem Auftrag zu einem Austausch von Natriumionen aus dem Glas gegen Silberionen aus der Paste. Die Silberionen reagieren durch eine Elektronenaufnahme von zweiwertigen Eisenionen im Glas zu Silberatomen. Diese wiederum lagern sich zu Silberpartikel zusammen, die unter dem Einfluss der Grenzflächenspannung sphärische Form erhalten. Die Durchmesser dieser Silberkugeln betragen typischerweise 10 nm bis 30 nm [3.15, 3.17 und 3.18]. Der Natrium-Silber-Ionenaustausch kann ebenfalls durch das Einlegen des Glases in eine Silbersalzschnmelze auch bei Temperaturen unterhalb der Glastransformationstemperatur erfolgen. Durch eine anschließende Wärmebehandlung erfolgt auch bei diesem Verfahren die Silberpartikelbildung. Die entstandenen sphärischen Teilchen bilden im Glas Absorptions- und Streuzentren, deren Einfluss das Glas gelb färbt. Durch das Umformen der sphärischen Silberpartikel in Rotationsellipsoidform und eine gleichförmige Ausrichtung erhält das Glas polarisierende Eigenschaften und eine charakteristische Farbe. Die Umformung der Partikel kann entweder durch Reckung der Glasproben bei Temperaturen wenig oberhalb der Glastransformationstemperatur [3.17] oder durch gezielte thermische Behandlung mittels hochintensiver ultrakurzer Laserimpulse [3.15 und 3.19] geschehen. Beim mechanischen Reckvorgang sind derzeit Glasbreiten nicht über 40 mm möglich, wohingegen beim Laserumformverfahren keine Breitenbeschränkung besteht. Das letztgenannte Verfahren befindet sich derzeit noch in der Entwicklung. Beim mechanischen Recken werden die Gläser von ihrer ursprünglichen Dicke von ca. 1 mm bis 3 mm auf eine Enddicke von ca. 0.2 mm deformiert [3.17]. Ursache für die Polarisierung des durchlaufenden Lichtes ist die unterschiedliche Absorption der Strahlung in Richtung der Hauptachsen der ellipsoidförmigen Teilchen. Dieser dichroitische Effekt beruht auf der Tatsache, dass der parallel zur Hauptachse des Ellipsoids eintreffende Strahlungsanteil im sichtbaren Bereich und der senkrecht einfallende Anteil im ultravioletten Wellenlängenbereich absorbiert wird. Für veränderliche Halbachsenverhältnisse lassen sich so Absorptionsspektren für den parallelen Anteil im Farbbereich von blau über grün bis hin zu gelb realisieren [3.15]. Die Gläser erscheinen daher in der Durchsicht ebenfalls verschiedenfarbig. Der große Vorteil solcher Glaspolarisatoren ist die Tatsache, dass dieses Glas auch mit der Dotierung dieselbe Langzeitstabilität aufweist wie der Grundwerkstoff selbst.

Auch mit Hilfe von Mischungen aus modifizierten organischen Farbstoffen mit lyotropen, flüssigkristalliner Eigenschaft (LLCP von englisch "lyotropic liquid crystal polarizer") lassen sich durch spezielle Verfahren der Aufbringung auf transparente Träger-substrate Polarisatoren herstellen. Bei diesen lyotropen Substanzen ist das Erreichen eines anisotropen flüssigen Zustandes abhängig vom Vorhandensein eines entsprechenden Lösungsmittels. Eine Polarisatorschicht wird hergestellt durch das Aufbringen der lyotropen Flüssigkeit auf ein Substrat und die anschließende mechanische Ausrichtung der Moleküle der Flüssigkeit beim Beschichten. Durch das Verdunsten des Lösungsmittels während oder kurz nach der Ausrichtung der Moleküle verbleiben diese auch im festen Zustand in orientierter Anordnung. Dichroitische Eigenschaften der gerichtet orientierten Farbmoleküle der Schicht bewirken die Polarisation des durchlaufenden Lichtes. Über die Zusammensetzung der Beschichtungen aus verschiedenen Farbstoffmolekülen lassen sich verschiedenfarbige Polarisatoren herstellen. Beschränkungen bezüglich der herstellbaren Polarisatorgrößen ergeben sich lediglich aus der vorhandenen Anlagenspezifikation für die Herstellung. Die für das elektrooptische Element dieser Arbeit teilweise verwendeten Flüssigkristallpolarisato-



Abbildung 3.4:  
Herstellung der polarisierenden Schicht aus Flüssigkristallpolarisator durch Scheren mit einer Kunststoffolie und einer feststehenden Gummirolle.



ren wurden durch Abziehen mittels Gummirolle und untergelegter Folie entsprechend Abbildung 3.4 und auch im Hand-Rakelverfahren hergestellt.

Das System der TN-Zelle benötigt zwei Polarisatoren, die entscheidend die Transmissionseigenschaft der Zelle beeinflussen. Um eine große Strahlungsdurchlässigkeit eines TN-Zellen-Systems zu erhalten müssen die Polarisatoren in paralleler Anordnung eine große Durchlässigkeit aufweisen. Zur Realisierung eines großen Schalthubes ist dabei eine möglichst geringe Transmission im gekreuzten Zustand der Polarisatoren unabdingbar. Zur Beschreibung einer Polarisatorpaarung wird deshalb die Transmissionsdifferenz zwischen den beiden Extremlagen der Polarisatoren eingeführt. Sie ist definiert zu

$$T = T_{\parallel} - T_{\perp} \quad (3.25)$$

Dabei kennzeichnet die Größe  $T_{\parallel}$  den Transmissionsgrad zweier paralleler Polarisatoren. Mit  $T_{\perp}$  wird der Transmissionsgrad für die senkrecht zueinander angeordneten Polarisatoren bezeichnet. Es handelt sich jeweils um spektrale Größen. Vorausgesetzt wird hierbei ein flächennormaler Strahlungsdurchgang durch die Anordnung beider Polarisatoren und die Bestrahlung durch unpolarisiertes Licht in der Messvorrichtung. Zweckmäßigerweise werden die integralen Mittelwerte, die fotometrischen oder radiometrischen Transmissionsgrade, nach Gleichung 3.5 zur Bestimmung des Transmissionsunterschiedes herangezogen. Sowohl die fotometrischen als auch die radiometrischen Mittelwerte beziehen sich dabei auf den Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm.

Üblicherweise sind die entsprechenden spektralen Kennwerte lediglich für den fotometrischen Wellenlängenbereich in den Produktinformationen der Hersteller dokumentiert. Um jedoch für einen weitergehenden Bereich die entsprechenden Transmissionsdaten zu erhalten, wurden die vorhandenen Polarisatormuster vom Autor spektral vermessen. Hierzu fand ein Spektrometer (s. Anhang C-1) Verwendung. Vermessen werden konnten die Proben im Wellenlängenbereich von 190 nm bis 1100 nm. Auf Grund der Tatsache, dass der Messstrahl des verwendeten Spektrometers teilweise polarisiert ist, muß die Transmission einer Probe unter zwei um 90° zueinander verdrehte Polarisationsrichtungen gemessen werden. Der entsprechende Transmissionswert für unpolarisierte Einstrahlung ergibt sich aus der Mittelwertbildung der Messwerte beider Richtungen.

$$T_{\parallel} = \frac{1}{2}(T_{\parallel,0} + T_{\parallel,90}) \quad (3.26)$$

$$T = \frac{1}{2}(T_{\perp,0} + T_{\perp,90}) \quad (3.27)$$

Auch die Farbwirkung der TN-Zelle wird wesentlich von den Eigenschaften der Polarisatoren bestimmt. Die Farbmaßzahlen des  $L a b$  -Farbraumes werden hierbei herangezogen. Ein gleichmäßiger Verlauf der spektralen Werte der Transmission und Absorption weist dabei auf eine geringe Farbveränderung hin.

Wie bei Glasscheibensystemen bereits beschrieben, zeigen auch Folienpolarisatoren eine Winkelabhängigkeit bei der Transmission und der Reflexion. Um diese analytisch beschreiben zu können ist die Kenntnis der spektralen Brechungsindizes sowie der entsprechenden Absorptionskoeffizienten nötig. Diese Daten müssen zudem für die Schwingungsrichtungen parallel und senkrecht zur Polarisationsrichtung der Polarisatoren vorliegen. Entsprechende Werte waren jedoch weder in der Literatur dokumentiert noch von den Herstellern zu beziehen. Für die theoretische Behandlung des Strahlungsdurchganges durch Polarisatoren wird in der Literatur allgemein vom idealen Polarisator ausgegangen. Aus Ermangelung entsprechender Polarisatorkennndaten wird zur Darstellung der Winkelabhängigkeit der Transmissionsgrade teilweise auf Messungen zurückgegriffen. Messtechnisch lässt sich die Abhängigkeit durch eine Vielzahl von Einzelmessungen der Transmission und Reflexion je Probe unter verschiedenen Inzidenz- und Azimutwinkeln ermitteln. Unter Einsatz eines speziellen Messgerätes (s. Anhang C-2) kann eine Transmissionsmessung durchgeführt werden [3.20]. Hierbei wird die Transmission eines einzelnen Polarisators über Elevationswinkel ( $\Theta$ ) im Bereich von  $-80^\circ$  bis  $80^\circ$  und Azimutwinkel ( $\Phi$ ) von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  unter zu Hilfeahme einer geeigneten Lichtquelle bei einer einzigen Messung bestimmt. Zunächst wird mit einer ersten Messung die Leuchtdichte der Lichtquelle im angegebenen Blickwinkelbereich ohne Probe bestimmt und anschließend die durch Reflexion und Absorption reduzierte Leuchtdichte mit Probe ermittelt. Verwendet

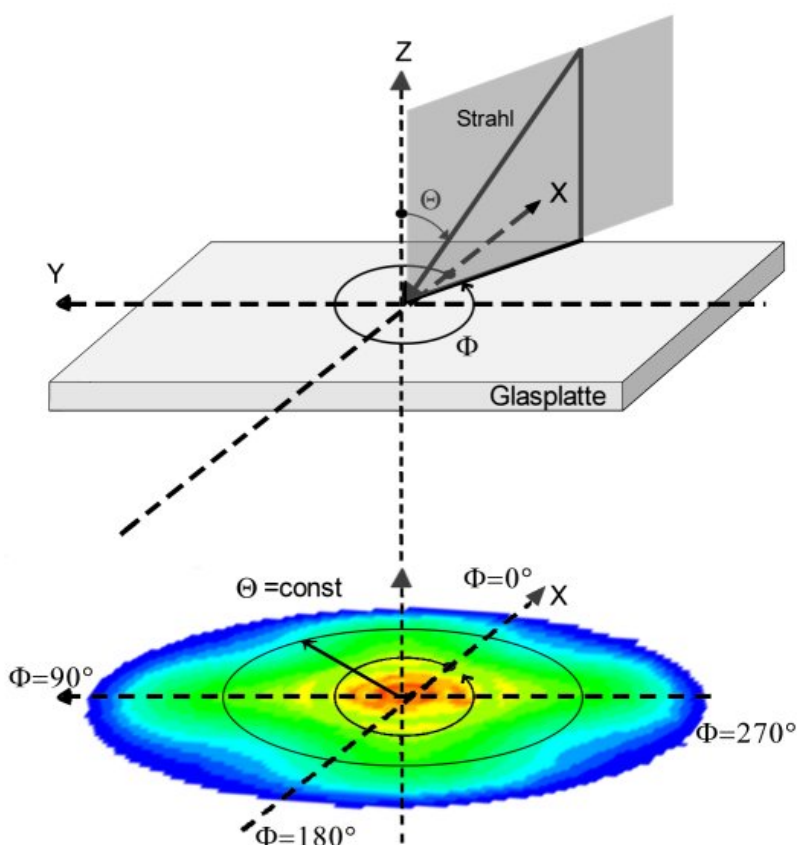


Abbildung 3.5:  
Bezeichnungssystematik  
für eine Probe mit einfallendem Strahl im Polarendiagramm der Transmission.

wurde für die Messungen eine Leuchtplatte (s. Anhang C-3). Im Polardiagramm dargestellt sind die Quotienten der Leuchtdichten nach der Transmission durch die Probe zu der Leuchtdichte aus der Strahlungsquelle ohne Probe. Der inzidenzwinkelabhängige Transmissionswert, ist wie folgt definiert:

$$T(\theta, \varphi) = \frac{L_{mit\ Probe}}{L_{ohne\ Probe}} \quad (3.28)$$

Die Definitionen der Winkel am einfallenden Strahl können der Abbildung 3.5 entnommen werden. Im Polarkoordinatensystem lassen sich die winkelabhängigen optischen Kennwerte anschaulich darstellen. Für einen bestimmten Elevationswinkel können dabei die Kennwerte auf dem entsprechenden Kreis im Diagramm entnommen werden. Der Azimutwinkel wird dabei von der X-Achse aus gemessen.

### 3.1.4 TN-Zelle

Zunächst soll der prinzipielle Aufbau einer Flüssigkristallzelle mit einer nematischen Phase und einer passiven Ansteuerung an Hand der schematischen Darstellung in den Abbildungen 3.6 und 3.7 erläutert werden. Die Zelle ist als transmissives Element mit lediglich einem adressierbaren Feld aufgebaut. Im nicht angesteuerten Fall ( $U=0$ ) ist sie lichtdurchlässig, also "normally white" (NW). Die außenliegenden Polarisatoren (e) sind gegeneinander um  $90^\circ$  gedreht. Bei paralleler Anordnung der Polarisatoren im "normally black"-Modus (NB) wäre die Zelle im nichtangesteuerten Zustand lichtundurchlässig. Neben den zwei außenliegenden Polarisatoren besteht die Zelle aus zwei Trägersubstraten, vorzugsweise aus Glas (d), die die Funktionsschichten (a,b,c) tragen und den Flüssigkristall einschließen. Die elektrisch leitfähige Schicht (b) dient dem Aufbau eines elektrischen Feldes. Die Orientierungsschicht (a)

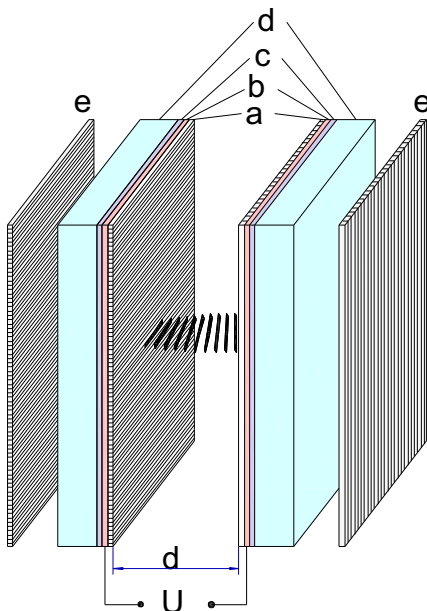


Abbildung 3.6:  
Schematischer Aufbau einer transmissiven, passiv angesteuerten TN-Zelle im NW-Modus bei  $U=0$ . Die Zelle ist lichtdurchlässig.

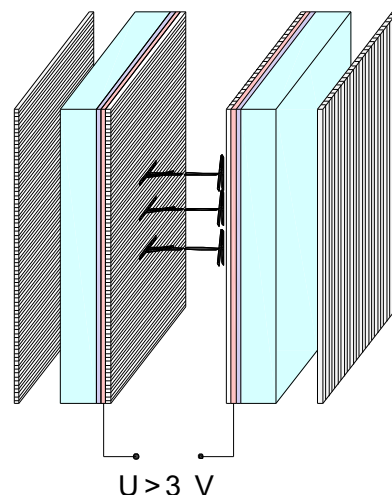


Abbildung 3.7:  
Schematischer Aufbau einer transmissiven, passiv angesteuerten TN-Zelle im NW-Modus bei  $U > 3\text{ V}$ . Die Zelle ist lichtundurchlässig.

bewirkt, dass sich der Flüssigkristall an der Grenzfläche jeweils in definierter Richtung ausrichtet. Die Richtung der Orientierungsschicht ist jeweils parallel zur Polarisationsrichtung des nächstgelegenen Polarisators. Abstandshalter (zu englisch "spacer") sorgen für einen konstanten Abstand zwischen den Trägersubstraten. Wird ein alkalihaltiges Trägerglas verwendet, so verhindert eine Siliziumdioxid-Schicht (c) das Wandern von Alkaliionen in die übrigen Schichten. Eine Randverklebung aus einem UV-härtenden Klebstoff schließt die Zelle ab.

Trifft unpolarisiertes Licht auf den vorderen Polarisator, so wird von diesem lediglich eine Schwingungsrichtung des Lichtes hindurch gelassen. Dieses üblicherweise linear polarisierte Licht gelangt nun in die Flüssigkristallschicht. Während der Direktor der obersten Flüssigkristalllage parallel zur Polarisationsrichtung des oberen Polarisators ausgerichtet ist, erfolgt in der Flüssigkristallschicht eine Drehung des Direktors um  $90^\circ$ , so dass die untere Lage mit der Direktorrichtung parallel zum unteren Polarisator orientiert ist. Ursache für die Ausrichtung der Flüssigkristallmoleküle in den Grenzschichten ist die Orientierungsschicht. Die Direktordrehung der Flüssigkristallphase bewirkt, dass die Polarisationsrichtung des durchlaufenden Lichtes ebenfalls um  $90^\circ$  mitgedreht wird und am Austritt aus dem Flüssigkristall nun parallel zur Polarisationsrichtung des unteren Polarisators verläuft. Das Licht kann daher den unteren Polarisator passieren. Die Zelle erscheint in diesem nichtangesteuerten Zustand durchsichtig (Abbildung 3.6). Überschreitet die an die Zelle angelegte Spannung einen bestimmten Wert  $U_{th}$ , (zu englisch "threshold"=Grenzwert), so werden die Direktoren im Flüssigkristall parallel zum E-Feld ausgerichtet. In diesem Zustand des Lichtdurchganges in Richtung der optischen Achse der Flüssigkristallmoleküle erfolgt keine Doppelbrechung und auch keine Drehung des E-Feld-Vektors der Strahlung mehr. Die Schwingungsrichtung des E-Feld-Vektors der durchlaufenden Strahlung steht nun senkrecht zur Polarisationsrichtung des unteren Polarisators. Daher wird das Licht durch diesen weitestgehend absorbiert. Die Zelle erscheint undurchsichtig. Die Lichttransmission der TN-Zelle wird funktionsbedingt wesentlich von den Eigenschaften der eingesetzten Polarisatoren bestimmt. Unter bestimmten Bedingungen im Zellaufbau wird das im oberen Polarisator linear polarisierte Licht (bei Verwendung eines Linearpolarisators) den unteren Polarisator mit ebenfalls linearer Polarisation, aber um  $90^\circ$  gedrehter Richtung, erreichen. Diese als "Maguin-Bedingung" bekannte Gleichung lautet [3.21]:

$$d \cdot n = \frac{\lambda}{2}. \quad (3.29)$$

Dabei beschreibt  $d$  die Dicke der Flüssigkristallschicht,  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichtes und  $n$  die optische Anisotropie. Für den eingesetzten Nematenergibt sich für die Grenzwellenlängen des sichtbaren Lichtes von 380 nm bzw. 780 nm eine Grenzdicke der Zelle von  $1.96 \mu\text{m}$  sowie von  $4.03 \mu\text{m}$ . Für die hergestellten Testzellen mit den Dicken zwischen  $5 \mu\text{m}$  bis  $10 \mu\text{m}$  ist die Maguin-Bedingung nicht erfüllt.

Weil der Schaltvorgang zwischen voller Transmission und geringster Transmission mit zunehmender Dicke an Dauer zunimmt werden dünne Flüssigkristallschichten für die Bildschirmtechnik angestrebt. Dickere Zellen sind träger beim Ansteuern. Nach Gooch und Tarry [3.22] ergibt sich die Transmission einer TN-Zelle im NB-Modus zu:

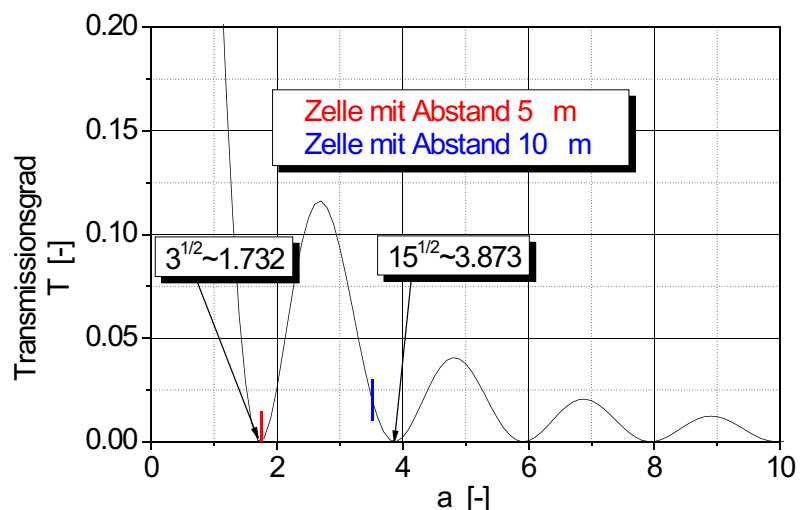
$$T = \frac{1}{2} \frac{\sin^2\left(\frac{\sqrt{1-a^2}}{2}\right)}{1-a^2} \quad (3.30)$$

mit

$$a = 2d \frac{n}{\lambda} \quad (3.31)$$

Bei der TN-Zelle in diesem Modus sind der vordere und der hintere Polarisator parallel ausgerichtet. Im ungeschalteten Zustand weist die Zelle eine geringe und im angesteuerten Zustand eine große Transmission auf. Wird  $T$  als Funktion von  $a$  aufgetragen, so ergibt sich Diagramm 3.3. In den Bereichen der Minima kann die minimale Dunkeltransmission erreicht werden (auch bei nicht erfüllten der Maguin-Bedingung). Für eine entsprechende Zelle im NW-Modus wäre dies der Zustand maximaler Transmission. Vor allem für dünne Zellen ist es daher von Wichtigkeit, das Produkt aus der Dicke der Flüssigkristallschicht und der optischen Anisotropie so zu wählen, dass sie zu einem Maximum der Transmission für die NW-Zelle oder zu einem Minimum der Transmission für die NB-Zelle führt. Bei größeren Zellabständen konvergiert die Transmission gegen einen Grenzwert und der Einfluss der Dicke der Flüssigkristallschicht auf die maximale bzw. minimale Transmission nimmt ab. Für den in dieser Arbeit verwendeten Flüssigkristall (ZLI-4792), die Wellenlänge 550 nm und die Zelldicken von 5  $\mu\text{m}$  bzw. 10  $\mu\text{m}$  ergeben sich Werte für  $a=1.762$  sowie  $a=3.524$ . Für beide Zelldicken ist damit eine gute Helltransmission sichergestellt, wobei die Zelle der Dicke von 10  $\mu\text{m}$  etwas weiter vom Optimum entfernt liegt als die dünnere. Ideal wäre eine Flüssigkristallschichtdicke von 11  $\mu\text{m}$ . Wegen der Verfügbarkeit der Abstandshalter in der Stufung von 5  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  war der Zellabstand an diese Werte gebunden.

Diagramm 3.3:  
Transmission für eine NB-Zelle im nicht angesteuerten Zustand mit einem Verdrehwinkel von  $90^\circ$  im Flüssigkristall als Funktion von  $a = 2d \frac{n}{\lambda}$ .





### 3.2 Eigenschaften von Flüssigkristallen

Im flüssigen Aggregatzustand weisen viele Stoffe keine regelmäßigen molekularen Strukturen mehr auf und sind daher in ihren Eigenschaften isotrop. Flüssigkristalle dagegen besitzen auch in diesem Zustand Ordnungsprinzipien auf molekularer Ebene, die ihnen in Bezug auf ihre optischen und elektrischen Eigenschaften eine Richtungsabhängigkeit verleihen. Beim Übergang von der festen kristallinen Phase gehen sie zunächst in einen flüssigen anisotropen Zustand, eine mesomorphe Phase (= Mesophase), über, bevor auch sie den isotropen flüssigen Zustand einnehmen. Erfolgt dieser Phasenübergang alleinig auf Grund der Temperaturerhöhung im Stoff, so handelt es sich um einen thermotropen Flüssigkristall. Lyotrope Flüssigkristalle erreichen die Mesophase durch die Phasenumwandlung in Lösungsmitteln unter bestimmten Konzentrationen und in gewissen Temperaturbereichen [3.21, 3.23 und 3.24]. Der bei der "twisted nematic"-Zelle verwendete Flüssigkristall gehört zur Gruppe der thermotropen Typen, die auch im Bereich der kommerziellen Anwendungen im Anzeigenbereich ausschließlich zum Einsatz kommen. Die Mesophase ist charakterisiert durch einen molekularen Aufbau, der sich in zwei oder auch nur in einer Raumrichtung wiederholt, nur im statistischen Mittel vorhanden ist und der Temperaturabhängigkeit aufweist. Ursache der Ausrichtung der Moleküle des Flüssigkristalles ist die Tatsache, dass flüssige Kristalle gewöhnlich aus langgestreckten, stäbchenartigen Molekülen bestehen, die sich auf Grund ihrer Wechselwirkungskräfte mit ihren Längsachsen vorzugsweise parallel ausrichten. Entsprechend der chemischen Struktur solcher Moleküle können sich diverse energetisch günstige ein- oder mehrdimensionale Ordnungszustände ergeben [3.21 und 3.26]. Das Ordnungsprinzip umfaßt hierbei die Möglichkeit der Ausrichtung der Moleküle beziehungsweise der Molekülachsen selbst wie auch die Positionierung der Bausteine zueinander. Die Ordnungszustände lassen sich in drei Grundtypen einteilen: die smektische, die cholesterische und die nematische Zustandsform.

In der smektischen Phase sind die Moleküle nicht nur im Mittel parallel zueinander geordnet, sondern noch in Schichten gefügt. Experimentell nachgewiesen sind mindestens acht verschiedene smektische Phasen, von denen an dieser Stelle lediglich drei Typen vorgestellt werden sollen [3.24]. Steht die Moleküllängsachse senkrecht auf der Schichtebene, so handelt es sich um die Phase smektisch A. Bilden die Moleküllängsachsen einen bestimmten Winkel mit ihr, so wird dies als smektisch C bezeichnet. Des weiteren besteht die Möglichkeit, innerhalb der Schichtebene nochmals eine Ordnung in Form einer hexagonalen Struktur vorzufinden (smektisch B). Die komplizierteste Struktur weist die cholesterische Zustandsform auf, die beispielsweise auch bei "verdrillt nematischen" (von englisch "twisted nematic") Flüssigkristallen vorliegt. Bei ihnen sind ebenfalls Schichtebenen vorhanden, jedoch liegen die Moleküllängsachsen in der Schichtebene, wobei sich deren Vorzugsrichtung von Schicht zu Schicht um einen bestimmten Betrag verändert. Eine Verbindungslinie durch die Endpunkte der Moleküle von Schicht zu Schicht weist hierbei eine schraubenförmige oder auch helikale Struktur auf, deren Ursache in der nichtvorhandenen Molekülsymmetrie in Bezug auf dessen atomarem Aufbau begründet ist.

Die nematische Phase weist die geringste Ordnung auf. In ihr zeigt sich lediglich eine Parallelausrichtung der Molekülachsen. Eine bestimmte flüssigkristalline Substanz kann bei steigender Temperatur verschiedene Mesophasen durchlaufen. So ist ein Übergang von der festen Phase in die smektische Mesophase C bei der Schmelztemperatur (zu englisch "melting temperature",  $T_m$ ) über die smektische Phase A und



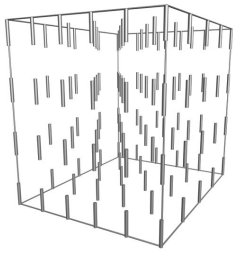


Abbildung 3.8:  
Smektische Phase  
(smektisch A)

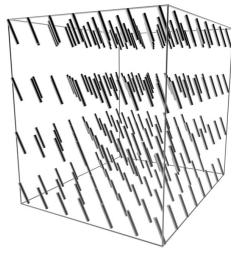


Abbildung 3.9:  
Smektische Phase  
(smektisch C)

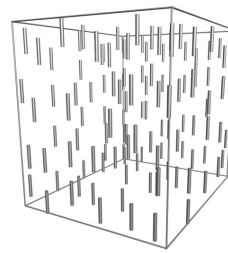


Abbildung 3.10:  
Nematische Phase

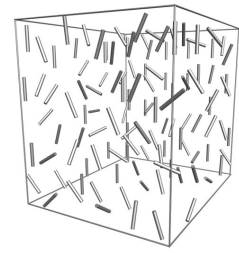


Abbildung 3.11:  
Isotroper Zustand  
bei  $T = T_c$

bei weiterer Temperaturerhöhung in die nematische Phase möglich, bis schließlich die Klärtemperatur (zu englisch "clearing temperature",  $T_c$ ) erreicht wird, bei der keinerlei Ordnungsprinzip mehr vorliegt und die damit isotrop ist [3.21]. Die schematische Darstellung einer Auswahl von Ordnungsvarianten ist in den Abbildungen 3.8 bis 3.11 dargestellt.

Das Auftreten unterschiedlicher flüssigkristalliner Phasen in einer Verbindung wird mit Unterschieden bei der Nahordnung der Moleküle erklärt. Für die Anwendung von Flüssigkristallen in technischen Anzeigen ist die Ausbildung bestimmter orientierter größerer Bereiche, sogenannter Texturen, im Flüssigkristall auf Grund von Wechselwirkungen zwischen begrenzenden Flächen und den Molekülen von besonderer Bedeutung. Für eine bestimmte flüssigkristalline Phase ist so die Herstellung verschiedener Texturen möglich. Die Beeinflussung der Morphologie kann dabei durch die Gestalt der begrenzenden Oberfläche oder auch durch chemische Oberflächeneinflüsse erfolgen.

Anwendungsbezogen betrachtet sind die Flüssigkristalle mit einer smektischen C-Phase (bistabile ferroelektrische Anzeigen), mit einer nematischen (TN-Zelle und STN-Zelle, Verdrehung des Direktors um  $180^\circ$  bis  $270^\circ$ ) oder auch cholesterischen Mesophase (bistabile Anzeigen) derzeit von besonderer Bedeutung. Entsprechend der geordneten geometrischen Struktur der Flüssigkristalle zeigen diese neben der optischen sowohl elektrische als auch mechanische Anisotropie. Zur Charakterisierung der physikalischen Gegebenheiten im Flüssigkristall ist noch die Definition der Richtungen notwendig. Es wird dabei, wie in Abbildung 3.12 dargestellt, die Richtung parallel zur Molekülachse als Direktor,  $\vec{n}$  bezeichnet.

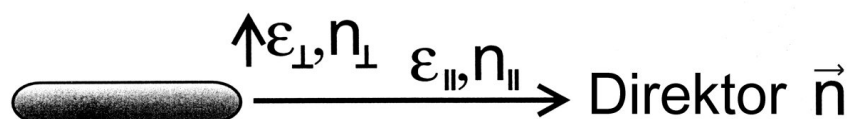


Abbildung 3.12:

Schematische Darstellung des länglichen Flüssigkristallmoleküles mit der Richtung des Direktors sowie der physikalischen Kenngrößen für die Schwingungsrichtung des E-Feld-Vektors parallel ( $\epsilon_{||}, n_{||}$  bzw.  $n_{||}$ ) und senkrecht ( $\epsilon_{\perp}, n_{\perp}$  bzw.  $n_{\perp}$ ) zum Direktor [3.21].

Zum besseren Verständnis des elektrooptischen Verhaltens sollen nachfolgend einige wichtige physikalische Größen vorgestellt werden. Nematische Flüssigkristalle zeigen auf Grund ihrer molekularen Struktur optisch einachsiges Verhalten. Die optische Achse liegt in dieser Phase in Richtung des räumlichen und zeitlichen Mittelwertes aus den Richtungen aller Molekülachsen also nahezu parallel zu der, durch den Direktor beschriebenen, Vorzugsrichtung der Moleküle. Die optische Anisotropie wird beschrieben durch die beiden Brechungsindizes

$$n \quad n_0 \quad (3.32)$$

und

$$n_{\parallel} \quad n_e \quad (3.33)$$

senkrecht und parallel zur Molekülachse. Der Brechungsindex für den ordentlichen Strahl, dessen E-Feld-Vektor senkrecht zur optischen Achse, also senkrecht zum Direktor schwingt, wird dabei mit  $n_0$  bezeichnet. Der Brechungsindex für den außerordentlichen Strahl, dessen E-Feld-Vektor parallel zur optischen Achse, also parallel zum Direktor schwingt, wird  $n_e$  genannt. Die optische Anisotropie bestimmt sich zu:

$$n \quad n_e \quad n_0 \quad n_{\parallel} \quad n \quad . \quad (3.34)$$

Die Werte für gebräuchliche Flüssigkristalle liegen dabei im Bereich von

$$0.03 \quad n \quad 0.15 \quad . \quad (3.35)$$

Für größere Werte der optischen Anisotropie ergeben sich bezüglich der UV-Stabilität der Flüssigkristalle Probleme.

Die Permittivität, auch als Dielektrizitätskonstante bezeichnet, ergibt sich zu

$$\epsilon_r \quad \epsilon_0 \quad [C/(Vm)=F/m] \quad (3.36)$$

mit  $\epsilon_0 \quad 8.854 \cdot 10^{-12} \quad [C/(Vm)=F/m]. \quad (3.37)$

Dabei wird unterschieden zwischen der Permittivitätszahl

$$\epsilon_{r,\parallel} \quad \epsilon_{\parallel} \quad , \quad [-] \quad (3.38)$$

parallel zur Richtung der Molekülachsen der Flüssigkristalle und in den entsprechenden Wert

$$\epsilon_r \quad , \quad [-] \quad (3.39)$$

senkrecht zur Richtung der Molekülachsen.

Die Permittivitätszahl  $\epsilon_r$  beschreibt das Verhältnis der elektrischen Feldstärke im Vakuum,  $\vec{E}_0$  zur Feldstärke mit Dielektrikum im Feld  $\vec{E}$ ,

$$\epsilon_r \quad \frac{E_0}{E} \quad (3.40)$$

Zum weiteren Verständnis der Wirkung der Feldstärke sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass sie die Kraft bestimmt, die auf eine elektrische Ladung im Feld wirkt.

Es gilt dabei:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}. \quad (3.41)$$

Um die Richtungsabhängigkeit der Größen darzustellen wird die vektorielle Schreibweise angewendet. Die dielektrische Anisotropie bestimmt sich aus

$$\parallel \cdot \quad (3.42)$$

Für Werte von  $\epsilon$  größer als Null richten sich die Moleküle parallel zu einem angelegten elektrischen Feld aus (p-Typ) wohingegen für Werte kleiner Null (n-Typ) eine Ausrichtung der Moleküle senkrecht zum elektrischen Feld erfolgt. Für Materialien mit positiven Werten der dielektrischen Anisotropie liegen die Werte im Bereich von 2 bis 20 [3.21]. Für negative Werte der Größe ergibt sich  $\epsilon$  zwischen 5 und 1 [3.21]. Für die Beschreibung des Verhaltens flüssiger Kristalle unter Deformation ist das Auftreten rücktreibender elastischer Kräfte charakteristisch. Drei Grunddeformationen werden hierbei unterschieden.

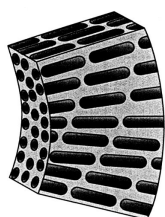


Abbildung 3.13: Deformation in Form der Spreizung mit der elastischen Konstante  $K_{11}$  [3.21].

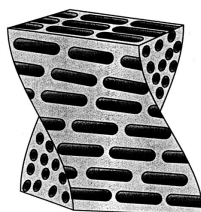


Abbildung 3.14: Deformation in Form der Verdrehung mit der elastischen Konstante  $K_{22}$  [3.21].

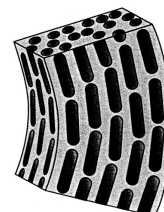


Abbildung 3.15: Deformation in Form der Biegung mit der elastischen Konstante  $K_{33}$  [3.21].

Neben der Spreizung der Molekülachsen ist sowohl die Verdrehung (zu englisch "twist"=verdrehen) als auch die Biegung eine mögliche Verformungsart, die jeweils durch die entsprechende elastische Konstante  $K_{11}$ ,  $K_{22}$  oder  $K_{33}$  beschrieben wird. Die Abbildungen 3.13 bis 3.15 verdeutlichen die Zusammenhänge. Die erwähnten physikalischen Größen zur Beschreibung der Eigenschaften flüssiger Kristalle lassen sich in weiten Bereichen durch entsprechendes Design des molekularen Aufbaues bestimmen.

Der zur Zellenfüllung in dieser Arbeit verwandte Flüssigkristall besteht aus einer Mischung aus dem Nemat ZLI-4792 mit einem Anteil von 0.1 % eines chiralen Dotierstoffes ZLI-3786 (s. Anhang D-a). Dieser unterstützt die Drehung des Nematens in der TN-Zelle und gibt ihm den Richtungssinn. Die Eigenschaften der Mischung werden wesentlich durch den ZLI-4792 bestimmt. Technische Daten dieses Stoffes sind der Literatur entnommen [3.27] und im Anhang B gegeben.

In den beiden Grundschriftzuständen der Zelle ist die Ausrichtung der Direktorachsen in der Flüssigkristallschicht entweder überwiegend parallel zur begrenzenden Substratebene gegeben ( $U=0$ ) oder sie stehen überwiegend senkrecht dazu ( $U = U_{th}$ ).

Ohne angelegte Steuerspannung orientieren sich die Achsen der Moleküle dabei parallel zur Reiberichtung der begrenzenden Orientierungsschicht, wobei über die Zelldicke eine Verdrehung der Direktoren um  $90^\circ$  von der oberen zur unteren Begrenzung bei der TN-Zelle charakteristisch ist. Im geschalteten Zustand zeigen die Richtungen der Direktoren senkrecht auf die Begrenzungsflächen abgesehen von Bereichen unmittelbar an den Grenzflächen.

### 3.3 Herstellung von Flüssigkristall-Testzellen

Die Herstellung einer TN-Zellen-Einheit, wie sie Gegenstand der Untersuchungen dieser Arbeit ist, verlangt große Präzision und höchste Sauberkeit. Aus diesem Grunde erfolgt der Herstellungsprozess unter Reinraumbedingungen. Nur so kann gewährleistet werden, dass bei der Fertigung keine Verunreinigungen in und zwischen die einzelnen Schichten gelangen. Nach der Reinigung der Glassubstrate (d) (vgl. Abbildung 3.6), deren Dicke für "display"-Anwendungen derzeit zwischen 0.7 mm und 1.1 mm beträgt, wird, falls es der Glastyp erfordert, zunächst eine diffusionshemmende Schicht beispielsweise aus Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) (c) im Aufstäubeverfahren (zu englisch "sputter", Kathodenzerstäubungsverfahren) aufgebracht. Sie verhindert bei der Verwendung von alkalihaltigen Weichgläsern das Wandern von Alkaliionen aus dem Glas in die Flüssigkristall-Schicht. Zu einer solchen Wanderung kann es kommen, wenn die im Herstellungsprozess durchlaufenen Temperaturen über  $400^\circ\text{C}$  liegen. Bei der Verwendung alkaliarmer Hartgläser wird eine Grundlageschicht nur aufgebracht, wenn es gilt, die Haftung der nachfolgenden Materialien zu verbessern oder deren gleichmäßige Aufbringung zu erleichtern.

Das Aufbringen der transparenten leitfähigen Schicht kann ebenfalls durch Aufstäuben erfolgen. Beim diesem Prozess wird durch eine kontinuierliche Gasentladung in einer Vakuumkammer ein Plasma erzeugt. Die im Plasma enthaltenen Ionen treffen, durch elektrische Felder beschleunigt, auf ein Zielmaterial und schlagen dort Atome heraus. Diese wiederum treffen auf das zu beschichtende Substrat, lagern sich dort an und bilden die gewünschte Schicht. Ein übliches Material zur Erzeugung der Elektrodenschicht ist Indium-Zinnoxid, (von englisch "indium-tin-oxid", ITO). Bei der Bildschirmherstellung werden die Elektroden nach dem Aufbringen üblicherweise mit Hilfe lithografischer Prozesse und Ätztechniken zu Bildpunkten strukturiert. Da bei der Herstellung der Musterzellen auf eine Strukturierung in mehrere Bildpunkte verzichtet werden kann, entfällt dieser Arbeitsschritt.

Auf die ITO-Schicht wird die sogenannte Orientierungsschicht aufgebracht, die die Ausrichtung der Flüssigkristallmoleküle an den Grenzflächen bewirkt. Ein einfaches Verfahren ist dabei das Aufschleudern (zu englisch "spinn coating") eines geeigneten flüssigen Kunststoffes (a). Für dieses Verfahren kommen üblicherweise Polyimide (PI) zum Einsatz. Nach dem Aufschleudern wird das Substrat zur Polymerisation des Kunststoffes einer Temperaturbehandlung unterzogen. Die Orientierungsschicht muss nachfolgend mechanisch gerieben werden, um eine Mikrostrukturierung in Form winziger Riefen in den Kunststoff einzuprägen. Diese Mikrorillen bewirken unter anderem die entsprechende Ausrichtung der Flüssigkristall-Molekülachsen parallel zur Rillenrichtung. Das Reiben erfolgt hierbei mittels einer rotierenden Walze, die mit Samt bespannt ist. Die jeweilige Reiberichtung an den beiden Substraten einer Zelle ist dabei um den als Verdrillungs-Winkel (zu englisch "twist") bezeichneten Wert gegeneinander verdreht. Im Falle der TN-Zelle beträgt dieser  $90^\circ$ .

Zur Sicherung eines gleichmäßigen Zellenabstandes  $d$  nach Abbildung 3.6 dienen Abstandshalter (zu englisch "spacer"). Diese Abstandshalter in Form winzig kleiner Glaskugeln werden mit einer leichtflüchtigen Flüssigkeit gemischt und auf eines der Substrate aufgebracht. Nach dem Verdunsten der Flüssigkeit bleiben sie auf der Probe zurück. Auf das zweite Substrat wird der Kleberahmen in Form eines unter ultravioletter Strahlung aushärtenden Klebstoffbandes am Rand aufgebracht. Dabei bleibt noch eine Einfüllöffnung zur Einbringung des Flüssigkristalles erhalten.

Nach dem als Zellenbau bezeichneten übereinander Ausrichten (zu englisch "align"= ausrichten) und Verpressen der Glassubstrate mit nachfolgendem Verkleben wird die Zelle befüllt. Dieser Vorgang erfolgt wiederum in einer Vakuumkammer. Zunächst wird hierbei die Luft aus der Kammer evakuiert. Dabei wird auch aus der noch offenen Zelle die Luft herausgesaugt. Nach dem Erreichen eines bestimmten Unterdruckes erfolgt das Benetzen der Einfüllöffnung mit Flüssigkristall, so dass die Füllöffnung vollständig mit Flüssigkristall getränkt ist und sich ein kleiner Flüssigkristallsee um die Öffnung bildet. Beim anschließenden Belüften der Vakuumkammer wird der Flüssigkristall in die Zelle hineingezogen und die gesamte Zelle füllt sich gleichmäßig. Nach dem Befüllen kann die Zelle nun auch an der Einfüllöffnung verschlossen werden. Nach einer entsprechenden elektrischen Verdrahtung ist die Zelle in Verbindung mit zusätzlich angebrachten Polarisatoren funktionsfähig.

Um die grundsätzliche Eignung der Flüssigkristalltechnologie für die Anwendung im Gebäudehüllenbereich zu erforschen, wurden im Rahmen dieser Arbeit im ersten Entwicklungsschritt Zellen weitestgehend entsprechend des bereits beschriebenen Aufbaues hergestellt. Sie weisen keine Strukturierung der ITO-Elektrode auf und sind daher lediglich als komplette Zelle ohne Bildpunktunterteilung schaltbar (Generation 1 nach Tabelle 3.1). Auf die Ionensperrschicht konnte wegen der Verwendung alkali-freier Glassubstrate verzichtet werden. Die hergestellten Zellen liegen in zwei Größen vor. Dies sind zum einen Kleinproben mit Substratabmessungen von 5.5 cm x 6 cm (~2" x 2.4") Kantenlänge sowie Zellen aus 35.6 cm x 35.6 cm (14" x 14") Substraten.

In weiteren Schritten mit modifizierten Zellenaufbauten war es möglich, vereinfachte und anwendungsangepasste Zellen herzustellen. Neue, bis dato weltweit noch nicht realisierte, Schichtaufbauten in TN-Zellen (z. B. innenliegender Polarisator, z. B. Zelle ohne PI) konnten dabei durch die Zusammenarbeit und mit der Unterstützung verschiedener Industriepartner und universitärer Einrichtungen umgesetzt werden. Das Ziel der empirischen Optimierung des Zellaufbaus war es, diesen in Bezug auf die Funktion, den Herstellungsaufwand sowie die Lebenserwartung unter Berücksichtigung der Erfordernisse des Anwendungsbereiches zu verbessern. In Tabelle 3.1 sind dabei die einzelnen Schichtaufbauten in einem Generationenschema dargestellt. Mit den Zellen der Generation 1 konnte nachgewiesen werden, dass auch bei der Herstellung großer Monobildpunktzellen über die Probenfläche ein homogenes elektrooptisches Verhalten zu erreichen ist, sofern bei der Fertigung und hierbei insbesondere bei der Verklebung und dem Befüllung der Zelle ausreichende Sorgfalt aufgewendet wird. Als problematisch erwies sich bei einigen der Proben jedoch die sehr geringe Schichtdicke der Flüssigkristallschicht von nur 5  $\mu\text{m}$ . Bei den 14"-Zellen der 1. Generation kam es im Fertigungsprozess durch einige manuell durchgeführte Arbeitsschritte zu einer ungleichmäßigen Schichtdickenverteilung im Flüssigkristall der Zelle und daher zur Inhomogenität der optischen Eigenschaften beim Schalten. Außerdem verursachten Partikeleinschlüsse in der Flüssigkristallschicht elektrische



Kurzschlüsse zwischen den leitfähigen Schichten und führten zur lokalen Zersetzung des Flüssigkristalls an den entsprechenden Stellen. Die Funktionsfähigkeit der Einheit leidet hierdurch zwar nicht, jedoch ergeben sich optisch unschöne Effekte. Auch erweist sich die Unterdruckbefüllung derart dünner Scheibenzwischenräume vor allem im Hinblick auf TN-Zellen größerer Fläche ( $1\text{ m}^2$ ) als zeitaufwendig und stör anfällig. Beim Befüllen der 14"-Zellen kam es wiederholt zur unvollständigen Füllung der Zellen mit dem Nemat.

Generation/ Probenbez.	Substrat- größe	Schichtaufbau	Besonderheiten bei der Schichtherstellung
1./ O2,O4, SW1/SW2, SW3/SW4, SW5/SW6	2" 14"	Glas, ITO, PI-vollflächig, Abstandshalter 5 $\mu\text{m}$ , Flüssigkristall, PI-vollflächig, ITO, Glas.	
2./ T1-T5	2"	Glas, ITO, PI mit Maske, Abstandshalter 5 $\mu\text{m}$ , Flüssigkristall, PI mit Maske, ITO, Glas.	PI im Bereich der Randverklebung in eigenem Prozessschritt entfernt.
3./ T18/T21, T42/T44	2"	Glas, ITO, Polarisator auf Flüssigkristallbasis, PI-vollflächig, Abstandshalter 10 $\mu\text{m}$ , Flüssigkristall, PI-vollflächig, Polarisator auf Flüssigkristallbasis, ITO, Glas.	Polarisator LLCN Nr.13 wurde auf die ITO-Schicht aufgerakelt und anschließend mit $\text{BaCl}_2$ behandelt.
4./ Z5/Z6, Z7/Z8	14"	Glas, ITO, $\text{SiO}_2$ , Polarisator auf Flüssigkristallbasis, PI-vollflächig, Abstandshalter 10 $\mu\text{m}$ , Flüssigkristall, PI-vollflächig, Polarisator auf Flüssigkristallbasis, $\text{SiO}_2$ , ITO, Glas.	Polarisator LLCN Nr.15 wurde auf die ITO-Schicht entsprechend Abbildung 3.4 aufgebracht und anschließend mit $\text{BaCl}_2$ behandelt.
5./ Z1/Z2, Z3/Z4	14"	Glas, ITO, PI-vollflächig, Abstandshalter 10 $\mu\text{m}$ , Flüssigkristall, PI-vollflächig, ITO, Glas.	
6./ Z50, Z51, Z52	55 mm x60 mm	Glas, ITO, $\text{SiO}_2$ , Polarisator auf Flüssigkristallbasis, Abstandshalter 10 $\mu\text{m}$ , Flüssigkristall, Polarisator auf Flüssigkristallbasis, $\text{SiO}_2$ , ITO, Glas.	Polarisator LLCN Nr.15 wurde auf die $\text{SiO}_2$ - Schicht entsprechend Abbildung 3.4 aufgebracht und anschließend mit $\text{BaCl}_2$ behandelt.

Tabelle 3.1:  
Generationschema zum inneren Aufbaues der unterschiedlichen Zellen.



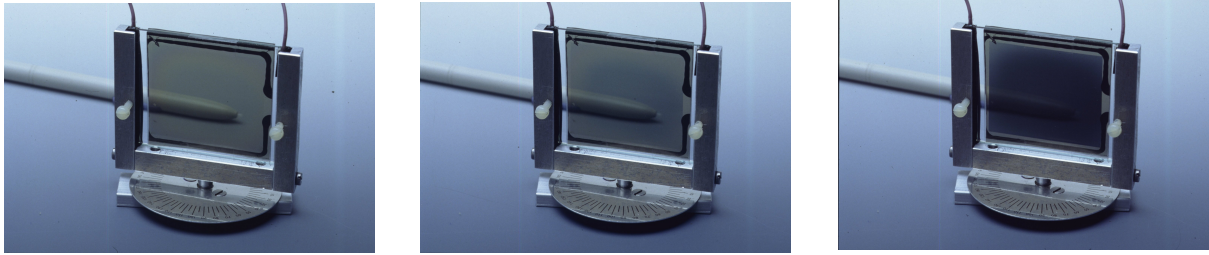


Abbildung 3.16 (links) bis 3.18 (rechts):  
2"-TN-Zelle der 1. Generation mit externem Polarisator des Typs LLC2- 9218 (s. Anhang D-b). Polarisation unter 45° zur Substratunterkante. Verschiedene Schaltstufen von  $U=0$  (links) bis  $U = U_{th}$  (rechts).

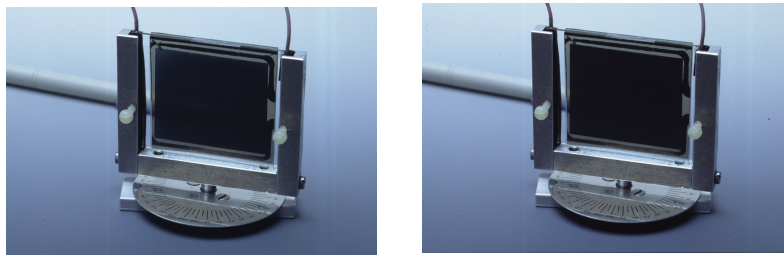


Abbildung 3.19 und 3.20:  
2"-TN-Zelle der 1. Generation mit externem Polarisator des Typs LLC2- 9218 (s. Anhang D-b). Polarisation unter 45° zur Substratunterkante. Verschiedene Schaltstufen  $U = U_{th}$  (rechts).

Eine fertigungstechnisch einwandfreie Zelle der ersten Generation in Kombination mit Folienpolarisatoren ist in Abbildung 3.16 bis Abbildung 3.20 dargestellt. Sie ist im ungeschalteten, in drei verschiedenen Zwischenzuständen sowie im vollständig geschalteten Zustand fotografiert.

Aus genannten Gründen ist in den nachfolgenden Generationen die Schichtdicke auf 10  $\mu\text{m}$  erhöht worden. Nach der Vergrößerung des Substrababstandes wurden keine Kurzschlussbildungen mehr beobachtet. Die TN-Zellen der 3. und 4. Generation erhielten zudem einen innenliegenden Polarisator. Diese Bauart weist den Vorteil auf, dass zum einen auf einen externen Polarisator auf Glas- oder Folienbasis verzichtet werden kann und somit eine funktionell kompaktere Zelle entsteht und zum anderen der Polarisator durch das Glassubstrat vor mechanischer Beschädigung besser geschützt ist als in der Außenlage. Die Aufbringung der flüssigkristallinen Polarisatorschicht (LLCP) erfolgte dabei in unterschiedlichen Verfahren: durch Rakeln im manuellen Vorgang mit einer Handrakel direkt auf dem beschichteten Substrat (3. Generation) sowie durch das in Abbildung 3.4 dargestellten modifizierte Verfahren mit untergelegter Kunststoffolie und einer Gummiwalze (4. Generation), einem sogenannten Scherverfahren. Nachdem mit der Handrakelmethode Erfahrungen bei der Verarbeitung des LLC gesammelt wurden und hierbei Haftungs- und Benetzungsprobleme mit der ITO-Schicht zu Tage traten, konnte durch das Aufbringen einer  $\text{SiO}_2$  Schicht vor dem Aufbringen des LLC eine homogene Polarisatorschicht mit guter Haftung hergestellt werden. Der Aufbau der Zellen der 4. Generation ist schematisch in Abbildung 3.21 dargestellt. Die entsprechenden Zellenmuster im ungeschalteten und voll geschalteten Zustand zeigen die Abbildung 3.22 und 3.23.

Abbildung 3.21:  
Schematischer Aufbau der einzelnen Schichten einer TN-Zelle der 4. Generation auf Glassubstraten (d) mit PI (a), ITO (b),  $\text{SiO}_2$ -Schicht (c), LLC (g) sowie "spacer" mit Flüssigkristall (h). Bei den Zellen der 3. Generation entfällt die  $\text{SiO}_2$ -Schicht (c).

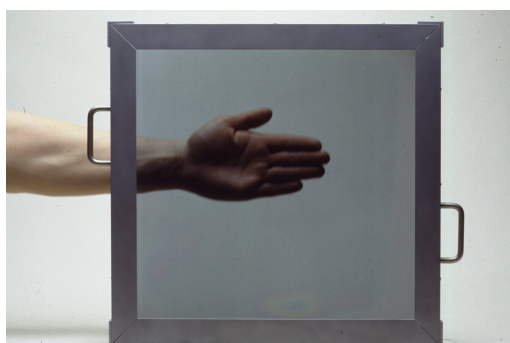
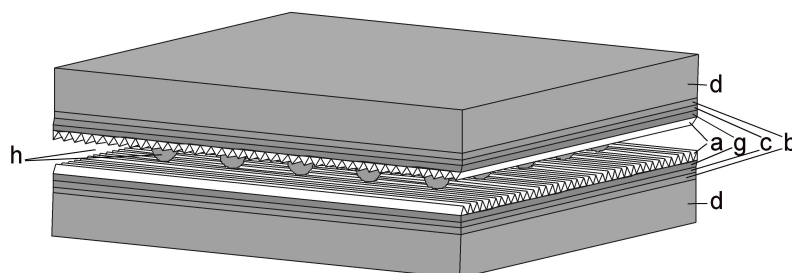


Abbildung 3.22:  
14"-TN-Zelle der 4. Generation mit internem Polarisator. Polarisation unter  $0^\circ$  und  $90^\circ$  zur Substratunterkante. Zelle mit maximaler Transparenz ( $U=0$ ).

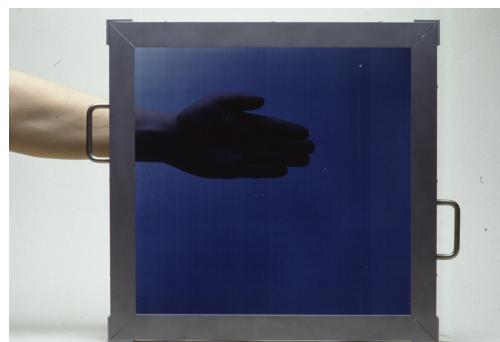


Abbildung 3.23:  
14"-TN-Zelle der 4. Generation mit internem Polarisator. Zelle mit minimaler Transparenz ( $U = U_{th}$ ).

Die Herstellung der Proben der 5. Generation erfolgten zum Nachweis der Verbesserung der Homogenität im Schaltverhalten bei größerer Schichtdicke von  $10 \mu\text{m}$  und mit größeren Substraten.

Grundlage des Schichtaufbaues der Zellen der 6. Generation war die Idee, eine weitere Reduzierung der Anzahl verschiedener Schichten durch die Einsparung der PI-Lagen zu erzielen und dabei die Orientierungswirkung der Molekularkräfte aus der LLC-Polarisatorschicht heranzuziehen um die Oberflächenausrichtung in der TN-Schicht zu erreichen. Es gelang mit den entsprechenden Proben eine schaltfähige Zelle herzustellen. Jedoch zeigt sich in den entsprechenden Zellen in den Schaltzwischenstufen ein inhomogenes elektrooptisches Verhalten, dessen Ursache teilweise durch Rasterkraftmikroskop-Beobachtungen (RKM) ergründet werden konnte. Eingegangen wird auf diese Problematik in Kapitel 4.3.4. Das Auftreten von Nebenrichtungen in der Orientierung der LLC-Moleküle ist vermutlich dessen Ursache und führt zur Domänenbildung mit unterschiedlichen Schwellenspannungen für den Umkippvorgang der Moleküle in der TN-Lage. Abbildung 3.24 verdeutlicht den Schichtaufbau dieser Zellen. In Abbildung 3.25 bis 3.29 ist eine Probe in verschiedenen Schaltzuständen abgebildet.

Für die Aufnahmen nach Abbildung 3.30 bis 3.32 kam ein Mikroskop mit angekoppelter Fotooptik zur Verwendung. Hierbei konnte die Umorientierung der Flüssigkristalle an Hand der Domänenveränderung im zeitlichen Ablauf beobachtet werden. Vom nicht angesteuerten Zustand erfolgte der Übergang zur Ansteuerung mit einem

Abbildung 3.24: Schematischer Aufbau der einzelnen Schichten einer TN-Zelle der 6. Generation auf Glassubstraten (d) mit ITO (b),  $\text{SiO}_2$ -Schicht (c), LLCP (g) sowie "spacer" mit Flüssigkristall (h).

