



# DIPLOMARBEIT

## Entwicklung und Aufbau optischer Quellen für automatisierte 10 Gbit/s und 40 Gbit/s Messsysteme

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnologie

am

Institute of Electrodynamics, Microwave and Circuit Engineering

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dr. Horst Zimmermann  
Dipl.-Ing. Wolfgang Gaberl

durch

**Irena Radovanovic, B.Sc.**  
Mat. Nr. 0126176  
Hertha-Firnbergstr. 7/77  
1100 Wien





TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology



# Diploma Thesis

**Development and realization of optical sources for  
automated 10 Gbit/s and 40 Gbit/s test systems**

**Institute:** Institute of Electrodynamics,  
Microwave and Circuit Engineering

**Supervisors:** Univ.Prof. Dr. Horst Zimmermann  
Dipl.-Ing. Wolfgang Gaberl

**Author:** Irena Radovanovic, B.Sc.  
Mat. Nr. 0126176  
Hertha-Firnbergstr. 7/77  
1100 Wien

Vienna, January 2014



*Der Mensch hat dreierlei Wege klug zu handeln:  
erstens durch Nachdenken, das ist das edelste;  
zweitens durch Nachahmen, das ist das leichteste;  
drittens durch Erfahrung, das ist das bitterste.*

Konfuzius



## Danksagung

Während meiner Diplomarbeit haben mich viele Menschen begleitet, denen ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen möchte.

Zuallererst möchte ich mich bei Professor Dr.-Ing. Horst Zimmermann bedanken, der meine Diplomarbeit überhaupt erst ermöglicht hat.

Vor allem gilt mein Dank Wolfgang Gaberl, der mir aufgrund seiner langjährigen Erfahrungen immer helfend zur Seite stand, für die verständnisvolle Betreuung. Auch für die vielen Stunden des Korrekturlesens möchte ich mich bei ihm besonders bedanken.

Mein herzlicher Dank gilt außerdem meinen Kollegen der Arbeitsgruppe Schaltungstechnik am "Institute of Electrodynamics, Microwave and Circuit Engineering" (EMCE). Besonders Michael Hofbauer und Johannes Seiter möchte ich an dieser Stelle danken, die sich neben ihrer Forschungsarbeit, die Mühe gemacht haben, mich mit zahlreichen Kommentaren zu unterstützen. Außerdem danke ich Stefan Schidl und Robert Swoboda für die vielen hilfreichen Anregungen und wertvolle Ratschläge.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, die immer für mich da war und ohne deren Unterstützung mir das Studium nicht möglich gewesen wäre. Ebenfalls möchte ich meinen tiefsten Dank meinem Freund Reinhard Enne aussprechen. Neben seiner umfangreichen Unterstützung während der Diplomarbeit war er immer eine Quelle der Inspiration für mich.



## Kurzfassung

In den letzten Jahren stieg der Anteil der optischen Kommunikation am weltweiten Datenverkehr stark an. Wir stehen gerade an der Schwelle, dass schon einzelne Haushalte breitbandig mit optischen Medien an das Internet angebunden werden. Um die hohe Anzahl an optischen Verbindungen seitens der Internetanbieter günstig realisieren zu können, wurden in den letzten Jahren diverse Konzepte für eine optische Verbindung der „last-mile“ entwickelt. Viele dieser Konzepte erfordern neuartige Datenübertragungskomponenten. Vor allem die optischen Empfänger müssen für neue Modulationsverfahren und Netzwerktopologien optimiert, verbessert oder vollkommen neu entwickelt werden.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein flexibles optisches Testsystem entwickelt, welches ermöglichen soll neuartige Übertragungsverfahren und Techniken zu testen und zu erforschen. Es wurden zwei Laserquellen bestehend aus mehreren Modulen entwickelt, die im Zusammenspiel in der Lage sind, komplexe Modulationsarten mit hoher Geschwindigkeit und Qualität in Form von optischen Signalen zu realisieren.

Die vorliegende Arbeit beschreibt einerseits die Motivation, die solch einer Entwicklung zu Grunde liegt, als auch die konkrete Realisierung des Testsystems. Die zwei realisierten modularen optischen Quellen arbeiten auf den Telekommunikationswellenlängen von 1310 nm und 1550 nm. Die schnellere der beiden Quellen kann bis zu 40 Gbit/s schnelle Signale generieren. Der neuartige Aspekt der Quellen ist dabei die Modulierbarkeit bis hinunter zu DC. Damit ist es möglich Datensignale, welche in geschalteten optischen Netzen existieren, nachzubilden. Diese haben neben der schnellen AC-Modulation auch sprunghaft wechselnde Amplituden und Mittelwerte, es handelt sich dabei um sogenannte Burst-Mode-Signale.

Die Realisierung der beiden optischen Quellen erfolgte jeweils in Form von drei Funktionsmodulen: Zum einen das Modul „Laser“, welches sowohl die Ansteuerung als auch die Temperaturregelung der eigentlichen Laserdiode beinhaltet. Dabei kann die Laserdiode entweder im Dauerstrichmodus oder direkt moduliert betrieben werden. Die direkte Modulation der Laserdioden wird für niedrige Datenraten genutzt. Für höhere Übertragungsgeschwindigkeiten wird das zweite Modul „Modulation“ eingesetzt. Dieses nutzt einen optischen Modulator und ermöglicht somit eine schnelle und präzise Modulation der Lichtleistung mit dem Nachteil, dass keine DC-Signale übertragen werden können. Als drittes Modul „Leistungsanpassung“ wurde eine steuerbare optische Abschwächung realisiert, die es ermöglicht, das Gesamtsignal in einem weiten Leistungsbereich auszugeben. Durch Kombination der drei Module, zusammen mit externen elektrischen Signalgeneratoren, ist es möglich hochkomplexe optische Signalformen mit hoher Reproduzierbarkeit zu generieren.

In der Arbeit ist nicht nur der Entwurf und der Aufbau beschrieben, sondern auch die Messungen der grundlegenden Parameter der Module, sowie das Zusammenspiel der Module am Beispiel der Generation exemplarischer „Burst-Mode“-Signale.

Der Abschluss umfasst eine Zusammenfassung der erreichten Ergebnisse und einen Ausblick auf zukünftige Forschungsmöglichkeiten mit dem Testsystem.



## Abstract

In the last years the share of optical communication in global data networks becomes more and more important. The number of households that are directly connected with optical fibers (fiber to the home) starts to increase. To allow a huge number of optical endpoints modern concepts of optical communications have been developed. A lot of these new technologies require new network components. Especially optical receivers need to be optimized, improved or even developed newly.

The presented work describes the development and the realization of a test system allowing the generation of highly complex optical waveforms which are used in modern optical switched network topologies. Two laser sources were realized. Both consist of different modules, which in combination allow complex modulation schemes with a high modulation rate together with a high quality.

The work describes on one hand the motivation to develop such a test system and on the other hand the practical realization as well as measurements of the whole test system. The two realized optical sources are designed for the common telecommunication wavelengths of 1310 nm and 1550 nm. The faster one of the two sources is capable of producing signals with a data rate up to 40 Gbit/s. The novelty of these sources is the possibility to apply modulation signals down to DC. With this feature it is possible to generate optical data signals which are common in switched optical networks. Such signals usually have a fast AC modulation at the same time with variable amplitudes and optical mean values. Such signals are usually called burst mode signals.

The practical realization of the two optical sources is separated in three independent modules for each source. One module is called 'laser' and houses temperature regulation as well as controlling of the laser diode itself. The laser diode can be operated in continuous wave mode or in direct modulated mode. This direct modulated mode can be used for data rates down to DC. For higher transmission speeds a second module was realized for each source. It uses an external modulator which allows fast and precise modulation at high speeds with the drawback that the DC modulation cannot be used for this module. A third module which is called 'power control' has a controllable optical attenuator which allows to vary the optical output power in a wide range. The combination of these three modules together with external signal generators allows generation of highly complex optical signal patterns with good reproducibility.

In the presented work not only the development and the realization of the modules are described but also measurements of the basic parameters of each module. Furthermore, the combination of these modules and an exemplary burst mode signal generation setup are presented.

In the last chapter a conclusion of the reached performance and a forecast on possible future research scenarios are presented.



# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis . . . . .	XI
<b>1 Vorwort</b>	<b>1</b>
<b>2 Einleitung und Motivation</b>	<b>3</b>
2.1 Messsystem zur Charakterisierung von optischen Empfängern . . . . .	3
2.2 Aufgabenstellung und Realisierung . . . . .	4
2.3 Unterschied zu den konventionellen Konzepten . . . . .	5
<b>3 Laserdiode als Lichtquelle</b>	<b>7</b>
3.1 Typische Parameter der Laserdioden . . . . .	8
3.1.1 Eingangs-Charakteristik . . . . .	8
3.1.2 Stromleistungskennlinie . . . . .	9
3.1.3 Photodioden-Charakteristik . . . . .	9
3.1.4 Thermistor . . . . .	10
3.1.5 Spektrum . . . . .	10
3.2 Simulationsmodell der Laserdiode . . . . .	12
3.3 Direkte Modulation . . . . .	13
3.3.1 Kopplungsmethoden . . . . .	14
3.4 Laserdiodenansteuerung . . . . .	14
3.4.1 Laserdiodentreiber . . . . .	15
3.4.1.1 Ansteuerung des Bias-Pfades . . . . .	16
3.4.1.2 Ansteuerung des Modulationspfades . . . . .	19
3.4.2 Temperaturregelung . . . . .	22
3.4.3 Computergestützte Steuerung . . . . .	24
3.4.3.1 Firmware . . . . .	26
3.4.3.2 Software . . . . .	27
3.5 Messergebnisse der Laserdiodenansteuerung . . . . .	28
3.5.1 DC-Ergebnis . . . . .	28
3.5.2 Frequenzgang . . . . .	29
3.5.3 Augendiagramm . . . . .	31
<b>4 Modulation</b>	<b>37</b>
4.1 Eigenschaften . . . . .	37
4.2 Modulatoransteuerung . . . . .	38
4.2.1 Computergestützte Steuerung . . . . .	44
4.2.1.1 Firmware . . . . .	44
4.2.1.2 Software . . . . .	46

4.3	Messergebnisse . . . . .	46
4.3.1	Frequenzgang . . . . .	46
4.3.2	Augendiagramm . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Leistungsanpassung</b>	<b>53</b>
5.1	Steuerbares optisches Dämpfungsglied . . . . .	53
5.2	Leistungsmesser . . . . .	54
5.3	Ansteuerung der Leistungsanpassung . . . . .	55
5.3.1	Computergestützte Steuerung . . . . .	55
5.3.1.1	Firmware . . . . .	55
5.3.1.2	Software . . . . .	57
5.4	Messergebnisse . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Burst Mode</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>63</b>
	<b>Anhang</b>	<b>64</b>
<b>A</b>	<b>Datenblätter</b>	<b>65</b>
A.1	Datenblatt von LD1310 . . . . .	65
A.2	Datenblatt von LD1550 . . . . .	68
A.3	Datenblatt von 10 Gbit/s Modulator . . . . .	75
A.4	Datenblatt von 10 Gbit/s Modulatortreiber . . . . .	79
A.5	Datenblatt von 40 Gbit/s Modulator . . . . .	83
A.6	Datenblatt von 40 Gbit/s Modulatortreiber . . . . .	86
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>90</b>
	<b>Literatur</b>	<b>90</b>

## Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog-to-Digital Converter
CM	Continuous Mode
CW	Continuous Wave
DAC	Digital-to-Analog Converter
DFB	Distributed Feedback Laser
EMCE	Institute of Electrodynamics, Microwave and Circuit Engineering
ER	Extinction Ratio
FP	Fabry Perot
FTTH	Fiber To The Home
ISR	Interrupt Service Routine
LD	Laserdiode
LD1310	Laserdiode mit einer Wellenlänge von 1310 nm
LD1550	Laserdiode mit einer Wellenlänge von 1550 nm
LDT1310	Laserdiodentreiber von LD1310
LDT1550	Laserdiodentreiber von LD1550
MD10	Modulation mit einer Datenrate von 10 Gbit/s
MD40	Modulation mit einer Datenrate von 40 Gbit/s
MZM	Mach-Zehnder-Modulator
OEIC	Optoelectronic Integrated Circuit
OLT	Optical Line Terminal
ONU	Optical Network Unit
OPV	Operationsverstärker
PM	Polarization Maintaining
PON	Passive Optical Network
SMF	Single Mode Fiber
SPAD	Single-Photon Avalanche Dioden
TDMA	Time Division Multiple Access
TEC	Thermoelectric Cooler
VMEbus	Versa Module Eurocard-bus

WDM      Wavelength Division Multiplex

# 1 Vorwort

Moderne Hochgeschwindigkeits-Kommunikationssysteme basieren zum Großteil auf optischen Datenübertragungstrecken. Solche Datenübertragungstrecken bestehen aus optischen Sendern und Empfängern. An der TU Wien, am „Institute of Electrodynamics, Microwave and Circuit Engineering“ (EMCE) werden hybride optische Empfänger entworfen, die in zukünftigen Datenübertragungstrecken eingesetzt werden sollen. Gerade die Kundenanbindung (last-mile) wird in den nächsten Jahren in immer größeren Anteilen als optische Verbindung realisiert werden.

Die dabei verwendeten Verfahren erfordern zum Teil neuartige Sender und Empfänger. Die vorliegende Arbeit realisiert ein hochflexibles Testsystem für die optischen Empfänger der nächsten Generation. Die Charakterisierung von optischen Empfängern erfordert schnelle, flexible Messsysteme, welche hohe Flexibilität bei der Wahl der Signalform ermöglichen. Diese Systeme können dann unterschiedliche optische Signale und Leistungspegel erzeugen und sind besonders für die Qualitätsüberprüfung der neu entwickelten optischen Empfänger geeignet. Zwei komplexe optische Quellen bilden das Kernstück des Messsystems, welches im Rahmen dieser Diplomarbeit aufgebaut wurde. Das Spezielle an den hier aufgebauten Laserquellen ist ihre Burst-Mode-Fähigkeit. Das bedeutet, es können Daten mit hohen Übertragungsgeschwindigkeiten und unterschiedlichen, rasch veränderlichen, Leistungspegeln erzeugt werden. Diese Burst-Mode-Fähigkeit der Laserquellen ist ein herausragendes Merkmal, da optische Quellen dieser Art kaum am Markt erhältlich sind.

Die folgende Arbeit gliedert sich in fünf Teile. Zunächst wird im ersten einführenden Teil die Laserquelle mit ihrem groben internen Aufbau, sowie die Realisierung der Aufgabenstellungen vorgestellt. Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Laserdiode und dem Aufbau der Laserdiodenansteuerung. Hierbei wird speziell auf die direkte Modulation der Laserdioden eingegangen. Es folgt dann eine Charakterisierung der entscheidenden Parameter der Laserdiodenansteuerung. Im Kapitel 4 folgen die Erläuterung der Ansteuerung der externen Modulatoren, sowie die experimentellen Ergebnisse. Kapitel 5 beschreibt das dritte Funktionsmodul der Laserquelle, nämlich die Leistungsanpassung. Im abschließenden Kapitel 6 wird der Burst-Mode-Betrieb präsentiert und experimentell untersucht.



## 2 Einleitung und Motivation

Die Datenübertragung mittels Lichtwellenleiter stellt heute die Schlüsseltechnologie der aktuellen Breitband-Kommunikationssysteme dar. Fortschritte der faseroptischen Technologien haben einerseits erreicht, dass die Langstrecken-Kommunikationssysteme Entfernungen überwinden, die einst undenkbar waren. Andererseits erzielen optische Übertragungssysteme hohe Datenraten über eine einzelne Glasfaser. Diese liegen bei 10 Gbit/s bis hinauf zu 120 Gbit/s. Doch mit steigendem Informationsaustausch werden nicht nur höhere Datenraten benötigt, sondern auch effiziente Empfänger. In der optischen Signalübertragung werden fast ausschließlich Empfänger mit Wellenlängen bei 1310 nm oder 1550 nm eingesetzt. Denn bei diesen beiden Wellenlängen haben Glasfasern ein spektrales Dämpfungsminimum und sind damit optimal verwendbar.

Die Charakterisierung der neu entwickelten Empfänger benötigt daher Messsysteme, welche sowohl bei hohen Datenraten, als auch bei den Telekom-Wellenlängen arbeiten. Diese Prüfstände sind erforderlich, da die Technologien bei diesen Geschwindigkeiten an ihre Grenzen stoßen, und die Simulationsergebnisse durch Messergebnisse verifiziert werden müssen.

Das Messsystem zur Charakterisierung der Empfänger, so wie das Grundkonzept der vorliegenden Arbeit wird im folgenden Abschnitt kurz erläutert.

### 2.1 Messsystem zur Charakterisierung von optischen Empfängern

Die Realisierung der optischen Empfänger erfolgt in optoelektronisch integrierten Schaltungen (*Optoelectronic Integrated Circuits*, OEICs). Der Empfänger besteht aus der Kombination eines Lichtdetektors aus III/V Halbleitern, welche Wellenlängen oberhalb der 1  $\mu\text{m}$  detektieren können und einer Empfängerschaltung zur Datenaufbereitung und Verarbeitung.

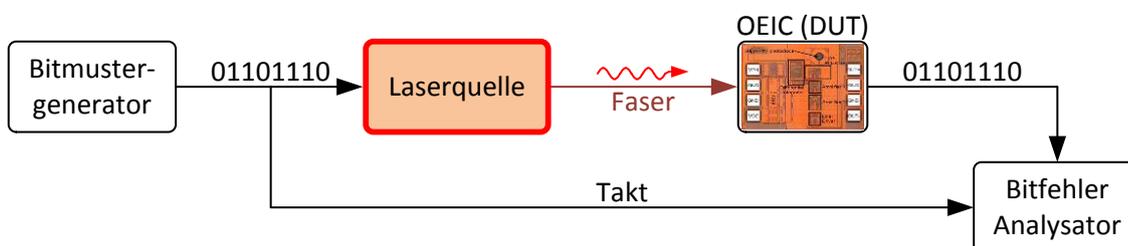


Abbildung 2.1: Testaufbau zur Charakterisierung von optischen Empfängern

Für die Messung der Übertragungsqualität eines optischen Empfängers ist es wichtig zu wissen, welche Bitrate übertragen werden kann. Abbildung 2.1 zeigt ein Beispiel für den Testaufbau zur Vermessung eines OEICs. Dabei stellt die Laserquelle das Kernelement dar. Sie erhält vom Bitmustergenerator ein elektrisches Datensignal, welches in ein optisches Datensignal gewandelt wird. Das so entstandene optische Bitmuster gelangt an den optischen Empfänger (OEIC), welcher das optische Signal zurück in ein elektrisches konvertiert. Das direkte Datensignal vom Bitmustergenerator wird mit dem Signal vom OEIC verglichen, wobei die Übertragungsfehler gezählt werden und ein Maß für die Qualität des optischen Übertragungssystems angegeben werden kann.

Der interne Aufbau der Laserquelle ist in Abbildung 2.2 ersichtlich. Sie besteht aus einer Laserdiode, welche direkt modulierbar ist. Ein Nachteil der direkten Modulation ist jedoch, dass der Laser nur eine begrenzte Modulationsbandbreite aufweist. Aus diesem Grund wird nach dem Laser ein schneller externer Mach-Zehnder-Modulator verwendet. Nach dem Modulator wird das optische Signal in den Abschwächer weitergeleitet, wo es im Anschluss einen 90:10 Fasersplitter durchläuft. Dieser führt einen Teil der optischen Leistung direkt zu einem integrierten Leistungsmesser. Damit kann die aktuelle Leistung am Ausgang der Laserquelle während der Messung erfasst und auch überwacht werden.

