

# MOpti-Vortrag

Robert Appel

## Wikipedia: Optical switch

Ein optischer Schalter ist ein Gerät, dass selektiv optische Signale an/aus oder von einem Kanal zu einem anderen schaltet. Der erstgenannte wird als ein optischer (Zeit-Domäne) Schalter oder ein optischer Modulator, während der letztgenannte als ein optischer Raum-Schalter oder einen optischen Router bezeichnet wird.

## Applications

Die Technologie des optical switching wird von dem Bedarf an Flexibilität in optischen Netzwerken angetrieben. Führende Anwendungen sind optische Abschirmung, Testsysteme, fern-rekonfigurierbare add-drop Multiplexer und Sensorik.

*Multiplexverfahren (lat. multiplex vielfach, vielfältig) sind Methoden zur Signal- und Nachrichtenübertragung, bei denen mehrere Signale zusammengefasst (gebündelt) und simultan über ein Medium (Leitung, Kabel oder Funkstrecke) übertragen werden. Oftmals werden Multiplexverfahren auch kombiniert, um eine noch höhere Nutzung zu erreichen. Die Bündelung erfolgt, nachdem die Nutzdaten auf ein Trägersignal moduliert wurden. Entsprechend werden sie beim Empfänger nach der Entbündelung (dem Demultiplexen) demoduliert.*

*Ein Add-Drop-Multiplexer ist ein Gerät der Multiplextechnik, das einem Multiplexsignal sowohl ein oder mehrere Teilsignale hinzufügen (add) und auch aus dem Multiplexsignal Teilsignale entnehmen (drop) kann. Das empfangene Multiplexsignal wird bis auf diese Add/Drop-Änderungen unverändert weitergesendet.*

Aktuelle Anwendungen sind zB:

- passiver Schutz-Schalten für Wiederherstellung des Service nach einer Störung, zB einem Bruch in einer Faser
- Remote Fiber Test Systems (RFTS) spürt und lokalisiert eine Störung innerhalb des Glasfaserkabels.

Aufstrebende Technik ist optical cross-connection. Also eine Kopplung zwischen mehreren optischen Inputs und Outputs.

# Optical switches - Materials and design

## Introduction to optical switches

Eine Glasfaser hat eine Bandbreite von 25 000 GHz und ein Kabel das 1000 dieser Fasern enthält kann bis zu sechs billionen Videotelefonate gleichzeitig übertragen, also ein Telefonat für jeden Menschen auf der Erde. Mit den Techniken wie zB HDTV und 3D-Kino zu Hause, braucht es den Netzausbau und dieser ist nur mit Glasfaser zu bewerkstelligen unter verwendung von Halbleiterlasern. Deshalb müssen optische Bauteile für ein optisches Netzwerk gebaut werden. Allgemein ist ein Schalter dafür zuständig eine Umleitung eines Signals aufgrund eines Steuersignals durchzuführen. Das Signal kann dabei Multiplex-Verkehr oder auch eine große Anzahl von bit Kanälen sein. Die Anwendung von optischen Schaltern ist nicht nur limitiert auf Kommunikationsnetzwerke sondern könnten auch in Zukunft in großen multi-Prozessor Computern verwendet werden, deren Datenrate größer als 100Gbit/s. Für Quantencomputing müssen noch Schalter entwickelt werden, die nicht die Phaseninformation stören.

Ein optischer Schalter schaltet/leitet selektiv ein optisches Signal einer optischen Faser oder eines optischen Schaltkreis zu einem anderem. Verschiedene Methoden durch verschiedene physikalische Mechanismen.