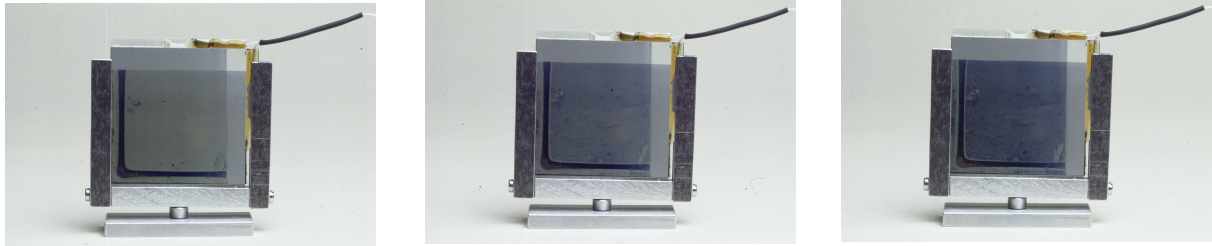
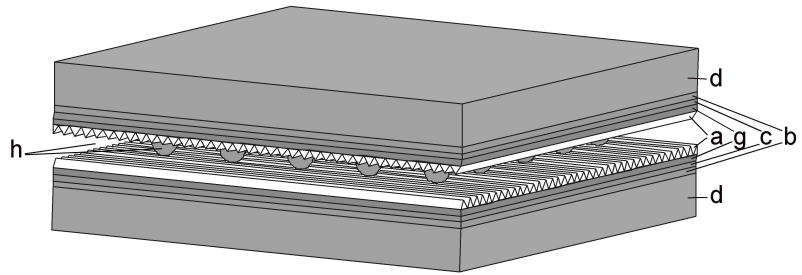


Abbildung 3.25 bis 3.27: 2"-TN-Zelle der 6. Generation mit internem Polarisator des Typs NO.15.00.100.013SF.10.00 (s. Anhang D-c) jedoch ohne PI. Verschiedene Schaltstufen von  $U=0$  angefangen (links) bis  $U > U_{th}$  (rechts).

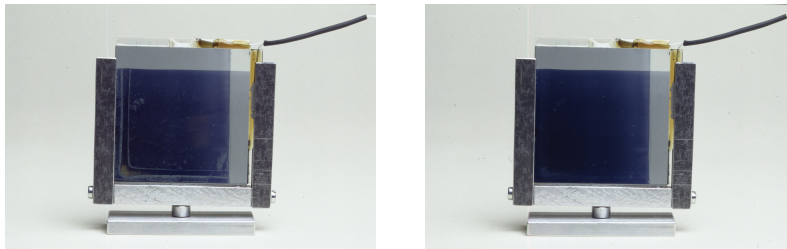


Abbildung 3.28 und 3.29: 2"-TN-Zelle der 6. Generation mit internem Polarisator des Typs NO.15.00.100.013SF.10.00 (s. Anhang D-c) jedoch ohne PI. Verschiedene Schaltstufen bis  $U > U_{th}$  (rechts).

Spannungswert oberhalb der Schwellenspannung. Nach dem Ansteuern mit diesem Spannungswert erfolgte die qualitative zeitliche Dokumentation der Veränderung über eine entsprechende Bildserie.

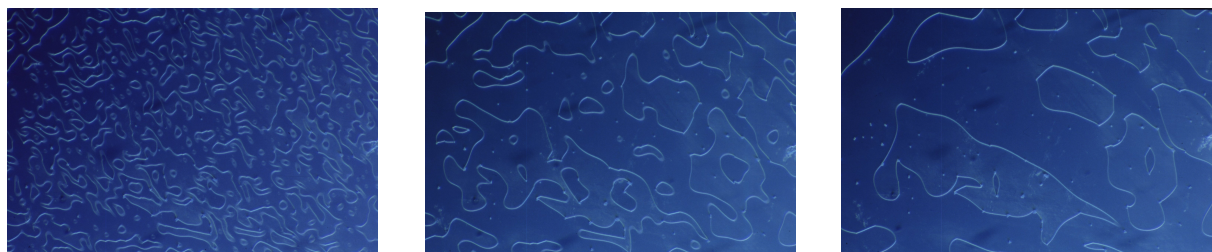


Abbildung 3.30 bis 3.32: Zeitliche Abfolge der Domänenbildung in der TN-Zelle nach Abbildung 3.25 ff. Vom Zeitpunkt kurz nach dem Steuern auf  $U > U_{th}$  bis zu einem Zeitpunkt einige Sekunden später. Die Randpunkte der einzelnen Domänen werden von den Abstandshalter gebildet.



Die einzelnen Herstellungsschritte einer TN-Zelle werden im Anhang A im Detail erläutert.

Für die Zellen der 3. Generation wurde der Polarisator mit der Bezeichnung LLCBlack (Nr. 13), NO.13.01.0810-X-99, eingesetzt (s. Anhang D-c). Zur Erzielung einer gleichmäßigeren Absorption, vor allem im geschaltet dunklen Zustand, ist in Zusammenarbeit mit dem LLCBlack-Hersteller ein neuer LLC-Polarisator Typ NO.15.00.100.013SF.10.00 (kurz Nr.15) entwickelt worden. Dieser weist eine größere Transmission im nicht angesteuerten Zustand bei verbesserter Farbwertverschiebung auf und ist gekennzeichnet durch eine gegenüber dem LLCBlack, NO.13.01.0810-X-99 (kurz Nr.13), veränderte Farbstoffverteilung in der LLCBlack Suspension. Der Anteil von Nanofarbparkeln im orangen Spektralbereich ist hierbei gegenüber dem schwarzen Polarisator verändert. Die Zellen der 4. und der 6. Generation nutzen die Polarisationswirkung dieses neuentwickelten Polarisatorstyps.

Zur Anwendung in den verschiedenen, im Rahmen der Arbeit hergestellten Zellentypen kam ausschließlich ein Spezialglas im Bereich der Bildschirmtechnologie (s. Anhang D-d ). Die Beschränkung auf diesen Glasscheibentyp erfolgte auf Grund der anlagenspezifischen Erfordernisse im Herstellungsprozess. Die genutzten Geräte sind ausgelegt für Glasdicken von unter 2 mm wie sie für die Bildschirmanwendung üblich sind. Die Herstellung der Zellen unter Verwendung herkömmlicher Floatgläser mit Dicken über 3 mm ist zwar als wünschenswert erkannt, aber auf Grund der damit verbundenen notwendigen Modifikationen an den Anlagen nicht in Erwägung gezogen worden. Ein Einfluss auf die Zellenfunktion sowie auf die notwendigen Prozessschritte bei der Zellenherstellung ist bei Verwendung von Floatgläsern lediglich durch die unterschiedliche chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffes und durch im Floatglasherstellungsprozess bedingte Einflüsse auf die Oberflächenstruktur und die Ebenheit der Gläser zu erwarten. Auf die unterschiedlichen optischen Eigenschaften von Floatgläsern gegenüber dem verwendeten Spezialglas sowie deren Einfluss auf die Eigenschaften der Funktionszelle wird in den folgenden Kapiteln noch eingehend eingegangen.

Durch den erfolgreichen Versuch, die üblichen Folienpolarisatoren durch interne, in Beschichtungstechnologie hergestellte, extrem dünne, großflächige LLCBlack-Schichten zu ersetzen, gelang ein wesentlicher Schritt hin zu einem einfachen und kostengünstigen Herstellungsprozess einer TN-Zelle für Fensteranwendungen. Auch sind die LLCBlack-Schichten innerhalb der Zelle wesentlich besser vor mechanischen Einflüssen geschützt. Bei Zellabständen von über 10  $\mu\text{m}$  lässt sich die Gefahr der Kurzschlussbildung in der TN-Zelle durch Partikeleinschlüsse fast vollständig bannen. Wird zudem der Abstand auf über 30  $\mu\text{m}$  (Schwebstaub-Grenze für Atmosphärenluft) erhöht, so ist eine Zellherstellung ohne Reinraumbedingungen denkbar [3.28].

## 4. Komponenten einer Flüssigkristall-Zelle

Bevor auf die TN-Zelle als komplette Einheit und auf deren Eigenschaften eingegangen werden kann, müssen zunächst die Einzelkomponenten in ihren materialspezifischen und funktionsspezifischen Eigenschaften näher erläutert werden. Diese sind es, die wesentlich die Funktion und die Eigenschaften des elektrooptischen Gesamtsystemes bestimmen.

Entsprechende Kenngrößen für die verschiedenen Komponenten lassen sich einerseits durch Messungen erhalten, sie können jedoch auch mittels theoretisch fundierter Beschreibungsmodelle berechnet werden. Da das Vermessen der Bauteile unter allen maßgeblichen Bedingungen oft sehr zeit- und kostenaufwendig ist, wird angestrebt, lediglich einige wenige Messungen durchzuführen um anschließend aus den Messergebnissen die für die theoretische Beschreibung der Elemente nötigen Grunddaten zu erhalten. So lassen sich beispielsweise durch Messung der spektralen Transmissions- und Reflexionsgrade an Glasscheiben unter flächennormalem Strahlungseinfall die spektralen Werte des Absorptionskoeffizienten bestimmen, die benötigt werden, um für beliebige Einfallswinkel den Strahlungsdurchgang berechnen zu können. Sind die Eigenschaften der Einzelkomponenten bekannt, so lassen sich auch Mehrschichtsysteme durch die Anwendung entsprechender Formalismen charakterisieren. Die entsprechenden Formalismen sowie relevante Messergebnisse zur Bestimmung der Werkstoffkennwerten sind nachfolgend dargestellt.

Die farbmetrischen Charakterisierungsgrößen werden ebenfalls für die unterschiedlichen Elemente einer TN-Zelle berechnet. Neben den vorgenannten Eigenschaften wird auch auf die Struktur und die Beschaffenheit der Oberflächen von verschiedenen Beschichtungen zur Bewertung des Einflusses der Herstellungsverfahren oder der Schichtdicken auf deren Eigenschaften eingegangen.

### 4.1 Glasscheiben

#### 4.1.1 Beschreibung der optischen Eigenschaften

An der Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes kommt es sowohl zur Transmission als auch zur Reflexion der elektromagnetischen Welle. Ursache für die Reflexion ist die Veränderung der Permittivitätszahl an der Grenzfläche. Der Reflexions- und auch der Transmissionsanteil der Strahlungsenergie lassen sich für eine sprunghafte Änderung der Permittivitätszahl mit Hilfe der Fresnelschen Gleichungen für homogene, isotrope, nichtleitende Stoffe (Dielektrika) beschreiben. Für den Strahlungsdurchgang durch mehrere Grenzflächen ist die Herleitung der entsprechenden Gleichungen zur Bestimmung der Transmissions- sowie der Reflexionsgrade vom Autor in [4.1] dargestellt. Für eine Einzelglasscheibe der Dicke  $d$  mit zwei Grenzflächenübergängen gilt für die Transmissions- und Reflexionsgrade dabei:

$$T( )_{1,3} = \frac{T_{1,2} T_{2,3} e^{-ad}}{1 - R_{2,1} R_{2,3} e^{-2ad}} \quad (4.1)$$

$$R( )_{1,3} = R_{1,2} + \frac{T_{1,2} T_{2,1} R_{2,3} e^{-2ad}}{1 - R_{2,1} R_{2,3} e^{-2ad}} \quad (4.2)$$

Der Index 1 bezeichnet die Luft vor der Glasscheibe. Die Glasscheibe selbst bildet das Medium 2. Nach dem Durchlaufen des Glases trifft der Strahl auf die Luft hinter der Scheibe, das Medium 3. Die Transmissions- bzw. Reflexionsgrade am Schichtübergang von der Schicht i in die Schicht j bestimmen sich zu:

$$T(\ )_{i j} = \frac{n_j}{2n_i} (t_{\parallel, i j}^2 + t_{\perp, i j}^2) \frac{\cos \theta_j}{\cos \theta_i} \quad (4.3)$$

$$R(\ )_{i j} = \frac{1}{2} (r_{\parallel, i j}^2 + r_{\perp, i j}^2) . \quad (4.4)$$

Die Amplituden-Transmissions- und -Reflexionskoeffizienten der senkrechten sowie der parallelen Komponente des  $\vec{E}$ -Vektors nach Fresnel für den Übergang vom Medium i in das Medium j können wie folgt angeschrieben werden [4.2]:

$$r(\ )_{\perp, i j} = \frac{E_{r, \perp, i j}}{E_{e, \perp, i j}} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j} \quad (4.5)$$

$$r(\ )_{\parallel, i j} = \frac{E_{r, \parallel, i j}}{E_{e, \parallel, i j}} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_j + n_i \cos \theta_i} \quad (4.6)$$

$$t(\ )_{\perp, i j} = \frac{E_{t, \perp, i j}}{E_{e, \perp, i j}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j} \quad (4.7)$$

$$t(\ )_{\parallel, i j} = \frac{E_{t, \parallel, i j}}{E_{e, \parallel, i j}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_j + n_j \cos \theta_i} , \text{ für } i, j=1,2,3. \quad (4.8)$$

Es bezeichnet  $E_{e,1 2}$  beispielsweise den Betrag des Feldvektors des einfallenden Strahles,  $E_{r,1 2}$  den Betrag des reflektierten Feldvektors und  $E_{t,1 2}$  den Betrag des transmittierten Feldvektors am Übergang 1-2 von der Luft in das Glas hinein. Vorausgesetzt wird hierbei die vektorielle Aufspaltung des Feldvektors der einfallenden Strahlung in eine parallele und eine senkrechte Komponente bezogen auf die Einfallsebene des Strahles. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass es sich jeweils um spektrale Größen handelt, da der Brechungsindex wellenlängenabhängig ist.

Beim Durchlaufen von Medien, deren Schichtdicke im Verhältnis zu den Kohärenzlängen der Strahlung groß ist ( $d \gg 1500 \text{ nm}$ ), kommt es zwischen den an den Grenzflächen reflektierten und transmittierten Wellenzügen eines Wellenpaketes nicht zu Interferenzerscheinungen wie etwa die gegenseitige Auslöschung. Lediglich durch Absorptionserscheinungen im Medium selbst wird bei diesen Scheiben die Bestrahlungsstärke verringert. Unter Heranziehung des Lambertschen Gesetzes wird das Absorptionsverhalten von homogenen, isotropen, nicht streuenden Stoffen berücksichtigt:

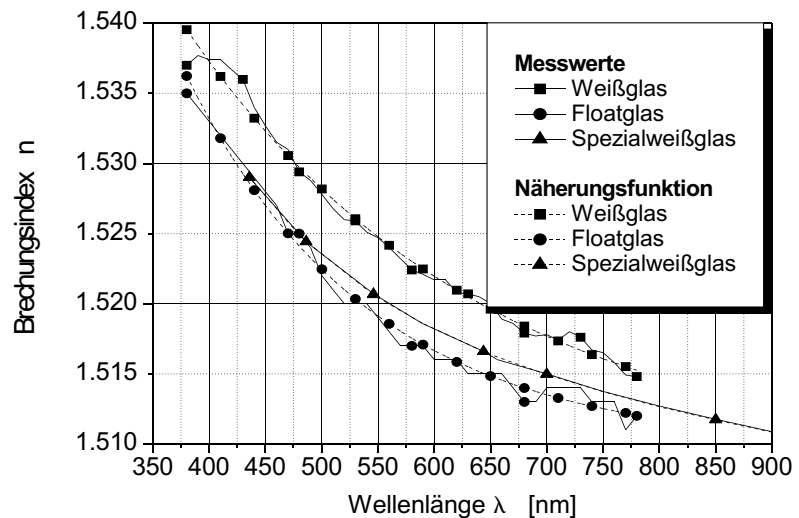
$$I = I_0 e^{-ax} , \text{ mit } a = a(\lambda) . \quad (4.9)$$



Der Strahlungsfluss verringert sich beim Durchlaufen des Mediums durch Absorption im Stoff proportional zur Weglänge  $x$  des Strahles im Medium. Nach dem Durchlaufen der Strecke  $x$  verringert sich die Strahlungsleistung von  $I_0$  bei  $x = 0$  auf  $I$  bei  $x$ . Der Absorptionskoeffizient  $a$  ist dabei der Proportionalitätsfaktor. Er ist wellenlängenabhängig.

Bevor die Gleichungen zur Beschreibung des optischen Verhaltens des Strahldurchganges herangezogen werden können, ist die Kenntnis des spektralen Brechungsindex sowie des spektralen Absorptionskoeffizienten der Gläser notwendig. Die zur Bestimmung der Amplitudenwerte notwendigen Brechungsindizes für die zwei Gläsertypen Floatglas (s. Anhang D-e) und Weißglas (s. Anhang D-e) wurden empirisch (s. Anhang C-4) ermittelt. Für ein Spezialweißglas aus der Bildschirmanwendung (s. Anhang D-d) wurden die Werte der entsprechenden Literatur entnommen [4.3]. Aus messtechnischen Gründen erfolgte die Bestimmung der Werte im sichtbare Lichtspektrum. Der Verlauf der Funktion der spektralen Brechzahl  $n(\lambda)$  lässt sich durch eine empirisch ermittelte Näherungsfunktion beschreiben. Diese Näherung kann anschließend zur Funktionsextrapolation außerhalb des vermessenen Wellenlängenbereiches herangezogen werden. Die Messergebnisse zur Bestimmung der Brechzahlen sowie die entsprechenden Näherungsfunktionen sind in Diagramm 4.1 dargestellt. Grundlage der Näherungsfunktionen ist die nachfolgende Gleichung mit den konstanten Werten aus Tabelle 4.1.

Diagramm 4.1:  
Messwerte und Näherungsfunktionen der spektralen Brechungsindizes für die Gläsertypen Weißglas, Floatglas sowie Spezialweißglas.



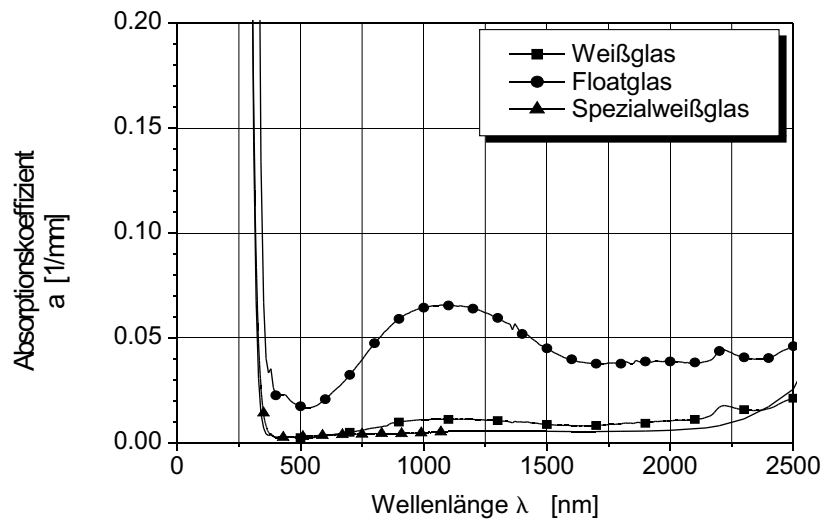
$$n(\lambda) = n_0 - a \cdot e^{-b/\lambda} - c \cdot e^{-d/\lambda} \quad (4.10)$$

Gläsertyp	$n_0$ [-]	$a$ [-]	$b$ [nm]	$c$ [-]	$d$ [nm]
Weißglas	1.50839	0.13113	264.42302	-	-
Floatglas	1.50978	0.27198	163.09018	-	-
Spezialweißglas	1.49654	0.48734	109.26119	0.03766	920.25671

Tabelle 4.1:  
Koeffizienten der Näherungsfunktionen für die spektralen Brechzahlen.

Aus Gleichung 4.1 kann durch Umformung unter Verwendung der gemessenen Transmissionswerte  $T_n(\lambda)$  unter flächennormalem Strahlungsdurchgang der spektrale Absorptionskoeffizient bestimmt werden. Mit dem spektralen Brechungsindex und dem spektralen Absorptionskoeffizienten lässt sich wiederum das optische Verhalten von beliebigen Glasscheibenanordnungen bei Bestrahlung unter beliebigen Einfallswinkeln  $\theta_i$  beschreiben. Die ermittelten Absorptionskoeffizienten können Diagramm 4.2 entnommen werden.

Diagramm 4.2:  
Spektraler Absorptionskoeffizient für die Glassorten Weißglas, Floatglas sowie Spezialweißglas. Berechnet aus Transmissionsmesswerten.



Zur Berechnung der strahlungsphysikalischen Eigenschaften beliebiger Glasscheibensysteme ist eine analytische Beschreibung der Absorptionsfunktionen nützlich. Die Koeffizienten der empirisch ermittelten Näherungsfunktionen der Art

$$a(\lambda) = a_0 + b \lambda + c \lambda^2 + d \lambda^3 + e \lambda^4 + f \lambda^5 + g \lambda^6 \quad (4.11)$$

sind Tabelle 4.2 zu entnehmen.

Glastyp	$a_0$ [ $\text{mm}^{-1}$ ]	$b$ [ $(\text{mm nm})^{-1}$ ]	$c$ [ $(\text{mm nm}^2)^{-1}$ ]	$d$ [ $(\text{mm nm}^3)^{-1}$ ]	$e$ [ $(\text{mm nm}^4)^{-1}$ ]	$f$ [ $(\text{mm nm}^5)^{-1}$ ]	$g$ [ $(\text{mm nm}^6)^{-1}$ ]
Weißglas							
190 390	548.399	-7.03207	3.59E-2	-9.19E-5	1.17E-7	-4.9E-11	-
390 2500	0.04017	-2.21E-4	4.425E-7	-3.7E-10	1.39E-13	-1.9E-17	-
Floatglas							
190 340	874.243	-7.4607	2.122E-2	-2.01E-5	-	-	-
340 350	2.4265	-6.74E-3	-	-	-	-	-
350 550	63.5841	-0.6832	2.92E-3	-6.23E-6	6.61E-9	-2.8E-12	-
550 2500	0.76637	-4.262E-3	9.068E-6	-9.208E-9	4.847E-12	-1.28E-15	1.342E-19
Spezialweißgl.							
190 320	-32.0877	-1.0196	2.036E-2	-1.21E-4	2.99E-7	-2.7E-10	-
320 410	546.633	-7.1823	3.778E-2	-9.94E-5	1.31E-7	-6.9E-11	-
410 2500	2.539E-3	-1.09E-5	1.786E-8	3.76E-12	-1.2E-14	3.44E-18	-

Tabelle 4.2:  
Koeffizienten der Näherungspolynome der Absorptionsfunktionen.

Für den Einstrahlwinkel  $0^\circ$  sind die Transmissions- sowie die Reflexionsgrade für die Glasscheibentypen Weißglas, Floatglas sowie Display-Spezialglas im Diagramm 4.3 für eine Einzelscheibe der Dicke von 4 mm dargestellt. Die Veränderung der Transmission in Abhängigkeit von der Glasdicke für Floatglas ist in Diagramm 4.4 aufgetragen. Der exponentielle Einfluss der Absorption im Glas wird dabei deutlich.

Diagramm 4.3:  
Berechneter Transmissions- und Reflexionsgrad für die Glassorten Weißglas, Floatglas sowie Spezialweißglas bei einer jeweiligen Dicke von 4 mm.

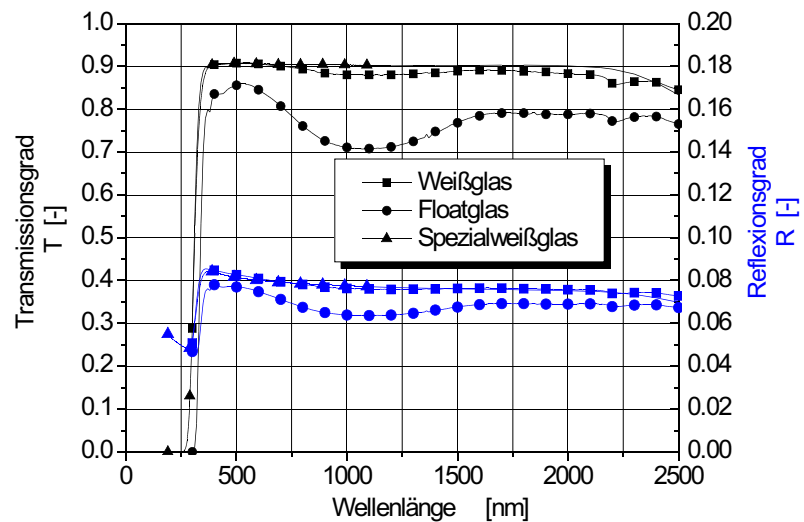
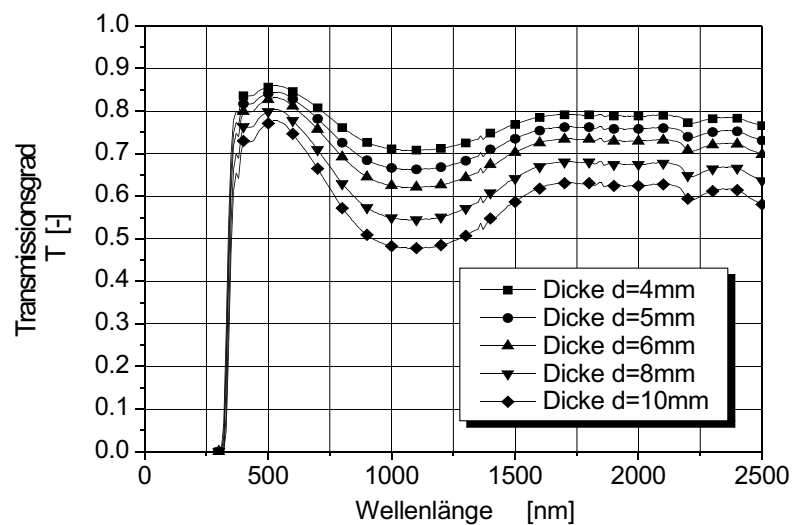


Diagramm 4.4:  
Berechneter Transmissionsgrad für Floatglas bei verschiedenen Glasdicken von 4 mm bis 10 mm.



Für ein System bestehend aus zwei parallelen Glasscheiben können nachfolgende Formeln hergeleitet werden. Vorausgesetzt wird hierbei lediglich, dass der Glaszwischenraum eine vernachlässigbar geringe Absorption der Strahlung aufweist. Dies ist für alle gängigen Füllgase in der Isolierglasanwendung gegeben. Die Bezeichnungssystematik sowie das Interaktionsverhalten der Strahlung für ein Zweischeibensystem kann der Abbildung 4.1 entnommen werden.

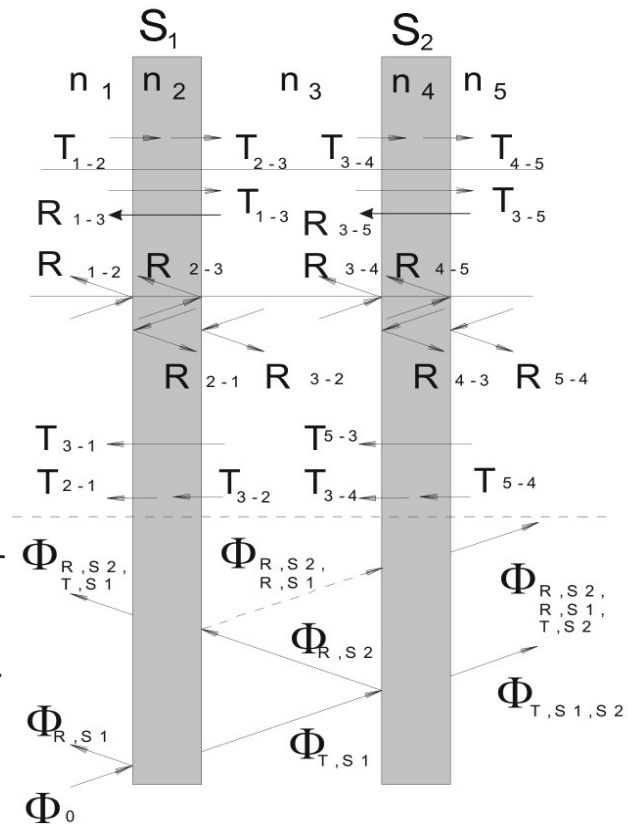


Abbildung 4.1:  
Zweischeibensystem. Bezeichnungssystematik der Transmissions- und Reflexionsgrade an den Grenzflächenübergängen der Scheiben S1 und S2 (oben). Strahlengang nach dem Strahlungsbilanz-Verfahren mit Mehrfachreflexionen im Zwischenraum (unten).

Die Transmission in Richtung 1-5 an einem Zweischeibensystem wird beschrieben durch [4.1]

$$T( )_{1,5} = \frac{T_{1,3} T_{3,5}}{1 - R_{3,1} R_{3,5}} \quad (4.12)$$

Für die Reflexion in derselben Richtung gilt [4.1]:

$$R( )_{1,5} = R_{1,3} + \frac{T_{1,3} T_{3,1} R_{3,5}}{1 - R_{3,1} R_{3,5}} \quad (4.13)$$

Für die Dreischeibenanordnung ist nachfolgend der entsprechende Formalismus zur Berechnung des Transmissions- und Reflexionsgrades gegeben [4.1]:

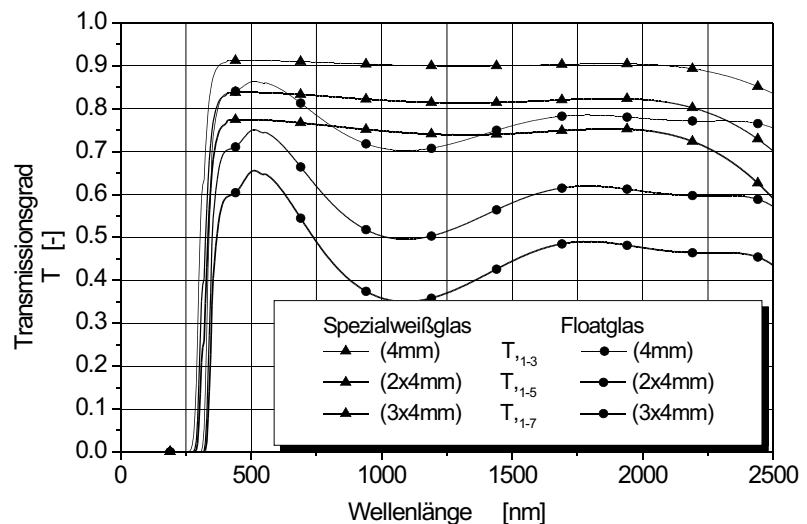
$$T( )_{1,7} = \frac{T_{1,3} T_{3,5} T_{5,7}}{[1 - R_{3,1} R_{3,5}] [1 - R_{5,3} R_{5,7}] - T_{3,5}^2 R_{3,1} R_{5,7}} \quad (4.14)$$

$$R( )_{1,7} = R_{1,3} + \frac{T_{1,3}^2 R_{3,5} [1 - R_{5,3} R_{5,7}] + T_{1,3} T_{3,5}^2 R_{5,7}}{[1 - R_{3,1} R_{3,5}] [1 - R_{5,3} R_{5,7}] - T_{3,5}^2 R_{3,1} R_{5,7}} \quad (4.15)$$

Mit Hilfe der dargestellten Gleichungen ist es möglich, die optischen Eigenschaften einer einzelnen Glasscheibe oder auch einer Glasscheibenanordnung im Strahlengang zu charakterisieren. Die Einstrahlrichtung sowie die Polarisation finden dabei entsprechend Berücksichtigung. Auch kann aus Messdaten auf einfache Weise der Absorptionskoeffizient berechnet werden.

Im Vergleich sind die Transmissionsgrade für eine Ein-, Zwei- und eine Dreischiebenanordnung sowohl für Floatglas auch für Weißglas im Diagramm 4.5 dargestellt. Der Strahlungseinfall erfolgt hierbei senkrecht zur Scheibenoberfläche. Bemerkenswert ist die große Abnahme der Transmission beim Floatglas bei zunehmender Glas-scheibenanzahl. Sie beträgt bei einer Wellenlänge von  $500\text{ nm}$  ca. 21%. Deutlich geringer fällt die Transmissionsänderung beim Weißglas mit etwa 14% aus. Bei schwach absorbierenden Gläsern ist die Transmissionsabnahme vor allem durch die Zunahme der Reflexion an den Grenzflächen bedingt.

Diagramm 4.5:  
Berechneter Transmissionsgrad für Floatglas und Spezialweißglas in Einzel- ( $d=4\text{mm}$ ), Doppel- ( $2d=4\text{mm}$ ) und Dreifachglas-anordnung ( $d=3\times 4\text{mm}$ ).



Die beschriebenen Einzel- und Mehrscheibensysteme werden im Weiteren als Vergleichsbasis herangezogen, um die Einordnung der schaltbaren TN-Zellen als Einzelkomponente und auch im Isolierglasverbund zu ermöglichen.

Wie bereits schon bei der Behandlung der Amplitudenkennwerte gezeigt, besteht eine ausgeprägte Abhängigkeit der optischen und energetischen Kenngrößen einer Verglasungsanordnung vom Winkel der einfallenden Strahlung. Daher soll an dieser Stelle noch das Transmissionsverhalten in Abhängigkeit vom Scheibenaufbau und dem Inzidenzwinkel eingegangen werden. Gesondert für die Einzel-, Doppel- und Dreifachglasschichtung sind in den Diagrammen 4.6 bis 4.8 die Transmissionsgrade für unpolarisierte Strahlung winkelabhängig dargestellt. Für das Einfachglas ergibt sich eine Verringerung der Transmission  $T_{1,3}$  zwischen dem flächennormalen Einfall der Strahlung hin zu einem Einfallswinkel von  $70^\circ$  um ca. 21,6% beim Weißglas und um ca. 32,3% beim Floatglas. Mit zunehmender Glaslagenanzahl wird die Transmissionsabnahme bei größeren Einfallswinkeln gegenüber der flächennormalen Bestrahlung noch deutlicher. Sie beträgt für das Dreifachsystem aus Weißglas  $T_{1,7}$  34,6% und für das Floatglassystem  $T_{1,7}$  32,3% bei  $70^\circ$ . Zum einfacheren Vergleich der optischen Eigenschaften von transparenten Systemen eignen sich die integralen Mittelwerte. Diese sind in Tabelle 4.3 für die beiden untersuchten Glas-sorten in der Einzelglas- bis zur Dreifachglas-anordnung für eine flächennormale Bestrahlung angegeben. Zur Berechnung der Werte kommt Gleichung 3.5 zur Anwendung.

Diagramm 4.6:  
Berechneter spektraler Transmissionsgrad für Spezialweißglas in Einzelglasanordnung (d=4mm).

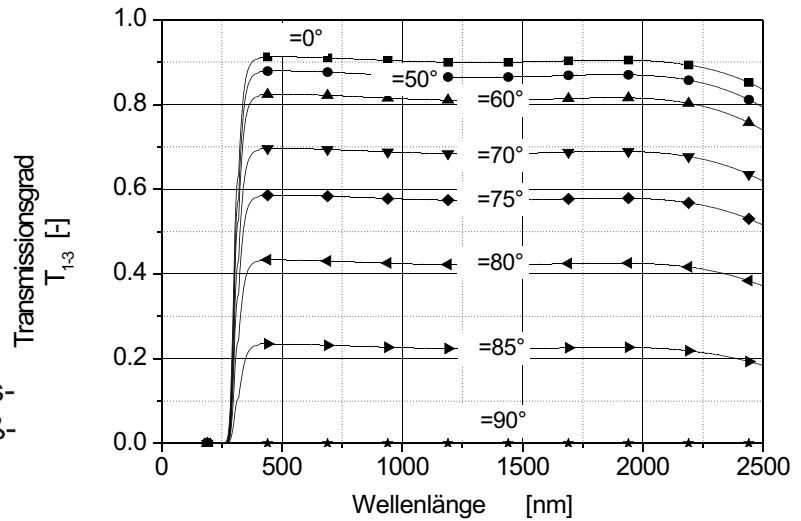


Diagramm 4.7:  
Berechneter spektraler Transmissionsgrad für Spezialweißglas in Doppelglasanordnung (2 x 4 mm) mit Luft im SZR.

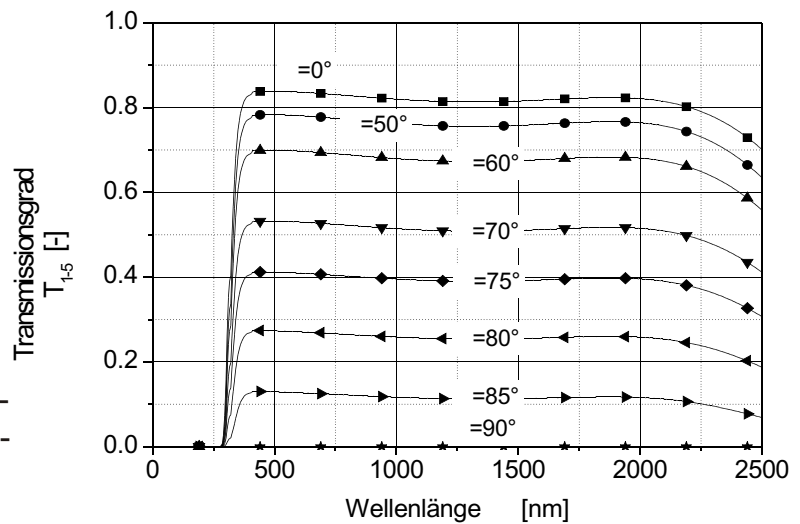
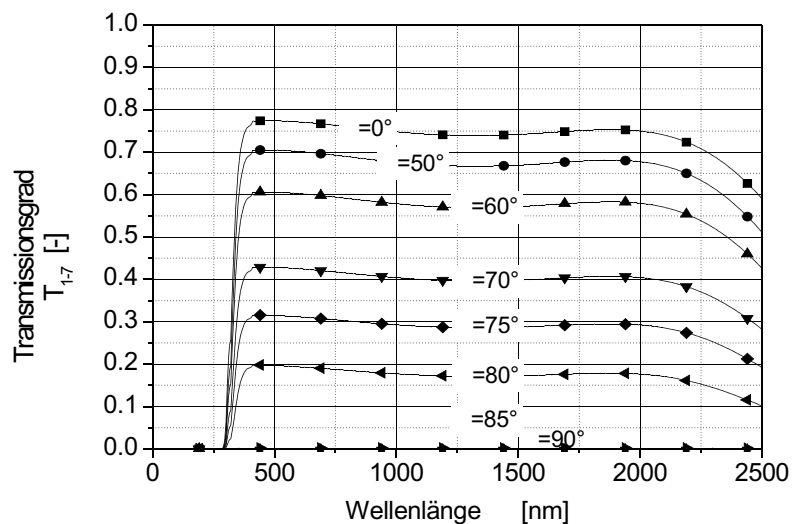


Diagramm 4.8:  
Berechneter spektraler Transmissionsgrad für Spezialweißglas in Dreifachglasanordnung (3 x 4 mm) mit Luft im SZR.





Spezialweißglas	Einzeilscheibe (d=4 mm)	Doppelscheibensystem (d=2 x4 mm)	Dreifachscheibensystem (d=3 x 4 mm)
$T_{n,VIS}$ [-]	0.91	0.84	0.77
$T_{n,SOL}$ [-]	0.90	0.82	0.75
$R_{n,VIS}$ [-]	0.08	0.15	0.21
$R_{n,SOL}$ [-]	0.08	0.14	0.20
$A_{n,VIS}$ [-]	0.01	0.01	0.02
$A_{n,SOL}$ [-]	0.02	0.03	0.05
Floatglas			
$T_{n,VIS}$ [-]	0.86	0.74	0.64
$T_{n,SOL}$ [-]	0.79	0.63	0.51
$R_{n,VIS}$ [-]	0.08	0.13	0.17
$R_{n,SOL}$ [-]	0.07	0.12	0.15
$A_{n,VIS}$ [-]	0.07	0.13	0.19
$A_{n,SOL}$ [-]	0.14	0.26	0.35

Tabelle 4.3:

Lichttechnische (Index VIS) und strahlungsphysikalische (Index SOL) Kenngrößen T, R und A unter flächennormaler Bestrahlung für Spezialweißglas und Floatglas in Einzel-, Zweifach- und Dreifachscheibenanordnung. Ergebnisse gerundet.

Unterschiede zu den tabellierten Werten der Glashersteller ergeben sich aus der Anwendung unterschiedlicher Strahlungsfunktionen und der dort üblichen Anwendung der Gewichtungsfunktion des 2°-Normalbeobachters.

#### 4.1.2 Farbmaßzahlen

Wegen der spektral unterschiedlichen Reflexion und Absorption der Strahlung beim Auftreffen und Durchlaufen eines transparenten Systems kommt es zu einer Veränderung der spektralen Energieverteilung im durchgelassenen und reflektierten Licht. Dies macht sich bei der Farbwahrnehmung der Glasscheibenanordnung von außen durch die reflektierte Strahlung bemerkbar. Auch bei der Farbwahrnehmung von farbigen Körpern im Inneren eines Gebäudes unter Beleuchtung durch das von außen durch die Scheiben transmittierte Licht kommt es zu einer Farbwertverschiebung. Dargestellt werden nachfolgend zum einen die Farbwerte eines matt weißen Körpers bei Betrachtung der Probe unter Beleuchtung mit dem durch die Transmission veränderten Tageslichtstrahlungsspektrums (Situation innen) bezogen auf dieselbe Probe unter Betrachtung bei Tageslicht (Situation draußen). Zum anderen wird die Körperfarbe des Glasscheibensystems bei der Betrachtung von außen bestimmt. Zur Bestimmung der Farbmaßzahlen wird in Anlehnung an die EN 410 die Normlichtart D65 tabelliert in der DIN 5033 Teil 7 sowie der 10°-Normalbeobachter herangezogen. Die Bestrahlung erfolgt flächennormal. Stellvertretend für die Vielzahl verschiedener Glasarten sind nachfolgend die Farbmaßzahlen der zwei untersuchten Glasarten, Spezialweißglas (s. Anh. D-d) sowie Floatglas (s. Anh. D-e), nach dem  $L a b$ -Farbsystem für die transmittierte und die reflektierte Strahlung tabellarisch angegeben.

Spezialweißglas	Einzelscheibe (d=4 mm)	Doppelscheibensystem (d=2 x 4 mm)	Dreifachscheibensystem (d=3 x 4 mm)
$L^*$	96.496	93.339	90.468
$a^*$	-0.052	-0.102	-0.152
$b^*$	-0.013	-0.044	-0.089
Floatglas			
$L^*$	94.157	88.816	83.881
$a^*$	-1.273	-2.428	-3.484
$b^*$	0.775	1.464	2.085

Tabelle 4.4:

Farbmaßzahlen eines matt weißen Körpers unter Betrachtung bei Beleuchtung unter transmittiertem Tageslicht (Situation innen) für Spezialweißglas und Floatglas .

Bei beiden Glastypeen kommt es mit zunehmender Glaslagenanzahl zu einer Verringerung des Helligkeitswertes  $L^*$ . Entsprechend der Transmissionswerte der Glas-scheibentypen fällt die Änderung beim Floatglas deutlicher aus. Charakteristisch ist ebenfalls eine Farbwertveränderung hin zum Grünen bei beiden Glastsorten veranschaulicht durch die negativen  $a^*$ -Werte sowie eine Änderung hin in Richtung Gelb beim Floatglas und in Richtung Blau beim Weißglas entsprechend der positiven bzw. negativen  $b^*$ -Werte. Auch hierbei sind die Farbwertänderungen beim Floatglassystem ausgeprägter als beim Weißglassystem. In der Außenansicht der Systeme, beschrieben durch die Farbwerte in der Reflexion entsprechend Tabelle 4.5, erscheinen sowohl die Floatglas- als auch die Weißglassysteme im Grünen Bereich, ersichtlich an den negativen  $a^*$ -Werten. Die Blau-Gelb Anteile entsprechend dem  $b^*$ -Wert verschieben sich mit zunehmender Glaslagenzahl beim Floatglas in Richtung Gelb wohingegen sie beim Weißglas in Richtung Blau wandern.

Spezialweißglas	Einzelscheibe (d=4 mm)	Doppelscheibensystem (d=2 x 4 mm)	Dreifachscheibensystem (d=3 x 4 mm)
$L^*$	34.234	44.528	52.606
$a^*$	-0.076	-0.12	-0.161
$b^*$	-0.627	-0.779	-0.887
Floatglas			
$L^*$	33.21	43.165	48.846
$a^*$	-0.56	-1.253	-1.938
$b^*$	-0.36	-0.079	0.255

Tabelle 4.5:

Farbmaßzahlen der Glassysteme unter Betrachtung bei Beleuchtung durch Tageslicht in der Reflexion für die Glastypeen Spezialweißglas und Floatglas .

## 4.2 Flächenpolarisatoren

Wie bereits in Kapitel 3.1.3 dargestellt, sind für den Einsatz im Bereich der TN-Zelle drei Polarisatorarten von besonderem Interesse. Dies sind die Folienpolarisatoren,

die Glaspolarisatoren, sowie die Flüssigkristallpolarisatoren auf der Basis lyotroper Flüssigkristalle. Alle drei Arten wurden in Bezug auf Ihre Eignung für den Einsatz an der TN-Zelle im Hinblick auf ihre Eigenschaften eingehend untersucht. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, werden die Folienpolarisatoren und die Glaspolarisatoren lediglich anhand einiger beispielhafter Typen vorgestellt.

#### 4.2.1 Folienpolarisatoren

Vergleichend untersucht wurden die Linearpolarisatoren mit den Typenbezeichnungen HN32, HN38S sowie HN42 (s. Anhang D-f). Diese Folien nutzen eine Funktionsschicht aus Jod dotierter Polyvinylalkohol-Folie (PVA) mit einer beidseitigen Trägerschicht aus Celluloseacetobutyrat (CAB) [4.4]. Die Gesamtdicke beträgt 0.762 mm. Ebenfalls untersucht wurde der Zirkularpolarisator HNCP37 mit gleicher Dicke vom selben Hersteller. Weiterhin fand der Linearpolarisator mit der Typenbezeichnung LLC2-9218 (s. Anhang D-g) als Vertreter der Polarisatoren aus der Bildschirmmanwendung Eingang in die Untersuchungen. Seine Gesamtdicke beträgt 0.18 mm. Dieser Typ weist die gleiche Funktionsschicht wie die erstgenannten Polarisatoren auf, allerdings bestehen seine beidseitigen Trägerschichten aus Cellulosetriacetat. Dieser Polarisator ist auf einem Glasträger (Spezialweißglas) der Dicke 0.68 mm auflamiert [4.5].

Die genannten Polarisatoren wurden im Durchlichtverfahren mit einem Dia-Scanner aufgenommen um einen groben Eindruck von der Farbigkeit der Polarisatoren zu bieten. Die Farbräume der beteiligten Geräte sind hierbei nicht gesondert aufeinander abgestimmt. Die Abbildungen 4.2 und 4.3 zeigen zwei der Proben. Die Transmissionskurven bei flächennormalem Strahlungsdurchgang für diese polarisierenden Folien sind in den Diagrammen 4.9 und 4.10 dargestellt.



Abbildung 4.2: Durchlichtaufnahme des Polarisators LLC2-9218 einzeln (links), parallel (mittig) und gekreuzt (rechts).

Diagramm 4.9: Transmissionsgrad für unpolarisiertes Licht durch den Linearpolarisator LLC2-9218 bei flächennormalem Durchgang. Polarisator einzeln, parallel und gekreuzt.

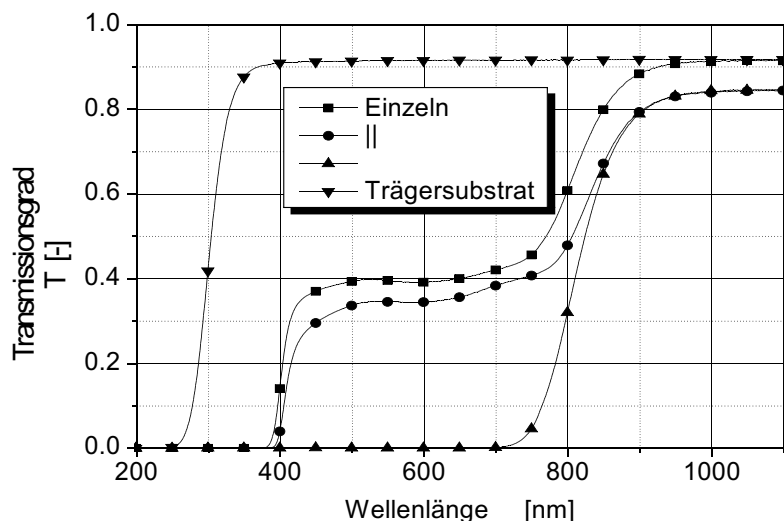
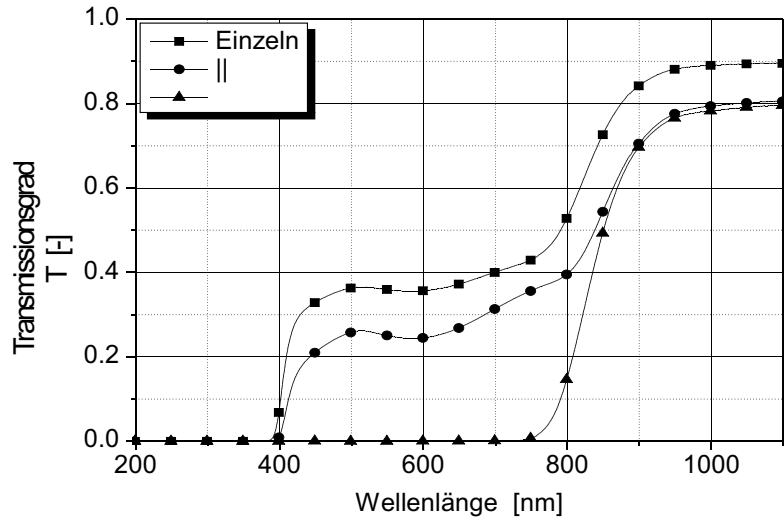




Abbildung 4.3:  
Durchlichtaufnahme des Polarisators HNCP37 einzeln (links), parallel (mittig) und gekreuzt (180° Spiegelung an der Flächennormale, rechts).

Diagramm 4.10:  
Gemessener Transmissionsgrad für unpolarisiertes Licht durch den Zirkularpolarisator HNCP37 bei flächennormalem Durchgang. Polarisator einzeln, parallel und gekreuzt (180° Spiegelung der Flächennormale).



Für die parallele Anordnung der Polarisatoren wird maximal ein radiometrischer Transmissionsgrad von  $T_{n,SOL} = 0.33$  beim Polarisator des Typs LLC2-9218 erreicht. Die fotometrischen und die radiometrischen Werte der Transmission für die vorgestellten Polarisatortypen sowie für das Trägersubstrat des LLC2-9218 Polarisators sind in der Tabelle 4.6 vergleichend dargestellt. Zu beachten ist hierbei, dass die radiometrischen ebenso wie die fotometrischen Werte berechnet wurden für den Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm.

Polarisator	Lichttechnische Daten			Radiometrische Daten	
	$T_{n,vis  }$ [-]	$T_{n,vis}$ [-]	$T_{n,vis}$ $T_{n,vis  }$ $T_{n,vis}$ [-]	$T_{n,sol  }$ [-]	$T_{n,sol}$ [-]
HN32	0.24	0.00	0.24	0.24	0.00
HN38S	0.27	0.00	0.27	0.25	0.00
HN42	0.34	0.01	0.33	0.32	0.02
LLC2-9218	0.34	0.00	0.34	0.33	0.01
HNCP37	0.25	0.00	0.25	0.25	0.00
Spezialweißglas-Substrat t=0.68mm	$T_{n,vis}$ 0.92			$T_{n,sol}$ 0.91	

Tabelle 4.6:  
Lichttechnische (Index VIS) und strahlungsphysikalische (Index SOL) Daten zur Transmission bei flächennormaler Bestrahlung ausgewählter Folienpolarisatoren sowie des Trägersubstrates des Polarisators LLC2-9218 für den Wellenlängenbereich 380 nm bis 780 nm.

Die Farbmaßzahlen zweier Polarisatoren in paralleler und gekreuzter Anordnung können der Tabelle 4.7 entnommen werden.

Polarisatorotyp	Polarisatoren in paralleler Anordnung				Polarisatoren in gekreuzter Anordnung			
	$L$	$a$	$b$	$C_{ab,  }$	$L$	$a$	$b$	$C_{ab,⊥}$
HN32	56.032	-4.075	7.125	8.208	0.061	0.011	-0.159	0.159
HN38S	58.455	-4.891	14.665	16.411	0.058	-0.001	-0.005	0.0051
HN42	64.721	-3.321	3.741	4.002	10.392	7.487	-34.894	34.688
LLC2-9218	64.134	-2.54	7.479	7.899	0.481	0.014	-0.401	0.4012
HNCP37	57.06	-4.075	7.885	8.876	0.279	0.495	-0.636	0.806
Spezialweißglas, einzeln, $t=0.68\text{mm}$	96.614	-0.002	0.175	0.175				

Tabelle 4.7:

Farbmaßzahlen eines matt weißen Körpers unter Betrachtung bei Beleuchtung unter transmittiertem Tageslicht, das die jeweiligen Polarisatoren in paralleler und gekreuzter Anordnung passiert hat. Farbmaßzahlen eines matt weißen Körpers unter Betrachtung bei Beleuchtung unter transmittiertem Tageslicht, das das Trägerglas des Polarisators LLC2-92-18 passiert hat.

Alle untersuchten Folienpolarisatoren verursachen in der parallelen Anordnung eine Farbwertverschiebung am matt weißen Körper hin zu grün und gelb. Diese Verschiebung ist wesentlich deutlicher als beim Floatglas. Die geringste Farbwertveränderung wird vom Polarisator HN42 verursacht.

Die blickwinkelabhängigen Kontrastwerte für den Polarisator LLC2-9218 sind im Diagramm 4.11 dargestellt. Gegenüber einer Glasscheibe mit alleiniger Abhängigkeit der Transmission und damit auch des Kontrastwertes vom Elevationswinkel zeigt sich bei

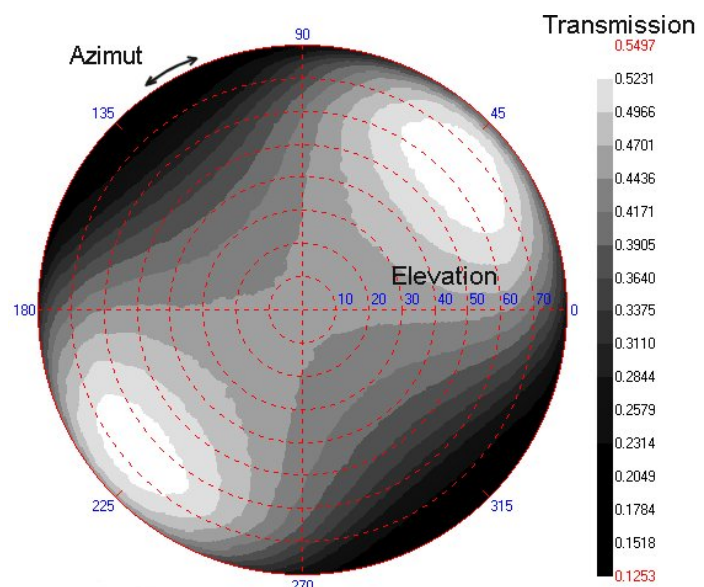


Diagramm 4.11:  
Gemessener Transmissionsgrad  
des Polarisators LLC2-9218 mit  
Polarisationsrichtung bei 45 .  
Polarisator einzeln.

den Polarisatoren zusätzlich eine deutliche Abhängigkeit vom Azimutwinkel bzw. von der Polarisationsrichtung der Probe. Auf Grund der größeren Transmission im parallelen Zustand des LLC2-9218 weist dieser auch gegenüber den beiden anderen Proben eine größere maximale Transmission auf. Die maximale Transmission beim LLC2-9218 ergibt sich unter einem Elevationswinkel von  $65^\circ$  und einem Azimut von  $45^\circ$ .

#### 4.2.2 Glaspolarisatoren

Die untersuchten Glaspolarisatoren stammen alle von einem Hersteller (s. Anhang D-h). Die ersten Proben gingen 1999 zu und tragen die Bezeichnung CP1 bis CP6. Sie zeigen alle ähnliche optische Eigenschaften. Die polarisierenden Gläser weisen bei einer Breite von 20 mm eine Dicke von 0.18 mm in Probenmitte sowie eine Dicke von 0.36 mm am Rand auf. Jeweils zwei oder drei Streifen polarisierenden Glases sind nebeneinander auf ein Trägersubstrat aus Weißglas der Dicke 1.1 mm mittels eines UV-härtenden Epoxidharz-Klebers (s. Anhang D-i) aufgebracht und ergeben eine Probe. Die Polarisationsrichtungen der Streifen weisen je Trägersubstrat in die gleiche Richtung.

Die Polarisationsstreifen sind im Heißreckverfahren entsprechend der Ausführungen in Kapitel 3 hergestellt. Anlagenbedingt war die maximal herstellbare Polarisatorbreite auf 20 mm beschränkt (mittlerweile 40 mm). Weitere Proben mit der Bezeichnung CP7 bis CP12 der Abmessungen 10 mm x 10 mm und den Dicken von 0.28 mm (CP7 und CP8), 0.25 mm (CP9 und CP10) sowie von 0.19 mm (CP11 und CP12) gingen Anfang 2002 zu und wurden ebenfalls untersucht. Bei ihnen ist eine größere optische Homogenität entlang der Probenabmessungen zu erkennen. Die Polarisatoren dieser Serie sind nicht auf Trägersubstrate auflaminiert.

Aus der 1999-Produktion sind exemplarisch die Messergebnisse der Proben CP5 und CP6 bezüglich ihrer optischen Eigenschaften dargestellt. Zwei farblich unterschiedliche Polarisatoren des Produktionsjahres 2002 finden sich in den Abbildung 4.4 und 4.5. Die Proben wurden hierbei ebenfalls im Durchlichtverfahren mit einem Dia-Scanner aufgenommen. Gescannt wurden die Glaspolarisatoren ohne Trägersubstrat.

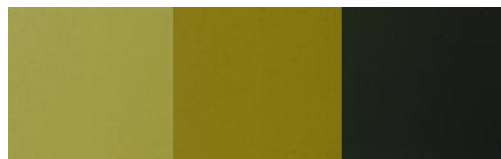


Abbildung 4.4:

Durchlichtaufnahme der Glaspolarisatoren CP9, CP10 einzeln (links), parallel (mittig) und gekreuzt (rechts).