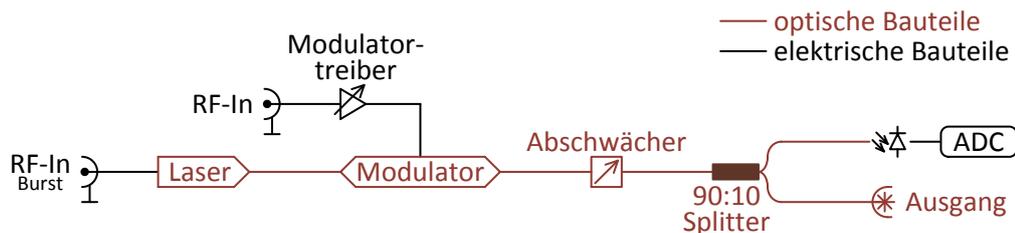


Abbildung 2.2: Blockdiagramm einer optischen Quelle

## 2.2 Aufgabenstellung und Realisierung

Die Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und dem Aufbau schneller Laserquellen mit faseroptischem Ausgang. Der Aufbau in Abb. 2.2 ist zu realisieren, wobei folgende Anforderungen zu erfüllen sind:

- Wellenlänge bei 1310 nm und 1550 nm
- Maximale Datenraten bei 10 Gbit/s und 40 Gbit/s
- Beliebige Signalformen (beginnend bei DC) sollen übertragen werden („Burst-Mode“-Fähigkeit)
- Die Signale sollen mit einstellbarer optischer Leistung gesendet werden
- Steuerung über einen PC

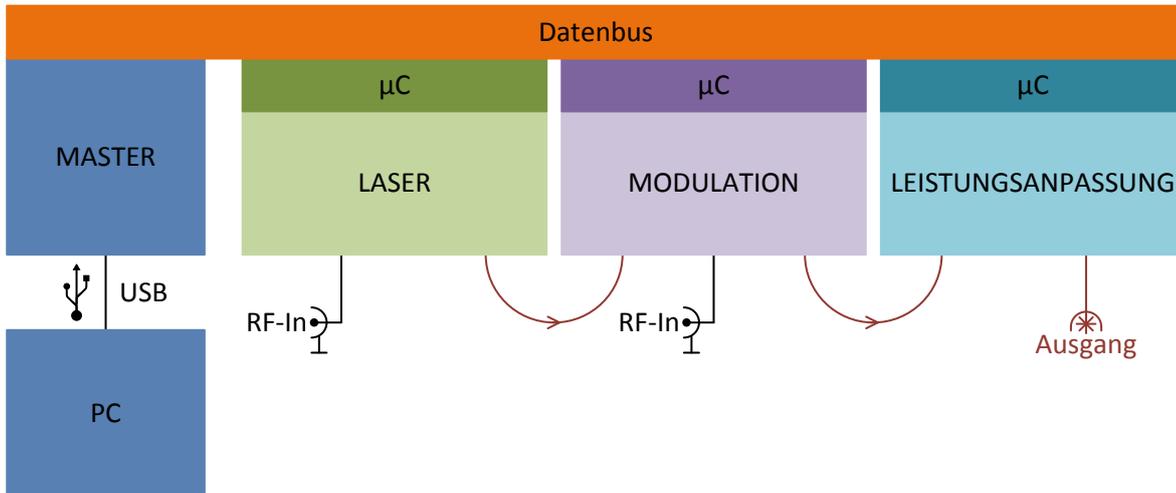


Abbildung 2.3: Bussystem

Diese werden in einzelnen Baugruppen realisiert (Abb. 2.3), welche in ein 19"-Einschubgehäuse montiert werden. Für die elektrische Verbindung zwischen den einzelnen Funktionsmodulen dient eine Backplane mit einem I<sup>2</sup>C-Bussystem. Jedes Modul besteht aus zwei Leiterplatten im Europakartenformat, wobei die Verbindung zwischen diesen zwei Karten mit einem 64-poligen Flachbandkabel realisiert wird. Dabei dient eine Karte als I<sup>2</sup>C-Slave und Hardwaresteuerung, realisiert mit einem ATMEL Mikrocontroller, und die zweite Karte steht als Komponenten-Platine zur Verfügung. Auf jeweils einer Komponenten-Platine befindet sich einmal die Laserdiode samt der gesamten Ansteuerung. Auf einer weiteren Komponenten-Platine ist der Hochgeschwindigkeitsmodulator inklusive Modulatortreiber vorzufinden. Die letzte enthält die optische Leistungsanpassung des Ausgangssignal. Mit ihr kann das optische Signal abgeschwächt und gleichzeitig auch dessen Leistung gemessen werden.

Es werden zwei Laserquellen entwickelt, deren grundsätzliche Architektur identisch ist. Die Unterschiede bestehen in den angestrebten Datenraten, sowie in den Wellenlängen: Eine Laserquelle arbeitet auf der Wellenlänge von 1310 nm mit einer Datenrate von 10 Gbit/s, während die zweite Laserquelle eine Datenrate von 40 Gbit/s bei der Wellenlänge 1550 nm besitzt. Obwohl diese Unterschiede nur sehr gering erscheinen, erfordern sie jedoch auf Grund der verschiedenen verwendeten Kernkomponenten unterschiedliche Entwürfe bei den Ansteuerschaltungen.

## 2.3 Unterschied zu den konventionellen Konzepten

Die Besonderheit der Quellen in der vorliegenden Arbeit ist eine so genannte „Burst-Mode“-Fähigkeit. Dabei darf das übertragene Datensignal jede beliebige Signalform annehmen und muss im Speziellen nicht mittelwertfrei sein. Diese bedeutende Eigenschaft ist wichtig für die Charakterisierung von optischen Burst-Mode-Empfängern, wie sie in den passiven opti-

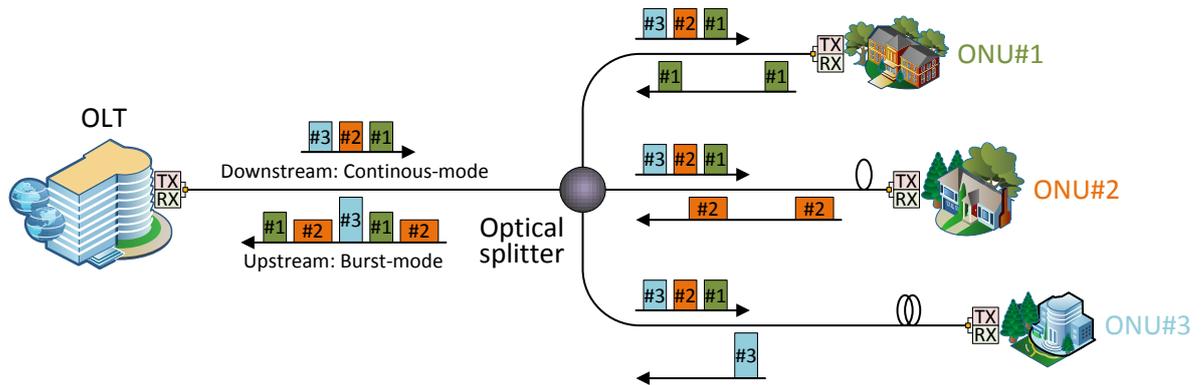


Abbildung 2.4: Allgemeine Architektur des PON-Systems für FTTH-Umgebung

schen Netzwerken (PON) vorzufinden sind. Abb. 2.4 zeigt die Architektur eines PON-Systems. Die aufstrebende Technologie und die Realisierung von PONs haben dazu geführt, dass die Fiber-To-The-Home (FTTH)-Dienste, vor allem in Asien, schon heute weit verbreitet sind. Diese optischen Zugangsnetze bieten eine kostengünstige Methode für die Bereitstellung von FTTH-Systemen, da sich mehrere Teilnehmer eine „lange“ primäre optische Faser zwischen der Vermittlungsstelle (*Optical Line Terminal*, OLT) und dem optischen Splitter (nahe bei den Kunden) teilen können. In einem PON-System werden Zeitmultiplexverfahren (*Time Division Multiple Access*, TDMA) und voll-duplex Wellenlängenmultiplexverfahren (*Wavelength Division Multiplex*, WDM) für die Übertragung benutzt, wobei die Netze eine Baum-Topologie aufweisen. Aufgrund der Topologie, unterscheidet sich der Downstream vom Upstream. Die Vermittlungsstelle (OLT) sendet Downstream-Daten im Dauerstrichmodus (*Continuous Mode*, CM), die mit einem Header versehen sind, für die Identifizierung der gewissen Optical Network Unit (ONU). Im Gegensatz dazu, variieren Upstream-Daten in Phase und Amplitude aufgrund der unterschiedlichen Abstände zwischen den ONUs und OLT. Diese Burst-Mode-Daten haben unterschiedliche optische Leistungspegel, daher brauchen Burst-Mode-Empfänger ein schnelles Ansprechverhalten und einen breiten dynamischen Bereich, um die Daten zu verarbeiten.

Die am Markt erhältlichen optischen Quellen sind typischerweise nicht für die Generierung eines Burst-Mode-Signals geeignet, weil schnelle Modulatortreiber durchwegs eine AC Kopplung im Signalpfad verwenden und daher nur mittelwert-freie bzw. mittelwert-konstante Signale übertragen können. Daher sind solche Quellen für die Qualitätsprüfung von heutigen Burst-Mode-Empfängern untauglich.

Im Vergleich zu den typischen optischen Quellen stellt die vorliegende Realisierung der Laserquellen einige wichtige Vorteile dar. Besonders die in dieser Arbeit benutzte Kopplungsart, nämlich die DC-Kopplung, bietet die Eigenschaft der absoluten Unabhängigkeit bei der Wahl der Signalquellen. Basierend darauf ergibt sich die Eigenschaft, dass es keine Untergrenze für die Dauer eines Daten-Bursts gibt.

### 3 Laserdiode als Lichtquelle

Laserdioden (LD) haben ein sehr breites Anwendungsspektrum, wobei jede Anwendung ihre speziellen Anforderungen stellt. Für den Einsatz als Lichtquelle mit hohen Datenraten ist eine schmale Linienbreite nötig. Weiterhin werden für anspruchsvolle Signalübertragungen fast ausschließlich Monomodefasern (*Single Mode Fiber*, SMF) eingesetzt, vor allem da hier keine Modendispersion auftritt. DFB-Laserdioden (*Distributed Feedback Laser*, DFB) stellen für diese Systeme fast ideale Konditionen bereit, denn sie schwingen auf nur einer longitudinalen Mode und die spektrale Bandbreite ist sehr gering. Im Gegensatz dazu haben FP-Laser (*Fabry-Perot*, FP) eine recht große spektrale Bandbreite, etwa 1 bis 4 nm, da sie auf mehreren longitudinalen Moden anschwingen können und infolgedessen zu größerer Modendispersion neigen als DFB-Laser.

In dieser Arbeit sind beide Arten von Lasern vorzufinden. Die Laserdiode mit der Wellenlänge von 1310 nm (LD1310) ist ein FP-Laser und die mit 1550 nm (LD1550) ist ein DFB-Laser. Beide Halbleiterlaser sind Dauerstrich- (*Continuous Wave*, CW)-Laser und erzeugen ein Licht konstanter Intensität. Dabei wird die CW-Laserstrahlung durch eine Optik (Gradientenindexlinsen) in die PM-Glasfaser (*Polarization Maintaining*, PM) eingekoppelt. PM-Fasern sind polarisationserhaltende SM-Fasern, in denen die komplexe Amplitude (Betrag und Phase) einer wohldefinierten Polarisation erhalten bleibt. Dies wird erreicht indem die zwei unabhängigen Polarisationszustände der Grundmode nicht dieselbe Ausbreitungskonstante haben und daher nicht miteinander koppeln. Der DFB-Laser befindet sich in einem hermetisch verschlossenem butterfly-Gehäuse gemeinsam mit einem Peltier-Kühler (*Thermoelectric Cooler*, TEC) zur Temperaturregelung (Abb. 3.1a). Ein Thermistor dient zur Überwachung der Temperatur. Neben der Laserdiode und dem TEC beinhaltet das Gehäuse der 1550 nm Laserdiodenfaser außerdem eine Photodiode, welche optisch mit der Laserdiode gekoppelt ist und für die Leistungsüberwachung zur Verfügung steht. Darüber hinaus befinden sich im Gehäuse eine Induktivität für den DC-Pfad und ein Anschluss für die Hochfrequenzmodulation von LD1550. Im Gegensatz dazu ist der FP-Laser im üblichen TO-CAN-Gehäuse untergebracht (Abb. 3.1b), welches neben der LD1310 nur noch eine Monitor-Photodiode enthält.



Abbildung 3.1: 1550 nm und 1310 nm Laserdioden in ihrem Gehäuse

In den folgenden Abschnitten sollen die wichtigsten Eigenschaften der Laserdioden und die grundlegenden Verfahren zur Steuerung der Halbleiterlaser ausführlich dargestellt werden.

## 3.1 Typische Parameter der Laserdioden

Für den Entwurf der Laserdiodensteuerung, wie zum Beispiel die Einstellung des Arbeitspunktes und die Verarbeitung des Modulationshubs von externen Signalquellen, ist zu erst eine genaue Kenntnis der Laserdiodenparameter erforderlich. Die wichtigsten Größen können dem Datenblatt (Anhang A) entnommen werden, jedoch enthält das Datenblatt von LD1550 (Anhang A.2) keine der notwendigen Kennlinien, welche für das Simulationsmodell (Kap. 3.2) wesentlich sind. Auf Grund dessen sind in den folgenden Kapiteln die Kennlinien von LD1550 gemessen und aufgenommen.

### 3.1.1 Eingangs-Charakteristik

In der Abbildung 3.2 ist die Strom-Spannung-Kennlinie von LD1550 dargestellt. Der Verbrauch der Laserdiode liegt zwischen 20 mW und 425 mW. Mit Hilfe des Diagramms kann der dynamische Eingangswiderstand ermittelt werden. Dieser beträgt etwa  $2,5 \Omega$ .

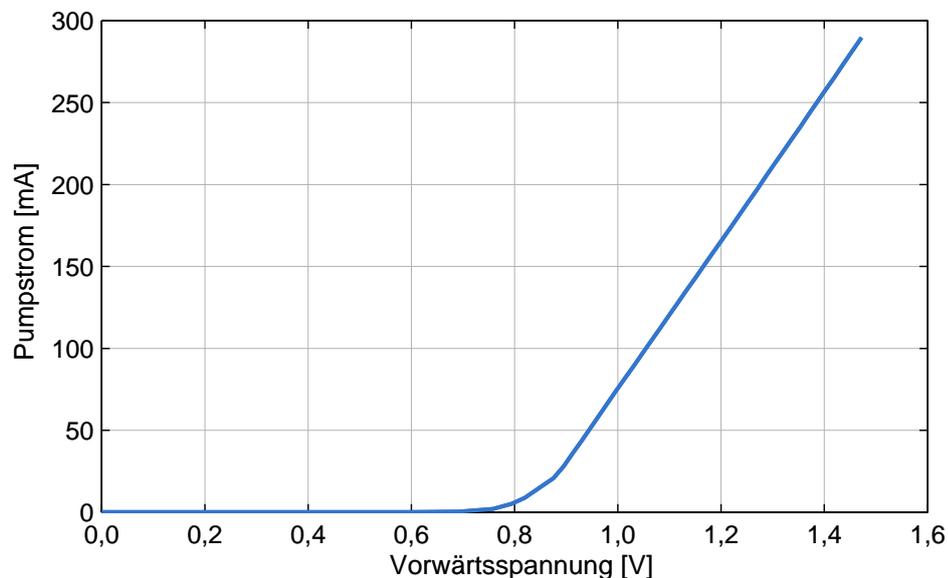


Abbildung 3.2: Gemessener Injektionsstrom als Funktion der Vorwärtsspannung (LD1550)

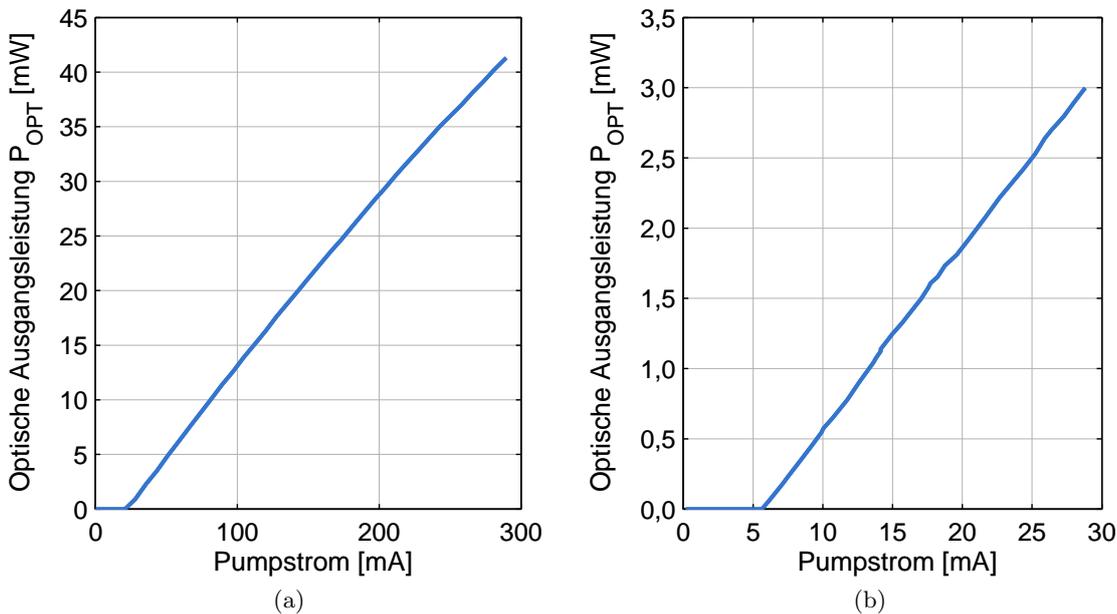


Abbildung 3.3: Ausgangsleistung als Funktion des Eingangsstroms von (a) LD1550 (gemessen) und (b) LD1310 (Datenblatt)

### 3.1.2 Stromleistungskennlinie

Die Ausgangsleistung in Abhängigkeit des Laserstroms ist ein weiterer wichtiger Parameter. In Abb. 3.3 sind typische P-I-Kennlinien zu sehen. Der Schwellstrom  $I_{TH}$  gibt den Strom an, ab dem der Laserbetrieb einsetzt und die Laserdiode eine Laserstrahlung emittiert. Unterhalb von  $I_{TH}$  ist die spontane Emission der dominierende Strahlungsprozess und die Laserdiode emittiert allein LED-Licht. Wird  $I_{TH}$  überschritten, so überwiegt die stimulierte Emission gegenüber der spontanen Emission, eine Besetzungsinversion liegt vor und die Laserdiode emittiert Laserstrahlung. Mit wachsendem Pumpstrom steigt die Ausgangsleistung stark an. Die Steilheit der P-I-Kennlinie ist ein Merkmal für die Modulation.

Der Schwellstrom von LD1550 ist bei ca. 21 mA und stimmt mit dem Schwellstrom von 24 mA vom Datenblatt (Anhang A.2) fast überein. Der Schwellstrom von LD1310 beträgt laut Datenblatt (Anhang A.1) 6 mA. Der Pumpstrom von 290 mA bei LD1550 und 30 mA bei LD1310 sollte nicht überschritten werden, da dadurch die Laserdiode zerstört werden kann. Aus diesem Grund soll der Biasstrom immer deutlich unter dem Wert des maximalen Pumpstroms bleiben.

### 3.1.3 Photodioden-Charakteristik

Der Strom, der internen Photodiode, welcher mit einer negativen Spannung ( $V_R$ ) vorgespannt wird, ist proportional zur Ausgangsleistung der Laserdiode. Im Datenblatt (Anhang A.2, Seite 74) von LD1550 ist nur der maximale Monitorstrom von ca. 0,5 mA für die volle optische

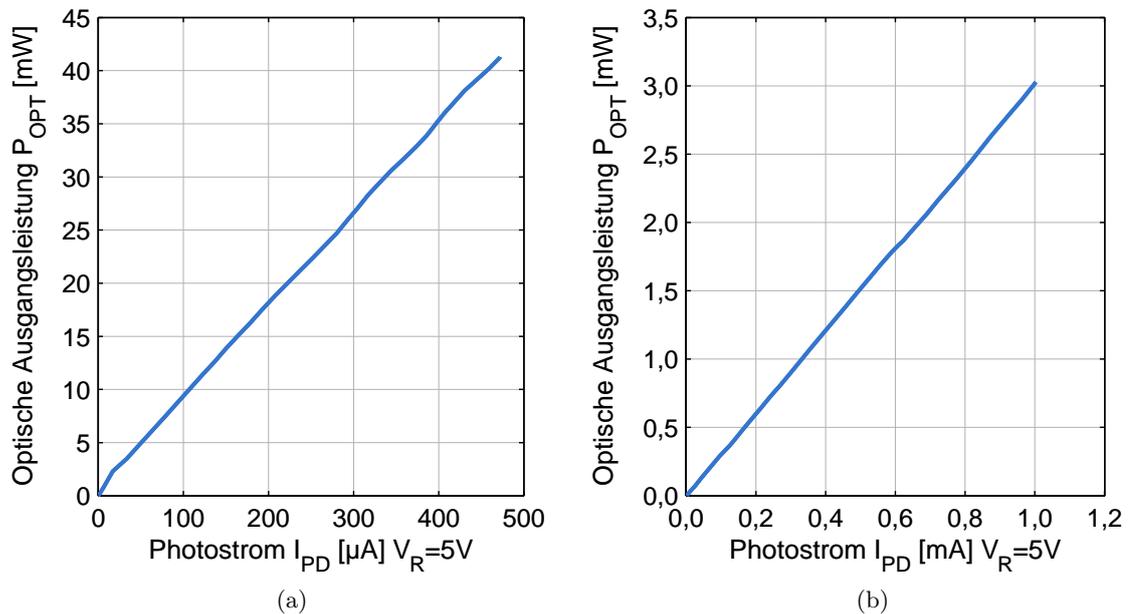


Abbildung 3.4: Monitorstrom als Funktion der Ausgangsleistung von (a) LD1550 (gemessen) und (b) LD1310 (Datenblatt)

Leistung von 40 mW zu finden und dieser stimmt mit dem Diagramm 3.4a gut überein. Der höchste Monitorstrom von LD1310 beträgt 1 mA bei der maximalen Leistung von 3 mW (Abb. 3.4b).

