



# Integriert-optische Modulatoren

## Technische Information und Hinweise zur Bedienung



# Integriert-optische Modulatoren

## Inhalt

1. Elektrooptische Modulatoren .....	3
1.1. Integriert-optische Wellenleiter.....	3
1.2. Der lineare elektrooptische Effekt .....	3
1.3. Phasenmodulatoren .....	4
1.4. Amplitudenmodulatoren.....	5
2. Auswahlkriterien.....	7
2.1. Wellenlänge und Wellenlängenbereich.....	7
2.2. Faserkopplung und Polarisation des Lichts .....	7
2.3. Optische Leistung .....	8
2.4. Spektrale Breite des Lichts .....	9
3. Technische Daten.....	10
4. Elektrische Steuerung der Modulatoren .....	12
4.1. Interne Beschaltung .....	12
4.2. Ansteuerung des Modulators.....	14
4.3. Bestimmung von $U_0$ und $U_\pi$ .....	15
4.4. Gleichspannungsdrift.....	16
5. Anwendungsbeispiele.....	20
5.1. Pulserzeugung.....	20
5.2. Pulspicken.....	20
6. Begriffserklärung .....	23

# Elektrooptische Modulatoren

## Integriert-optische Modulatoren

### Technische Information und Hinweise zur Bedienung

#### 1. Elektrooptische Modulatoren

##### 1.1. Integriert-optische Wellenleiter

Integriert-optische Wellenleiter sind in der Lage, in Analogie zur Lichtleitfaser Licht entlang einer vorbestimmten Bahn zu führen. Sie werden in planare Substrate ein- bzw. aufgebracht. Die Eigenschaften des Substrats bestimmen maßgeblich die Eigenschaften der Wellenleiter wie z.B. die elektrooptische Modulierbarkeit.

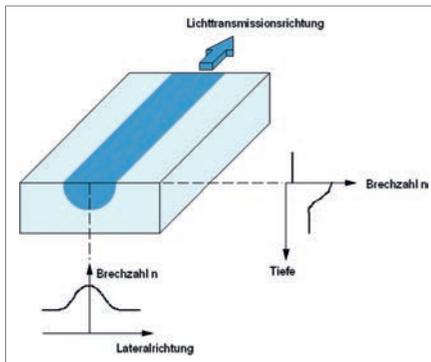


Abb. 1.1 - Schema eines integrierten optischen Wellenleiters

Der Wellenleiter selbst besteht aus einem Kanal, dessen Brechzahl im Vergleich zum umgebenden Material erhöht ist (Abb. 1.1). Der Brechzahlübergang an der Kanalbegrenzung kann stufenförmig oder, wie hier beschrieben, gradientenförmig sein. Die Lichtführung wird durch Totalreflexion an der Kanalbegrenzung gewährleistet. In Abhängigkeit von Wellenlänge, Substratbrechzahl, Brechzahlerhöhung,

Breite und Tiefe des Kanals können ein bzw. mehrere transversale Schwingungszustände (Moden) angeregt werden. Von besonderer Bedeutung ist die Führung von Licht in der Grundmode, da diese für die eindeutige Funktion vieler integriert-optischer Bauelemente zwingend ist. Integriert-optische Bauelemente, insbesondere in der optischen Kommunikationstechnik, werden üblicherweise mit optischen Fasern zur Ein- und Auskopplung des Lichts versehen. Um eine gute Koppel-effizienz zur Faser zu ermöglichen beträgt der Durchmesser des Wellenleiters in Abhängigkeit von der Wellenlänge zwischen drei und neun Mikrometern. Unter Nutzung von Wellenleitern können verschiedene Bauelemente wie Y-Verzweiger, Polarisatoren, Phasen- und Amplitudenmodulatoren, Schalter oder Wellenlängenmultiplexer realisiert werden.

##### 1.2. Der lineare elektrooptische Effekt

Der lineare elektrooptische Effekt, auch Pockels-Effekt genannt, ist ein nichtlinear-optischer Effekt zweiter Ordnung. Er beschreibt die Änderung der Brechzahl eines optischen Mediums unter Einwirkung eines äußeren elektrischen Feldes. Die Größe der Brechzahländerung hängt linear von der elektrischen Feldstärke, ihrer Raumrichtung und der Polarisation des Lichts ab. Diese Wechselwirkung wird mit dem elektrooptischen Tensor beschrieben.

# Elektrooptische Modulatoren

ben und ist im Allgemeinen anisotrop. Der Effekt tritt in polaren Materialien, unter anderem in den ferroelektrischen Kristallen auf. In der Integrierten Optik wird Lithiumniobat ( $\text{LiNbO}_3$ ) bevorzugt, welches auch zur Herstellung der hier beschriebenen Modulatoren verwendet wird. In diesem Kristall tritt die stärkste Wechselwirkung zwischen einem in der kristallographischen z-Richtung ( $E_3$ ) angelegten elektrischen Feld und z-polarisiertem Licht (Brechzahl  $n_3$ ) auf. Sie beträgt:

$$\Delta n_3 = -\frac{1}{2} n_3^3 r_{33} E_3$$

Der elektrooptische Koeffizient  $r_{33}$  beträgt 33 pm/V. Die Eindeutigkeit der elektrooptischen Brechzahländerung erfordert die Verwendung linear polarisierten Lichts.

## 1.3. Phasenmodulatoren

Lässt man auf einen Wellenleiter auf der Länge L ein homogenes äußeres elektrisches Feld wirken, so ändert sich die Brechzahl im Bereich zwischen den Elektroden, was eine Phasenverschiebung des geführten Lichts zur Folge hat. Aufgrund des kleinen Wellenleiterquerschnittes ist es jedoch technisch nicht möglich, die Elektroden so anzubringen, dass sie ein homogenes Feld erzeugen. Deshalb ordnet man koplanare Elektrodenpaare mit dem Abstand g auf der Substratoberfläche an (Abb. 1.2). Eine solche Elektrodenkonfiguration hat allerdings aufgrund des erzeugten inhomogenen Feldes einen Wirkungsgrad  $\Gamma$  kleiner als 1. Im Falle von Modulatoren in x-geschnittenen Lithiumniobatkristallen beträgt er etwa 0,65. Die Phasenverschiebung ist linear zur

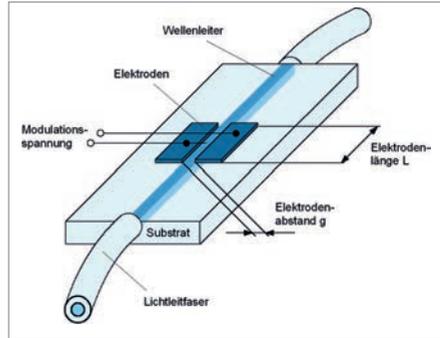


Abb. 1.2 - Phasenmodulator

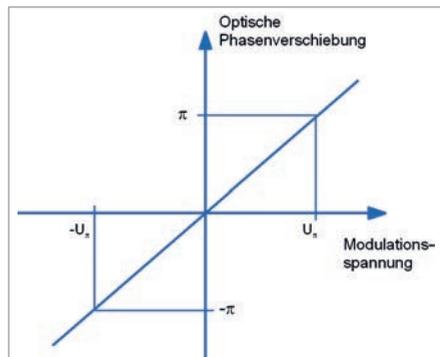


Abb. 1.3 - Kennlinie eines Phasenmodulators

angelegten Spannung U (Abb. 1.3). Eine gute Näherung der Kennlinie kann mit folgender Gleichung beschrieben werden: Die Halbwellenspannung  $U_\pi$ , die eine

$$\Delta \varphi = -\frac{\pi L}{\lambda} n_3^3 r_{33} \frac{U}{g} \Gamma$$

Phasenverschiebung von  $\pi$  erzeugt, wird wie folgt berechnet:

$$U_\pi = -\frac{\lambda g}{n_3^3 r_{33} L \Gamma}$$

Sie beträgt typisch einige Volt. Bei gege-

## Elektrooptische Modulatoren

bener Elektrodengeometrie steigt sie mit zunehmender Wellenlänge. Zum Beispiel beträgt sie etwa 3 V bei 635 nm und etwa 10 V im Wellenlängenbereich der Telekommunikation um 1550 nm. Da die an den Modulator anlegbare Spannung etwa  $\pm 30$  V beträgt, kann eine Phasenverschiebung von etwa  $20\pi$  im Roten und  $6\pi$  bei 1550 nm erreicht werden. Aufgrund der sehr schnellen elektrooptischen Wechselwirkung in Verbindung mit niedrigen Modulationsspannungen und entsprechend angepassten Wanderfeld-elektroden ist eine Modulation bis in den Gigahertzbereich möglich.