Den Diagrammen 4.12 und 4.13 können die ermittelten Transmissionskurven bei flächennormalem Strahlungsdurchgang entnommen werden. Auffällig gegenüber den entsprechenden Daten für die Folienpolarisatoren ist, dass im gekreuzten Zustand die Transmissionswerte der Glaspolarisatoren deutliche höher liegen. Während die Folienpolarisatoren gekreuzt nahezu keine radiometrische Durchlässigkeit ( $T_{n,SOL} \approx 0$ ) aufweisen, liegt der entsprechende maximale Wert für die untersuchten Glaspolarisatoren bei  $T_{n,SOL} \approx 0.17$ . Auch die Transmissionsgrade im parallelen Zustand unterscheiden sich im spektralen Verlauf und im Integralwert. Der größte radio-



metrische Wert für den Transmissionsgrad findet sich beim Polarisatorpaar CP11 und CP12 mit  $T_{n,SOL||}$  0.35. Die fotometrischen und die radiometrischen Daten für die Transmission der unterschiedlichen Glaspolarisatoren sind in der Tabelle 4.8 dargestellt. Die Farbmaßzahlen können der Tabelle 4.9 entnommen werden. Die Richtungsabhängigkeit der Transmission entspricht qualitativ der von Folienpolarisatoren.

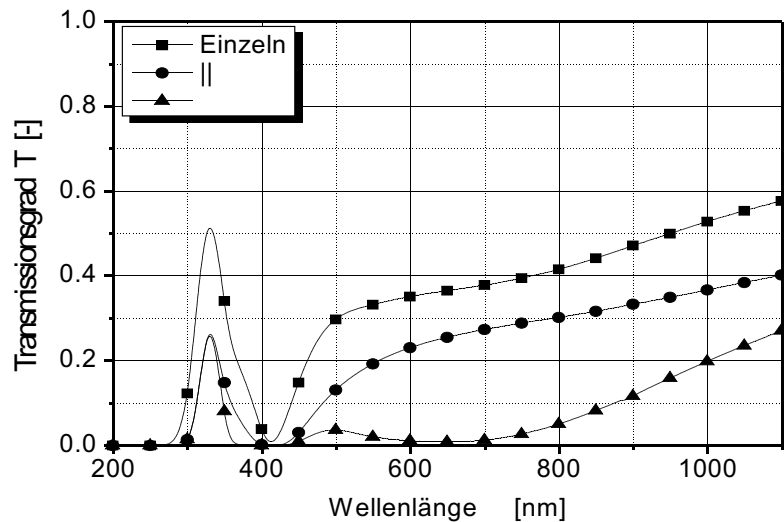


Diagramm 4.12: Gemessener Transmissionsgrad für unpolarisiertes Licht durch die Glaspolarisatoren CP9 und CP10 bei flächennormalem Durchgang. Polarisation einzeln, parallel und gekreuzt.

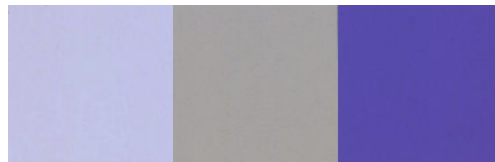


Abbildung 4.5: Durchlichtaufnahme der Glaspolarisatoren CP11, CP12 einzeln (links), parallel (mitig) und gekreuzt (rechts).

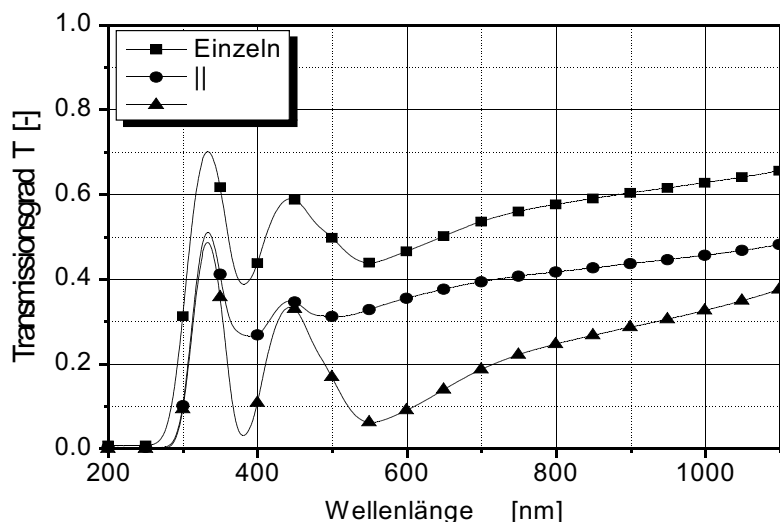


Diagramm 4.13: Gemessener Transmissionsgrad für unpolarisiertes Licht durch die Glaspolarisatoren CP11 und CP12 bei flächennormalem Durchgang. Polarisation einzeln, parallel und gekreuzt.

Polarisatorotyp	Lichttechnische Daten			Radiometrische Daten	
	$T_{n,vis  }$ [-]	$T_{n,vis}$ [-]	$T_{n,vis}$ $T_{n,vis  }$ $T_{n,vis}$ [-]	$T_{n,sol  }$	$T_{n,sol}$
CP5, CP6	0.29	0.11	0.18	0.28	0.10
CP7, CP8	0.30	0.11	0.19	0.3	0.11
CP9, CP10	0.19	0.02	0.17	0.18	0.02
CP11, CP12	0.34	0.10	0.23	0.35	0.17
Substrat von CP5 und CP6 t=1.1mm	$T_{vis}$ 0.91			$T_{sol}$ 0.91	

Tabelle 4.8:  
Lichttechnische (Index VIS) und strahlungsphysikalische (Index SOL) Daten zur Transmission bei flächennormaler Bestrahlung ausgewählter Glaspolarisatoren sowie des Trägersubstrates des Polarisatorpaares CP5, CP6. Berechnet im sichtbaren Spektrum.

Polarisatorotyp	Polarisatoren in paralleler Anordnung				Polarisatoren in gekreuzter Anordnung			
	$L$	$a$	$b$	$C_{ab,  }$	$L$	$a$	$b$	$C_{ab,}$
CP5, CP6	60.661	-0.058	14.308	14.308	39.94	-21.853	-18.27	28.484
CP7, CP8	61.65	0.304	2.28	2.3	39.679	-19.257	-34.148	39.204
CP9, CP10	50.1	0.718	43.558	43.564	14.81	-18.666	6.656	19.817
CP11, CP12	64.507	4.429	0.359	4.444	39.012	16.191	-37.077	40.458
Substrat von CP5 und CP6 t=1.1mm	96.44	-0.076	0.218	0.231				

Tabelle 4.9:  
Farbmaßzahlen eines matt weißen Körpers unter Betrachtung bei Beleuchtung unter transmittiertem Tageslicht, das die jeweiligen Glaspolarisatoren in paralleler und gekreuzter Anordnung passiert hat. Farbmaßzahlen eines matt weißen Körpers unter Betrachtung bei Beleuchtung unter transmittiertem Tageslicht, das das Trägerglas des Polarisators CP5 bzw. CP6 passiert hat.

### 4.3 Polarisierende Beschichtungen aus lyotropen Flüssigkristallen

#### 4.3.1 Untersuchte Flüssigkristallmischungen und deren Besonderheiten

Gegenstand der Untersuchungen der strahlungsphysikalischen Eigenschaften polarisierender Beschichtungen aus lyotropen Flüssigkristallen (zu englisch "lyotropic liquid crystal polarizer", LLCPP) sind zwei in ihrer Zusammensetzung unterschiedliche Flüssigkristallmischungen. Zum einen ist dies die Mischung Nr.13 und zum anderen handelt es sich um die Mischung Nr.15 (s. Anhang D-c). Aus dem Standardprogramm des Herstellers entnommen ist hierbei die Mischung mit der Nr.13, die dort als schwarzer Polarisator geführt wird. Bei der Mischung Nr.15 handelt es sich um

eine spezielle Farbstoffmischung, die im Rahmen der Kooperation vom Hersteller nach den Spezifikationen des Autors hergestellt wurde. Das Ziel bei der Herstellung der Mischung Nr.15 bestand darin, einen Grundstoff zu erhalten, der als Polarisationsfilm eine geringe Farbwertänderung hervorruft bei gleichzeitig großer Transmission im parallelen Zustand und einem großen Schalthub. Neben den beiden erwähnten Mischungen werden vom Hersteller weitere Farbstoffmischungen zur Herstellung von Polarisatoren angeboten. Sie werden bezeichnet als blaue, dunkel blaue, violette und rote Mischung. Da sie jedoch ausgeprägte Unterschiede der spektralen Transmission aufweisen, waren sie nicht Gegenstand der Untersuchungen. Allerdings muss bemerkt werden, dass beim Einsatz solcher Typen zur Polarisatorherstellung und deren Anwendung im Gebäudehüllenbereich interessante Gestaltungsmöglichkeiten durch die Farbigkeit der Elemente auftreten. Der Integralwert der Transmission im sichtbaren Spektrum der Strahlung vor allem bei den Mischungen blau und violett übertrifft den entsprechenden Wert der schwarzen Mischung Nr.13 oder der neuen Mischung Nr.15. Der lyotrope Grundstoff zur Herstellung der Polarisatorbeschichtung besteht aus den Farbstoffen unterschiedlicher Zusammensetzung (ca. 13% bis 16% bei der Mischung schwarz aus den Einzelfarben blau, rot und violett im Gewichtsanteilverhältnis 5:2:1 ), dem Lösungsmittel  $H_2O$  (ca. 83.3% bis 86.3% ) und aus diversen Additiven (ca. 0.7% Gewichtsanteilen) [4.6 und 4.7]. Der Molekulaufbau der diversen Farbstoffe ist in der Literatur [4.8 bis 4.10] ausführlich dargelegt. Die lyotropen, wasserlöslichen Moleküle der Farbstoffe weisen eine ebene, langgestreckte Form auf, bei der für die Streckung  $\lambda$ , also dem Verhältnis von Länge zu Breite, Werte von  $\lambda \approx 100$  auftreten [4.11]. Die Länge eines violetten Farbstoffmoleküls beträgt beispielsweise 2.2 nm [4.12].

#### 4.3.2 Verfahren zur Herstellung einer Polarisatorschicht

Nötig zur Herstellung eines Flüssigkristallpolarisators ist ein Trägersubstrat, der lyotrope Flüssigkristall sowie eine Vorrichtung zur Ausrichtung der Farbstoffmoleküle des LLC auf dem Träger. Die Beschichtung sollte in einer Reinraumumgebung erfolgen, da wegen der geringen Schichtdicke von 0.1  $\mu\text{m}$  bis 1.5  $\mu\text{m}$  bereits staubförmige Verunreinigungen zur optisch auffälligen Schichtbeeinträchtigung führen. Um die polarisierende Wirkung auf dem Substrat zu erzielen müssen die flüssigkristallinen Farbstoffmoleküle im Lösungsmittel gelöst in einer dünnen Schicht auf das Trägermaterial aufgebracht und dabei orientiert ausgerichtet werden. Nach dem Verdunsten des Lösungsmittels verbleiben die Farbstoffmoleküle in geordneter Struktur auf dem Untergrund und wirken für durchlaufende Strahlung polarisierend. Ursache hierfür ist die parallele Ausrichtung der Farbstoffgebilde auf dem Substrat sowie deren Eigenschaft, dichroitisch zu sein. Strahlung, deren E-Feldvektor parallel zur Richtung der wirkenden Schubkräfte beim Ausrichtvorgang schwingt, wird überwiegend von der Beschichtung durchgelassen, wohingegen die senkrecht zur Scherrichtung schwingende Strahlung verstärkt absorbiert wird [4.11]. Dies ist in Abbildung 4.6 schematisch dargestellt [4.13].

Da die aufgebrachte Polarisatorschicht weiterhin löslich für Wasser ist, hat es sich als nützlich erwiesen, durch eine Behandlung mit einer 10%-igen  $BaCl_2$ -Lösung eine Unlöslichkeit gegenüber Wasser zu erreichen. Die Proben werden hierzu nach dem Auftragen und Trocknen der Polarisatorschicht in eine entsprechende Lösung getaucht.

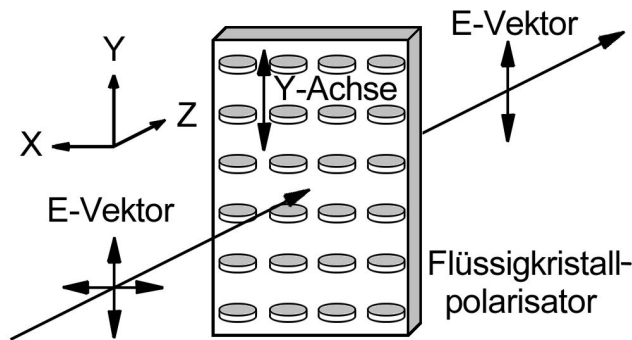


Abbildung 4.6:  
Schematische Darstellung des Flüssigkristallpolarisators. Transmittiert wird der Anteil vom unpolarisierten Licht, der parallel zur Rakel- oder Scherrichtung, also parallel zur Y-Achse verläuft. Diese steht senkrecht auf die Molekülebene der Farbstoffe des LLCp.

Das Ausrichten der Moleküle in der flüssigen Schicht kann auf verschiedene Weise erreicht werden. Zur Herstellung der Proben kamen zwei Methoden zum Einsatz. Einerseits wurde eine Spiral-Rakel bestehend aus einer drahtumwickelten Rundstange mit einem Durchmesser von 10.2 mm und einem Draht der Dicke von 10  $\mu\text{m}$  verwendet (s. Anhang D-j), andererseits kam eine gummiummantelte Stahlrolle mit untergelegter PET-Folie (Polyethylenterephthalat), wie sie in Abbildung 3.4 dargestellt ist, zum Einsatz. Sowohl die Rakelstange als auch die Gummirolle sind nicht drehbar gehalten und werden beim Abziehvorgang mit einer festgelegten Andruckkraft auf das benetzte Substrat gedrückt. Die optimale Andruckkraft sowie die passende Abzugsgeschwindigkeit zur Erreichung einer bestimmten Schichtdicke des Polarisators hängen von der Substratgröße, der Substratvorbehandlung sowie der Polarisatormischung ab und müssen durch Vorversuche ermittelt werden. Anhaltswerte sind in [4.14] gegeben. Bei den selbst hergestellten Schichten betrug die Andruckkraft des Rakels ca. 10 N bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 0.02  $\text{m/s}$  bis 0.1  $\text{m/s}$ . Vor dem Aufbringen der Flüssigkristallschicht ist eine gründliche Reinigung der Substrate in deionisiertem  $\text{H}_2\text{O}$  mit einem Volumenanteil von 1% Mucasol als Reiniger notwendig. Hierdurch werden eventuell vorhandene Verunreinigungen und Fettrückstände entfernt. Anschließend erfolgt die Trocknung der Substrate unter einer Stickstoffabbläsung. Bei Substraten mit einer aufgetragenen ITO-Schicht hat es sich als günstig erwiesen, auf diese eine  $\text{SiO}_2$ -Schicht zur Verbesserung der Benetzung der Oberfläche mit dem Flüssigkristall aufzubringen.

### 4.3.3 Schichtdickenabhängigkeit der Transmission und des Schalthubes

Bereits nach den Vorversuchen zur Beschichtung mit dem Spiral-Rakel zeigte sich, dass sich eine polarisierende Schicht zwar leicht herstellen lässt, dass diese jedoch in der Homogenität deutliche Schwankungen aufweist. Besonders im gekreuzten Zustand zweier Polarisatoren machen sich die Ungleichmäßigkeiten durch sichtbare Streifenmuster bemerkbar. Die erzeugte Schichtdicke bei dem gewählten Verfahren war ebenfalls deutlich zu groß und damit zusammenhängend lag der Transmissionsgrad bei geringen Werten.

Um nicht einen weiteren Schwerpunkt auf die Optimierung des Verfahrens zur Schichtherstellung zu legen, wurden die zur TN-Zellenherstellung verwendeten polarisierenden Schichten von Partnerfirmen aufgebracht, da diese sich bereits einge-

hend mit der Problematik beschäftigt hatten. Die LLC-Polarisatoren auf Glasträger mit der Beschichtung vom Typ Nr.13 (s. Anhang D-k) und die Polarisatoren mit dem Farbstoff Nr.15 (s. Anhang D-c) ebenfalls auf Glassubstraten stammen von zwei unterschiedlichen Partnern. Alle noch untersuchten Polarisatoren auf Folienträgern stammen ebenfalls von letzterem Partner. Bei beiden Firmen erfolgte das Schichtauftragen unter Verwendung der verdrehsicheren Gummirolle.

Die Eigenschaften der aufgetragenen Schicht werden wesentlich von der Schichtdicke des getrockneten Polarisators sowie dem Grad der Gleichausrichtung der Einzelmoleküle der Farbstoffe bestimmt. Der Zusammenhang zwischen der Schichtdicke sowie den Transmissionsgraden für Polarisatoren in einzelner, paralleler und gekreuzter Anordnung sind für zwei verschiedene Schichtherstellungsverfahren in Diagramm 4.14 sowie 4.15 dargestellt. Ist die Schichtdicke gering, so stellt sich eine große Transmission im gekreuzten Zustand ein, ist sie groß, so sinkt der Transmissionsgrad für die parallele Anordnung der Polarisatoren. Der maximale Schalhub, also die größte Differenz zwischen dem Transmissionsgrad in paralleler Anordnung und in gekreuzter Anordnung, wird erreicht beim Auftragen der Schicht im Scherverfahren mit einer festgehaltenen Gummirolle und untergelegter PET-Folie. Bei diesem Verfahren kann der Schalhub ( $T_{\perp} - T_{\parallel}$ ) einen Werte von 24.2 % erreichen. Verglichen mit den Werten aus Tabelle 4.6 für Folienpolarisatoren ist der erreichbare Schalhub geringer als für die besseren Folienpolarisatoren. Er ist jedoch durch die Schichtdicke zusammenhängend mit der Transmission einstellbar. Im parallelen Zustand zweier Polarisatoren ergibt sich beispielsweise bei einem Transmissionsgrad von 45 % ein Schalhub von ca. 10 %. Die Schichtdicke einer Probe, die vom Autor im Rakelverfahren mit der Mischung Nr.13 beschichtet wurde, beträgt 1.2  $\mu\text{m}$  (Probe OP3 bzw. OP4).

Wesentlich dünner ist die Polarisatorschicht des LLCP Nr.15, die mit Hilfe der festgeklemmten Gummirolle und der PET-Folie aufgetragen wurde. Wie in Diagramm 4.16 zu erkennen ist liegt sie bei ca. 200 nm. Im Übergangsbereich zwischen den Schichten ist als typische Randerscheinung der Beschichtung eine deutlich größere Schichtdicke zu erkennen. Die Schichtdickenmessung erfolgte mit einem Gerät, das im Anhang C-5 beschrieben wird.

Diagramm 4.14:  
Transmissionsgrad im sichtbaren Spektrum,  $T_{n,SOL}$ , in Abhängigkeit von der Polarisatorschichtdicke für einen einzelnen Polarisator sowie von zwei Polarisatoren in paralleler und gekreuzter Anordnung auf einem Weißglassubstrat aufgebracht mit einer Gummirolle. Quelle s. Anhang D-c.

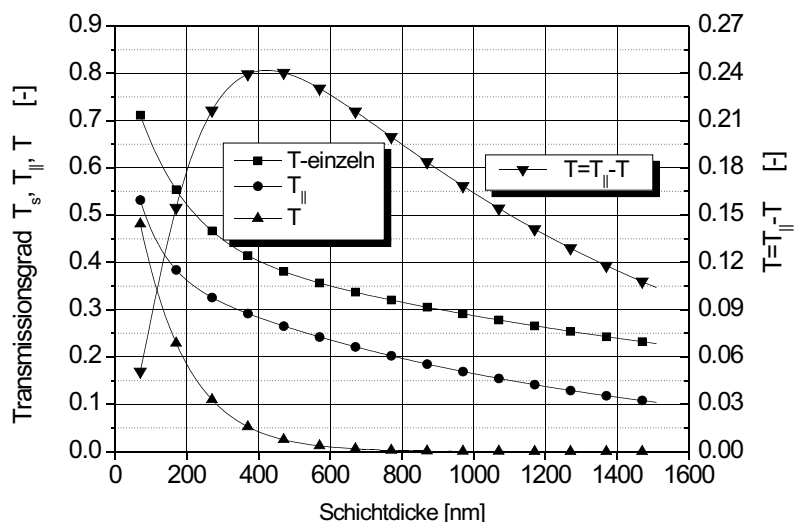


Diagramm 4.15:  
 Transmissionsgrade im sichtbaren Spektrum,  $T_{n,SOL}$ , in Abhängigkeit von der Polarisatorschichtdicke für einen einzelnen Polarisator sowie von zwei Polarisatoren in paralleler und gekreuzter Anordnung. Hergestellt wurde die Schicht mit einer Spiral-Rakel. Quelle s. Anhang D-c.

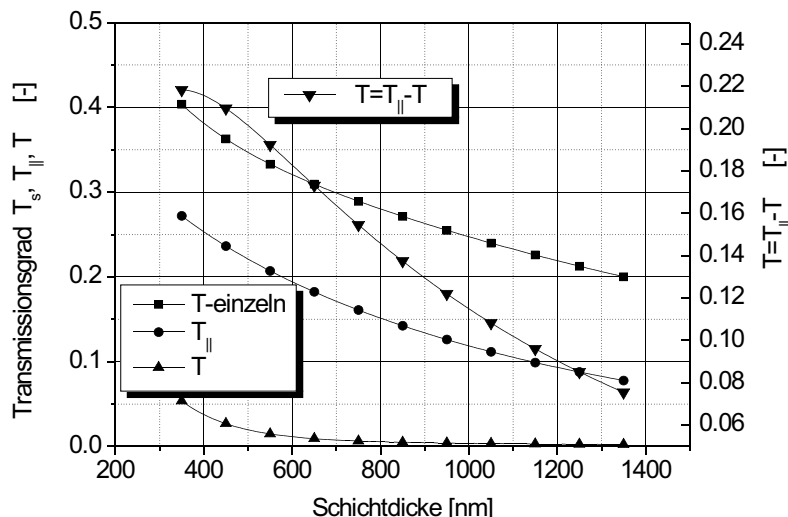
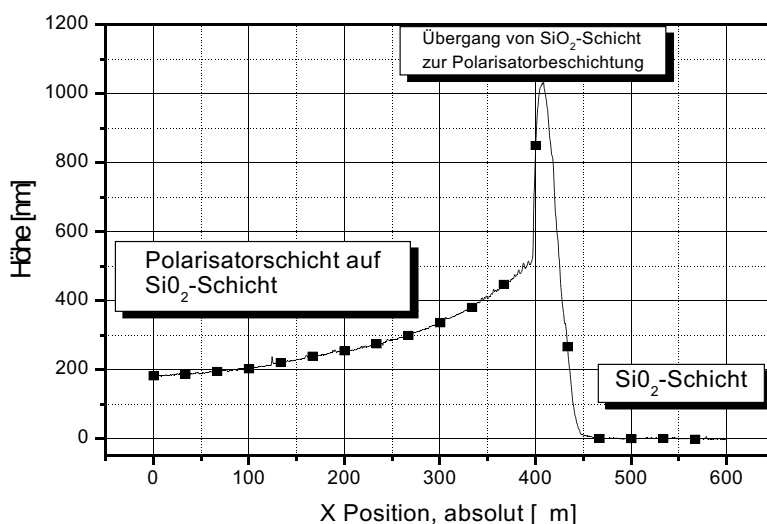


Diagramm 4.16:  
 Gemessener Schichtdickenverlauf beim Übergang vom Glassubstrat mit  $SiO_2$ -Schicht zu einer Polarisatorschicht, die mit einer feststehenden Gummirolle und einer untergelegten PET-Folie aus der Polarisatormischung Nr.15 hergestellt wurde.



#### 4.3.4 Zelleninterner Polarisator mit orientierender Wirkung

Ein wesentlicher Vorteil des Flüssigkristallpolarisators besteht darin, dass er nicht nur außen sondern auch innen in einer TN-Zelle angebracht werden kann. Im Inneren der Zelle ist er weitgehend vor mechanischer Beeinflussung geschützt. Möglich ist der interne Einsatz durch die geringe Schichtdicke der Polarisatorschicht sowie durch seine Eigenschaft, als Haftgrund für den PI dienen zu können. Auch ist der LLCPP bei entsprechender Behandlung gegenüber dem TN-Flüssigkristall unlöslich.

Die Orientierung des Flüssigkristalls erfolgt durch zwei geriebene PI-Schichten wie bei Anzeigeneinheiten üblich. Jedoch konnte durch die Herstellung einer entsprechenden Zelle mit internem Polarisator ohne aufgebrachter PI-Schicht gezeigt werden, dass auch die LLCPP-Schicht eine orientierende Wirkung aufweist und sich eine Funktionszelle ohne eine PI-Schicht schaltbar realisieren lässt. Allerdings weisen diese Zellen ein verändertes Schaltverhalten mit teilweiser Domänenbildung und daher optisch inhomogenem Aussehen im Bereich zwischen der kompletten Verdunkelung und der maximalen Transparenz auf. Um diese Erscheinung zu ergründen wurden einige mit dem Polarisator Nr.15 beschichtete Substrate unter dem Rasterkraftmikro-



skop (RKM) untersucht. Eine entsprechende Aufnahme ist in Abbildung 4.7 wiedergegeben. Das Höhenprofil an den drei ausgewiesenen Schnitten aus Abbildung 4.7 ist in Diagramm 4.17 aufgetragen.

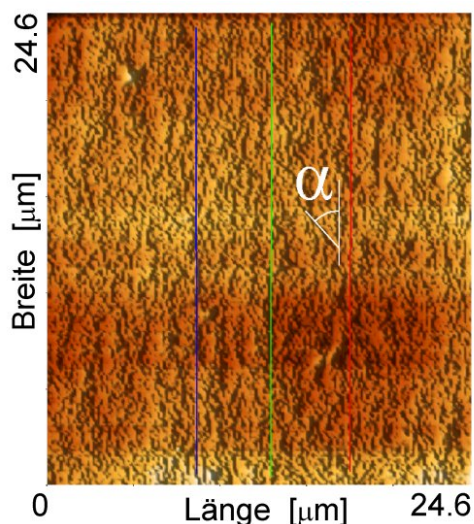
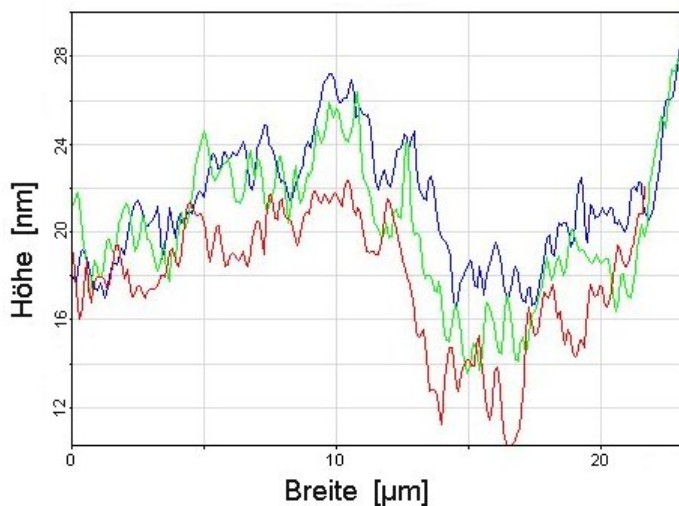


Abbildung 4.7: Draufsicht auf das Höhenprofil der Flüssigkristallpolarisatorschicht auf einem Glassubstrat mit Funktionsschichten (ITO,  $\text{SiO}_2$ ). Die Haupttrichtung verläuft unter  $90^\circ$  zur Bildunterkante. Der Winkel  $\alpha$  kennzeichnet eine Nebenrichtung. Der Verlauf der Höhengschnitte ist farblich markiert.

Diagramm 4.17: Höhenverlauf in der Polarisatorschicht über der Probenbreite aus der RKM-Messung. Die Lage der Schnitte ist in Abbildung 4.7 dargestellt.



Der untersuchte quadratische Ausschnitt wies eine Kantenlänge von  $24,6 \mu\text{m}$  auf. Die maximale Höhendifferenz im Profil der Schnitte beträgt  $14,5 \text{ nm}$ . In Bezug auf die Polarisatorschichtdicke von  $200 \text{ nm}$  ergibt sich damit die Dickenschwankung von  $7,25 \%$  im Messbereich. Sie ist mit dem Auge bei der Durchsicht durch einen einzelnen Polarisator nicht als Inhomogenität wahrnehmbar.

Aus den RKM-Aufnahmen ist erkennbar, dass es im Oberflächenprofil der Polarisatorschicht eine Haupttrichtung gibt, die parallel zur Rakel oder Abziehrichtung beim Beschichtungsvorgang liegt. Daneben existieren Nebenrichtungen, die auffällig von der Haupttrichtung um  $30$  bis  $45$  abweichen. Charakterisiert werden die Haupt- und Nebenrichtungen durch eine Riffelung der Oberfläche. Täler und Berge kenn-

zeichnen die Haupt- und Nebenrichtungen. Ähnliche Ergebnisse aus Oberflächenabtastungen werden in der Literatur [4.12] beschrieben. Die beobachteten Nebenrichtungen sind vermutlich die Ursache für das ungleichmäßige Schaltverhalten der TN-Zellen, die ohne PI-Orientierungsschicht hergestellt wurden und die in den Zwischenstufen Domänenbildung aufweisen. Da jeweils zwei sich gegenüberliegende Substrate den Flüssigkristall umfassen und beide Träger derartige Nebenrichtungen aufweisen, gibt es Regionen ohne definierte 90°-Drehung im Flüssigkristallbereich. In diesen Gebieten muss sich natürlich auch ein anderes Schaltverhalten zeigen als im Bereich gegenüberliegender Hauptrichtungen. Vorausgesetzt wird hierbei, dass sich eine Wechselwirkung zwischen der Polarisatorschicht und der Flüssigkristallfüllung in der Zelle einstellt, sei sie eine Folge mechanischer Ausrichtungseinflüsse oder die Ursache molekularer Wechselkräfte. Weitergehende Untersuchungen zur Verbesserung der Parallelausrichtung der Polarisatormoleküle zur Optimierung der Schalteigenschaften der TN-Zellen ohne PI erfolgten im gegebenen Rahmen nicht. Alle untersuchten LLC-Polarisatoren wurden durch das Ausrichten der Moleküle unter mechanischen Einwirkungen hergestellt. In der Literatur werden auch andere Methoden zur Gleichausrichtung beschrieben. So kann diese beispielsweise auch durch die Verwendung von photosensitiven, auf das Substrat aufgebrachte Materialien erfolgen. Diese erhalten durch die Bestrahlung mit linear polarisiertem Licht Strukturen eingepägt, die beim Auftragen des LLC in diesem eine entsprechende Ausrichtung der Nanopartikel induzieren [4.15]. Allerdings wird auch bei diesem Verfahren das Vorhandensein von Nebenrichtungen beobachtet.

#### 4.3.5 Optische Kenndaten

Zur Bestimmung der Transmission wurden wiederum spektrometrische Messungen durchgeführt. Die graphische Darstellung der Messergebnisse erfolgt in den Diagrammen 4.18 und 4.19. Durchlichtaufnahmen der Proben in einfacher, paralleler und gekreuzter Anordnung finden sich in den Abbildungen 4.8 und 4.9. Bei den untersuchten, beschichteten Folien sowie der unbeschichteten Folie weisen Oszillationen im Verlauf der spektralen Transmissionsgrade auf Interferenzerscheinungen zwischen dem durchlaufenden und dem mehrfach reflektierten Strahlen hin.

Verglichen mit den Polarisatorschichten auf Glassubstraten weisen die beschichteten Folien deutlich geringere Transmissionsgrade auf. Dies lässt auf große Schichtdicken der Polarisatorschichten bei den Folien schließen. Die Proben OP3 und OP4 gehören zu dieser Gruppe. Bei diesen beiden Mustern ist auf die PET-Folie der Polarisator des Typs Nr.13 aufgetragen. Der größte Transmissionsgrad wird erreicht bei der Mischung Nr.15, die aufgetragen auf ein Glassubstrat bei den Mustern N15-2 und N15-4 den Wert von  $T_{n,vis}$  0.32 erreicht. Verglichen mit den Folienpolarisatoren liegen die Transmissionsgrade der LLCP-Schicht in gekreuzter Anordnung bei höheren Werten. Die Übersicht zu den strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Transmissionsgraden wird in der Tabelle 4.10 gegeben.



Abbildung 4.8:  
Durchlichtaufnahme der Flüssigkristallpolarisatoren OP3, OP4 (Nr.13) einzeln (links), parallel (mittig) und gekreuzt (rechts). Substrat PET-Folie,  $d = 60 \text{ } \mu\text{m}$ .

Diagramm 4.18:  
Gemessener Transmissionsgrad für unpolarisiertes Licht durch die Flüssigkristall-Polarisatoren OP3 und OP4 (Mischung Nr.13) bei flächennormalem Durchgang. Substrat ist eine PET-Folie. Polarisator einzeln, parallel und gekreuzt.

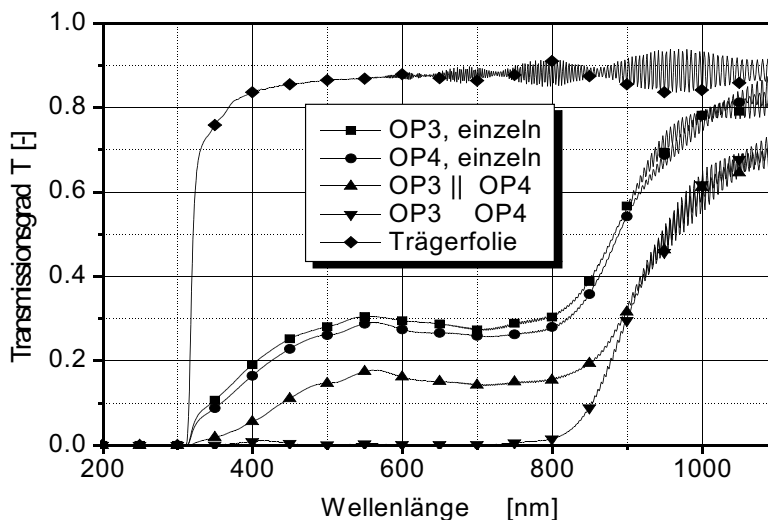
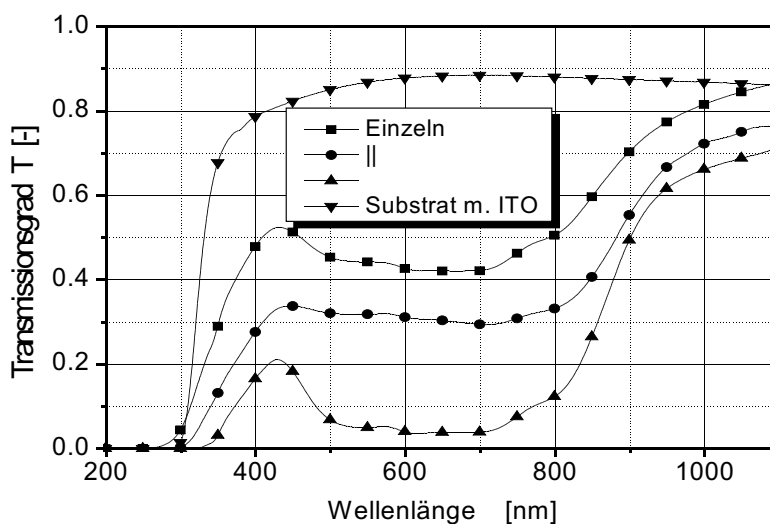


Abbildung 4.9:  
Durchlichtaufnahme der Flüssigkristallpolarisatoren N15-2, N15-4 (Nr.15) einzeln (links), parallel (mittig) und gekreuzt (rechts). Substrat aus Weißglas der Dicke 1.1 mm mit ITO- und  $SiO_2$ -Beschichtung.

Diagramm 4.19:  
Gemessener Transmissionsgrad für unpolarisiertes Licht durch die Flüssigkristall-Polarisatoren Probe N15-2 und N15-4 (Mischung Nr.15) bei flächennormalem Durchgang. Polarisator einzeln, parallel und gekreuzt. Trägersubstrat aus Spezialweißglas.



Polarisator	Lichttechnische Daten			Radiometrische Daten	
	$T_{n,VIS  }$ [-]	$T_{n,VIS}$ [-]	$T_{VIS}$ $T_{n,VIS  }$ $T_{n,VIS}$ [-]	$T_{n,SOL  }$ [-]	$T_{n,SOL}$ [-]
OP3, OP4 (Nr.13) auf Folie	0.16	0.00	0.16	0.14	0.00
0201-04-1/ -2, (Nr.15) auf Folie	0.24	0.05	0.19	0.24	0.07
OP59, OP60 (Nr.13) auf Glas	0.24	0.01	0.22	0.21	0.02
N15-2, N15-4 (Nr.15) auf Glas	0.32	0.06	0.26	0.31	0.08
PET-Substrat von OP3, OP4, 0201-04-1/-2 mit Dicke 60µm	$T_{n,VIS}$ 0.87			$T_{n,SOL}$ 0.87	
Glassubstrat mit ITO von OP59, OP60, N15-2, N15-4 mit Dicke 1.1 mm	$T_{n,VIS}$ 0.87			$T_{n,SOL}$ 0.86	

Tabelle 4.10:

Lichttechnische (Index VIS) und strahlungsphysikalische (Index SOL) Daten zur Transmission bei flächennormaler Bestrahlung ausgewählter Flüssigkristallpolarisatoren sowie der Folien- und Glasträgersubstrate der Polarisatoren für das sichtbare Spektrum.

#### 4.3.6 Transmissionsmessung

Als Repräsentant der Flüssigkristallbeschichtungen ist in Diagramm 4.20 für das Muster OP3 (Nr.13 auf PET-Folie) der winkelabhängige Transmissionsgrad ersichtlich. Gegenüber den Folien- und auch den Glaspolarisatoren ist die Einfallswinkelabhängigkeit der Transmission für ein einzelnes Substrat nicht sehr ausgeprägt und ähnelt dem von Glas.

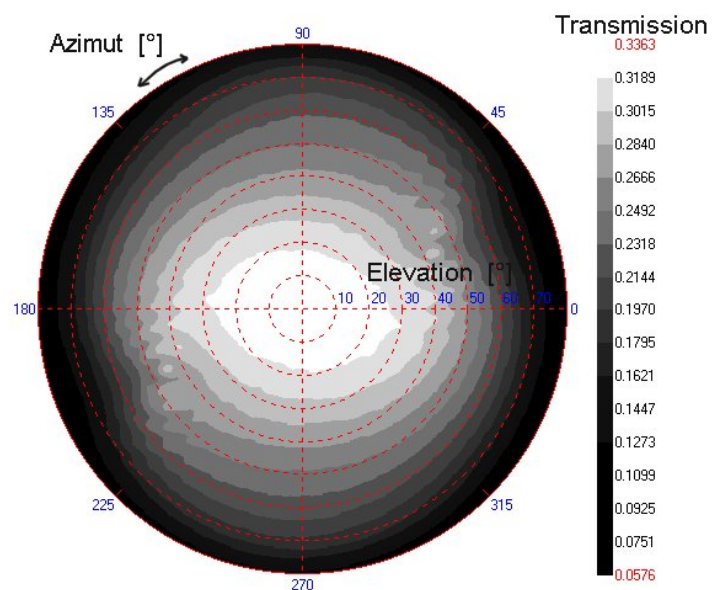


Diagramm 4.20:

Gemessener, winkelabhängiger Transmissionsgrad des Polarisators OP3 mit Polarisationsrichtung bei 0°. Polarisator einzeln.

### 4.3.7 Farbmaßzahlen

Die ermittelten Farbmaßzahlen der Polarisatormuster sowie der verwendeten Substrate können aus Tabelle 4.11 gelesen werden. Es zeigt sich, dass die Proben mit der Farbstoffmischung Nr.15 gegenüber den Proben mit der Farbstoffmischung Nr.13 im parallelen Zustand zweier Polarisatoren eine geringere Verschiebung der Farbmaßzahlen  $a$  und  $b$  aufweisen. Im gekreuzten Zustand der Polarisatoren jedoch verhält es sich umgekehrt. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass für die hergestellte Beschichtungsdicke bei den Mustern der Mischung Nr.15 die Transmissionsgrade vor allem im Bereich blauer Strahlung ( $\approx 430 \text{ nm}$ ) größere Werte aufweisen als bei den Proben der Mischung Nr.13. Während also in paralleler Anordnung die Polarisatoren mit der Mischung Nr.15 eine geringere Farbmaßzahlverschiebung und damit eine geringere Buntheit verursachen, liegt sie bei gekreuzten Polarisatoren des selben Typs bei größeren Verschiebungen. Auf Kosten einer verringerten Transmission in der parallelen Stellung lässt sich allerdings auch bei der Mischung Nr.15 mit erhöhter Schichtdicke die Buntheit reduzieren.

Polarisator typ	Polarisatoren in paralleler Anordnung				Polarisatoren in gekreuzter Anordnung			
	$L$	$a$	$b$	$C_{ab,  }$	$L$	$a$	$b$	$C_{ab,\perp}$
OP3, OP4 (Nr.13)	47.128	-4.321	12.228	12.969	2.202	1.443	-3.749	4.017
0201-04-1/-2 (Nr.15)	56.188	-0.521	0.569	0.771	27.579	16.844	-18.585	24.08
OP59, OP60 (Nr.13)	54.692	-4.113	7.207	8.836	10.679	4.053	-14.665	14.22
N15-2, N15-4 (Nr.15)	63.174	-0.374	-1.891	1.928	28.738	12.54	-32.411	34.75
PET-Substrat von OP3/4 und 0201-04-1/-2 mit Dicke 60 $\mu\text{m}$	94.741	0.004	1.076	1.076				
Glassubstrat mit ITO (OP59/60, N15-2/-4), $d=1.1 \text{ mm}$	94.554	-0.052	3.045	3.045				

Tabelle 4.11:

Farbmaßzahlen eines matt weißen Körpers unter Beleuchtung mit transmittiertem Tageslicht, das die jeweiligen Flüssigkristall-Polarisatoren in paralleler und gekreuzter Anordnung passiert hat. Farbmaßzahlen eines matt weißen Körpers unter Beleuchtung unter transmittiertem Tageslicht, das die Trägersubstrate passiert hat.

### 4.3.8 Temperaturbeständigkeit der untersuchten Polarisatortypen

Ein wesentliches Kriterium für die Einsetzbarkeit der untersuchten Polarisatortypen im Gebäudehüllenbereich, ist die Temperaturbeständigkeit der Polarisatoren sowie gegebenenfalls notwendiger Adhäsionsmaterialien. In Kapitel 6 wird eingehend auf die auftretenden Temperaturlasten und deren Einfluß auf die Funktion und die Haltbarkeit der Polarisatoren eingegangen. An dieser Stelle soll lediglich auf die Herstellerangaben zur Beständigkeit gegenüber Temperaturlasten Bezug genommen werden.

Die in der Bildschirmmanwendung bisher überwiegend eingesetzten Folienpolarisatoren werden üblicherweise auf die TN-Zellen-Substrate von außen auflaminiert. In



ähnlicher Weise könnte die Integration der Polarisatoren beim Einsatz einer TN-Zelle als adaptives Element einer Isolierverglasung erfolgen. Sowohl der Polarisator als auch der Klebstoff müssen den auftretenden Temperaturlasten auf lange Dauer Stand halten können. Die Hersteller limitieren jedoch die Anwendung ihrer Produkte in den Grenzen von  $20\text{ C} < T < 70\text{ C}$  für die PVA-Folienpolarisatoren (Polyvinylalkohol) mit beidseitiger CAB-Trägerschicht (Celluloseacetobutyrat) [4.16]. Bei hoher relativer Feuchte von 90 % kann schon bei geringeren Temperaturen ( $49^\circ\text{C}$ ) eine Beeinträchtigung der optischen Eigenschaften eintreten [4.17]. Die maximale gemessene Temperatur an einer Polarisatorprobe von ca.  $85^\circ\text{C}$  im Freilandversuch (vgl. Kap. 6.1.2) führte zu einer Degeneration der polarisierenden Eigenschaften. Aus diesem Grunde sind Folienpolarisatoren nicht für den Einsatz im adaptiven Fenster geeignet.

Anders verhält es sich mit den Glas- und mit den LLC-Polarisatoren. Während die Temperaturbeständigkeit der optischen Eigenschaften bei den Glaspolarisatoren bis nahezu an die Glastransformationstemperatur von  $T_g = 640\text{ C}$  heranreicht [3.13], wird als Grenztemperatur einer beginnenden Degradation für die LLC-Schicht der Wert von ca.  $200^\circ\text{C}$  angegeben [4.14]. In der selben Quelle wird für die LLC-Polarisatoren dargelegt, dass bei einer Erwärmung in trockener Luft über eine Dauer von 800 h bei der Temperatur von  $130^\circ\text{C}$  keinerlei Eigenschaftsänderungen zu verzeichnen sind. Damit scheinen sowohl die Glas- als auch die LLC-Polarisatoren für den Einsatz im adaptiven Element unter dem Gesichtspunkt der Temperaturstabilität geeignet.

#### 4.3.9 Beschreibungsmodell für den Strahlungsdurchgang bei LLC-Polarisatoren

Da die Glaspolarisatoren derzeit und auch in absehbarer Zeit noch nicht in entsprechenden Abmessungen verfügbar sein werden, soll bei der formelmäßigen Beschreibung der optischen Eigenschaften lediglich der LLC-Typus Berücksichtigung finden. In Abbildung 4.10 ist schematisch die Molekülanordnung der LLC-Moleküle in der Polarisatorschicht dargestellt. Jedes einzelne Molekül, bildet eine als Scheibe dargestellte Ebene mit den Achsen X und Z. Die X-Achse liegt parallel zur Substratebene und weist in Richtung der Molekülquerachse. Die Z-Achse definiert die Moleküllängsachse und steht senkrecht auf der Substratebene. Die Y-Achse ist senkrecht zur Scheibenebene der Moleküle angeordnet und weist in Richtung der Auftragsrichtung der LLC-Schicht.

Bei optisch isotropen Stoffen werden die Transmission und die Reflexion bestimmt unter Anwendung eines einzigen Brechungsindex, unabhängig von der Schwingungsrichtung des E-Feld-Vektors. Für optisch einachsige oder gar biaxiale Materialien jedoch ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle davon abhängig, in welche Richtung ihr elektrisches Feld schwingt. Bei einachsigen Stoffen existieren zwei unabhängige Brechzahlen  $n_o, n_e$ . Bei biaxialen Materialien sind es deren drei. Jeder Hauptschwingungsrichtung im Raum ist ein Wert zugeordnet. Die Brechzahlen werden dann zweckmäßigerweise als  $n_x, n_y, n_z$  bezeichnet. Der verwendete LLC zeigt zweiachsiges Verhalten. Da der Farbstoff der polarisierenden Nanopartikelschicht durch seine unterschiedliche Absorption in den drei Hauptrichtungen als dichroitischer Filter polarisiert, sind den Brechzahlen natürlich auch die entsprechenden Absorptionskoeffizienten  $k_x, k_y, k_z$  zugeordnet. E-Feld-Vektoren, die parallel zur X-Achse schwingen, werden beim Durchgang bevorzugt absorbiert, wohingegen die Schwingungsrichtungen parallel zur Y- und Z-Achse wesentlich geringere Abschwächungen



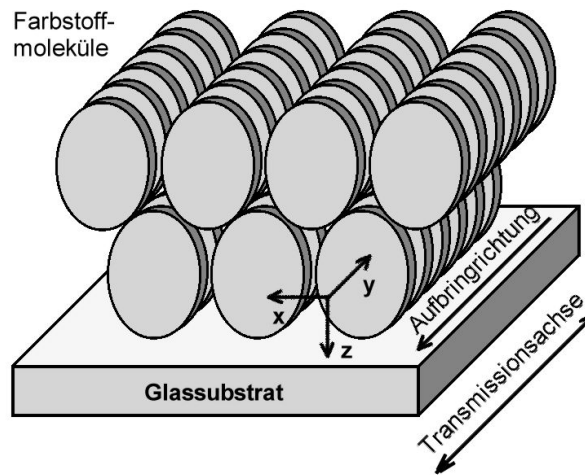


Abbildung 4.10:  
Schematische Darstellung der Ausrichtung der Farbstoffmoleküle des LLCPS. Die Nanopartikel des LLCPS sind als ovale Scheiben dargestellt.

erfahren. Während die Komponenten  $n_x, n_y$  sowie  $k_y$  von der Schichtdicke der LLCPS-Schicht weitestgehend unabhängig sind, zeigen  $n_z, k_x$  und  $k_z$  deutliche Abhängigkeiten. Mit zunehmender LLCPS-Schichtdicke wird der Absorptionskoeffizient  $k_x$  in der Haupttrichtung X kleiner, während er für die Richtung Z zunimmt. Dies wird bei Bobrov und Novak [4.18] mit einem unterschiedlichen Orientierungsverhalten der LLCPS-Moleküle in der X-Z-Ebene bei unterschiedlichen Schichtdicken erklärt. Bei dünnen Schichten ist demnach die Gleichausrichtung größer als bei dickeren Schichten. Auch die Art der Aufbringung hat einen beträchtlichen Einfluss auf den Ordnungsgrad der Molekülausrichtung in der LLCPS-Schicht. So können sich diese Unterschiede in einem veränderten  $k_x$ -Wert bemerkbar machen. Für dünne Schichten ( $d \approx 600 \text{ nm}$ ) finden sich Unterschiede von bis zu 10 % zwischen der Aufbringung mit einem Spiralrakel im Vergleich zu der Aufbringung im Scherverfahren (größeres  $k_x$ ). Für dicke Schichten ( $d \approx 1700 \text{ nm}$ ) sind die Unterschiede wesentlich größer und betragen annähernd 100 %.

Die als Ellipsometrie bezeichnete messtechnische Erfassung der richtungsabhängigen Eigenschaften eines Werkstoffes ist äußerst aufwendig. Es bestand nicht die Möglichkeit die notwendigen Messungen zur Ermittlung der komplexen Werte der Brechzahlen durchzuführen, um eine ausreichende Datenbasis zur Beurteilung unterschiedlicher Schichtdicken zu erlangen. Daher muss an dieser Stelle auf die veröffentlichten Datensätze in der Literatur zurückgegriffen werden [4.18 und 4.19]. Die Werte der vorgenannten Variablen für die Farbmischung schwarz, Nr.13, bei  $629 \text{ nm}$  und zweier unterschiedlicher Schichtdicken sind der Veröffentlichung von Bobrov [4.18] entnommen und in Tabelle 4.12 dargestellt. Leider sind für diese LLCPS-Mischung keine Daten für weitere Wellenlängen der einfallenden Strahlung veröffentlicht. Interessant für den Einsatz in der Fassade als schaltbare Systeme sind Dicken der LLCPS-Schicht von ca. 100 nm bis etwa 400 nm. Bei dickeren Schichten ist die maximale Transmission zu gering, wie aus Diagramm 4.14 ersichtlich wird. Die bei den beiden Dicken von 629 nm und 1620 nm gegebenen Daten lassen lediglich eine lineare Extrapolation zur Ermittlung der entsprechenden Kennzahlen bei den interessierenden dünnen Schichten zu. Um den Fehler bei diesem Vorgehen zu verifizieren, wurde für die bei Bobrov [4.20] ermittelten Werte von  $k_x$  für die Schichtdicken von 1700 nm und 610 nm einer Polarisatormischung aus blauen, roten und violetten Farbstoffmolekülen (grauer Polarisator), die lineare Extrapolation

angewendet, um den entsprechenden Wert bei der ebenfalls vermessenen Schichtdicke von 497 nm zu berechnen. Der relative Fehler zum Messwert betrug dabei 0.49 %. Wegen des geringen Fehlers bei der Extrapolation wird diese auch für die übrigen Kenndaten angewendet. Es zeigt sich dabei, dass für den interessierenden Dickenbereich der Mischung Nr.13 gilt, dass  $n_y > n_z$  ist. Da die Komponente  $k_x$  wesentlich größere Werte annimmt als die beiden übrigen Imaginärteile der Brechzahl, deren Beträge sich annähern, und da für die Mischung Nr.15 lediglich  $k_x$  und  $k_y$  vermessen sind [4.19], wird das Verhalten des LLCPP als optisch einachsig angesetzt. Für den senkrecht auf die Schicht auftreffenden Strahl wirken lediglich die bekannten Komponenten  $k_x, k_y$ . Für alle übrigen Einfallrichtungen wird die Absorption in der Schicht auch durch den Koeffizient  $k_z$  bestimmt und zwar um so mehr, je größer der Winkel zwischen der Flächennormalen und dem Strahl ausfällt. Beim Ansatz des Modells eines einachsigen Werkstoffes wird die Transmission für größere Einfallswinkel zu hoch bestimmt. Wegen der geringen Veränderungen der Kennzahlen mit der Schichtdicke bei den dünnen Schichten wird im Bereich von 100 nm bis 400 nm mit unveränderten Werten gerechnet.

Schichtdicke [nm]	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$k_x$	$k_y$	$k_z$
629 4	1.77	1.51	1.69	0.36	0.026	0.097
1620 50	1.8	1.53	2.09	0.286	0.029	0.172
Extrapoliert aus den obigen Messwerten						
Schichtdicke [nm]	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$k_x$	$k_y$	$k_z$
200	1.757	1.501	1.517	0.392	0.025	0.065
400	1.763	1.505	1.598	0.377	0.026	0.08

Tabelle 4.12:

Komponenten des Vektors der komplexen Brechungszahlen für verschieden dicke Polarisatorschichten der Mischung Nr.13 bei  $\lambda = 425 \text{ nm}$ . Entnommen aus [4.18].

Da der LLCPP vor allem im Hinblick auf die Anwendung im Bildschirmbereich erforscht und optimiert wird, beziehen sich die ellipsometrischen Messungen überwiegend auf den Bereich des sichtbaren Lichtes. Für die Farbstoffmischung Nr.15 sind spektrale Verläufe der Brechzahlen  $n_x, n_y$  und der Absorptionskoeffizienten  $k_x, k_y$  bei Cobb et alii [4.19] zu finden und in Diagramm 4.21 und 4.22 dargestellt. Für den Bereich außerhalb des Sichtbaren sind lediglich für die Realteile des Brechungsindex  $n_x$  und  $n_y$  des Farbstoffes Blau Daten dokumentiert [4.21]. Die Brechungsindizes in X- und Y-Richtung liegen in den Bereichen 1.71  $n_x$  1.94 sowie 1.6  $n_y$  1.66 für das Wellenlängenintervall 1200 nm  $\lambda$  1600 nm. Während sich die einzelnen Farbmischungen der Flüssigkristallpolarisatoren bezüglich der Brechzahlkomponenten  $n_x, n_y, k_y$  nicht wesentlich unterscheiden, differieren die spektralen Verläufe beim Imaginärteil der Anteile  $k_x$  stark in Abhängigkeit von der Farbstoffmischung. Der Maximalwert beträgt  $k_x = 0.45$  der untersuchten Farbstoffmischungen rot, blau, violett und schwarz. Während für die rote Farbstoffmischung das Maximum der Absorption, also auch das Maximum von  $k_x$ , im Bereich zwischen violetterem und grünem Licht erreicht wird, liegt das Maximum für die blaue Farbmischung zwischen gelb und rot, den jeweiligen Komplementärfarben. Zu erkennen ist im Diagramm 4.22, dass bei der Mischung Nr.15, schwarz, erst ab  $\lambda = 425 \text{ nm}$ , im violetten Bereich, eine verstärkte Ab-

Diagramm 4.21:  
Spektraler Verlauf der Brechzahlen  $n_x$  und  $n_y$  für den LLCP Nr.15 bei einer Schichtdicke von 380 nm, aufgebracht im Scherverfahren. Entnommen aus [4.19].

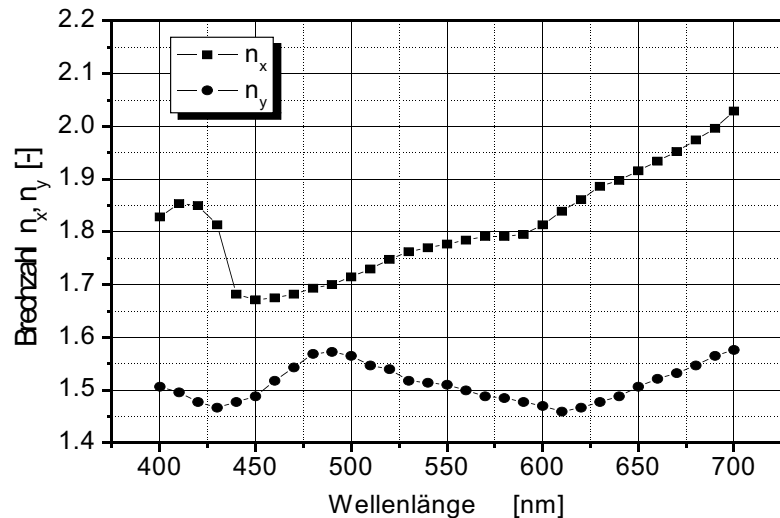
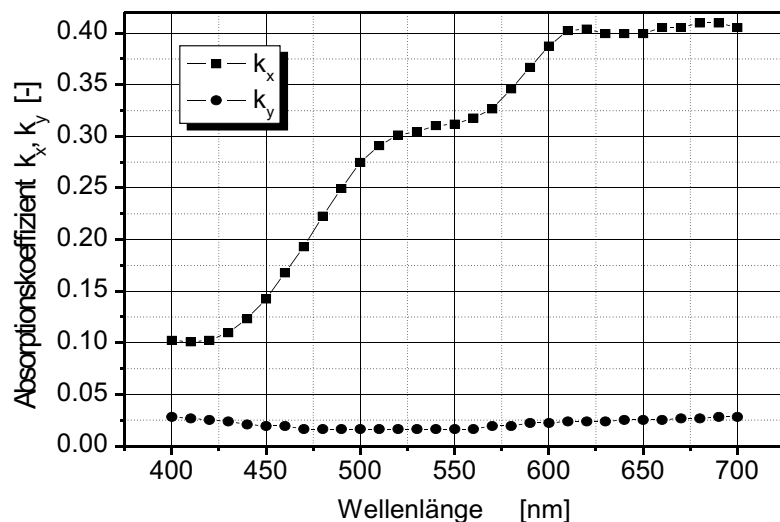


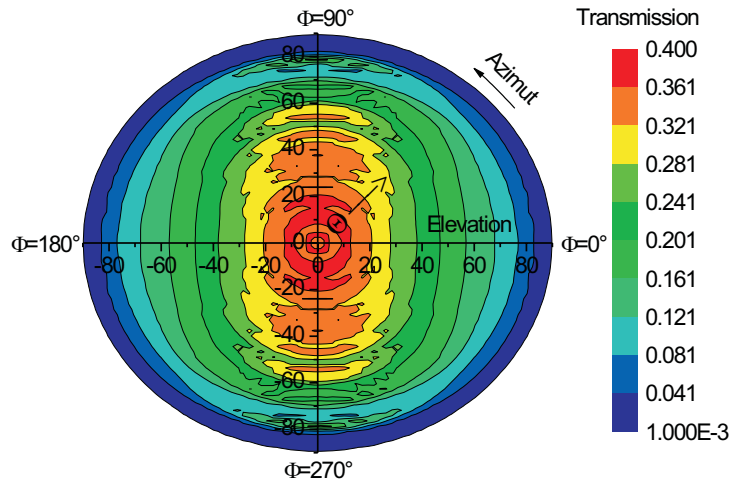
Diagramm 4.22:  
Spektraler Verlauf der Absorptionskoeffizienten  $k_x$  und  $k_y$  für den LLCP Nr.15 bei einer Schichtdicke von 380 nm, aufgebracht im Scherverfahren. Entnommen aus [4.19].



sorption in X-Richtung auftritt. Dies ist die Ursache dafür, dass vor allem in gekreuzter Anordnung zweier Polarisatoren aus der Mischung Nr.15 diese in der Durchsicht blau erscheinen. Dieser Effekt ist vor allem bei dünnen Schichten (100 nm bis 200 nm) deutlich wahrnehmbar. Um auch für diese Dicken eine gleichmäßigere spektrale Transmission zu erhalten, müsste die Mischung Nr.15 mit einem größeren Anteil blau absorbierender Farbstoffmoleküle angereichert werden. Der Verlauf von  $k_x$  im Diagramm 4.22 würde dann bei kleineren Wellenlängen nicht soweit und so stark absinken.