#### 3.1.4 Thermistor

Der Thermistor befindet sich nur in der Laserdiodenfassung von LD1550. Dessen nomineller Widerstand von  $10\text{ k}\Omega$  bei einer Temperatur von  $25\text{ }^\circ\text{C}$  besitzt einen negativen Temperaturkoeffizienten von  $-4,4\text{ } \%/^\circ\text{C}$ . Aufgrund der starken Nichtlinearität der Kennlinie (Abb. 3.5), wird diese mit entsprechender Schaltung linearisiert. Der Aufbau und die Funktion der Schaltung werden im Kap. 3.4.2 genau untersucht.

#### 3.1.5 Spektrum

Die Emissionsspektren sind für das Simulationsmodell nicht relevant, aber es ist ein typischer Parameter der Laserdioden. Wie schon zu Anfang des Kap. 3 erwähnt, ist in der Abb. 3.7 deutlich der Unterschied zwischen einem FP- und DFB-Laser zu sehen. LD1550 schwingt auf nur einer Mode bei einer Wellenlänge von  $1548,75\text{ nm}$ . Im Gegensatz dazu beträgt die spektrale Bandbreite von LD1310 2 bis 4 nm und sie schwingt auf mehreren Moden bei einer Wellenlänge um  $1315\text{ nm}$  (Abb. 3.7).

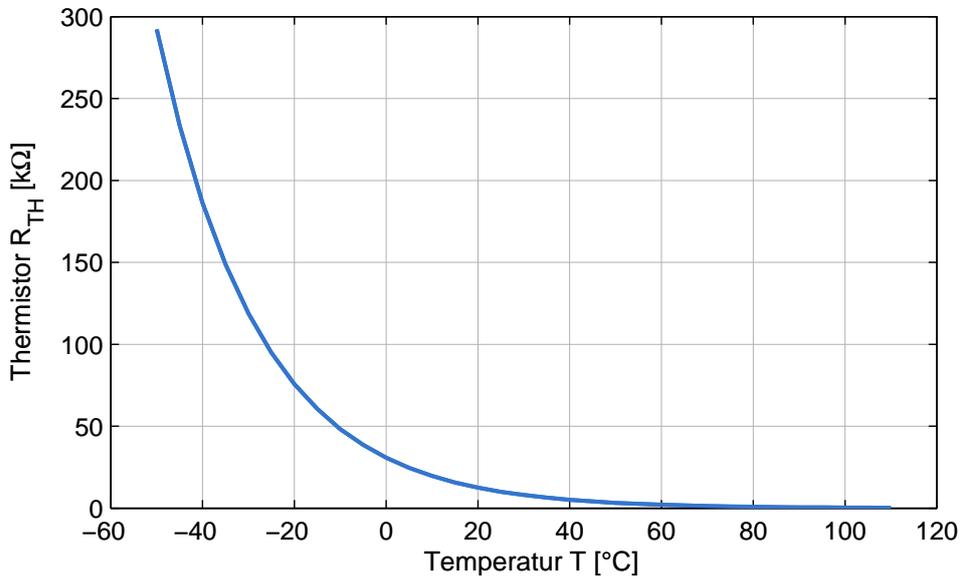


Abbildung 3.5: Berechnete Kennlinie von  $R_{TH}$  als Funktion der Temperatur

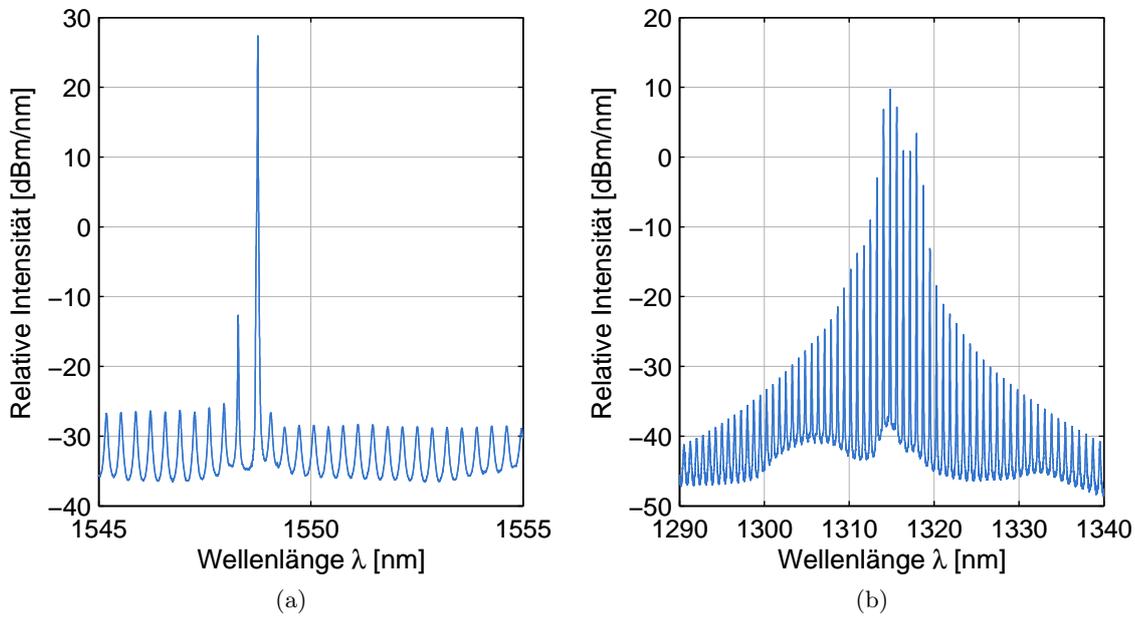


Abbildung 3.6: Gemessenes Emissionsspektrum von (a) LD1550 bei  $P_0=5,6$  mW und (b) LD1310 bei  $P_0=0,85$  mW

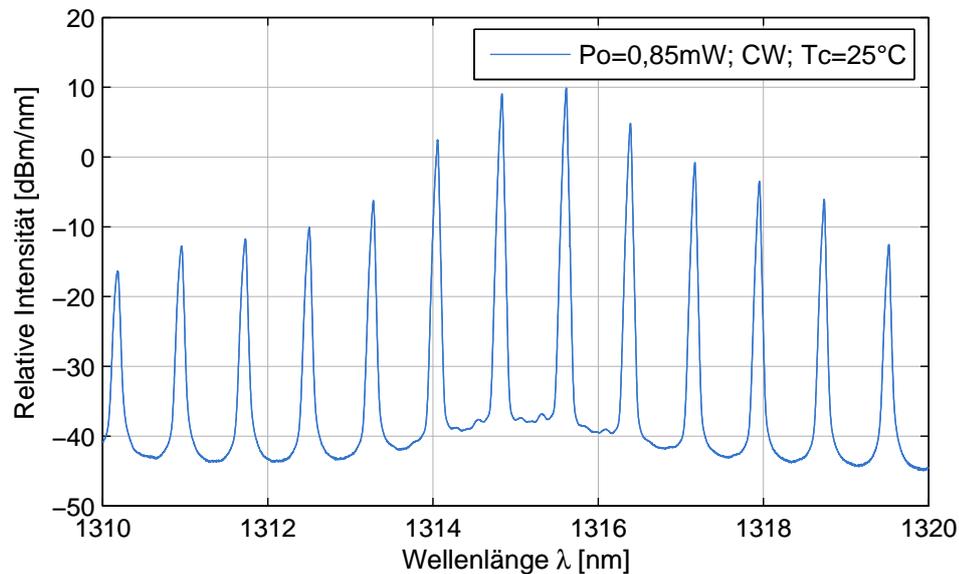


Abbildung 3.7: Detaillierte Darstellung des gemessenen Spektrums von LD1310

## 3.2 Simulationsmodell der Laserdiode

Für die Entwicklung und Optimierung des Laserdiodentreibers ist es sehr vorteilhaft, wenn ein Simulationsmodell der gesamten Steuerschaltung vorhanden ist, wobei das Kernstück des Simulationsprozesses das Modell der Laserdiode ist. Die gesamte Simulation der beiden Laserdiodentreiber basiert auf einer präzisen Modellierung von LD1550, da hier die genauen Messdaten zu den Kennlinien zur Verfügung stehen. Darüber hinaus haben die zwei Laserdioden ein gut vergleichbares Verhalten in allen charakteristischen Größen mit dem Unterschied in der Steigung der Kennlinien, so dass der gleiche Treiber für beide Laserdioden verwendet werden kann, jedoch mit unterschiedlichen Werten der passiven Bauteile.

Das DC-Simulationsmodell von LD1550 ist in Abb. 3.8 dargestellt. Die Eingangscharakteristik der Laserdiode (Abb. 3.2) wird mit einer Serienschaltung einer DC-Spannungsquelle von 0,1 V, einem Serienwiderstand von  $2\Omega$  und einer idealen Diode simuliert. Die Diode D1 bewirkt einen exponentiellen Knick der Laserdioden-Kennlinie. Die Photodioden-Charakteristik (Abb. 3.4a) und die P-I-Kennlinie (Abb. 3.3a) werden mit einer arbiträren Spannungs- und einer arbiträren Stromquelle modelliert. Die Quellen B1 und B2 sind Quellen beliebigen Verhaltens (*arbitrary behavioral current source*) und geben einen Strom aus, welcher über Funktionen beschreibbar ist. Über die Quelle B2 wird die optische Ausgangsleistung in Abhängigkeit des Laserstroms modelliert und in der Quelle B1 ist der Monitorstrom in Abhängigkeit des Laserstroms implementiert. Die Tabellenfunktion interpoliert einen Wert für den Strom durch R1 basierend auf einer Nachschlagstabelle, welche als eine Reihe von Paaren von Punkten angegeben ist. Die ersten Parameter dieser Punkte repräsentieren den Laserstrom, während die zweiten Werte die dazu korrespondierende optische Leistung oder den übereinstimmenden Monitorstrom

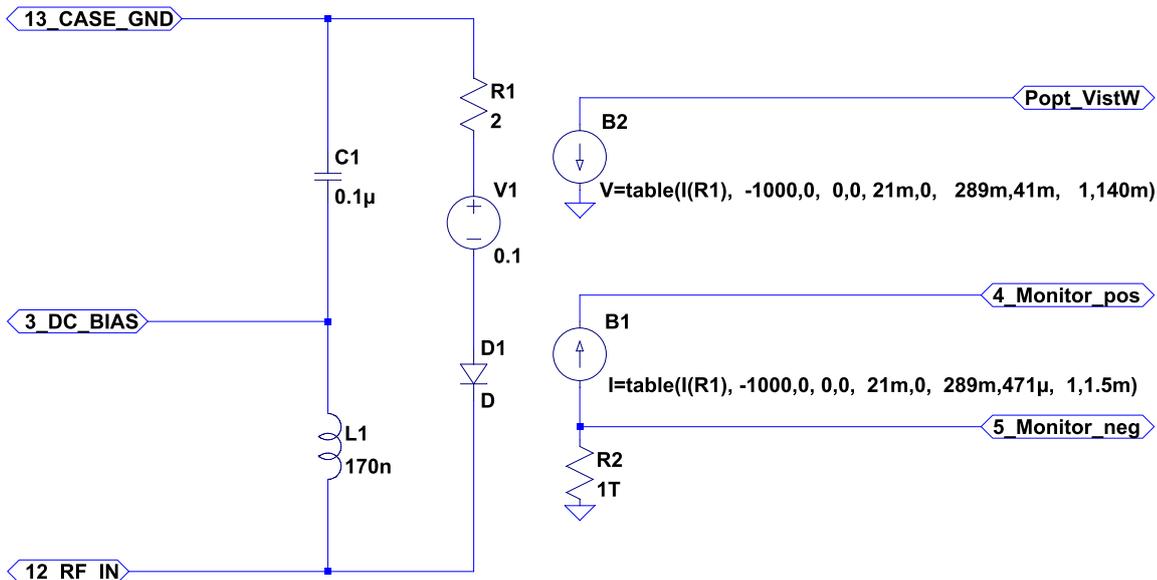


Abbildung 3.8: DC-Simulationsmodell von LD1550 mit Gehäuse-Parasiten

kennzeichnen. Durch das annähernd lineare Verhalten der Kennlinien, sind lediglich wenige Wertepaare notwendig, um den Fehler der Interpolation zu minimieren. Die ersten und letzten Parameterpaare sind aus den Diagrammen extrapolierte Werte für eine stabile Simulation auch im Falle einer Überlastung des Simulationsmodells. Der Ausgang der Quelle B2 ist eine der optischen Leistung proportionale Spannung ( $1 \text{ V} = 1 \text{ W}$ ). Der Widerstand R2 ist allein für die Konvergenz der Simulation eingesetzt. Die Elemente C1 und L1 wurden in späterer Folge eingefügt, um den Einfluss der im Datenblatt angegebenen Parasiten des Gehäuses auf den Frequenzgang zu untersuchen. Dennoch sollte das Modell grundsätzlich nur für DC-Simulationen verwendet werden.

### 3.3 Direkte Modulation

Halbleiterlaser können über den Injektionsstrom direkt moduliert werden. Dies ist auch die einfachste Art der Intensitätsmodulation bei Laserdioden. Dabei wird die Laserdiode ein- und ausgeschaltet, indem der Betriebsstrom ein- und ausgeschaltet wird. Es sind jedoch nicht beliebig hohe Modulationsgeschwindigkeiten erreichbar. Diese reichen bis in den GHz-Bereich und werden durch die Einschwingvorgänge und die spektrale Verbreiterung der Lasermoden (Chirp) begrenzt. Die Einschwingvorgänge treten beim Übergang vom LED-Modus zum Laserbetrieb auf. Besonders das Ausschalten ist ein langsamer Vorgang, da die Relaxationszeiten von Halbleiterdioden (InGaAsP) typischerweise im ps-Bereich liegen. Der Chirp entsteht, da bei der Intensitätsmodulation in Laserdioden die Ladungsträgerdichten verändert werden und damit ändert sich auch der Brechungsindex, welcher eine Phasenmodulation bewirkt. Der Chirp begrenzt somit die Übertragungseigenschaften besonders auf langen Strecken und führt

zur Verbreiterung des Pulses. Infolgedessen wird die direkte Modulation von Laserdioden nur für niedrige Datenraten (bis ca. 10 Gbit/s) genutzt. Für hohe Datenraten wird ein externer Modulator, wie im Kapitel 4 beschrieben, verwendet.

In folgendem Abschnitt werden typische Ansteuerschaltungen für die direkte Modulation von Laserdioden beschrieben.

#### 3.3.1 Kopplungsmethoden

Für die direkte Modulation von Laserdioden wird eine typische Ansteuerschaltung, ein so genanntes Bias-Tee (Bias-T), verwendet (Abb. 3.9a). Dabei wird die Hochfrequenz über eine Kapazität  $C$  und das niederfrequente Signal über eine Induktivität  $L$  eingekoppelt. Dementsprechend wird der Modulationsstrom über die Kapazität zugeführt, der Biasstrom über die Induktivität. Der Biasstrom  $I_0$  wird über die Konstantstromquelle eingespeist, während der Modulationsstrom von einer Wechselstromquelle oder einem Bitmuster-generator über eine  $50\Omega$ -Leitung eingepreßt wird. Damit der Leitungswellenwiderstand von  $50\Omega$  erhalten bleibt, wird ein Abschlusswiderstand  $R_{LW}$  zur Leitungsanpassung eingefügt.

Allerdings können beim Bias-T, aufgrund des Koppelkondensators, nur mittelwertfreie Signale über den Modulationspfad eingekoppelt werden, daher wird so eine Ansteuerung auch als Ansteuerschaltung mit AC-Kopplung bezeichnet. Damit auch Mischsignale (DC und AC) im Modulationspfad verwendet werden können, ist eine Ansteuerschaltung mit DC-Kopplung notwendig (Abb. 3.9b). Bei dieser Art der Ansteuerung entfällt der Koppelkondensator. Da sich aber durch das externe Modulationssignal mit DC Anteil der Arbeitspunkt der Laserdiode verschieben, sind umfangreiche Schaltungsstrukturen notwendig um die interne Biasstromregelung immer dem durch die externe Modulation gewünschten Arbeitspunkt anzupassen. Diese Schaltungsblöcke werden im Folgenden detailliert erläutert.

Auch beim Laserdiodentreiber von LD1550 und LD1310 wird kein Koppelkondensator im Modulationspfad eingesetzt, somit kann auch dort eine beliebige Signalform an externen Modulationsanschluss eingespeist werden.

## 3.4 Laserdiodenansteuerung

Die Laserdiodenansteuerung umfasst sowohl die Regelung des Bias- und Modulationsstroms, sowie die Temperaturregelung der Laserdioden. Im Schaltplan 3.16 übernehmen die blau hervorgehobenen Blöcke die Funktion für die Steuerung des Bias- und Modulationspfades, die orangenen Blöcke sind für die Einstellung der Lasertemperatur zuständig. Wie im Kapitel 3.2 erwähnt, ist die Ansteuerung für beide Laserdioden gleich, lediglich einzelne passive Bauteile unterscheiden sich. Die genaue Funktionsbeschreibung dieser Blöcke befindet sich in den folgenden Kapiteln.

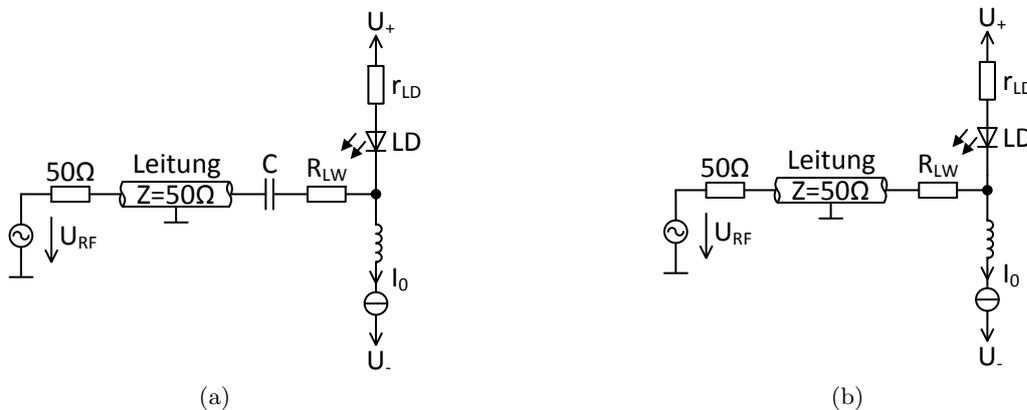


Abbildung 3.9: Darstellung von Ansteuerschaltungen zur Direktmodulation von Laserdioden mit (a) AC-Kopplung und (b) DC-Kopplung

### 3.4.1 Laserdiodentreiber

Wie im Kap. 3.3.1 beschrieben, wird die Laserdiode über zwei Pfade mit DC-Kopplung (Abb. 3.9b) angesteuert, zum einen über den internen Bias-Pfad und dann über den externen Modulationspfad. Die Darstellung in Abb. 3.9b ist jedoch sehr vereinfacht dargestellt, die gesamte Ansteuerung fällt aufwendiger aus. Das grobe Blockschaltbild ist in Abb. 3.10 zu sehen. Die Ansteuerung des Bias-Pfades erfolgt über die Blöcke A, C, D, E und F und die des Modulationspfades über die Blöcke G und H und das Potentiometer R47. Der geneigte Leser möge an dieser Stelle das Blockschaltbild 3.10 mit dem Schaltplan der Laserdiodenansteuerung 3.16 vergleichen.