### 1.4. Amplitudenmodulatoren

Um einen Amplitudenmodulator zu erzeugen, fügt man einen elektrooptischen Phasenmodulator in ein integriertes Mach-Zehnder-Interferometer ein (Abb. 1.4). Das Anlegen einer Spannung führt zu einer Phasenverschiebung des in den Interferometerzweigen geführten Lichts, was eine Änderung des Interferenzzustands am Bauelementeausgang bewirkt. Auf diese Weise lassen sich beliebige Ausgangsleistungen zwischen einem Minimal- und einem Maximalwert ( $P_{\min}$  bzw.  $P_{\max}$ ) einstellen. Die Auslöschung wird durch das Verhältnis von Maximum zu Minimum beschrieben. Eine Phasendifferenz von  $\pi$  ist notwendig, um vom An- zum Auszustand und umgekehrt zu schalten. Die notwendige Spannung wird als Halbwellenspannung  $U_{\pi}$  des Amplitudenmodulators bezeichnet. Es ist hierbei vorteilhaft, die Elektroden im Gegentakt anzuordnen. Deshalb beträgt die Halbwellenspannung eines Amplitu-

denmodulators die Hälfte der eines Phasenmodulators gleicher Elektrodenlänge. Zum Beispiel kann eine Halbwellenspannung von 1,5 V im Roten und 5 V im Wellenlängenbereich der Telekommunikation erwartet werden. Die Auslöschung beträgt typisch 500:1 im Roten und mehr als 1000:1 im Infraroten.

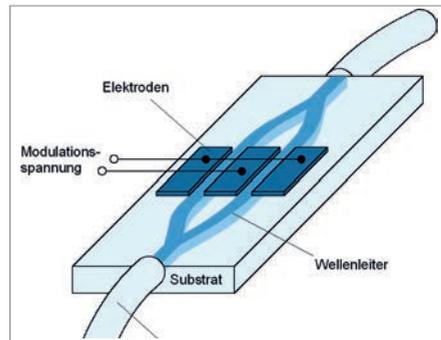


Abb. 1.4 - Mach-Zehnder-Amplitudenmodulator

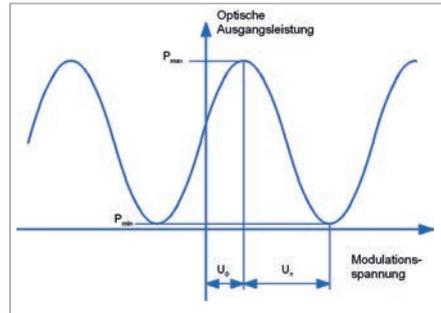


Abb. 1.5 - Kennlinie eines Amplitudenmodulators

Die Kennlinie des Amplitudenmodulators ist periodisch und entspricht einer Cosinusfunktion:

$$P = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min}) \left( \frac{1}{2} \cos \left( \frac{\pi(U - U_0)}{U_{\pi}} \right) + \frac{1}{2} \right)$$

# Elektrooptische Modulatoren

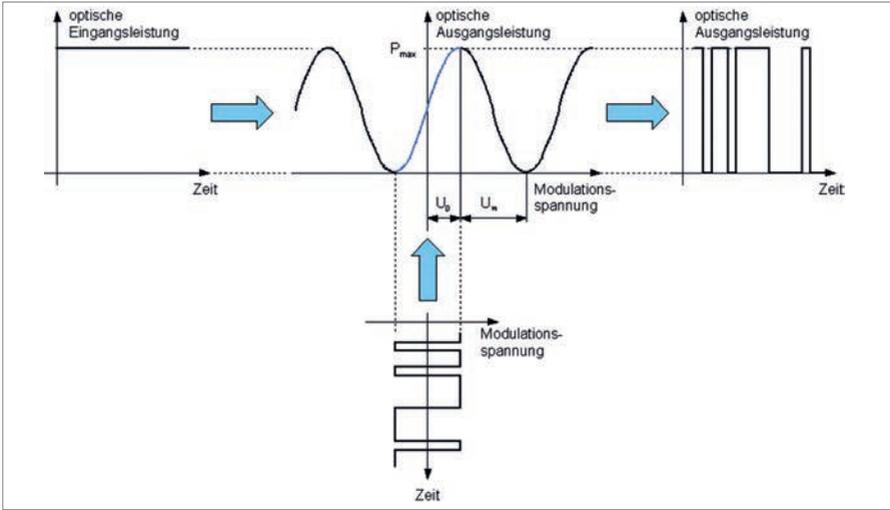


Abb. 1.6 - Signalübertragung eines Mach-Zehnder-Amplitudenmodulators

Der Arbeitspunkt  $U_0$  weicht im Allgemeinen vom theoretischen Wert  $U_0=0$  ab. Die Einstellung auf einen gewünschten Arbeitspunkt wird durch eine entsprechende Steuer- und Regelelektronik durchgeführt.

Wenn ein elektrisches Eingangssignal an die Elektroden angelegt wird, so wird dieses in eine optische Amplitudeninformation transformiert. Das optische Ausgangssignal hängt von der Spannungsamplitude und -funktion in Verbindung mit der Lage des Arbeitspunktes ab. Die Abbildung 1.6 zeigt die Transformation eines binären elektrischen Eingangssignals in ein entsprechendes optisches Ausgangssignal. Wenn die Spannungsamplitude oder der Arbeitspunkt nicht korrekt sind, reagiert der Modulator mit unkorrekten Pegeln des Ausgangssignals im binären Betrieb oder mit höheren Harmonischen im Analogbetrieb.

# Auswahlkriterien

## 2. Auswahlkriterien

Es sind integriert-optische Modulatoren verschiedener Bauarten in  $\text{LiNbO}_3$  und für verschiedene Wellenlängen erhältlich. Die Auswahl hängt von der gewünschten Anwendung ab.

### 2.1. Wellenlänge und Wellenlängenbereich

Verschiedene Eigenschaften der Modulatoren, insbesondere die Halbwellenspannung und die Einfügedämpfung, hängen von der Arbeitswellenlänge ab. Während die Halbwellenspannung bei kürzeren Wellenlängen sinkt, steigt die Einfügedämpfung, was im Wesentlichen auf die Rayleighstreuung und nur wenig auf die Absorption zurückzuführen ist. Der nutzbare Wellenlängenbereich guter Modulatorfunktion, auch als spektrale oder optische Bandbreite bezeichnet, ist aufgrund des Modenverhaltens des Wellenleiters begrenzt. Er hängt vom Substratmaterial, dem Brechzahlprofil der Wellenleiter und der Wellenlänge ab. Entscheidend ist, dass die Einmodigkeit der Wellenleiter in diesem Bereich gewährleistet sein muss.

Im hier vorliegenden Fall kann der Modu-

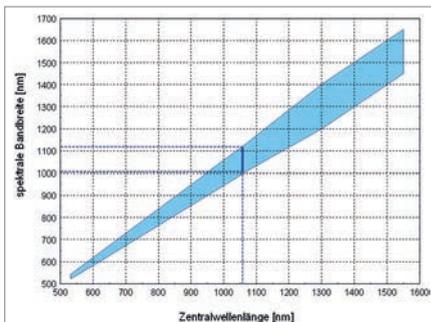


Abb. 2.1 - Nutzbarer Wellenlängenbereich

lator bei gegebener Zentralwellenlänge, für die der Modulator hergestellt wurde, Wellenlängen aus dem in Abbildung 2.1 farbig gekennzeichneten Bereich akzeptieren. Bei einer Zentralwellenlänge von beispielsweise 1060 nm beträgt die optische Bandbreite  $\pm 60$  nm, d.h. der Modulator funktioniert bei Wellenlängen aus dem Bereich zwischen 1000 nm und 1120 nm. Zu längeren Wellenlängen hin steigt die Einfügedämpfung aufgrund des cut-off des Wellenleiters, während zu kürzeren Wellenlängen die Eindeutigkeit der Modulation aufgrund der Anregung höherer Moden verlorengeht. Letzteres macht sich bei Amplitudenmodulatoren in einer Verringerung der Auslöschung und bei Phasenmodulatoren durch höhere Restmodulation bemerkbar.