Auf der Grundlage des einachsigen Materialverhaltens wurden Berechnungen zur winkelabhängigen Transmission durchgeführt. Das Ergebnis ist in der bekannten Polarardarstellung im Diagramm 4.23 veranschaulicht. Herangezogen wurden die Werte  $n_x$  1,8,  $n_y$   $n_z$  1,5,  $k_x$  0,4 sowie  $k_y$   $k_z$  0,02 des LLC-Materials Nr.15 bei einer Wellenlänge von ca. 600 nm. Die Dicke der Polarisatorschicht ist mit 600 nm angesetzt. Der Graph der Transmission für eine solche Schicht ist der Darstellung der entsprechenden Messergebnisse gemäß Diagramm 4.20 qualitativ ähnlich. Lediglich die Richtung der Polarisationsachse ist bei beiden Darstellungen gegeneinander um  $90^\circ$

Diagramm 4.23:  
Berechneter Transmissionsgrad eines Spezialglassubstrates mit LLCPSchicht der Dicke 600 nm in Polardarstellung für die Wellenlänge von 600 nm. Die Polarisationsrichtung verläuft unter 90°.



verdreht. Die größere Transmission der berechneten Schicht ist der geringeren angesetzten Schichtdicke zuzuschreiben.

Grundlage der Berechnung ist der nachfolgend dargestellte Formalismus. Zunächst wird der dielektrische Tensor in Diagonalform, wie er für ein solches einachsiges System Gültigkeit hat, eingeführt:

$$\hat{\epsilon} = \begin{bmatrix} \tilde{\epsilon}_x & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{\epsilon}_y & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\epsilon}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{n}_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{n}_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{n}_z^2 \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

Er beschreibt den Zusammenhang zwischen den Brechzahlen und den Permittivitätszahlen für jede Raumrichtung. Für das absorbierende Medium des LLCPS sind die Brechzahlen komplexe Größen in folgender Form:

$$\tilde{n}_i = n_i - ik_i \quad \text{mit } i = x, y, z. \quad (4.17)$$

Während isotrope Stoffe lediglich die Amplitude und die Phase der sie durchlaufenden Strahlung modulieren, verändern anisotrope Medien auch den Polarisationszustand der Welle. Trifft eine Welle auf einen anisotropen Stoff, so bricht und absorbiert das Medium Teilstrahlen unterschiedlich in Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung. Zur Veranschaulichung des optischen Verhaltens eines einachsigen Mediums eignet sich der rotationssymmetrische Ellipsoid der Brech- und Absorptionszahlen, die Indikatrix des Mediums (Abbildung 4.11). Die Hauptachsen werden gebildet durch die beiden Elemente des Brechzahlentensors. Im Falle des LLCPS weist der Direktor  $\vec{n}$  des Ellipsoides in Richtung quer zur Aufbringung des Polarisators. Der Direktor und die X-Achse für das Schichtsystem entsprechend Abbildung 4.10 sind demnach parallel. Die Richtung der Wellenausbreitung wird durch den Wellenvektor  $\vec{k}$  gekennzeichnet. Ein Lichtstrahl, der in Richtung des Wellenvektors fortschreitet, wird, sofern dieser nicht parallel zum Direktor verläuft, in zwei senkrecht zueinander, linear polarisierte Teilstrahlen aufgespalten, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit im Medium ausbreiten. Für die jeweilige Polarisationsrichtung wirksam ist die dem E-Feldvektor parallele Komponente der Brechzahl, also entweder  $\tilde{n}_1$  oder  $\tilde{n}_2$ . Während für  $\tilde{n}_1 = \tilde{n}_y = \tilde{n}_z$  gilt, muss der Realteil von  $\tilde{n}_2$  aus der Gleichung der Schnittellipse bestimmt werden:

$$\frac{1}{n_2^2} = \frac{\cos^2 \alpha}{n_y^2} + \frac{\sin^2 \alpha}{n_x^2}. \quad (4.18)$$

Zur Beschreibung einer elektromagnetischen, monochromatischen Welle, die sich in positiver  $\vec{k}$ -Richtung fortbewegt, wird allgemein nachfolgender Formalismus herangezogen:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}). \quad (4.19)$$

Neben dem Wellenvektor  $\vec{k} = \omega/c \cdot \vec{n}$ , dessen Betrag  $k = \omega/c$  als Wellenzahl bezeichnet wird, finden sich darin der Stützvektor auf die Wellenebene  $\vec{r}$  sowie die Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 2\pi f$  wieder. Mit  $\vec{s}$  ist der Einheitsvektor in Richtung der Ausbreitung bezeichnet. Die Variable  $t$  beschreibt die Abhängigkeit der Welle von der Zeit. Wegen der einfacheren mathematischen Handhabbarkeit hat sich die komplexe Schreibweise der Wellengleichung eingebürgert.

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (4.20)$$

Hierbei repräsentiert der Realteil der elektrischen Feldstärke den physikalischen Sachverhalt einer sich bewegenden Welle. Eine entsprechende Formulierung beschreibt die sich mitbewegende magnetische Welle. Der Formalismus zur weiteren Beschreibung des Strahlungsdurchgangs in optisch homogenen, doppelbrechenden Medien soll an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden. Darstellungen finden sich bei Jones [4.22] für senkrechten Strahleinfall sowie in Erweiterung für beliebige Einfallrichtungen bei Yeh [4.23 und 4.24]. Beide Autoren verwenden zur Berechnung einen 2x2-Matrix-Ansatz, bei dem zwar Einfachreflexionen an den Grenzflächen nicht jedoch Mehrfachreflexionen Berücksichtigung finden. Aufwendiger ist die Berechnung des Strahlungsverlaufes nach der 4x4-Matrix-Methode, wie sie Berreman in [4.25 und 4.26] vorstellt. Bei diesen Verfahren werden Mehrfachreflexionen berücksichtigt.

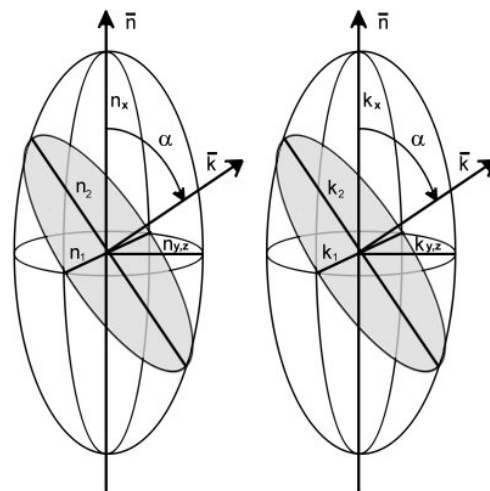


Abbildung 4.11:  
Ellipsoid der Brech- und Absorptionszahlen für einen einachsigen Stoff mit der Direktorrichtung  $\vec{n}$ .

#### 4.3.10 Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile

An dieser Stelle soll in tabellarischer Form auf die Vor- und Nachteile der beiden anwendbaren Polarisortypen eingegangen werden. Auf Grund der Verfügbarkeit und der gegenüber den Glaspolarisatoren bei derzeitigem Entwicklungsstand günstigeren

optischen Eigenschaften stellen die LLC-Polarisatoren den bevorzugten Polarisator-  
 typ für die hier betrachtete Anwendung dar. Daher wird im Folgenden nur noch auf  
 diesen Typ eingegangen, wenn es um die Charakterisierung der Eigenschaften einer  
 TN-Zelleneinheit geht.

Polarisatorotyp	Vorteile	Nachteile
Glaspolarisator	Herstellung -keine Nachteile	Herstellung -aufwendiges Herstellungsverfahren -bisher nur geringe Polarisatorbreiten verfügbar -geringe Glasdicke nach Verstrecken und damit Empfindlichkeit gegenüber äußeren mechanischen Einflüssen
	Eigenschaften -Absorptionsspektrum und damit Farb- wirkung einstellbar	Eigenschaften -große Transmission im gekreuzten Zustand -im Vergleich mit den LLCs geringerer Schalthub <sup>vis</sup> -deutliche Blickwinkelabhängigkeit des Transmissionsgrades
	Beständigkeit -sehr gute Temperatur- und UV-Beständigkeit -hohe Beständigkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung der Oberflächenschicht	Beständigkeit -keine Nachteile
LLC-Polarisator	Herstellung -einfaches Herstellungsverfahren -zelleninterne Applikation möglich	Herstellung -Reinraumbedingungen gefordert
	Eigenschaften -Absorptionsspektrum und damit Farb- wirkung einstellbar -strukturierbar beim Auftragen -Transmissionsgrad und Schalthub abhängig modifizierbar -geringe Blickwinkelabhängigkeit des Transmissionsgrades -Schalthub größer als bei Glaspolari- satoren -orientierende Eigenschaft auf TN-Flüssigkristall	Eigenschaften -große Transmission im gekreuzten Zustand
	Beständigkeit -gute Temperaturbeständigkeit -gute UV-Beständigkeit	Beständigkeit -geringe Beständigkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung

Tabelle 4.13:  
 Vergleichende Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von Polarisatoren auf  
 Glasbasis und auf der Grundlage lyotroper Flüssigkristalle.

#### 4.4 Funktionsbeschichtungen

Zu den Funktionsschichten gehören die elektrisch leitfähige Schicht zum Aufbau des  
 E-Feldes, bestehend aus dem Halbleitermaterial ITO ( $InSnO_2$ ), die Haftschrift für



den LLC-Polarisator aus  $\text{SiO}_2$  sowie die Orientierungsschicht aus Polyimid.

#### 4.4.1 Indium-Zinn-Oxidschicht

Zunächst soll der Strahlungsdurchgang bei einem elektrisch leitfähigen Material wie ITO beschrieben werden. Es wird dabei auf die Beschreibungssystematik von homogenen, isotropen, absorbierenden Stoffen zurückgegriffen [4.27 und 4.28]. Hierzu wird der bereits eingeführte Brechungsindex in der komplexen Schreibweise in der nachfolgenden Form verwendet:

$$\tilde{n} = n + ik. \quad (4.21)$$

Der imaginäre Teil  $k$  des Brechungsindex beschreibt die Absorption im Medium wohingegen der Realteil  $n$  das Brechverhalten bestimmt. Beim Durchgang einer elektromagnetischen Welle bezeichnet  $\vec{E}$  die elektrische Feldstärke einer linear polarisierten Welle zu

$$\vec{E} = E_1 e^{[i(t \frac{x\tilde{n}}{c})]}. \quad (4.22)$$

Die Ausbreitungsrichtung ist hierbei die X-Richtung.  $E_1$  bezeichnet die Amplitude der einlaufenden Welle,  $\tilde{n}$  die Winkelgeschwindigkeit,  $t$  die zeitliche Variable und  $c$  die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum. Wird  $\tilde{n}$  nach Gleichung 4.21 substituiert, so ergibt sich der Vektor der elektrischen Feldstärke zu

$$\vec{E} = E_1 e^{[i(t \frac{xn}{c})]} e^{[-(\frac{xk}{c})]}. \quad (4.23)$$

Der Realteil in der Gleichung beschreibt die Dämpfung der Amplitude des Feldvektors beim Durchgang durch das Medium und der Imaginärteil die Phase. Für dünne Schichten, deren Dicke geringer als die Kohärenzlänge des durchlaufenden Strahles ist, kann es durch Mehrfachreflexionen zu Interferenzen der Einzelstrahlen kommen. Die Ursache hierfür ist die beim Durchlaufen des Mediums ungestörte Kohärenz der Wellenpakete. Bei dicken Schichten erfolgt die Abschwächung allein durch Absorption und Streuung im Medium. Die Abschwächung dieser Charakteristik ist bereits in Kapitel 4.1.1 in Gleichung 4.9 beschrieben ohne genauer auf die Eigenschaft des Absorptionskoeffizienten  $a$  einzugehen. Die Abschwächung der Strahlungsleistung beim Durchlaufen einer dicken (Index  $dd$ ) Schicht soll an dieser Stelle definiert werden zu

$$dd = \frac{2}{1} e^{(\frac{ad}{\cos^2 \alpha})} e^{(\frac{4kd}{\cos^2 \alpha})}. \quad (4.24)$$

Für die dünne Schicht ergibt sich die Abschwächung unter Anwendung der Gleichung 4.17 aus dem Verhältnis der  $\vec{E}$ -Feldbeträge zu

$$d = \frac{E_2}{E_1} e^{(i \frac{2}{\cos^2 \alpha} nd)} e^{(\frac{2}{\cos^2 \alpha} kd)}. \quad (4.25)$$

Die Definitionen der Abschwächung sind der Literatur entnommen [4.27 und 4.28]. Zur Berechnung einer Einzelschicht oder eines Mehrschichtsystems wird für dünne Schichten Gleichung 4.25 anstelle von Gleichung 4.9 verwendet. Das Snelliussche Brechungsgesetz wird ebenfalls komplex interpretiert, so dass gilt:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2 + ik_2}{n_1}. \quad (4.26)$$

Dabei ist der Übergang vom einem homogenen, isotropen nichtabsorbierenden Medium 1 zum homogenen, isotropen absorbierenden Medium 2 beschrieben. Erfolgt der Übergang von einem zum anderen absorbierenden Stoff, so ist natürlich auch  $n_1$  durch die entsprechende komplexe Größe zu ersetzen. Mit Hilfe der bereits eingeführten Fresnel'schen Gleichungen können unter Verwendung der komplexen Brechzahlen und des komplexen Brechungswinkels  $\tilde{\theta}_2$  die Amplitudenwerte  $r_p, r_s, t_p, t_s$  für beide Oberflächenübergänge einer ITO-Schicht bestimmt werden. Die Abschwächung der Strahlung beim Durchgang durch die Schicht ist je nach dem Verhältnis von Schichtdicke zur Kohärenzlänge entweder mit Gleichung 4.24 oder 4.25 beschrieben. Die Transmissions- und Reflexionsgrade der Schichtübergänge können auch für komplexe Amplitudenwerte nach Gleichung 4.5 bis 4.8 berechnet werden. Allerdings wird hierbei das entsprechende Quadrat der Amplitudenkoeffizienten durch das Produkt des komplexen Wertes mit seinem konjugierten komplexen Wert verwendet [4.29 und 4.31]:

$$R(\theta)_{1,2} = \frac{1}{2} (r_{\parallel,1,2}^2 r_{\parallel,1,2}^* + r_{\perp,1,2}^2 r_{\perp,1,2}^*) \quad (4.27)$$

$$T(\theta)_{1,2} = \frac{n_2}{2n_1} (t_{\parallel,1,2}^2 t_{\parallel,1,2}^* + t_{\perp,1,2}^2 t_{\perp,1,2}^*) \frac{\cos \tilde{\theta}_2}{\cos \theta_1} \quad (4.28)$$

Zur Beschreibung einer Schicht mit zwei Grenzflächen und der Absorption beim Durchgang durch das Medium können die Gleichungen 4.1 und 4.2 herangezogen werden. Die Absorption jedoch wird dabei mit den Gleichungen 4.24 und 4.25 erfasst.

Voraussetzung ist die Kenntnis des spektralen Verlaufes der Werte der komplexen Brechzahlen für eine ITO-Schicht. Für unterschiedliche Verfahren der Aufbringung der Schicht auf ein Substrat sowie diverse Raumbedingungen beim Auftrag finden sich spektrale Werte der komplexen Brechzahlen in der Literatur [4.32 bis 4.35]. Speziell für aufgestäubte Schichten sind die entsprechenden Daten in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt der Gasmischung aus Argon und Sauerstoff in der Prozesskammer gegeben [4.32]. Die Herstellung der ITO-Schichten der TN-Zellen-Substrate erfolgte in einer Atmosphäre aus Argon und Sauerstoff mit einem Sauerstoffgehalt von 0.48 % Volumenanteilen. Die in [4.35] beschriebenen Schichten wurden in einer Gasmischung aus Argon und Sauerstoff mit einem variablen Sauerstoffanteil von 0.19 % bis hin zu 1.13 % hergestellt. Die entsprechenden Verläufe von  $n$  und  $k$  sind in den Diagrammen 4.24 und 4.25 gegeben. Die Kurvenwerte für das Volumenverhältnis von 0.48 % Sauerstoff im Gemisch wurden aus den gegebenen Werten der Verhältnisse von 0.19 % und 0.57 % linear interpoliert. Die Koeffizienten der Näherungspolynome der Art

$$a(\lambda) = a_0 + b \lambda^{-1} + c \lambda^{-2} + d \lambda^{-3} + e \lambda^{-4} + f \lambda^{-5} + g \lambda^{-6} + h \lambda^{-7} \quad (4.29)$$

sind in Tabelle 4.14 angegeben.

Kennwert	Koeffizient							
	$a_0$	$b [nm^{-1}]$	$c [nm^{-2}]$	$d [nm^{-3}]$	$e [nm^{-4}]$	$f [nm^{-5}]$	$g [nm^{-6}]$	$h [nm^{-7}]$
$n_{0.48\%}$	6.9935	-0.0364	1.0472E-4	-1.5437E-7	1.2216E-10	-4.2959E-14	1.1891E-17	-1.0833E-21
$k_{0.48\%}$	3.0821	-0.0251	8.3171E-5	-1.4234E-7	1.3391E-10	-6.866E-14	1.8016E-17	-1.8951E-21

Tabelle: 4.14

Koeffizienten der Näherungspolynome der Komponenten der komplexen Brechzahl.

Diagramm 4.24:  
 Spektrale Brechungsindizes für gesputterte ITO-Schichten mit variablem Sauerstoffanteil im Gemisch. Kurven für 0.19% O<sub>2</sub>, 0.57% O<sub>2</sub> sowie 1.13% O<sub>2</sub> aus [4.35]. Kurve für 0.48% O<sub>2</sub> durch lineare Interpolation zwischen den Kurven für 0.19% O<sub>2</sub> und 0.57% O<sub>2</sub> berechnet.

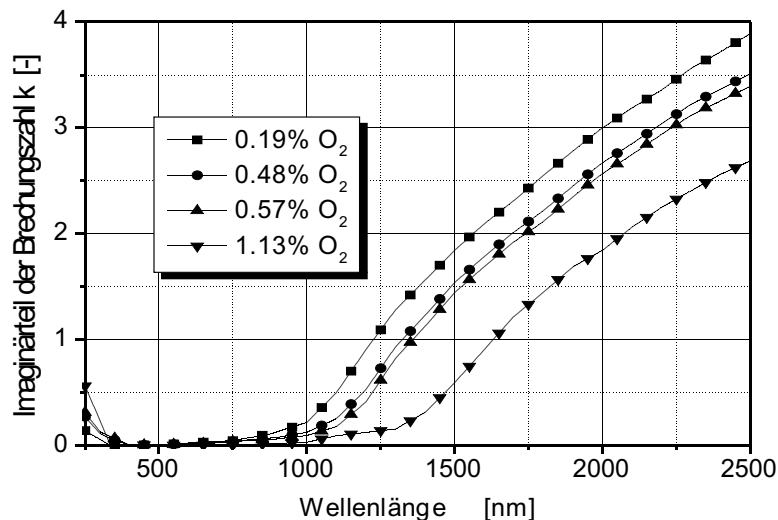
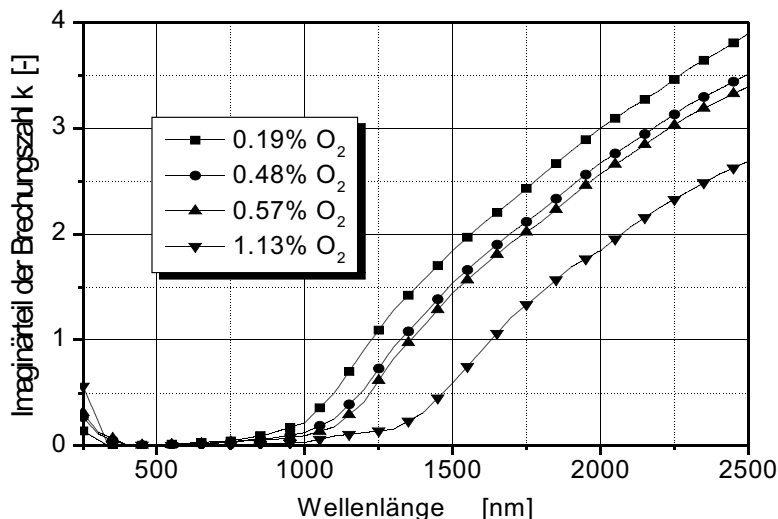


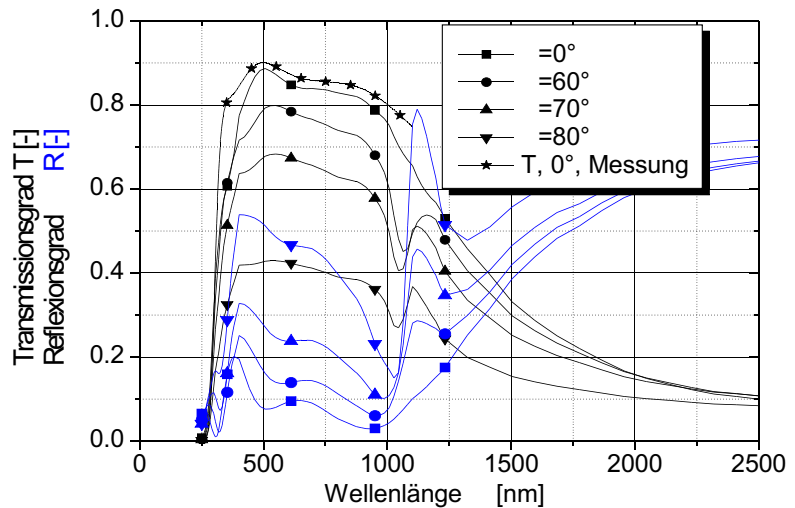
Diagramm 4.25:  
 Spektrale Absorptionskoeffizienten für gesputterte ITO-Schichten mit variablem Sauerstoffanteil im Gemisch. Kurven für 0.19% O<sub>2</sub>, 0.57% O<sub>2</sub> sowie 1.13% O<sub>2</sub> aus [4.35]. Kurve für 0.48% O<sub>2</sub> durch lineare Interpolation zwischen den Kurven für 0.19% O<sub>2</sub> und 0.57% O<sub>2</sub> berechnet.



Um für einen gegebenen Schichtaufbau aus Substrat und ITO-Schicht die optischen Kenndaten zu bestimmen, ist die Kenntnis der Schichtdicke nötig. Die Herstellung aller ITO-Schichten für den Einsatz in den TN-Zellen erfolgte mit dem gleichen Aufstäubprogramm. Daher genügt es, die Schichtdicke an einem Substratübergang zu untersuchen. Die ermittelte Dicke der Schicht liegt bei 90 nm (s. Anhang C-5). Die Schwankungen der Schichtdicke, die Standardabweichung vom Mittelwert, beträgt 154 nm.

Für eine ITO-Schicht der ermittelten Dicke auf einem Glassubstrat (Spezialweißglas, d=1.1 mm) wurden die optischen Kenndaten unter Anwendung des vorangestellten Formalismus berechnet. Die ITO-Schicht wird als dünne Schicht behandelt wobei neben der Abschwächung durch Streuung und Absorption auch der Einfluß der Phasenverschiebung und damit auch der Interferenz Eingang findet. Die berechneten Transmissions- und Reflexionswerte für die Einfallswinkel von 0 bis 80 sind im Diagramm 4.26 veranschaulicht. Für senkrechten Einfall liegt eine Referenzmessung

Diagramm 4.26:  
Spektraler Verlauf des  
Transmissions- und  
Reflexionsgrades eines ITO  
( $d = 90\text{nm}$ ) beschichteten  
Spezialweißglassubstrates  
( $d = 1.1\text{mm}$ ). Berechnet für  
 $0^\circ, 50^\circ$  bis  $90^\circ$  und ge-  
messen für  $0^\circ$ .



an einer hergestellten Probe vor. Die Übereinstimmung mit den Rechenwerten ist gut. Die maximale Abweichung im sichtbaren Spektrum beträgt 2.6 %. Gegenüber den Transmissionswerten von Weißglas bewirkt die Halbleiter-Beschichtung einen deutlichen Abfall der Lichtdurchlässigkeit bei Wellenlängen über ca. 1000 nm. Ursache hierfür ist die Zunahme der Reflexion im infraroten Spektralbereich. Die ITO-Beschichtung verursacht keine wesentliche Veränderung der Abhängigkeit der Transmission vom Einfallswinkel gegenüber unbeschichtetem Weißglas im sichtbaren Spektrum.

#### 4.4.2 Silizium-Dioxid-Schicht

Float- und Weißglas bestehen zum größten Teil aus Silizium-Dioxid. Die Kenndaten sind daher denen der bereits beschriebenen Glassorten ähnlich, wobei die Absorption vor allem im sichtbaren Spektrum gering ist. Der komplexe Brechungsindex für das isotrope  $\text{SiO}_2$  ist in den Diagrammen 4.27 und 4.28 über der Wellenlänge aufgetragen. Die Werte sind der Literatur entnommen [4.36]. Zur Berechnung der Spektraldaten wird wiederum eine Näherung für die Komponenten des komplexen Brechungsindex verwendet. Die Funktionen sind nachfolgend angegeben. Der Imaginärteil der Brechzahl kann mittels dreier abschnittsweise definierter Funktionen beschrieben werden:

$$k_1(\lambda) = 8.95 \cdot 10^{-3} - 8.3703 \cdot 10^{-1} e^{-0.5 \left( \frac{91.74721 \text{ nm}}{30.43476 \text{ nm}} \right)^2} \quad \text{für } 10 \text{ nm} \quad 204.5 \text{ nm} \quad (4.30)$$

$$k_2(\lambda) = 5.9048 \cdot 10^{-8} - 2.343 \cdot 10^{-2} e^{-\left( \frac{\lambda}{35.12621 \text{ nm}} \right)^2} \quad \text{für } 204.5 \text{ nm} \quad 463 \text{ nm} \quad (4.31)$$

$$k_3(\lambda) = 1.48919 \cdot 10^{-7} - 3.1418 \text{ nm}^{-1} \cdot 10^{10} - 2.76894 \text{ nm}^{-2} \cdot 10^{13} - 8.164099 \text{ nm}^{-3} \cdot 10^{17} \quad \text{für } 463 \text{ nm} \quad 3000 \text{ nm}. \quad (4.32)$$

Der Realteil lässt sich beschreiben mit

$$n(\lambda) = 3461.0927 - 0.932229e^{-\frac{83.8999}{\lambda}} + 3462.5598e^{-\frac{2.131696}{\lambda} \cdot 10^8} \quad (4.33)$$

Die  $\text{SiO}_2$ -Lage wird als isotrope, homogene und absorbierende Schicht betrachtet. Sie kann mit dem bereits für ITO vorgestellten Formalismus erfasst werden.

Die Schichtdicke der aufgestäubten  $\text{SiO}_2$ -Schicht wurde bestimmt zu 210 nm bei einer Standardabweichung vom Mittelwert von 159 nm.

Für eine entsprechende Schicht aus Silizium-Dioxid auf einem Glassubstrat (Spezialweißglas,  $d=1.1\text{mm}$ ) können die Spektralwerte für die Transmission und für die Reflexion dem Diagramm 4.29 entnommen werden. Wie zu erwarten ist, zeigen sich nur geringe Differenzen zum Verhalten einer Weißglasscheibe gleicher Gesamtdicke. Lediglich durch die Interferenz wird eine geringe Welligkeit in den Funktionsverläufen verursacht. Die Einfallswinkelabhängigkeit der Transmission wird gegenüber den Werten des Substrates aus Weißglas nicht verändert.

Diagramm 4.27:  
Realteil des spektralen Brechungsindex für eine aufgestäubte  $\text{SiO}_2$ -Schicht. Entnommen aus [4.36].

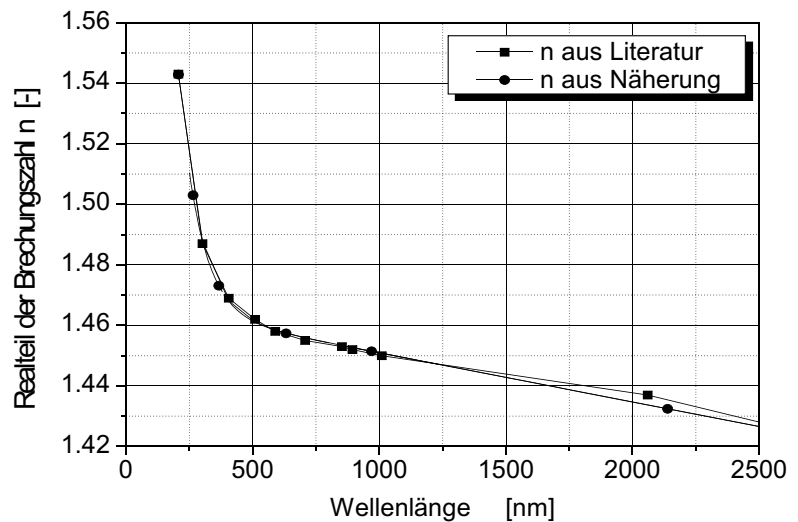


Diagramm 4.28:  
Imaginärteil des spektralen Brechungsindex für eine aufgestäubte  $\text{SiO}_2$ -Schicht. Entnommen aus [4.36].

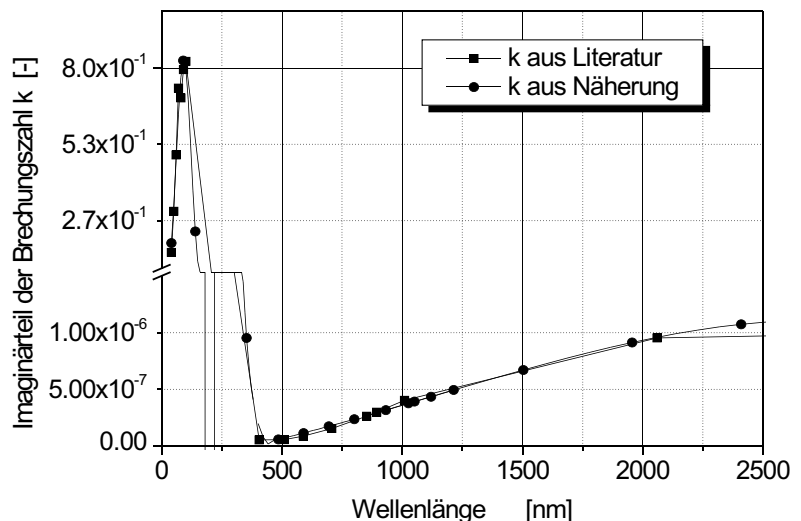
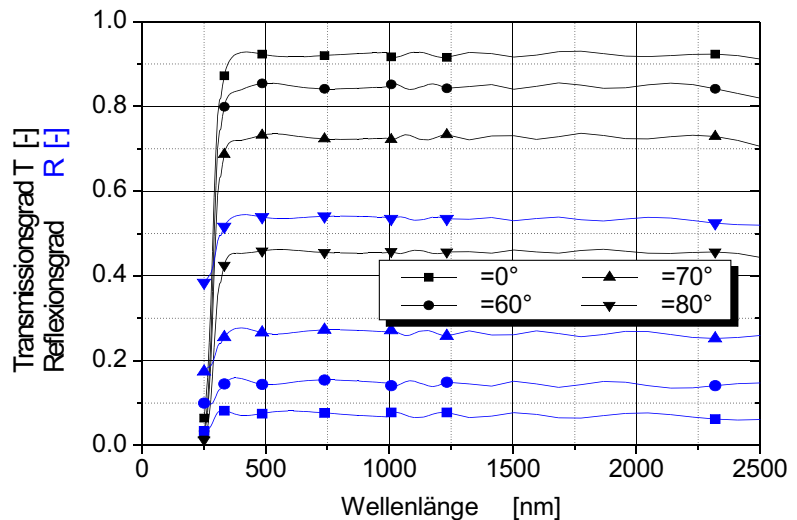


Diagramm 4.29:  
Spektraler Verlauf des  
Transmissions- und  
Reflexionsgrades eines  $\text{SiO}_2$   
( $d = 210 \text{ nm}$ ) beschichteten  
Spezialweißglassubstrates  
( $d = 1.1 \text{ mm}$ ). Berechnet für  
 $0^\circ, 60^\circ$  bis  $80^\circ$ .



#### 4.4.3 Orientierungsschicht aus Polyimid

Für den verwendeten Polyimid (s. Anhang E-d) sind die spektral aufgelösten Daten des komplexen Brechungsindex nicht verfügbar. Daher wird zur Berechnung der optischen Eigenschaften auf die Werte eines in seiner Zusammensetzung sehr ähnlichen PI's (s. Anhang E-e) zurückgegriffen [4.38]. Die Verläufe der Komponenten des komplexen Brechungsindex sind im Diagrammen 4.30 dargestellt. Die Näherungsfunktionen für beide Kurven sind nachfolgend angegeben. Für den Imaginärteil ist wiederum eine abschnittsweise Definition günstig:

$$n(\lambda) = 1.52014 - 451639e^{-\frac{\lambda}{33.797 \text{ nm}}} + 0.3004e^{-\frac{\lambda}{203.9 \text{ nm}}} \quad (4.34)$$

$$k_1(\lambda) = 6.6105 \cdot 10^{-4} + 11311568 \cdot 10^{10} e^{-\frac{\lambda}{11.4473 \text{ nm}}} \quad \text{für } 250 \text{ nm} \leq \lambda < 353.5 \text{ nm} \quad (4.35)$$

$$k_2(\lambda) = 3.58844 \cdot 10^{-1} + 2.37801 \text{ nm}^{-1} \cdot 10^3 \cdot \lambda + 5.125277 \text{ nm}^{-2} \cdot 10^6 \cdot \lambda^2 + 3.61708 \text{ nm}^{-3} \cdot 10^9 \cdot \lambda^3 \quad \text{für } 353.5 \text{ nm} \leq \lambda < 502.5 \text{ nm} \quad (4.36)$$

$$k_3(\lambda) = 9.87365 \cdot 10^{-4} + 16811 \text{ nm}^{-7} \cdot \lambda^7 \quad \text{für } 502.5 \text{ nm} \leq \lambda < 2500 \text{ nm}. \quad (4.37)$$

Das Material wird als isotrop, homogen und absorbierend behandelt. Es zeigt sich, dass die Absorption im PI bei der gegebenen Schichtdicke von 60 nm sehr gering ausfällt und nur unwesentlich über den Werten des Glassubstrates selbst liegt. Auf die Darstellung des Grafen wird daher verzichtet. Die entsprechenden spektralen Verläufe der Transmissions- und Reflexionsgrade sind im Diagrammen 4.31 für diverse Einfallswinkel visualisiert.

Für den in der Arbeit verwendeten PI wird eine Dauergebrauchstemperatur bis  $260^\circ\text{C}$  angegeben [4.39].



Diagramm 4.30:  
 Realteil- und Imaginärteil  
 des spektralen Brechungsindex für eine aufgeschleuderte PI-Schicht.  
 Entnommen aus [4.38].

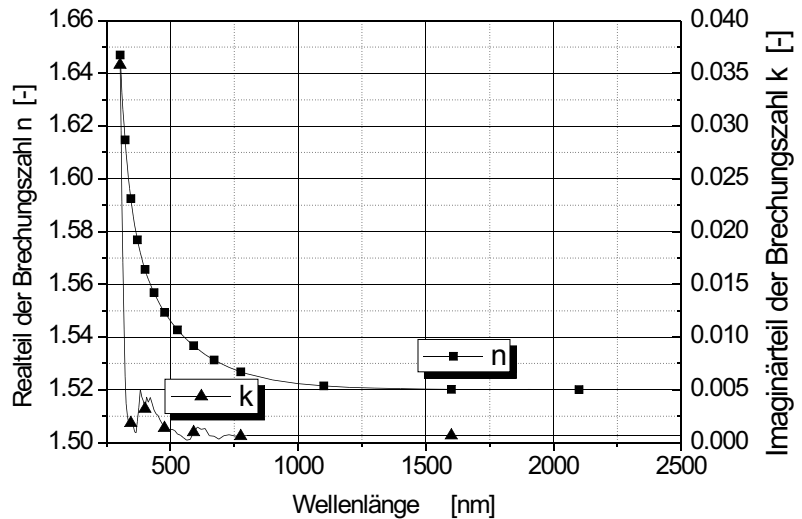
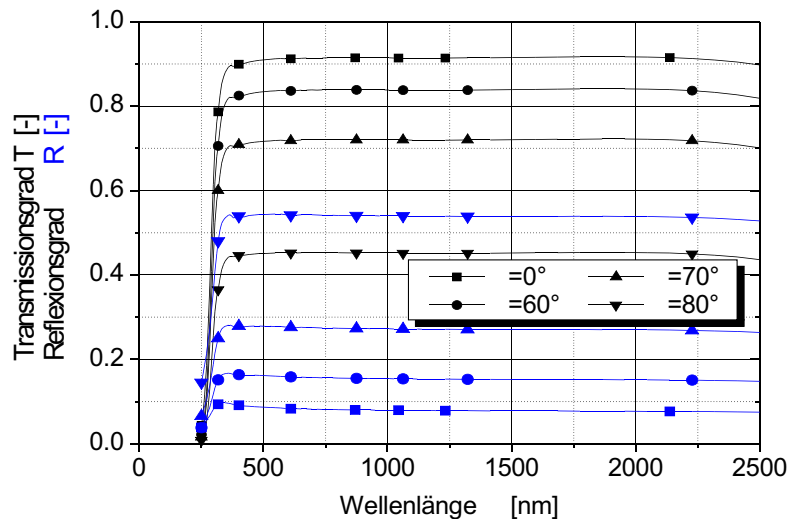


Diagramm 4.31:  
 Spektraler Verlauf des  
 Transmissions- und  
 Reflexionsgrades eines PI  
 ( $d = 90 \text{ nm}$ ) beschichteten  
 Spezialweißglassubstrates  
 ( $d = 1.1 \text{ mm}$ ). Berechnet für  
 $0^\circ, 60^\circ$  bis  $80^\circ$ .



#### 4.5 Flüssigkristall

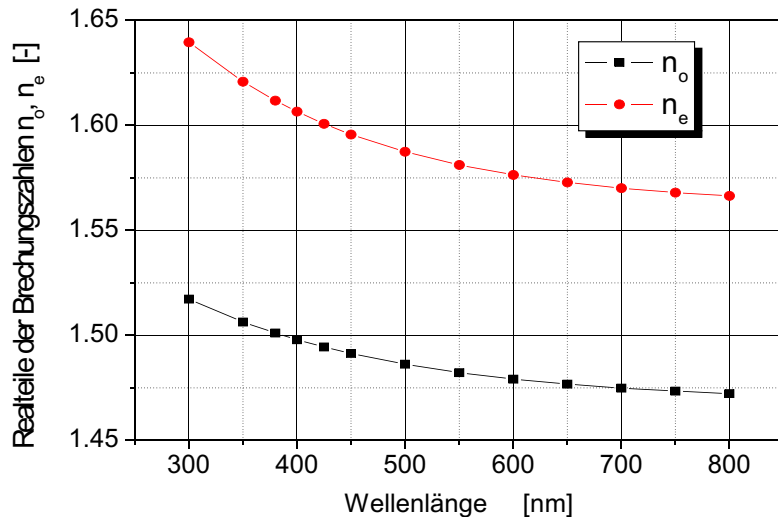
Der Flüssigkristall in der TN-Zelle verhält sich wie ein monoaxialer Werkstoff. Die Realteile des Brechungsindex für den ordentlichen Strahl  $n_o$ , sowie für den außerordentlichen Strahl  $n_e$ , weisen eine gewisse Dispersion im sichtbaren Spektrum auf. Diagramm 4.32 zeigt den Verlauf der Brechzahlen bei der Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  (s. Anhang D-a). Die entsprechenden Koeffizienten der empirisch ermittelten Näherungsfunktion für beide Brechzahlkomponenten finden sich in der Tabelle 4.15.

$$n_i(\lambda) = n_{i,0} - a \cdot e^{-b/\lambda} \quad \text{Mit } i = o, e \quad (4.38)$$

Brechzahlkomponente	Koeffizienten		
	$n_{i,0}$ [-]	$a$ [-]	$b$ [nm]
$n_o$	1.468	0.21958	199.7962
$n_e$	1.561	0.40694	181.7319

Tabelle 4.15:  
 Koeffizienten der Näherungsfunktionen für die Realteile der Brechzahlen d. ZLI-4792.

Diagramm 4.32:  
Dispersion der Realteile  
der Brechzahl des  
ZLI-4792 bei  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  
Quelle siehe Anhang D-a.



Auf Grund der sehr geringen Absorption werden üblicherweise bei der Berechnung der optischen Eigenschaften des verwendeten Nematens die Imaginärteile der Brechzahlen zu null gesetzt (diese sind i. A. auch beim Hersteller nicht verfügbar). Der Flüssigkristall wird als nicht absorbierender Werkstoff behandelt. Als solcher zeigt er wegen der zu Glas ähnlichen Brechzahlen auch ähnliche optische Kennzahlen. Die spektrale Transmission und die spektrale Reflexion schwanken auf Grund der geringen Dispersion nur gering im sichtbaren Wellenlängenbereich. Es gilt dabei  $T_n = 0.91$  sowie  $R_n = 0.085$  (Flüssigkristall in Luft).

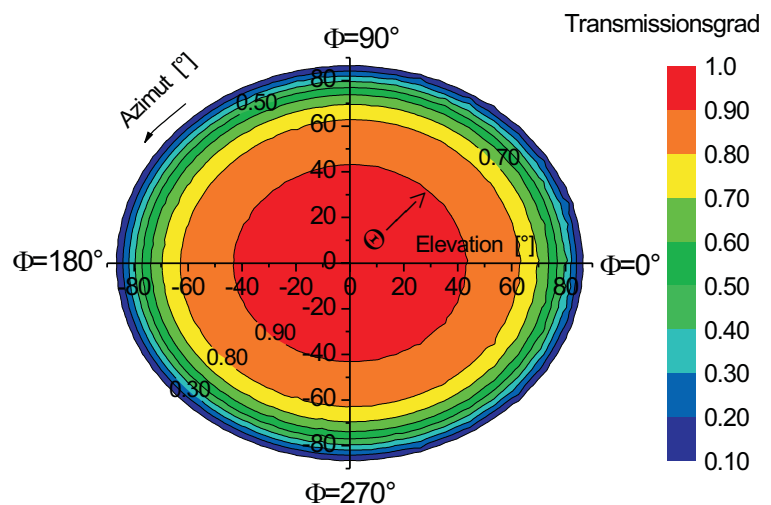
Lediglich für den geschalteten Zustand des Nematens und dann auch nur für den senkrechten Strahlungseinfall lassen sich die optischen Kennwerte aus den bereits bekannten Fresnelschen Gleichungen bestimmen. Für den senkrechten Einfall der Strahlung auf den geschalteten Flüssigkristall ist für beide Polarisationsrichtungen parallel und senkrecht,  $n = n_o$  zur Bestimmung der Fresnelschen Koeffizienten zu verwenden. Im ungeschalteten Zustand sind für die parallele und die senkrechte Polarisationsrichtung der einfallenden Welle beide Brechzahlen aktiv. Da sich die Richtung der Direktoren in der Flüssigkristallschicht um  $90^\circ$  ändert, wird üblicherweise zur Beschreibung der Eigenschaft der Füllung ein Schichtenmodell angewandt, bei der jede Schicht als optisch monoaxial betrachtet wird. Der Direktor jeder folgenden Schicht wird als um einen definierten Winkel gegenüber dem Direktor der vorangegangenen Schicht verdreht betrachtet. Bei genügender Anzahl von solchen Schichten kann die Eigenschaft der Füllung hinreichend genau bestimmt werden. Für beliebige Einfallswinkel und beliebige Schaltzustände lassen sich die optischen Kennwerte nicht mehr ohne großen numerischen Aufwand bestimmen. Daher wird zur Charakterisierung der Flüssigkristallschicht auf entsprechende Software zurückgegriffen [4.40].

Für die Berechnungen wird ein Tilt-Winkel von  $2^\circ$  angesetzt (übliche Werte sind  $1$  bis  $4.5$ ). Er bezeichnet die Abweichung der Direktorachse aus der Begrenzungsebene. Als Verdrehwinkel wird  $90^\circ$  verwendet. Dies entspricht der Drehung der Direktoren von der oberen zur unteren Grenzfläche in der TN-Zelle. Für die Bestimmung der blickwinkelabhängigen optischen Kennwerte wird eine Flüssigkristallschicht des Nematens ZLI-4792 der Dicke von  $10\text{ }\mu\text{m}$  ohne umfassende Gläser angesetzt. Ein entsprechendes Polardiagramm 4.33 zur Darstellung der Transmission ist nachfolgend gegeben. Da zwischen den beiden Ansteuerungszuständen mit  $U=0$  so-

wie  $U \gg U_{th}$  nur geringfügige Unterschiede im Polardiagramm zu erkennen sind, soll die Darstellung des geschalteten Zustandes genügen. Die Ähnlichkeit ist eine Folge der Tatsache, dass der Flüssigkristall als nichtabsorbierend angenommen wird. So kommt es beim Durchlaufen der Strahlung zwar zu einer Änderung der Polarisationsrichtung der Strahlung, aber nur in geringem Maße zu einer Änderung der Transmission als Folge der Änderung der wirksamen Brechzahlen gegenüber dem umgebenden Medium (Luft) bei den beiden Grundzuständen.

Zur Berechnung stehen zwei Methoden bei der Verwendung der erwähnten Software zur Verfügung. Dies ist zum einen die 2x2-Matrix-Methode, auch als modifizierte Jones-Matrix-Methode bezeichnet, sowie zum anderen die 4x4-Matrix-Methode. Bei den Methoden eigen ist die Beschreibung einer jeden Schicht eines Mehrschichtsystems in Form einer Matrix. Das gesamte System wird charakterisiert durch eine Matrix, die als Produktmatrix der Einzelmatrizen jeder Schichtlage bestimmt wird. Im Gegensatz zur 2x2-Matrix-Methode wird beim 4x4-Verfahren der Einfluss der Mehrfachreflexionen an jeder Schichtgrenze und damit verbunden die Wirkung entsprechender Interferenzen erfasst. In der Praxis wirken jedoch Schwankungen der Dicken der diversen Schichten der TN-Zelle der Ausbildung ausgeprägter Interferenzwirkungen entgegen. Daher kommt die 2x2-Matrix-Methode zur Bestimmung der Transmission am Flüssigkristall zur Anwendung. Die Berechnungen beziehen sich auf eine Wellenlänge von 600 nm. Die Kenndaten für den Flüssigkristall entstammen Anhang B.

Diagramm 4.33:  
Berechnete Transmission durch den ZLI-4792 für  $U \gg U_{th}$ . Flüssigkristall der Dicke 10  $\mu\text{m}$  in Luft. Berechnet mit 2x2-Matrix-Methode.



## 5 Adaptive Eigenschaften einer LLC-P-TN-Zelle als Einheit

Nachdem auf alle Einzelkomponenten der TN-Zellen eingegangen wurde, soll nachfolgend die Zelle als Funktionseinheit mit ihren optischen Eigenschaften im Besonderen und den sonstigen relevanten physikalischen Eigenschaften erläutert werden. TN-Zellen mit verschiedenen Aufbauten und deren Komponenten sind Gegenstand der Untersuchungen in diesem und den nachfolgenden Kapiteln. In der folgenden Tabelle 5.1 ist eine Übersicht aller Proben der Funktionseinheiten gegeben.

Probenbezeichnung	Proben	Zweck der Proben
ZP (Zellen-Proben)	ZP-1, ZP-2, ZP-3, ZP-4, ZP-V	Zellen-Proben zur Berechnung der optischen Eigenschaften der verschiedenen Aufbauten einer TN-Zelle mit LLC-P
VI (verschlossenes Isolierglas)	VI-1 bis VI-8, VI-R1, VI-R2	Proben in verschlossenem Isolierglas für die Freilandaussetzung
WI (wiederverschließbares Isolierglas)	WI-1 bis WI-27	Proben in wiederverschließbarem Isolierglas für die Freilandaussetzung
SO (Sonnensimulator)	SO-1 bis SO-4, SO-R	Proben zur Vermessung unter dem Sonnensimulator
AF (Alterung, Freiland)	AF-1 bis AF-4	Proben zur Bestimmung des Alterungsverhaltens im Freiland
AT (Alterung, Temperatur)	AT-1 bis AT-8	Proben zur Bestimmung des Alterungsverhaltens unter Temperatureinfluss von 85°C im Klimaschrank
PA (praktische Anwendung)	PA-1 bis PA-4	Proben für die praktische Anwendung

Tabelle 5.1:  
Übersicht der Proben

## 5.1 Strahlungstransmissions-Eigenschaften

### 5.1.1 TN-Zellen mit internem LLCP und PI-Orientierungsschicht

Die Kenndaten der Transmission, Reflexion und auch der Absorption für eine TN-Zelle mit internem LLCP (Nr. 15) sind größtenteils rechnerisch mit dem Programmsystem DIMOS ermittelt worden [4.40]. Verwendung fanden bei den Berechnungen die Materialkenndaten der einzelnen Schichten, wie sie in Kapitel 4 dargestellt sind. Insbesondere für die LLCP-Schicht entstammen die Werte aus den Diagrammen 4.21 sowie 4.22 der Mischung Nr.15. Der nematische Flüssigkristall und die LLCP-Schicht werden als monoaxiale, homogene, optische Stoffe behandelt. Zunächst soll für einen Zellaufbau einer LLCP-TN-Zelle nach Tabelle 5.2 für die Wellenlänge 600 nm die Abhängigkeit der Transmission im ungeschalteten und geschalteten Zustand von der Schichtdicke des LLCP bei senkrechtem Strahleinfall untersucht werden.

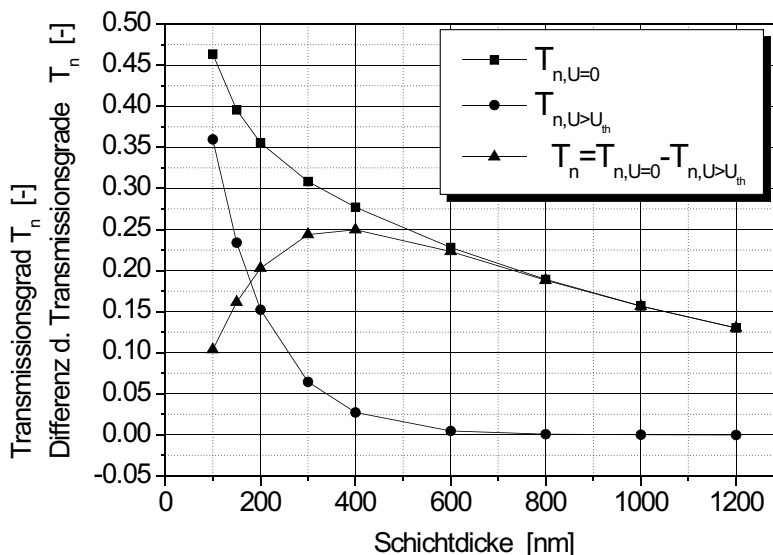
Variante	Zellaufbau	Polarisator typ, -dicke
ZP-1	Spezialweißglas-Substrat (d=1.1 mm), ITO, SiO <sub>2</sub> , LLCP, PI, Flüssigkristall mit Spacer 10 µm, - symmetrisch.	Interner LLCP-Nr. 15, d 100 nm
ZP-2	dito	Interner LLCP-Nr. 15, d 200 nm
ZP-3	dito	Interner LLCP-Nr. 15, d 300 nm
ZP-4	dito	Interner LLCP-Nr. 15, d 400 nm
ZP-V (Vergleichszelle)	Spezialweißglas-Substrat (d=1.1 mm), ITO, PI, Flüssigkristall mit Spacer 10 µm, - symmetrisch.	Externe ideale Polarisatoren

Tabelle 5.2:

Untersuchte TN-Zellen Varianten. Vorausgesetzt wird für alle Proben der Aufbau als "normally white"-TN-Zelle.

Die Schichtdickenabhängigkeiten der Komponenten des komplexen Brechungsindex sind hierbei entsprechend der Erläuterungen in Kapitel 4 vernachlässigt. In Diagramm 5.1 ist dargestellt, dass bei einer Schichtdicke von ca. 400 nm der größte Schalthub mit  $T_n$  24.5 % zu erzielen ist. Die Transmission im ungeschalteten Modus beträgt 27.7 %. Wird die LLCP-Schicht dünner ausgeführt, so steigt zwar die Transmission im ungeschalteten Zustand, jedoch sinkt der Schalthub. Für eine 100 nm dicke Schicht beträgt die Transmission (U=0) 46.3% bei einem Hub von  $T_n$  10.4 %. Übliche Sonnenschutzverglasungen weisen Lichttransmissionen auf, die je nach Verglasungstyp im Bereich zwischen  $T_{n,VIS}$  15 % und  $T_{n,VIS}$  67 % liegen [1.5 und 5.1].

Diagramm 5.1:  
 Transmissionsgrad  $T_n$  und  
 Schalthub (berechnet mit  
 der Jones-Matrix-Methode)  
 einer LLCP-TN-Zelle bei  
 senkrechtem Lichteinfall in  
 Abhängigkeit von der  
 LLCP-Schichtdicke bei der  
 Wellenlänge von 600 nm.



Interessant für den Einsatz als regelbare Sonnenschutzverglasung erscheinen TN-Zellen-Systeme mit einer LLCP-Schichtdicke bis etwa 400 nm. Bei Schichtdicken über diesen Wert hinaus nimmt die Helltransmission zu stark ab. Vier Schichtdicken zwischen 100 nm und 400 nm werden nachfolgend genauer untersucht. Der Schichtaufbau der untersuchten Zelltypen sowie die Bezeichnungssystematik ist der Tabelle 5.2 zu entnehmen. Vergleichend sind ebenfalls die Kenndaten einer TN-Zelle mit externem, idealem Folienpolarisator aufgeführt. Der ideale Polarisator ist dadurch gekennzeichnet, dass seine spektrale Transmission nahezu konstant ist und er, abgesehen von den Reflexionsverlusten, vollständig linear polarisiertes Licht liefert. Die Werte der Transmission für diese fünf TN-Zellensysteme sind für zwölf Wellenlängen bei einem Strahleneinfall aus der gesamten Hemisphäre berechnet worden. Für den senkrechten Einfall sind die Graphen in den Diagrammen 5.2 bis 5.6 dargestellt.

Auffällig ist bei allen LLCP-Zellen die große Dunkeltransmission im Bereich der Wellenlängen unterhalb von 500 nm. Dies ist eine Folge der geringen Schichtdicken und der Tatsache, dass die Mischung Nr.15 in diesem Bereich eine geringe Absorption

Diagramm 5.2:  
 Transmissions-, Reflexions-  
 und Absorptionsgrad (be-  
 rechnet mit der 4x4-Ma-  
 trix-Methode) der Zelle ZP-1  
 bei senkrechtem Lichteinfall.  
 LLCP-Schichtdicke 100 nm.  
 $U = 0, U = U_{th}$ .

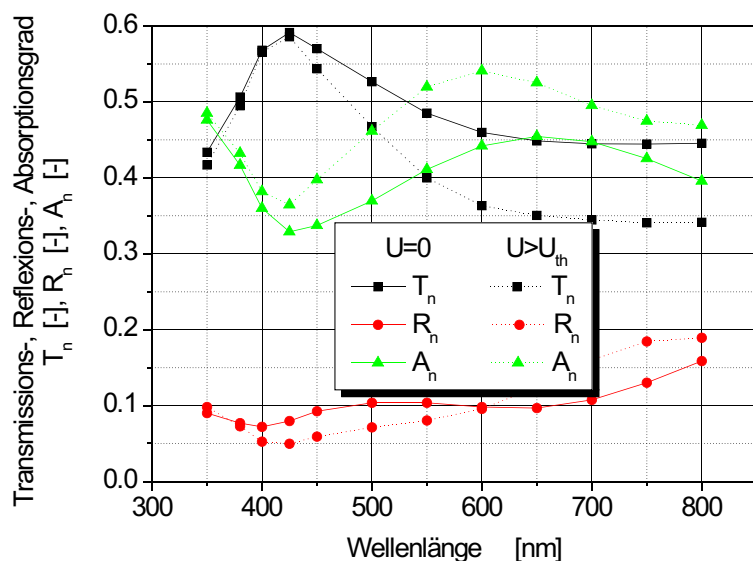




Diagramm 5.3:  
 Transmissions-, Reflexions-  
 und Absorptionsgrad (berech-  
 net mit der 4x4-Matrix-Metho-  
 de) der Zelle ZP-2 bei senk-  
 rechtem Lichteinfall.  
 LLCP-Schichtdicke 200 nm.  
 $U = 0, U = U_{th}$ .