Einfach gesagt wird per Software intern über den Bias-Pfad eine DC-Spannung, entsprechend einer gewünschten optischen Leistung, eingestellt. Diese durchläuft den PI-Regler (F) und steuert die Konstantstromquelle (A) an, welche direkt die optische Bias-Leistung in der Laserdiode beeinflusst. Durch die integrierte Photodiode wird diese CW-Lichtleistung so über D und E geregelt, dass sie der gewünschten optischen Leistung entspricht.

Durch diese Regelung des Bias-Pfades wird lediglich der Arbeitspunkt der optischen Ausgangsleistung eingestellt. Durch eine externe Signalquelle, kann um diesen Arbeitspunkt herum moduliert werden. Der Modulationshub wird extern über den Modulationspfad eingepreßt, und die Modulationsspannungen reichen hier von DC bis in den niedrigen GHz-Bereich. Der Abschlusswiderstand  $R_{LW}$  dient dazu in Serie zu dem Laserdiodeninnenwiderstand am Modulationseingang eine  $50\ \Omega$  Schnittstelle zu erreichen. Über ebendiesen Abschlusswiderstand  $R_{LW}$  wird ein Modulationsstrom eingespeist, welcher sich zum Laserstrom hinzuaddiert oder abgezogen wird, wodurch sich in der Laserdiode mehr oder weniger Licht ergibt. Ohne weitere Schaltungstechnische Maßnahmen würde durch die interne Photodiode der oben beschriebene Bias-Pfad diese Variation im Licht korrigieren und somit den durch das externe Signal gewünschten Biaspunkt verfälschen, bzw. ausregeln.

Damit der Biaspunkt unbeeinflusst bleibt, wird die externe Spannung überwacht und die abwei-

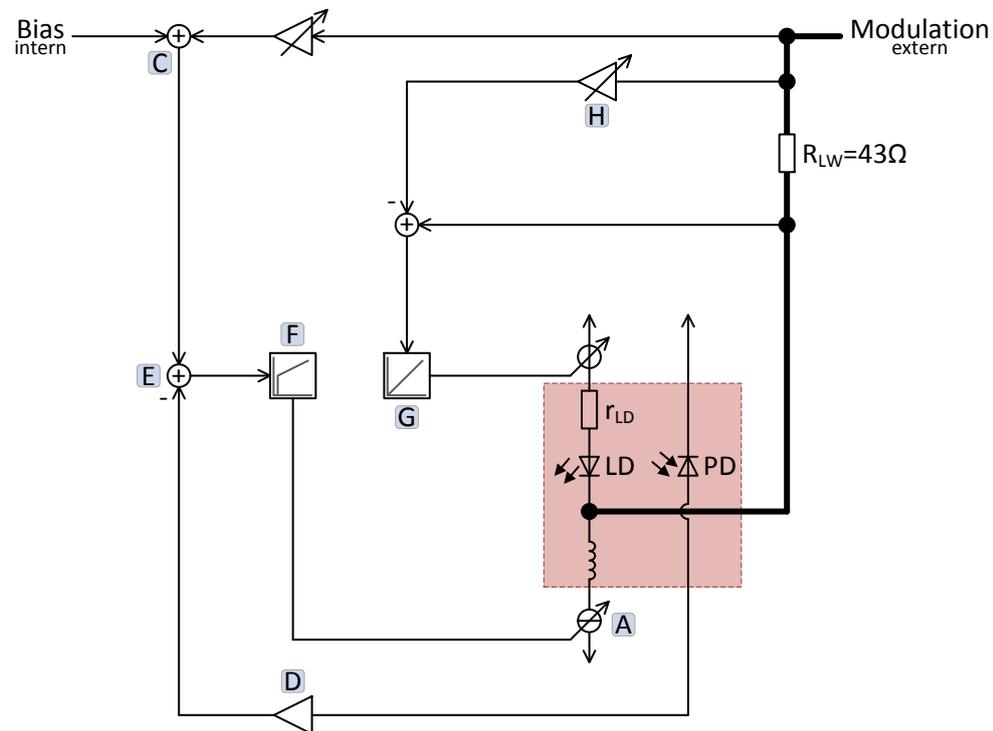


Abbildung 3.10: Blockschaltbild des Laserdientreibers

chende Differenz vom Biaspunkt zum Bias-Pfad im Summierer C passend addiert. Die exakte Verstärkung dieses Pfades wird mit dem Potentiometer R47 eingestellt.

Der Abschlusswiderstand  $R_{LW}$  im Modulationspfad beträgt  $43,3\ \Omega$  und setzt sich im Schaltplan aus den Widerständen  $R1||R2||R3$  zusammen (Abb. 3.16). Er ist mit Absicht etwas kleiner als  $50\ \Omega$  gewählt, denn der Innenwiderstand  $r_{LD}$  der Laserdioden liegt in Serie zum  $R_{LW}$  und beträgt  $2-10\ \Omega$ . Der Innenwiderstand und die Flussspannung der Laserdioden sind dynamisch und ändern sich mit dem Arbeitspunkt. Um dem Rechnung zu tragen, werden die Potentiale am  $R_{LW}$  gemessen, dann ins Verhältnis gesetzt und damit die Spannung an der Anode der Laserdiode mit einem I-Regler (G) korrigiert. So bleibt die Eingangsimpedanz von  $50\ \Omega$  für alle Frequenzen bis hinunter zu DC erhalten.

Die detaillierte Beschreibung der Blöcke in Abb. 3.10 wird im Folgenden besprochen.

### 3.4.1.1 Ansteuerung des Bias-Pfades

#### A: Konstantstromquelle

Der Arbeitspunkt der anzusteuern Laserdiode wird durch einen Biasstrom einer Konstantstromquelle eingestellt. Der Biasstrom wird durch den Widerstand R51 festgelegt und von der Stromquelle konstant gehalten. Der Widerstand R51 beträgt  $100\ \Omega$  beim Laserdientreiber

von LD1310 (LDT1310) und  $10\ \Omega$  beim Laserdiodentreiber von LD1550 (LDT1550). Der OPV (*Operationsverstärker*, OPV) IC15 arbeitet als Spannungsfolger und bekommt am +Eingang eine konstante Spannung von 2,5 V. Der -Eingang versucht diese Spannung zu halten. So lange die Spannung am -Eingang kleiner als am +Eingang ist, ist die Spannung am OPV-Ausgang größer und damit auch die Spannung  $U_{BE}$  vom Transistor Q6. Mit größerer  $U_{BE}$  steigt auch der Basisstrom und mit dem der Kollektorstrom, welcher die Spannung am R51 so lange erhöht, bis die Spannung an den OPV-Eingängen gleich groß ist. Für die Begrenzung des Basisstroms dient R52. Wichtig für die Frequenzgangkompensation des OPVs sind R53 und C49. Diese Werte sollen so gewählt werden, dass der OPV ausreichend schnell ist ohne zu schwingen.

Mit dem Potentiometer R54 kann der Biasstrom bei LDT1550 auf maximal 250 mA eingestellt werden, das entspricht einer optischen Ausgangsleistung von etwa 36 mW. Bei LDT1310 beträgt der maximal einstellbare Biasstrom 25 mA, mit dem wird eine maximale Leistung um 2,5 mW erreicht. Die Treiber wurden so dimensioniert, dass sie etwas Platz für die Modulation freilassen (LDT1550:  $170\ \text{mA} \hat{=} 25\ \text{mW}$ , LDT1310:  $20,5\ \text{mA} \hat{=} 1,83\ \text{mW}$ ). Da die Laserdiode um den eigenstellten Biaspunkt herum moduliert wird, soll sich der Arbeitspunkt vorzugsweise in der Mitte der P-I-Kennlinie (Abb. 3.3) befinden. So wird mit einer externen reinen AC Modulation auch ein maximales Extinktionsverhältnis (*Extinction Ratio*, ER) erzielt.

## B: Digital-Analog-Wandler

Die Spannung am DAC (*Digital-to-Analog Converter*, DAC) kann bei LDT1550 zwischen 0 und 1,24 V über das Bussystem in  $2^{12}$  Schritten eingestellt werden. Bei LDT1310 kann die Spannung zwischen 0 und 2,5 V variiert werden, hiermit sind die Widerstände der Referenzquelle R74 und R75 jeweils  $1\ \text{k}\Omega$  groß. Damit wird die optische Bias-Leistung über eine passende Software mit einem PC vorgegeben. In Abbildung 3.11 ist die optische Leistung in Abhängigkeit der DAC-Schritte dargestellt.

## C: Invertierender Addierer

Drei Eingangsspannungen werden aufsummiert und verstärkt. Eine Schaltspannung dient dazu, um den Laser generell ein- oder ausschalten zu können. Die Abschaltung des Lasers über ein SSollsignalim Leistungsregelkreis hat den großen Vorteil, dass alle Regler auch im abgeschalteten Zustand eingeschwungen bleiben und beim Einschalten der Laserdiode die komplette Regelung definiert und eingeschwungen hochfährt. Desweiteren finden sich am Addierer noch die interne Bias-Spannung vom DAC und schließlich die externe Spannung für die direkte Modulation des Lasers. Diesen Eingangsspannungen wird ein schaltungstechnisch notwendiges Offset von  $-1,24\ \text{V}$  überlagert.

Demzufolge wird mit dem entsprechenden Verhältnis der Eingangswiderstände R49 der Offsetquelle und R71 des D/A-Wandlers, eine breite Aussteuerung um den mittleren Bereich des DACs erzielt (Abb. 3.11). Mit dem Widerstand R71 (LDT1310:  $25\ \text{k}\Omega$ , LDT1550:  $22\ \text{k}\Omega$ ) wird der DAC-Bereich optimiert, d.h. die Steigung der  $P_{OPT}$ -Kennlinie wird angepasst. Durch den R49 (LDT1310:  $14\ \text{k}\Omega$ , LDT1550:  $27\ \text{k}\Omega$ ) wird der Offset des DAC-Bereichs größer bzw. kleiner

eingestellt, d.h. die  $P_{OPT}$ -Kennlinie wird verschoben. Somit lässt sich die Bias-Leistung mit digitalen Werten von 800 bis 3300 über die Ausgangsspannung  $P_{SOLL}$  des Summierverstärkers IC14A per PC steuern. Die Funktion des Potentiometers R47 wird im Kap. 3.4.1.2 erklärt.

#### **D: Invertierender Verstärker**

Mit Hilfe eines invertierenden Verstärkers wird der Monitorstrom der internen Photodiode verarbeitet. Die Photodiode wird in Sperrrichtung mit einer gesteuerten Versorgungsspannung von maximal 4 V betrieben. Der Ausgang  $P_{IST}$  des invertierenden Verstärkers IC18A ist wegen der Differenzbildung im Block E invertiert. Es ist eine der abgegebenen optischen Leistung proportionale Spannung. Darüber hinaus wird die Spannung  $P_{IST}$  über einen weiteren invertierenden Verstärker IC18B zum analogen Ausgang geführt.

Mit dem Potentiometer R62 wird die Spannung  $P_{IST}$  für den analogen Ausgang skaliert. Der Skalierungsfaktor beträgt bei LDT1550 20 mV/mW und bei LDT1310 500 mV/mW. Der jeweilige Skalierungsfaktor ist auf der Frontplatte vermerkt.

#### **E: Differenzbildung**

Hier wird die Differenz zwischen den Spannungen  $P_{SOLL}$  und  $P_{IST}$  gebildet. Die 1 k $\Omega$  Widerstände R64 und R63 zusammen mit den Schottky-Dioden D4 dienen zur beschleunigten Ausregelung des Biasstroms der Laserdiode. So lange der Spannungsunterschied zwischen  $P_{SOLL}$  und  $P_{IST}$  klein ist, sperrt eine der Schottky-Dioden und es wirken sich nur die 10 k $\Omega$  Widerstände R65 und R66 auf die Ladekurve des Kondensators C53 (Block F) aus. In diesem Fall wird der Kondensator langsam geladen und damit erfolgt auch die Regelung des Laserstroms langsam. Bei einem großen Spannungsunterschied ist die Schottky-Diode in Durchlassrichtung geschaltet und die Steigung der U-I-Kennlinie wird hier durch die 1 k $\Omega$  Widerstände beeinflusst. Die Steigung in Durchlassrichtung der Schottky-Diode ist um das 10-Fache größer, als in der Sperrrichtung, somit fließt ein zusätzlicher Strom über den 1 k $\Omega$  Widerstand in den Kondensator und lädt diesen schneller auf. Aus diesem Grund erfolgt auch die Regelung des Laserstroms schnell.

Für den Fall, dass die Regelung hier nur schnell erfolgt, so würde der Integrator (Block F) zum Überschwingen neigen. Demzufolge wird beim Anlegen einer positiven Spannung  $P_{SOLL}$  zuerst schnell zu einem Wert des Biasstroms geregelt und dann langsam zum gewünschten Wert nachgeregelt. Sobald der Strom im Kondensator C53 null erreicht, ist die Schaltung ausgeregelt.

#### **F: Integrator mit nachfolgender Basisschaltung**

Der Transistor T1 zusammen mit dem Integrator steuern automatisch den Strom der Konstantstromquelle. Überschreitet die Spannung am -Eingang von IC17 etwa 70  $\mu$ V, so schaltet dieser OPV auf die maximalen 8 V durch. Im Regelfall liegt am Transistor T1 eine Basis-Emitter-Spannung  $U_{BE}$ , die etwas größer als 0,6 V ist, und dieser beginnt zu leiten. Der Kollektorstrom wird mit dem R56 begrenzt. Durch den Kollektorstrom steigt der Spannungsabfall am R53

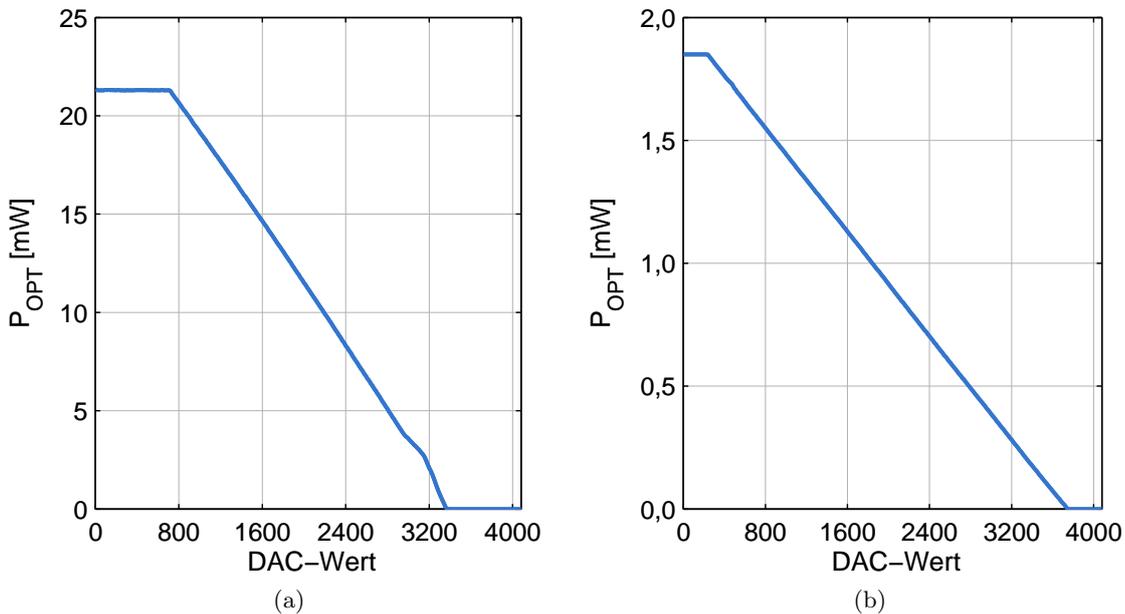


Abbildung 3.11: Gemessene optische Leistung in Abhängigkeit der DAC-Spannung von (a) LDT1550 und (b) LDT1310

(Block A) und folglich auch die Spannung am -Eingang von IC15 im Block A, welche mit der vorgegebenen Dimensionierung gleich der Spannung am +Eingang ist. Dadurch sperrt der OPV im Block A und der Laserstrom wird kleiner.

### 3.4.1.2 Ansteuerung des Modulationspfades

Aufgrund der DC-Kopplung bei der Direktmodulation der Laserdiode, können im externen Modulationspfad sowohl DC- als auch AC-Signale verwendet werden. Die Verwendung der DC-Signale im Modulationspfad erfordert zusätzliche Maßnahmen. Zum einen darf der Arbeitspunkt durch die Rückkopplung nicht verfälscht werden, zum anderen soll das 50- $\Omega$ -System erhalten bleiben. Im Folgenden werden die Realisierungen dieser zusätzlichen Regelung behandelt.

#### Potentiometer R47

Wird ein Spannungssprung am externen Modulationseingang angelegt, so würde die optische Leistung ohne Potentiometer R47 im ersten Moment ebenso springen, jedoch nach einiger Zeit, aufgrund der Regelung im Bias-Pfad, zum Wert vor dem Sprung abklingen. Denn mit dem Leistungssprung ändert sich auch die von der Photodiode gemessene Leistung  $P_{IST}$ . Die vorgegebene Leistung  $P_{SOLL}$  bleibt jedoch unverändert. Genau dieser Leistungsunterschied zwischen  $P_{IST}$  und  $P_{SOLL}$  muss ausgeglichen werden, ansonsten ändert die Konstantstromquelle ihren

Biasstrom. Dieser soll aber unverändert bleiben und die Modulation der Laserdiode nur vom externen Modulationssignal abhängen. Mit der passenden Einstellung des Potentiometers R47 wird der Leistung  $P_{\text{SOLL}}$  die Leistungsdifferenz hinzugefügt, dadurch bleibt der Biasstrom unverändert und die optische Leistung klingt nicht ab.

Das Potentiometer R47 ist dann richtig eingestellt, wenn die Ausgangsspannung  $V_{\text{CTRL}}$  von IC17 (Block F), bei einem angelegten externen Signal, flach bleibt. Wichtig ist, dass R47 bei einer mittleren bis hohen Bias-Leistung eingestellt wird, denn hier ist die PI-Kennlinie der Laserdiode im linearen Bereich.

Des Weiteren soll der invertierende Verstärker vom Block D annähernd so schnell wie der Summierverstärker (Block C) sein. In Abb. 3.12 ist die Simulation des Frequenzganges dieser zwei Blöcke dargestellt. Die Ausgangsspannung  $P_{\text{SOLL}}$ , vom Block C, hat den 3 dB Abfall bei 2,3 MHz. Im Vergleich dazu, der 3 dB Abfall von  $P_{\text{IST}}$ , befindet sich bei 2 MHz. Somit sind die zwei Blöcke gleich schnell und der Biasstrom wird überschwingungsfrei geregelt.

#### **G: Virtuelle Masse**

Werden am Modulationseingang 0 V angelegt, so soll kein Strom durch den Abschlusswiderstand  $R_{\text{LW}}$  fließen. Folglich muss das Potential an der Kathode der Laserdiode 0 V betragen. Dieser virtuelle Nullpunkt wird vom Integrator IC12 erzielt. Er befindet sich direkt nach dem Abschlusswiderstand und misst hochohmig am -Eingang die Spannung vom Modulationspfad und vergleicht sie mit 0 V. Die Spannungsquelle an der Anode der Laserdiode wird nun so lange nachgeregelt, bis sowohl das Potenzial am -Eingang von IC12, als auch das Potential an der Kathode 0 V ergeben. Die virtuelle Masse ist dann erreicht, wenn der Strom durch die Widerstände R67 und R39 zum Stillstand kommt.

Vom Modulationseingang darf kein Strom in die Laserdiode fließen, wenn an diesem 0 V anliegt, sonst summiert sich dieser mit dem Laserstrom von der Konstantstromquelle, was wiederum den Arbeitspunkt verfälschen würde.