### 2.2. Faserkopplung und Polarisation des Lichts

Aufgrund der Anisotropie des elektrooptischen Effekts ist eine eindeutige Funktion des Modulators nur bei linear polarisiertem Licht gewährleistet. Weiterhin sind die Wellenleiter im vorliegenden Fall polarisierend, so dass bei nicht linearer Polarisation oder unkorrekt eingestellter Polarisationsrichtung erhöhte Transmissionsverluste auftreten.

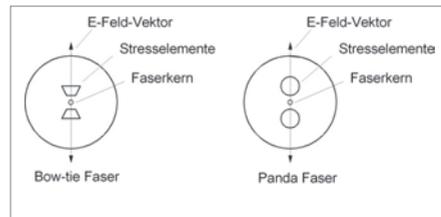


Abb. 2.2 - Polarisationserhaltende Fasern (Bow-tie und Panda Typ)

# Auswahlkriterien

Die Modulatoren werden standardmäßig beidseitig mit polarisationserhaltenden Einmoden-Lichtleitfasern der Länge von 1 m versehen. Andere Längen können auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden. Auf der Eingangsseite muss eine polarisationserhaltende Faser verwendet werden. Am Ausgang sind sowohl polarisationserhaltende als auch nichtpolarisationserhaltende Einmodenfasern möglich. Die Polarisation (E-Feld-Vektor) wird gewöhnlich entlang der Stresselemente der Lichtleitfaser („langsame Achse“) ausgerichtet. Als Standard werden Bow-tie-Fasern verwendet. Fasern des Panda-Typs können auf Anfrage angebracht werden (Abb. 2.2). Um Rückreflexionen des Lichts an den Übergängen Faser-Wellenleiter-Faser zu verhindern, sind die optischen Flächen zwischen Faser und Modulator-kristall angeschrägt. Die Modulatoren können mit unkonfektionierten Faserenden oder mit Fasersteckern, vorzugsweise FC/PC- oder FC/APC-Steckern mit um  $8^\circ$  zur optischen Achse geneigter Politur versehen werden. Die Polarisation ist zum Steckerindex entsprechend Abb. 2.3 ausgerichtet. Andere Stecker oder andere Ausrichtungen sind auf Anfrage erhältlich.

## 2.3. Optische Leistung

### Dauerstrichbetrieb

Die transmittierbare optische Leistung hängt von der Wellenlänge ab. Bei Wellenlängen von mehr als  $1 \mu\text{m}$  kann eine Leistung am Eingang von bis zu ca.  $0,3 \text{ W}$  genutzt werden. Im Roten beträgt das Leistungslimit ca.  $30 \text{ mW}$  und im Grünen lediglich  $10 \text{ mW}$ .

### Impulsbetrieb

Die transmittierbare optische Leistung hängt von der Wellenlänge, der Pulslänge, der Repetitionsrate und der mittleren Leistung ab. Das Verhalten der Modulatoren im Impulsbetrieb ist nur punktuell und nicht in allen Einzelheiten bekannt. Zum Beispiel sind die Modulatoren in der Lage,  $150 \text{ fs}$ -Pulse mit einer Repetitionsrate von  $80 \text{ MHz}$  und einer mittleren Leistung von  $50 \text{ mW}$  in der Eingangsfasern bei  $1060 \text{ nm}$  zu verarbeiten. Die Leistung im Puls beträgt dabei weit mehr als  $100 \text{ Watt}$ . In der Faser verbreitern sich die Pulse und das Pulsspektrum aufgrund der nichtlinearen Dispersion der Faser. Hingegen wirken Mikro- und längere Nanosekundenpulse wie Dauerstrichbetrieb.

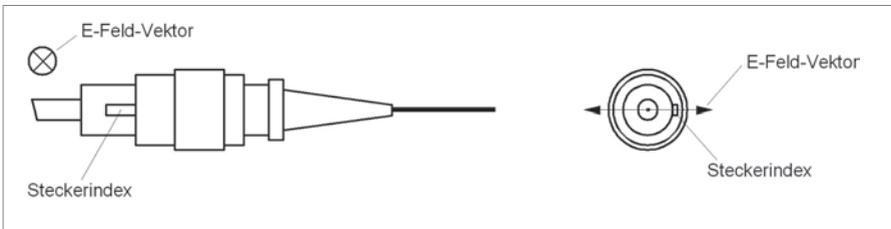


Abb. 2.3 - Ausrichtung eines FC-Fasersteckers

## Auswahlkriterien

### 2.4. Spektrale Breite des Lichts

Die Modulatoren sind für den Betrieb bei einer schmalbandigen Lichtwellenlänge ausgelegt. Da die Halbwellenspannung von der Wellenlänge abhängt, führt eine Vergrößerung der spektralen Breite des Lichts aufgrund des interferometrischen Funktionsprinzips zu einer Verringerung des Auslöschungsverhältnisses der Amplitudenmodulatoren. Während die Auslöschung nahe der nullten Ordnung der Interferenz für viele Anwendungen ausreichend ist, sinkt sie mit höherer Ordnung drastisch ab. Dies ist ebenso für gepulstes Licht gültig. Abb. 2.4 zeigt die Kennlinie im cw- und Femtosekundenbetrieb über einige Interferenzordnungen hinweg. Als Laser fand ein 150 fs-Laser mit einer spektralen Breite von 8 nm FWHM Verwendung. In den ersten Zentimetern der Einkoppel-faser verbreiterten sich die Pulse auf 3 ps, 30 nm FWHM. Der Modulator selbst verändert das Spektrum nicht mehr wesentlich. Während die Auslöschung in der nullten Ordnung 1000 : 1 beträgt, sinkt sie mit steigender Ordnung auf 100 : 1, 30 : 1 usw..

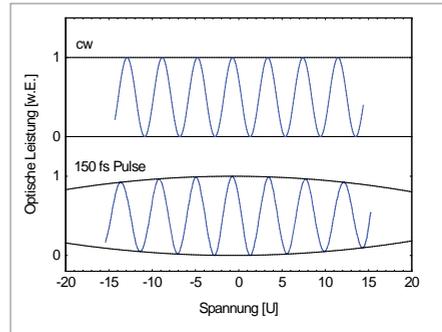


Abb. 2.4 - Modulationskennlinie im Dauerstrich- und Femtosekundenbetrieb

# Technische Daten

## 3. Technische Daten

Die Modulatoren sind für eine Vielzahl von Wellenlängen erhältlich. Im Prinzip können Modulatoren für jede Wellenlänge zwischen 532 nm und 1550 nm hergestellt

werden, wenn ein Laser zur Verfügung steht, dessen Wellenlänge nahe der gewünschten Wellenlänge liegt. Die technischen Daten bei einigen ausgewählten Wellenlängen sind im Folgenden aufgeführt:

### Amplitudenmodulatoren

Typ	AM 532	AM 635	AM 830	AM 1064	AM 1550
Wellenlänge*)	532 nm	635 nm	830 nm	1064 nm	1550 nm
Spektrale Bandbreite	±10 nm	±20 nm	±40 nm	±60 nm	±100 nm
Einfügedämpfung (typisch)	7 dB	7 dB	6 dB	5 dB	5 dB
Auslöschung (typisch)	200 : 1	500 : 1	800 : 1	1000 : 1	1000 : 1
Minimale optische Anstiegszeit 10/90, (typisch)	1 ns	200 ps	200 ps	200 ps	200 ps
Optische Schnittstelle, Eingang	Standard Faserstecker		Polarisationserhaltende Einmodenfasern Ohne, FC/PC- oder FC/APC-Stecker		
Optische Schnittstelle, Ausgang	Standard		Polarisationserhaltende Einmodenfasern		
	Optional		Einmodenfasern		
	Faserstecker		Ohne, FC/PC- oder FC/APC-Stecker		
Halbwellenspannung (typisch)	2 V	3 V	3 V	3 V	5 V
Maximale optische Eingangsleistung (typisch , Dauerstrichbetrieb)	10 mW	30 mW	50 mW	300 mW	300 mW