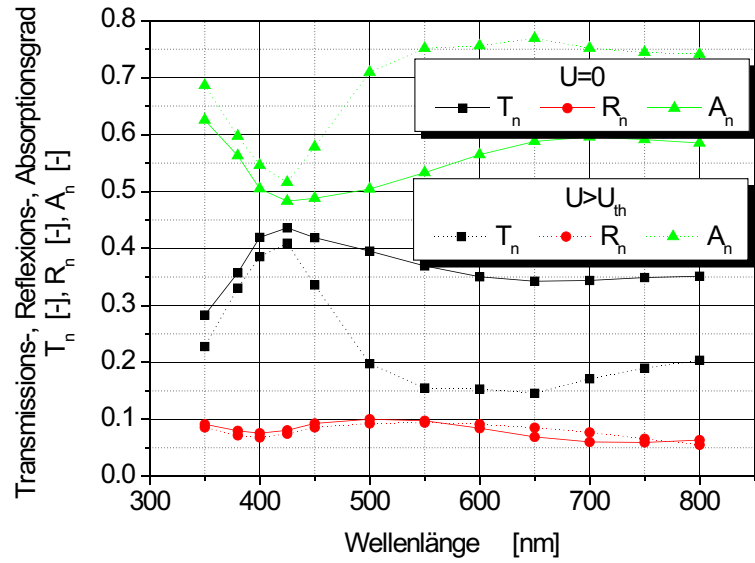


Diagramm 5.4:  
 Transmissions-, Reflexions-  
 und Absorptionsgrad (berech-  
 net mit der 4x4-Matrix-Metho-  
 de) der Zelle ZP-3 bei senk-  
 rechtem Lichteinfall.  
 LLCP-Schichtdicke 300 nm.  
 $U = 0, U = U_{th}$ .

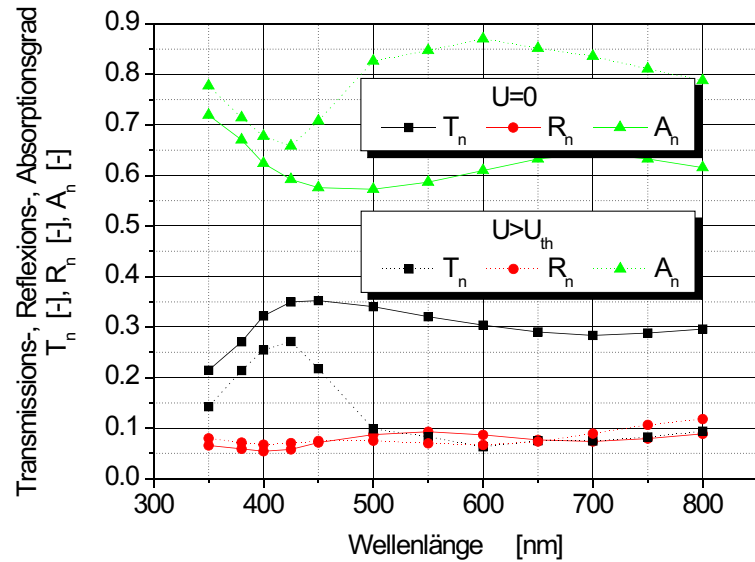


Diagramm 5.5:  
 Transmissions-, Reflexions-  
 und Absorptionsgrad (berech-  
 net mit der 4x4-Matrix-Metho-  
 de) der Zelle ZP-4 bei senk-  
 rechtem Lichteinfall.  
 LLCP-Schichtdicke 400 nm.  
 $U = 0, U = U_{th}$ .

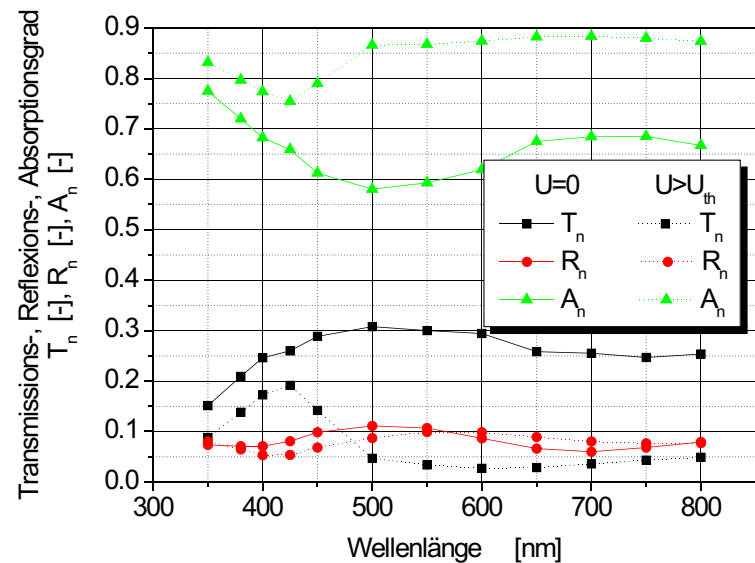
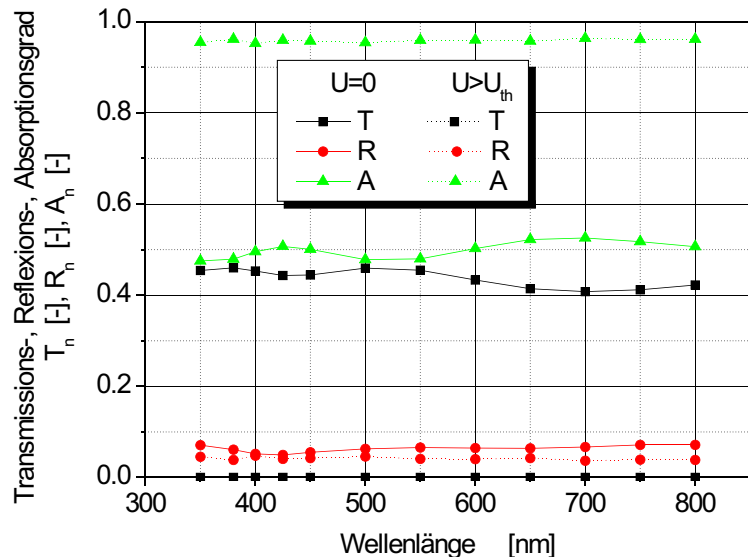


Diagramm 5.6:  
 Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad (berechnet mit der 4x4-Matrix-Methode) der TN-Zelle mit idealem Polarisator ZP-V bei senkrechtem Lichteinfall.  
 $U = 0, U = U_{th}$ .



wegen kleiner  $k_x$ -Werte zeigt. Untersuchungen zur Verringerung der Dunkeltransmission durch Veränderung der LLC-P-Mischung folgen in Kapitel 5.1.3.

Wesentlichen Einfluß auf die Effektivität einer Sonnenschutzverglasung hat das optische Verhalten derselben bei Einfallswinkel aus der gesamten Hemisphäre. Für die Bestimmung der winkelabhängigen Kenndaten der Transmission, der Reflexion sowie der Absorption wurde die Schrittweite für den Einfallswinkel zur Flächennormalen der TN-Zelle, den Elevationswinkel, zu  $1^\circ$  gewählt. In Azimutrichtung genügt eine Schrittweite von  $5^\circ$ . Die winkelabhängige Transmission in Polardarstellung für die Zelle mit der dünnsten sowie der dicksten LLC-P-Schicht ist für  $600 \text{ nm}$  nachfolgend gegeben in den Graphen 5.7 bis 5.10. Die Zellen sind dargestellt im spannungslosen sowie im geschalteten Zustand. Für die Vergleichszelle findet sich die graphische Darstellung in den Diagrammen 5.11 sowie 5.12. Gegenüber beispielsweise einer Doppelscheibenanordnung, wie sie im Diagramm 4.7 dargestellt ist, zeigt sich bei den untersuchten TN-Zellen im spannungslosen Zustand eine deutlichere Winkelabhängigkeit vom Elevationswinkel. Je dicker die LLC-P-Schicht aufgetragen ist, desto stärker fällt die Transmission bei größeren Elevationswinkel ab. Im

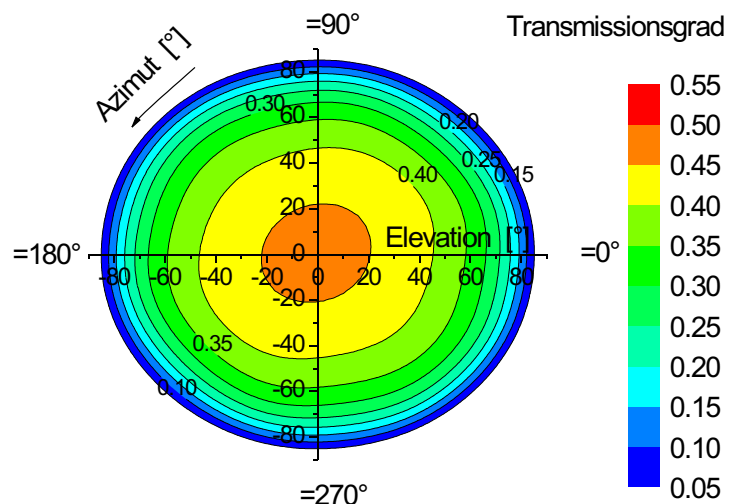


Diagramm 5.7:  
 Polarendiagramm zur winkelabhängigen Transmission (berechnet mit der Jones-Matrix-Methode) der Zelle ZP-1 bei  $U=0$  und  $600 \text{ nm}$ .

Diagramm 5.8:  
 Polarendiagramm zur winkelabhängigen Transmission (berechnet mit der Jones-Matrix-Methode) der Zelle ZP-1 bei  $U = U_{th}$  und  $600 \text{ nm}$ .

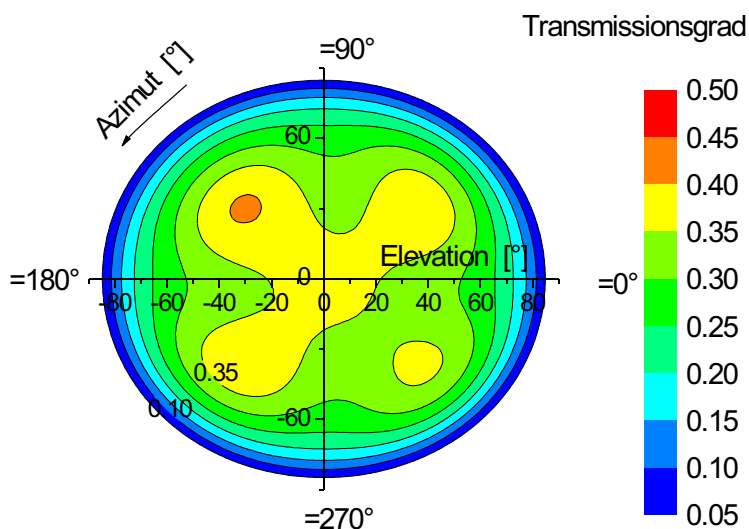


Diagramm 5.9:  
 Polarendiagramm zur winkelabhängigen Transmission (berechnet mit der Jones-Matrix-Methode) der Zelle ZP-4 bei  $U=0$  und  $600 \text{ nm}$ .

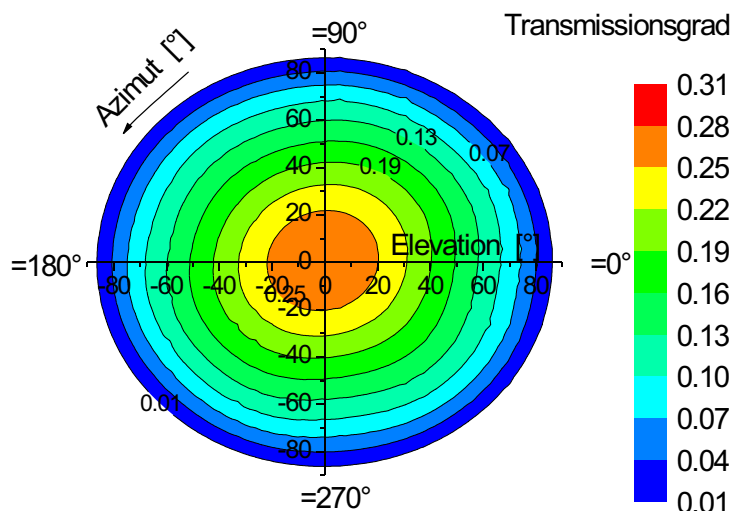


Diagramm 5.10:  
 Polarendiagramm zur winkelabhängigen Transmission (berechnet mit der Jones-Matrix-Methode) der Zelle ZP-4 bei  $U = U_{th}$  und  $600 \text{ nm}$ .

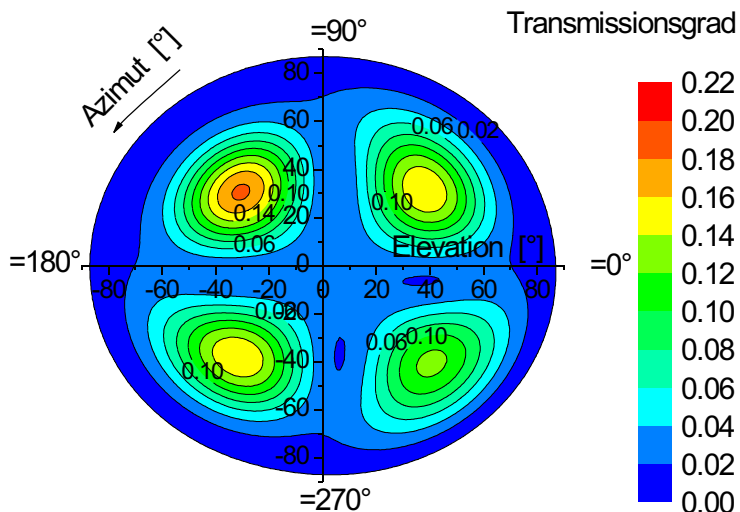


Diagramm 5.11:  
Polarendiagramm zur winkel-  
abhängigen Transmission (be-  
rechnet mit der Jones-Ma-  
trix-Methode) der Vergleichs-  
zelle ZP-V bei  $U=0$  und  
 $600\text{ nm}$ .

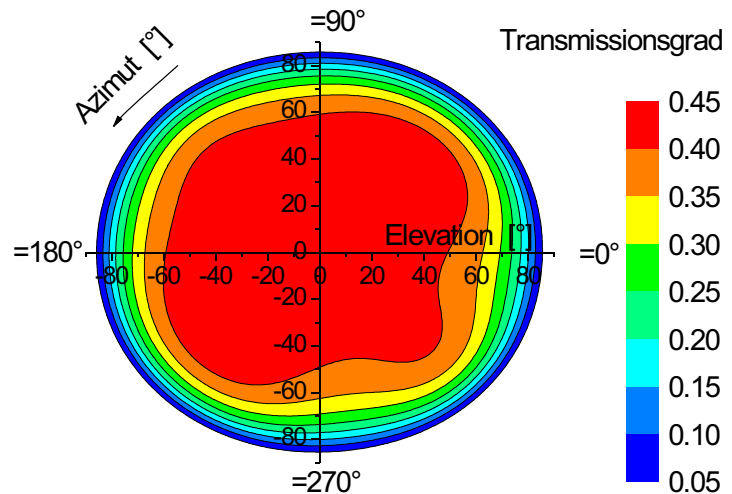
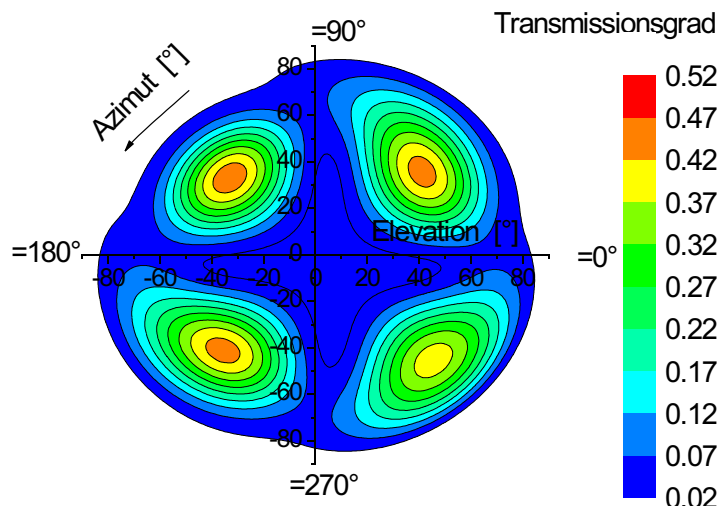


Diagramm 5.12:  
Polarendiagramm zur winkel-  
abhängigen Transmission (be-  
rechnet mit der Jones-Ma-  
trix-Methode) der Vergleichs-  
zelle ZP-V bei  $U = U_{th}$  und  
 $600\text{ nm}$ .



angesteuerten Zustand fallen die Transmissionsspitzen im Bereich der Winkelhalbierenden der Graphen auf. Diese Erscheinung ist typisch für Flüssigkristallzellen. Die Ursache hierfür ist die unterschiedliche Absorption in den Polarisatorschichten in Abhängigkeit von der Schwingungsrichtung des E-Feld-Vektors, gekennzeichnet durch die unterschiedlichen Werte der Imaginärteile der Brechzahlkomponenten  $k_x$ ,  $k_y$ . Der Einfluß ist im angesteuerten Zustand ausgeprägter als im Hellzustand der Zelle. Wegen der zwei absorbierenden Richtungen X und Z bei den LLC-Polarisatoren ist dieser Effekt gegenüber lediglich einer absorbierenden Richtung X bei den Folienpolarisatoren bei den LLC-TN-Zellen weniger ausgeprägt als bei TN-Zellen mit Folienpolarisator.

Mit den Datensätzen für senkrechten Lichteinfall, dargestellt in den Diagrammen 5.2 bis 5.6, erfolgte die Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenndaten im sichtbaren Spektrum in Anlehnung an Gl. 3.5. Die Ergebnisswerte sind der Tabelle 5.3 zu entnehmen. Zu beachten ist, dass auch für die strahlungsphysi-

kalischen Kenndaten lediglich der sichtbare Wellenlängenbereich mit 380 nm bis 780 nm Berücksichtigung findet.

Kenngroße	Probenbezeichnung				
	ZP-1	ZP-2	ZP-3	ZP-4	ZP-V
	$U_0$ $U_{th}$	$U_0$ $U_{th}$	$U_0$ $U_{th}$	$U_0$ $U_{th}$	$U_0$ $U_{th}$
$T_{n,VIS}$ [-]	0.49 0.41	0.37 0.17	0.32 0.09	0.3 0.04	0.45 0
$R_{n,VIS}$ [-]	0.10 0.08	0.09 0.09	0.09 0.07	0.1 0.09	0.06 0.04
$A_{n,VIS}$ [-]	0.41 0.51	0.54 0.74	0.59 0.84	0.60 0.87	0.49 0.96
$T_{n,SOL}$ [-]	0.49 0.42	0.37 0.22	0.31 0.12	0.28 0.07	0.44 0
$R_{n,SOL}$ [-]	0.10 0.10	0.08 0.08	0.08 0.08	0.09 0.08	0.06 0.04
$A_{n,SOL}$ [-]	0.40 0.48	0.54 0.70	0.61 0.80	0.64 0.85	0.50 0.96

Tabelle 5.3:

Lichttechnische (Index VIS) und strahlungsphysikalische (Index SOL) Kenngroßen der Transmission, Reflexion und Absorption unter flächennormaler Bestrahlung im Wellenlängenintervall von 380 nm bis 780 nm für die Proben aus Tabelle 5.2.

Aus den errechneten Werten der Kenndaten bei einer bestimmten Wellenlänge und Einfallrichtung lassen sich durch entsprechende Integration über den gesamten Einfallsbereich der Strahlung nach Gleichung 3.6 die hemisphärischen, spektralen Kenngroßen berechnen [3.9]. Die so erhaltenen Werte beschreiben das optische Verhalten bei einer bestimmten Wellenlänge, jedoch mit Berücksichtigung des Strahleneinfalls aus der gesamten Hemisphäre. Die spektralen, hemisphärischen, optischen Größen finden sich in Tabelle 5.4 wieder. Zu bemerken ist, dass die spektralen, hemisphärischen Transmissionsgrade im Vergleich mit den Werten für senkrechten Strahleneinfall um ca. 0.1 geringer ausfallen. Dies ist auf die geringere Transmission vor allem bei großen Elevationswinkeln, zurückzuführen. Umgekehrt verhält es sich bei der Reflexion. Es zeigt sich, dass die LLCPC-Mischung Nr.15 zwar für die Anwendungen in der Displaytechnik bei großen Schichtdicken ( $d > 400$  nm) geeignet ist, dass jedoch für den Einsatz als Polarisator in einer schaltbaren Verglasung noch Optimierungsbedarf in Bezug auf die Schichteigenschaften besteht. So muß die Fähigkeit der Polarisierung für dünne Schichten verbessert werden und die Dunkeltransmission ist zu verringern. Dies bedeutet, dass die Absorption in X und Z-Richtung

verstärkt werden muß ( $k_x$  und  $k_z$  vergrößern). Eine Verbesserung der Helltransmission kann erreicht werden durch eine Verringerung der Absorption in Y-Richtung, der Durchlassrichtung der LLCP-Schicht (geringere Werte von  $k_y$ ).

In der Gleichung 3.6 sind keine Gewichtungsfunktionen enthalten, die beispielsweise eine Richtungsabhängigkeit der Einstrahlung berücksichtigen würden. Diese Funktion wäre nämlich von dem Standort, der jeweiligen Ausrichtung der Zellen bezüglich der Strahlungsquelle sowie den tages- und jahreszeitlichen Gegebenheiten abhängig. Um aus den diskreten, hemisphärischen, spektralen Werten zu den gewichteten Werten zu gelangen, ist wiederum Gl.3.5 anzuwenden. Der Tabelle 5.4 können die Daten hierzu entnommen werden.

Kenngröße	Probenbezeichnung				
	ZP-1	ZP-2	ZP-3	ZP-4	ZP-V
	$U_0$ $U_{th}$	$U_0$ $U_{th}$	$U_0$ $U_{th}$	$U_0$ $U_{th}$	$U_0$ $U_{th}$
$T_{h,VIS}$ [-]	0.39 0.34	0.27 0.18	0.22 0.10	0.18 0.07	0.41 0.13
$R_{h,VIS}$ [-]	0.16 0.15	0.13 0.12	0.13 0.13	0.13 0.12	0.11 0.09
$A_{h,VIS}$ [-]	0.46 0.51	0.6 0.7	0.65 0.77	0.69 0.81	0.48 0.78
$T_{h,SOL}$ [-]	0.41 0.37	0.28 0.20	0.22 0.12	0.18 0.08	0.4 0.13
$R_{h,SOL}$ [-]	0.15 0.15	0.13 0.13	0.13 0.12	0.13 0.12	0.11 0.09
$A_{h,SOL}$ [-]	0.44 0.48	0.6 0.7	0.65 0.75	0.7 0.8	0.49 0.78

Tabelle 5.4:  
Hemisphärische lichttechnische (Index VIS) und strahlungsphysikalische (Index SOL) Kenngrößen der Transmission, Reflexion und Absorption für Proben aus Tabelle 5.2 im sichtbaren Spektrum.

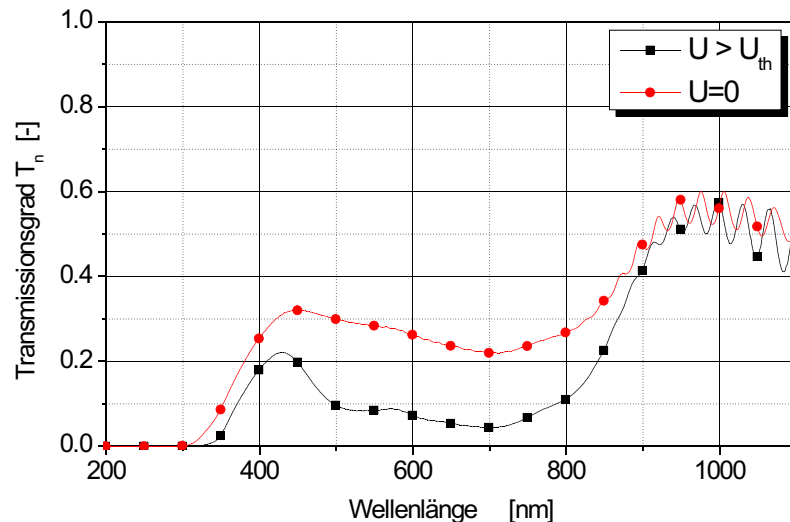
### 5.1.2 TN-Zellen mit internem LLCP ohne PI-Orientierungsschicht

Wie bereits in Kapitel 3.3 dargelegt wurde, findet sich bei den Zellen der 6. Generation mit internem LLCP ohne Orientierungsschicht eine deutliche Domänenbildung. Dies bedeutet, dass keine eindeutige und gleiche Orientierung der Flüssigkristallmoleküle des Nematens vorliegt. Eine Berechnung der optischen Kenndaten ist jedoch ohne die Kenntnis der Ausrichtung der optisch aktiven Flüssigkeit nicht möglich. Da-



her erfolgte die Bestimmung der Transmission der im Rahmen der Arbeit hergestellten Zellen mittels spektraler Vermessung. Das Ergebnis ist im Diagramm 5.13 dargestellt. Der Verlauf sowie der Betrag der Werte für den ungeschalteten und den geschalteten Zustand entsprechen den bereits in Kapitel 4 dargestellten Kurven der im selben Verfahren unter gleichen Bedingungen hergestellten Proben (vgl. Diagramm 4.19). Auf Grund der großen Schichtdicke des LLCP-Auftrages sind bei diesen Zellen die Transmissionswerte im ungeschalteten Zustand gering.

Diagramm 5.13:  
Gemessener Transmissionsgrad  $T_n$  einer TN-Zelle der 6. Generation (ohne Orientierungsschicht) mit internem LLCP (s. Anhang D-c).

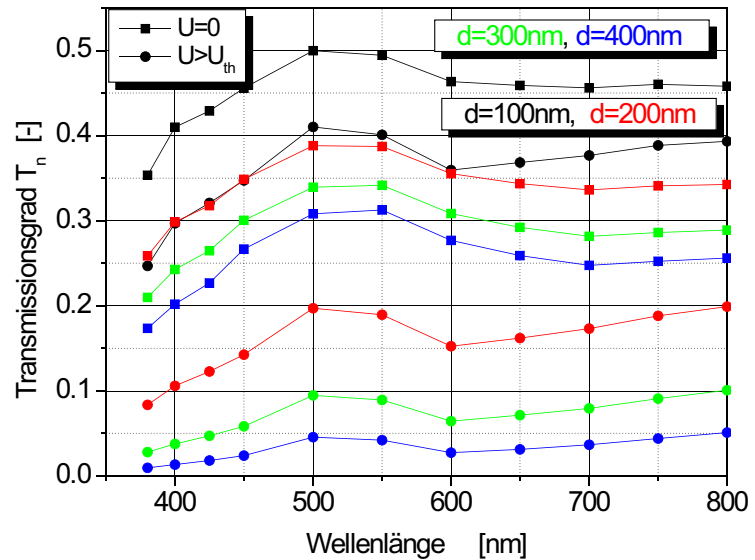


### 5.1.3 TN-Zelle mit internem LLCP bei optimierter Mischung

Um den Schalthumb und auch die große Dunkeltransmission im Bereich kleiner Wellenlängen zu verringern bietet es sich beispielsweise an, die Mischung der Farbanteile im LLC dahingehend zu verändern, dass der Anteil der Farbstoffmoleküle, die im Bereich blauer Strahlung absorbieren, erhöht wird [4.21 und 5.2]. Für ein verbessertes Absorptionsverhalten, gekennzeichnet durch einen größeren  $k_x$ -Wert, soll nachfolgend der Einfluß auf die Hell- und Dunkeltransmission dargestellt werden. Es wurde der Wert  $k_x = 0.3$  für den Wellenlängenbereich von  $380 \text{ nm}$  bis  $450 \text{ nm}$  festgelegt und entsprechende Berechnungen zur Bestimmung der Transmission bei  $U=0$  durchgeführt. Alle übrigen Materialkennwerte blieben unverändert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Diagramm 5.14 dargestellt. Es zeigt sich erwartungsgemäß eine deutliche Verbesserung des Verhaltens im angesteuerten Zustand. Es lässt sich so ein näherungsweise konstanter spektraler Schalthumb erreichen.

Um die Helltransmission und den Schalthumb zu verbessern ist ein möglichst geringer Wert von  $k_y$  anzustreben. Wird dieser beispielsweise um 25 % verringert, so ergibt sich eine Verbesserung der Helltransmission um  $T_n = 16\%$  ( $600 \text{ nm}$ ,  $d_{LLCP} = 200 \text{ nm}$ ) bzw.  $T_n = 2.7\%$  ( $600 \text{ nm}$ ,  $d_{LLCP} = 400 \text{ nm}$ ) sowie eine Vergrößerung des Schalthumbes um nahezu jeweils denselben Betrag. Die Veränderung wirkt sich hauptsächlich auf den Hellzustand der TN-Zelle aus. Verbesserungen der Rezeptur des LLC im Bereich der geschilderten Größenordnungen werden vom Hersteller des LLC-Materials als realisierbar angesehen [4.11 und 4.18].

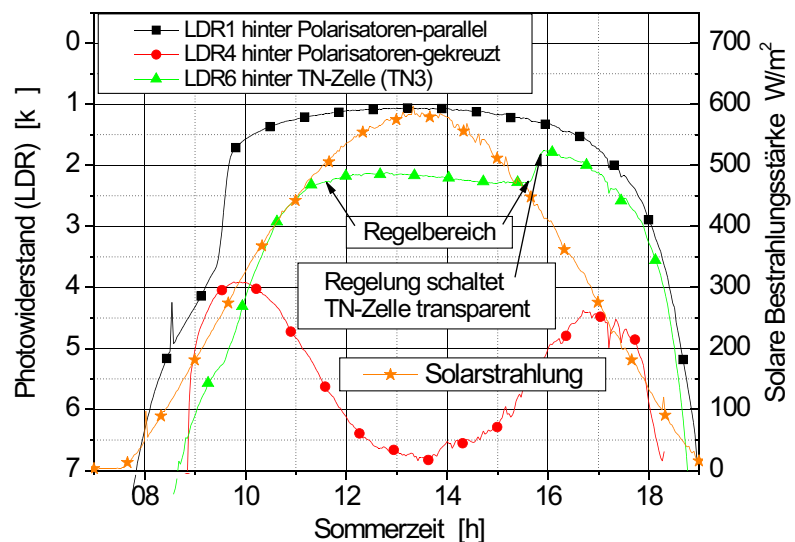
Diagramm 5.14:  
Spektraler Transmissionsgrad (berechnet mit der Jones-Matrix-Methode) der im blauen Spektralbereich verbesserten LLCP-TN-Zellen bei senkrechtem Lichteinfall in Abhängigkeit von der LLCP-Schichtdicke.



### 5.1.4 TN-Zelle mit Regelung

Zwei der vom Autor hergestellten TN-Zellen der 2. Generation wurden jeweils mit einer eigenen, analogen Regelungseinheit versehen. Die beiden Elemente befanden sich in je einer abgeschlossenen Isolierverglasung und waren mit Folienpolarisatoren des Typs HNCP37 versehen (vgl. Tabelle 6.1 Probe VI-2). Die Aufgabe der Regelung bestand darin, die Zellen jeweils so zu schalten, dass in Strahlrichtung gesehen hinter dem Element eine konstante Bestrahlungsstärke vorhanden war. Zur Detektierung der Bestrahlungsstärke fanden Miniatur-Photowiderstände (zu englisch "light dependent resistor" = lichtempfindlicher Widerstand, LDR) Verwendung. Der Widerstand der eingesetzten Photowiderstände ist umgekehrt proportional zur Bestrahlungsstärke. Für eine der adaptiven TN-Zellen werden die Messergebnisse, dargestellt in Diagramm 5.15, nachfolgend erläutert. Der Sensor LDR6 befand sich, in Strahlrichtung gesehen, hinter der TN-Zelle. Zwei Referenzproben mit einem Polarisatorpaar in paralleler Anordnung zum einen und einem Polarisatorpaar in gekreuzter Anordnung zum anderen dienen zum Vergleich. Die Sensoren LDR1 sowie LDR4

Diagramm 5.15:  
Gemessener einstrahlungsabhängiger Widerstand der LDR-Photowiderstände zusammen mit der Bestrahlungsstärke am 11.9.1999.



waren jeweils hinter den Polarisatorpaaren angebracht. LDR1 befand sich hinter zwei parallelen Polarisatoren und LDR4 war einem gekreuzten Polarisatorpaar nachgeordnet. Diese beiden Photowiderstände dienen zur Darstellung der Widerstandsverläufe bei nicht adaptiver Anordnung.

Bei zunehmender Einstrahlung verringert sich der Widerstand des LDR6 hinter der TN-Zelle bis die Regelung den Strahlungsdurchgang im gekennzeichneten Regelbereich konstant hält. Der Widerstand des LDR6 ändert sich hierbei nicht mehr. Verringert sich nun die Bestrahlungsstärke etwa gegen 15:40 Uhr so, dass die Regelung die Versorgungsspannung an der Zelle unter den Schwellenwert fallen lässt, dann schaltet die Zelle auf maximale Durchlässigkeit. Damit steigt die Bestrahlungsstärke hinter der Zelle sprunghaft an, was an der Verringerung des Widerstandes des LDR6 erkennbar ist. Anschließend folgt der Verlauf des LDR6-Signals dem von LDR1 hinter den parallelen Polarisatoren.

## 5.2 Farbeigenschaften

Für die untersuchten TN-Zellen mit LLC-Polarisatoren wird das Farbverhalten wesentlich von den spektralen Eigenschaften des Polarisators bestimmt. Für die vier TN-Zellen-Typen sind die Farbmaßzahlen in den Tabellen 5.5 sowie 5.6 angegeben. Verwendung fanden hierbei die optischen Kenngrößen T und R für senkrechten Strahlungseinfall auf die Proben.

Kenngröße	Probenbezeichnung			
	ZP-1	ZP-2	ZP-3	ZP-4
	U=0 $U \quad U_{th}$	U=0 $U \quad U_{th}$	U=0 $U \quad U_{th}$	U=0 $U \quad U_{th}$
<i>L</i>	75.53	67.43	63.42	61.40
	70.31	48.87	35.88	24.20
<i>a</i>	-1.07	-1.08	-1.92	-3.26
	-1.12	7.76	9.01	13.75
<i>b</i>	-7.65	-5.72	-3.8	1.96
	-13.93	-25.05	-29.09	-33.56
<i>C<sub>ab</sub></i>	7.72	5.82	4.26	3.81
	13.98	27.18	29.34	35.27

Tabelle 5.5

Farbmaßzahlen eines matt weißen Körpers unter Betrachtung bei Beleuchtung unter transmittiertem Tageslicht (Situation innen) und senkrechtem Strahlungseinfall.

Bei allen Proben kommt es im angesteuerten Zustand zu einer Verschiebung der Farbwirkung des matt weißen Körpers hin zum Blauen. Außer bei der dünnsten Schicht verschieben sich die Farbwirkungen bei den übrigen Proben in Richtung Rot. Je dicker die LLCP-Schicht gewählt wurde, desto deutlicher fällt diese Verschiebung

aus. In der Ansicht erscheinen die Proben im Dunkelzustand gegenüber dem Hellzustand in Richtung zum Roten und zum Gelben hin verschoben. Ausnahme bildet hier lediglich die Probe LLCV-V3, bei der eine Verschiebung von Gelb in Richtung Blau beim Übergang vom Hell- zum Dunkelzustand erfolgt.

Kenngröße	Probenbezeichnung			
	ZP-1	ZP-2	ZP-3	ZP-4
	U=0 $U \quad U_{th}$	U=0 $U \quad U_{th}$	U=0 $U \quad U_{th}$	U=0 $U \quad U_{th}$
L	38.07	35.53	35.52	37.81
	34.73	35.36	31.97	35.69
a	-2.55	-4.94	-3.68	-7.21
	4.18	-2.04	-0.68	-2.41
b	3.23	0.68	5.05	1.17
	9.52	2.65	-1.08	9.10

Tabelle 5.6

Farbmaßzahlen der Proben unter Betrachtung bei Beleuchtung durch Tageslicht sowie bei senkrechtem Strahlungseinfall (Betrachtung von außen).

### 5.3 Schalteigenschaften und Energieverbrauch

Übersteigt die an einer TN-Zelle anliegende Spannung einen Schwellenwert (zu englisch "threshold voltage"=Grenzspannung), so kommt es zur Ausrichtung der Dipolmoleküle im nematischen Flüssigkristall in Richtung parallel zum anliegenden elektrischen Feld. Die Feldkräfte übersteigen nun die intermolekularen Wechselwirkungskräfte im Nemat. Der entsprechende Spannungswert für den verwendeten Nemat ZLI-4792 (s. Anhang D-a) ergibt sich zu [3.21]:

$$U_{th} = \sqrt{\frac{11 \cdot \left( \frac{2}{33} \right) \cdot 0.25}{0}} = 1.76 \text{ V.} \quad (5.1)$$

Ab Spannungswerten von  $U_{LC} = 5U_{th}$  bis  $7U_{th} = 8.8 \text{ V}$  bis  $12.32 \text{ V}$  sind bis auf die Moleküle in unmittelbarer Nähe der Begrenzungsflächen alle Flüssigkristalldipole in Feldrichtung orientiert. Bei den entsprechenden Feldstärken ist die minimale Transparenz der TN-Zelle bei der NW-Anordnung erreicht.

#### 5.3.1 Schaltzeiten

Die Schaltzeit einer TN-Zelle, also die Zeit, die benötigt wird um vom Zustand 10 % von T-max ( $T_{10\%}$ ) auf 90 % von T-max ( $T_{90\%}$ ) zu wechseln, wird näherungsweise durch die folgende Gleichung beschrieben [5.3]:

$$t_{on} = \frac{d^2}{2K_{11} \frac{U^2}{U_{th}^2} - 1} \quad (5.2)$$

Dabei beschreibt  $d$  den Zellabstand und  $U$  die angelegte Spannung.  $\gamma_1$  und  $K_{11}$  bezeichnen Materialkennwerte des Flüssigkristalls. Für den Zellabstand von  $5 \mu\text{m}$  ergibt sich eine theoretische Einschaltzeit der TN-Zelle von  $0.83 \text{ ms}$  bei einer angelegten Spannung von  $U=10 \text{ V}$ . Wird der Zellabstand auf  $10 \mu\text{m}$  erhöht, so nimmt auch die Schaltzeit zu und erreicht den Wert von  $3.27 \text{ ms}$ . Für eine  $10 \mu\text{m}$  Zelle ist die Abhängigkeit der Schaltzeit,  $t_{on}$ , von der angelegten Spannung im Diagramm 5.16 aufgezeigt.

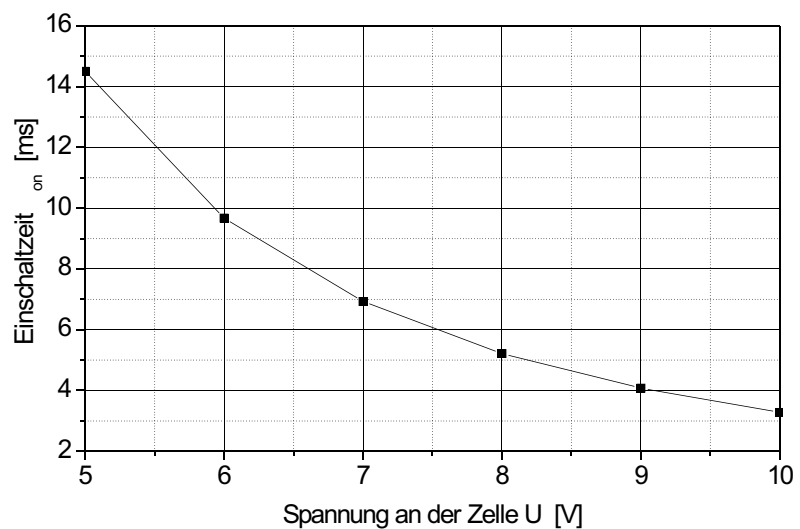


Diagramm 5.16: Einschaltzeit (berechnet) für eine TN-Zelle mit Flüssigkristallschicht der Dicke  $10 \mu\text{m}$ . Abhängigkeit von der angelegten Spannung.

Die Rückorientierung der Flüssigkristallmoleküle nach dem Abschalten der Spannungsversorgung benötigt im allgemeinen längere Zeit. Sie lässt sich näherungsweise bestimmen zu [5.3]:

$$t_{off} = \frac{d^2}{2K_{11}} \quad (5.3)$$

Auch hierbei definieren die Transmissionsgrade  $T_{10\%}$  und  $T_{90\%}$  den Zeitbereich. Für die Zelle mit  $5 \mu\text{m}$  sowie  $10 \mu\text{m}$  Substratabstand ergeben sich Rückstellzeiten von  $25.5 \text{ ms}$  und  $102 \text{ ms}$ . Die Schaltzeiten variieren wegen der großen Veränderlichkeit der Drehviskosität sehr stark mit der Temperatur im Nemat. Für die Drehviskosität liegen die entsprechenden Temperaturabhängigkeiten nicht vor, jedoch sind sie für die kinematische Viskosität dokumentiert. Bei ihr steigt der Wert bei einem Temperatursprung von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  um den Faktor 30 an (vgl. Anhang B).

Zur Verifizierung der theoretisch errechneten Schaltzeiten dienen entsprechende Messungen an ausgewählten Testzellen der beiden Dicken bei Temperaturen von  $T=21 \text{ }^\circ\text{C}$ . Verwendung fand hierbei eine Anordnung bestehend aus einer Beleuchtungsquelle, der Testzelle und einem lichtempfindlichen Sensor (TSL251). Der Photo-Sensor liefert eine Spannung, die proportional zur Bestrahlungsstärke ist. Für die

NW-Zelle im nichtangesteuerten Zustand ist demnach das Sensorsignal höher als für die angesteuerte Zelle. Mit der Abtastrate von 1 kHz erfolgte die Messung der an der Zelle anliegenden Spannung sowie des Signals des Lichtsensors. Der kleinste messbare Zeitschritt weist eine Dauer von 1 ms auf. Sowohl bei der Detektierung der Transmission  $T_{10\%}$  als auch beim Messen des Wertes von  $T_{90\%}$  ergibt sich jeweils eine maximale zeitliche Abweichung von 1 ms. Der Fehler bei der Bestimmung der Schaltzeiten beträgt daher maximal 2 ms. In den Diagrammen 5.17 und 5.18 ist das Ein- und Ausschaltverhalten einer 5  $\mu\text{m}$  dicken TN-Zelle (O4) dargestellt. Für alle vermessenen TN-Zellen mit Zellabstand von 5  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  mit und ohne PI-Orientierungsschicht finden sich die Ergebnisse in Tabelle 5.7 wieder.

Üblicherweise werden TN-Zellen mit Wechselspannung betrieben. Hierdurch wird das Auftreten des Einbrenneffektes, eine elektrochemische Reaktion zwischen dem Flüssigkristall und der Umgrenzung, bei dem der Umschaltvorgang extrem verlangsamt wird, vermieden.

Zellen-Bezeichnung	Flüssigkristalldicke [ $\mu\text{m}$ ]	Polyimid (PI)	Schaltzeit [ms]	
			<i>on</i>	<i>off</i>
O4 (1. Gen.)	5	mit PI	~ 1	~18.6
T18 (3. Gen.)	10	mit PI	~ 6	~ 41.3
Z50 (6. Gen.)	10	ohne PI	~ 8	~ 51.9

Tabelle 5.7:  
Schaltzeiten diverser Test-Zellen, gemessen bei  $U=10\text{V}$ . Maximaler Messfehler 2 ms.

Diagramm 5.17:  
Gemessener Zeitverlauf der Schaltspannung an der Zelle und der Spannung am Photo-Sensor (TN-Zelle O4 mit PI-Orientierungsschicht, Abstand 5  $\mu\text{m}$ ). Einschalt-dauer  $t_{on}$  1 ms.

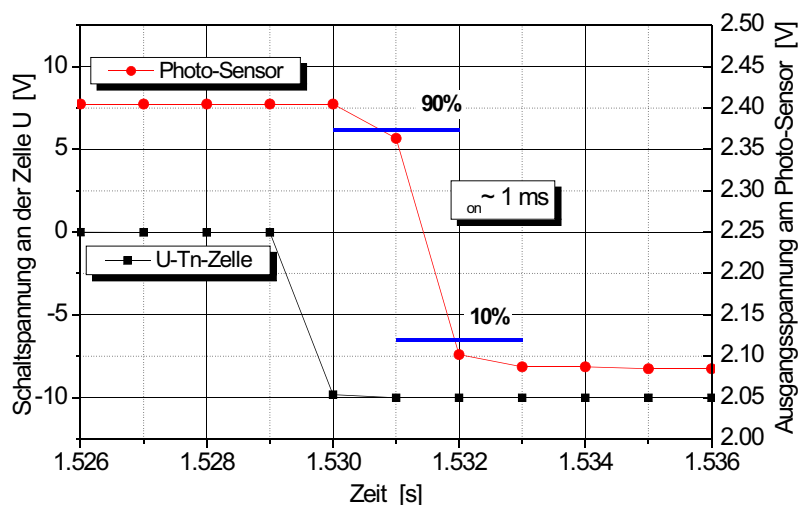
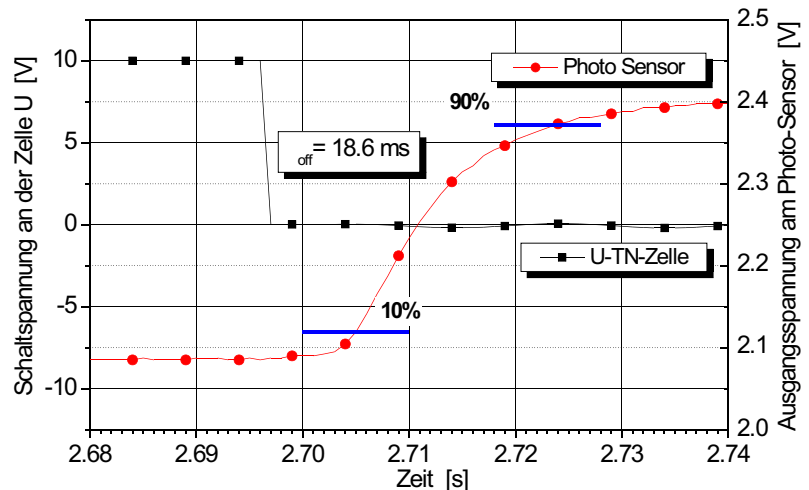




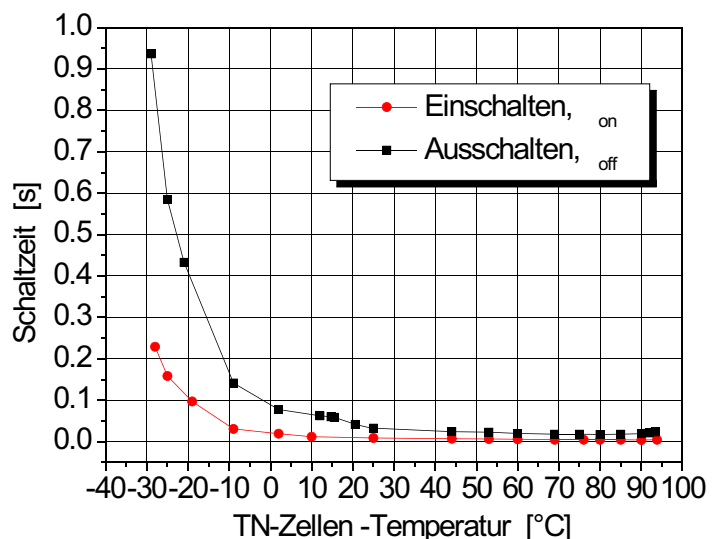
Diagramm 5.18:  
Gemessener Zeitverlauf der Schaltspannung an der Zelle und der Spannung am Photo-Sensor (TN-Zelle O4 mit PI-Orientierungsschicht, Abstand 5  $\mu\text{m}$ ). Ausschalt-dauer  $t_{\text{off}} = 18.6(2) \text{ ms}$ .



### 5.3.2 Temperaturabhängigkeit der Schaltzeiten

Wesentlichen Einfluß hat die Temperatur auf den Phasen-zustand des schaltenden Flüssigkristalls der TN-Zelle. Markant ist hierbei der Übergang der nematischen in die isotrope Phase bei der Klärpunkttemperatur. Befindet sich der Flüssigkristall in der isotropen Phase, so verliert er die Eigenschaft zur Drehung des Lichtvektors beim Durchgang durch die Zelle. Die Zelle des Typs "normally white" wird in diesem Zustand dunkel, wohingegen die Zelle vom Typ "normally black" zur Transparenz wechselt. Bei mehrfacher Erwärmung diverser Testzellen konnte ein reversibler Übergang zwischen der nematischen und der isotropen Phase für den Flüssigkristall ZLI-4792 nachgewiesen werden. Der eingesetzte Flüssigkristall befindet sich in der nematischen Phase bei Temperaturen im Bereich von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+92^{\circ}\text{C}$ . Mit der Temperatur verändern sich auch die optischen Kennwerte, die elastischen Konstanten wie auch die Viskosität. Leider sind die Temperaturabhängigkeiten der Stoffkennwerte nicht verfügbar. Deshalb kann der Einfluss der Temperatur auf die Schalteigen-

Diagramm 5.19:  
Gemessene Schaltzeiten der TN-Zelle T43 (Abstand 10  $\mu\text{m}$ ) mit PI-Orientierungsschicht in Abhängigkeit von der Temperatur der Zelle ( $U=8.3 \text{ V}$ ).

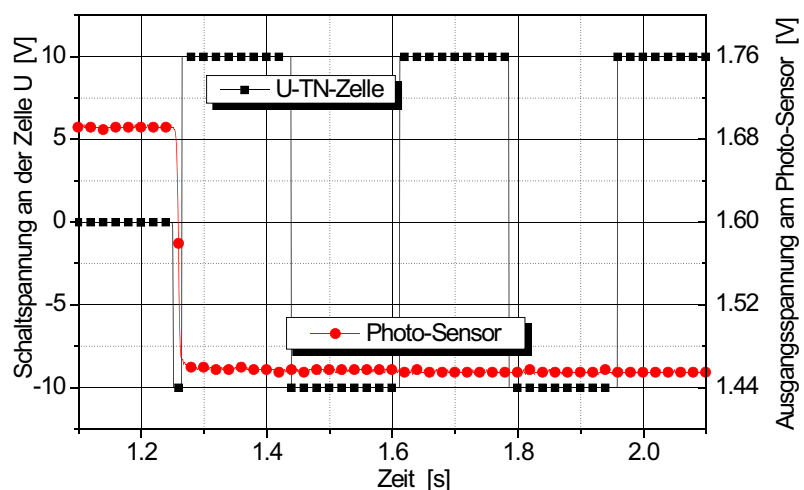


schaften nicht mit den vorgestellten Formalismen berechnet werden. Durchgeführt wurden jedoch Messungen mit der in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Messvorrichtung und der TN-Zelle T43 (Abstand 10  $\mu\text{m}$  mit PI-Orientierungsschicht) unter Erwärmung im Ofen auf maximal 93.8°C sowie Abkühlung bis auf minimal -28°C. Im Diagramm 5.19 ist das gemessene Ein- und Ausschaltverhalten dieser Zelle dargestellt. Versorgt wurde die Zelle mit einer Spannung von  $U=8.3\text{ V}$ . Im Vergleich mit den Werten bei  $T\sim 21^\circ\text{C}$ , der Referenztemperatur, ergibt sich bei Erwärmung eine merkliche Vergrößerung der Schaltgeschwindigkeit. Bei der maximal abgekühlten Zelle erhöht sich die Zeit für das Einschalten gegenüber der Referenztemperatur um den Faktor 25.5 auf  $t_{on} = 0.229\text{s}$ . Für das Ausschalten ergibt sich der Faktor zu 22.7. Die Ausschaltzeit beträgt dann  $t_{off} = 0.937\text{s}$ . Außer dem Flüssigkristall zum Schalten der Zelle weisen alle übrigen Schichtkomponenten einer LLCN-TN-Zelle Temperaturempfindlichkeiten erst ab Temperaturwerten, die weit oberhalb von  $T=100^\circ\text{C}$  liegen auf (Kleber  $T>125^\circ\text{C}$ , Polyimid  $T>200^\circ\text{C}$ , LLCN  $T>200^\circ\text{C}$ ) [5.4, 5.5 und 4.14].

### 5.3.3 Ansteuerung

Zur Ansteuerung der TN-Zellen ist eine Rechteckspannung besonders geeignet. Bei dem abrupten Wechsel der Vorzeichen des Spannungswertes bei diesem Signaltyp ändert die Zelle ihre Durchlässigkeit nicht. In Diagramm 5.19 ist die Speisespannung sowie das Signal des Photo-Sensors für die Zelle T18 bei einer Frequenz von drei Hz aufgetragen. Wird hingegen eine Dreiecksspannung mit der selben Frequenz verwendet, so ergeben sich kurzzeitige Bereiche maximaler Transmission. Der gleiche Effekt tritt natürlich auch bei der Ansteuerung mit einer sinusförmigen Wechselspannung auf. Demzufolge muss die Speisespannung im Form eines Sinus- oder Dreieckssignales mit größerer Frequenz betrieben werden um eine konstante Durchlässigkeit zu gewährleisten.

Diagramm 5.20:  
Gemessener Zeitverlauf der Schaltspannung an der Zelle und der Spannung am Photo-Sensor der TN-Zelle T18 (Abstand 10  $\mu\text{m}$ ) mit PI-Orientierungsschicht bei einer Rechteckspannung von 3 Hz .



#### 5.3.4 Energieverbrauch einer TN-Zelle

Eine TN-Zelle entspricht in ihrer Wirkungsweise einem Plattenkondensator mit zwischenliegendem Dielektrikum, dem Flüssigkristall. Die beiden transparenten, leitfähigen Elektroden aus ITO bilden dabei die beiden Platten des Kondensators. Da also lediglich zwischen den ITO-Schichten ein Potential aufgebaut wird und im Idealfall keine Leitung durch das Dielektrikum erfolgt, wird im Kondensator der TN-Zelle keine Energie verbraucht, sondern diese wird dort gespeichert. Der Energieverbrauch einer Anordnung aus TN-Zelle, Zuleitung und Ansteuer Elektronik bestimmt sich daher durch die Eigenschaften der beiden letztgenannten Komponenten. Für die hergestellten TN-Zellen der Kantenlänge von ca. 35 cm und der Fläche von  $0.126 \text{ m}^2$  konnte eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 165 mW gemessen werden. Die Ansteuerfrequenz betrug 100 Hz bei einer Rechteckspannung mit der Spannungsamplitude von 8 V. Auf eine Fläche eines Quadratmeters hochgerechnet, ergäbe sich dabei eine Leistungsaufnahme von ca. 1.3 W.

## **6. Kurzzeit- und Langzeitverhalten einer Flüssigkristall-Zelle und deren Komponenten**

Zur Ermittlung des Verhaltens der Flüssigkristall-Zellen und deren Komponenten unter kurzzeitig und langfristig wirkenden Einflüssen wurden unterschiedliche Versuche durchgeführt. Das Langzeitverhalten unter Umweltbedingungen konnte im Freilandversuchsstand untersucht werden. Der Einfluss kurzzeitig wirkender extremer Temperaturen auf die Funktion und das Schaltverhalten der ausgewählten Testzellen wurde in der Klimakammer untersucht. Zur Verifizierung der Erwärmung von Isolierglassystemen mit TN-Zellen verschiedener Schichtaufbauten diente die Exposition unter künstlicher Beleuchtung im Sonnensimulator. Die Anordnung und Auswahl der Komponenten im Isolierglas entsprach dabei möglichen sinnvollen Aufbauten mit entsprechenden polarisierenden Schichten.

Ziel der empirischen Untersuchungen war es, Aufschluss zu erlangen über die Auslegungsgrößen, die zur Auswahl der Komponenten zukünftiger TN-Zellen Berücksichtigung finden müssen, sowie das Verhalten der eingesetzten Werkstoffe und Systeme zu studieren. Einer experimentellen Untersuchung an entsprechenden Proben wurde gegenüber einer analytischen Berechnungsmethode des Verhaltens derselben der Vorzug gegeben, da, wie auch im Kapitel 4 ersichtlich wurde, eine vollständige Charakterisierung der Komponenteneigenschaften nicht möglich war. Da die Darstellung der Ergebnisse für alle Proben den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, soll es genügen, für ausgewählte Zellen und Komponenten markante Ergebnisse nachfolgend zu erläutern. Im entsprechenden Forschungsbericht [6.1] sind der Versuchsaufbau, die verwendeten Messmittel sowie die erhaltenen Versuchsergebnisse ausführlich dokumentiert.

### **6.1 Temperaturverhalten im Freiland**

#### **6.1.1 Proben**

Sowohl TN-Zellen als auch diverse Polarisatorarten wurden unter Freilandbedingungen geprüft. Die TN-Zellen waren hierbei in einer Isolierglasscheibe auf einem Aluminiumträgerblech montiert und mit einer Regelung zur Anpassung der jeweiligen Transmission an die Einstrahlung versehen. Zur Aufnahme der Polarisatorproben diente ebenfalls ein Aluminiumblechträger, der Bestandteil einer Isolierglaseinheit war. Dieses Isolierglas konnte zur Probenentnahme für Zwischenmessungen jederzeit geöffnet werden. Diese Proben dienten vornehmlich der Beobachtung des Alterungsverhaltens der Polarisatoren. Weitere geschlossene Isolierglassysteme mit diversen Proben von Polarisatoren sollten vornehmlich zur Ermittlung der auftretenden Extremtemperaturen im System dienen. Sämtliche Aufnahmerahmen mit den Proben sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Zur Aufnahme der Proben dienten entsprechende Montagerahmen, auf denen die Proben unter einem Winkel von  $45^\circ$  zur Horizontalen befestigt waren. Alle Proben waren in südliche Richtung orientiert aufgestellt.

Eingebettet in jeweils ein Isolierglasscheibensystem wurden zwei TN-Zellen der 2. Generation im Freilandversuch eingesetzt. Die Proben tragen die Bezeichnungen VI-1 und VI-2. Die Zellen waren geklemmt gehalten auf einem Aluminiumblech mit entsprechendem Ausschnitt zur Aufnahme der Testzellen. Das Blech wiederum befand sich zwischen zwei abschließenden Floatglasscheiben der Dicke 4 mm. Zwischen der Aluminiumhalterplatte und den Proben bestand thermische Trennung.