#### **H: Ausgleich des Laserdiodeninnenwiderstands**

Für eine schnelle AC-Modulation am externen Eingang ist effektiv der Leitungswiderstand von  $43,3 \Omega$  in Serie zu dem Laserdiodeninnenwiderstand wirksam. Die beiden ergeben in Serie die gewünschten  $50 \Omega$  Eingangswiderstand. Liegt jetzt aber am Modulationseingang eine DC-Spannung größer 0 V, so ist nur der Leitungswiderstand von  $43,3 \Omega$  sichtbar. Das ist deshalb, weil der Integrator im Block G das Potential an der Kathode auf 0 V regelt. Damit auch DC-mäßig ein Leitungswiderstand von  $50 \Omega$  zu sehen ist, muss das Potential an der Kathode der Laserdiode bei DC Eingangssignalen ein wenig mitwandern. Die Schaltung im Block H bewirkt genau diese Verschiebung des Potentials, damit zusätzlich an der Kathode immer genau  $6,7 \Omega$  sichtbar sind. Der Invertierende Verstärker IC14B befindet sich vor dem Abschlusswiderstand und misst die DC-Spannung direkt vom Modulationseingang. Diese wird mit einer passenden Verstärkung versehen und zum Integrator im Block G hinzuaddiert, welcher die Spannungsquelle an der Anode der Laserdiode steuert. Das richtige Potential an der Kathode ist dann erreicht, wenn der Strom durch die  $10 \text{ k}\Omega$  Widerstände R38 und R67+R39 gleich groß ist. Also wenn

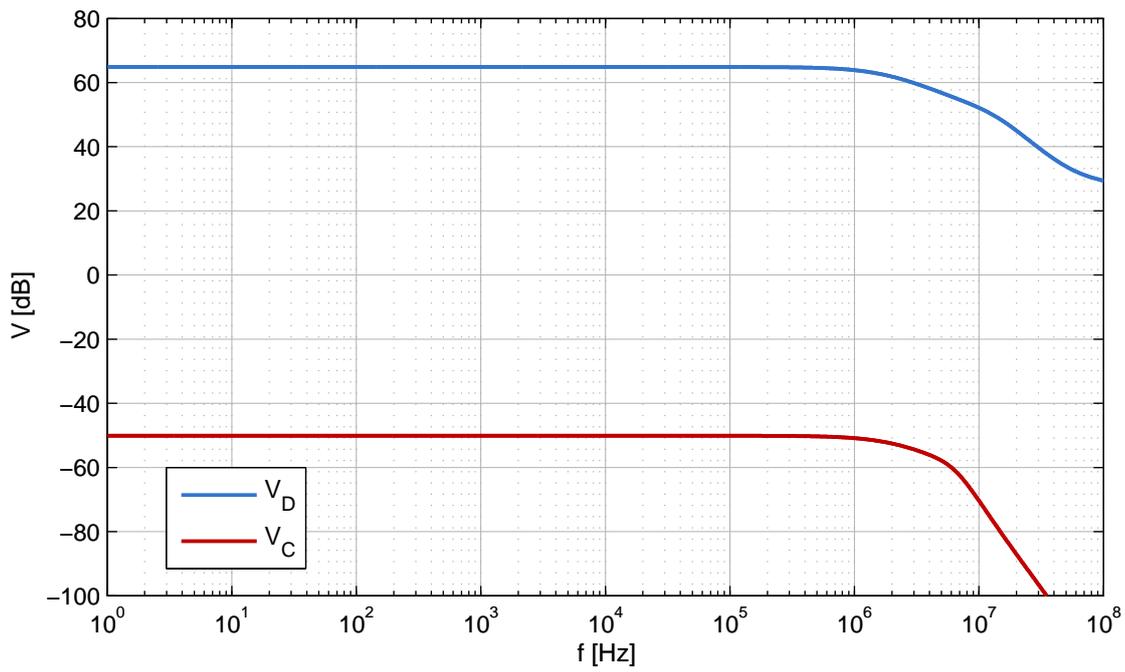


Abbildung 3.12: Simulation des Frequenzganges der äußeren Schleife

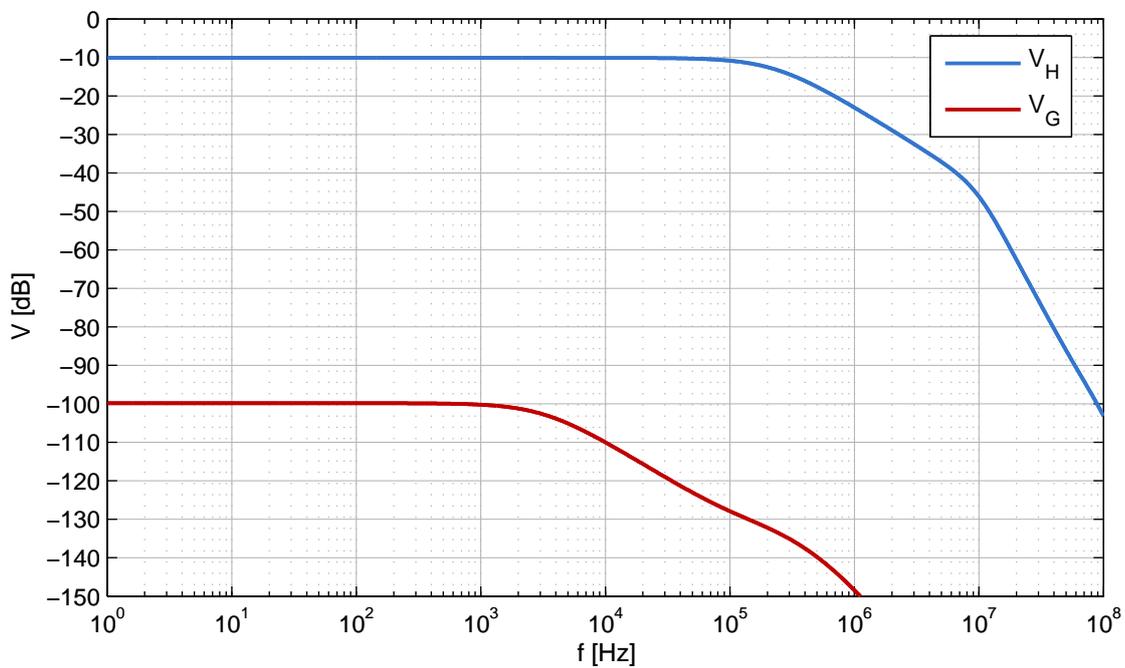


Abbildung 3.13: Simulation des Frequenzganges der inneren Schleife

am Potential der Kathode, für die angelegte externe Spannung, eine Spannung proportional zu einem Widerstand von  $6,7\Omega$  anliegt.

Die Simulation der Frequenzgänge der Blöcke G und H ist der Abb. 3.13 zu entnehmen. Die Ausgangsspannung von IC14B (Block H), hat den 3 dB Abfall bei 232 kHz. Der 3 dB-Abfall von dem Integrator (Block G) liegt bei 3,3 kHz. Die Nachregelung des virtuellen Nullpunktes hat mit diesen Werten optimale Messergebnisse gebracht.

#### 3.4.2 Temperaturregelung

Der Einfluss der Temperatur auf die optische Ausgangsleistung bedingt im Grunde eine Leistungsbegrenzung. Eine steigende Temperatur bewirkt eine Erhöhung des Schwellstroms, die optische Ausgangsleistung hingegen sinkt. Eine Temperaturänderung über einen weiten Bereich kann die Laserdiode zerstören. Daher ist der Betrieb bei konstanter Temperatur empfehlenswert und wird über Thermistoren und thermoelektrische Kühler realisiert.

Die Temperaturregelung der Laserdioden besteht aus zwei Funktionseinheiten, welche in Abb. 3.16 orange markiert sind. Der Block 1 ist für die Auswertung des Thermistors und des Temperatursensors. Die zweite Einheit dient zur Steuerung des thermoelektrischen Kühlers (TEC).

##### 1: Temperaturüberwachung

Der Arbeitstemperaturbereich von LD1550 ist zwischen  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , bei LD1310 befindet sich dieser Bereich zwischen  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Diese Daten sind im Anhang A.1 und A.2 zu finden. Die optimale Arbeitstemperatur von Laserdioden ist schwer zu bestimmen. Grundsätzlich schwingen die Laserdioden in Abhängigkeit der Temperatur auf unterschiedlich Wellenlängen bzw. Moden. Im gesamten Temperaturspektrum einer Laserdiode finden sich mehrere Bereiche, in denen interne Fluktuationen minimal sind. Es macht Sinn, im Rahmen des Aufbaus der Laserdiodenansteuerung, die Temperatur über einen weiten Bereich zu variieren und dabei die Stabilität der Laserdiode zu vermessen. Dann kann eine optimale Arbeitstemperatur für die jeweilige Laserdiode gefunden werden.

Wie im Kap. 3.1.4 erwähnt, existiert im Gehäuse von LD1550 ein Thermistor mit einem NTC-Widerstand. Die Laserdiodenfassung von LD1310 hat keinen Thermistor inkludiert, dafür wurde aber ein Thermistor der gleichen Familie mit gleichen Charakteristiken direkt an das Gehäuse von LD1310 befestigt. Die stark nichtlineare Kurve von NTC-Thermistoren in Abb. 3.5 wird mit Hilfe eines Spannungsteilers in einem Temperaturbereich von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  linearisiert. Die Thermistorspannung in Abhängigkeit der Temperatur ist der Abb. 3.14a zu entnehmen. Eine Spannung von  $0,3\text{ V}$  entspricht einer Temperatur von  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , diese soll nicht überschritten werden. Dafür sorgt ein Komparator im Anschluss. In Abb. 3.15 ist die ganze Schaltung der Temperaturüberwachung etwas anschaulicher dargestellt als im Block 1. Sobald die Thermistorspannung (LASER\_TEMP) die  $0,3\text{ V}$  am +Eingang des Komparators IC27B unterschreitet, wird der Ausgang des Komparators LOW und eine Fehlermeldung wird zum PC gesendet. Weiterhin wird durch den Fehler der Block 2 aktiviert. So lange das Potential LASER\_TEMP größer als  $0,3\text{ V}$  ist, befindet sich der Komparatorausgang auf HIGH und es erscheint keine Feh-

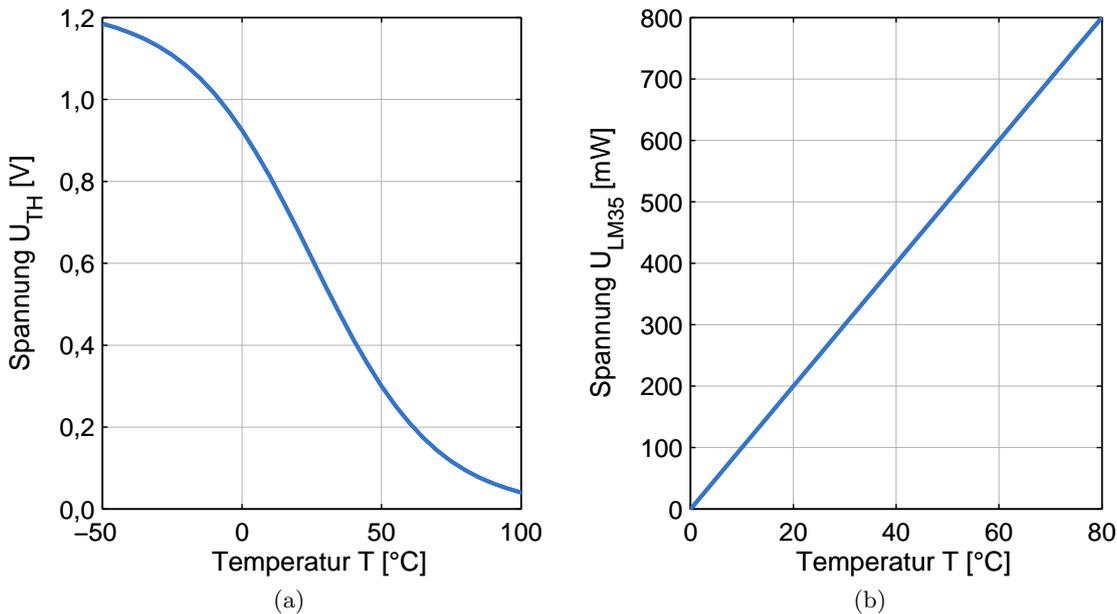


Abbildung 3.14: Berechnete Kennlinien von (a) Thermistor und (b) LM35

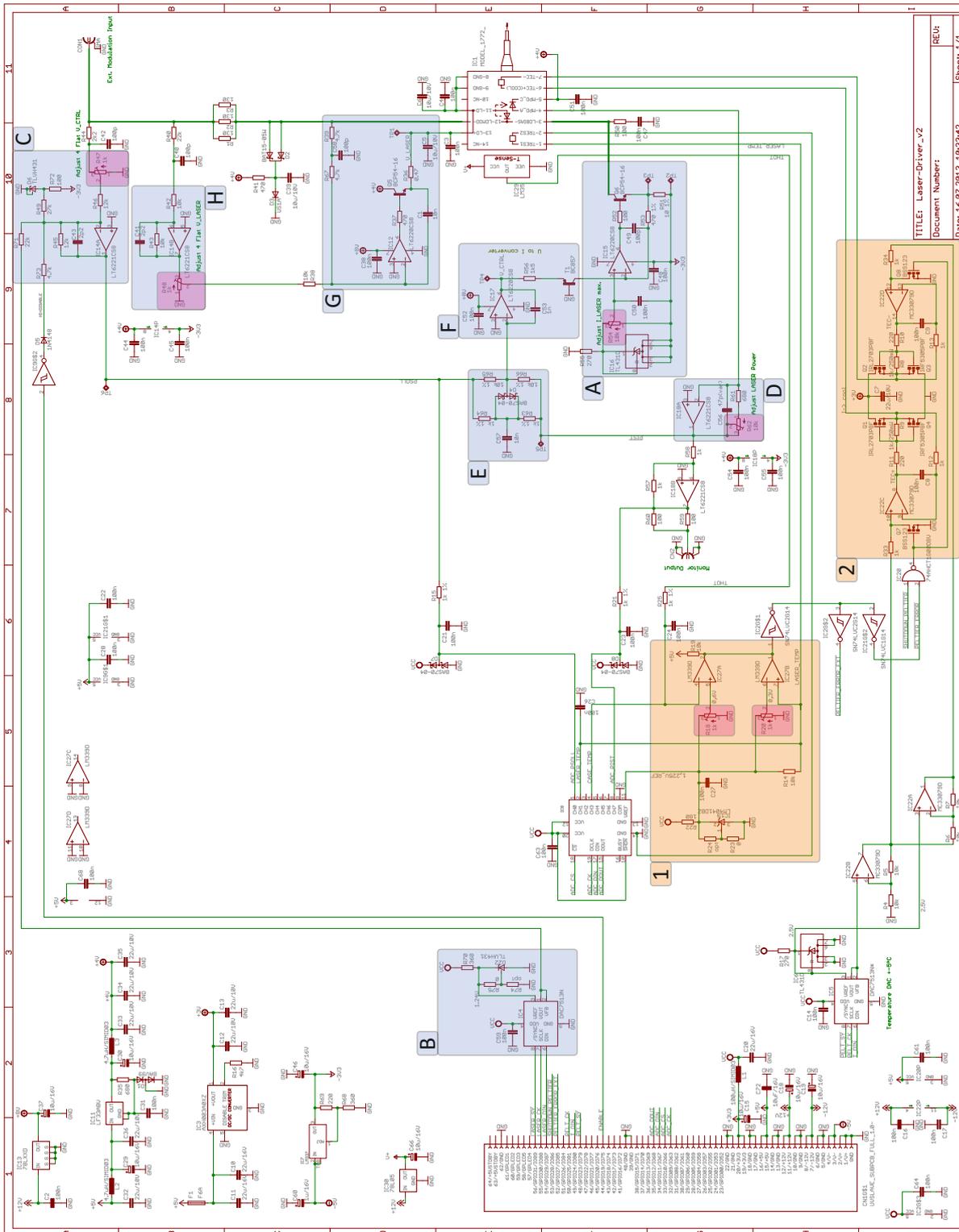
meldung. Die Betriebstemperatur von 25 °C der Laserdioden entspricht 0,6 V (Abb. 3.14a). Die Referenzspannung von 0,3 V am -Eingang des Komparators IC27B wird mit Potentiometer R20 genau eingestellt.

Zur genaueren Überwachung der Temperatur wird zusätzlich noch ein Temperatursensor LM35 für die Temperaturmessung der Laserdiodenfassung verwendet. Die Ausgangsspannung des LM35 ist zur Temperatur linear proportional mit einem Skalierungsfaktor von 10 mV/°C (Abb. 3.14b). Der Sensor ist direkt an das Gehäuse von LD1550 angebracht. Bei LD1310 ist der Sensor auf der warmen Seite von TEC befestigt. Das Prinzip ist gleich wie beim Thermistor, allerdings ist hier kein Spannungsteiler notwendig, da die Spannung der Temperatur direkt proportional ist. Aus diesem Grund wird auch die Ausgangsspannung des Sensors (CASE\_TEMP) zum - Eingang des Komparators IC27A geführt. Wird diese größer als 0,6 V schaltet der Komparator auf LOW und es folgt eine Fehlermeldung. Beide Komparatoren verfügen über einen Open-Collector-Ausgang. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Fehlermeldung mit Hilfe einer Wired-And-Verknüpfung zu verbinden. Vorteilhaft ist dabei, dass die Und-Verknüpfung implizit ist und dadurch Bauteile eingespart werden können.

## 2: TEC-Steuerung

Das Peltier-Element benötigt viel Strom, daher wird es mit einer dualen H-Brücke gesteuert. Leiten Q1 und Q3, so erfolgt eine Kühlung der Laserdiode. Im Gegensatz dazu wird die Laserdiode geheizt, falls Q2 und Q4 leiten. Jedoch muss vermieden werden, dass Q1 und Q4 gleichzeitig leiten, denn das würde einen Kurzschluss der 3 V Spannungsquelle verursachen. Das





REU:  
 Document Number:  
 Date: 16.07.2013 10:33:42  
 Sheet 1/1

Abbildung 3.16: Kompletter Schaltplan der Laserdiodenansteuerung

die Daten vom Mikrocontroller zur Platine der Laserdiodenansteuerung. Im Folgenden werden die Firmware und die Software beschrieben.

#### 3.4.3.1 Firmware

Die Firmware besteht aus mehreren Programmmodulen. Die Module `_Base_Functions`, so wie das Modul `_I2C_Slave_Basic` und `_PI_Controller` wurden von älteren Projekten übernommen. Das erste Modul `_Base_Functions` stellt den Takt auf 32 MHz und beschreibt die Grundfunktionen von Anschlüssen (Ports) und Kontakten (Pins). Um auf die Hardware des Mikrocontrollers zuzugreifen, werden diverse Register gebraucht, was zu einem relativ unübersichtlichen und schlecht lesbaren Quelltext führt. Daher werden in der Header-Datei von `LaserSource1` zunächst alle Ports und die dazugehörigen Pins mit der passenden Richtung, etwas langwierig eingetragen. Jedoch in der Quellcode-Datei von `LaserSource1` werden lediglich die kurzen Funktionsnamen aus dem Modul `_Base_Functions` für die Initialisierung verwendet.

Das Modul `_I2C_Slave_Basic` managet die Kommunikation mit dem Datenbus und dem Master. Weiterhin erlaubt das Modul den Zugriff auf die 16-bit Register, welche in der Header-Datei von `LaserSource1` definiert sind. Die ersten 31 Register stehen nur zum Lesen zur Verfügung, ab 32 können sie auch beschrieben werden.

Die Lese-Register werden für die Berechnungsfaktoren von Temperatur und Leistung der Laserdiode verwendet. Darüber hinaus werden sie außerdem zur Messwerterfassung und Statusabfragen von entstandenen Fehlern benutzt. Die Schreib-Lese-Register werden als Konfigurationsregister und für die Vorgabe der einstellbaren Sollwerte von Temperatur und Leistung, so wie für die Faktoren vom PI-Temperaturregler verwendet. In der Tab. 3.1 sind die Initialwerte der Register zu finden.

Das Modul `_PI_Controller` regelt die Temperatur der Laserdiode. Da ein PID-Regler vor allem bei rauschenden Eingangssignalen eine sehr hohe Schwingungsneigung zeigt, wurde hier lediglich der PI-Regler verwendet. Weiterhin wird eine Anti-windup-Maßnahme benutzt, um das Überschwingen durch den aufintegrierten Regelfehler entgegenzuwirken.

In der Quellcode-Datei von `LaserSource1` werden in der ersten Funktion `Init_Device` alle Anschlüsse, der Takt, die Adresse des Hardware-Moduls und die Register initialisiert. Die zweite Funktion `main` initialisiert zunächst die externen Module und daraufhin die Zähler `TCC0` und `TCC1`. Die Überlaufrate von `TCC0` ist 250 Hz, d.h. alle 4ms wird ein Interrupt ausgelöst. Bei `TCC1` beträgt die Überlaufrate 125 Hz. Danach werden Interrupt-Service-Routinen (`Interrupt Service Routine`, `ISR`) ausgeführt. Die erste `ISR` (`TCC0`) ist die Haupt-Interrupt-Service-Routine. Sie steuert das komplette Modul basierend auf den aktuellen Messwerten und dem Inhalt der internen Register. Mit ihr wird alle 4 ms die komplette Laserdiodenansteuerung aktualisiert. Die `ISR` des Überlaufs von `TCC1` ist zuständig für das verlängerte Blinken der Schreib/Lese-LED. Eine weitere `ISR` wird von dem Hardware-Block der I<sup>2</sup>C-Schnittstelle gestartet sobald eine I<sup>2</sup>C-Übertragung erkannt wurde. Diese verwaltet den kompletten I<sup>2</sup>C-Datenverkehr und bedient den User mit Daten aus den internen Registern, bzw. schreibt Daten des Users in die internen Register.