### Phasenmodulatoren

Typ	PM 532	PM 635	PM 830	PM 1064	PM 1550
Wellenlänge*)	532 nm	635 nm	830 nm	1064 nm	1550 nm
Spektrale Bandbreite	±15 nm	±20 nm	±40 nm	±60 nm	±100 nm
Einfügedämpfung (typisch)	7 dB	6 dB	5 dB	4 dB	3 dB
Minimale optische Anstiegszeit 10/90, typical	1 ns	200 ps	200 ps	200 ps	200 ps
Optische Schnittstelle, Eingang	Standard Faserstecker		Polarisationserhaltende Einmodenfasern Ohne, FC/PC- oder FC/APC-Stecker		
Optische Schnittstelle, Ausgang	Standard		Polarisationserhaltende Einmodenfasern		
	Optional		Einmodenfasern		
	Faserstecker		Ohne, FC/PC- oder FC/APC-Stecker		
Halbwellenspannung, (typisch)	4 V	6 V	6 V	6 V	10 V
Maximale optische Eingangsleistung (typisch , Dauerstrichbetrieb)	10 mW	30 mW	50 mW	300 mW	300 mW

\*) andere Wellenlängen auf Anfrage

## Technische Daten

### Größe

Die Modulatoren werden in Standardgehäusen angeboten. Die Maße können den folgenden Zeichnungen entnommen werden:

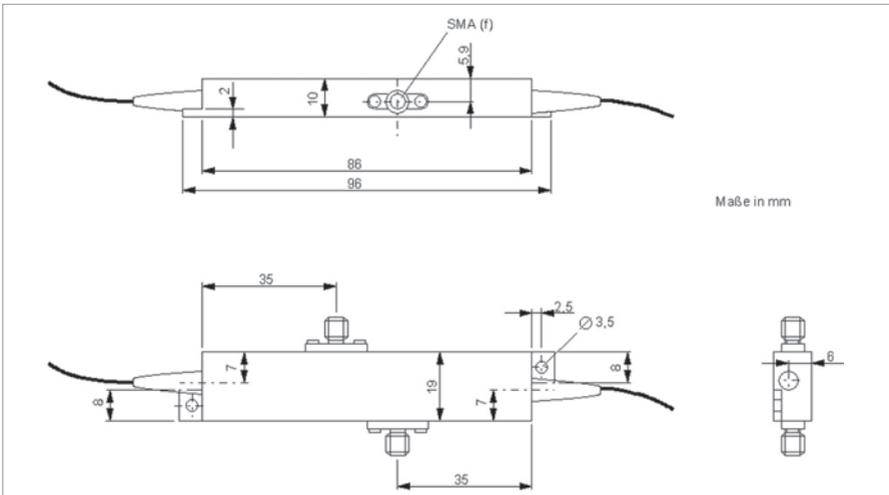


Abb. 3.1 - Standardgehäuse für Phasen und Amplitudenmodulatoren

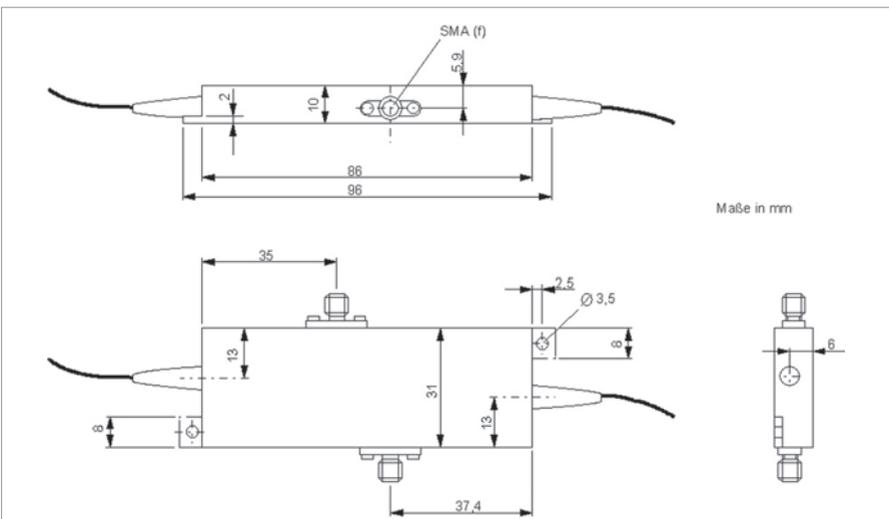


Abb. 3.2 - Breites Gehäuse für Amplitudenmodulatoren mit getrenntem Gleichspannungseingang

# Elektrische Steuerung der Modulatoren

## 4. Elektrische Steuerung der Modulatoren

### 4.1. Interne Beschaltung

#### 4.1.1. Standardbeschaltung bei Phasen- und Amplitudenmodulatoren

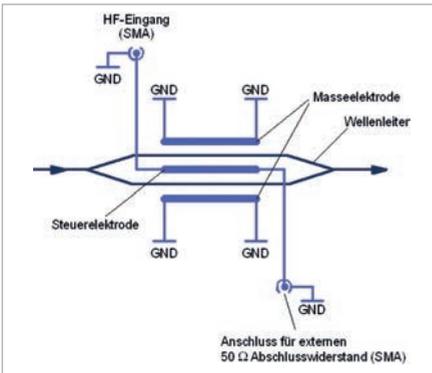
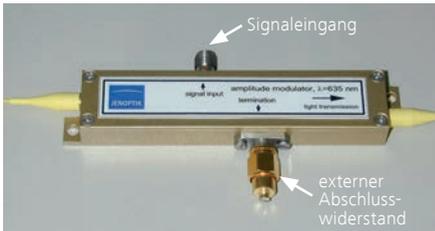


Abb. 4.1 - Standardbeschaltung

Alle Phasen- und die Standard-Amplitudenmodulatoren sind ohne Elektronik im Gehäuseinneren erhältlich (Abb. 4.1). Beide Enden der Steuerelektrode auf dem Modulatorkristall sind mit SMA-Anschlüssen verbunden. Die Masseelektroden sind mit dem Gehäuse und der Masse der SMA-Anschlüsse verbunden. Ein SMA-Anschluss kann als Signaleingang dienen, der andere sollte mit dem mitgelieferten 50 Ω Abschlusswiderstand versehen werden, um Signalreflexionen zu vermeiden,

welche die Modulation oder die Funktion der Ansteuerelektronik beeinträchtigen könnten. Die Eingangsimpedanz ist 50 Ω, der ohmsche Widerstand zwischen beiden SMA-Anschlüssen beträgt 5 - 10 Ω außer bei den Modulatoren für grünes Licht, bei denen er etwa 150 Ω ist. Die Kapazität beträgt ca. 20 pF. Der Abschlusswiderstand kann zu Messzwecken oder zum Anschluss weiterer Elektronik entfernt werden. Der Modulator ist elektrisch und optisch symmetrisch ausgelegt. Bei höherer Modulationsfrequenz (500 MHz oder mehr) sollte die optische Transmissionsrichtung die gleiche wie die des elektrischen Signals sein.

Die minimale optische Anstiegszeit beträgt etwa 200 ps bzw. etwa 1 ns bei den Modulatoren für grünes Licht. Eine auf das Signal addierte Gleichspannung, wie sie zum Einstellen des Arbeitspunktes bei Amplitudenmodulatoren nötig ist, erzeugt einen Strom durch die Steuerelektrode, der zum Aufheizen der Elektrode und auch des Abschlusswiderstandes führt. Dies kann durch Beschaltung des Modulators mit getrenntem Gleichspannungseingang, wie im folgenden Kapitel beschrieben, vermieden werden.

