

1. Einleitung

Gebäudehüllen aus Glas sind in der Architektur moderner Bürogebäude sehr verbreitet. Tageslicht kann das Innere eines Raumes beleuchten, während die gläsernen Außenfassaden einen Bezug zur Außenwelt herstellen. Das Wohlbefinden – die „visuelle Behaglichkeit“ [1] – der Personen im Raum nimmt zu. Tritt jedoch Sonnenlicht in den Raum ein, so heizt sich der Raum auf; im ungünstigsten Fall blendet das Sonnenlicht.

Moderne Wärmeschutzisolierverglasungen minimieren den Wärmeübergang durch Wärmestrahlung und Konvektion zwischen dem Raum und der Außenwelt. Tritt das Sonnenlicht in den Raum ein, wird es an den Innenwänden des Raums in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt. Fensterglas ist für langwellige Strahlung jedoch undurchlässig, so dass sich der Raum aufheizt. Um die überschüssige Wärme abzuführen, werden Klimaanlage eingesetzt. Klimaanlage sind jedoch energieintensiv und vermindern das Wohlbefinden. Der Einsatz von Klimaanlage kann reduziert oder vermieden werden, wenn das einfallende Sonnenlicht gedämpft wird. Absorptionsgläser, einfach verspiegelte Gläser oder Hochleistungs-sonnenschutzgläser sind schon lange verfügbar, jedoch ist deren Lichtdurchlässigkeit nicht änderbar. Gefordert sind daher Isolierverglasungen mit anpassungsfähiger Tageslichtdurchlässigkeit.

Klassische Systeme, mit deren Hilfe die Lichtdurchlässigkeit angepasst werden kann, sind mechanisch bewegliche Lamellen wie Außenjalousien, Innenjalousien oder im Scheibenzwischenraum der Isolierverglasungen angebrachte Jalousien. Diese Systeme sind aufwändig zu warten und beeinträchtigen den optischen Eindruck der Glasfassade.

Neuere Systeme entbehren mechanischer Bestandteile und können direkt in die Isolierverglasung eingebettet werden; sie sind bereits im Handel erhältlich. Zu nennen sind hier vor allem elektrochrome Systeme [2] und Suspended-Particles-Systeme [3]. Lange Schaltzeiten, farbige Gläser oder hohe Kosten dieser Systeme führen dazu, dass sie in der Architektur selten eingesetzt werden. Andere Systeme wie thermochrome und fotochrome Systeme ändern die Lichtdurchlässigkeit durch einen chemischen Vorgang, der durch die Temperatur bzw. die Lichtintensität gesteuert wird. Sie sind günstig, müssen nicht gewartet werden und beeinträchtigen auch nicht den optischen Eindruck. Jedoch ist es nicht möglich, die Lichtdurchlässigkeit manuell einzustellen.

W. Haase [4] hat ein alternatives System auf der Grundlage einer verdreht-nematischen (TN, von engl. twisted nematic) Flüssigkristallzelle entwickelt, das die Nachteile bestehender Systeme

nicht aufweist.¹ Die Schaltgeschwindigkeit von TN-Flüssigkristallzellen beträgt üblicherweise mehrere Millisekunden und der Schaltvorgang wirkt sich auf das gesamte sichtbare Spektrum aus, so dass sich nur die Transparenz, nicht aber die Farbe ändert. Allerdings ist die Transparenz stark abhängig vom Blickwinkel.

In seiner Dissertation [4] hat W. Haase in Langzeittests gezeigt, dass der grundsätzliche Aufbau seines Systems die wechselnden Einflüsse durch Temperatur, Feuchtigkeit und Sonnenstrahlung übersteht, die an einer Außenfassade herrschen. Konventionell hergestellte Flüssigkristallzellen wie in der Flachbildschirmindustrie sind für den großflächigen Einsatz in Isolierverglasungen zu teuer. Üblicherweise eingesetzte, auf der Außenseite einer Flüssigkristallzelle aufgebrachte Folienpolarisatoren waren nicht temperaturbeständig und wurden durch einen auf der Innenseite aufgebrachten Flüssigpolarisator ersetzt. Bis jetzt stand noch kein rationelles Verfahren zur Verfügung, um den Flüssigpolarisator großflächig und homogen aufzutragen.