Abbildung 6.1:  
 Freilandversuchsstand mit diversen Proben. Im Hintergrund: Sammelproben. Im Vordergrund: Einzelproben im Isolierglas.

Zwei verschiedene Polarisatorarten wurden für die Isolierglasanordnung im Freilandversuch vorbereitet. Zum Einsatz kamen hierbei Folienpolarisatoren (Probe VI-3 und VI-4) sowie Glaspolarisatoren (Probe VI-5, VI-6, VI-7 und VI-8). Unter Verwendung des Polarisators HNCP37 wurden zwei Isolierglaseinheiten hergestellt. In der Probe VI-3 wurden die Folien in paralleler Anordnung eingebracht und in der Probe VI-4 waren sie in gekreuzter Lage eingebaut. So sind die beiden Schaltzustände der TN-Zelle näherungsweise nachgestellt.

Die Glaspolarisatoren VI-5 und VI-6 befanden sich in gekreuzter Anordnung im Isolierglas, wohingegen die Proben VI-7 und VI-8 zwar zusammen in derselben Isolierglaseinheit montiert waren, jedoch in Einzelanordnung der Umwelt ausgesetzt waren. Die Glaspolarisatoren entstammten der 1999-er Produktion (s. Anhang D-h). Neben den Funktionsproben befanden sich weitere sogenannte Referenzproben im Freilandversuch. Hierzu gehörten ein Isolierglas mit zwei Lufträumen und einer mittig angeordneten Floatglasscheibe (Probe VI-R1) sowie ein Isolierglas mit einer ungefüllten also funktionslosen TN-Zelle ohne Polarisatoren (Probe VI-R2, Dummy-TN-Zelle) auf einer Aluminium-Trägerplatte. Die Abmessungen der Proben sowie die Position der Sensoren sind [6.1] zu entnehmen. Dargestellt sind sämtliche Proben im verschlossenen Isolierglasaufbau in Tabelle 6.1. Die Expositionszeiten im Freiland können dieser Tabelle entnommen werden.

Zur Erfassung der Alterung der im Freiland ausgebrachten Polarisatoren wurden entsprechende Proben in Sammelanordnung zu jeweils neun Stück in dafür geeignete Isolierglaseinheiten auf einem Blechträger montiert. Die Isoliergläser konnten zur Probenentnahme geöffnet werden. Isolierglaseinheiten diesen Typs sind in Abbildung 6.1 im Hintergrund angeordnet zu erkennen. Die Front- und die Rückseite der Isolierglaseinheit bestehen aus Floatglasscheiben der Dicke 4 mm. Die auf diese Weise ausgebrachten Proben sind mit ihren Bezeichnungen und Aufbauten in Tabelle 6.2 zusammengefasst dargestellt.

Bezeichnung der Probe	Probenart	Ausgebracht	Eingeholt
VI-1	T1: Zelle 2. Generation nach Tab. 3.1 mit Folienpolarisator HNCP37 (d=0.762 mm)	20.06.1999	22.06.2001
VI-2	T3: Zelle 2. Generation nach Tab. 3.1 mit Folienpolarisator HNCP37 (d=0.762 mm)	20.06.1999	22.06.2001
VI-3	HNCP37 parallel: Folienpolarisator HNCP37 (d=0.762 mm) in paralleler Anordnung	20.06.1999	01.10.2002
VI-4	HNCP37 gekreuzt: Folienpolarisator HNCP37 (d=0.762 mm) in gekreuzter Anordnung	20.06.1999	01.10.2002
VI-5, VI-6	CP1 CP2: Glaspolarisatoren (s. Anhang D-h) aus erster Lieferung	06.11.1999	01.10.2002
VI-7, VI-8	CP5, CP6 s. auch Tab.6.2: Glaspolarisator (s. Anhang D-h) aus erster Lieferung	23.12.1999	22.06.2001
VI-R1	Floatglas-Referenzprobe: Isolierglas mit zwei Scheibenzwischenräumen (SZR > 8 mm) alle Gläser Float (d=4 mm)	13.06.1999	01.10.2002
VI-R2	Referenzprobe-ungefüllte TN-Zelle (Dummy-TN-Zelle): Isolierglasprobe mit ungefüllter TN-Zelle auf Aluminiumträgerblech	13.06.1999	01.10.2002

Tabelle 6.1:

Bezeichnung, Aufbau und Aussetzungszeitraum der Proben im verschlossenen Isolierglas mit Freilandexposition



Bezeichnung der Probe	Probenart	Ausgebracht	Eingeholt
WI-1, WI-2, WI-3	HNCP37-einzeln: Einzelne Folienpolarisatoren HNCP37, d=0.762 mm	13.06.1999	01.10.2002
WI-4, WI-5, WI-6	HNCP37-parallel: Folienpolarisatoren HNCP37, d=0.762 mm in paralleler Anordnung	13.06.1999	01.10.2002
WI-7, WI-8, WI-9	HNCP37-gekreuzt: Folienpolarisatoren HNCP37, d=0.762 mm in ge- kreuzter Anordnung	13.06.1999	01.10.2002
WI-10, WI-11	OP1 und OP2: LLCP Nr.13 auf PET-Folie d 60 m ohne $BaCl_2$ -Be- handlung	24.03.2000	20.03.2002
WI-12 bis WI-17	OP55 bis OP60: Trägersubstrat aus Spezial- weißglas, d=1.1 mm. LLCP Nr.13 ohne $BaCl_2$ - Behand- lung	15.06.2000	22.06.2001 teilweise schadhaft
WI-18 bis WI-20	OP61 bis OP63 Trägersubstrat aus Spezial- weißglas, d=1.1 mm. LLCP Nr.13 ohne $BaCl_2$ - Behand- lung	15.06.2000	22.06.2001 schadhaft
WI-21, WI-22, WI-23, WI-24	N15-4, N15-5, N15-9, N15-10: Trägersubstrat aus Spezial- weißglas, d=1.1 mm. LLCP Nr.15 mit $BaCl_2$ - Behandlung	06.03.2001	22.06.2001 schadhaft
WI-25	CP4: Glaspolarisator (s. Anhang D-h) aus 1999-er Lieferung	06.11.1999	20.03.2002
WI-26, WI-27	VI-7 und VI-8 s. a. Tab.6.1: Glaspolarisator (s. Anhang D-h) aus 1999-er Lieferung	23.06.2001	1.10.2002

Tabelle 6.2: Bezeichnung, Aufbau und Aussetzungszeitraum der Freilandproben im wiederverschließbaren Isolierglas zu jeweils neun Stück (Sammelanordnung).

### 6.1.2 Extremwerte der Temperaturen an den Proben

Zur Ermittlung der Extremwerte der mit den Sensoren erfassten Temperaturen aus den aufgezeichneten Datensätzen über den gesamten Messzeitraum hinweg diente eine speziell für diesen Zweck erstellte Software. Die Maximal- und Minimaltemperaturen jeden Messtages wurden so für den gesamten Messzeitraum zusammengestellt. Aus den erhaltenen beiden Datensätzen kann auf einfache Weise für jede Probe und jeden Sensor die höchste und die niedrigste Temperatur im Beobachtungszeitraum ermittelt werden. Die Verläufe der Tagesmaximal- und Tagesminimalwerte der Außentemperatur sowie der Verlauf der Tagesmaximalwerte der solaren Einstrahlung am Messstandort sind in den Diagrammen 6.1 bis 6.3 aufgetragen.

Diagramm 6.1:  
Gemessene Tagesmaximalwerte der Außentemperatur gemessen mit einem PT-100. Standort: Stuttgart-Universität-Vaihingen.

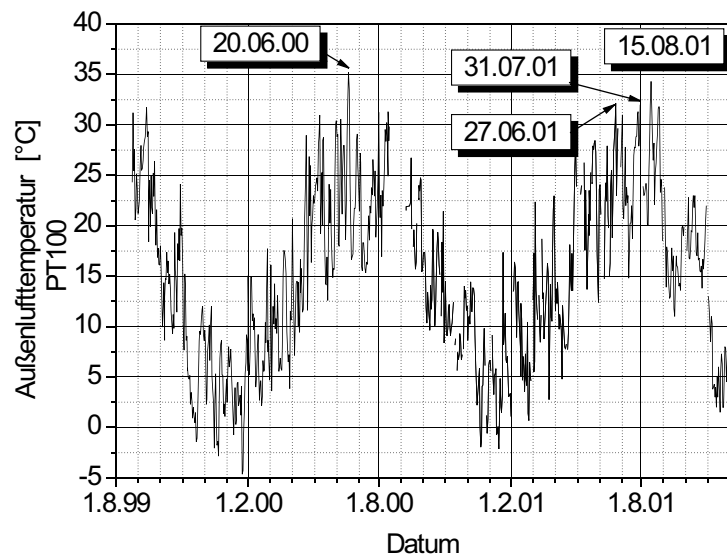


Diagramm 6.2:  
Gemessene Tagesminimalwerte der Außentemperatur gemessen mit einem PT-100. Standort: Stuttgart-Universität-Vaihingen.

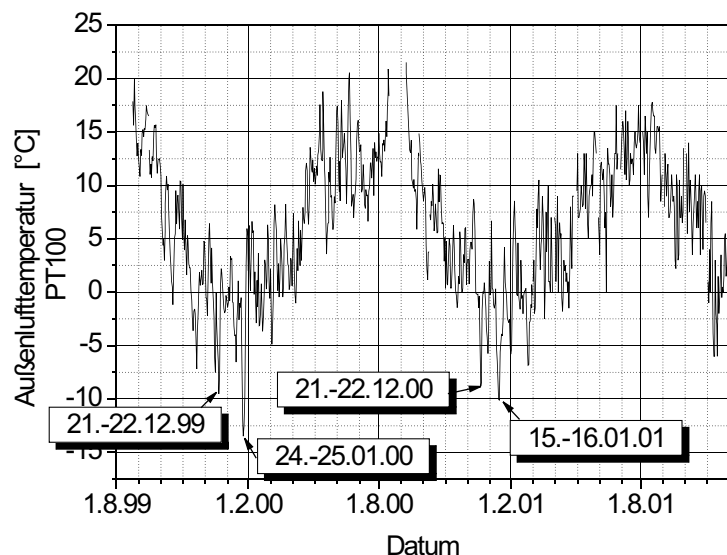
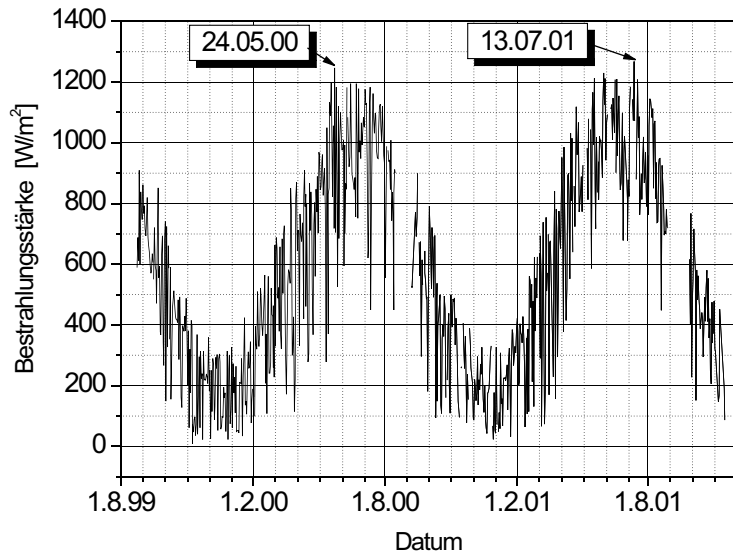


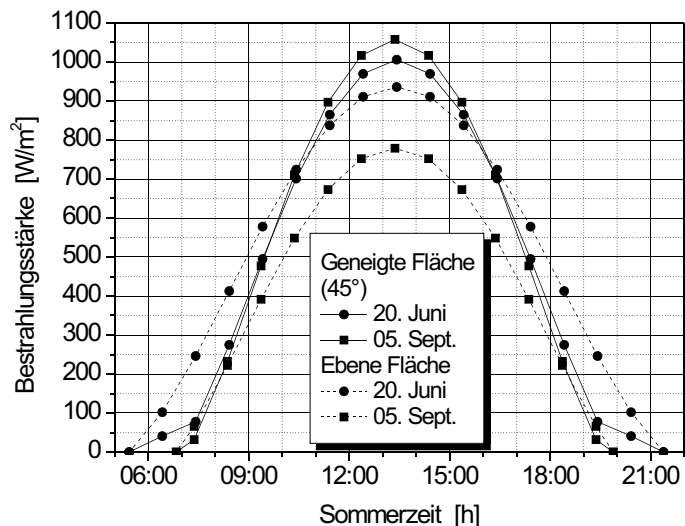
Diagramm 6.3:  
Tagesmaximalwerte der Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Ebene, gemessen mit einem Pyranometer. Standort: Stuttgart-Universität-Vaihingen.



Die höchste Außentemperatur konnte am 20.06.2000 mit 35.2 °C aufgezeichnet werden. Als kältester Tag im Messzeitraum erfasste der Außentempersensor den 25.01.2000 mit einer Minimaltemperatur von -13.5 °C.

Die Maximalwerte der Oberflächentemperatur in den einzelnen Proben wurden verzeichnet am 05.09.1999 sowie am 20.06.2000. Nicht alle Proben befanden sich bereits am 05.09.1999 im Freilandversuch. Diejenigen Testobjekte, die erst später der Freilandbewitterung ausgesetzt wurden zeigten die höchsten Temperaturwerte im Juni 2000. Ein Blick in das Diagramm 6.3 zeigt, dass die Bestrahlungsstärke im September auf eine horizontal orientierte Fläche, gemessen mittels des installierten Pyranometers geringer ist als für einen Tag im Juni. Wird jedoch die Neigung der Probenebenen um 45° gegenüber der Horizontalen bedacht, so ergibt sich für eine solche geneigte Fläche im September eine größere Bestrahlungsstärke als im Juni. Der Sonnenhöhenwinkel im Zenit beträgt im September ca. 48°, was näherungsweise der Probenneigung entspricht, im Juni hingegen steht die Sonne mittags höher und erreicht einen Winkel von ca. 64.7°. Ein Vergleich der berechneten Tagesverläufe der Bestrahlungsstärken auf die nach Süden orientierten und um 45° geneigten Proben für beide Tage der höchsten gemessenen Temperaturen ist im Diagramm 6.4

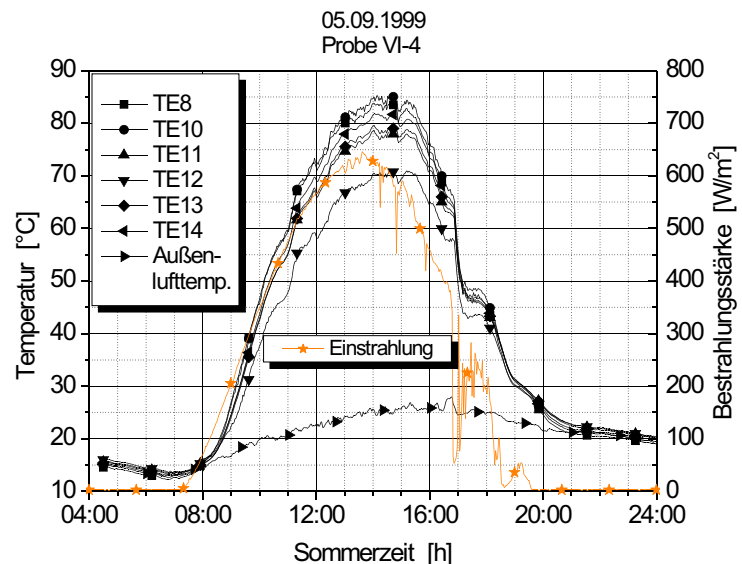
Diagramm 6.4:  
Berechnete Tagesverläufe der Bestrahlungsstärke auf eine ebene Fläche sowie auf eine unter 45° geneigte Fläche am 20.06. sowie am 05.09. bei klarem Himmel am Standort Stuttgart.



gegeben. Die Berechnungen beziehen sich auf den Standort Stuttgart und gehen von klarem Wetter aus. Das hierzu herangezogene Berechnungsprogramm ist beschrieben in [6.2].

Da die höchsten Oberflächentemperaturwerte bereits nach wenigen Tagen nach der Exposition der alterungsanfälligen, mit Folienpolarisatoren bestückten Proben auftraten, kann davon ausgegangen werden, dass die Proben zu diesem Zeitpunkt nicht vorgeschädigt waren. Entsprechende Messungen an den Polarisatorproben aus den Sammelprobenhaltern zeigten bis dato noch keinen nennenswerten Abfall der Polarisationswirkung. Die Höchstwerte der Temperaturen der Proben VI-5, VI-6, VI-7 und VI-8 wurden am 20.06.2000 gemessen. Für die Proben mit Folienpolarisatoren (Probe VI-3 und VI-4) traten diese am 05.09.1999 auf. Dem Diagramm 6.5 kann der Tagesverlauf für die Probe VI-4 mit gekreuzten Polarisatoren HNCP37 entnommen werden. Diese Probe erfuhr die größte Erwärmung. Die Höchstwerte der Oberflächentemperaturen aller Proben finden sich in der Tabelle 6.3.

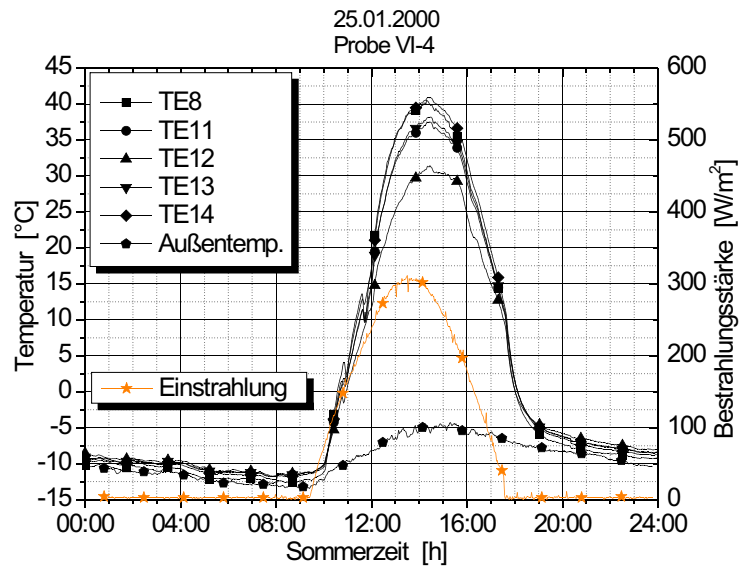
Diagramm 6.5:  
Gemessener Tagesverlauf der Oberflächentemperaturwerte der Isolierglasprobe VI-4 mit dem Folienpolarisator HNCP37 in gekreuzter Anordnung und der Bestrahlungsstärke am 5.9.1999. Anordnung der Thermoelemente (TE) siehe Diagr. 6.8. Gemittelte Windgeschwindigkeit  $\bar{v} = 0.24 \text{ m/s}$ .



Meßgröße, Datum	Probe								
	VI-1	VI-2	VI-R2	VI-3	VI-4	VI-R1	VI-5/ VI-6	VI-7	VI-8
Maximale Oberflächen- temperatur [°C]	76.6	79.4	57.4	82.3	85.3	51.1	70.8	64	62
Datum des Auftretens	5.9. 1999	5.9. 1999	5.9. 1999	5.9. 1999	5.9. 1999	5.9. 1999	20.6. 2000	20.6. 2000	20.6. 2000

Tabelle 6.3:  
Maximale Oberflächentemperaturen in den Isolierglasproben mit Tag des Auftretens.

Diagramm 6.6:  
Gemessener Tagesverlauf  
der Oberflächentemperatur-  
werte der Isolierglasprobe  
VI-4 mit dem Folienpolarisa-  
tor HNCP37 in gekreuzter  
Anordnung und der Bestrah-  
lungsstärke am 25.1.2000.  
Anordnung der Thermoele-  
mente (TE) siehe Diagr. 6.8.  
Gemittelte Windgeschwin-  
digkeit  $\bar{v}$  0,35 m/s.



Am 25.01.2000 ist das Auftreten der minimalen Oberflächentemperaturen bei allen Proben zu verzeichnen. Die Minimalwerte der Oberflächentemperaturen aller Proben im Messzeitraum sind der Tabelle 6.4 zu entnehmen. Der Tagesverlauf der Temperatur für das Muster VI-4 mit den gekreuzten Polarisatoren ist im Diagramm 6.6 veranschaulicht.

Messgröße	Probe								
	VI-1	VI-2	VI-R2	VI-3	VI-4	VI-R1	VI-5/ VI-6	VI-7	VI-8
Minimale Oberflächentemperatur [°C]	-12.3	-12.0	-12.15	-12.56	-12.74	-11.7	-11.63	-11.5	-11.5

Tabelle 6.4:  
Minimale Oberflächentemperaturen in den Isolierglasproben am 25.01.2000.

Beim Auftreten der höchsten Temperaturwerte an den Proben zeigt sich ein Temperaturgefälle im Schnitt der Proben. Bei den Isoliergläsern mit den Polarisationsfolien in paralleler und gekreuzter Anordnung tritt dabei die höchste Temperatur jeweils in der Probenmitte an der Innenseite der Polarisationsfolie, die der Sonne am nächsten liegt, auf. Geringfügig geringer ist der Temperaturwert an der Sonnenseite desselben Polarisators. In Richtung der zweiten Polarisatorfolie nimmt die Temperatur an den Oberflächen ab. Die Temperaturdifferenz zwischen der heißesten und der kühlfsten Oberfläche beträgt bei der Probe VI-4 mit gekreuzten Polarisatoren  $T_{TE10} - T_{TE11} = 7,66 \text{ K}$ . Das Isolierglas mit den Polarisationsfolien in paralleler Anordnung VI-3 zeigt eine Temperaturdifferenz von  $T_{TE4} - T_{TE1} = 10,33 \text{ K}$ . Die Temperaturwerte sind in den Diagrammen 6.7 und 6.8 aufgetragen. Bei den parallelen Polarisatoren von Probe VI-3

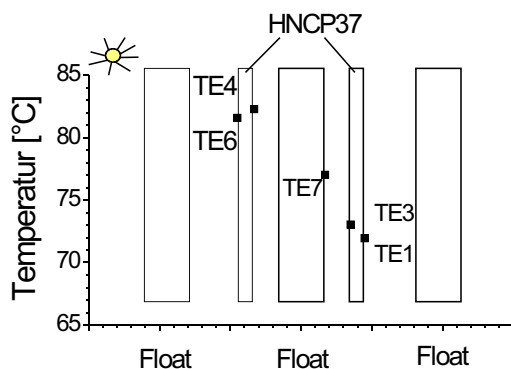


Diagramm 6.7:  
Gemessene Temperaturverteilung in Schichtungsrichtung der Probe VI-3 bei maximaler Temperatur in der Probe am 5.09.99.

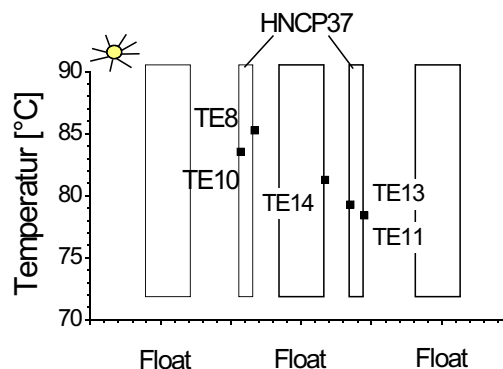


Diagramm 6.8:  
Gemessene Temperaturverteilung in Schichtungsrichtung der Probe VI-4 bei maximaler Temperatur in der Probe am 5.09.99.

absorbiert der sonnenzugewandte Polarisator auf Grund der fast vollständigen Absorption der einen Schwingungsrichtung wesentlich mehr Strahlungsenergie als die zweite Folie, die für die auftreffende polarisierte Strahlung durchlässig ist. Dies ist die Ursache für die größere Temperaturdifferenz an dieser Probe. Bei den gekreuzten Polarisatoren der Probe VI-4 ist der Unterschied der absorbierten Energiemengen beider Folien wesentlich geringer, da beide Folien jeweils eine Schwingungsrichtung absorbieren. Daher liegen die Oberflächentemperaturen dichter beieinander.

Es besteht ein Gradient der Temperatur jedoch nicht nur in Schichtungsrichtung, sondern wegen des Randeinflusses natürlich auch von der Mitte zur Begrenzung hin. Auf der Sonnenseite kann an der Probe VI-4 wegen des Ausfalles der Meßstelle TE9 der Wert nicht bestimmt werden. Für die sonnenabgewandte Seite beträgt die Differenz bei dieser Probe  $T_{TE11 TE12} 7.3 K$ . Für die Probe VI-3 liegen beide Werte vor. Bei der Sonnenseite ergibt sich  $T_{TE6 TE5} 12.2 K$ . Bei der abgewandten Seite liegt die Differenz bei  $T_{TE1 TE2} 8.6 K$ . Die Differenzwerte beziehen sich jeweils auf den Zeitpunkt der größten Erwärmung der Proben.

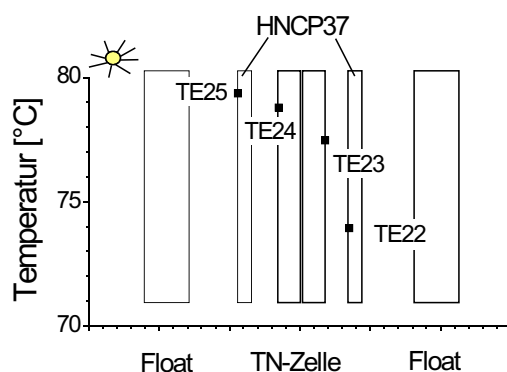


Diagramm 6.9:  
Gemessene Temperaturverteilung in Schichtungsrichtung der Probe VI-2 bei maximaler Temperatur in der Probe am 5.09.99.



Bei den Isoliergläsern mit eingebauten TN-Zellen ist auf Grund der geringeren Anzahl von Sensoren lediglich die Aussage möglich, dass auch bei diesen ein Temperaturgradient zwischen der Sonnenseite und der sonnenabgewandten Seite besteht. An der Sonnenseite treten hierbei die größeren Temperaturwerte auf. Die Temperatur nimmt dabei in Schichtrichtung von der Sonne weg ab. Allerdings sind die Temperaturdifferenzen wesentlich geringer als bei den größeren Proben mit alleinigen Polarisationsfolien. Dargestellt ist dies in Diagramm 6.9 für die Probe VI-2 zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur in der Probe. Verglichen mit der Probe VI-3 fällt bei vergleichbarem Aufbau und gleicher Energieabsorption im sonnenzugewandten Polarisator auf, dass die Temperatur in der Probe VI-2 um  $T_{TE6} - T_{TE25} = 2.2 \text{ K}$  geringer ist als an der entsprechenden Polarisatorfolie von VI-3. Dies ist auf die unterschiedliche Gewichtung des Randeinflusses zurückzuführen.

## 6.2 Temperaturverhalten im Sonnensimulator

### 6.2.1 Probenvorbereitung

Interessant ist der Einsatz von schaltbaren Zellen im Zwischenraum einer Isolierverglasung, da sie dort von äußeren statischen Belastungen freigestellt werden können. Es ist vorstellbar, eine komplette schaltfähige Einheit, bestehend aus der TN-Zelle sowie den notwendigen Polarisatoren, im Zwischenbereich einer Isolierverglasung mit weiteren Funktionsgläsern oder Folien zu kombinieren (vgl. Kapitel 7). Zur Durchführung von thermischen Messungen an Proben verschiedener Aufbauten unter künstlicher Bestrahlung kamen insgesamt sechs Varianten zum Einsatz. Um die absorbierende Wirkung einer eingebauten TN-Zelle nachzustellen dienten in diesem Fall Gläser, die mit dem Polarisator LLCP-Nr.13 (s. Anhang D-c) beschichtet wurden. Die optischen Daten entsprechen denen der Proben OP59 und OP60, dargestellt im Bericht [6.1]. Die Gläser befanden sich zur maximalen Energieabsorption in gekreuzter Anordnung und wurden an verschiedenen Stellen im Schichtaufbau der Isolierglaseinheiten eingebracht. Bei allen Isolierglasproben waren die Abmessungen identisch mit einer Breite von 175 mm und einer Länge von 350 mm. Die entsprechenden Probenaufbauten sind den Abbildungen 6.2 bis 6.6 zu entnehmen. Die Temperatursensoren (Thermoelement=TE) befanden sich bei allen Proben im Mittenbereich. In Tabelle 6.5 sind alle Proben, die zur Bestrahlung im Sonnensimulator eingesetzt wurden dargestellt.

Aus fertigungstechnischen Gründen mussten als Substrate für die Beschichtung mit dem LLCP Gläser der Dicke von 1.1 mm eingesetzt werden. Dickere Gläser hätten nur im Handrakelverfahren beschichtet werden können und wären in ihrer Schichthomogenität nicht der Qualität der maschinell beschichteten Proben gleichgekommen. Da jedoch für eine thermische Untersuchung auch die Schichthomogenität eine wesentliche Rolle spielt, wurde den dünnen Gläsern der Vorzug gegeben.

Im einfachsten Aufbau für eine schaltbare Isolierglaseinheit mit TN-Zelle ist die TN-Zelle zusammen mit den Polarisatoren im Zwischenbereich einer Isolierverglasung eingesetzt. Der Aufbau der Probe SO-1, wie er in Abbildung 6.2 dargestellt ist, bildet eine solche Isolierglaseinheit nach. Hierbei dienen die beiden in der Mitte liegenden Substrate als Träger der LLCP-Schicht. Die LLCP-Beschichtung befindet sich jeweils auf der nach außen gerichteten Seite. Beide Scheiben sind mittels eines Kleberahmens im Randbereich mit einem Abstand von ca. 1 mm voneinander fixiert gehalten, um eine Beschädigung der polarisierenden Beschichtung bei der Herstellung und dem Zusammenbau der Isolierverglasung zu verhindern. Zwischen den

Trägersubstraten und den beiden Scheibenzwischenräumen befindet sich, wie in allen übrigen Zwischenschichten, Luft.

Probenbezeichnung	Probenaufbau	Ziel der Vermessung	Dargestellt in Abbildung
SO-1	Floatglas (2 mm), SZR 8.5 mm, 2 x LLCP beschichtete Spezialweißglasscheiben, SZR 8.5 mm, Floatglas (2 mm)	Ermittlung des Verhaltens einer LLCP-TN-Zelle im abgedunkelten Zustand in mitten einer Isolierverglasung	6.2
SO-2	Spezialweißglasaußenscheibe mit innenliegender LLCP-Schicht (1.1 mm), SZR 8.5 mm, LLCP beschichtete Spezialweißglasscheibe (1.1 mm), SZR 8.5 mm, Floatglas (2 mm)	Bestimmung des Einflusses der Verlegung des äußeren LLCP an die Innenseite der Außenscheibe	6.3
SO-3	Floatglas (2 mm), SZR 8.5 mm, 2 x LLCP beschichtete Spezialweißglasscheiben, SZR 8.5 mm, Heat-Mirror-Folie SC75 , Floatglas (2 mm)	Bestimmung des Einflusses einer zusätzlichen HM-Folie im inneren SZR im Vergleich zu Probe SO-1	6.4
SO-4	Spezialweißglasaußenscheibe mit innenliegender LLCP-Schicht (1.1 mm), SZR 8.5 mm, Heat-Mirror-Folie SC75, SZR 8.5 mm, Floatglas (2 mm), SZR 8.5 mm, Spezialweißglasinnenscheibe mit außenliegender LLCP-Schicht (1.1 mm)	Bestimmung des Einflusses einer außenliegenden HM-Folie bei jeweils an den Außengläsern aufgebrachttem LLCP	6.5
SO-R	Spezialweißglasaußenscheibe (1.1 mm), SZR 8.5 mm, Floatglas (2 mm), SZR 8.5 mm, Spezialweißglasinnenscheibe (1.1 mm)	Referenzisolierglas	6.6

Tabelle 6.5:  
Proben zur Bestrahlung unter dem Sonnensimulator.

Bei der Probe mit der Bezeichnung SO-2 wurde einer der beiden Polarisatoren von der TN-Zelle entfernt positioniert. Der vordere Polarisator befindet sich nun an der Innenseite der äußeren Isolierglasscheibe, wohingegen der zweite Polarisator in der Mitte der Isolierverglasung verbleibt. Dies entspricht der Einbausituation einer TN-Zelle in der Mitte der Isolierverglasung und ist vergleichbar mit dem Aufbau PA-1 aus Kapitel 7. Dargestellt ist der Schichtaufbau hierzu in Abbildung 6.3.

Ergänzend wurden weitere Isolierglasaufbauten mit einer zusätzlichen "heat mirror"-Folie (HM-Folie) im Zwischenraum hergestellt und untersucht. Zum Einsatz kam hierbei eine Folie des Typs SC75 (s. Anhang D-o) mit einer reduzierten Emissivität an der innenliegenden Seite von 0.06 [6.3]. Eine Anordnung, die ausgehend von der Probe SO-1 eine solche Folie aufweist, ist in Abbildung 6.4 dargestellt und als SO-3 bezeichnet. Die Folie befindet sich an der innenraumzugewandten Position. Mit ihr soll der Wärmeeintrag nach Innen reduziert werden.

Eine zweite Variante mit HM-Folie im äußeren Zwischenraum ist mit der Probe SO-4 gegeben. Bei dieser Probe sind die polarisierenden Schichten getrennt. Die eine befindet sich an der äußeren Scheibe und die zweite an der Innenseite der inneren Scheibe. Der detaillierte Aufbau ist der Abbildung 6.5 zu entnehmen.

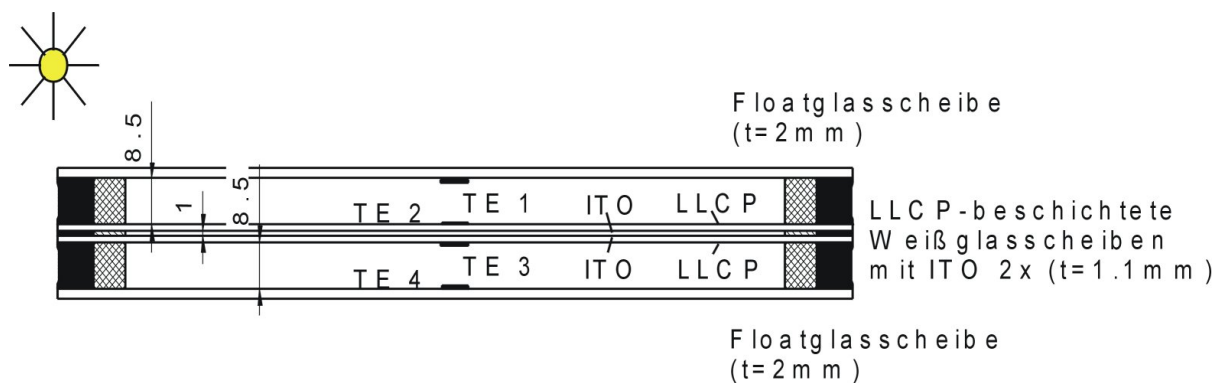


Abbildung 6.2:

Schnitt durch die Probe SO-1. Anstelle einer kompletten TN-Zelle befinden sich zwei LLC P-beschichtete Weißglasscheiben im System. Die Temperaturmeßstellen (TE) sind mit Lage und Nummer dargestellt.

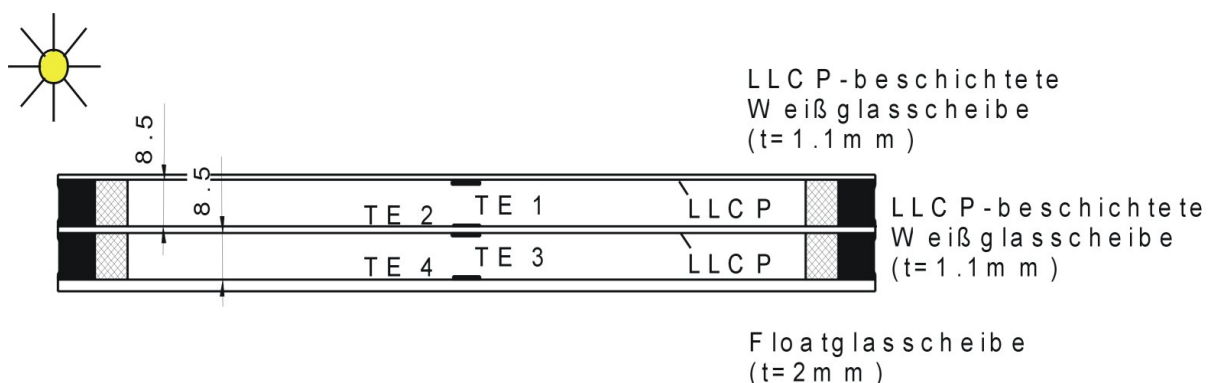


Abbildung 6.3:

Schnitt durch die Probe SO-2. Anstelle einer kompletten TN-Zelle befinden sich zwei LLC P-beschichtete Weißglasscheiben im System. Die Temperaturmeßstellen (TE) sind mit Lage und Nummer dargestellt.

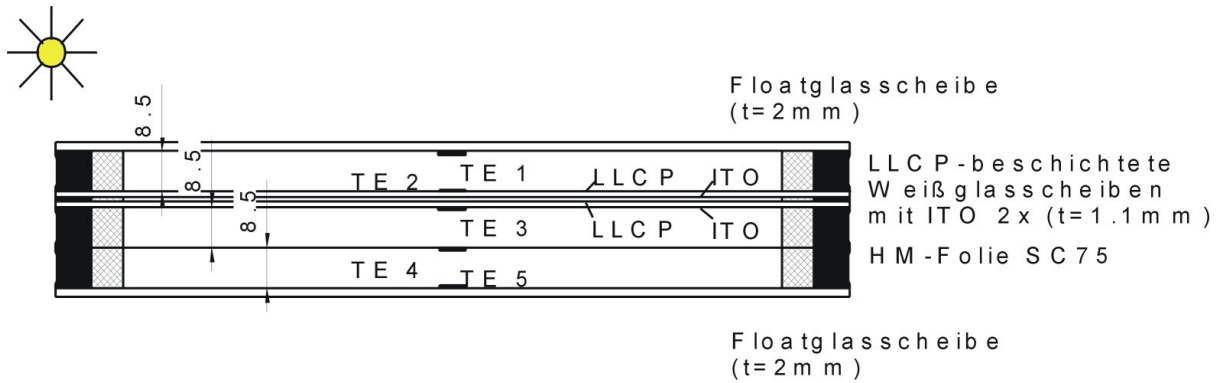


Abbildung 6.4:  
Schnitt durch die Probe SO-3. SO-3 entspricht der Probe SO-1 jedoch mit zusätzlicher HM-Folie. Die Temperaturmeßstellen (TE) sind mit Lage und Nummer dargestellt.

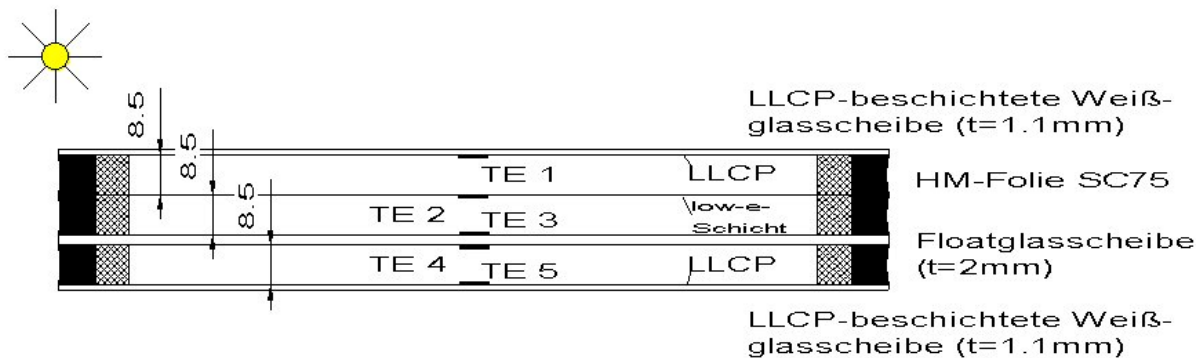


Abbildung 6.5:  
Schnitt durch die Probe SO-4. Die Temperaturmeßstellen (TE) sind mit Lage und Nummer dargestellt.

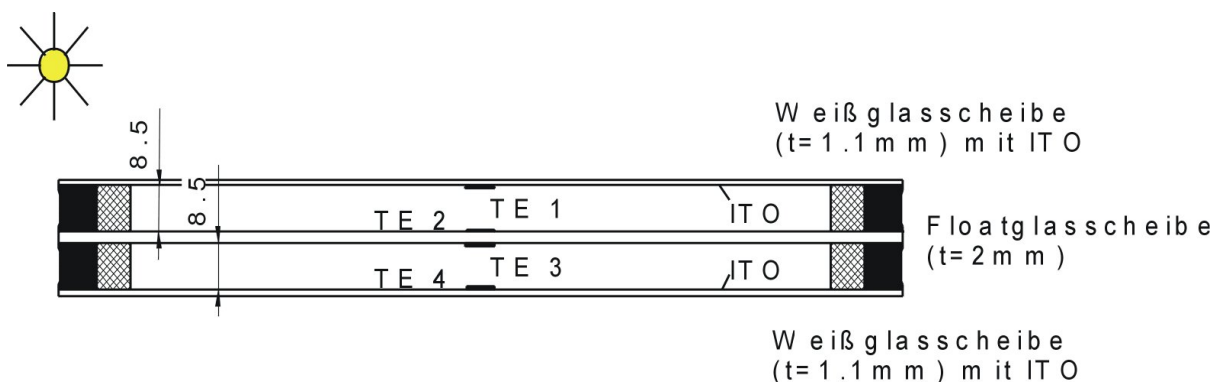


Abbildung 6.6:  
Schnitt durch die Referenzprobe SO-R. Die Temperaturmeßstellen (TE) sind mit Lage und Nummer dargestellt.

Um auch bei den Messungen unter künstlicher Sonne eine Referenzprobe vorliegen zu haben, wurde ein Isolierglaselement SO-R mit zwei Scheibenzwischenräumen gefertigt. Deren Aufbau ist in Abbildung 6.6 ersichtlich.



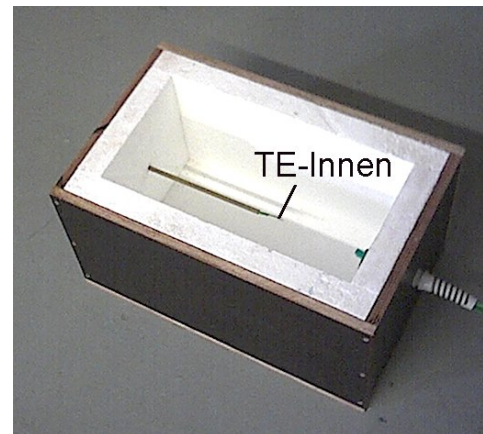
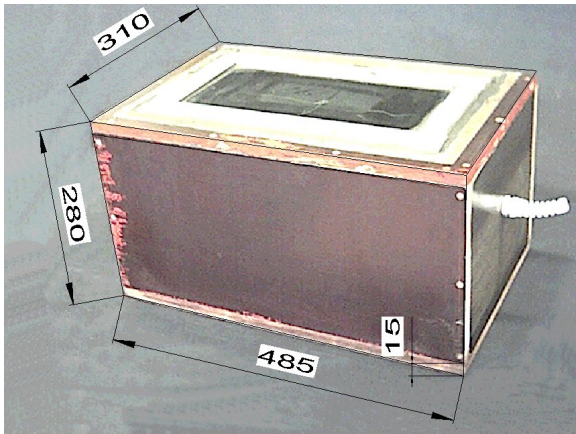


Abbildung 6.7 und 6.8:  
Thermobox zur Aufnahme der Isolierglasproben. Abmessungen und Innenaufbau.

Eingebaut wurden die Isolierglasproben in Thermoboxen aus Mehrschichtholz mit innen angebrachter 40 mm dicker Polystyrol-Hartschaum-Dämmschicht der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 030. Messdaten der Temperatur in der Mitte jeder Box lieferte wiederum ein entsprechend angeordnetes Thermoelement. Die Box ist mit ihren Abmessungen und im Innenaufbau in den Abbildungen 6.7 und 6.8 dargestellt. Der Einbau der Proben in das Gehäuse ermöglicht die Beobachtung der Erwärmung eines abgeschlossenen Luftraumes. Wegen der baugleichen Ausführung aller Thermoboxen ist ein qualitativer Vergleich der thermischen Reaktionen der Einheit aus Probe und Box für die unterschiedlichen Varianten möglich.

### 6.2.2 Sonnensimulator

Der Sonnensimulator besteht aus 361 Halogen-Kaltlichtlampen (Typ QHDM, s. Anhang D-p), die in einer Ebene angeordnet sind und als Strahlungsquelle für ein gegenüberliegendes Messfeld dienen. Zwischen dem Lampenfeld und der Probenebene befindet sich ein Glaszwischenraum, der von kühler Luft durchströmt wird. Diese Anordnung dient zur Nachbildung des kalten Himmels. Die Luft in diesem Zwischenraum wird gegenüber der Lufttemperatur in der Klimakammer um ca. 10 K abgekühlt [6.4]. Die Abbildung 6.9 zeigt eine Probenreihe, bestehend aus drei Thermoboxen vor dem Lampenfeld.

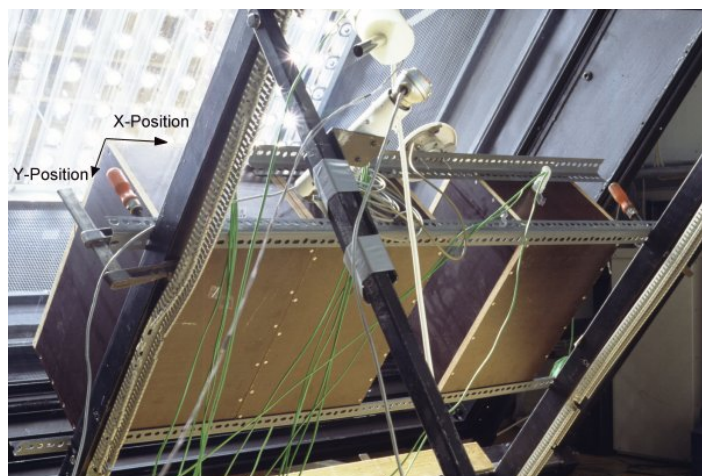


Abbildung 6.9:  
Proben vor dem Lampenfeld des Sonnensimulators

während der Messung  $858 \text{ W / m}^2$ . Während der Bestrahlung lieferte das eingesetzte Pyranometer für einen Referenzmesspunkt die entsprechenden Daten. Bei den durchgeführten Messungen war der Ventilator zur Simulation einer Luftströmung um die Proben (Windsimulator) nicht in Betrieb.

### 6.2.3 Messergebnisse

Nach einer Bestrahlungsdauer von ca. 2.5 Stunden stellt sich in den Proben annähernd ein thermisch stationärer Zustand ein. Für diesen Zustand sind die ermittelten Temperaturwerte der Sensoren in den Diagrammen 6.10 bis 6.14 dargestellt.

Im Vergleich der beiden Proben SO-1 und SO-2 fällt auf, dass bei der Anordnung der Polarisatorschicht an der Außenscheibe und in der Mitte, wie bei der Probe SO-2 ausgeführt, das Temperaturniveau der Thermoelemente niedriger liegt als bei der Variante SO-1 mit mittigen Polarisatoren. Bei der Probe SO-2 wird die am Polarisator der äußeren Scheibe absorbierte Energie vor allem durch Leitung an die kühlere Umgebung abgegeben und trägt daher weniger zur Aufheizung des Gesamtsystems bei. Trotz des geringeren Strahlungsenergieeintrages wegen der erhöhten Reflexionsver-

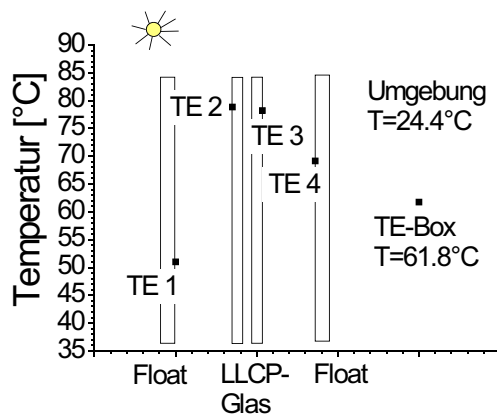


Diagramm 6.10:  
Gemessenes Temperaturprofil der Probe SO-1.

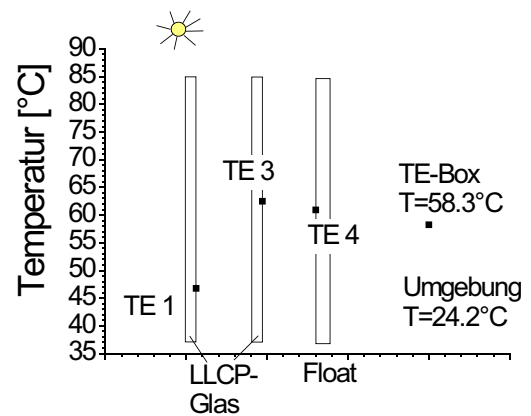


Diagramm 6.11:  
Gemessenes Temperaturprofil der Probe SO-2. TE 2 ausgefallen.

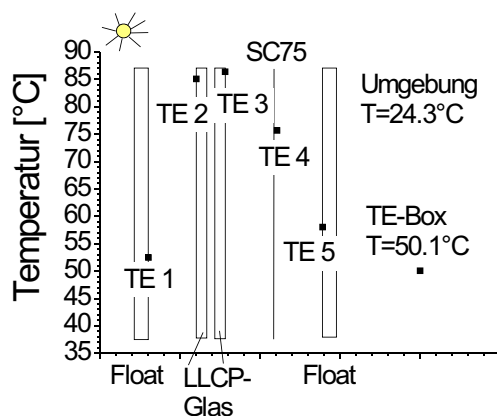


Diagramm 6.12:  
Gemessenes Temperaturprofil der Probe SO-1.

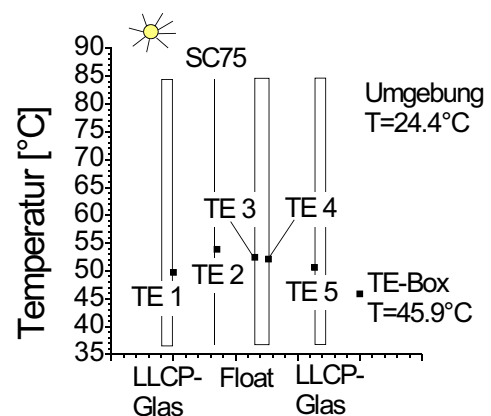


Diagramm 6.13:  
Gemessenes Temperaturprofil der Probe SO-2.



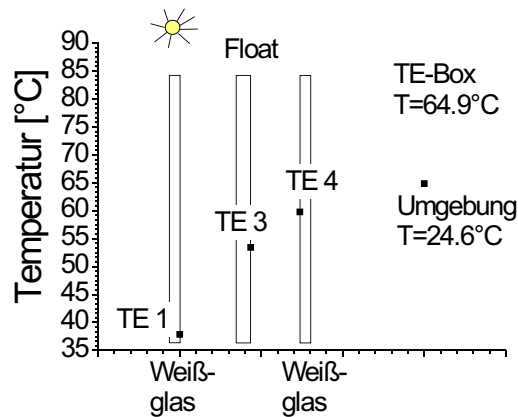


Diagramm 6.14:

Gemessenes Temperaturprofil der Referenzprobe SO-R. TE 2 ausgefallen.

Iust an der zusätzlichen LLCP-Scheibe der Probe SO-1, ergibt sich eine geringfügig höhere Temperatur in der Box dieser Probe.

Die Probe SO-3 ist gegenüber der Probe SO-1 um eine HM-Folie im innenliegenden Luftraum ergänzt. Dadurch wird sowohl die Wärmeübertragung durch Leitung als auch durch Strahlung in den Innenraum reduziert. Die Folge ist eine geringere Temperatur in der Box bei einer Erhöhung der Temperaturen an den LLCP-Schichten. Dort werden Werte von ca. 86°C erreicht.

Bei der Probe SO-4, mit der HM-Folie im äußeren Luftraum, liegen die Temperaturwerte der Sonden nahe beisammen. Die Erwärmung der LLCP-Schichten ist gering. Der Innenraum erfährt seine geringste Aufheizung. Seine Temperatur liegt um ca. 19 K unter dem Wert der Referenzprobe SO-R. Trotz der Absorption von ca. 90 % der einfallenden Strahlung in den gekreuzten Polarisatorschichten (vgl. Diagramm 7.2 oder 7.4) lag bei allen Proben die Innentemperatur der Box unter dem Messwert für die Referenzprobe ohne Einstrahlungsschutz.

### 6.3 Transmissionsänderung durch Alterung

Zur Beurteilung der Alterung der polarisierenden Schichten sowie der Polarisatorfolien durch die Freilandaussetzung dienen spektrometrische Messungen der Transmission in Einzel-, Parallel- und gekreuzter Anordnung. Den Sammelprobenhaltern wurden hierzu die Proben in Abständen von drei bis sechs Monaten für die Messungen kurzzeitig entnommen. Die Isoliergläser der Sammelproben weisen einen zweiseitigen Aufbau auf. Der eigentliche Probenhalter für jeweils neun Proben besteht aus einem 5 mm dicken Aluminiumblech mit entsprechenden Ausfräsungen zur Aufnahme der 60 mm langen und 50 mm breiten Proben. An die Rückseite des Trägerbleches ist mittels eines 8 mm dicken Aluminiumrandprofils eine 4 mm dicke Floatglasscheibe gasdicht angeklebt. Eine zweite ebenso dicke Scheibe desselben Typs wiederum mit verklebtem Aluminiumrandprofil dient zum Verschluss der Sammelprobenhalterung. Das hierzu noch zwischen dem Trägerblech und dem Abstandsprofil der Abdeckscheibe eingebrachte Dichtprofil aus Zellkautschuk konnte jedoch leider keine Gasdichtigkeit gewährleisten, so dass zur Aufnahme der eindringenden Feuchte ein Trocknungsmittel (Kieselgel) im Luftzwischenraum Verwendung fand. Dieses konnte jedoch nicht verhindern, dass eindringendes Wasser einige Proben der

LLC-Polarisatoren schädigte. Eine Übersicht zu den ausgesetzten Proben in Sammelprobenhaltern liegt in Tabelle 6.2 vor. Auch die Folienpolarisatoren aus den geschlossenen Isoliergläsern, VI-3 und VI-4, dienten nach dem Auftrennen der Isoliergläser und der Herausnahme der Folien als Messproben. Aus dem Rand und aus der Mitte der sonnenzugewandten Folien der Isoliergläser wurden jeweils zwei Proben geschnitten.

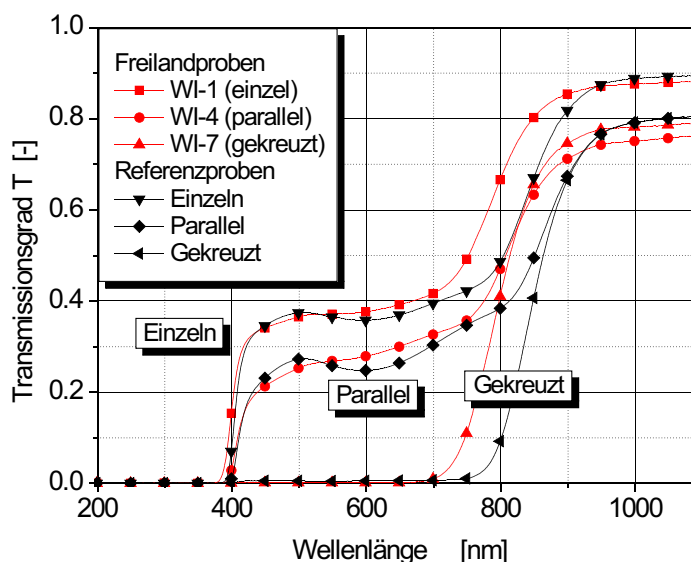
Da es bei den Freilandproben teilweise zum Eindringen von Wasser in den Isolierglasaufbau kam, lassen die entsprechenden Proben keine eindeutige Ursachenbestimmung für die Veränderung der Transmission zu. Aus diesem Grunde erfolgte eine Temperaturbelastung im Klimaschrank bei kontrollierter relativer Luftfeuchte. Die entsprechenden Ergebnisse finden sich am Ende des Abschnittes.

### 6.3.1 Folienpolarisatoren aus Freilandversuch

Zur Beobachtung des Alterungsverhaltens im Freiland diente stellvertretend für die Folienpolarisatoren auf der Basis von PVA der Zirkularpolarisator HNCP37 ( $d=0.762$  mm). Für Transmissionsmessungen fanden die Proben aus der Sammelanordnung (Probe WI-1 bis WI-9) sowie die Folien aus den geschlossenen Isolierglasproben (VI-3 und VI-4) Verwendung. Erst nach Einholung aus dem Freiland und dem Auftrennen dieser Isoliergläser konnten die Folien entnommen und vermessen werden. Daher liegen für diese Proben lediglich Messdaten vor und nach der Exposition vor. In den Sammelprobenhaltern befanden sich jeweils drei Einzelproben (WI-1 bis WI-3) sowie drei Paare in paralleler (WI-4 bis WI-6) und gekreuzter Anordnung (WI-7 bis WI-9) mit fixierter Lage zueinander. Die Fixierung schloss aus, dass es zwischen den Folien zu einer Winkelverdrehung kam, die zu einem Messfehler geführt hätte.

Wie bereits vorgehend beschrieben, ist die maximale Temperatur, die die Polarisatoren im Freiland erfuhren, wegen des Randeinflusses auch von der Probengröße abhängig. Für kleinere Proben liegen die Höchstwerte niedriger als für größere. Da die Schädigung der Polarisatorfolien wesentlich von der thermischen Belastung abhängt, ergibt es sich, dass die zugeordneten Folien aus dem Sammelprobenhalter (WI-1 bis WI-9) thermisch geringer belastet waren als die vergleichbaren Polarisatoren aus den Isoliergläsern. Auch ist aus den vorangehenden Auswertungen klar, dass die höchsten Temperaturen in dem Isolierglas mit gekreuzten Folien vorlag.

Diagramm 6.15:  
Gemessener spektraler Transmissionsgrad der Polarisatorfolie HNCP37 aus der Sammelprobe in der Anordnung einzeln, parallel und gekreuzt. Proben: WI-1, WI-4, WI-7. Referenzprobe HNCP37 ohne Freilandexposition.