#### 4.1.2. Beschaltung des Amplitudenmodulators mit separaten Signal- und Gleichspannungseingängen

Der Amplitudenmodulatorkristall kann in ein Gehäuse mit einer Schaltung gemäß Abb. 4.2 eingesetzt werden, um die Signal- und Gleichspannungsanteile voneinander zu trennen. Alle Elektroden sind vom Gehäuse isoliert. Die Steuerelektrode ist intern mit 50 Ω abgeschlossen, wäh-

## Elektrische Steuerung der Modulatoren

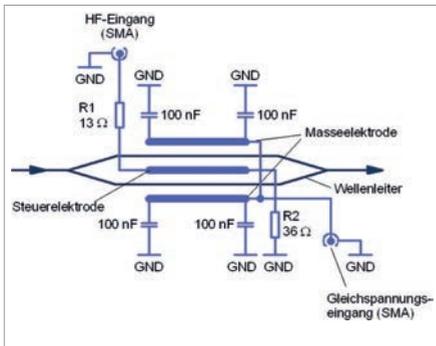
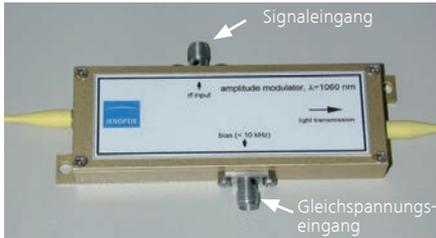


Abb. 4.2 - Beschaltung mit getrenntem Gleichspannungseingang

rend die Masseelektroden kapazitiv vom Gehäuse getrennt sind, was für hohe Frequenzen einen Masseschluss bewirkt, für Gleichspannungen oder niederfrequente Signale jedoch nicht. Auf diese

Weise kann der Arbeitspunkt mit einer Gleich- oder niederfrequenten Spannung unter Verwendung eines zweiten Anschlusses eingestellt werden. Die maximale Frequenz an diesem Eingang wird durch die Größe der Kondensatoren bestimmt. Sie beträgt etwa 10 kHz mit 100 nF-Kondensatoren und 100 kHz bei Verwendung von 10 nF-Kondensatoren. Die minimale optische Anstiegszeit beträgt etwa 500 ps bzw. etwa 1 ns bei den Modulatoren für grünes Licht. Im Gegensatz zu der in Abb. 4.1. dargestellten Schaltung verursacht die zur Arbeitspunkteinstellung verwendete Gleich- oder niederfrequente Spannung keinen Stromfluss durch die Steuerelektrode. Eine niederfrequente Spannung hat allerdings einen frequenzabhängigen Stromfluss infolge des kapazitiven Widerstands der Kondensatoren zur Folge. Bei der Frequenz 0 Hz fließt kein Strom.

### 4.1.3. Separation von Signal- und Gleichspannungseingang unter Verwendung von Modulatoren mit Standardbeschaltung

Das im vorhergehenden Abschnitt

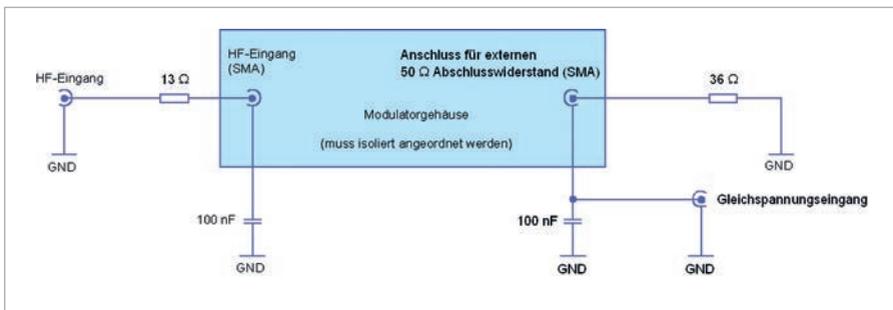


Abb. 4.3 - Externe Beschaltung zur Separation von Signal- und Gleichspannungseingang

# Elektrische Steuerung der Modulatoren

beschriebene Schema kann auch extern mit einem Modulator mit Standardbeschaltung angewendet werden. In diesem Fall muss das Modulatorgehäuse isoliert angebracht und unter Verwendung von Kondensatoren von der Masse getrennt werden (Abb. 4.3). Es ist vorteilhaft, den Modulator und die Schaltung in einem hochfrequenzdichten Gehäuse zu installieren. Wenn die Leitungslängen kurz genug sind, unterscheiden sich die elektrischen und optischen Eigenschaften nicht von der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen integrierten Version. Der Vorteil ist, dass der Modulator aus der Schaltung entfernt und auch als Standardmodulator verwendet werden kann.

## 4.2. Ansteuerung des Modulators

Zur Ansteuerung des Modulators ist kein spezieller Treiber erforderlich. Jede Spannungsversorgung, die in Abhängigkeit vom Modulator eine einstellbare Amplitude von 6 - 10 V an  $50 \Omega$  zur Verfügung stellen kann, über einen einstellbaren Offset verfügt und schnell genug ist, kann zur Modulatoransteuerung verwendet werden. Falls die Amplitude der Spannungsversorgung nicht ausreicht, kann ein zusätzlicher Verstärker nötig sein. Die an den Modulator angelegte Spannung sollte 30 V nicht überschreiten.

Einstellung der Modulationsspannung:

Die Modulatoren können für digitale und analoge Modulation verwendet werden. Bei der analogen Modulation muss die periodische, cosinusförmige Kennlinie beachtet werden.

Bei der digitalen Modulation kann ein schneller Pulsgenerator genutzt werden.

Der obere und untere Spannungspegel bzw. Amplitude und Offset sollten sich separat einstellen lassen. Dann kann der Modulator in zwei Betriebsweisen betrieben werden – dem Pulsmodus zur Erzeugung kurzer Pulse und Schaltmodus zum schnellen Schalten. Die Betriebsweisen werden im Folgenden anhand eines Modulators mit  $U_{\pi} = 2 \text{ V}$  und  $U_0 = 1,5 \text{ V}$  erläutert.

Pulsmodus:

An den Modulatoreingang wird eine

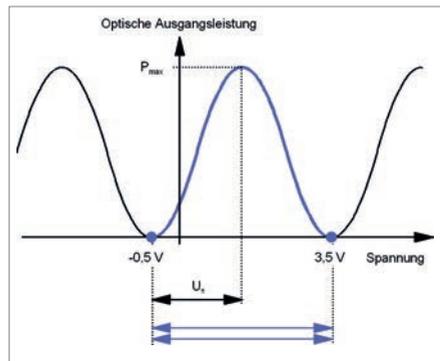


Abb. 4.4 - Pulsmodus

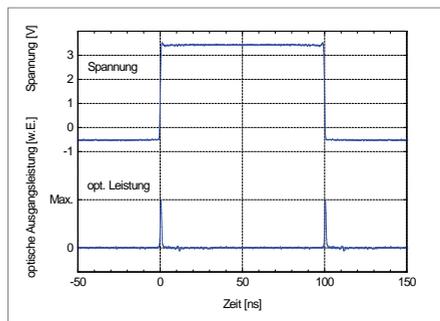


Abb. 4.5 - Erzeugung von optischen 1 ns-Pulsen

## Elektrische Steuerung der Modulatoren

Rechteckspannung gelegt, für deren beide Pegel der Modulator im Sperrzustand ist (im Beispiel  $-0,5\text{ V}$  und  $3,5\text{ V}$ ). Während des Pegelwechsels wechselt der Modulator vom Sperr- über den Durchlass- zum nächsten Sperrzustand (in Abb. 4.4 blau gekennzeichnet). Somit lässt der Modulator nur während des Schaltprozesses Licht durch. Die Länge des entstehenden Lichtpulses entspricht

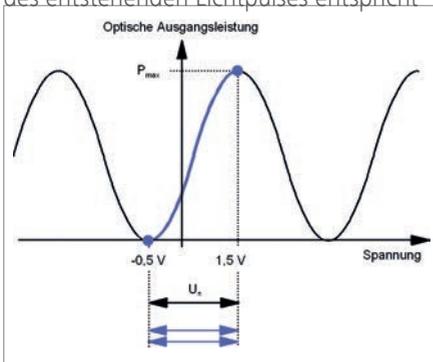


Abb. 4.6 - Schaltmodus

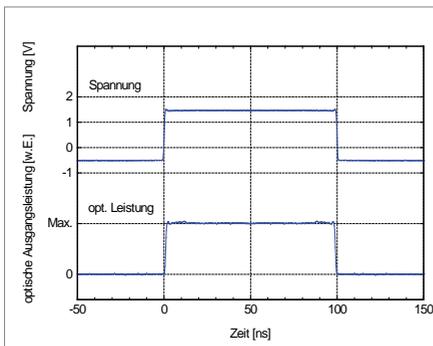


Abb. 4.7 - Erzeugung von optischen 1 ns-Flanken

der Anstiegszeit der Spannung (1 ns in Abb. 4.5), mindestens aber der minimalen optischen Anstiegszeit des Modulators.