**Elektro-optischer Schalter:** Verminderung des Brechungsindex durch anlegen einer Spannung an einem Halbleiter ermöglicht es zu Schalten. Wird eine Oberfläche des Materials Ladungsträger angebracht, kommt es dazu, dass der Brechungsindex einer Seite des Materials reduziert wird, das führt dazu das die Seiten des Materials unterschiedliche Brechungsindizes besitzen, was wiederum zu totaler inneren Reflexion führt. Das führt schließlich dazu, dass ein einfallender Strahl eher reflektiert wird als an der OF transmittiert wird. Das kann verwendet werden um den Strahl zu schalten. Änderung des Brechungsindex eines Strahlengangs zu einem anderen führt zur Interferenz, diese kann konstruktiv bzw destruktiv sein, wenn beide Strahlengänge sich treffen. Elektro-optische Schalter machen sich genau das zur Nutze in einem interferometrischen Apparat.

**Thermo-optischer Schalter:** Der Brechungsindex kann mit Temperatur beeinflusst werden. Brechungsindizes von Materialien nehmen ab mit ansteigender Temperatur. In einem interferometrischen Apparat kann so ein Schalter ermöglicht werden.

**Magneto-Optischer Schalter:** Die Polarisation des Lichtes kann geändert werden, wenn es durch ein Medium durchgeht das mit einem Magnetfeld wechselwirkt. Die Rotation der Polarisationsebene ist bekannt als Faraday-Effekt, ist proportional zur Intensität des angelegten Magnetfeldes in Richtung des Lichtstrahls. Mit einem Polarisator am Ende des Mediums, kann der Strahl dann abgeschnitten werden.

**MEMS Schalter:** Wird ein Strahl an einem micro-Spiegel reflektiert, kann der reflektierte Strahl auf eine Anzahl an optischen Fasern präzise über die Auslenkung des Spiegels gelenkt werden. Diese Spiegel können zu sog. micro-electro-mechanical (MEMS) systems eingebaut werden. Das wird oft bewerkstelligt in dem eine Si-O<sub>2</sub> in kleine arrays von flachen Balken oder Membranen geätzt wird. Die Bewegung dieser Spiegel bildet dann die Basis der auf MEMS-basierenden optischen Schalter.

**semiconductor optical amplifier (SOA) Schalter:** Propagiert Licht durch ein Aktives Laser Medium, kann sich dessen Wellenlänge, Polarisation, Phase und Amplitude ändern, dabei kann dann durch ein Element, dass sensitiv auf die Eigenschaft reagiert die durch die Anregung verändert wurde, eine (gating function) Ein-/Ausblende Funktion erzeugt/erhalten werden. Bsp (grating polarization beam splitter) Pol Beam Splitter während ein Mach-Zehnder Interferometer nach Wellenlänge, Polarisation und Phase selektieren kann. Das Einbinden eines Halbleiter optischen Verstärkers (SOA) formt die Basis des SOA Schalters

**Schalten mit nichtlinearen Effekten:** Mit dem nichtlinearen Kerr Effekt kann der Brechungsindex eines Materials durch anlegen eines elektrischen Feldes verändert werden. Im Falle das das Licht selbst das E-Feld darstellt, handelt es sich um den optischen Kerr Effekt. Dieser ändert den Brechungsindex proportional zur lokalen Strahlungsintensität/-dichte des Lichtes. Dieser Brechungsindex ist verantwortlich für die Effekte des Selbst-Fokussierens und Selbst-Phasen Modulation. Der Strahl der durch ein Medium propagiert, erfährt einen Phasenverschub aufgrund des sich ändernden Brechungsindex, der durch die Intensität des Strahls hervorgerufen wird. Wird hierbei noch ein Ein-/Ausblendendes Element (gating) Element verwendet, kann eine Schaltung verwirklicht werden.

**Flüssigkristall Schalter:** In Flüssigkristallen ändert die Orientierung der Stab-ähnlichen Moleküle die Polarisierung eines linear pol Strahls, der durch das Medium propagiert. Wird die Orientierung der Moleküle kontinuierlich von Anfang bis Ende einer Lage bis  $90^\circ$  variiert, durch anlegen einer Spannung, kann die Polarisierungsebene des Lichtes um  $90^\circ$  gedreht werden, im Vgl zum Input. Mit einem Polarisator kann am Ende des Flüssigkristalls, kann dann ein Schalter verwirklicht werden. Spannung an kommt durch, Spannung aus nicht.