Im Rahmen dieser Dissertation wurden die einzelnen Herstellungsschritte solcher TN-Flüssigkristallzellen für den Einsatz in einem adaptiven System zur Änderung der Lichtdurchlässigkeit daraufhin untersucht, ob kostengünstigere Verfahren eingesetzt werden können. Zunächst werden die Grundlagen (Kapitel 2) der einzelnen Herstellungsschritte dargestellt. Danach wird die Gesamtzelle vorgestellt (Kapitel 3). Die Reihenfolge der weiteren Kapitel orientiert sich an der Reihenfolge der Herstellungsschritte. Beginnend mit dem Auftrag des Elektrodenmaterials (Kapitel 4), des Polarisators (Kapitel 5) und der Orientierungsschicht (Kapitel 6) wird aufgezeigt, wie diese Prozesse vereinfacht werden können. Im letzten Herstellungsschritt wird die Flüssigkristallzelle zusammgebaut und befüllt. Hierzu werden die Erkenntnisse dargestellt, wie dies für großflächige Flüssigkristallzellen in kostengünstiger Weise möglich ist (Kapitel 7). Schließlich werden die Auswirkungen auf das Gesamtsystem vorgestellt (Kapitel 8).

¹Unter dem Namen „Privacy Glass“ sind bereits Systeme auf der Basis von Flüssigkristallzellen auf dem Markt. Hierbei werden sogenannte PDLC (von engl. polymer dispersed liquid crystal)-Zellen eingesetzt. Durch den Schaltvorgang ändert sich die Lichtstreuung, was die Scheibe eintrüben kann, die Gesamttransmission jedoch nur geringfügig ändert.

2. Grundlagen

In den folgenden Abschnitten sollen die Grundlagen zum Verständnis der einzelnen Herstellungsschritte gelegt werden.

Es beginnt mit der Polarisierung von Licht. Darauf folgt eine allgemeine Einführung in die Flüssigkristalle, deren Lage und Ausrichtung die Polarisierung von Licht beeinflussen kann. Daraus leiten sich das Prinzip einer verdrillt-nematischen Flüssigkristallzelle und das Prinzip eines Polarisators aus lyotropem Flüssigkristall ab.

An die Flüssigkristallzelle soll über ihre gesamte Fläche ein elektrisches Feld angelegt werden können. Dazu wird eine Elektrode flächig mit Hilfe des Kathodenzerstäubungsverfahrens aufgebracht. Erläutert werden die physikalischen Hintergründe dieses Verfahrens und das Prinzip der transparenten leitenden Oxide, aus welchen das Elektrodenmaterial besteht.

Ein großer Abschnitt dieses Kapitels widmet sich schließlich den Grundlagen der Strömungsmechanik. Darauf baut das theoretische Verständnis der Flüssigbeschichtungsverfahren für dünne Schichten auf, welche für die Herstellung des Polarisators eingesetzt werden. Weiterhin sind die Grundlagen der Strömungsmechanik notwendig für das theoretische Verständnis der Zellenbautechnik.

2.1. Polarisierung von Licht

Gemäß [5] kann ein Lichtstrahl als transversale elektromagnetische Welle betrachtet werden, die sich im Raum ausbreitet und deren elektrische und magnetische Felder sowohl im zeitlichen als auch im räumlichen Verlauf schwingen. Die Felder schwingen dabei in isotropen Medien stets senkrecht zur Wellenausbreitungsrichtung, die Schwingungsebenen von elektrischem und magnetischem Feld sind senkrecht zueinander orientiert. Im Weiteren wird nur das elektrische Feld von elektromagnetischen Wellen betrachtet; eine Betrachtung des magnetischen Felds ist in analoger Weise möglich.