Schaltmodus:

An den Modulatoreingang wird eine Rechteckspannung gelegt, für deren einen Pegel der Modulator den Sperrzustand und für den anderen Pegel den Durchlasszustand aufweist (im Beispiel  $-0,5\text{ V}$  und  $1,5\text{ V}$ ). Somit wird der Modulator vom Sperrzustand in den benachbarten Durchlasszustand geschaltet oder umgekehrt (in Abb. 4.6 blau gekennzeichnet). Die optische Anstiegszeit entspricht der Anstiegszeit der Spannung (1 ns in Abb. 4.7), mindestens aber der minimalen optischen Anstiegszeit des Modulators. Wenn auf diese Weise ein Lichtpuls erzeugt werden soll, entspricht dessen Länge dem Zeitabstand zwischen dem An- und Ausschalten (100 ns in Abb. 4.7), mindestens jedoch der doppelten minimalen optischen Anstiegszeit des Modulators.

### 4.3. Bestimmung von $U_0$ und $U_\pi$

Die Parameter  $U_0$  und  $U_\pi$  der Modulatorkennlinie können wie folgt bestimmt werden:

Das Licht eines Lasers oder Laserdiode wird in die Modulatoreingangsfaser eingekoppelt. Der Modulatorausgang wird mit einer Fotodiode verbunden. Der elektrische Modulatorausgang wird mittels Koaxialkabeln mit einem Frequenzgenerator und dem hochohmigen Eingang eines Oszillographen verbunden. Die Fotodiode wird mit dem auf  $50\ \Omega$  geschalteten zweiten Eingang des Oszillographen verbunden. In der x-y-Darstellung wird die Kennlinie des Modulators sichtbar, aus der  $U_0$  und  $U_\pi$  abgelesen werden können (Abb. 4.8).

# Elektrische Steuerung der Modulatoren

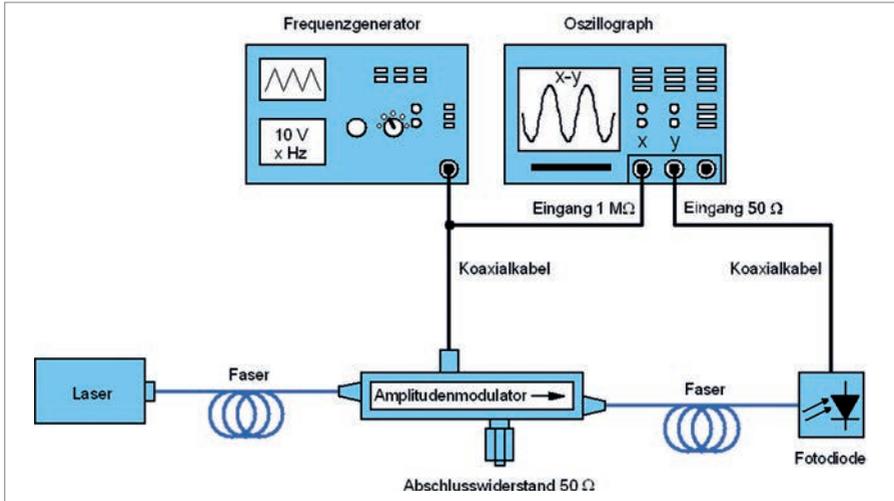


Abb. 4.8 - Schaltplan zur Bestimmung von  $U_0$  und  $U_\pi$

## 4.4. Gleichspannungsdrift

Wellenleitermodulatoren in Lithiumniobat reagieren auf das Anlegen einer Gleichspannung mit einer Gleichspannungsdrift, der sogenannten DC-Drift

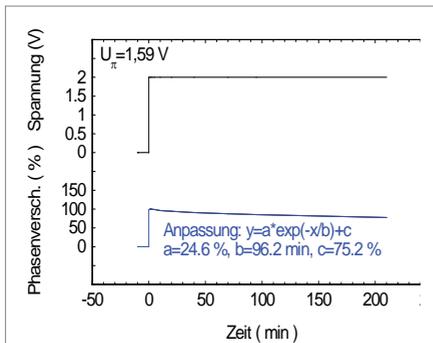


Abb. 4.9 Gleichspannungsdrift: Phasenrückdrift bei Anlegen einer Gleichspannung an die Modulatorelektroden (Amplitudenmodulator, 1550 nm, opt. Leistung 10 mW)

(Abb. 4.9). Nach dem Anlegen einer Spannung findet ein Ladungsträgertransport im Kristall statt. Aus diesem Grund wird das an die Elektroden angelegte äußere elektrische Feld teilweise durch das innere Feld kompensiert, so dass das am Wellenleiter anliegende wirksame elektrische Feld geringer als das äußere angelegte Feld ist. Der Prozess hängt mit der Anzahl freier Ladungsträger (Defekte) im Kristall und im Wellenleiter sowie der Dunkel- und Fotoleitfähigkeit des Materials zusammen.

Da die Dunkelleitfähigkeit von der Temperatur und der Kristallreinheit abhängt und die Fotoleitfähigkeit durch die Kristallreinheit, Wellenlänge und optische Leistungsdichte (d.h. die im Wellenleiter geführte optische Leistung) bestimmt ist, wird die Dauer der Einstellung des Prozesses durch diese Faktoren bestimmt. Der Prozess dauert einige Minuten bis Stunden und

## Elektrische Steuerung der Modulatoren

verläuft umso schneller, je höher die Temperatur und die optische Leistung sowie je kürzer die Wellenlänge ist. Es tritt eine Sättigung bei etwa 75 % des ursprünglichen Wertes ein. Die Kompensationszeit ist unabhängig von der angelegten Spannung. Das bedeutet, dass sich die Änderung der Phase pro Zeiteinheit bei steigender Spannung vergrößert.

Dieser partielle Kompensationsprozess des elektrischen Feldes bewirkt eine teilweise Rückdrift der ursprünglich eingestellten optischen Phasenverschiebung. Dies kann bei Phasenmodulatoren unter Verwendung eines externen Interferometers gemessen werden. Bei einem Amplitudenmodulator, der von seinem Aufbau ebenfalls ein Interferometer ist, wird durch die Phasendrift eine Amplitudenmodulation entsprechend der cosinusförmigen Kennlinie verursacht. Das kann als Änderung von  $U_0$  gemessen werden.

$U_\pi$  ändert seinen Wert nicht.

Abbildung 4.9 zeigt beispielhaft die Phasendrift, welche an einem Amplitudenmodulator bei 1550 nm, einer optischen Leistung von einigen Milliwatt und bei Raumtemperatur gemessen wurde. Die Phasendrift ist in % des ursprünglichen Wertes angegeben und wurde unter Nutzung der Modulatorkennlinie berechnet. Die angelegte Spannung (2 V) war etwas höher als die Halbwellenspannung (1,59 V), d.h., die anfängliche Phasenverschiebung betrug  $1,25 \pi$ . Man sieht, dass die zur Sättigung nötige Zeit mehr als eine Stunde beträgt, wenn der Modulator bei mäßigen Leistungen im Infraroten betrieben wird. Die Drift verläuft bei höherer Leistung und kürzeren Wellen-

längen wesentlich schneller.