**Schalter basieren auf photonischen Kristallen:** photonische Kristalle sind periodische optische Nanokristalle, typisch hexagonal angeordnete Arrays auf Löchern in einem flachen Hohlleiter/Wellenleiter (waveguide), so hergestellt, dass sie den selben Effekt auf Photonen wie die Periodizität von Halbleiterkristallen auf Elektronen hat. Bei richtiger Wahl des Loch Durchmessers und Periode, können spezifische Wellenlängen nicht durch das Material propagieren. Auf diese Weise kann durch Entfernen einer solchen Reihe, kann das Licht durch diese Reihe hindurch propagieren, wo keine Löcher sind. Durch Änderung des Brechungsindex des Halbleiters durch den das Licht propagiert, zB durch einen Kontrollpuls, kann ein Phasenverschub auftreten. Durch die Phasenänderung kann dann die Basis des Schalters bilden.

**Faser-Schalter:** Physikalisch hin und her bewegen von zwei Fasern die jeweils von einem Piezoelement aufgebracht sind und so bewegt werden können. Bei richtiger Ausrichtung findet Transmission statt und es kann zwischen den Fasern geschaltet werden.

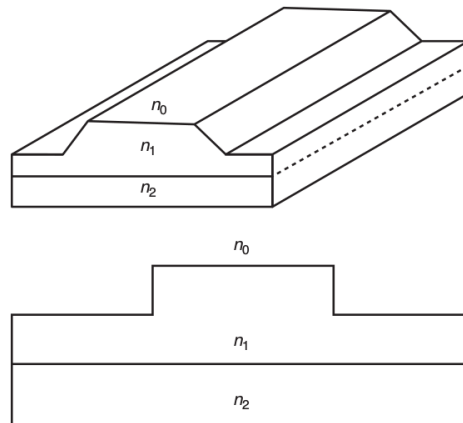
**Quanten optischer Schalter:** Bei dem Quantum confined Stark effect beschreibt die Änderung einer quantisierten Energie in einem Quantenpotenzial wenn ein el Feld über den Quantenpotenzial gelegt wird. Daraus resultiert eine Reduktion der Übergangsenergie zwischen dem geringsten quantisierten Energieniveau von Loch und Elektron. Die optische Absorption des Quantenpotenzials ist erhöht für eine bestimmte Wellenlänge bei Anschluss einer Spannung.

## Electro-optical switches

### Theory and principles of electro-optical switches

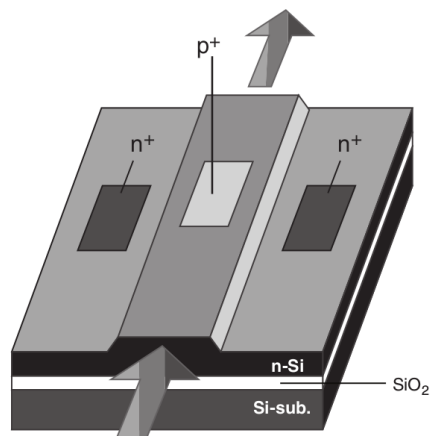
### Device structures of electro-optical switches

1x1 optischer Schalter = 1x1 optischer Modulator. (1x1 = einer rein, einer raus) Wird mit III-V Materialien hergestellt, Bsp Si(Ge),  $LiNbO_3$  oder Polymeren. Wird zB im Bild als SOI hergestellt also Silizium auf einem Isolator (SOI). Besteht aus einer Einzelmoden-Lamelle die als Einzelmoden-Wellenleiter dient, diese besteht aus einem n-typ (n-dotiert) Silizium auf einer  $SiO_2$  Lage. Eine p-n-Zusammenführung wird unter der OF der Lamelle erstellt, um dort Ladungsträger in den Wellenleiter einzubringen. Wird der p-n-Übergang in Vorwärtsrichtung betrieben, wenn optische Signale in die Lamelle entkoppelt werden, kann eine große Zahl von Ladungsträgern in den Wellenleiter eingebracht werden, dass führt dazu dass der Brechungsindex sich verringern wird. Das kann dazu führen, dass der leitende Modus in den Strahlungsmodus des Substrates und der Hülle übergeht.