Die Schwingungsrichtung der Transversalwelle kann als Überlagerung zweier voneinander linear unabhängiger Schwingungsrichtungen aufgefasst werden. Sind diese beiden Schwingungsrichtungen vollständig unkorreliert, spricht man von unpolarisiertem Licht. Bei linear

polarisiertem Licht hingegen schwingt das elektrische Feld einer elektromagnetischen Welle nur in einer Richtung. Wie in [5] bezieht sich die Polarisationsrichtung im Folgenden stets auf die Schwingungsrichtung des elektrischen Felds¹.

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird im Weiteren die Ausbreitung des Lichts nur in z -Richtung betrachtet, wodurch sich der komplexe Amplitudenvektor E_0 des elektrischen Felds stets in der x - y -Ebene bewegt. Die x - y -Ebene ist senkrecht zur z -Richtung orientiert. Das elektrische Feld $E(z,t)$ einer monochromatischen, ebenen Lichtwelle kann als Funktion der z -Koordinate und der Zeit t dargestellt [5] werden:

$$E(z,t) = \operatorname{Re} \left\{ E_0 \cdot e^{j(\omega t - kz)} \right\}, \quad (2.1)$$

wobei ω die Winkelfrequenz und k die Wellenzahl bezeichnen. Der komplexe Amplitudenvektor ist definiert als:

$$E_0 = \begin{pmatrix} A_x e^{j\varphi_x} \\ A_y e^{j\varphi_y} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Hierbei bezeichnen φ_x und φ_y die Phasenverschiebung der reellen, positiven Amplitudenanteile A_x und A_y in x - und in y -Richtung. Die relative Phasenverschiebung zwischen den x - und y -Komponenten des elektrischen Felds E ergibt sich zu [8]:

$$\varphi = \varphi_y - \varphi_x. \quad (2.3)$$

2.1.1. Polarisationszustände

Eine Lichtwelle wird im zeitlichen Verlauf an einem festen Ort $z = 0$ oder im räumlichen Verlauf zu einem festen Zeitpunkt $t = 0$ beobachtet. Währenddessen beschreibt der Vektor E des elektrischen Felds in der x - y -Ebene eine Kurve, die charakteristisch für den Polarisationszustand ist. Im Allgemeinen handelt es sich bei der Kurve um eine Ellipse, die in speziellen Fällen linien- oder kreisförmig wird:

Bei einer Phasenverschiebung von $\varphi = i \cdot \pi$ mit $i \in \mathbb{Z}$ bewegt sich der E -Vektor auf einer Geraden durch den Ursprung. Es handelt sich also um eine linear polarisierte Welle. Bei gleich großen Amplituden $A_x = A_y$ und einer Phasenverschiebung $\varphi = \frac{\pi}{2} + i \cdot \pi$ mit $i \in \mathbb{Z}$ bewegt sich der E -Vektor auf einer Kreisbahn. Es handelt sich in diesem Fall um zirkuläre Polarisation.

¹Aus historischen Gründen (wie z. B. in [6] definiert) hingegen ist die Polarisationsrichtung i. Allg. mit der Schwingungsebene des magnetischen Felds (auch als „Polarisationsebene“ bezeichnet [7]) verknüpft.

2.1.2. Polarisiertes Licht und optisch anisotropes Medium

Optisch anisotrope Medien besitzen richtungsabhängige relative Permittivitäten und richtungsabhängige Brechungsindices. Die Permittivität kann in Form eines Tensors $\boldsymbol{\varepsilon}$ angegeben werden, der nur reelle, symmetrische Einträge besitzt. Wird weiterhin das Hauptachsensystem des Tensors so gewählt, dass nur die Hauptdiagonale besetzt ist, ergibt sich für den Tensor $\boldsymbol{\varepsilon}$ [5]:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

wobei ε_x , ε_y und ε_z die relativen Permittivitäten in Richtung der Koordinaten x , y bzw. z bezeichnen.