Eine Stabilisierung des Arbeitspunkts kann auf folgende Weise erfolgen:

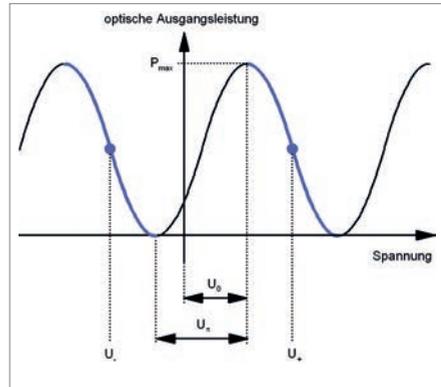


Abb. 4.10 - Modulatorkennlinie mit zwei äquivalenten Arbeitspunkten

### 1. dynamische Methode

Infolge der periodischen Kennlinie der Amplitudenmodulatoren ist es möglich, eine gleichartige Modulation auf verschiedenen Zweigen der Kennlinie auszuführen, die sich um ein Vielfaches des Spannungswertes von  $2 \cdot U_\pi$  unterscheiden. Der Arbeitspunkt sollte zwischen zwei äquivalenten Spannungen mit unterschiedlichem Vorzeichen, die in Abb. 4.10 mit  $U_-$  und  $U_+$  bezeichnet sind, springen. Dann erfolgt die Modulation abwechselnd auf den beiden blau gekennzeichneten Zweigen. Um die DC-Drift zu vermeiden sollte die an den Modulator angelegte Spannung gemessen und über eine Zeit integriert werden, die kurz genug gegenüber der Dauer der DC-Drift ist (z.B. < 1 Sekunde), während der Modulator auf dem Arbeitspunkt  $U_-$  arbeitet.

# Elektrische Steuerung der Modulatoren

In dieser Zeit wird der Wert  $A_-$  mit

$$A_- = \int_{U_-} U(t) dt$$

erreicht.

Danach muss der Arbeitspunkt zu  $U_+$  springen, auf dem der Modulator arbeitet, bis der Wert  $A_+$  mit

$$A_+ = \int_{U_+} U(t) dt$$

erreicht ist, wobei zur Vermeidung der Drift

$$|A_+| = |A_-|$$

erfüllt sein muss.

Dann muss der Arbeitspunkt wieder zu  $U_-$  springen und so weiter. Hierdurch wird erreicht, dass die mittlere am Modulator anliegende Spannung Null ist und somit keine DC-Drift auftreten kann. Es muss jedoch beachtet werden, dass der Modulator während des Umschaltens zwischen  $U_-$  und  $U_+$  und umgekehrt einmal die komplette Kennlinie durchläuft, was zu einer möglicherweise unerwünschten Modulation führt.

2. Nachführung der Gleichspannung  
Der Arbeitspunkt wird durch Anlegen einer Gleichspannung gesetzt. Die Gleichspannung kann mittels einer Hochfrequenzweiche vor dem Signaleingang des Modulators eingeführt werden, welche eine Gleichspannung oder ein niederfrequentes Signal zur hochfrequenten Mo-

dulationsspannung addiert. Das erzeugt jedoch einen zusätzlichen Stromfluss durch die Modulatorelektroden und den Abschlusswiderstand, was zu einer Aufheizung führt. Besser ist es, die Beschaltungen des Modulators entsprechend Abb. 4.2 oder 4.3 zu verwenden.

Bei periodischem Modulationssignal ist der Mittelwert der angelegten Spannung konstant. Wenn weiterhin die Temperatur und die optische Leistung nicht geändert werden, sättigt sich der Driftprozess nach einiger Zeit und der Modulator arbeitet stabil, nachdem man ggf. in mehreren Schritten die richtige Gleichspannung eingestellt hat.

Im Falle nichtperiodischer Modulation oder sich ändernder äußerer Bedingungen muss eine Rückkopplerschleife verwendet werden. Ein Teil des modulierten Lichts muss mit einem Faserkoppler oder einem teildurchlässigen Spiegel vom Nutzsignal abgetrennt und einer Fotodiode als Teil einer Steuerelektronik zugeführt werden. Wie die Steuerelektronik auszuführen ist, hängt jedoch stark von der Anwendung ab. So kann kein allgemeingültiges Rezept gegeben werden. Wenn beispielsweise kurze, aber variierende Lichtpulse mit relativ langen Pausen generiert oder Pulse mit variierendem Teilungsverhältnis gepickt werden sollen, ist es i.a. ausreichend, wenn die Gleichspannung so nachgeführt wird, dass der über mehrere Pulse gemittelte Fotostrom minimal gehalten wird, weil der bei unkorrekter Einstellung ansteigender Signaluntergrund einen im Vergleich zu den Pulsen selbst beträchtlichen Anteil am Zeitmittel liefert.

## Elektrische Steuerung der Modulatoren

Falls eine Analogmodulation nötig ist, muss das aktuelle modulierte Signal in Echtzeit gemessen und mit dem Sollwert verglichen werden. In einigen Fällen, beispielsweise der Bilderzeugung, existieren ungenutzte Signalaustastzeiten, in denen die aktuelle Kennlinie wiederholt gemessen und entsprechend geregelt werden kann.

Der Betrag der Gleichspannung sollte während des Regelns nicht zu hoch werden, da der Anstieg der Phasenverschiebung pro Zeiteinheit bei höherer Gleichspannung ebenfalls anwächst und somit schneller geregelt werden muss.

Jedoch kann die Nachführung der Gleichspannung die DC-Drift nicht verhindern.

# Anwendungsbeispiele

## 5. Anwendungsbeispiele

### 5.1. Pulserzeugung

Eine wichtige Anwendung der Amplitudenmodulatoren ist es, kurze Pulse aus dem Licht eines Dauerstrichlasers zu erzeugen. Der Vorteil ist, dass so unabhängig vom Lasertyp Pulse vorbestimmter Form erzeugt werden können. Das wird beispielsweise in Faser-Oszillator-Verstärker-Anordnungen benötigt.

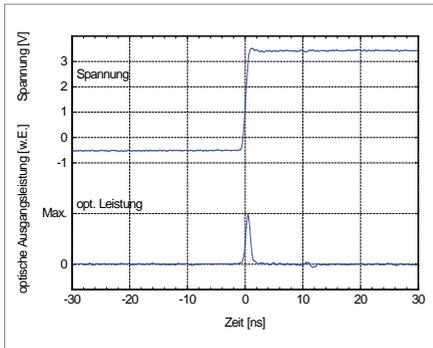


Abb. 5.1 - Erzeugung eines 1 ns langen Pulses

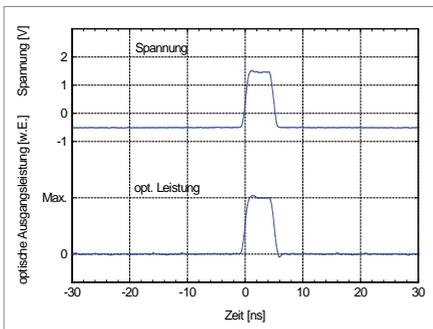


Abb. 5.2 - Erzeugung eines 5 ns langen Pulses

Zum Beispiel kann ein kurzer Lichtpuls erzeugt werden, wenn eine elektrische Flanke der Amplitude  $2 \times U_{\pi}$  oder ein

elektrischer Puls der Amplitude  $U_{\pi}$  an den Modulator angelegt wird (Abb. 5.1 und 5.2). Eine analoge zeitliche Formung, beispielsweise anhand eines zweistufigen Pulses, kann in vergleichbarer Weise erfolgen (Abb. 5.3). Weiterhin ist es möglich, lange Laserpulse beispielsweise aus dem Mikrosekundenbereich in den Nanosekundenbereich zu kürzen oder zu formen.

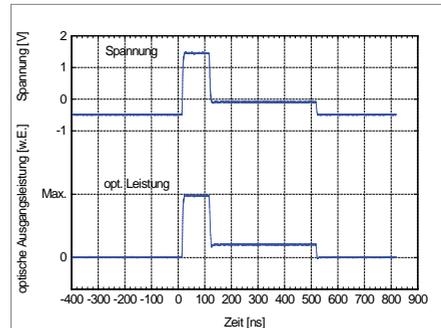


Abb. 5.3 - Erzeugung eines zweistufigen Pulses

### 5.2. Pulspicken

Mittels eines Amplitudenmodulators ist es möglich, Einzelpulse oder Pulsfolgen aus schnellen Laserpulszügen zu selek-