2.1 Cross-section view of a ridge waveguide.

Abbildung 1: Durschnitt eines Wellenleiters für einen el opt Sw



2.7 Schematic diagram of  $1 \times 1$  optical switch/modulator in SOI.

Abbildung 2: Schematische Darstellung eines 1x1 el optischen Sw auf SIO

*Für Wellenleiter heißt das ein Strahlendermodus der nicht nur auf den Kern zB einer Faser begrenzt ist. Dieser Modus hat Felder, die überall außerhalb des Leiters oszillieren.*

Das führt dazu das viel Energie des leitenden Modus verloren geht und in der Lamelle absorbiert wird. Das führt dazu, dass die Lamelle den Strahl abschneidet.  $n^+$  zeigen Kollektoren an. Die Modulationstiefe (relative Modulations Amplitude / max. Änderung in Absorption) von 96 % bei 45 mA (was auch der Betriebsstrom ist). Der Verlust beim einstrahlen liegt bei 3.65 dB bei einer Wellenlänge von 1.3  $\mu\text{m}$ . Schlaltzeit liegt bei 160 ns.

- funkt so, dass durch anlegen eines Feldes ein Strahlungsmodus erreicht werden kann. Der kommt durch die reflexion innerhalb des LEiters durch die Änderung des Brechungsindex.
- Dieser Strahlungsmodus hat Einfluss auf die Propagationskonstante des Materials  $\gamma = \alpha + i\beta$ . Dadurch wird  $\beta$  verändert. Das ist der Parameter für die Phase, weshalb man hier auch von Phasenmodulation sprechen könnte.

## Liquid crystal optical switches

### Liquid crystal theory and principles

Einige organische Stoffe besitzen eine gewisse molekulare Ordnung abhängig von der Temperatur (sog. thermooptische Flüssigkristalle [LC]), also ein Mittelding zwischen kristallinen Stoffen und amorphen Flüssigkeiten. Manche Eigenschaften der Flüssigkristalle sind anisotrop wie zB die dielektrische Konstante und der Brechungsindex, wie auch bei manchen Festkörpern, sie sind aber gleichzeitig flüssig wie normale Flüssigkeiten. Das hat zur Folge, dass die optischen Eigenschaften sich leicht durch anlegen eines el Feldes kotrollieren lassen. Grundlegen basieren LC-Bauteile aus einer dünnen Schicht eines LC-Materials zwischen zwei Glassubstraten. Die Dicke der LC Lage wird durch kleine kallibrierte Platzhalter gleich gehalten. Die Platzhalter sind kleine Plastikmicrosphären oder Glasfasern. Es werden transparente Elektroden in das Substrat eingebracht, um Spannung auf die LC Mol zu geben, die die Transmission durch die Zelle kontrollieren. Schließlich werden auf die Zelle Polarisatoren auf beide Seiten des Substrates angebracht, und andere photonische Applikationen.

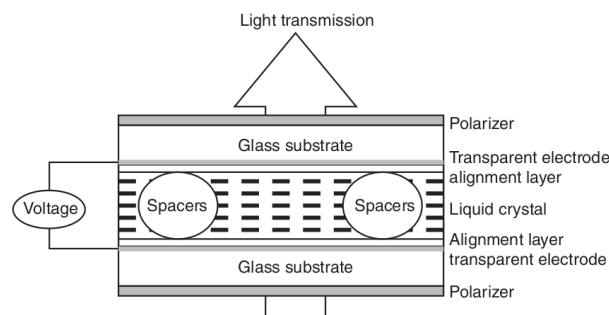


Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines LC Bauteils

### Liquid crystalline phases

Phasen zwischen Feststoff und Flüssigkeit sind in LC Materialien zu finden, diese werden LC Phasen oder Mesophasen genannt. Die Mesophasen treten auf wenn die Moleküle stark anisotrop sind, üblicherweise bei Stabförmigen oder Scheibenförmigen Molekülen. Meistens werden im photonischen