Beschränkt man sich auf transparente und para- bzw. diamagnetische Materialien [5] – Materialien also, die Licht nicht absorbieren und deren relative Permeabilität $\mu_r \approx 1$ ist, so kann mit Hilfe des allgemeinen Zusammenhang $n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}$ von Brechungsindex n und relativer Permittivität ε (2.4) in Abhängigkeit der richtungsabhängigen Brechungsindices n_x , n_y und n_z ausgedrückt werden als:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon_0 \cdot \begin{pmatrix} n_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2 \end{pmatrix}, \quad (2.5)$$

wobei ε_0 die elektrische Feldkonstante bezeichnet. Die Achsen x , y und z sind die dielektrischen Hauptachsen des optischen Mediums. Per Konvention [5] sind die Brechungsindices so definiert, dass $n_x < n_y < n_z$ gilt. Es handelt sich hierbei um sogenannte biaxiale Medien, die zwei optische Achsen besitzen. Die optischen Achsen sind diejenigen Ausbreitungsrichtungen, in denen eine Lichtwelle unabhängig von ihrer Polarisationsrichtung nur einen Brechungsindex erfährt.

Bei uniaxialen Medien hingegen gibt es lediglich zwei unterschiedliche Brechungsindices: n_o , den ordentlichen, und n_e , den außerordentlichen Brechungsindex. Per Konvention [5] sind sie so definiert, dass $n_o = n_x = n_y$ und $n_e = n_z$ gilt. Damit fällt bei uniaxialen Medien die optische Achse mit der z -Achse zusammen. Eine Lichtwelle, die sich in diesem Fall in z -Richtung ausbreitet, erfährt nur den Brechungsindex n_o . In allen anderen Ausbreitungsrichtungen erfährt eine Lichtwelle zwei unterschiedliche Brechungsindices, wird also an einer Grenzschicht zweifach gebrochen. Dieses Phänomen wird daher als Doppelbrechung bezeichnet. Quantitativ wird die Doppelbrechung durch die Differenz $\Delta n = n_e - n_o$ erfasst. Die Größe Δn wird auch als optische Anisotropie bezeichnet.

2.1.3. Polarisationsfilter

Polarisiertes Licht wird in technischen Systemen üblicherweise durch Polarisationsfilter erzeugt. Diese weisen eine stark anisotrope Absorption auf. Um die richtungsabhängige Absorption zu berücksichtigen, werden die uniaxialen Brechungsindizes daher zu komplexen Brechungsindizes N_o und N_e erweitert [5]:

$$N_o = n_o - j\kappa_o, \quad (2.6)$$

$$N_e = n_e - j\kappa_e, \quad (2.7)$$

wobei κ_o und κ_e die Absorptionsindizes bezeichnen. Es gibt nun zwei unterschiedliche Arten von Polarisationsfiltern, O-Typ- und E-Typ-Polarisatoren [5]. O-Typ-Polarisatoren (siehe Abbildung 2.1a) transmittieren ordentliche Wellenanteile und dämpfen außerordentliche Wellenanteile. Die elektrischen Felder ordentlicher Wellen schwingen in solchen Richtungen, dass sie nur N_o erfahren, die elektrischen Felder außerordentlicher Wellen erfahren N_o und N_e . Es gilt dann bei idealen² Medien: $\kappa_o = 0$, $\kappa_e > 0$. E-Typ-Polarisatoren (siehe Abbildung 2.1b) verhalten sich genau umgekehrt.