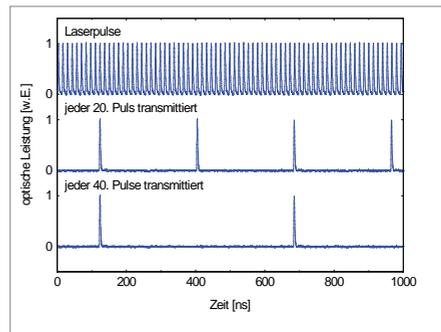


Abb. 5.4 - Pulspicken

## Anwendungsbeispiele

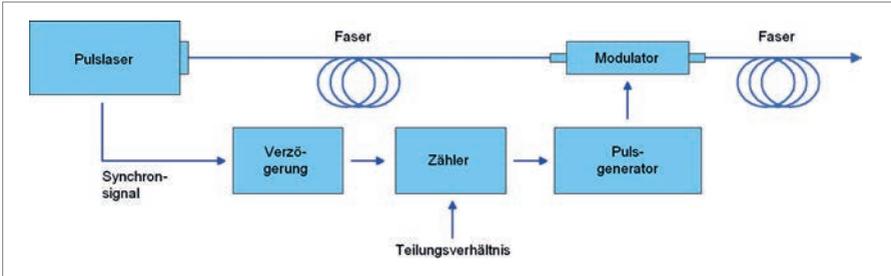


Abb. 5.5 -Schema der Puls pickeranordnung

tieren. Der Modulator arbeitet dann als Puls picker, um die Repetitionsrate eines Puls lasers zu reduzieren. Das folgende Beispiel erläutert das Puls picken eines 150 fs-Lasers mit der Repetitionsrate 76 MHz und der Wellenlänge 1060 nm. Die Abbildungen zeigen zum Zwecke der besseren Sichtbarkeit kleine Teilungsverhältnisse, z.B. von 20 und 40 in Abb. 5.4. In den meisten Fällen sind jedoch Teilungsverhältnisse von 100 bis 1000 erforderlich. Das Funktionsprinzip ist wie folgt (Abb. 5.5): Das Licht eines Puls lasers wird in einen Amplitudenmodulator im Sperrzustand

eingekoppelt. Weiterhin wird dem Laser ein elektrisches oder optisches Synchron signal entnommen, mit welchem eine Verzögerungsschaltung beaufschlagt wird. Das dient zur Anpassung der unterschiedlichen Laufzeiten des Lichts, der elektrischen Signale und der elektronischen Verarbeitungszeiten. Ein elektronischer Zähler zählt die Synchronpulse bis zu einem voreingestellten Wert des Teilungsverhältnisses. Anschließend wird ein Puls an einen Puls generator gesendet, welcher den Modulator so ansteuert, dass ein oder eine Anzahl Laserpulse passieren können. Der Modulator wird entsprechend des

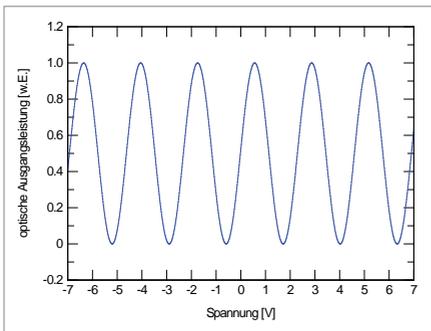


Abb. 5.6 - Modulatorkennlinie

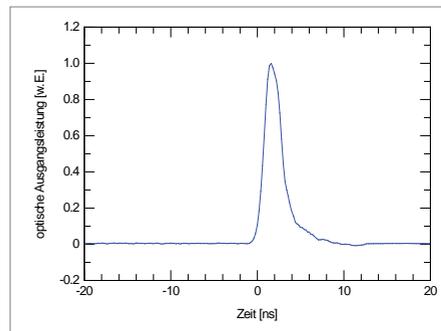


Abb. 5.7 - Zeitliche Öffnung des Modulators

# Anwendungsbeispiele

Pulsmoduls betrieben, d.h. der Modulator schaltet zwischen zwei benachbarten Sperrzuständen unter Nutzung einer Spannungsflanke der Amplitude von  $2 \times U_{\pi}$  hin und her. Im Beispiel entspricht das den Pegeln von -0,7 V und 1,7 V bei einer Halbwellenspannung des Modulators von 1,2 V (Abb. 5.6). Die Anstiegszeit muss kürzer als der Abstand zweier benachbarter Laserpulse sein und wird durch die Repetitionsrate des Lasers vorgegeben. Im Beispiel entspricht das einer

Modulatoröffnungszeit von ca. 3 ns bei einem Pulsabstand von 13 ns (Abb. 5.7).

So entspricht die am Modulator anliegende Spannung einer Rechteckspannung mit entsprechend dem gewünschten Pulsteilungsverhältnis reduzierter Frequenz (Abb. 5.8). Bei jeder Spannungsflanke wird der Modulator für ca. 3 ns geöffnet und lässt einen optischen Puls passieren. Das Resultat ist in Abb. 5.9 dargestellt.

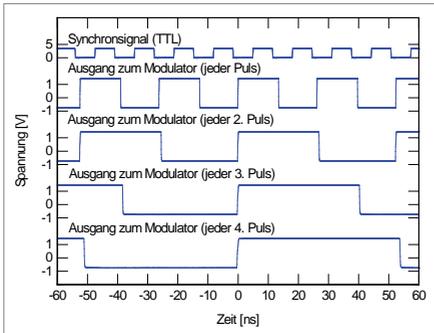


Abb. 5.8 - Spannung am Modulator

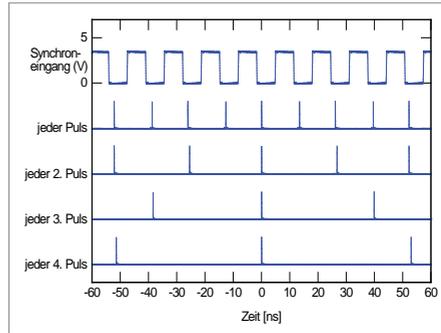


Abb. 5.9 - Zeitliche Modulatortransmission

# Begriffserklärung

## 6. Begriffserklärung

Einfügedämpfung (D)	<p>Verlust an optischer Leistung bei Lichttransmission durch den Modulator</p> $D = 10 \lg (P_{\text{ein}}/P_{\text{aus}})$ <p><math>P_{\text{ein}}</math>: in der Eingangsfaser geführte Lichtleistung  <math>P_{\text{aus}}</math>: in der Ausgangsfaser geführte Lichtleistung (beim Amplitudenmodulator in Durchlasszustand)          (Messung mittels Faserabschneidemethode)</p>
Auslöschung (E)	<p>Verhältnis der transmittierten Lichtleistungen eines Amplitudenmodulators im Durchlass- bzw. Sperrzustand</p> $E = P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$ <p>(Messung mit Gleichspannung)</p>
Halbwellenspannung ( $U_{\pi}$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- beim Amplitudenmodulator Spannungsdifferenz zum Schalten vom Durchlass- zum Sperrzustand oder umgekehrt</li> <li>- beim Phasenmodulator Spannungsdifferenz zum verschieben der Phase des optischen Ausgangssignals um <math>\pi</math></li> </ul>
Nullpunktverschiebung ( $U_0$ )	kleinste Spannung bezüglich 0 V, bei der die Transmission eines Amplitudenmodulators maximal ist
Polarisation Ausgangsfaser	Polarisationsgrad des aus der Ausgangsfaser austretenden Lichts im Falle der Verwendung einer polarisationserhaltenden Faser
Spektrale Bandbreite	mögliche Abweichung einer schmalbandigen Arbeitswellenlänge von der Zentralwellenlänge des Modulators, ohne dass dessen Auslöschung und Einfügedämpfung wesentlich beeinträchtigt werden (Anstieg der Dämpfung bzw. Abfall der Auslöschung um 10 % gegenüber der Zentralwellenlänge)
Obere Grenzfrequenz	Frequenz, bei der die Wirkung des elektrischen Eingangssignals auf das optische Ausgangssignal auf die Hälfte zurückgegangen ist
Minimale optische Anstiegszeit	Zeit, in der das optische Signal eines Amplitudenmodulators von 10 % auf 90 % ansteigt bzw. abfällt, wenn eine exakte elektrische Sprungfunktion angelegt wird, die den Modulator vom Durchlass- zum Sperrzustand oder umgekehrt schaltet



JENOPTIK | Healthcare & Industry

Geschäftsbereich Healthcare

JENOPTIK Optical Systems GmbH

Göschwitzer Straße 25

07745 Jena | Germany

Tel. +49 3641 65-4530 | Fax -3807

[lightmodulators@jenoptik.com](mailto:lightmodulators@jenoptik.com)

[www.jenoptik.com/light-modulators](http://www.jenoptik.com/light-modulators)