Bereich stabförmige Moleküle verwendet. Die meisten Materialien haben Mesophasen als Funktion der Temperatur. Bei hoher Temperatur sind die Moleküle ungeordnet. Bei Kühlung richten sie sich in einer bestimmten Richtung aus, sind aber nicht in einer räumlichen Ordnung (= nematische Phase). Wird die Temperatur weiter reduziert, bildet sich auch teilweise eine räumliche Ordnung, die eine Lagenstruktur aufweist, mit der langen Achse der Moleküle entlang der Lage (= smektisch [in der Ebene] -A Phase). Wird die Temperatur weiter reduziert, bildet sich eine Schieflage der Moleküle aus, im Bezug auf die Senkrechte der Lage (smektisch-C Phase). Bei niedrigen Temperaturen bildet sich dann sowohl eine Orientierung als auch eine räumliche Anordnung aus (kristalliner Feststoff). Dabei zeigen nicht alle LC Materialien alle Phasen.

**Hier fehlt noch ein Absatz, faöös das wichtig werden sollte**

## Basic liquid crystal structures for optical switching

### Twisted nematic (TN) cells

Nematische LCs mit positiver dielektrischer Anisotropie, für die die dielektrische Konstante größer in der langen Achse des Moleküles ist als in der kurzen Achse ist, werden in TN Materialien verwendet. Planare Anordnung, (zB LC Molekül Achse parallel zum Glassubstrat) und senkrecht Schleifen entlang der beiden Anordnungsrichtungen werden verwendet. Deshalb führen die LC Moleküle eine 90° Drehung entlang der LC Zelle. Dadurch wird linearpol Licht so modifiziert, dass es mit 90° Polarisierungsverschiebung zum eintreffenden Licht heraustritt. Das geschieht wenn die Mauguin Bedingung erfüllt ist:

$$d \cdot \Delta n \gg \frac{\lambda}{2}$$

dabei bezeichnet  $d$  die Dicke der Zelle,  $\Delta n$  die LC Doppelbrechung/opt. Anisotropie und  $\lambda$  die Wellenlänge.

Die Moleküle orientieren sich neu, wenn die Spannung größer ist als die Schwellspannung  $V^{th}$  ist. Wird eine Schaltspannung  $V^{sw}$  erreicht (ON-Zustand), richten sich die LC Moleküle parallel zum Feld aus und die Rotation der Polarisation verschwindet.

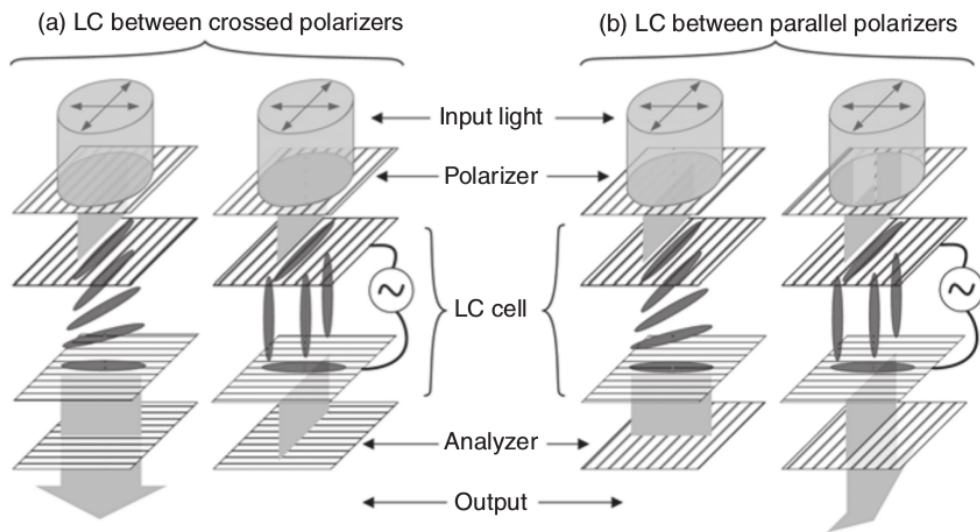
Polarisatoren werden so angebracht, dass sie parallel zur Schleifrichtung (Richtung in der die Mol liegen) sind. Die typischen Spannung für Schwellspannung liegen bei 1-2V und bei der Schaltspannung bei 3-5V.