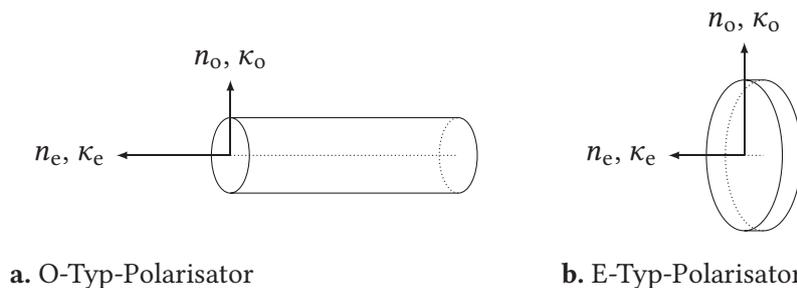


Abbildung 2.1.: Idealisierte Form anisotrop absorbierender Moleküle bei O-Typ- und E-Typ-Polarisator gemäß [5]

Die Güte eines Polarisators wird nun danach beurteilt, wieviel Licht in Durchlassrichtung im Verhältnis zu Licht in Sperrrichtung den Polarisator passiert. Es sei \mathcal{T}_1 die Transmission von linear polarisiertem Licht parallel zur Durchlassrichtung und \mathcal{T}_2 die Transmission von linear polarisiertem Licht senkrecht zur Durchlassrichtung. Für einen Polarisator gilt dann in Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge $0 \ll \mathcal{T}_1(\lambda) \leq 1$ und $0 \leq \mathcal{T}_2(\lambda) \ll 1$ [5]. Für einen idealen Polarisator gilt jeweils das Gleichheitszeichen.

2.2. Flüssigkristall

Bei gewöhnlichen Kristallen tritt gleichzeitig eine Positionsfernordnung und eine Orientierungsfernordnung der Moleküle auf, während bei gewöhnlichen, isotropen Flüssigkeiten weder

²Reale Medien absorbieren in geringem Maße stets auch die ordentlichen Wellenanteile, d. h. $\kappa_o \approx 0$.

eine Positionsfernordnung noch eine Orientierungsfernordnung der Moleküle auftritt. Zwischen diesen beiden Phasen können Mischphasen, auch Mesophasen genannt, bestehen [9]. Tritt in diesen Mesophasen eine Positionsfernordnung ohne Orientierungsfernordnung der Moleküle auf, so spricht man von einem plastischen Kristall; im umgekehrten Fall, wenn eine Orientierungsfernordnung ohne Positionsfernordnung der Moleküle auftritt, spricht man von einem flüssigen Kristall oder auch Flüssigkristall. Da nur scheiben- oder stabförmigen Molekülen eine Orientierung zugeordnet werden kann, gibt es bei kugelförmigen Molekülen keine Flüssigkristallphase [9].

Thermotrope Flüssigkristalle (TFK) bestehen in der Regel aus organischen Einzelmolekülen. Die flüssigkristalline Phase tritt abhängig von der Temperatur auf. Lyotrope Flüssigkristalle (LFK) bestehen in der Regel aus Molekülaggregaten. Die flüssigkristalline Phase tritt abhängig von der Molekülkonzentration in einer Lösung auf. Das Lösungsmittel ist meist Wasser. Bei den LFK tritt die Flüssigkristallphase meist auch in einem gewissen Maß abhängig von der Temperatur auf [10].

Eine elektrisch schaltbare Flüssigkristallzelle ist im Allgemeinen mit thermotropen Flüssigkristallen befüllt. Sie bilden ein Bindeglied zwischen der Optik und der elektrischen Ansteuerung und sind daher für den in Kapitel 2.3 beschriebenen elektrooptischen Effekt maßgeblich verantwortlich. Daneben existieren lyotrope Flüssigkristalle, auf deren Grundlage die Polarisatoren der Flüssigkristallzelle für diese Arbeit hergestellt wurden.

2.2.1. Thermotroper Flüssigkristall

Innerhalb der Flüssigkristallphase von TFK gibt es weitere Unterphasen. Als Beispiel weist die smektische Phase in einer Dimension zusätzlich eine Positionsfernordnung auf [5]. Dagegen weist die nematische Phase nur eine Orientierungsfernordnung auf. Im Folgenden werden nur nematische Flüssigkristalle – Flüssigkristalle, die in einem bestimmten Temperaturbereich eine nematische Phase aufweisen – betrachtet, da sie für die bereits erwähnte Flüssigkristallzelle eingesetzt werden [5]. Viele nematische Flüssigkristalle sind von stabförmiger Gestalt.