Register-Parameter	Initialwert	Beschreibung
LASERDAC LDT1310	0x880	$P_{\text{OPT}} = 0,8 \text{ mW}$
LASERDAC LDT1550	0x880	$P_{\text{OPT}} = 10,1 \text{ mW}$
PELTDAC	0x800	$0,61 \text{ V} \hat{=} 25 \text{ }^\circ\text{C}$
P_Fact LDT1310	10	Verstärkungsfaktor vom P-Regler
P_Fact LDT1550	1	Verstärkungsfaktor vom P-Regler
I_Fact	1	Verstärkungsfaktor vom I-Regler
I_Damp	3	Dämpfung des Verstärkungsfaktors vom I-Regler
OutLim	2000	Begrenzung vom PI-Regler
Tset	0x818	$0,62 \text{ V} \hat{=} 24 \text{ }^\circ\text{C}$
Config	0x0000	Laser Aus; Peltier An

Tabelle 3.1: Initialwerte der Register der Laserdiodenansteuerung

Bei der Haupt-ISR wird im ersten Schritt den LEDs die Funktion zugewiesen. Daraufhin werden die ADC-Werte in die Register übernommen. Danach folgt die Regelung des TECs. Anschließend wird kontrolliert, ob ein Temperaturfehler aufgetreten ist. Zum Schluss werden die DACs für TEC und Lasersteuerung gesetzt.

### 3.4.3.2 Software

Mit der grafischen Benutzeroberfläche (Abb. 3.17) lässt sich die Laserdiodenansteuerung einfach über den Computer bedienen. Jede Slave-Platine besitzt eine Adresse, die in der *Setup*-Gruppe eingetragen werden muss. Die Parameter werden erst dann übernommen, wenn die Modul-Adresse auch initialisiert ist.

Mit dem Schieberegler *Laser Bias Current DAC Value* in der *Parameter*-Gruppe wird der Wert vom DAC im Block B (Abb. 3.16) eingestellt. Im Textfeld daneben ist der angegebene DAC-Wert im Hexadezimalsystem ersichtlich. Direkt im unteren Textfeld wird für den eingestellten DAC-Wert die optische Ausgangsleistung errechnet. Diese Berechnung bezieht sich jedoch nur auf den Bias-Wert der optischen Leistung, d.h. am externen HF-Eingang liegt keine Spannung an. Wird eine externe Spannung gewünscht, so ist eine Schätzung der gesamten optischen Ausgangsleistung möglich. Schätzwert aus dem Grund, da die externe Spannung von der Software nicht überwacht wird und diese nur von außen vorgegeben werden kann. Dabei wird zuerst der externe Spannungswert mit dem Schieber *External Voltage on VRF* fiktiv eingestellt. Anschließend wird in den unteren Textfeldern die optische Leistung errechnet. Als Erstes wird allein die optische Ausgangsleistung entsprechend der externen Spannung kalkuliert. Danach wird die gesamte optische Leistung geschätzt, dabei sind die Leistungen vom externen HF-Eingang und vom Bias-DAC inkludiert. Die Temperatur der Laserdiode wird mit dem Schieber *Laser Tset* geregelt. Durch die Aktivierung *Laser Enable* wird der Laser eingeschalten. Mit der Auswahl der Checkbox von *Peltier Driver Shutdown* wird der thermoelektrische Kühler softwaremäßig ausgeschaltet. Die Betätigung der Schaltfläche *Send all values above and update status below* erlaubt die Übernahme aller eingestellten Parameter in die Laserdiodenansteuerung. Darüber hinaus wird der Fehler-Status gelesen und die in der Firmware eingetragenen Konstanten, für

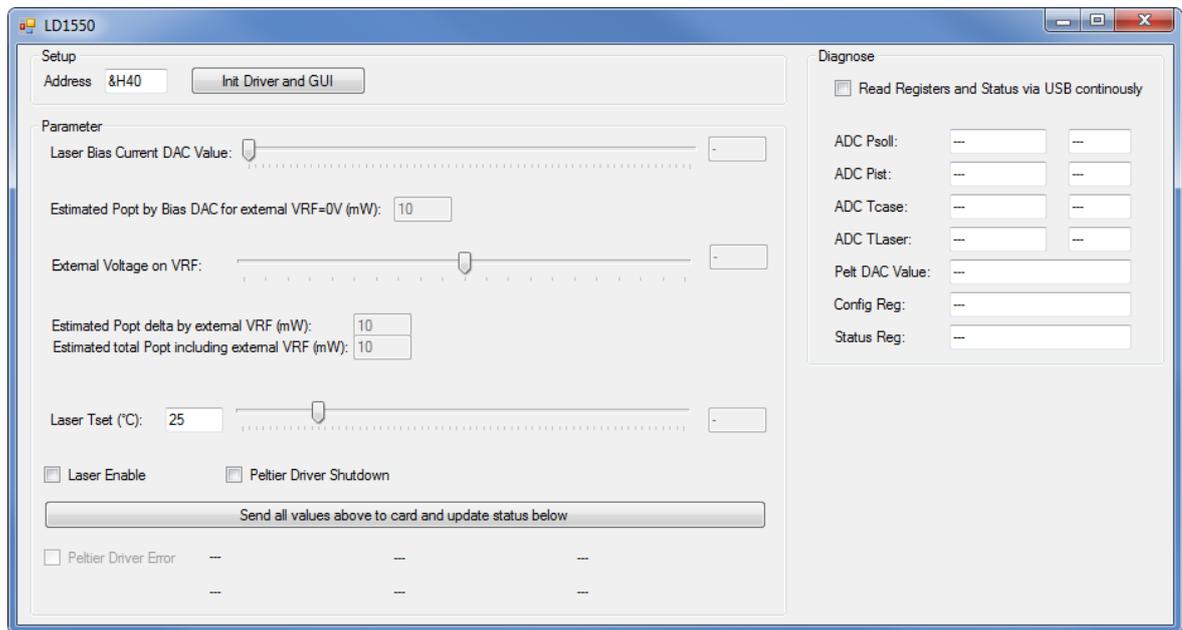


Abbildung 3.17: Benutzerschnittstelle der Laserdiodenansteuerung

die Berechnungen der optischen Ausgangsleistung und der Temperatur, angezeigt. Kommt es zu einem TEC-Fehler (Kap. 3.4.2, Punkt 1), so wird *Peltier Driver Error* automatisch aktiviert. In der Gruppe *Diagnose* werden die aktuellen Werte angezeigt.

## 3.5 Messergebnisse der Laserdiodenansteuerung

### 3.5.1 DC-Ergebnis

In der Abb. 3.18 ist die optische Leistungsmatrix von LDT1310 dargestellt. In der optischen Leistungsmatrix wird in der vertikalen Achse der interne Bias-Punkt (DAC-Wert) variiert und in der horizontalen Achse die extern angelegte Modulationsspannung aufgetragen. Die vertikale Linie bei  $V_{EXT} = 0\text{ V}$  stellt dabei die optische Ausgangsleistung des Moduls ohne extern angelegter Spannung dar.

Es zeigt sich, dass mit dem internen DAC die Leistung in einem weiten Bereich eingestellt werden kann. Der Einstellbereich des DACs geht aber über  $P_{MAX}$  und vor allem über  $P_{MIN}$  ( $P_{OPT} = 0\text{ W}$ ) hinaus. Dies dient dazu, dass auch mit einer extern angelegten Eingangsspannung die Laserleistung in einem weiten Bereich eingestellt werden kann. Damit ist es möglich externe Quellen direkt an das Lasermodul anzuschließen, auch wenn diese Quellen kein mittelwertfreies Signal liefern (z.B. ein externes Logik-Signal mit 0 und  $V_{MAX}$ ).

Weiterhin ist ebenfalls die maximal einstellbare Bias-Leistung von 1,85 mW zu sehen. Im Diagramm zeigt sich auch links unten ( $V_{EXT} = -0,3\text{ V} \hat{=} P_{OPT} = 2,6\text{ mW}$ ), dass durch Anlegen einer

externen Spannung die optische Leistung über den maximalen internen Bias-Punkt gehoben werden kann. Der Anwender muss dabei sicherstellen, dass eine allfällige externe Spannung nicht zur Zerstörung der Laserdiode führt. Eine Zerstörung der Laserdiode alleine durch die interne Leistungsregelung ist nicht möglich.

In Abb. 3.19 ist die Leistungsmatrix von LDT1550, mit der maximalen Bias-Leistung von 25 mW, dargestellt. Es zeigen sich dieselben Gesichtspunkte wie bei der LD1310, wobei die maximale optische Leistung  $P_{\text{OPT}} = 38,8 \text{ mW}$  bei einer externen Spannung von  $V_{\text{EXT}} = -4,5 \text{ V}$  und maximalem internen Bias erreicht wird. Nochmals wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass ein Überschreiten der maximal erlaubten optischen Leistung zur sofortigen Zerstörung der Laserdiode führt.

In den zwei Abbildungen ist unter dem DAC-Wert von etwa 250 keine Leistungsänderung bei Veränderung der internen DAC-Werte feststellbar. Für diesen Knick ist die interne Stromquelle verantwortlich, sie begrenzt den maximalen Laserstrom und die Ausgangsleistung bleibt konstant.

In der Leistungsmatrix der LD1550 zeigt sich, dass ab einem DAC-Wert von etwa 3300 ohne externe Spannung der Schwellstrom  $I_{\text{TH}}$  der Laserdiode erreicht wird. Die optische Leistung sinkt auf 0 W. Sofern der DAC-Wert weiter erhöht wird, sinkt der Strom in der Laserdiode weiter. Dies zeigt sich in der optischen Ausgangsleistung, wenn eine geringe negative externe Spannung angelegt wird und damit in Summe der Strom durch die Laserdiode wieder etwas über  $I_{\text{TH}}$  liegt. Ab einem DAC-Wert von etwas 3850 ist die interne Stromquelle dann bei 0 A angelangt und die optische Ausgangsleistung hängt nur mehr von der extern angelegten Spannung ab. Bei der LDT1310-Leistungsmatrix ist dieser zweite Knick nicht ersichtlich, weil die P-I-Kennlinien der Laserdioden eine etwas unterschiedliche Steigung aufweisen (Abb. 3.3).

Weiterhin kann in diesen Abbildungen die Ansteuerung des Modulationspfades (Kap. 3.4.1.2) kontrolliert werden. Ist das Potentiometer R47 falsch eingestellt, dann laufen die beiden besprochenen Knicke nicht horizontal durch das Diagramm, sondern sind leicht geneigt. Auch wenn die  $50 \Omega$ -Eingangsimpedanz falsch geregelt ist, würden die Knicke eine leichte Steigung aufweisen.

#### 3.5.2 Frequenzgang

Die optische Ausgangsleistung von LD1310 als Funktion der Frequenz ist in Abb. 3.20 dargestellt. Der Frequenzgang wurde mit zwei Geräten aufgenommen. Die Kurven in blau wurden mit einem Netzwerkanalysator der Firma R&S aufgenommen, der bei 10 MHz beginnt und bis maximal 20 GHz misst und für niedrigere Frequenzen mit einem Gerät von HP, der bei 100 kHz beginnt, jedoch bei 3 GHz endet (in rot). Es ist ersichtlich, dass sich die zwei Kurven im Überlappungsbereich gut decken und LD1310 problemlos bis 2 GHz modulierbar ist. Der Peak bei 2 GHz resultiert aus der Relaxationsschwingung der Laserdiode. Eventuell könnte auch bis 3 GHz moduliert werden, wenn eine externe elektrische Frequenzganganpassung mit einem Kompensationselement vorgenommen wird. Der Abfall bei niedrigen Frequenzen ergibt sich durch die untere Grenzfrequenz des Photoempfängers, die etwa 80 kHz beträgt.

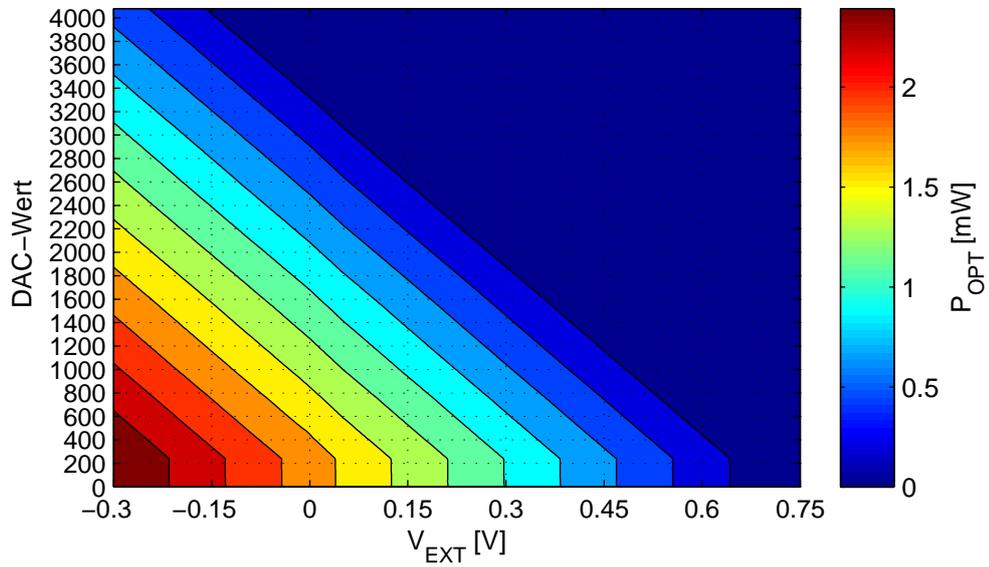


Abbildung 3.18: Gemessene Leistungsmatrix von LDT1310 in Abhängigkeit der Spannungen vom Bias-Pfad (DAC) und Modulationspfad ( $V_{EXT}$ )

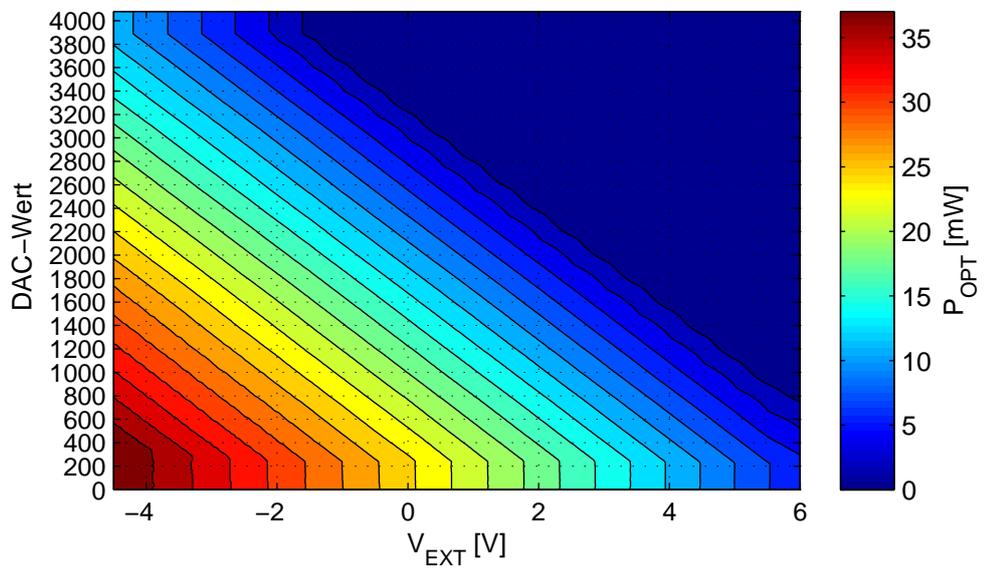


Abbildung 3.19: Gemessene Leistungsmatrix von LDT1550 in Abhängigkeit der Spannungen vom Bias-Pfad (DAC) und Modulationspfad ( $V_{EXT}$ )

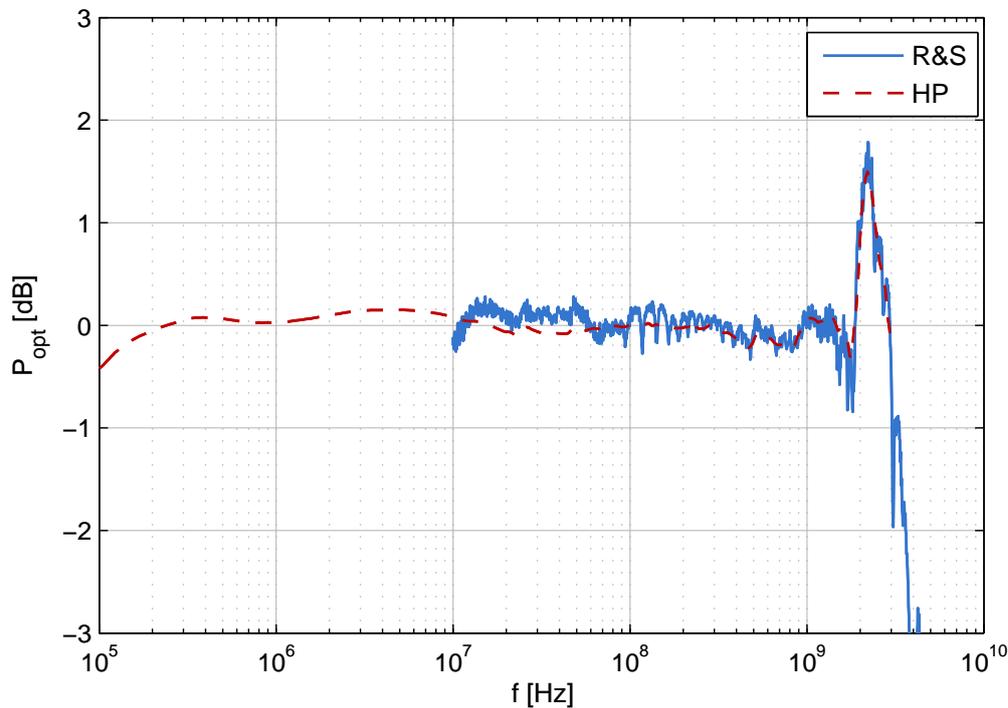


Abbildung 3.20: Gemessener Frequenzgang der direkt modulierten LD1310

Der Frequenzgang von LD1550 ist in Abb. 3.21 gezeigt und wurde nur mit dem langsamen Netzwerkanalysator aufgenommen. Es ist ein linearer Verlauf von 1 MHz bis 200 MHz deutlich zu sehen. Ebenfalls mit einem Kompensationselement könnte LD1550 bis etwa 1 GHz moduliert werden. Bei ca. 400 kHz ist ein Leistungseinbruch und bei 800 MHz eine Leistungspitze zu beobachten. Vor allem der Leistungseinbruch wurde exzessiv untersucht, aber alle Versuche die Beschaltung und Bedämpfung der HF-Leitungen zu verändern, ergaben immer ein identes Verhalten. Der Leistungseinbruch scheint in letzter Konsequenz von dem komplexen internen Aufbau und den parasitären Elementen im inneren des Laserdiodengehäuses herzurühren. Im Datenblatt erkennt man mehrere passive Bauteile im Inneren des Butterfly-Gehäuses, die scheinbar mit weiteren internen Parasiten Resonanzkreise bilden. Basierend auf den Messwerten zeigt sich, dass einfachere Gehäusestrukturen (z.B. TO-Header) grundsätzlich für direkt modulierbare Quellen bessere Frequenzgänge zulassen. Das Butterfly-Gehäuse vereinfacht dramatisch TEC und Temperaturüberwachung der Laserdiode, scheint aber eher für CW- oder nur schmalband modulierte Quellen optimiert zu sein.