## Liquid crystal switches and applications

### Switches based on polarization management

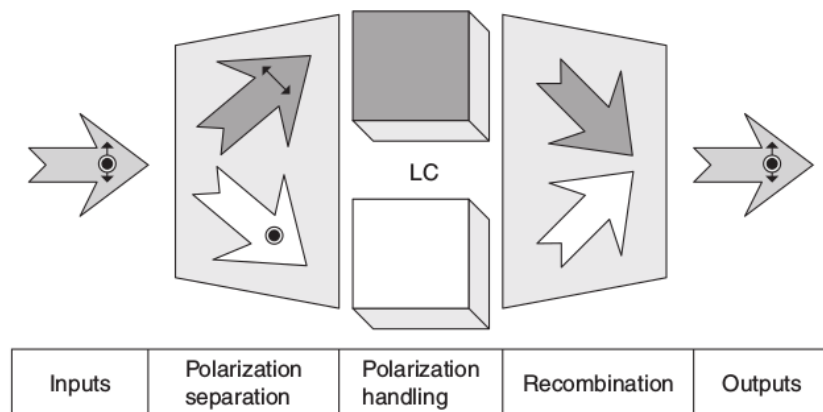
Dieser Schalter beruht auf dem Prinzip, dass die Polarisationssebene des einfallenden Lichtes gedreht wird bei Anlegen eines elektrischen Feldes. Die Änderung der Polarisation mit einer TN Zelle in Kombination mit einem Doppelbrechenden Calcitkristall, der räumlich Polarisation selektieren kann, oder einem Polarisations Strahlteiler (PBS) ist räumliches optisches Schalten möglich. Um die Polarisation zu verstärken und Verluste zu minimieren, wird eine Vielfach Polarisationsmethode verwendet, indem jede Polarisation parallel verarbeitet wird. Das Signal wird in die TE und TM Komponente aufgeteilt, die wiederum am Ausgang rekombiniert werden. Das Prinzip ist in Abbildung 5 dargestellt.

*Die transversalelektromagnetische Welle oder TEM-Welle (engl. Transverse Electromagnetic Mode) ist ein Sonderfall einer elektromagnetischen Welle, bei der in Ausbreitungsrichtung sowohl das elektrische als auch das magnetische Feld verschwindet. Stattdessen befinden sich die magnetischen und elektrischen Felder ausschließlich in Ebenen senkrecht*



8.4 Representation of a TN cell operation: (a) crossed polarizers and (b) parallel polarizers.

Abbildung 4: **Arbeitsschema einer LC Zelle mit a) gekreuzten Polarisatoren b) parallelen Polarisatoren.** In beiden Fällen tritt unpolarisiertes Licht ein und trifft auf einen Polarisator, das Licht wird linear polarisiert. Die grauen Bohnen zeigen die Orientierung der Moleküle in der Zelle. a) und b) zeigen jeweils zwei Fälle einmal mit und ohne angelegte Spannung. Der UNterschied zwischen a) und b) sind die Polarisatoren am Ende der Zelle.