Der Direktor \mathbf{n} gibt an einem beliebigen Ort im Flüssigkristallmedium die bevorzugte Orientierungsrichtung der Molekülachsen in der unmittelbaren Umgebung an [5]. Ist der nematische Flüssigkristall im gesamten Volumen einheitlich orientiert, zeigt der Direktor überall in die gleiche Richtung. Bei stabförmigen Molekülen nematischer Flüssigkristalle stimmt die Richtung des Direktors mit der Orientierung der Moleküllängsachse überein, welche die Symmetrieachse des Flüssigkristallmoleküls bildet. Aufgrund dieser Symmetrie können für das Flüssigkristallmedium zwei unterschiedliche relative Permittivitäten angegeben werden: Parallel zum Direktor (ϵ_{\parallel}) und senkrecht zum Direktor (ϵ_{\perp}). Aus beiden ergibt sich eine charakteristische Größe für den Flüssigkristall, die dielektrische Anisotropie $\Delta\epsilon$:

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}. \quad (2.8)$$

Die dielektrische Anisotropie ist entscheidend für das Schaltverhalten einer Flüssigkristallzelle. Ein außen angelegtes elektrisches Feld induziert ein Dipolmoment in den Flüssigkristallmolekülen [5]. Sofern der Direktor nun nicht exakt senkrecht oder parallel zum elektrischen Feld orientiert ist, ergibt sich ein Drehmoment, das die Flüssigkristallmoleküle für $\Delta\epsilon > 0$ entlang des elektrischen Feldes und für $\Delta\epsilon < 0$ quer zum elektrischen Feld ausrichtet.

Bereits in Kapitel 2.1.2 wurde die optische Anisotropie Δn vorgestellt. Da der Direktor mit der optischen Achse des Flüssigkristalls zusammenfällt, wirkt der ordentliche Brechungsindex n_o senkrecht zum Direktor, während der außerordentliche Brechungsindex n_e parallel zum Direktor wirkt [5]. Wenn die Flüssigkristallmoleküle einheitlich orientiert sind, dann gilt: Eine beliebig polarisierte Lichtwelle, die sich in \mathbf{n} -Richtung bewegt, erfährt nur n_o und somit keinerlei Änderung der Polarisation. Eine Lichtwelle, die sich hingegen senkrecht zur \mathbf{n} -Richtung bewegt, erfährt nur dann keine Änderung der Polarisation, sofern sie linear polarisiert ist und die Schwingungsebene des elektrischen Feldes parallel zu \mathbf{n} orientiert ist (die Welle erfährt dann nur n_e) oder senkrecht zu \mathbf{n} orientiert ist (die Welle erfährt dann nur n_o).

Werden TFK über eine bestimmte Temperatur hinaus erwärmt, wechseln sie in die isotrope Phase und verlieren ihre doppelbrechenden Eigenschaften. Diese Temperatur heißt auch Klärpunkt. Da sich ein einzelner TFK nur in einem eng begrenzten Temperaturbereich in der nematischen Phase befindet, werden TFK mit unterschiedlichen Eigenschaften gemischt [5]. Korrekterweise muss man daher bei schaltbaren Flüssigkristallzellen von TFK-Mischungen sprechen.

2.2.2. Lyotroper Flüssigkristall

Nach [9] werden die Molekülaggregate, aus denen die LFK bestehen, üblicherweise aus Tensiden gebildet. Tenside sind amphiphile Moleküle, die einen hydrophilen Kopfteil und einen hydrophoben Schwanzteil aufweisen. Der Kopfteil kann sich über Wasserstoffbrücken an die umgebenden Wassermoleküle anlagern, während sich die Schwanzteile auf der gegenüberliegenden Innenseite der Aggregate befinden.