Im Diagramm 6.15 sind vergleichend die Transmissionen einer Einzelfolie (WI-1), eines parallel angeordneten Folienpaares (WI-4) sowie eines Paares von gekreuzten Folien (WI-7) dargestellt. Zu erkennen ist deutlich die Veränderung der Transmissionen durch die Freilandaussetzung von etwa drei Jahren Dauer. Als Referenzprobe diente hierbei ein Polarisatorpaar gleichen Typs ohne Freilandaufenthalt.

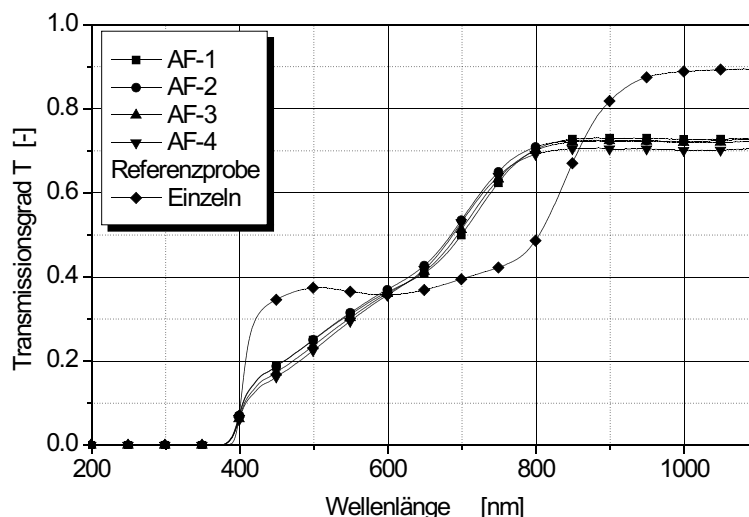
Aus der verschlossenen Isolierglasprobe mit der höchsten Temperaturbelastung (VI-4) wurden nach dem Einholen die Polarisatorfolien entnommen und die Proben AF-1 bis AF-4 hergestellt. Die Probenbezeichnungen und die Probenzuordnung sind der Tabelle 6.6 zu entnehmen. Während die Proben AF-1 und AF-2 dem Rand der Folie entstammen wurden die Proben AF-3 und AF-4 aus der Mitte der Folien hergestellt. Die Diagramme 6.16 bis 6.18 zeigen den spektralen Verlauf der Transmission für diese Proben.

Bezeichnung der Probe	Probenart
AF-1, AF-2	Aus der sonnenzugewandten Polarisationsfolie der Probe VI-4 hergestellt. Vom Rand der Polarisationsfolie entnommen.
AF-3, AF-4	Aus der sonnenzugewandten Polarisationsfolie der Probe VI-4 hergestellt. Entnommen aus der Mitte der Polarisationsfolie.

Tabelle 6.6:  
Bezeichnung und Art der Proben zur Analyse der Schädigung durch die Freilandaussetzung.

Deutlich ausgeprägt ist die Abnahme der Transmission im nahen Infrarotbereich ab etwa 850 nm sowie die Zunahme derselben im Wellenlängenbereich von 600 nm bis 850 nm, entsprechend den Farben gelb bis rot. Im Intervall von 400 nm bis 600 nm der Farben violett bis gelb verringert sich die Durchlässigkeit. Insgesamt bewirkt

Diagramm 6.16:  
Gemessener spektraler Transmissionsgrad der Proben AF-1 bis AF-4 der Polarisatorfolie HNCP37 aus der Probe VI-4 in der Anordnung einzeln. Proben: AF-1 und AF-2 (vom Rand) sowie AF-3 und AF-4 (aus der Mitte). Referenzprobe HNCP37 ohne Freilandexposition.



dies, dass der Polarisator in der Durchsicht braun erscheint. Der temperaturgeschädigte Polarisator verliert seine gute Farbneutralität. Diese ist gekennzeichnet durch eine weitgehend konstante Transmission im sichtbaren Spektrum. Auch verschlechtert sich die Sperrwirkung im gekreuzten Zustand dadurch, dass bereits ab 600 nm Strahlung die Anordnung durchdringt.

Diagramm 6.17:  
Gemessener spektraler Transmissionsgrad der Proben AF-1 parallel mit AF-2 und AF-3 parallel mit AF-4 der Polarisatorfolie HNCP37 aus der Probe VI-4. Proben: AF-1 und AF-2 (vom Rand) sowie AF-3 und AF-4 (aus der Mitte). Referenzprobe HNCP37 ohne Freilandexposition.

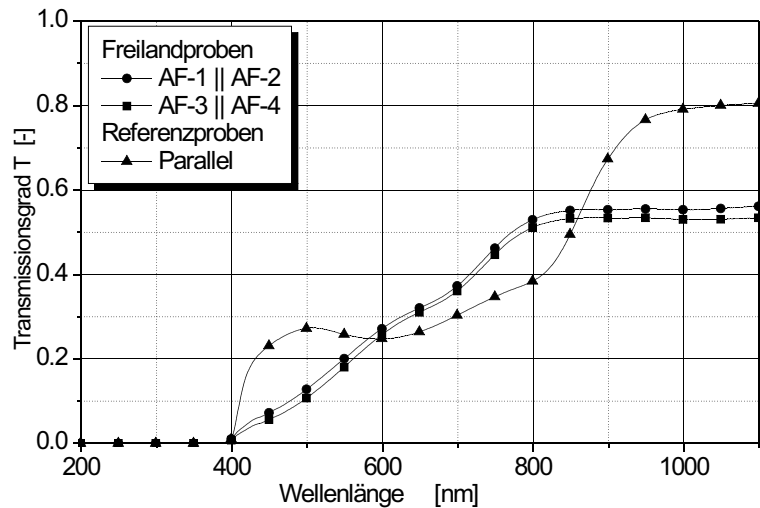
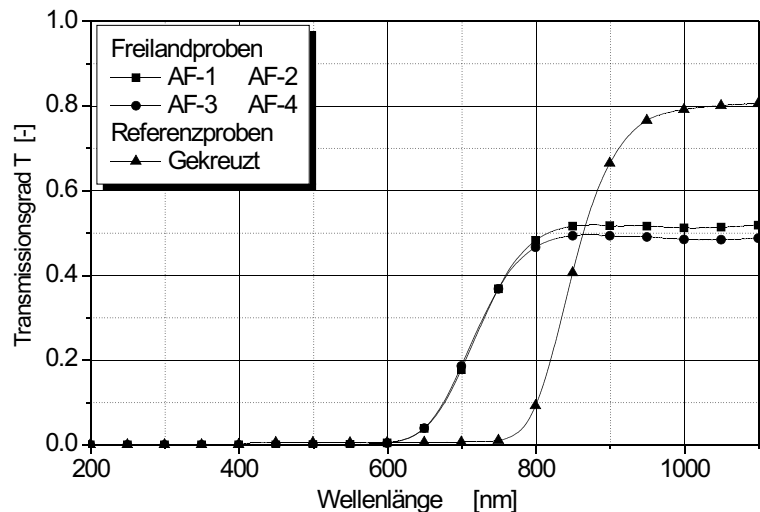


Diagramm 6.18:  
Gemessener spektraler Transmissionsgrad der Proben AF-1 gekreuzt mit AF-2 und AF-3 gekreuzt mit AF-4 der Polarisatorfolie HNCP37 aus der Probe VI-4. Proben: AF-1 und AF-2 (vom Rand) sowie AF-3 und AF-4 (aus der Mitte). Referenzprobe HNCP37 ohne Freilandexposition.



Die Anzahl und die Dauer thermischer Belastungen auf die vermessenen Polarisatorfolien kann aus den Messdatensätzen der Tagesmaxima der Temperatur näherungsweise ermittelt werden. Für die Proben aus den Isoliergläsern werden hierzu die Maxima der Thermoelementmeßstelle TE4 für die parallele Polarisatoranordnung sowie der Meßstelle TE10 für die gekreuzte Anordnung untersucht. Um auch für die Proben aus den Sammelprobenhaltern entsprechende Aussagen zu erhalten, können die Messdaten der Isolierglasproben mit den TN-Zellen herangezogen werden. Die Häufigkeitsverteilung der Tagesmaximaltemperaturen ist der Tabelle 6.7 zu entnehmen.

Der Wert  $h_i$  gibt dabei die Anzahl des Auftretens (Besetzungszahl) von Tagesmaxima innerhalb eines Temperaturintervalls an. Berücksichtigt sind dabei die Messwerte im Zeitraum vom 20.06.1999 bis zum 19.06.2000, also für einen Zeitraum von einem Jahr. Die vermessenen Polarisatorproben befanden sich etwa dreimal so lange im Freilandversuchsstand.

Temperaturintervall [°C]	Besetzungszahl für das Intervall $h_i$ [-]		
	Probe VI-1 (TE21)	Probe VI-3 (TE4)	VI-4 (TE10)
70 T 72	10	12	13
72 T 74	5	13	10
74 T 76	2	11	11
76 T 78	3	8	12
78 T 80	0	0	12
80 T 82		2	7
82 T 84		1	1
84 T 86			2

Tabelle 6.7:

Verteilung der absoluten Häufigkeiten des Auftretens der Tagesmaximalwerte der Oberflächentemperatur im jeweiligen Temperaturintervall. Die Meßstellen befanden sich jeweils auf der Sonnenseite des sonnenseitigen Polarisators. Messzeitraum vom 20.06.1999 bis zum 19.06.2000.

### 6.3.2 Glaspolarisatoren aus Freilandversuch

Von den Glaspolarisatoren befanden sich die Proben VI-5 und VI-6 in gekreuzter Anordnung im geschlossenen Isolierglas bei einer Expositionsdauer von 35 Monaten im Freiland. Die Proben VI-7 sowie VI-8 waren zunächst ebenfalls in einer geschlossenen Isolierverglasung in Einzelanordnung ausgebracht worden. Nachdem sich jedoch in dieser Verglasung Kondenswasserbildung zeigte, mussten die Proben entnommen und in die Sammelprobenhalterung verbracht werden. Die Dauer der Ausbringung für diese beiden Polarisatoren betrug 34 Monate. Wegen der gekreuzten Anordnung der Gläser VI-5 mit VI-6 erfuhren diese, verglichen mit den Polarisatoren in Einzelanordnung, die größeren thermischen Lasten. Für die Proben VI-5 und VI-6 können die Graphen der spektralen Transmission dem Diagramm 6.19 entnommen werden. Für die Proben VI-7 und VI-8 sind die entsprechenden Kurven in Diagramm 6.20 dargestellt. Die Graphen zeigen keine Degradation der Polarisation oder eine markante Veränderung der Transmission. Die geringfügigen Abweichungen der jeweils zugeordneten Datensätze einer Probe sind begründet in der nicht exakten Positionierung der Proben im Messgerät in Bezug auf den Auftreffpunkt des Messstrahles sowie in Bezug auf die Polarisationsrichtung des Strahles. Wegen der Probenstruktur mit In-

homogenität der optischen Eigenschaften führt dies zu den Unterschieden bei den Messwerten. Zu beachten ist, dass zur Reduzierung des Aufwandes bei allen Proben lediglich eine Polarisationsrichtung vermessen wurde. Die Polarisatoren VI-5 und VI-6 waren in Bezug auf die Ausrichtung zum Messstrahl um  $90^\circ$  gegeneinander verdreht. Bei der Vermessung der Polarisatoren VI-7 und VI-8 dagegen wiesen die Polarisationsrichtung der Proben jeweils in die gleiche Richtung. Die Häufigkeitsverteilung der Tagesmaximaltemperaturen im Zeitraum vom 06.10.1999 bis zum 07.10.2000 für die Proben im Isolierglas VI-5 gekreuzt mit VI-6 ist der Tabelle 6.8 zu entnehmen.

Diagramm 6.19:  
Gemessener spektraler Transmissionsgrad der Glaspolarisatorproben VI-5 und VI-6 unter teilweise polarisiertem Licht in der Anordnung einzeln, parallel und gekreuzt. Proben vor und nach der Freilandaussetzung von 35 Monaten.

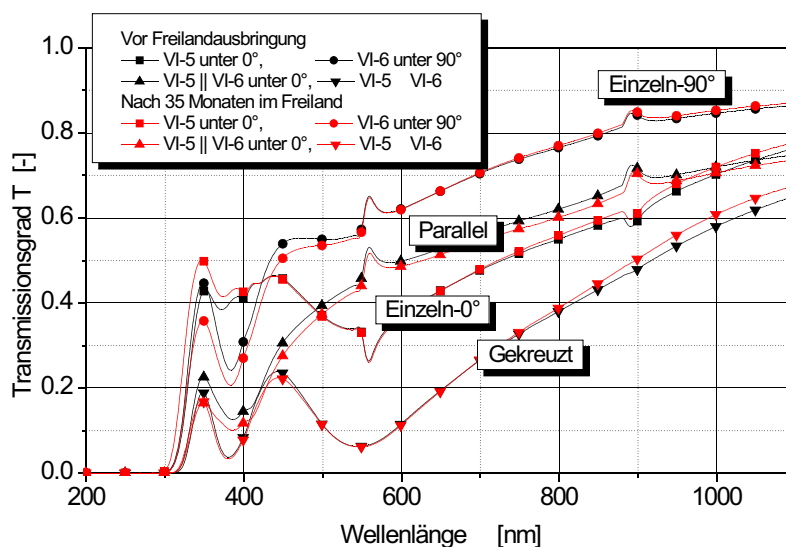
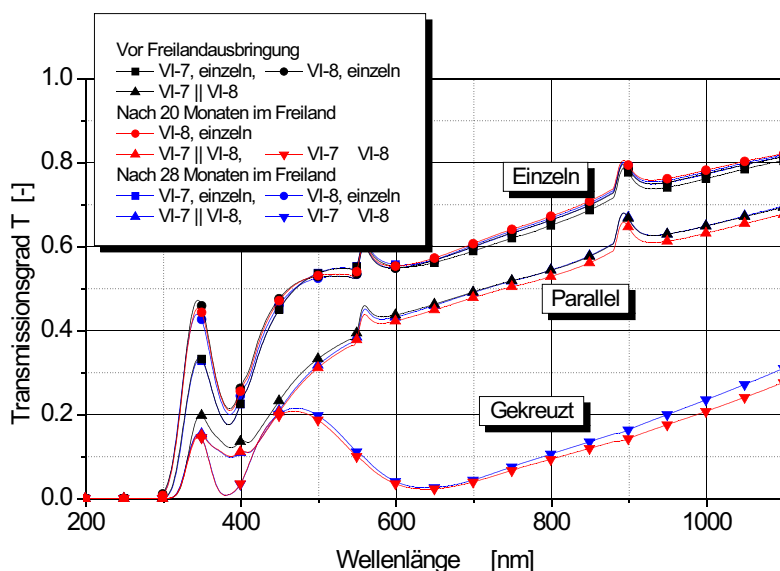


Diagramm 6.20:  
Gemessener spektraler Transmissionsgrad der Glaspolarisatorproben VI-7 und VI-8 unter teilweise polarisiertem Licht in der Anordnung einzeln, parallel und gekreuzt. Proben vor, während und nach der Freilandaussetzung von 28 Monaten.





Temperaturintervall [°C]	Besetzungszahl für das Intervall der Probe VI-5 gekreuzt mit VI-6 (TE32) $h_i$ [-]
65 T 67	10
67 T 69	11
69 T 71	2
T 71	0

Tabelle 6.8:

Verteilung der absoluten Häufigkeiten des Auftretens der Tagesmaximalwerte der Oberflächentemperatur im jeweiligen Temperaturintervall. Die Meßstellen befanden sich jeweils auf der Sonnenseite des Trägersubstrates des sonnenseitigen Polarisators. Meßzeitraum vom 06.10.1999 bis zum 07.10.2000.

### 6.3.3 LLC-Polarisatoren aus Freilandversuch

Bei den frühen Proben der Polarisatoren auf der Basis LLCP-beschichteter Substrate führen Inhomogenitäten in der Funktionsschicht zu einer Streuung bei den Messergebnissen einer Transmissionsmessung. Die Transmission variiert innerhalb gewisser Grenzen je nach der Schichtdicke am Ort des Strahldurchganges und dem Grad der Gleichausrichtung der Moleküle in der Schicht an dieser Stelle. Bei diesen Polarisatoren war es von besonderer Wichtigkeit, jeweils bei den Messungen dieselbe Stelle auf der Probe im Messfleck zu fokussieren. Dies gelang nur bedingt. Die Streuung der Transmissionswerte für die Proben aus demselben LLC-Polarisatormuster wird deutlich in Diagramm 6.21. Die Proben WI-10 und WI-11 entstammen einem, mit LLC-Nr.13 beschichteten PET-Foliensubstrat. Entsprechende Proben aus demselben beschichteten PET-Foliensubstrat ohne Freilandaussetzung dienen als Referenz. Die Differenz der Transmission zwischen diesen beiden Proben in Einzelanordnung beträgt 0.02 ( $T_n$ ) bei einer Wellenlänge von 600 nm. Bei weiteren Proben, die ebenfalls aus demselben Muster hergestellt wurden, beträgt die Differenz der Transmission zwischen der Messung mit der größten Durchlässigkeit und der Messung mit der geringsten Durchlässigkeit 0.03.

Auffällige Gemeinsamkeit aller spektralen Transmissionskurven der Proben eines Beschichtungsmusters ist der nahezu parallele Verlauf der Graphen. Wie bereits bei den Folienpolarisatoren dargestellt, führt eine Schädigung der dichroitischen Bestandteile der Polarisatoren zu einer Veränderung im Verlauf der spektralen Transmission gegenüber der unbelasteten Probe. Diese Erscheinung tritt auf für geschädigte Polarisatorproben in Einzel-, Parallel- und gekreuzter Anordnung. Eine solche Veränderung der spektralen Transmissionsgrade der Freilandproben gegenüber den nicht exponierten Referenzproben ist weder für die Proben WI-10 und WI-11 (PET-Folie/LLCP-Nr.13), noch für die Proben WI-13 und WI-15 (Spezialweißglas/LLCP-Nr.13) in den Diagrammen 6.21 und 6.22 zu erkennen. Es kann daher geschlossen werden, dass die untersuchten Polarisatorproben auf Folie (WI-10 und WI-11) und auf Glas (WI-13 und WI-15) durch die Dauer der Freilandaussetzung von

ca. 24 Monaten (WI-10, WI-11) bzw. 12 Monaten (WI-13, WI-15) keine wesentliche Veränderung der optischen Eigenschaften erfahren haben. Auch der Polarisator Nr. 15, aufgetragen auf Spezialweißglas, erfuhr bei einer Expositionsdauer von ca. 17 Monaten keine Veränderung der optischen Eigenschaften, die signifikant erkennbar auf eine Degradation der polarisierenden Eigenschaft hätten schließen lassen.

Diagramm 6.21:  
Veränderung des gemessenen Transmissionsgrades ( $T_n$ ) durch Freilandexposition. LLC-Polarisatoren WI-10 und WI-11 in der Anordnung einzeln, parallel und gekreuzt unter unpolarisiertem Licht. Transmissionsgrad des PET-Substrates. Die Referenzproben waren nicht im Freiland.

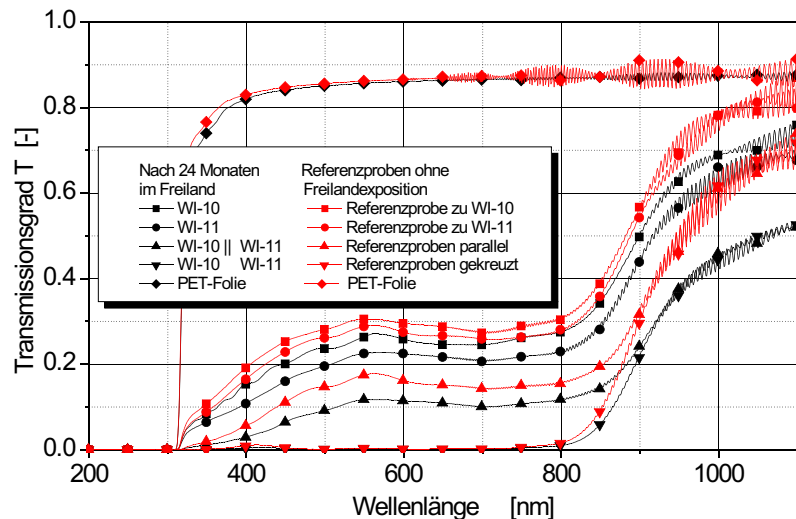
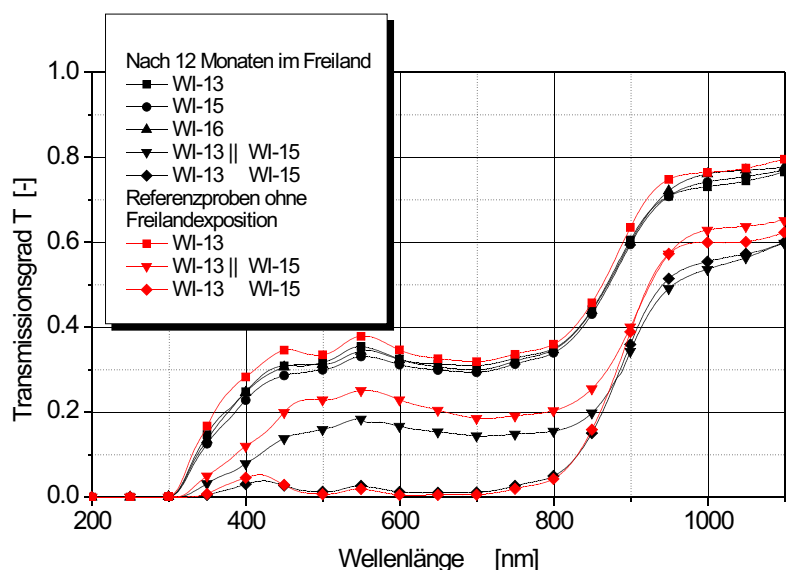


Diagramm 6.22:  
Veränderung des gemessenen Transmissionsgrades ( $T_n$ ) durch Freilandexposition. LLC-Polarisatorproben WI-13, WI-15, WI-16 in der Anordnung einzeln, parallel und gekreuzt unter unpolarisiertem Licht. Die Referenzmessung erfolgte vor der Freilandaussetzung.



## 6.4 Komponenten im Klimaschrank

Um den Einfluss der thermischen Belastung getrennt von der Bestrahlung beurteilen zu können sind einige Polarisortypen in einem Ofen durch eine konstante Temperatur von ca. 85°C bei einer relativen Luftfeuchte von 10 % belastet worden. Zu den untersuchten Typen gehören die Folienpolarisatoren HNCP37, Glaspolarisatoren, sowie LLC-Polarisatoren. Bei den LLC-Polarisatoren handelt es sich um Spezialweiß-

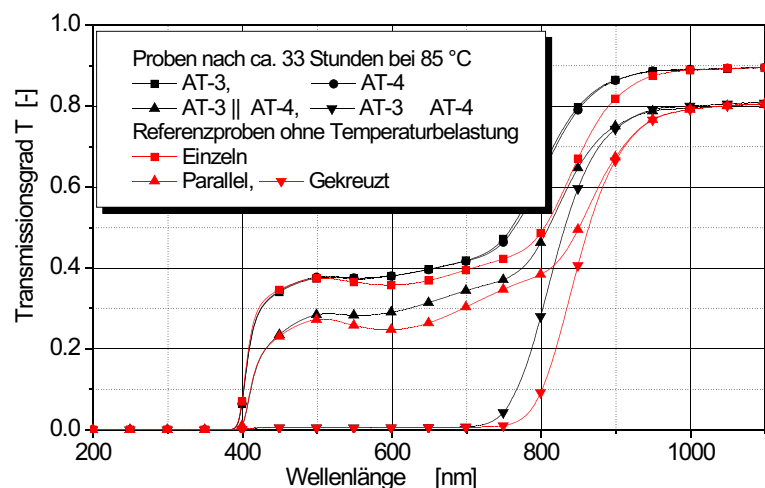
glassubstrate, die mit dem Polarisator Nr.15 beschichtete sind (s. Anhang D-c). Die Expositionszeiten der Proben im Ofen sind der Tabelle 6.9 zu entnehmen.

Probenbezeichnung	Probenart	Einwirkungsdauer bei 85°C [h]
AT-1, AT-2	Folienpolarisator HNCP37	14:10
AT-3, AT-4	Folienpolarisator HNCP37	32:40
AT-5, AT-6	Glaspolarisator	25:40
AT-7, AT-8	Spezialweißglas mit LLCN-Nr.15	25:40

Tabelle 6.9:  
Probenbezeichnung, Probenart sowie Einwirkungsdauer der Temperaturbelastung von 85°C auf die Proben.

Die Proben der Folienpolarisatoren zeigen nach einer thermischen Behandlung von ca. 14 Stunden Dauer bereits eine deutliche Veränderung der Transmission in allen Zuständen. Nach einer Temperaturbehandlung von etwa 33 Stunden werden die Veränderungen noch deutlicher. Diagramm 6.23 veranschaulicht dies. Bei den Glaspolarisatoren erfolgte die spektrale Vermessung nach einer Einwirkungsdauer der Temperaturlast von ca. 26 Stunden. Eine Veränderung der Transmissionseigenschaften wurde nicht festgestellt. Auch bei den LLC-Polarisatoren konnte keine Veränderung der Transmissionseigenschaften durch die thermische Behandlung von ca. 26 Stunden Dauer bemerkt werden.

Diagramm 6.23:  
Veränderung des gemessenen spektralen Transmissionsgrades von Folienpolarisatoren unter Temperatureinwirkung. Folienpolarisatorproben AT-3 und AT-4 in der Anordnung einzeln, parallel sowie gekreuzt vor und nach einer Temperaturbelastung.



## 7. Implementierungsmöglichkeiten von LLC-P-TN-Zellen in adaptive Verglasungen

### 7.1 Prinzipieller Aufbau der Isolierglasvarianten

Zwei unterschiedliche Versionen der Einbindung einer LLC-P-TN-Zelle in eine Isolierverglasung sollen nachfolgend vorgestellt und bezüglich ihrer wesentlichen Eigenschaften spezifiziert werden. Die TN-Zelle wird dabei entweder in den Zwischenraum der Isolierverglasung eingefügt oder sie ist Bestandteil der äußeren Isolierglasscheibe. Bei den Versionen PA-1 und PA-2 befindet sich einer der beiden Polarisatoren als Funktionsbeschichtung auf der Innenseite der äußeren Isolierglasscheibe und der zweite in der TN-Zelle. Die TN-Zelle selbst ist wiederum im Zwischenraum angeordnet. Bei den Varianten PA-3 und PA-4 wird die äußere Glasscheibe der Isolierverglasung zum Zellenbau mit verwendet. Die TN-Zelle ist somit integraler Bestandteil der äußeren Glasscheibe. Die LLC-P-Polarisatoren befinden sich bei dieser Version im Zellinneren. Der Vorteil dieser Anordnung gegenüber PA-1 und PA-2 besteht darin, dass eine Glasscheibe bzw. ein Trägersubstrat eingespart wird und die Transmission ( $T_{SOL}$ ) geringfügig vergrößert wird. Durch die Platzierung des Polarisators an der Außenscheibe soll ein geringerer Wärmeeintrag in den Innenraum durch eine stärkere Wirksamkeit der thermischen Anbindung an das Außenklima erreicht werden. Um auch für ein Fensterelement den Einfluß der LLC-P-Schichtdicke erfassen zu können werden die zwei Schichtdicken von 200 nm sowie 400 nm für die Polarisatorschicht berücksichtigt.

Verglasungsprobe	Isolierglasaufbau	TN-Zellenaufbau
PA-1	Weißglas (4 mm) mit LLC-P (200 nm), SZR (6 mm), TN-Zelle, SZR (6 mm), Weißglas (4 mm)	Spezialweißglas-Substr. (1.1 mm), ITO, $SiO_2$ , PI, Flüssigkristall mit Spacer 10 $\mu m$ , PI, LLC-P-Nr.15 (200 nm), $SiO_2$ , ITO, Spezialweißglas-Substrat (d=1.1 mm)
PA-2	Weißglas (4 mm) mit LLC-P (400 nm), SZR (6 mm), TN-Zelle, SZR (6 mm), Weißglas (4 mm)	dito aber LLC-P-Nr.15 (400 nm)
PA-3	Weißglas (4 mm) mit TN-Zelle, SZR (6 mm), Weißglas (4 mm)	Weißglas (4 mm), ITO, $SiO_2$ , LLC-P-Nr.15 (200 nm), PI, Flüssigkristall mit Spacer 10 $\mu m$ , PI, LLC-P-Nr.15 (200 nm), $SiO_2$ , ITO, Spezialweißglas-Substr. (1.1 mm)
PA-4	Wie Probe PA-3	Wie Probe PA-3 aber LLC-P-Nr.15 (400 nm)

Tabelle 7.1:  
Untersuchte Isolierglasvarianten von Außen nach Innen mit NW-TN-Zelle. SZR: Scheibenzwischenraum.

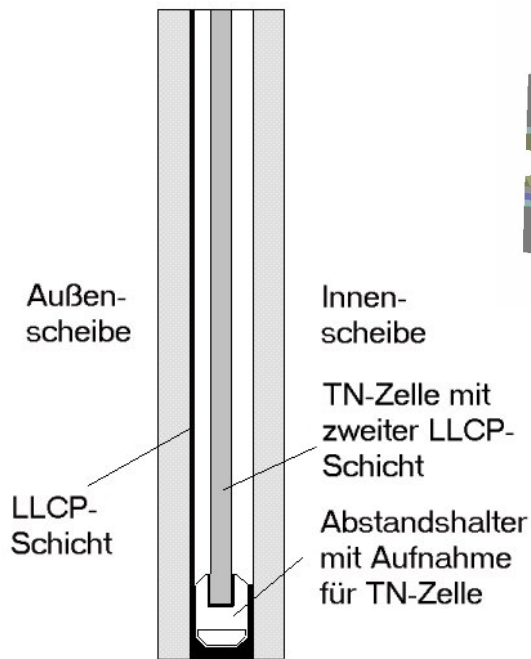


Abbildung 7.1:  
Teilschnitt durch ein Isolierglas mit TN-Zelle entsprechend dem Aufbau von PA-1 und PA-2 (ohne Maßstab).

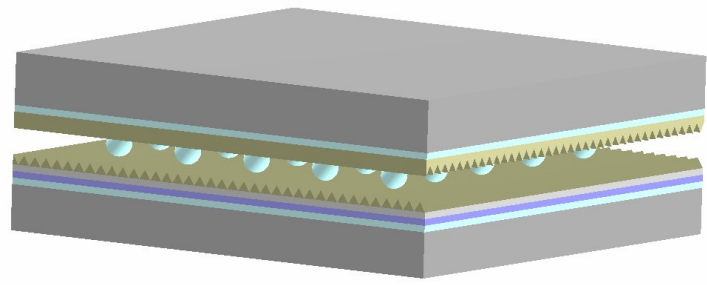


Abbildung 7.2:  
Ausschnitt aus der LLCPC-TN-Zelle mit dem Aufbau bestehend aus Weißglas-Substrat ( $d=1.1$  mm), ITO, PI, Flüssigkristall mit Abstandshalter von  $10 \mu\text{m}$ , PI, LLCPC-Nr.15 (200 nm bzw. 400 nm),  $\text{SiO}_2$ , ITO, Weißglas-Substrat ( $d=1.1$  mm).

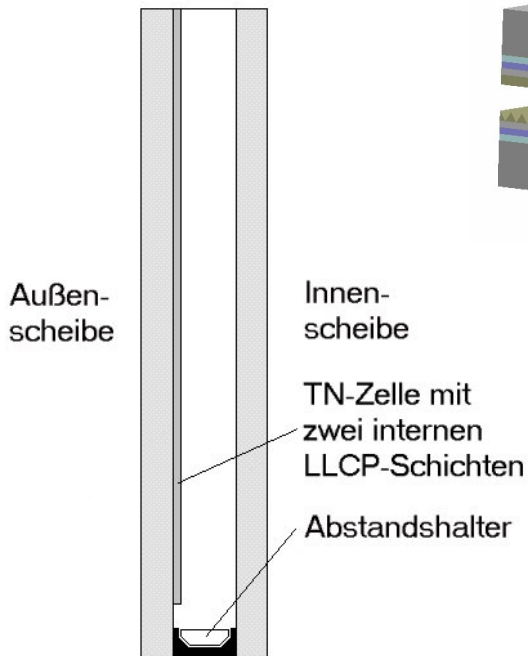


Abbildung 7.3:  
Teilschnitt durch ein Isolierglas mit TN-Zelle entsprechend dem Aufbau von PA-3 und PA-4 (ohne Maßstab).

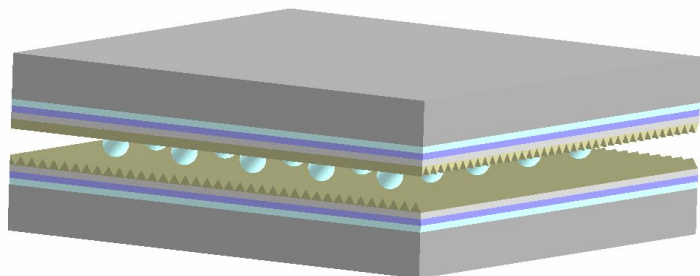


Abbildung 7.4:  
Ausschnitt aus der LLCPC-TN-Zelle mit dem Aufbau bestehend aus Weißglas-Substrat ( $d=4$  mm), ITO,  $\text{SiO}_2$ , LLCPC-Nr.15 (200 nm bzw. 400 nm), PI, Flüssigkristall mit Abstandshalter  $10 \mu\text{m}$ , PI, LLCPC-Nr.15 (200 nm bzw. 400 nm),  $\text{SiO}_2$ , ITO, Weißglas-Substrat ( $d=4$  mm).

Bei geringeren Schichtdicken als 200 nm erweist sich der mögliche Schaltheub als gering. Bei Dicken über 400 nm wiederum sinkt die Helltransmission zu stark. Der Aufbau der Isoliergläser und der enthaltenen TN-Zellen ist für die vier Versionen in Tabelle 7.1 beschrieben und in den Abbildungen 7.1 bis 7.4 visualisiert. Die Dicken der Einzelschichten im Innenaufbau der TN-Zellen entsprechen den Werten aus Kapitel 5.

## 7.2 Optische Eigenschaften der untersuchten Isolierglaseinheiten

Auch für die Isolierglaseinheiten erfolgte die Bestimmung der optischen Kennwerte wiederum numerisch unter Anwendung des Programmsystems DIMOS. Die Werkstoffkennwerte, wie sie für die Berechnungen zu Grunde gelegt wurden, entsprechen den Daten, die auch für die Berechnungen in Kapitel 5 Verwendung fanden. Gleiches gilt für die Wahl der Wellenlängen und Schrittweiten in Elevations- und Azimutrichtung bei der Bestimmung der winkelabhängigen optischen Kenndaten. Auf die Darstellung der Polarendiagramme der winkelabhängigen Transmission wird an dieser Stelle verzichtet, da sich die Isolierglasproben lediglich quantitativ von den entsprechenden TN-Zellen-Proben unterscheiden. Für die Hell- und Dunkel-Zustände der

Diagramm 7.1:  
Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad (4x4-Matrix-Methode) der Isolierglasprobe PA-1 bei senkrechtem Lichteinfall im geschalteten und ungeschalteten Zustand. LLCPSchichtdicke 200 nm.

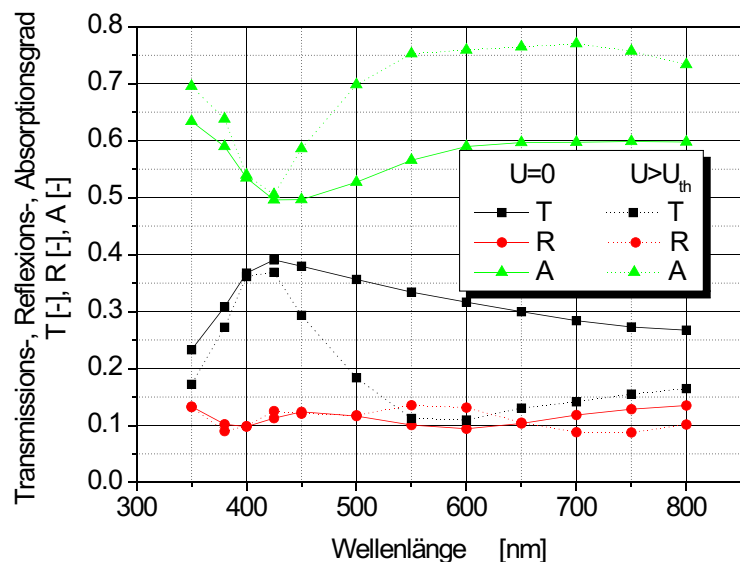


Diagramm 7.2:  
Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad (4x4-Matrix-Methode) der Isolierglasprobe PA-2 bei senkrechtem Lichteinfall im geschalteten und ungeschalteten Zustand. LLCPSchichtdicke 400 nm.

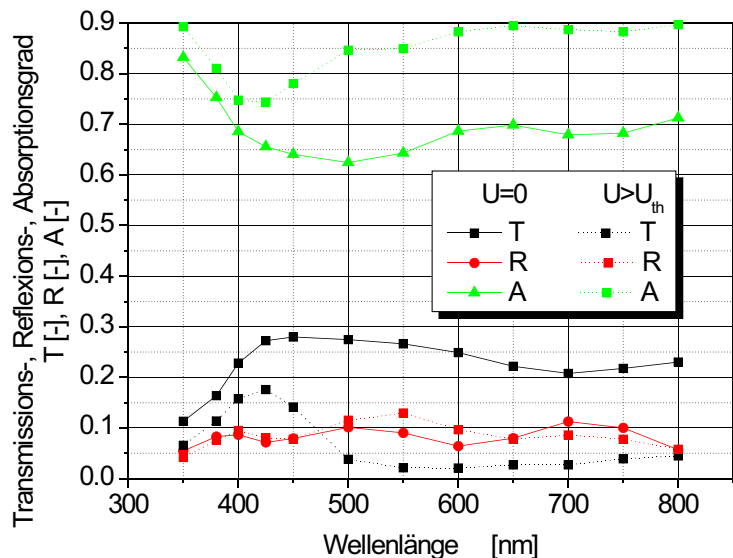




Diagramm 7.3:  
 Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad (4x4-Matrix-Methode) der Isolierglasprobe PA-3 bei senkrechtem Lichteinfall im geschalteten und ungeschalteten Zustand. LLCPSchichtdicke 200 nm.

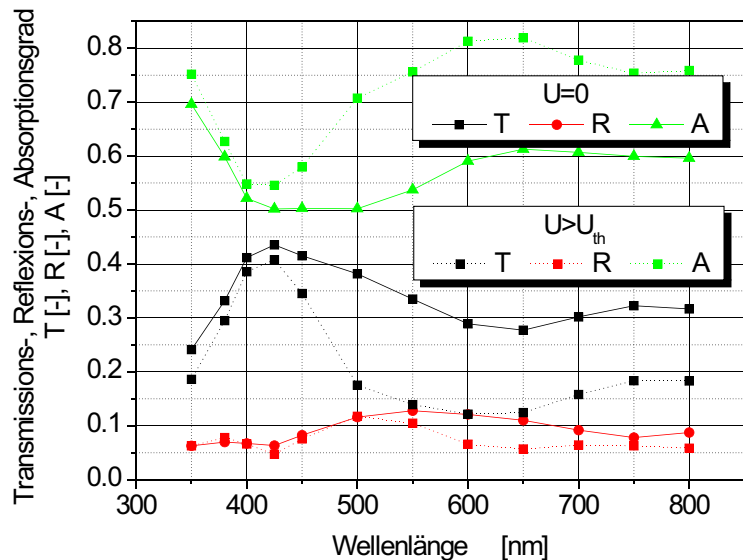
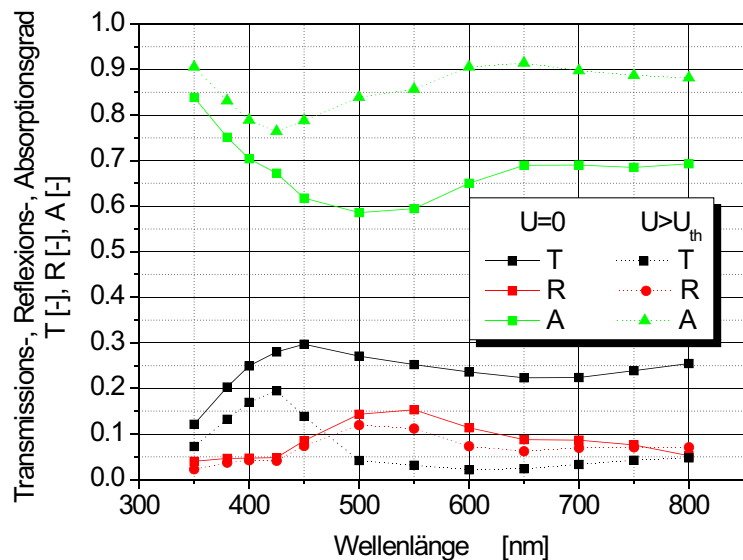


Diagramm 7.4:  
 Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad (4x4-Matrix-Methode) der Isolierglasprobe PA-4 bei senkrechtem Lichteinfall im geschalteten und ungeschalteten Zustand. LLCPSchichtdicke 400 nm.



Isoliergläser mit TN-Zellen sind die spektralen, optischen Kenndaten für senkrechten Strahleinfall den Diagrammen 7.1 bis 7.4 zu entnehmen. Die lichttechnischen und radiometrischen Integralwerte für den sichtbaren Spektralbereich bei  $0$  finden sich in der Tabelle 7.2 wieder.

Werden diese verglichen mit den Daten aus Tabelle 5.2 der LLCPTN-Zellen der entsprechenden LLCPSchichtdicken, so ergeben sich bei der Transmission im Hellzustand folgende Veränderungen. Gegenüber den Werten der LLCPTN-Zellen ist eine Reduktion der Transmission um ca. 3,5 % bis 4,5 % ( $T_n$ ) bei den Isolierglasproben zu beobachten. Dies gilt für die radiometrischen wie auch für die lichttechnischen Werte.

Zu bemerken ist, dass sich die Anordnungen PA-1 und PA-3 sowie PA-2 und PA-4 in der Hell-Transmission bei den lichttechnischen Werten um weniger als 1% unterscheiden. Bei den radiometrischen Daten ist die maximale Differenz 1,4 % ( $T_{n,SOL}$ ). Durch die Isolierglasproben PA-3 und PA-4 gelangt mehr Strahlung hindurch als durch die entsprechenden Proben PA-1 und PA-2. Da die Unterschiede zwischen den beiden

Isolierglasvarianten jedoch sehr gering ausfallen und die Varianten PA-1 und PA-2 technisch einfacher ausführbar erscheinen, ist die Anordnung der TN-Zelleneinheit in der Mitte der Isolierverglasung wie bei diesen Varianten vorgestellt zu bevorzugen. Zu beachten ist hierbei die Tatsache, dass sämtliche Glaselemente mit den Eigenschaften von Weißglas in die Berechnungen gingen. Wird an der Stelle von Weißglas stärker absorbierendes Glas eingesetzt, so wird sich ein deutlicherer Unterschied bei der Helltransmission zu Gunsten der Varianten PA-3 und PA-4 herausstellen.

Kenngröße	Probenbezeichnung			
	PA-1	PA-2	PA-3	PA-4
	Versorgungsspannung [V]			
	$U_0$ $U_{th}$	$U_0$ $U_{th}$	$U_0$ $U_{th}$	$U_0$ $U_{th}$
$T_{n,VIS}$ [-]	0.33 0.14	0.26 0.03	0.33 0.15	0.25 0.04
$R_{n,VIS}$ [-]	0.10 0.13	0.08 0.11	0.12 0.09	0.13 0.10
$A_{n,VIS}$ [-]	0.56 0.73	0.65 0.86	0.55 0.76	0.61 0.87
$T_{n,SOL}$ [-]	0.33 0.18	0.25 0.06	0.34 0.20	0.25 0.06
$R_{n,SOL}$ [-]	0.11 0.11	0.09 0.09	0.10 0.08	0.10 0.08
$A_{n,SOL}$ [-]	0.56 0.70	0.67 0.85	0.56 0.72	0.65 0.86

Tabelle 7.2:  
Lichttechnische (Index VIS) und strahlungsphysikalische (Index SOL) Kenngrößen Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad unter flächennormaler Bestrahlung im Wellenlängenintervall 380 nm – 780 nm für die Proben aus Tabelle 7.1. Ergebnisse gerundet.

Die hemisphärischen, spektralen Daten der Isolierglasproben können den Diagrammen 7.5 bis 7.8 entnommen werden. Die integralen Werte hierzu sind in den Tabellen 7.3 und 7.4 zusammengestellt. Werden auch diese wieder verglichen mit den Ergebnissen der LLCPTN-Zelle gleicher Polarisatorschichtdicke, so zeigt sich bei den lichttechnischen Transmissionsgraden eine Verringerung im Bereich 19 %  $T_{h,VIS}$  4,6 % und bei den radiometrischen Transmissionen eine Abschwächung um 2 %  $T_{h,SOL}$  5,1 %. Der Einfluß der Isolierglasordnung ist bei den Zellen geringerer LLCPTN-Schichtdicke größer als bei den dickeren Schichten und für die strahlungsphysikalischen Werte größer als für die lichttechnischen.

Diagramm 7.5:  
Hemisphärischer spektraler  
Transmissions-, Reflexions-  
und Absorptionsgrad (4x4-Ma-  
trix-Methode) der Isolierglas-  
probe PA-1 im geschalteten  
und ungeschalteten Zustand.  
LLCP-Schichtdicke 200 nm.

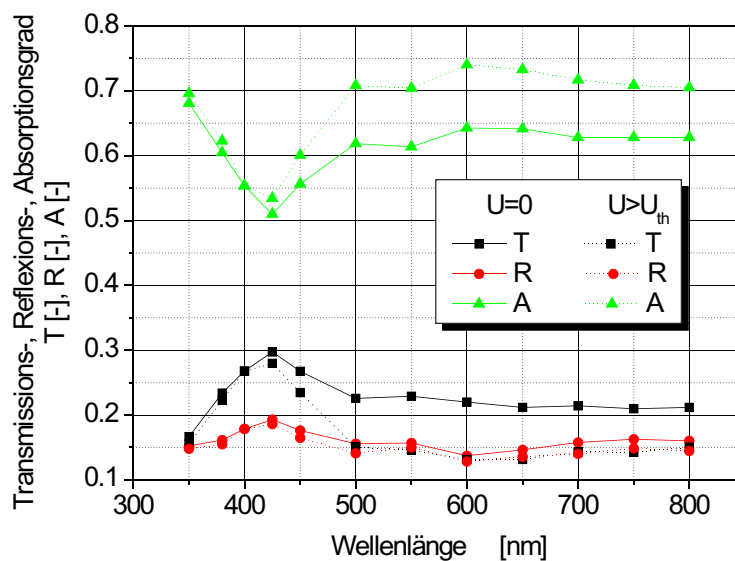


Diagramm 7.6:  
Hemisphärischer spektraler  
Transmissions-, Reflexions-  
und Absorptionsgrad (4x4-Ma-  
trix-Methode) der Isolierglas-  
probe PA-2 im geschalteten  
und ungeschalteten Zustand.  
LLCP-Schichtdicke 400 nm.

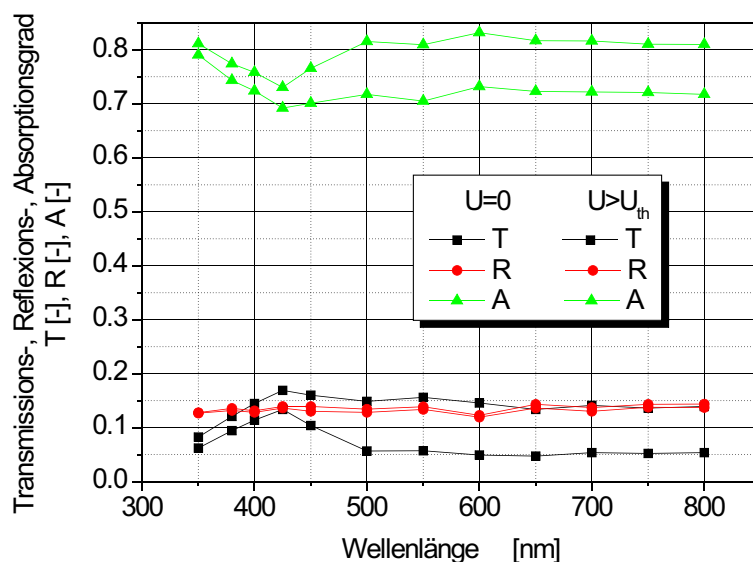


Diagramm 7.7:  
Hemisphärischer spektraler  
Transmissions-, Reflexions-  
und Absorptionsgrad (4x4-Ma-  
trix-Methode) der Isolierglas-  
probe PA-3 im geschalteten  
und ungeschalteten Zustand.  
LLCP-Schichtdicke 200 nm.

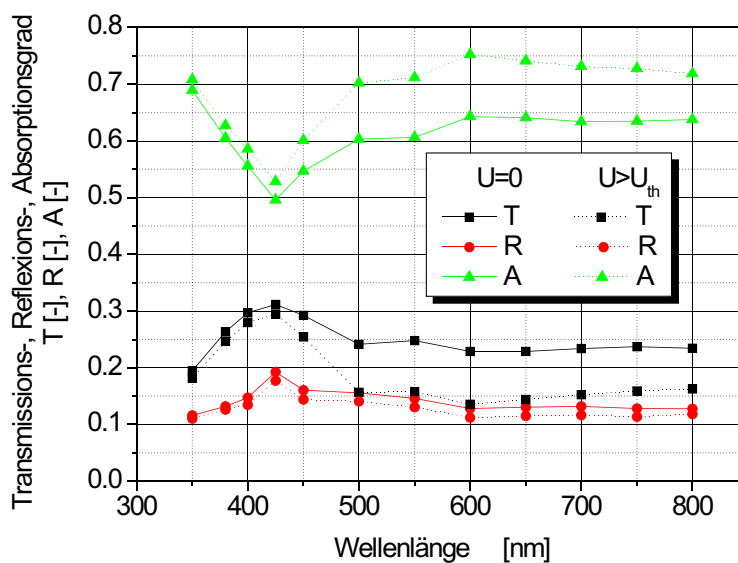
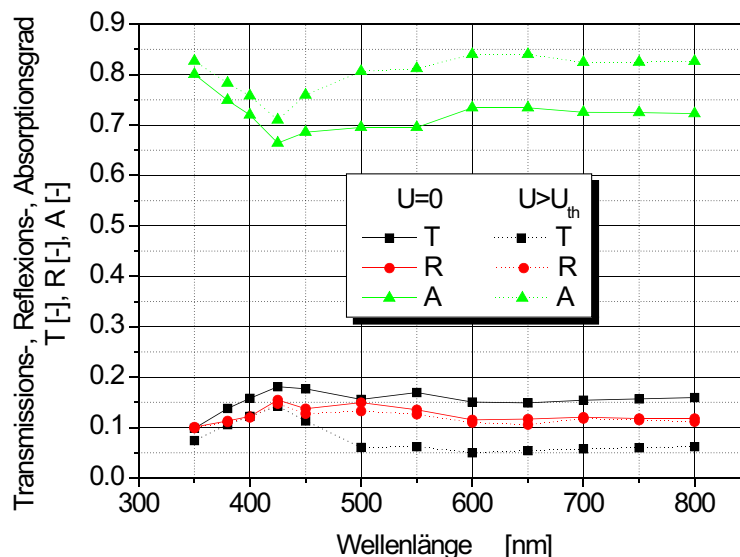


Diagramm 7.8:  
Hemisphärischer spektraler  
Transmissions-, Reflexions-  
und Absorptionsgrad (4x4-  
Matrix-Methode) der Isolier-  
glasprobe PA-4 im geschalte-  
ten und ungeschalteten Zu-  
stand. LLCSP-Schichtdicke  
400 nm.



Zur besseren Einschätzung der Ergebnisse sei an dieser Stelle noch auf die hemisphärischen Transmissionsgrade von üblichen Sonnenschutzgläsern eingegangen. Ein System bestehen aus einer absorbierenden grauen Außenscheibe ( $d=6$  mm, s. Anhang E-f) und einer Innenscheibe aus Floatglas ( $d=6$ mm, s. Anhang E-a) weist einen lichttechnischen hemisphärischen Transmissionsgrad ( $T_{h,VIS}$ ) von 0.31 auf. Ein Hochleistungs-Sonnenschutz-Isolierglas auf der Basis einer hochreflektierenden, Low-E beschichteten Außenscheibe ( $d=6$  mm, s. Anhang E-g) mit wiederum einer Floatglas-Innenscheibe ( $d=6$  mm, s. Anhang E-a) erreicht einen lichttechnischen hemisphärischen Transmissionsgrad von 0.54. Die Daten der Sonnenschutzgläser wurden mit dem Programm Window 5.1 berechnet [7.1].

Kenngroße	Probenbezeichnung			
	PA-1	PA-2	PA-3	PA-4
	Versorgungsspannung [V]			
	$U=0$	$U=0$	$U=0$	$U=0$
	$U < U_{th}$	$U < U_{th}$	$U < U_{th}$	$U < U_{th}$
$T_{h,VIS}$ [-]	0.23 0.15	0.15 0.06	0.24 0.16	0.16 0.06
$R_{h,VIS}$ [-]	0.15 0.14	0.13 0.13	0.14 0.13	0.13 0.12
$A_{h,VIS}$ [-]	0.62 0.71	0.72 0.81	0.61 0.72	0.71 0.82

Tabelle 7.3:  
Hemisphärische lichttechnische (Index VIS) Kenngroßen Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad für Proben aus Tabelle 7.1 im sichtbaren Spektrum. Ergebnisse gerundet.

Kenngröße	Probenbezeichnung			
	PA-1	PA-2	PA-3	PA-4
	Versorgungsspannung [V]			
	$U_0$	$U_0$	$U_0$	$U_0$
	$U_{th}$	$U_{th}$	$U_{th}$	$U_{th}$
$T_{h,SOL}$ [-]	0.23	0.15	0.25	0.16
	0.17	0.07	0.18	0.07
$R_{h,SOL}$ [-]	0.16	0.14	0.14	0.13
	0.15	0.13	0.13	0.12
$A_{h,SOL}$ [-]	0.61	0.72	0.61	0.71
	0.68	0.80	0.69	0.81

Tabelle 7.4:  
Hemisphärische strahlungsphysikalische (Index SOL) Kenngrößen Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad für Proben aus Tabelle 7.1 im sichtbaren Spektrum. Ergebnisse gerundet.

### 7.3 Farbmaßzahlen

Für die untersuchten Isolierglasaufbauten wird das Farbverhalten wesentlich von den spektralen Eigenschaften des Polarisators bestimmt. Für die vier Typen sind die Farbmaßzahlen in den Tabellen 7.5 sowie 7.6 angegeben. Verwendung fanden hierbei die optischen Kenngrößen Transmission und Reflexion aus Tabelle 7.2 für senkrechten Strahlungseinfall auf die Proben. Gegenüber dem Hellzustand kommt es beim Ansteuern der TN-Zellen im Isolierglasverbund zu einer Verschiebung der Farbwirkung des matt weißen Körpers hin in Richtung Rot und Blau. Mit zunehmender Schichtdicke des LLCP ist die Verschiebung ausgeprägter. In der Ansicht erscheinen die Proben im geschalteten Zustand gegenüber dem Hellzustand in Richtung Grün verschoben. Ausnahme bilden hierbei die Proben PA-1 und PA-2 mit einer Verschiebung in Richtung Rot. Auf der Blau-Gelb-Achse kommt es bei diesen Proben zu einer Veränderung der Farbwirkung hin zum Gelben, wohingegen bei den Proben PA-3 und PA-4 die Änderung in Richtung Blau weist. Um einen Eindruck von



Abbildung 7.5:  
Matt weißer Körper unter transmittiertem Tageslicht bei Probe PA-3. Links Hellzustand. Rechts Dunkelzustand.



Abbildung 7.6:  
Matt weißer Körper unter transmittiertem Tageslicht bei Probe PA-4. Links Hellzustand. Rechts Dunkelzustand.



Abbildung 7.7:  
Ansicht der Probe PA-3 unter Tageslicht.  
Links Hellzustand. Rechts Dunkelzu-  
stand.

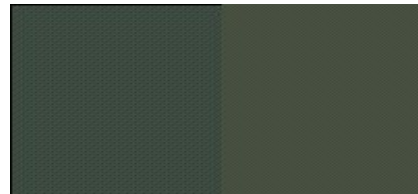


Abbildung 7.8:  
Ansicht der Probe PA-4 unter Tages-  
licht. Links Hellzustand. Rechts Dunkel-  
zustand.

der Farbverschiebung sowohl für den matt weißen Körper als auch für die Isolierglas-  
scheiben PA-3 und PA-4 in der Ansicht zu geben sind für den Hell- und den Dunkel-  
zustand für beide Schichtdicken des LLC<sub>P</sub> die Farben in den Abbildungen 7.5 bis 7.8  
dargestellt. Da die Farb Räume der Ausgabegeräte wiederum nicht abgestimmt sind,  
können die Farbtafeln lediglich Tendenzen aufzeigen.

Kenngröße [-]	Probenbezeichnung			
	PA-1	PA-2	PA-3	PA-4
	Versorgungsspannung [V]			
	U=0 <i>U U<sub>th</sub></i>	U=0 <i>U U<sub>th</sub></i>	U=0 <i>U U<sub>th</sub></i>	U=0 <i>U U<sub>th</sub></i>
<i>L</i>	64.6 44.26	58.23 21.06	64.60 46.27	57.39 22.86
<i>a</i>	-1.41 7.28	-2.88 17.96	-3.46 8.76	-1.83 14.69
<i>b</i>	-5.54 -28.72	-2.13 -37.39	-9.95 -30.54	-5.27 -35.33
<i>C<sub>ab</sub></i>	5.71 29.62	3.59 41.48	10.54 31.78	5.58 38.26

Tabelle 7.5:  
Farbmaßzahlen eines matt weißen Körpers bei Beleuchtung unter transmittiertem  
Tageslicht (Situation innen) bei senkrechtem Strahleinfall.