### 3.5.3 Augendiagramm

Im Folgenden sind die Augendiagramme der direkt modulierten Laserdioden zu sehen, mit denen die Qualität einer Datenübertragung bewertet werden kann. In der ersten Abb. 3.22 ist das Augendiagramm von LD1310, bei einer Übertragungsgeschwindigkeit von 1 Gbit/s, darge-

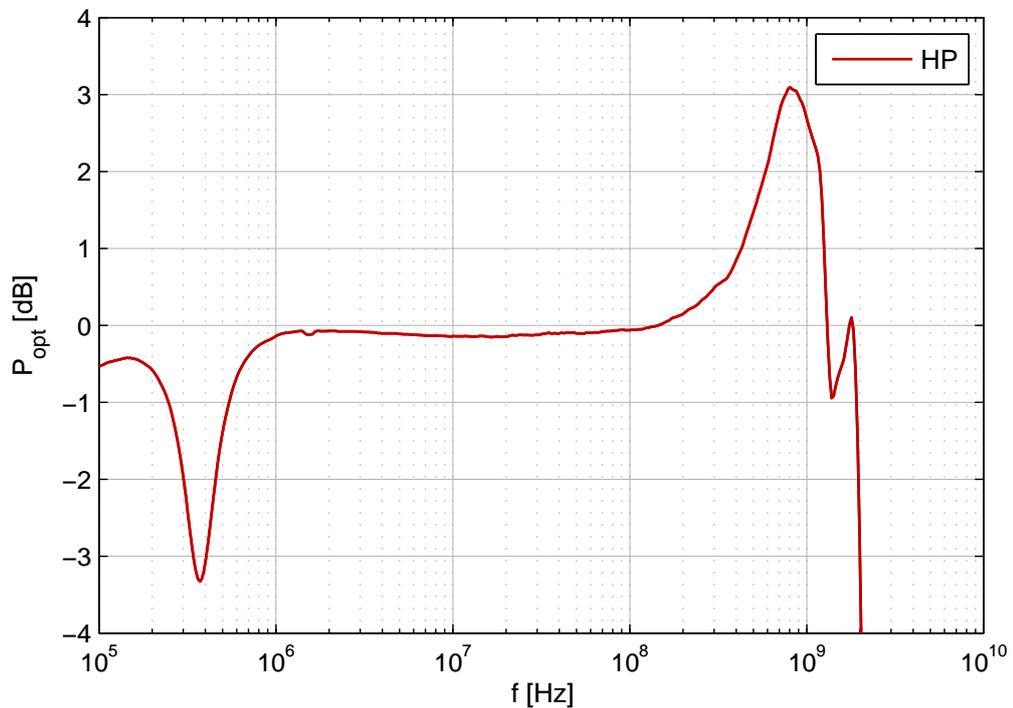


Abbildung 3.21: Gemessener Frequenzgang der direkt modulierten LD1550

stellt. Wie zu sehen ist, ist das Auge vollkommen offen und die Datenrate von 1 Gbit/s kann problemlos übertragen werden. Die Abbildung wurde mit DC-Kopplung aufgenommen und es kann links beim Marker M1 die Nulllinie der optischen Leistung erkannt werden. Es zeigt sich, dass in diesem Fall das Extinktionsverhältnis (ER) niedrig gewählt wurde, der Arbeitspunkt liegt bei etwa 2,2 mW. Die maximale Leistung liegt bei 2,87 mW, die minimale bei 1,63 mW. Der Laser wird in diesem Betrieb nie komplett ausgeschaltet, dadurch kann eine sehr hohe Geschwindigkeit direkt moduliert übertragen werden.

In Abb. 3.23 wurde die Übertragungsgeschwindigkeit auf 3 Gbit/s erhöht. Die Darstellung ist in diesem Fall AC-gekoppelt um das Auge deutlicher darzustellen. Selbst bei der für direkte Modulation hohen Geschwindigkeit ist das Auge noch deutlich offen und eine Datenübertragung gut möglich. Erst bei einer weiteren Erhöhung auf 6 Gbit/s zeigt sich eine deutliche Verschlechterung des Auges (Abb. 3.24).

Wenn das ER erhöht wird, so kommt es zu Relaxationsschwingungen in der Laserdiode (Abb. 3.25). In diesem Fall wurde im Vergleich zu Abb. 3.22 der Arbeitspunkt auf 1,2 mW gesenkt. Die minimale Leistung ist bei 0,4 mW und die logische „1“ befindet sich bei 2,3 mW. Eine Datenübertragung ist auch in diesem Fall möglich, allerdings ist das starke Überschwingen für den Empfänger problematisch. Die Relaxationsschwingungen des Lasers sind auch im Rechteckverlauf in Abb. 3.26 gut zu erkennen. Da die Relaxationsschwingungen für die steigende bzw. fallende Flanke sich unterschiedlich stark auswirken, ist eine einfache Kompensation eines

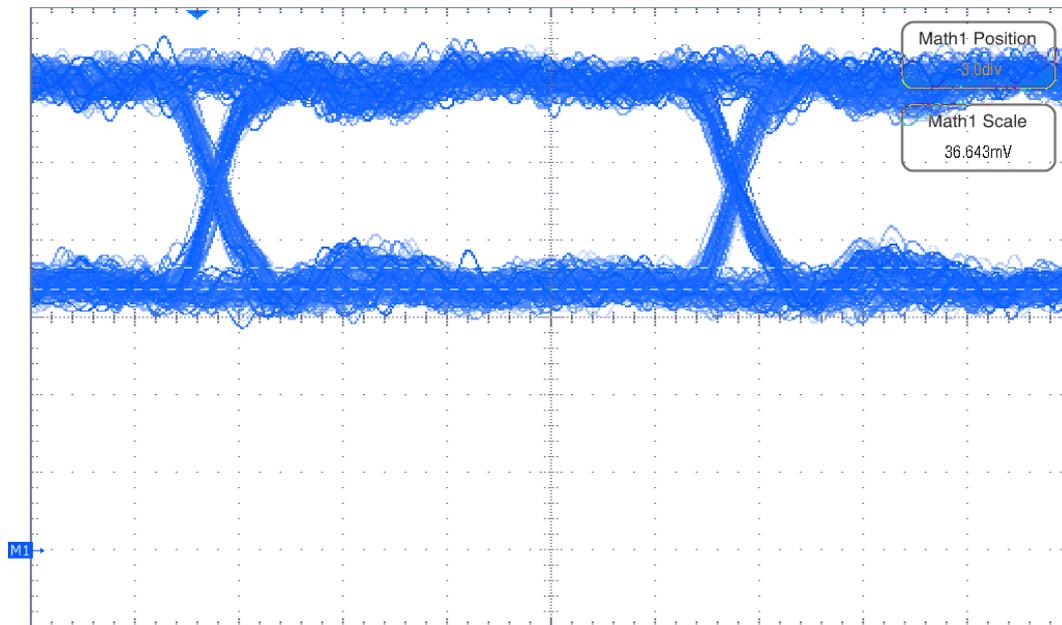


Abbildung 3.22: DC-Auge der direkt modulierten LD1310 bei einer Datenrate von 1 Gbit/s

Frequenzganges nur sehr begrenzt möglich. Sollten direkt modulierte Messungen mit einem sehr hohen ER notwendig sein und dabei Relaxationsschwingungen nicht tolerierbar sein, dann muss auf einen anderen Laser gewechselt werden.

Die Abb. 3.27 zeigt das Augendiagramm von LD1550 bei einer Übertragungsgeschwindigkeit von 350 Mbit/s. Der Arbeitspunkt liegt bei 16,7 mW und der externe Modulationshub beträgt 1 V. Es zeigt sich, dass eine Datenübertragung problemlos möglich ist, wobei auch hier das ER sehr gering ist. Die im Labor verfügbaren Bitmuster generatoren haben allerdings eine typische maximale Ausgangsamplitude von 1 V. Für Messungen mit deutlich höherem ER sind für diese Laserdiode externe Spannungsverstärker zur Signalanpassung notwendig.

Basierend auf dem nicht perfekt flachen Frequenzgang der LD1550 ist zu erwarten, dass Augendiagramme mit einem sehr hohen Bandbreitenbedarf schlechtes Verhalten zeigen.

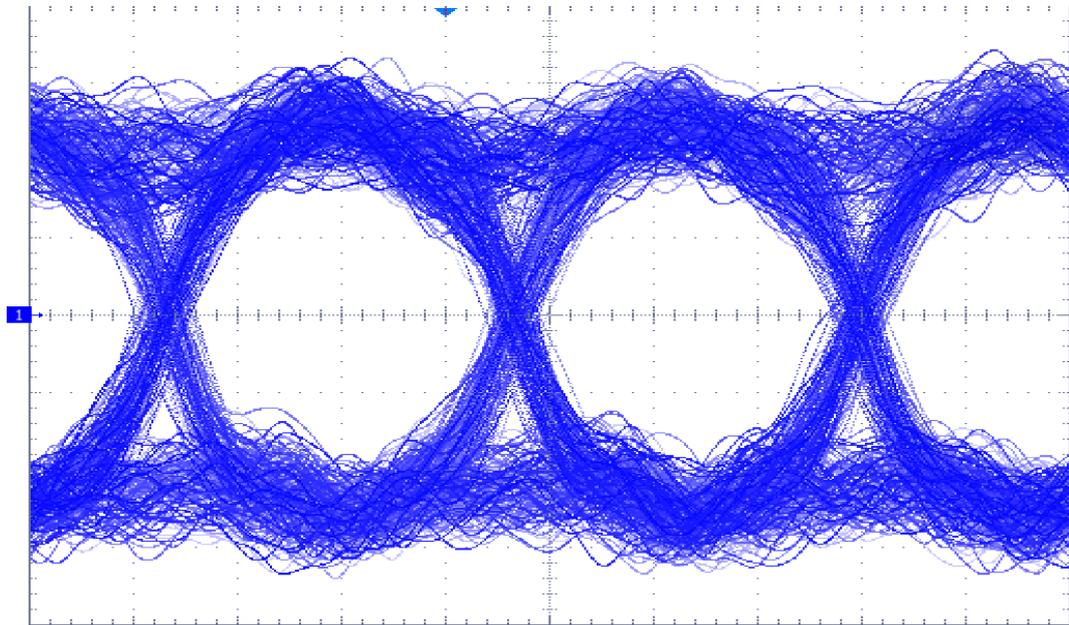


Abbildung 3.23: AC-Auge der direkt modulierten LD1310 bei einer Datenrate von 3 Gbit/s

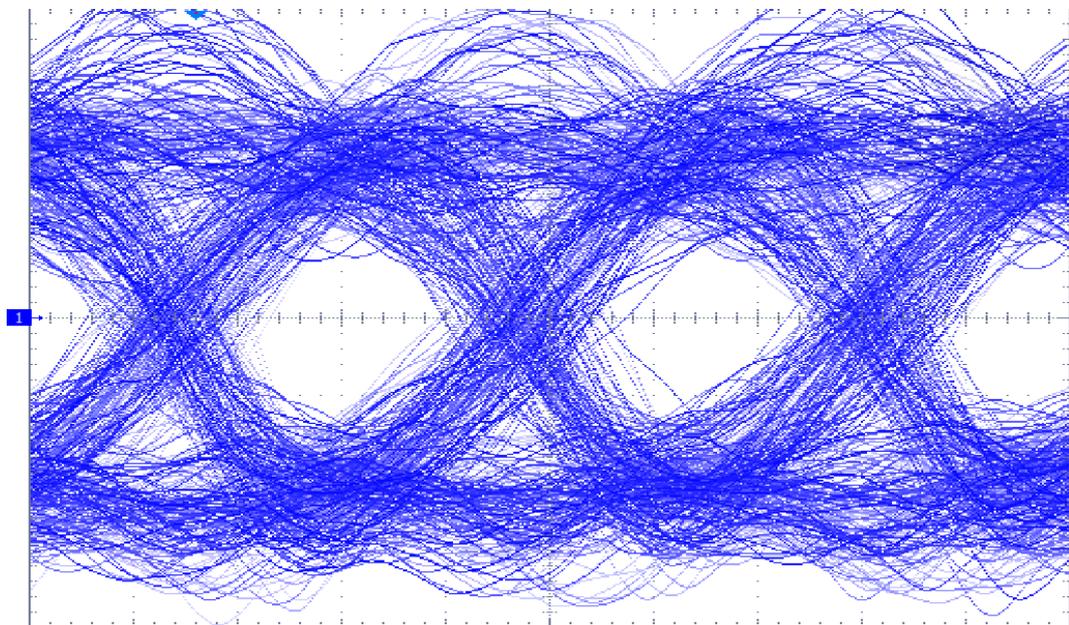


Abbildung 3.24: AC-Auge der direkt modulierten LD1310 bei einer Datenrate von 6 Gbit/s



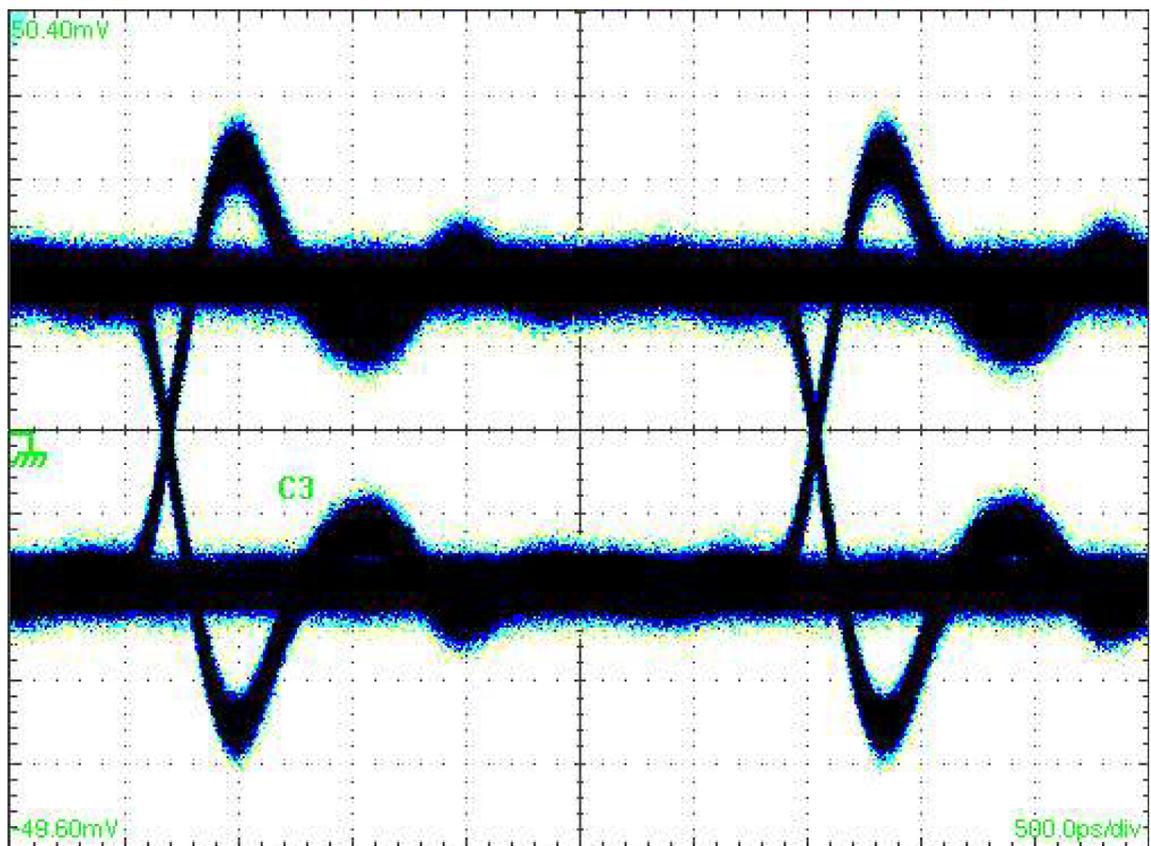


Abbildung 3.27: AC-Auge der direkt modulierten LD1550 bei einer Datenrate von 350 Mbit/s

## 4 Modulation

Wie im Kapitel 3.3 beschrieben, eignet sich die direkte Modulation von Laserdioden nicht für hohe Datenraten (10 Gbit/s oder höher). In diesem Fall wird die Laserdiode im CW-Modus betrieben und dahinter ein externer Modulator verwendet.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten das Licht extern zu modulieren. In dieser Arbeit wird ein Intensitätsmodulator mit Mach-Zehnder-Struktur verwendet (Abb. 4.1a). Vereinfacht dargestellt, funktioniert dieser wie ein Schalter, welcher entweder das Licht durchlässt oder abblockt. Das Ein- und Ausschalten erfolgt durch die Interferenz von optischen Feldern. Diese setzt eine Phasenkorrelation voraus. Bei vollständig korrelierter Phase stellt sich eine konstruktive Interferenz und bei unkorrelierter Phase eine destruktive Interferenz ein. In einem Mach-Zehnder-Interferometer werden zwei phasenkorrelierte Felder durch Aufteilung eines Lichtstrahls an einem Wellenleiterkoppler auf zwei Zweige realisiert. Die optische Leistung wird zuerst mit gleicher Amplitude auf die beiden Zweige aufgeteilt und über die Wellenleiter weitergeführt. Unter Nutzung des linearen elektrooptischen Effekts in den Zweigen des Interferometers kommt es zu einer Phasendifferenz der beiden Wellen und somit zu einer Änderung der Intensität in den beiden Ausgängen des zweiten Wellenkopplers. Der prinzipielle Aufbau des Mach-Zehnder-Modulators (MZM) ist in Abb. 4.1a dargestellt. Dieser wird in einem elektrooptischen Material, in diesem Fall in Lithiumniobat ( $\text{LiNbO}_3$ ), ausgeführt, in welches ein Titan-Wellenleiter eindiffundiert ist. Durch das Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes an integrierte Elektroden, ändert sich der Brechungsindex des Dielektrikums, und damit die Phase der Welle.

In der vorliegenden Arbeit kommen zwei Mach-Zehnder-Modulatoren zum Einsatz, mit verschiedenen Modulationsgeschwindigkeiten. Der langsame MZM mit einer maximalen Datenrate von 10 Gbit/s arbeitet auf einer Wellenlänge von 1310 nm, während der schnelle MZM eine maximale Übertragungsgeschwindigkeit von 40 Gbit/s, bei einer Wellenlänge von 1550 nm, besitzt. Im Folgenden werden die Modulations-Module mit einer Datenrate von 10 Gbit/s (MD10) und mit einer Datenrate von 40 Gbit/s (MD40) näher erläutert.

### 4.1 Eigenschaften

Für die Modulatoransteuerung ist eine der wichtigsten Eigenschaften die Übertragungskennlinie des MZMs. Diese beschreibt eine kosinusförmige Funktion (Abb. 4.1b). Idealerweise wird der Modulator symmetrisch betrieben, mit dem Arbeitspunkt im Punkt B, denn so kann die gesamte optische Leistung durchgeschaltet (Punkt C) oder komplett unterdrückt (Punkt A) werden. Die maximale Leistung wird dann durchgelassen, wenn die Phasendifferenz ein Vielfaches von  $2\pi$  ist.  $U_\pi$  gibt die Spannung, bei welcher die maximale Auslöschung der Leistung auftritt. Die

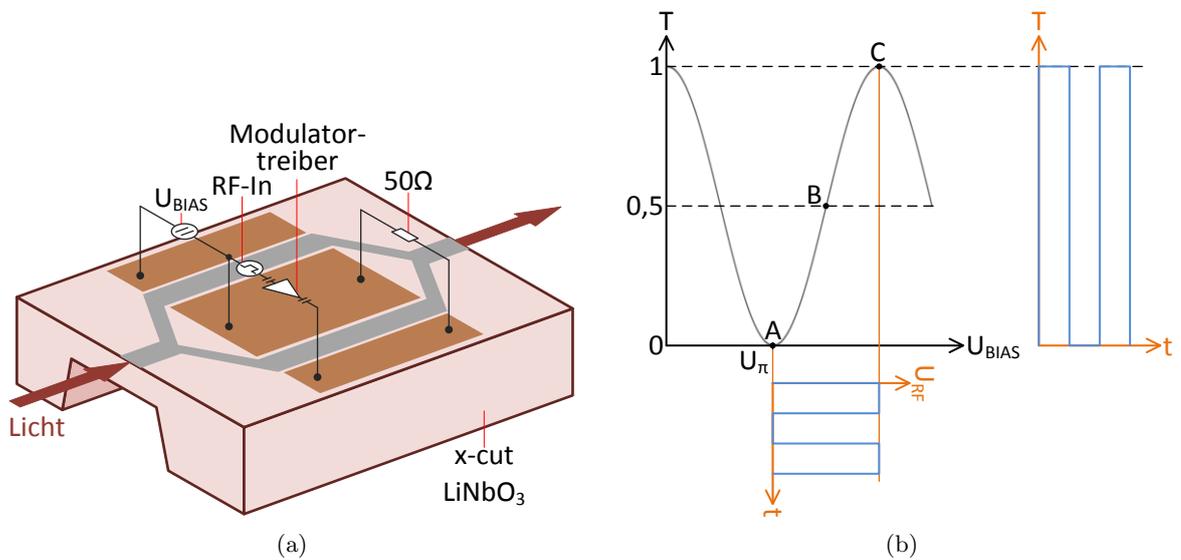


Abbildung 4.1: Mach-Zehnder-Modulator (a) Schematische Darstellung und (b) Übertragungskennlinie

Wahl des Arbeitspunktes ist bedeutend für das Extinktionsverhältnis. In der Symmetrischen Anordnung lässt sich das maximale ER erreichen. Weiterhin muss für lineare bzw. analoge Ansteuersignale die Nichtlinearität der Kennlinie beachtet werden. Der Arbeitspunkt wird mit der Spannung  $U_{\text{BIAS}}$  eingestellt.