Tenside können auch scheibenförmig sein. Hierbei ist der Mittelteil hydrophob und von flächiger Gestalt und die außenliegenden Kopfgruppen sind hydrophil. Die Moleküle lagern sich zu stapelförmigen Aggregaten zusammen, weil zwischen den Mittelteilen attraktive Dispersionswechselwirkungen bestehen [9]. Der Polarisator, der in dieser Arbeit eingesetzt wird, besteht ebenfalls aus scheibenförmigen Molekülen (siehe Kapitel 2.4).

Werden Aggregate gebildet, so führt das nach [11] zu einer höheren Viskosität der Lösung: Mit dem Grad der Positionsfernordnung nimmt die Viskosität zu. Daneben besteht eine Orientierungs- und eine Positionselastizität, so dass viskoelastisches Verhalten auftritt (siehe auch Kapitel 2.7).

2.2.3. Orientierungsmechanismen des nematischen, thermotropen Flüssigkristalls

Eine einheitliche und definierte Orientierung der TFK-Moleküle auf der gesamten Fläche einer Flüssigkristallzelle erfordert, dass von außen eine Orientierungsrichtung vorgegeben ist. Bewirkt wird dies durch eine Orientierungsschicht, die üblicherweise aus einer dünnen, transparenten Polymerschicht besteht. Das eingesetzte Material ist meist ein Polyimid. Eine bestimmte Orientierungsrichtung wird festgelegt, indem die Orientierungsschicht mehrfach in dieser Richtung gerieben wird. Die daraufhin eingefüllten Flüssigkristalle richten sich mit ihren Moleküllängsachsen entlang der Reiberichtung aus. Zusätzlich sind die Flüssigkristallmoleküle dann um einen Winkel ϑ gegenüber der Ebene der Orientierungsschicht verkippt (siehe Abbildung 2.2). Dieser Winkel wird als Vorverkippfungswinkel bezeichnet und seine Größe hängt bei

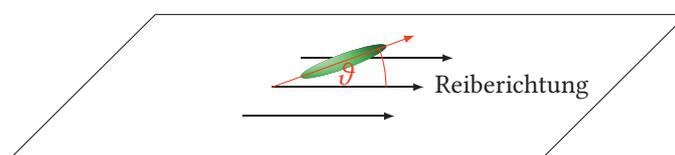


Abbildung 2.2.: Reiberichtung und Vorverkippfungswinkel ϑ

Polymerschichten hauptsächlich von der Art des Materials ab. Die Reibestärke selbst beeinflusst die Größe des Vorverkippfungswinkels nur geringfügig [12]. Auch bei den Versuchen von M. Brunner mit homöotropen Flüssigkristallzellen war kein signifikanter Einfluss der Reibestärke erkennbar [13]. Reibestärke ist hier ein Maß für die Kraft, die beim Reiben auf die Schicht wirkt.

Beim Reiben können mikroskopisch kleine Gräben entstehen. Nach [14] ist der Einfluss durch die Oberflächenstruktur jedoch nur ein möglicher Mechanismus, die Orientierung der TFK-Moleküle zu erklären. Die Enden von Molekülketten des organischen Materials der Orientierungsschicht, die durch das Reiben ausgerichtet werden und auf die TFK-Moleküle einwirken, beschreiben einen anderen möglichen Mechanismus. In [15] wird ein solcher Mechanismus auf molekularer Ebene beschrieben: Polyimid besteht unter anderem aus Benzolringen. Die Benzolringe sind vorzugsweise parallel zur Oberfläche orientiert. Daneben gibt es Benzolringe, die senkrecht zur Oberfläche orientiert sind (siehe Abbildung 2.3a, x - z -Ebene bzw. y - z -Ebene).