Kenngröße [-]	Probenbezeichnung			
	PA-1	PA-2	PA-3	PA-4
	Versorgungsspannung [V]			
	U=0 $U \quad U_{th}$	U=0 $U \quad U_{th}$	U=0 $U \quad U_{th}$	U=0 $U \quad U_{th}$
<i>L</i>	38.56	35	41.12	43.2
	42.39	39.9	36.53	37.56
<i>a</i>	-1.25	-6.97	-4.56	-12.58
	-1.03	-8.77	-14.2	-14.11
<i>b</i>	-4.28	1.08	10.96	13.59
	1.88	7.93	5.73	8.42

Tabelle 7.6:  
 Farbmaßzahlen der Proben bei Beleuchtung durch Tageslicht bei senkrechtem Strahleinfall.

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ergebnis einer vorab durchgeführten Recherche zum Stand der Technik bei aktiv regelbaren Verglasungen war die Erkenntnis, dass die meisten Systeme aktueller Forschung und Entwicklung gravierende Nachteile aufweisen. Diese sind je nach Funktionsprinzip unterschiedlich. Große Schaltzeiten sind charakteristisch für die elektrochromen Elemente. Gasochrome Systeme benötigen einen enormen infrastrukturellen Aufwand zur Gasrückgewinnung. Beide Elementtypen führen zudem zu einer erheblichen Farbverfälschung durch ihre Blaufärbung im eingedunkelten Zustand. Elemente auf der Basis von Flüssigkristall-dotierten Folien (PDLC-Folien, zu englisch "polymer dispersed liquid crystals") eignen sich auf Grund der mangelnden Wirksamkeit in Bezug auf die Regelung des Strahlungsdurchganges überhaupt nicht um den Energieeintrag in das Gebäude zu beeinflussen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher zu untersuchen, ob und mit welchem Aufbau sich verdrillt-nematische Flüssigkristallzellen (zu englisch "twisted nematic, TN-Zellen) eignen, um den Strahlungseintrag in ein Gebäude durch entsprechend versehene adaptive Fenster zu regeln und zu bestimmen, welche Eigenschaften diese aufweisen werden. Hierzu wurden Muster in diversen Aufbauten hergestellt. Es wurden die Einwirkungen, resultierend aus der Bestrahlung auf solche Proben, qualitativ und quantitativ spezifiziert und die optischen Eigenschaften für ausgewählte Aufbauten charakterisiert.

Die Idee, eine Flüssigkristallzelle als Lichtventil von der Bildschirmanwendung auf architektonische Anwendungen, beispielsweise im Fensterbereich, zu übertragen, ist bereits Anfang der 70-er Jahre des vorigen Jahrhunderts aufgegriffen worden. Allerdings sind, abgesehen von bereits erwähnten PDLC-Systemen, keine entsprechenden Anwendungen bekannt. Die Ursache hierfür liegt begründet in der unzureichenden Langzeitstabilität der Komponenten einer herkömmlichen TN-Zelle, vor allem der Polarisatoren, den hohen Erfordernissen der Fertigung sowie den Kosten für die nötigen Systemkomponenten. Um ein schaltbares Element oder auch dessen Komponenten bezüglich seiner Strahlungsbeeinflussung und damit auch seiner Farbwertverschiebung bewerten zu können werden Kennwerte herangezogen. Da der zur Beschreibung der Farbwiedergabe von Verglasungen üblicherweise angewandte Farbwiedergabe-Index keine hinreichende Beurteilung der Farbvalenzverschiebung ermöglicht, wird hierzu das  $L^*a^*b^*$ -Farbraum-System ausgewählt. Dieses Verfahren ermittelt Farbwertänderungen anschaulich in Form von Rot-Grün-Verschiebungen, Gelb-Blau-Verschiebungen oder auch Helligkeitsänderungen.

Zunächst erfolgte die Herstellung von TN-Muster-Zellen bis zu einer Größe von ca. 35 cm in der Ausführung als direkt angesteuerte Monobildpunktzellen, unter Anwendung von Prozessschritten und Werkstoffen, wie sie für die Fertigung von TN-Flüssigkristall-Anzeigen üblich sind, um die Muster charakterisieren und den Fertigungsprozess analysieren und bewerten zu können. An Hand der Muster konnte nachgewiesen werden, dass auch bei der Herstellung großformatiger Zellen ohne Untergliederung eine hervorragende optische Homogenität in der Zellenfläche bei geringen Schaltzeiten erreicht werden kann. Die auf der Grundlage spektraler Transmissionsmessungen an den Folienpolarisatoren berechneten Transmissionsänderungen von 0.34 für eine TN-Zelle mit Folienpolarisator entspricht beim Schalhub den erreichbaren Werten von elektrochromen Scheiben oder von SPD-Gläsern (zu englisch "sus-

pended-particle device). Die maximale Transmission der Musterzellen jedoch ist auf 0.34 begrenzt.

Systemeigenschaften	Adaptive Verglasungen						
	Nicht elektrische Systeme			Elektrotrope Systeme			
	Phototrop	Thermotrop	Gasotrop	Polymer dispersed liquid crystals-Element	Suspended-particle device Element	Elektrochromes Element ( $WO_3$ -Basis)	Lyotropic liquid crystal polarizer-TN-Zelle
Transmissionsgrad [-]	$T_{n,VIS}$ 0.5 bis 0.85	$T_{n,h,VIS}$ 0.21 bis 0.73	$T_{n,VIS}$ 0.64 bis 0.15	$T_{n,VIS}$ 0.68 bis 0.69	$T_{n,VIS}$ 0.09 bis 0.45	$T_{n,VIS}$ 0.15 bis 0.5	$T_{n,VIS}$ 0.14 bis 0.33
Absorptionsgrad [-]	$A_{n,VIS}$ 0.07 bis 0.42	$A_{n,h,VIS}$ 0.14 bis 0.2	$A_{n,VIS}$ 0.18 bis 0.78	$A_{n,VIS}$ 0.07 bis 0.08	$A_{n,VIS}$ 0.45 bis 0.84	$A_{n,VIS}$ 0.38 bis 0.76	$A_{n,VIS}$ 0.56 bis 0.73
Schalhub bei Transmission [-]	0.35	0.52	0.49	0.01	0.35	0.35	0.19
Schaltzeit [s]	Sekunden bis Minuten	Minuten	Sekunden	Millisekunden	Millisekunden	Minuten	Millisekunden
Schaltparameter	UV-Strahlung	Temperatur	$H_2$ -haltige Luft	Elektrische Spannung	Elektrische Spannung	Elektrischer Strom	Elektrische Spannung
Schaltspannung [V]	-	-	-	100	über 100	5	15
Langzeitverhalten	gut	gut	gut	gut	gut	schlecht	gut
Anschaffungskosten [€/m <sup>2</sup> ]	-	-	1600 300	1600	-	1500	-
Bemerkungen	nicht geeignet für die Anwendung am Gebäude wegen großer Temperaturabhängigkeit	gut geeignet zur Steuerung des Energiestromes jedoch keine Durchsicht mehr möglich	gut geeignet zur Steuerung des Energiestromes jedoch Blauverfärbung im Glas	ungeeignet zur Steuerung des Energiestromes und keine Durchsicht mehr möglich	gut geeignet zur Steuerung des Energiestromes bei Durchsicht	gut geeignet zur Steuerung des Energiestromes jedoch Blauverfärbung im Glas	gut geeignet zur Steuerung des Energiestromes ohne Verfärbung im Glas

Tabelle 8.1: Zusammenstellung der Systemeigenschaften verschiedener adaptiver Isolierverglasungen. Normal-hemisphärische Transmission im sichtbaren Spektrum (Indizes  $n,h,VIS$ ), Transmission im sichtbaren Spektrum bei flächennormaler Bestrahlung (Indizes  $n,VIS$ ).

Die geringe Dicke der TN-Flüssigkristallschicht von 5 µm bei den Proben der ersten und zweiten Generation, wie sie bei Flüssigkristall-Bildschirmen zur Gewährleistung eines guten Kontrastes üblich ist, erwies sich vor allem bei den größeren Formaten als problematisch. Sie führte zu erheblichen Anteilen von fehlerhaften TN-Zellen. Kurzschlüsse zwischen den beiden ITO-Elektroden (ITO=Indium-Zinnoxid) der Zelle, verbunden mit einer Zerstörung des Flüssigkristalls in der Umgebung der Fehlstellen, bedingen ein inakzeptables optisches Erscheinungsbild. Auch erweist sich die Unterdruckbefüllung derart dünner Scheibenzwischenräume vor allem im Hinblick auf TN-Zellen größerer Fläche ( $1\text{ m}^2$ ) als zu zeitaufwendig und zu störanfällig. Beim Befüllen der Zellen kam es wiederholt zur unvollständigen Füllung der Zellen mit dem Nemat. Nach Vergrößerung des Substrababstandes auf 10 µm bei den nachfolgend hergestellten Zellen wurden keine Kurzschlussbildungen mehr beobachtet. Die Vakuumbefüllung der großen Substrate blieb auch mit dem vergrößerten Zellabstand bei dem gewählten Verfahren, selbst mit zwei Einfüllöffnungen, ein zeitaufwendiger, kritischer Prozessschritt.

Der größte Teil der auftreffenden Strahlung wird am äußeren Polarisator einer TN-Zelle absorbiert. Daher ist es zweckmäßig, zur Optimierung der TN-Zellen-Transmission nach Alternativen zu den üblichen Folienpolarisatoren zu suchen. Glaspolarisatoren können derzeit lediglich in kleinen Abmessungen hergestellt werden (bis 40mm Breite); daher stellen sie trotz der gemessenen guten optischen Eigenschaften und der guten Haltbarkeit keine Alternative für die angestrebte Anwendung dar.

Anders verhält es sich bei einer neuen Art von polarisierenden Schicht aus dichroitischen, lyotropen Flüssigkristallen (zu englisch "lyotropic liquid crystal", LLC). Muster hierzu wurden im Rahmen dieser Arbeit durch Aufrollen oder Aufrakeln bis zu einer Größe von 35 cm x 35 cm hergestellt. Durch die Mischung des LLC lässt sich die spektrale Transmission beeinflussen. So ist es möglich, bunte wie auch weitgehend neutrale, graue Polarisationschichten herzustellen. Durch die Schichtdicke wird die maximale Transmission und der Schalhub, die Differenz zwischen nicht angesteuerter und angesteuerter Zelle, festgelegt. Der Schalhub entspricht näherungsweise der Differenz aus der Transmission durch parallele Polarisatoren abzüglich der Transmission durch gekreuzte Polarisatoren. Mit dickeren Schichten nimmt die maximale Transmission ab. Durch Berechnungen konnte ermittelt werden, dass Schichtdicken zwischen 100 nm und 400 nm von besonderem Interesse für die vorgesehene Anwendung im Fenster sind. Bei größerer Schichtdicke fällt die maximale Transmission zu weit ab. Bei geringerer Schichtdicke erweist sich der Schalhub als zu gering. Durch die geringe Dicke einer solchen Polarisatorschicht (sie ist lediglich 1/750 so dick wie dünne Folienpolarisatoren) sind diese für eine interne Anordnung im Schichtaufbau der TN-Zelle selbst hervorragend geeignet. Dort sind die LLCP-Schichten (zu englisch "lyotropic liquid crystal polarizer", LLCP) vor mechanischen Einflüssen sowie bei gleichzeitiger Verwendung von Glassubstraten auch vor der UV-Strahlung besser geschützt. Für entsprechend aufgebaute TN-Zellen der dritten und vierten Generation konnte die Funktionsfähigkeit durch entsprechende Muster nachgewiesen werden.

Die Polarisation durch die LLCP-Schicht ist eine Folge der weitgehenden Gleichausrichtung der Längsachsen der scheibenförmigen Moleküle des LLC. Verbunden mit der dichroitischen Eigenschaft existieren zwei absorbierende Hauptrichtungen im Molekül des LLC, für die der E-Feld-Vektor des auftreffenden Lichtes bevorzugt abgeschwächt wird. Der Gedanke, die Molekülausrichtung des LLC zur Orientierung

des TN-Flüssigkristalls zu nutzen um so eine definierte Ausrichtung der TN-Flüssigkristalle an den Grenzflächen zu erzielen, lag nahe. Durch entsprechende Muster der sechsten Generation, bei denen auf die übliche Polyimid-Orientierungsschicht (PI-Schicht) verzichtet wurde, konnte erstmals gezeigt werden, dass der LLC tatsächlich ausrichtend auf den TN-Flüssigkristall einwirkt. Leider kommt es jedoch neben der Bildung von einer Hauptrichtung noch zur Ausrichtung in Nebenrichtungen. Bei den entsprechenden Mustern zeigt sich für die Zustände zwischen der maximalen und der minimalen Transmission der Vorgang der Domänenbildung in der Zelle mit inhomogenem, optischem Erscheinungsbild.

Selbst ohne dass der LLC zur Orientierung herangezogen wird, lässt sich eine transmissionsregelnde TN-Zellen-Einheit in kompakter Bauweise mit lediglich vier Beschichtungsgängen (ITO,  $\text{SiO}_2$ , LLC, PI) herstellen. Wird zudem noch die Zelldicke auf Werte über 30  $\mu\text{m}$  erhöht (Schwebstaubgröße), so ist auch eine Herstellung der TN-Zelle außerhalb des Reinraumes vorstellbar. Neben einem einfachen, kostengünstigen Herstellungsverfahren und einer ausreichenden Langzeithaltbarkeit wird das Potential der TN-Zellensysteme in Bezug auf einen Einsatz als Fensterelement wesentlich von den optischen Eigenschaften abhängen. Ausschlaggebend wird hierbei sein, ob es gelingt, die nötigen Polarisatoren so einzustellen, dass eine möglichst große Lichtdurchlässigkeit im nichtangesteuerten Zustand vorliegt und der Schaltnub ausreichend ist um den Sonnenschutzbedürfnissen der Nutzer gerecht zu werden. Auch wird die Akzeptanz derartiger Systeme davon abhängen, wie sie die Farbwahrnehmung im Gebäude oder auch nach außen verändern.

Zur Charakterisierung der Einzelkomponenten der TN-Zelle bezüglich der Transmissions- und der Farbeigenschaften dienten sowohl die Ergebnisse der durchgeführten spektrometrischen Messungen als auch entsprechende Berechnungen für diverse Proben. Für die LLC-Polarisatoren jedoch sind die zur Berechnung notwendigen Materialkennwerte lediglich für den Bereich des sichtbaren Lichtes verfügbar. Daher beziehen sich die errechneten Kenndaten überwiegend auf diesen Bereich. Während der beste untersuchte Folienpolarisator einen lichttechnischen Transmissionsgrad von 0.34 im parallelen Zustand bei einem Schaltnub von 0.34 zeigt, liegen die entsprechenden Werte für die Glaspolarisatoren mit größter Transparenz bei 0.34 und 0.23. Der LLC-Polarisator größter Transmission in paralleler Anordnung zeigt einen Transmissionswert von 0.32 bei einem Schaltnub von 0.26. Keiner der vermessenen LLC-Polarisatorproben war bezüglich der Schichtdicke auf die Anwendung im Fenster optimiert worden. Vielmehr entstammen diese aus Serien für den Anzeigenbau. Um einen guten Kontrast zu erzielen ist die LLC-Schicht bei diesen Proben auf eine geringe Dunkeltransmission der gekreuzten Polarisatoren ausgelegt.

Die farbverändernde Wirkung der untersuchten Polarisatoren lässt sich an Hand der Buntheit nach dem  $L^*a^*b^*$ -Farbsystem beurteilen. Betrachtet wird hierbei die Farbwertveränderung eines matt weißen Körpers unter Betrachtung mit Tageslicht, das zuvor durch die Proben tritt. Die Untersuchung erfolgte an den Polarisatoren in paralleler wie auch in gekreuzter Anordnung. Bei den Folienpolarisatoren finden sich leicht Typen, die Buntheitswerte von kleiner als 10 bei maximaler Transmission sowie von unter eins bei minimaler Transmission aufweisen und damit in beiden Zuständen zu geringen Farbänderungen führen.

Bei den Glaspolarisatoren sind ebenfalls Typen verfügbar, die Werte unter 10 bei maximaler Transmission aufweisen, jedoch sind vor allem im gekreuzten Zustand (minimale Transmission) Werte über 19 typisch. Bestimmte LLC-Polarisatoren wei-

sen für die parallele Anordnung (maximale Transmission) geringe Buntheitswerte von unter zwei auf. Für die gekreuzte Position ergibt sich eine Buntheit von 25 bis zu 35. Dies bedeutet, dass bei maximaler Transmission dieser Typ, vergleichbar den Folienpolarisatoren, eine sehr geringe Farbänderung hervorruft, allerdings im gekreuzten Zustand zu größerer Farbveränderung führt als die Folienpolarisatoren. Die LLC-Polarisatoren beider untersuchter Mischungen weisen bezüglich kleiner Farbwertänderungen besseres Verhalten auf als Glaspolarisatoren jedoch sind sie schlechter als Folienpolarisatoren. Vor allem im Hinblick auf die Verfügbarkeit sowie die Temperaturstabilität der LLC-Polarisatoren erfolgte für die weiteren analytischen Parameterstudien die Beschränkung auf TN-Zellen mit diesem Polarisatorotypus.

Die Bestimmung des Einflusses der Schichtdicke des LLC auf die Eigenschaften einer LLC-TN-Zelle wurde rechnerisch ermittelt. Für Schichtdicken von 100 nm bis 400 nm des LLC ergeben sich Transmissionsgrade von 0.3 bis 0.49 ( $T_{n,vis}$ ) ungeschaltet beziehungsweise von 0.04 bis 0.41 geschaltet im Bereich sichtbaren Lichtes bei senkrechtem Lichteinfall auf die TN-Zellen. Für eine Schichtdicke von 100 nm ist dabei zwar die maximale Durchlässigkeit groß (0.49) aber der Schaltheub gering (0.08). Eine Schichtdicke von 200 nm weist bei einem Transmissionsgrad von 0.37 bereits einen Schaltheub von 0.2 auf.

Bezüglich der Implementierungsmöglichkeiten einer LLC-TN-Zelle in eine Isolierverglasung werden in der Arbeit zwei Varianten untersucht, die sich jedoch nur geringfügig in den Eigenschaften unterscheiden. Wird eine entsprechende TN-Zelle in den Zwischenraum einer Isolierverglasung eingebettet, so sinkt der Transmissionsgrad ungeschaltet um etwa 4 % gegenüber dem Wert für die separate TN-Zelle wegen der zusätzlichen Reflexionsverluste, bedingt durch weitere Grenzflächenübergänge an den zusätzlichen Scheiben. Mit einer LLC-Schichtdicke von 200 nm weist ein solches Fensterelement einen Transmissionswert von 0.33 (ungeschaltet) bei einem Schaltheub von 0.2 auf. Für übliche Sonnenschutzverglasungen liegen die Werte zwischen 0.15 und 0.66.

Wegen der bekannten Temperatur- und Feuchteempfindlichkeit der Folienpolarisatoren (PVA/CAB) dienten Versuche zur kurzzeitigen thermischen Belastung sowie Langzeit-Freilandversuche zur Verifizierung der Schädigung dieser Polarisatoren. Wie gezeigt werden konnte, führt bereits eine kurzzeitige 14-stündige thermische Einwirkung von  $T=85^{\circ}\text{C}$  (rel. Feuchte 10%) im Klimaschrank zu einer Verschlechterung der Polarisationswirkung der Folienpolarisatoren. Dass solch hohe Temperaturen an den Polarisatoren auftreten können, wurde ermittelt durch entsprechende Messungen an Folienpolarisatorproben in paralleler und gekreuzter Anordnung, die in Isoliergläser eingebracht waren, und im Freiland ausgesetzt wurden. Die maximale gemessene Temperatur an einer gekreuzten Probe im Messzeitraum betrug  $85^{\circ}\text{C}$  bei einer Ausrichtung der Proben nach Süden und einem Anstellwinkel zur Horizontalen von  $45^{\circ}$ . Die Bestrahlungsstärke auf die Probenebene betrug  $870 \text{ W/m}^2$ . Weitere Bestrahlungsversuche unter einem Sonnensimulator bestätigten das Auftreten solch hoher Temperaturwerte.

Zur Verifizierung des Alterungsverhaltens des Flüssigkristalls der TN-Zellen sowie der drei Polarisatorarten unter Umwelteinfluss waren diese, eingebettet in einen Isolierglasaufbau, im Freilandversuch ausgebracht worden. Die Freilandproben der Folienpolarisatoren zeigten nach 37 Monaten eine geringere Polarisationswirkung, verbunden mit einer ausgeprägten Veränderung der spektralen Transmission für alle Anordnungen, einzeln, parallel und gekreuzt. Auf Glaspolarisatoren hatte der Frei-



landaufenthalt von 34 Monaten Dauer keine messbar schädigende Wirkung. Bei den LLC-Polarisatoren erschwerten Schichtinhomogenitäten in der Polarisatorschicht die Beurteilung der Alterung, so dass für diese lediglich indirekt auf das Schädigungsverhalten geschlossen werden konnte. Demnach erfolgte durch eine 14-monatige Exposition der LLC-Folienproben (LLCP auf Folie aufgebracht) sowie durch eine zwölf monatige Ausbringung der LLC-Glasproben (LLCP auf Glassubstraten), keine wesentliche Veränderung der optischen Eigenschaften. Auf den Flüssigkristall innerhalb der TN-Zellen hatte die Freilandaussetzung von 24 Monaten keinen messbaren Einfluß. Sowohl die optischen Eigenschaften als auch die Schaltgeschwindigkeit blieben unverändert gegenüber Referenzmessungen vor der Aussetzung.

Im Rahmen der vorgestellten Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass sich eine LLC-TN-Zelle als adaptives Element einer Verglasung hervorragend eignet, um den Strahlungsdurchgang zu regeln. Eine hohe Schaltgeschwindigkeit, stufenlose Regelbarkeit, ein geringer Energieverbrauch, die Einstellbarkeit der Transmission sowie der Transmissionsänderung, eine geringe Farbvalenzverschiebung sowie ein geringer infrastruktureller Aufwand sind charakteristisch für eine solche Einheit. Durch die Optimierungsbemühungen bezüglich des Schichtaufbaus der Zelle gelang es, eine LLC-TN-Zelle mit lediglich vier Funktionsschichten bei interner Anordnung der notwendigen Polarisatoren herzustellen. Dies erhöht die Robustheit der Anordnung, da der Polarisator im Inneren der Zelle vor mechanischer Beschädigung sowie vor UV-Beeinflussung geschützt ist. Die notwendige Stabilität gegenüber den auftretenden Einwirkungen konnte versuchstechnisch nachgewiesen werden.

Trotz der umfangreich durchgeführten Untersuchungen an der LLC-TN-Zelle verbleiben noch einige Fragestellungen zur weiteren Klärung. Die Herstellung weiterer Muster ist notwendig, um praktisch nachzuweisen, dass bei vergrößertem Substratabstand der Zellenbau sowie die Befüllung der Zelle außerhalb der Reinraumumgebung durchgeführt werden kann, ohne dass die Zellen dadurch fehlerhaft werden. Auch erscheint die Verwendung von Standardgläsern (z. B. mit Metalloxid beschichtete Wärmeschutzgläser) anstelle von Spezialgläsern aus der Anzeigenproduktion eine Option zur Reduktion der Herstellungskosten darzustellen. Jedoch ist zuvor deren Eignung zu untersuchen. Neben Gläsern sind Folien interessant. Für die Verwendung als Substrate allerdings setzt dies voraus, dass eine Langzeit-Diffusionsdichtigkeit erzielbar ist. Vor allem für eine rationelle Herstellung großflächiger Elemente (größer als  $1 \text{ m}^2$ ) müssen alternative Befüllungsverfahren gefunden werden. Um die orientierende Wirkung der LLC-Schicht nutzen zu können, müsste das Funktionsprinzip, das diesem Effekt zu Grunde liegt, vertieft studiert und die orientierende Wirkung verbessert werden.

Die favorisierte LLC-Polarisator-Technologie bietet gegenüber anderen Systemen wesentliche Vorteile dadurch, dass das Transmissionsspektrum beeinflusst werden kann bis hin zu einer Verschiebung des absorbierenden Bereiches in das Spektrum der infraroten Strahlung. Auch eine gleichzeitige Absorption im sichtbaren und im IR-Bereich ist möglich. Um das Potential, das sich hierdurch erschließen ließe, bestimmen zu können, sind weitergehende Arbeiten in enger Kooperation mit dem Hersteller des LLC-Flüssigkristalles nötig. In diesem Zusammenhang ist ebenfalls zu klären, ob der TN-Flüssigkristall im Bereich der IR-Strahlung noch doppelt bricht und wie sich die übrigen Funktionsschichten in diesem Spektrum verhalten. Um bei den LLC-Schichten die Langzeitstabilität auch für verschiedene Schichtdicken bewerten zu können sind weitere Freilandversuche nötig. Die Schichthomogenität ist mittler-

weile durch Prozessmodifikationen bei den LLC-Beschichtern wesentlich verbessert worden.

Die Effizienz der vorgestellten TN-Zellen beim Einsatz in Gebäudehüllen kann mit den in der Arbeit dokumentierten Kenndaten bestimmt werden; sie wird bei der Entscheidung für oder gegen die Umsetzung der TN-Technologie bei architektonischen Anwendungen eine gewichtige Rolle einnehmen.

## Literaturverzeichnis

### Kapitel 1

- [1.1] Sobek, W., Haase, W.: Selbstanpassende Systeme in der Gebäudehülle. Das Bauzentrum (1998), H. 5, S. 70-75.
- [1.2] Sobek, W., Haase, W., Teuffel, P.: Adaptive Systeme. Stahlbau 69 (2000), H. 7, S. 544-555.
- [1.3] Haase, W.: Glas in Hüllenanwendungen. Architektur & Bau Forum 10 (2003), H. 5, S. 9-10.
- [1.4] Haase, W.: smart materials - "Intelligente" Werkstoffe. Anwendungsmöglichkeiten in Hüllsystemen. Kongressunterlagen GlasKon (2003).
- [1.5] Flachglas AG: Glas-Handbuch. (1996).

### Kapitel 2

- [2.1] Wilson, Helen Rose: Solar Control Coatings for Windows. Tagungsunterlagen EUROMAT99, 13 (1999), Functional Materials, ed. K. Grassie.
- [2.2] Raicu, A., Jahns, E., Wilson, H.R., Nitz, P.: Überhitzungsschutz durch thermotrope schaltbare Elemente an der Fassade. Stand der Forschung. Stahlbau 69 (2000), H. 6, S. 485-489.
- [2.3] Elbl-Weiser, K.: Thermotrope Schichten: Intelligente Schattenspendler. Presse-Information der BASF-AG vom 19.02.1996.
- [2.4] Jahns, E., Gerst, M., Kühn, I.: Schichtsystemen mit veränderlichem Transmissionsgrad. Teilprojekt: Technologische Fortentwicklung von Polymersystemen für Thermotrope Schichten. Statusbericht „Solar optimiertes Bauen“, Grafische Betriebe der Forschungszentrum Jülich GmbH, (1998).
- [2.5] Blessing, R., Wilson, H.R.: Schichtsysteme mit veränderlichem Transmissionsgrad: Technologische Fortentwicklung thermotroper Schichten in Verglasungen. Statusbericht „Solar optimiertes Bauen“, Grafische Betriebe des Forschungszentrum Jülich GmbH, (1998).
- [2.6] Jahns, E., Raicu, A.: Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben "Schichtsysteme mit veränderlichem Transmissionsgrad", FhG-ISE, (2000).
- [2.7] Georg, A., Graf, W., Schweiger, D., Wittwer, V., Nitz, P., Wilson, H.R.: Switchable glazing with a large dynamic range in total solar energy transmittance. Solar Energy 62 (1998), H. 3, S. 215-228.
- [2.8] Georg, A., Graf, W., Wittwer, V.: The gasochromism of sputtered WO<sub>3</sub> films. Proc. of the EUROMAT99, 13 (1999), Functional Materials, ed. K. Grassie, S. 234-238.
- [2.9] Georg, A.: Gasochrome Verglasungen als Überhitzungs- und Blendeschutz. Stahlbau 69 (2000), Heft 6, S. 483-484.
- [2.10] Graf, W.: Verglasungselement mit variabler Transmission. Patentschrift DE 44 40 572 C2. Deutsches Patent- und Markenamt. Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 7.5.1997.
- [2.11] Huibertus, J.N., Griessen, R., Rector, J.H., et al. : Yttrium and lanthanum hydride films with switchable optical properties. Nature 380

- (1996), S. 231-234.
- [2.12] Deinlein, Th.: Elektrochrome Fassaden – Glas mit steuerbaren Eigenschaften. Stahlbau 69 (2000), Heft 7, S. 568-570.
- [2.13] Krug, H.: Weiterentwicklung elektrochromer Dünnschichtzellen über die Sol-Gel-Technik. Jahrestätigkeitsbericht 1996. Insitut für Neue Materialien gem. GmbH.
- [2.14] Pilkongton: Produktinformation-Pilkington EControl-TM, die Energiekontrolle für mehr Komfort, (2000).
- [2.15] Wittkopf, H.: Elektrochrome Verglasung. Ein Beitrag der Glasindustrie zur Wettbewerbsfähigkeit deutscher Automobile?
- [2.16] Stassen, I.: Elektrochrome Materialien. Arbeitsmaterial zum Vortrag beim Kolloquium „Selbstanpassende Systeme in der Architektur“ am Institut für Leichte Flächentragwerke, (1998).
- [2.17] Monk, P.M.S., Mortimer, R. J. Rosseinsky, D. R.: Elektrochromism: Fundamentals and Applications. VHC Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, (1995).
- [2.18] Koswig, H. D.: Flüssige Kristalle. Eine Einführung in ihre Anwendung. 1. Auflage, Aulis-Verlag Deubner, Köln, (1985).
- [2.19] Drzaic P. S., Ong Hiap L.: Liquid Crystal Dispersions. World Scientific (1995)
- [2.20] Sobek W., Haase W., Köhnlein J.: „Smart Materials“. Forschungsbericht 2/98. Institut für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, (1998).
- [2.21] VEGLA Vereinigte Glaswerke GmbH: Technisches Handbuch „ Glas am Bau“, mkt gmbh, Alsdorf, (1999).
- [2.22] Saxe, R. L., Thompson, R. I.: Suspended-Particle Devices. Research Frontiers Incorporated, Technical report, (2003).
- [2.23] Check, III, Joseph, A.: Light valve employing a film comprising an encapsulated liquid suspension, and method of making such film. Patentschrift US 5 463 491. United States Patent. Date of Patent: Oct. 31, 1995.
- [2.24] CICURSA, Cristales Curvados S. A. : Produktinformation: Cri-Regulite. (2003).
- [2.25] Georg, A.: Optisches Bauelement. Offenlegungsschrift DE19816675A1. Deutsches Patent- und Markenamt. Veröffentlichungstag 28.9.1999.
- [2.26] Georg A., Hauch A., Graf W., Wittwer V.: Photoelektrochrome Fenster. Fraunhofer ISE Internet Home Page. Aktualisierung: 18.03.2001.
- [2.27] Hauch, A., Georg, A., Baumgärtner, S., Opera Krasovec, U., Orel, B.: New photoelectrochromic device. Electrochimica Acta 46 (2001), S. 2131-2136.
- [2.28] Gliemeroth, G., Mader, K.-H.: Phototropes Glas. Angewandte Chemie, 82 (1970), H. 11, S. 421-433.
- [2.29] Neuroth, N.: Glas als optischer Werkstoff. Spektrum der Wissenschaft, Digest: Moderne Werkstoffe, (1996), H. 3, S. 6-17.
- [2.30] Trotter, D. M. Jr.: Photochrome und photosensitive Gläser. Spektrum der Wissenschaft, Digest: Moderne Werkstoffe, (1996), H. 3, S. 18-24.

## Kapitel 3

- [3.1] Goetzberger, A.; Wittwer, V.: Sonnenenergie. Thermische Nutzung. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Teubner, Stuttgart, (1993).
- [3.2] Haferkorn, H.: Optik. 3. bearbeitete und erweiterte Auflage. Barth, Leipzig-Berlin-Heidelberg, (1994).
- [3.3] CEN, Europäisches Komitee für Normung: Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen. EN 410 vom April 1998.
- [3.4] Pettit, B. R.: Hemispherical Transmittance Properties of Solar Glazings as a Function of Averaging Procedure and Incident Angle. Solar Energy Materials (1979) , H. 1, S. 125-140.
- [3.5] Normenausschuß Lichttechnik (FNL) im DIN Deutschen Institut für Normung e. V.: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik DIN 5031 Teil 1 bis Teil 10.
- [3.6] Dobrinski, P.; Krakau, G.; Vogel, A.: Physik für Ingenieure. 6., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Teubner, Stuttgart, (1984).
- [3.7] Normenausschuß Lichttechnik (FNL) im DIN Deutschen Institut für Normung e. V.: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien. DIN 5036 Teil 1 bis Teil 4.
- [3.8] Normenausschuß Farbe (FNF) im DIN Deutschen Institut für Normung e. V.: Farbmessung. DIN 5033 Teil 1 bis Teil 9.
- [3.9] Baehr, Hans Dieter: Wärme- und Stoffübertragung. 2. Auflage, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, (1996).
- [3.10] Engeln-Müllges, Gisela: Numerik-Algorithmen. Entscheidungshilfen zur Auswahl und Nutzung. 7. Auflage, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, (1996).
- [3.11] Fachnormenausschuß Farbe (FNF) im DIN Deutschen Institut für Normung e. V.: Farbwiedergabe. DIN 6169 Teil 1 bis Teil 8.
- [3.12] Shewandrow, N. D.: Die Polarisation des Lichtes. Wissenschaftliche Taschenbücher, Band 44, Akademie Verlag, Berlin, (1973).
- [3.13] Huard, S.: Polarization of light. John Wiley & Sons, New York-Brisbane-Toronto-Singapore, (1997).
- [3.14] Ostoja Starzewski, K.-H. A.: Polarisationsfolien. Patentschrift EP 0 704 723 A1, Europäisches Patentamt, Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 3.4.1996.
- [3.15] Rainer, T., Berg K.-J., Berg, G.: Kleine Teilchen, große Wirkung: Wird Fensterglas zum High-Tech-Material?. Kongreßbeitrag der GlasKon (2000).
- [3.16] Araujo, R.J., Borrelli, N.F.: Glass polarizer for visible light. Patentschrift US 5 517 356 , United States Patent, Date of Patent: May 14, 1996.
- [3.17] Borek, R., Berg K.-J., Berg, G.: Low-temperature tensile deformation of flat glass containing metal particles to generate dichroism. Glastech. Ber. Glass Sci. Technol., 71 (1998), H. 12.
- [3.18] Berg K.-J., Dehmel, A., Berg, G.: Colour-microstructured glass polarizers Glastech. Ber. Glass Sci. Technol. 68 C1 (1995).
- [3.19] Graener, H.: Verfahren zur definierten dauerhaften Veränderung des Extinktionsspektrums metallpartikelhaltiger Dielektrika durch intensive Laserimpulse. Offenlegungsschrift DE 198 23 257 A1 , Deutsches

- Patent- und Markenamt, Offenlegungstag: 17.2.2000.
- [3.20] Leroux, T., Rossignol, C.: Fast Analysis of LCD Contrast and Color Coordinates vs. Viewing Angle. Society for Information Display, Digest, (1995).
- [3.21] Lueder, E.: Fundamentals of Passive and Active Addressed Liquid-Crystal Displays. Short Course S-1. Society for Information Display, San Diego, (1996).
- [3.22] Gooch, C.H., Tarry, H.A.: The optical properties of twisted nematic liquid crystal structures with twist angles  $90^\circ$ . J. Phys. D., Appl. Phys. 8 (1975), S. 1575-1584.
- [3.23] Demus, D., Goodby, J. W., Gray, G. W., et alii: Physical Properties of Liquid Crystals. 1. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim-New York-Chichester-Brisbane-Singapore-Toronto, (1999).
- [3.24] Koswig, H. D.: Flüssige Kristalle. Eine Einführung in ihre Anwendung. 1. Auflage, Aulis-Verlag Deubner, Köln, (1985).
- [3.25] Yeh, P.: Optical Waves in Layered Media. J. Wiley & Sons, New York-Chichester-Brisbane-Singapore-Toronto, (1988).
- [3.26] Finkenzeller, U.: Flüssigkristalle für optische Displays. Spektrum der Wissenschaft, Digest: Moderne Werkstoffe, (1996), H. 3, S. 68-76.
- [3.27] E. Merck KGaA: Datenblatt ZLI-4792, Darmstadt, (1994).
- [3.28] VDI-Richtlinie 2463: Messen von Partikeln. Blatt 1, Ausgabe 11.99: Gravimetrische Bestimmung der Massenkonzentration von Partikeln in der Außenluft. Grundlagen Blatt 4, Ausgabe 12.76: Messen der Massenkonzentration von Partikeln in der Außenluft. LIB-Filterverfahren. Blatt 9, Ausgabe 2.87: Messen der Massenkonzentration (Immission). Filterverfahren. LIS/P-Filtergerät.

#### Kapitel 4

- [4.1] Haase, W.: Charakterisierung der Funktionsschichten einer TN-Zelle. Forschungsbericht des Zentrallabor des Konstruktiven Ingenieurbaus der Universität Stuttgart. Bericht 2, (2004) (noch zu veröffentlichen).
- [4.2] Hecht, E.: Optik. 3. vollst. überarb. Auflage, Oldenbourg, München-Wien, (2001).
- [4.3] Corning Incorporated: Advanced Display Products. Corning, N.Y. 14831. Material information: Glass code 1737F, (1995).
- [4.4] Jos. Schneider Optische Werke GmbH: Polarisationsfolien- Datensammlung, (2000).
- [4.5] Sanritz Corp.: Catalog of polarizers, (2002).
- [4.6] Bobrov, Y.A.: Dependence of the anisotropic absorption coefficient on the thickness of molecularly oriented organic dye films. J. Opt. Technol. 66 (1999), H. 6, S. 547-549.
- [4.7] Bobrov, Y.A.: Spectral Properties of Thin Crystal Film Polarizers. Mol. Materials, 14 (2001), H. 3, S. 191-203.
- [4.8] Lazarev, P., Lokshin, K., Nazarov, V.: X-Ray Diffraction by Large Area Organic Crystalline Nano-Films. Mol. Materials, 14 (2001), H. 4, S. 303-311.
- [4.9] Dembo, A., Ionov, A., et alii: Lyotropic Dye-Water Mesophases Formed by Rod-Like Supramolecules. Mol. Materials, 14 (2001), H. 4,



- S. 275-290.
- [4.10] Iverson, I.K. Et alii: Cascade of Molecular Order by Sequential Self-Organization, Induced Orientation and Order Transfer Process. *J. Am. Chem. Soc.* 121 (1999), H. 24, S. 5801-5802.
- [4.11] Bobrov, Y., Cobb, C., Lazarev, P.: Lyotropic Thin Film Polarizers. *Society for Information Display, Digest* (2000), S. 1102.
- [4.12] Schneider, T., Smith, A., Lavrentovich, O. D.: Imaging Oriented Aggregates of Lyotropic Chromonic Mesogenic Dyes by Atomic Force Microscopy. Proc. of summer undergraduate research program, Kent State University, (2000).
- [4.13] Yeh, P., Paukshto, M.: Extraordinary polarizers for LCD. Optiva Inc. Technical Report, (2000).
- [4.14] Labrotory Procedure for Application of Optiva Liquid-Crystal Polarizer Coating on Glass and Plastic. Optiva Inc. Technical Report, March (2000).
- [4.15] Kozenkov, V. M., Yip, W. C., Tang, S. T., et alii: Thin Photo-Patterned Internal Polarizers for LCDs. *Society for Information Display, Digest* (2000), S. 1099-1101.
- [4.16] Jos. Schneider Optische Werke GmbH: Produktinformation, (2001).
- [4.17] Cael, J. J., Nkwantah, G., Trapani, G.: High-Durability KE Polarizer for LCD Applications: Design Considerations. *Society for Information Display, Digest*, (1997).
- [4.18] Bobrov, Y., Novak, V.: Determination of Anisotropic Complex Refractive Indices of Thin Film-Polarizers. *Mol. Materials*, 14 (2001), H. 1, S. 21-31.
- [4.19] Cobb, C., Gerbaz, C., Lazarev, P., et alii: LCD Wich 7-Micron Light Management Path. Optiva Inc. Technical Report.
- [4.20] Bobrov, Y.: Dependence of the anisotropic coefficients on the thickness of molecularly oriented organic dye films. *J. Opt. Technol.*, 66 (1999), H. 6.
- [4.21] Ignatov, L., Lazarev, P., et alii: Thin Crystal Film Optical Components. Optiva Inc. Technical Report.
- [4.22] Jones, R. C.: A New Calculus for the Treatment of Optical Systems. *Journal of the Optical Society of America*, 31 (1941), H. 1-12, S. 488-503.
- [4.23] Yeh, P.: Extended Jones matrix method. *J. Opt. Soc. Am.*, 72 (1982), H. 4, S. 507-513.
- [4.24] Yeh, P.: Extended Jones matrix method. II *J. Opt. Soc. Am. A*, 10 (1993), H. 5, S. 966-973.
- [4.25] Berreman, D. W., Scheffer, T.: Reflection and Transmission by Single-Domain Cholesteric Liquid Crystal Films: Theory and Verification. *Third Intern. Liquid Crystal Conference Berlin*, (1970).
- [4.26] Berreman, D. W.: Optics in Stratified and Anisotropic Media: 4x4-Matrix Formulation. *Journal of the Optical Society of America*, 62 (1972), H. 4, S. 502-510.
- [4.27] Pfrommer, P., Lomas, K.J. Et alii: The Radiation Transfer Through Coated and Tinted Glazing. *Solar Energy*, 54 (1995), H. 5, S. 287-299.
- [4.28] Heavens, O. S.: Optical Properties of Thin Films. *Rep. Prog. Phys.*, 23 (1960), S. 1-65.
- [4.29] Harbecke, B.: Coherent and Incoherent Reflecion and Transmission of

- Multilayer Structures. Applied Physics, B 39 (1986), S. 165-170.
- [4.30] Hettner, G.: Durchlässigkeit und Reflexionsvermögen dünner Metallschichten im langwelligen Ultrarot bei beliebigem Einfallswinkel. Optik, (1946), Band 1, S. 2-7.
- [4.31] Harbecke, B., Heinz, B., Große, P.: Optical Properties of Thin Films and the Berreman Effect. Applied Physics, A 38 (1985), S. 263-267.
- [4.32] Bender, M., Seelig, W., Daube, C. et alii: Dependence of oxygen flow on optical and electrical properties of DC-magnetron sputtered ITO films. Thin Solid Films, 326 (1998), H. 1, S. 72–77.
- [4.33] Craciun, V., Craciun, D., Chen, Z. Et alii: Room Temperature Growth of Indium Tin Oxide Films by Ultraviolet-Assisted Pulsed Laser Deposition. Mat. Res. Soc. Symp. 617 (2000).
- [4.34] Morton, D. E., Dinca, A.: Ion-Assisted Deposition of E-gun Evaporated ITO Films at Low Substrate Temperatures. Annual Technical Conference of the Society of Vacuum Coaters in Chicago (1999).
- [4.35] Bender, M., Seelig, W., Daube, C. et alii: Dependence of film composition and thicknesses on optical and electrical properties of ITO–metal–ITO multilayers. Thin Solid Films, 326 (1998), H. 1, S. 67–71.
- [4.36] Brewster, Q. M.: Thermal Radiative Transfer and Properties. J. Wiley & Sons, New York-Chichester-Brisbane-Singapore-Toronto, S. 507, (1991).
- [4.37] JSR Corp.: Typical properties of JSR Alignment Layers for A/M LCDs. Optmer AL 5417. Technical Report, (1993).
- [4.38] Nissan Chemical Industries, Ltd.: Nissan Polyimide Coating for Homeotropic Alignment. SE-1211. Technical Data.
- [4.39] Merkel, M., Thomas, K.-H.: Taschenbuch der Werkstoffe: Grundlagen und Beispiele. 4. Auflage. Fachbuchverlag, Leipzig-Köln, (1994).
- [4.40] Autronics-Melchers GmbH: DIMOS. User's Guide. Manual Revision 1.500, (1999).

## Kapitel 5

- [5.1] VEGLA, Vereinigte Glaswerke GmbH: Technisches Handbuch. Glas am Bau. mkt gmbh, Alsdorf, (1995).
- [5.2] Cobb, Carl, Ignatov L. et alii: Application Specific Polarizers. Optiva Inc. Technical Report.
- [5.3] Tarumi, K., Bremer, M., Geelhaar, T.: Recent liquid crystal material development for active matrix displays. Annu. Rev. Mater. Sci., 27 (1997), H. 8, S. 423-441.
- [5.4] Norland Products Inc.: Norland Optical Adhesive NOA 61, NOA 91. Norland Products Inc. Technical Report 1, (2001).
- [5.5] JSR Corporation: Display Materials. OPTMER AL 5417. JSR Corporation Technical Report, (2001).

## Kapitel 6

- [6.1] Haase, W.: Kurz- und Langzeitversuche an adaptiven Elementen und deren Komponenten. Forschungsbericht des Zentrallabor des

Konstruktiven Ingenieurbaus der Universität Stuttgart., Bericht 3, (2004), (noch zu veröffentlichen).

- [6.2] Bauer, Gerd: Erstellung eines Programmes zur Berechnung der Globalstrahlung auf beliebig geneigte Flächen. Diplomarbeit am Institut für Leichte Flächentragwerke der Universität Stuttgart, (1997).
- [6.3] Lawrence Berkley National Laboratory: International Glazing Database (V.13.5), Window 5.1. Windows&Daylighting Group, Enviromental Energy Technologies Department.
- [6.4] Kogler, M.: Vermessen und Inbetriebnahme des Sonnensimulators. Diplomarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart, (1996).

## Kapitel 7

- [7.1] Lawrence Berkley National Laboratory: Window 5.1. Windows&Daylighting Group, Building Technologies Program, Enviromental Energy Technologies Department.

## Kapitel 8

- [8.1] Gläser, H.-J.: Abschirmvorrichtung für Fenster. Patentschrift DT 2155951. Deutsches Patent- und Markenamt. Ausgabetag: 27.09.1973.

## Anhang A

### Wesentliche Prozessschritte bei der Herstellung der TN-Zellen der 1. bis 6. Generation

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte im Prozess der Herstellung der TN-Zellen beschrieben. Nicht alle Proben durchliefen dieselben Fertigungsschritte. Die Prozessfolge richtet sich nach der Schichtenabfolge und ist der Tabelle 3.1 zu entnehmen.

#### 1. Reinigung der Glassubstrate

Die Reinigung erfolgt in einer Lösung aus deionisiertem  $H_2O$  mit einem Volumenanteil von 1% Mucasol zur Entfernung der Schutzbeschichtung und zum Entfetten der Glassubstrate ("alkaline earth aluminosilicate glass", code: 1737F, Corning Incorporation, Glasdicke  $d = 11 \text{ mm}$ ).

#### 2. Hochdruckreinigung (nur 14" Gläser)

Absprühen (bei 80 bar) mit deionisiertem  $H_2O$ .

#### 3. Randabklebung

Drei Seiten des Substrates werden am Rand mit Klebeband abgeklebt. Der abgedeckte Bereich weist eine Breite von  $b = 6 \text{ mm}$  auf. Die Abdeckung verhindert das Anlagern des ITOs in einem schmalen Bereich am Glasrand. Am nicht abgedeckten Rand wird die Zelle nach der Fertigung kontaktiert.

#### 4. Aufbringen der ITO-Schicht durch Aufstäuben

Das Aufbringen erfolgt im Vakuumverfahren unter Argonatmosphäre bei  $p = 5 \cdot 10^{-6} \text{ bar}$ . Die Fahrgeschwindigkeit beträgt  $v = 0,28 \text{ m/min}$ . Vier Oszillationen werden gefahren (Programm 4). Die Schichtdicke der ITO-Schicht beträgt  $d = 90 \text{ nm}$ .

#### 5. Abblasen der Substrate mit Stickstoff

Zum Entfernen etwaiger Partikelverunreinigungen werden die Substrate abgeblasen.

#### 6. Tempern

Nach dem "sputter"-Vorgang mit ITO werden die Substrate bei  $T = 180 \text{ C}$  für 75 Minuten im Ofen unter  $N_2$ -Atmosphäre getempert. Die Transparenz wird dadurch verbessert.

#### 7. Aufbringen der $SiO_2$ -Schicht im "sputter"-Verfahren (nur die Zellen der 4. und 6. Generation)

Nach dem Abkleben der ITO-Kante mit einem Streifen der Breite  $b=15\text{mm}$  sowie der übrigen drei Glasränder mit Streifen der Breite  $b=5\text{mm}$  wird eine  $SiO_2$ -Schicht aufgebracht (Vakuumverfahren mit Programm 10). Die Schicht verbessert das Aufbringen und die Haftung des LLC-Polarisators. Die Schichtdicke beträgt  $d = 210 \text{ nm}$ .

#### 8. Beschichten mit flüssigkristallinem Polarisator

Die Suspension aus  $H_2O$  und Farbpartikel in Nanostruktur wird mittels

Handrakelverfahren bei den Zellen der 3. Generation (Spiral-Rakel, 10  $\mu\text{m}$ , BYK-Gardner GmbH) aufgebracht. Es kommt der LLCPTyp NO.13.01.0810-X-99 (Nr.13) zum Einsatz. Für die Zellen der 4. Und 6. Generation erfolgt das Aufbringen nach dem in Abbildung 3.5 dargestellten Verfahren maschinell. Als LLCPT findet die Mischung NO.15.00.100.013SF.10.00 (Nr.15) Anwendung.

#### 9. Oberflächenbehandlung des LLCPT

Die Substrate mit LLCPT-Schicht werden in eine 10% Lösung mit  $\text{BaCl}_2$  getaucht. Dadurch wird erreicht, dass die LLCPT-Schicht nicht mehr wasserlöslich ist.

#### 10. Trocknen der Proben mit LLCPT-Schicht

Die behandelten Proben werden bei  $T = 180 \text{ C}$  15 Minuten lang getrocknet.

#### 11. Aufschleudern des PI

Durch Aufschleudern wird eine Lösung aus Polyimid (Optmer AL5417 der JSR Company) und Lösungsmittel (  $\gamma$ -Butyrolacton, Merck-Schuchardt) im Verhältnis 1:1 für die Herstellung der PI-Schicht verwendet. Nach einem kurzen Anschleudern wird bei einer Drehzahl von 800 *Umdr./min* abgeschleudert.

#### 12. Härten des PI

Im Ofen wird bei einer Temperatur von  $T = 180 \text{ C}$  eine Stunde lang gehärtet.

#### 13. Reiben der PI-Schicht

In der Reibeanlage wird das Substrat mit einer Drehzahl von 800 *Umdr./min* und einer Reibtiefe von  $t = 0.1 \text{ mm} \sim 0.12 \text{ mm}$  bei einem Vorschub von 600 *mm/min* gerieben.

#### 14. Aufbringen der Abstandshalter

Eine Suspensionslösung aus Propanol und Abstandshalter wird in einem Plexiglasbehälter versprüht. Nach dem Verdampfen des Propanols setzen sich die Abstandshalter auf dem, am Boden liegenden Substrat ab. Angestrebt wird eine Abstandshalter-Dichte von 100  $\text{mm}^2$ .

#### 15. Aufbringen des Kleberrahmens

Während das eine Substrat einer Zelle mit den Abstandshaltern versehen wird, bekommt das andere Substrat den Kleberahmen aufgetragen. Verwendet wird zum Verkleben der Gläser der UV-härtende Kleber NOA 91 der Norland Products Inc..

#### 16. Positionieren der Substrate

Über dem Substrat mit den Abstandshaltern wird das Glas mit dem Kleberahmen versetzt positioniert so, dass der Kontaktbereich jeweils übersteht.

#### 17. Verpressen der Gläser und Härten des Klebers

Unter Druck erfolgt anschließend durch Beleuchtung mit UV-Strahlung der Aushärtprozess des Klebers. Die Lampenleistung beträgt 15  $\text{mW/cm}^2$ . Die Aushärtungsdauer liegt bei  $t = 15 \text{ min}$ .

#### 18. Vorbereitung zum Befüllen

Hierzu wird vor der Einfüllöffnung ein Klebstoffrand angebracht. Dieser stellt beim

Befüllen die vollständige Benetzung der Einfüllöffnung sicher.

#### 19. Befüllen der Zelle

In der Vakuumkammer wird bis zu einem Druck von  $p = 3 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$  abgepumpt. Vor dem Befluten wird der Flüssigkristall vor die Einfüllöffnung gebracht. Beim Befluten wird er in die Zelle gezogen. Alle Zellen wurden mit dem rechtsdrehenden Flüssigkristallgemisch aus den Typen ZLI-4792 (Nemat) mit einem 0.1 % Anteil ZLI-3786 (chiraler Dotierstoff) der Firma Merck gefüllt.

#### 20. Verschließen der Zelle

Zum Verschließen der Zelle wird sie der Vakuumkammer entnommen. Mit dem Klebstoff NOA 91 der Norland Products Inc. erfolgt das Abdichten.

#### 21. Kontaktieren

An den freien, überstehenden Seiten erfolgt die elektrische Kontaktierung der beiden Substrate. Hierzu findet leitfähiges Klebeband oder auch leitfähiger Zweikomponenten-Kleber Anwendung.



## Anhang B

### Materialkenndaten des Flüssigkristalls ZLI-4792 der Merck KGaA

Temperatur d. Phasenwechsels S N	< -40
Klärpunkt Temperatur [°C]	+92
$n_e$ $n_{  }$ [589nm, 20°C]	1.5763
$n_o$ $n$ [589nm, 20°C]	1.4794
$n$ [589nm, 20°C]	+0.0969
$_{  }$ $_e$ [1kHz, 20°C]	8.3
$_o$ [1kHz, 20°C]	3.1
[1kHz, 20°C]	+5.2
$K_{11}$ [10 <sup>12</sup> N, 20°C]	13.2
$K_{22}$ [10 <sup>12</sup> N, 20°C]	6.55
$K_{33}$ [10 <sup>12</sup> N, 20°C]	18.3
Dichte [g / cm <sup>3</sup> , 20°C]	1.0493
Wärmeausdehnungskoeffizient [10 <sup>4</sup> 1/k, -40°C~ -20°C]	6.5~7
Kin. Viskosität	
$\left[\frac{mm^2}{s}, 25^\circ C\right]$	12
$\left[\frac{mm^2}{s}, 0^\circ C\right]$	40
$\left[\frac{mm^2}{s}, -20^\circ C\right]$	160
$\left[\frac{mm^2}{s}, -30^\circ C\right]$	420
Drehviskosität	
$_1$ [10 <sup>3</sup> $\frac{N}{m^2}$ s, 20°C]	133

## **Anhang C**

### **Messgerätebezeichnungen**

- 1           Spektrometer des Typs Lambda2 der Perkin Elmer Instruments,  
Ferdinand-Porsche-Ring 17, 63110 Rodgau-Jügesheim, Deutschland.
- 2           EZContrast 160R der Firma ELDIM S.A., 1185, Rue d'Epron, 14200  
Herouville Saint Clair, Frankreich.
- 3           Leuchtplatte Typ Hansa LP551, Deutschland.
- 4           MiniScan TM der Firma Hunterlab Inc., 11491 Sunset Hills Road,  
Reston VA 20190-5280, USA.
- 5           Dektak 16000 der Firma Veeco Instruments Inc., 100 Sunnyside Blvd.  
Ste. B, Woodbury, New York 11797-2902, USA.

## Anhang D

### Firmenbezeichnungen

- a Merck KGaA, Frankfurter Str. 250, D-64293 Darmstadt, Deutschland.
- b Nitto Denko Corp., 1-1-2, Shimohozumi, Ibaraki, Osaka, 567-8680, Japan.
- c Optiva Incorporated, 377 Oyster Point Blvd. 13, San Francisco, USA.
- d Corning Incorporated, Display Technologies, HP-AB-03-4, Corning, NY 14831, USA.
- e Pilkington, Prescott Road St. Helens WA10 3TT, Großbritannien.
- f Polaroid Corporation, 1265 Main St. W2-2C Waltham, MA 02154, USA.
- g Sanritz Corporation, 1-30-13, Narimasu, Itabashi-ku, Tokyo, Japan.
- h CODIXX AG, Steinfeldstr. 3, 39179 Barleben, Deutschland.
- i Panacol-Elosol GmbH, Obere Zeil 6-8, 61440 Oberursel, Deutschland.
- j BYK-Gardner GmbH, Lausitzer Straße 8, 82538 Geretsried, Deutschland.
- k TECDIS S.p.A., 41, Rue de la Gare, 11024 Chatillon (AO), Italien.
- l Japan Synthetic Rubber Co., Ltd. (JSR Corporation), 5-6-10 Tsukiji Chuo-ku, Tokyo, 104-8410, Japan.
- m Nissan Chemical Industries, 3-7-1 Kanda Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0054 Japan.
- n AFG-Industries, 1400 Lincoln Street, Kingsport, TN 37660, USA.
- o Southwall Technologies Inc., 1029 Corporation Way Palo Alto, CA 94303, USA.
- p Philips, Sunnyvale, Kalifornien, USA

## Anhang E

### Produktbezeichnungen

- a Floatglas OPTIFLOAT der Firma Pilkington (s. Anhang D-e)
- b Weißglas OPTIWHITE der Firma Pilkington (s. Anhang D-e)
- c Weißglas CORNING 1737F der Firma Corning Incorporated (s. Anhang D-d)
- d Polyimid Optmer AL 5417 der Japan Synthetic Rubber Co., Ltd. (s. Anhang D-l)
- e Polyimid SE-1211 der Firma Nissan Chemical Industries (s. Anhang D-m)
- f OPTIGRAU der Firma Firma Pilkington (s. Anhang D-e)
- g Sunbelt Low-E der Firma AFG-Industries (s. Anhang D-n)

## Lebenslauf

19.07.1961	geboren in Neubeuern/Rosenheim
10.1966 - 07.1972	Primary School in Scone/Schottland und Grundschule in Leutkirch/Allgäu
09.1972 -05.1982	Gymnasium in Leutkirch, Reifeprüfung
1984	Studium der Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart
07.1992	Abschluss der Diplomprüfung an der Universität Stuttgart
1992 - 95	Freie Mitarbeit bei der Sonderkonstruktionen und Leichtbau GmbH in Leinfelden
1995 - 09.1998	Freie Mitarbeit bei der Werner Sobek Ingenieure GmbH in Stuttgart
03.1996 - 02.1999	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Leichte Flächentragwerke der Universität Stuttgart unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. W. Sobek
10.1998	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrallabor des Konstruktiven Ingenieurbaus der Universität Stuttgart