8.11 Block diagram of a generic polarization management LC switch.

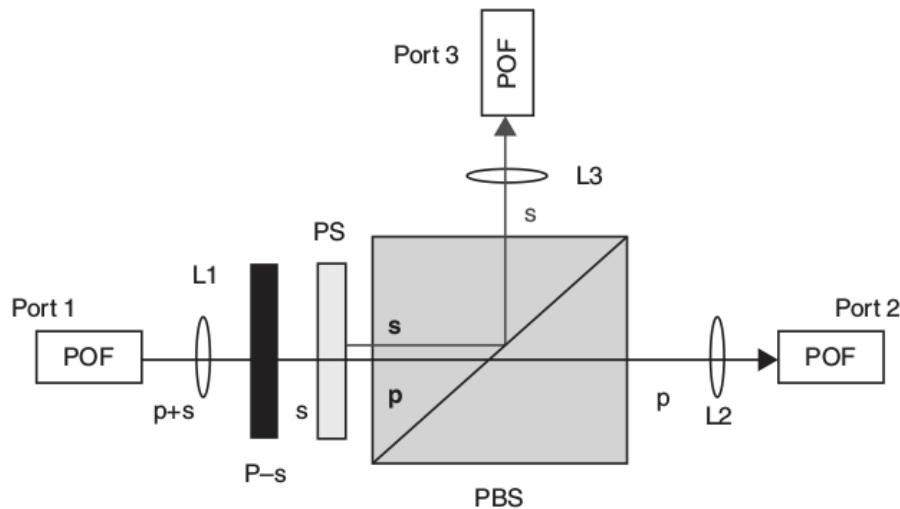
Abbildung 5: LC Switch Polarisationsverarbeitungs Methodic Schema

(transversal) zur Ausbreitungsrichtung. Dieser Typ elektromagnetischer Wellen bildet sich als geführte Welle z. B. zwischen Außen- und Innenleiter eines verlustlosen Koaxialkabels aus. Auch die ebene Welle ist ein Beispiel für TEM-Wellen.

- transversal-elektrische Wellen (TE-Wellen); hier verschwindet nur die elektrische Komponente in Ausbreitungsrichtung, während die magnetische Komponente Werte ungleich 0 annehmen kann.
- transversal-magnetische Wellen (TM-Wellen); hier verschwindet nur die magnetische Komponente in Ausbreitungsrichtung, während die elektrische Komponente Werte ungleich 0 annehmen kann.

Einfachste Bsp dazu ist der zuvor beschriebene 1x2 LC Schalter in Abbildung 6. Dieser funktioniert wie folgt, der Polarisator P manipuliert die Polarisierung zum bevorzugten Output. PS bezeichnet hier den LC, liegt keine Spannung an wird das linear polarisierte Licht aus P um 90° in der Polarisierung gedreht. Das Licht tritt durch den PBS und trifft so auf Port 2. Wird eine Spannung größer als  $V^{sw}$  angelegt, richten sich die LC Molekülen parallel aus zum E-Feld und es tritt beim PS keine Rotation der Polarisierung auf. Weshalb das Licht im ON-Modus des Schalters vom PBS zum Port 3 reflektiert wird.

Die Transmission kann also durch die Spannung an der LC Zelle gesteuert werden, kleinere Spannungen führen zu einer geringeren Rotation der Polarisierungsebene. Folglich können diese Schalter auch als variable optische Dämpfungsglieder (variable optical attenuators = VOA) verwendet werden. Durch anlegen einer Spannung  $V^{th} < V < V^{sw}$  kann der VOA so eingestellt werden, dass er auf beide Output ein Signal mit einstellbarem Verhältnis zu einander gibt. Das ist abhängig von der angelegten Spannung und damit von der Polarisierungsebene.



8.12 Scheme of a  $1 \times 2$  LC optical switch.  
POF: polymer optical fibers; PS: TN-LC cell; PBS: polarization beam splitter; P: polarizer; L: focusing/collimating lens.

Abbildung 6: LC Polarisations Schalter

### Performance of polarization management based liquid crystal switches

Alle Schalter basieren Grundsätzlich auf dem oben dargestellten System, dabei können auch andere optische Instrumente verwendet werden Prismen, Spiegel etc. Eine schnellere Schaltzeit wird dadurch erhalten, das ferroelektrische LC verwendet werden. > *Ferroelektrizität (oder auch Polarisationskats-trophe)* beschreibt das Phänomen, dass Stoffe mit einem elektrischen Dipolmoment durch das Anlegen



eines äußeren elektrischen Feldes die Richtung der spontanen Polarisierung ändern. Mit FLCs können Reaktionszeiten von 35  $\mu$ s und mit NLCs nur 20 ms. NLC reagieren langsamer als FLC können auf eine größere Bandbreite im Bezug auf Wellenlängen. Tabellen mit Publikationen und Bauart des Schalters sind in den Abb. 7 und 8 zu finden.