Wird nun die Polyimidschicht in x -Richtung gerieben, treten zweierlei Änderungen bei der Orientierung der Benzolringe auf. Zum einen verkippen die ursprünglich parallel zur Oberfläche liegenden Benzolringe entgegen der Reiberichtung aus der Ebene der Oberfläche heraus (siehe Abbildung 2.3b ①). Zum anderen sind die senkrecht zur Oberfläche orientierten Benzolringe nun nicht mehr gleichmäßig auf alle Orientierungsrichtungen verteilt, sondern liegen vorwiegend parallel zur Reiberichtung (siehe Abbildung 2.3b ②).

Die stabförmigen Flüssigkristalle bestehen unter anderem aus hintereinander angeordneten Benzolringen. Zwischen den Benzolringen der Flüssigkristalle (siehe Abbildung 2.4) und den

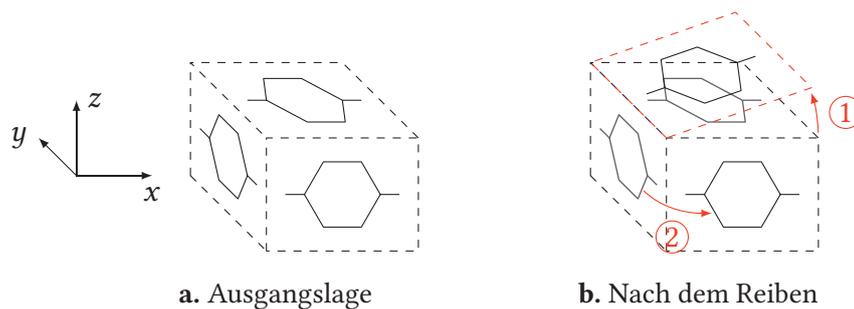


Abbildung 2.3.: Benzolringverteilung an der Oberfläche einer Polyimidschicht nach [15]

Benzolringen des Polyimids kommt es nun zu Wechselwirkungen. Die Flüssigkristalle richten sich an den Benzolringen des Polyimids aus. Die erstgenannte Änderung, die Verkippung der Benzolringe des Polyimids aus der Ebene der Oberfläche heraus, führt so zu einem einheitlichen Vorverkipfungswinkel [15]. Die zweitgenannte Änderung, die Häufung von Benzolringen parallel zur Reiberichtung bewirkt eine einheitliche Ausrichtung der Flüssigkristalle in Reiberichtung [15].

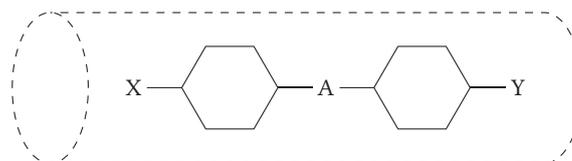


Abbildung 2.4.: Molekülstruktur eines typischen stabförmigen Flüssigkristallmoleküls, mit den Endgruppen X und Y und mit der Verbindungsgruppe A [5]

2.3. Verdrillt-nematische Flüssigkristallzellen

In dieser Arbeit wird eine verdrillt-nematische Flüssigkristallzelle (kurz VN-Zelle) eingesetzt. Die VN-Zelle ist auch unter dem Namen seiner Erfinder als Schadt-Helfrich-Zelle [16] und als TN-Zelle (von engl. *twisted nematic*) bekannt. Die VN-Zelle wird eingesetzt, weil hier der sogenannte Wellenleitungseffekt (engl. *waveguiding effect* oder auch *adiabatic following*) ausgenutzt werden kann [5]. Ist der Wellenleitungseffekt wirksam, kann eintretendes Licht unabhängig von seiner Wellenlänge moduliert werden. Zunächst wird der allgemeine Aufbau einer VN-Zelle dargestellt, danach werden ihre Funktionsweise erklärt und ihre speziellen optischen und optoelektrischen Eigenschaften im Detail betrachtet.

2.3.1. Aufbau

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf VN-Zellen transmissiver Art. Sollen Flüssigkristallzellen für die Lichttransmission in Gebäudeverglasungen eingesetzt werden, so sind transmissive Flüssigkristallzellen notwendig.