Table 8.1 State-of-the-art and performance parameters of RotPol LC switches.

Contribution	LC cell	$\lambda$ (nm)	Type	Fiber	CT (dB)	IL (dB)	Turn-on/D. time	Control voltage	Elements
(Wagner and Cheng, 1980)	TN-LC	633	1 $\times$ 2	MM	-20	0.4 <sup>1</sup>	—	2.5V	2PBS, 2AP, 1LLC
(Soref, 1981)	TN-LC	632.8	2 $\times$ 2	MM	-27	2.5	50/150ms	5V	4PBS, 2 LLC, 7 AP
(Soref and McMahon, 1982)	TN-LC	633	2 $\times$ 2	None	-32	3	—	6V	2 LC, 2 HWP, 3 Calcites
(McAdams et al., 1990)	NLC-FLC	—	2 $\times$ 2	—	-20	1.4	250 $\mu$ s	15Vrms	2 NLC 2 SS-FLC, 2 M, 4 HIEP
(McAdams and Goodman, 1990)	FLC	633	1 $\times$ 4	—	-21.6	3.5	50 $\mu$ s	—	4 FLC, 4 PBS
(Grimes et al., 1991)	FLC	820(670)	6 $\times$ 6	MM		11.1	150 $\mu$ s	—	6FLC, 6 GL
(Fujii, 1993)	TN-LC	1300	2 $\times$ 2	SM	-43.3	2.2	—	—	2 PBS, 2AP, 5LC, 2 BR
(Riza and Yuan, 1998)	FLC	1300	2 $\times$ 2	SM	-34.1	6.94	35.3 $\mu$ s	—	4PBS, 2M, 4LC, 2AP, 2HWP, 2QWP, 1LB
(Riza and Yuan, 1999)	FLC	1550	2 $\times$ 2	SM	-40	6.76	35.3 $\mu$ s	—	1PBS, 2LC, 2P, 1M, 1HWP, 1QWP, 1AP
(Vázquez et al., 2003)	NLC	650–850	1 $\times$ 2	MM	-22	7	ms	8V	1PBS, 1LC, 1P
(Riza and Madamopoulos, 2005)	TN-LC	—	—	—	-20	2	—	—	2FO-Circulator, 2 PBS, 2 LC, 2 TIR, 2 BDP
(Lallana et al., 2006)	NLC	650–850	3 $\times$ 1	MM	-23	3	20–5 ms	3V	2 PBS, 4 L, 6LC, 1 P

Abbildung 7: LC Schalter Tab 1

(Lallana et al., 2007)	NLC	650–850	Dual 3 × 2	MM	–20		13,5ms	5V	3 PBS, 8 L, 6LC
(Yang et al., 2008)	NLC/FLC	808	2 × 2	—	–36.2	2.5	60.6µs 35 µs	±15transient ±5V hold	4 PBS, 2 HWP, 4 QWP, 4 M

<sup>1</sup> neglecting reflections, expected up to 1.2dB with MM fibers and GRIN-rod lenses

AP:	Right-Angle Prism
BDP:	Beam Displacing Prism
BR:	Birefringent Crystal
FLC:	Ferroelectric Liquid Crystal
GL:	GRIN Lens
HWP:	Half Wave Plate
HIEP:	High Index Equilateral Prism
LB:	Leakage Block
LLC:	Large LC Cells
M:	Mirror
MM:	MultiMode
NLC:	Nematic Liquid Crystal
P:	Polariser
PBS:	Polarizing Beam Splitter
QWP:	Quarter Wave Plate
SM:	SingleMode
TIR:	Total Internal Reflection Prism
TN-LC:	Twist Nematic Liquid Crystal

Abbildung 8: LC Schalter Tab 2