## 4.2 Modulatoransteuerung

Beide MZM-Modulatoren haben einen Anschluss für die Biasspannung, um den Arbeitspunkt einzustellen und einen HF-Eingang, an den der Modulatortreiber angeschlossen wird (Abb. 4.1). Typischerweise werden Modulatoren mit Spannungen in mehreren Volt-Bereich moduliert. Da gängige Signalquellen im hohen GHz-Bereich nur Ausgangsspannungen kleiner als 1 V erreichen, ist der Einsatz einer HF-Spannungsverstärkerschaltung nötig. Diese sogenannten Modulatortreiber, verstärken ein Eingangssignal um 20 dB bis 30 dB und haben dabei eine Bandbreite im 2-stelligen GHz-Bereich. Die beiden Modulatortreiber haben zusätzliche Parameter die über externe Steuerspannungen eingestellt werden können. Zum einen kann der Nullpegel des Eingangssignals mit der Symmetrie-Spannung  $V_{\text{XP}}$  definiert werden. Damit kann der zeitliche Kreuzungspunkt (bzw. das Tastverhältnis) eines Datensignals, das endliche steile Flanken aufweist eingestellt werden. Zum anderen kann die Gesamtverstärkung mit  $V_{\text{AMP}}$  bzw.  $V_{\text{C}}$  eingestellt werden. Die Ansteuerschaltungen der schnellen und der langsamen Modulationsmodule sind verschieden, unterscheiden sich im Prinzip aber nicht. Im Folgenden wird näher auf die beiden Ansteuerungen eingegangen.

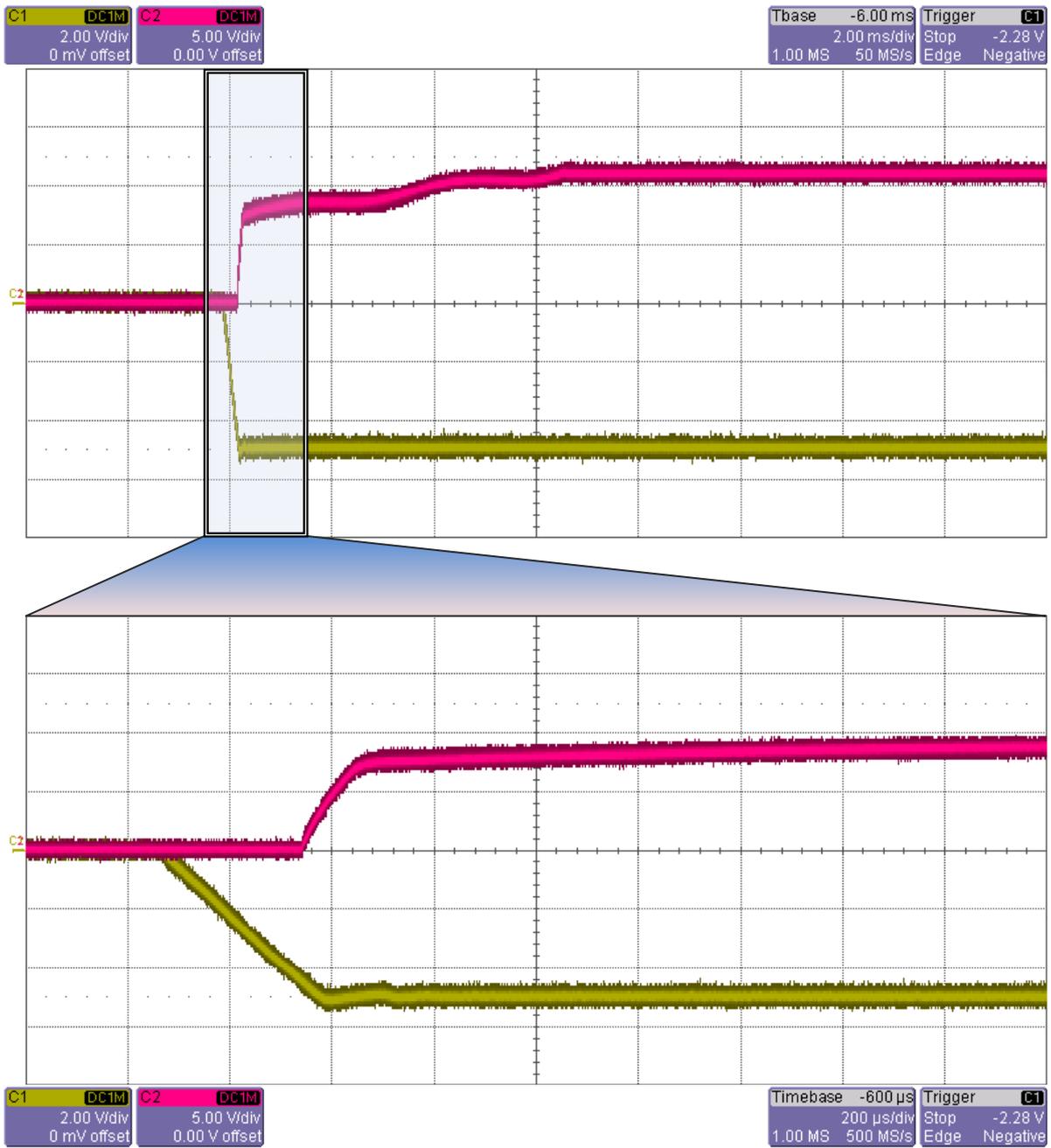


Abbildung 4.2: Gemessenes Einschaltverhalten der Versorgungsspannungen von MD10

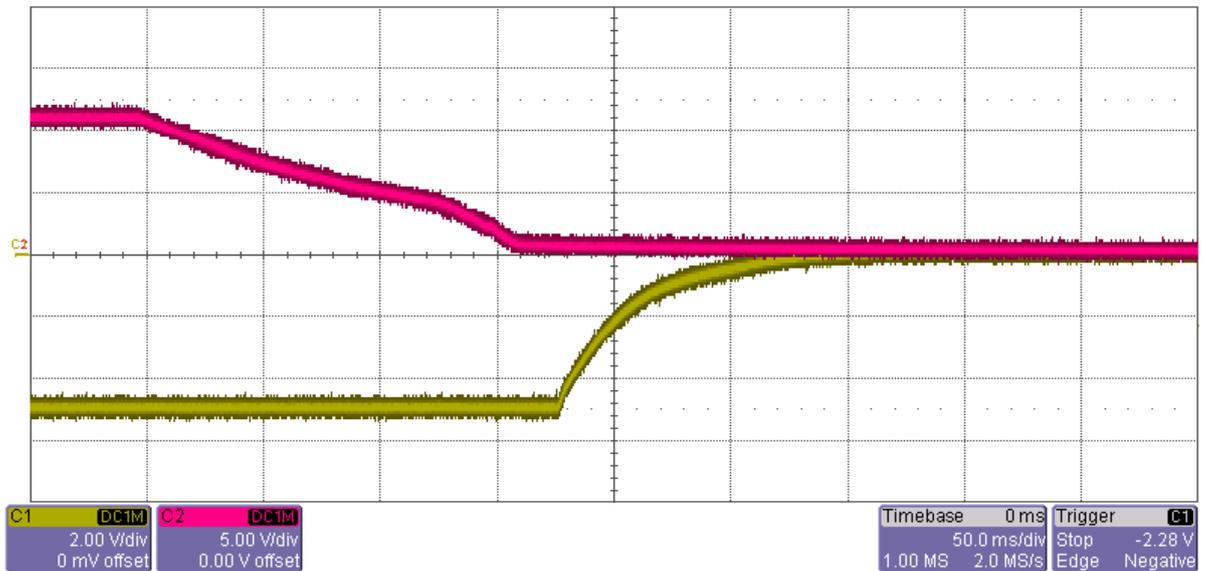


Abbildung 4.3: Gemessenes Ausschaltverhalten der Versorgungsspannungen von MD10

### Ansteuerung des 10 Gbit/s Modulators

Der Schaltplan der langsamen Modulation MD10 ist in Abb. 4.5 zu finden. Die Einstellung der Biasspannung des MZMs erfolgt per Software über einen DAC. Durch einen nichtinvertierenden Verstärker IC6A werden die Grenzen des erlaubten Spannungsbereichs festgesetzt. Diese können dem Datenblatt (Anhang A.3) entnommen werden. Der Modulatortreiber benötigt laut dem Datenblatt (Anhang A.4) zwei Versorgungsspannungen. Die Versorgungsspannung von  $-5\text{ V}$  muss vor der zweiten Versorgungsspannung von  $11\text{ V}$  anliegen. Daher ist eine Einschalt-Logik vorgesehen. Der Komparator IC3A schaltet erst dann den Ausgang vom OPV auf HIGH, wenn die Versorgungsspannung mehr als  $-4,5\text{ V}$  erreicht. Dadurch wird der Transistor T2 leitend und der Low-Drop-Spannungsregler IC12 wird eingeschaltet, wodurch am Ausgang nun  $11\text{ V}$  anliegen. Das Einschaltverhalten der Versorgungsspannung ist in der Abb. 4.2 dargestellt. Im oberen Bild stellt die rosa Kurve die  $11\text{ V}$  dar und die grüne die  $-5\text{ V}$ . Das untere Bild zeigt das Einschaltverhalten in etwas größerer zeitlicher Auflösung und es ist ersichtlich, dass die positive Versorgung erst beim Erreichen von  $-4,5\text{ V}$  der negativen Versorgung eingeschaltet wird. Das gewünschte Ausschaltverhalten ist der Abb. 4.3 zu entnehmen. Die negative Versorgungsspannung (in grün) beginnt erst dann zu sinken, wenn die  $11\text{ V}$  (in rosa) auf  $0\text{ V}$  abgefallen sind.

Die Regelung von  $V_{XP}$  erfolgt in gleicher Weise wie die Regelung der Biasspannung des Modulators, lediglich der Spannungsbereich unterscheidet sich. Die Spannungsgrenzen von  $V_C$  werden mit einem invertierenden Verstärker IC6B geregelt und die Grenzen der Biasspannung des Modulatortreibers werden mit einem Differenzverstärker IC9B eingehalten.

### Ansteuerung des 40 Gbit/s Modulators

Der Schaltplan 4.6 der schnellen Modulation MD40 enthält im Unterschied zur langsamen

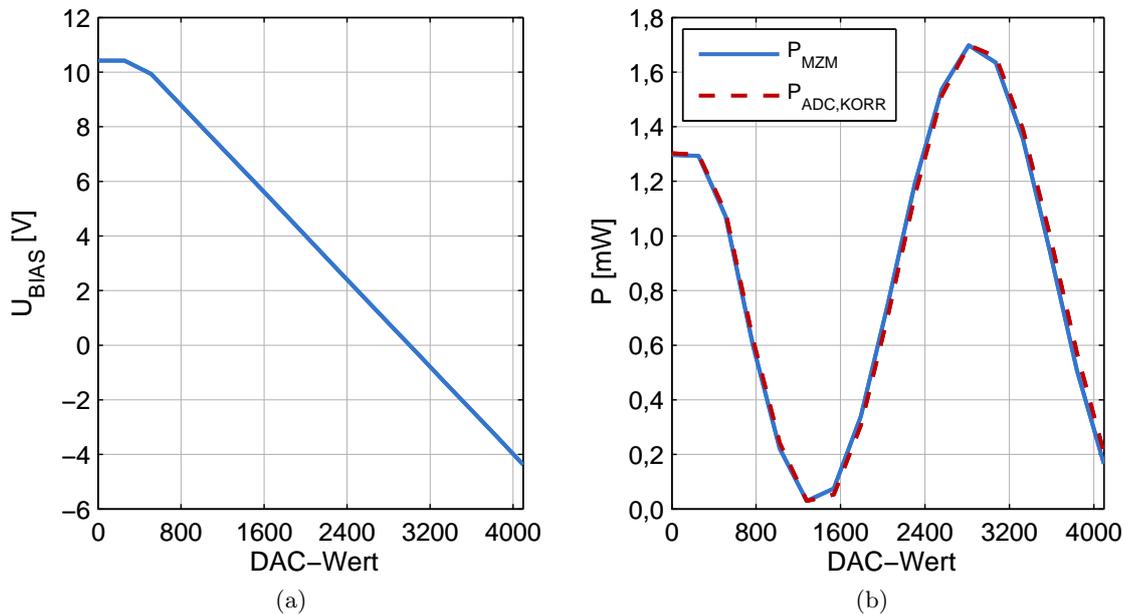


Abbildung 4.4: Gemessene MD40-Kennlinien von (a) Biasspannung und (b) optischer Ausgangsleistung

Modulation eine Leistungsüberwachung, denn der 40 Gbit/s Modulator besitzt eine interne Photodiode. Der Photostrom wird mit dem Verstärker IC10A verstärkt und über einen ADC (*Analog-to-Digital Converter*, ADC) IC11 mit der entsprechenden Software ausgewertet. Die Biasspannung des 40 Gbit/s Modulators wird ebenfalls per Software über einen DAC eingestellt und mit einem Differenzverstärker IC17A werden die Spannungsgrenzen laut dem Datenblatt (Anhang A.5) eingehalten. In Abb. 4.4a wurde die Biasspannung in Abhängigkeit der DAC-Werte gemessen. Im Bereich unter einem DAC-Wert von  $0 \times 200$  flacht die Biasspannung ab, aufgrund von OPV IC17A. Die Abb. 4.4b zeigt die optische Ausgangsleistung des MZMs in Abhängigkeit der DAC-Werte der Biasspannung. Dabei wurde einmal mit der internen Photodiode gemessen ( $P_{\text{ADC}}$ , in rot) und zugleich am Ausgang des Modulators extern aufgenommen ( $P_{\text{MZM}}$ , in blau). Die interne Photodiode am zweiten Pfad des Ausgangskopplers sieht die verbleibende Intensität. Bei einer hohen Ausgangsleistung ist die Lichtleistung an der internen Diode niedrig, bzw. umgekehrt. Durch eine einfache lineare Transformation kann damit gut die Leistung am optischen Ausgang ermittelt werden, was Abb. 4.4b zeigt.

Ebenfalls über einen DAC werden die Spannungen des Modulatortreibers  $V_{\text{XP}}$  und  $V_{\text{AMP}}$  eingestellt, wobei der maximale Spannungsbereich (Anhang A.6) über Referenzquellen festgelegt wird. Weiterhin können diese Spannungen auch manuell per Potentiometer in der Frontplatte verstellt werden, um einen Betrieb des Moduls auch ohne Software und Ansteuerung zu ermöglichen. Für die Umschaltung zwischen manueller- und Software-Steuerung dient ein Multiplexer IC2. Ohne Steuersignale von einem PC startet das Modul nach einem Reset im manuellen Modus.





Register-Parameter	Initialwert	Beschreibung
VC	0x0000	0 V
VXP	0x0800	0 V
VBIAS	0x0000	0 V
VBIASDR	0x0800	0,3 V
Config	0x0001	Kontinuierliche Aktualisierung

Tabelle 4.1: Initialwerte der Register von MD10

### 4.2.1 Computergestützte Steuerung

Die Kommunikation des Masters mit dem Slave und retour basiert wie bei der Laserdioden-ansteuerung (Kap. 3.4.3) ebenfalls auf dem I<sup>2</sup>C-Datenbus. Da die Slave-Platinen dieser zwei Hardware-Module identisch aufgebaut sind, haben die Firmware und die Software genauso identische Grundstrukturen, welche nun im Einzelnen kurz erläutert werden.

#### 4.2.1.1 Firmware

Die Firmware der beiden Modulatoransteuerungen verwendet ebenfalls die gleichen Module, `_Base_Functions` und `_I2C_Slave_Basic`, auf die schon im Kap 3.4.3.1 näher eingegangen wurde, daher wird hier gleich der Quellcode besprochen.

#### Quellcode von MD10

Der Unterschied im Quellcode von `MD10Gbps` zu `LaserSource1` ist zunächst die Überlaufrate des Zählers `TCC0`, diese beträgt 1 kHz. `TCC0` ist auch hier die Haupt-ISR.

In der Haupt-ISR werden zunächst die LEDs beschrieben, daraufhin werden die DACs aktualisiert. Die DACs können jedoch kontinuierlich, d.h. jede Millisekunde, oder nur einmalig aktualisiert werden. Der Grund für eine nicht-kontinuierliche Aktualisierung der DACs ist ein minimales Rauschen an den DAC-Ausgängen während der DAC-Aktualisierung. Typischerweise werden die Parameter der Modulatoren statisch gesetzt und bleiben während eines Messaufbaus oft konstant. In diesem Fall kann die Aktualisierung der DACs abgeschaltet werden. Die geringen aber messbaren Störungen der Modulatorsteuersignale durch die Digitallogik werden damit komplett eliminiert. Beim kontinuierlichen Update ist das erste Bit vom Register `REG_CONFIG` gesetzt, ansonsten findet kein Update statt. Im Gegensatz dazu muss beim einmaligen Update das zweite Bit von `REG_CONFIG` gesetzt werden. Damit werden die DACs einmal aktualisiert und die Software löscht automatisch wieder das zweite Bit des Konfigurationsregisters. In der Tab. 4.1 befinden sich die Initialwerte der Register.

#### Quellcode von MD40

Da die in der Hardware von MD40 eine Leistungsüberwachung integriert ist, besteht die Möglichkeit einer automatischen Kalibrierung der Bias-Spannung des MZMs. Die Kalibrierung

erfolgt in einem Unterprogramm `CalibrateVBias`.

Für eine erfolgreiche Kalibrierung muss ein stabiles optisches CW Eingangssignal mit ausreichender Leistung (8 mW) am Eingang des Modulators angelegt werden. Im ersten Schritt werden das Minimum und das Maximum der Ausgangsleistung gesucht. Die Suche beginnt bei einem DAC-Wert `0x200` entspricht  $V_{\text{BIAS,MAX}} = 9,94 \text{ V}$  und geht bis `0xFFF` äquivalent zu  $V_{\text{BIAS,MIN}} = -4,38 \text{ V}$  (Abb. 4.4). Unter `0x0200` hat der DAC keine Funktion. Dabei wird der Routine `SetVBiasDAC` die Bias-Spannung vom MZM übergeben und daraufhin wird die zugehörige Leistung der Photodiode von der Routine `ReadADC` übernommen. Falls die eben besprochene Suche kein Ergebnis liefert, wird als folgende Maßnahme eine Fehlerbehandlung durchgeführt. Es wird kontrolliert, ob die gefunden minimalen und maximalen Werte überhaupt vorhanden sind oder die Lichtquelle überhaupt eingeschaltet ist. Der Fehler wird dann ausgegeben, wenn der Hub ( $P_{\text{MAX}} - P_{\text{MIN}}$ ) kleiner als ca.  $60 \text{ mW} \hat{=} 0x100$  ist. Falls die Suche erfolgreich war, wird sofort der mittlere Leistungswert berechnet.

Nach dieser Suche stehen die Werte für die minimale und die maximale Leistung fest. Die dazugehörigen Bias-Spannungen sind jedoch unbekannt. Zweitens ist es ungewiss, ob der Mittelwert auf der fallenden oder steigenden Flanke der optischen Leistung ist. Diese Fälle werden im zweiten Schritt behandelt.

Im zweiten Schritt wird zuerst nach dem entsprechenden DAC-Wert für die Bias-Spannung gesucht. Es wird überprüft, ob sich der schon gefundene Leistungsmittelwert `Mean_ADC` mit dem aktuellen ADC-Wert deckt. Ist eine Übereinstimmung gefunden, wird die dazugehörige  $V_{\text{BIAS}}$  in `VBiasDAC_Min` abgespeichert und `FoundFirst` auf `TRUE` gesetzt. Wurde kein Leistungsmittelwert in dem gesamten DAC-Bereich gefunden, so wird lediglich der Ausgangswert für  $V_{\text{BIAS}} \hat{=} 2100$  übergeben und ein Fehler ausgegeben. Es besteht aber die Möglichkeit, dass der Leistungsmittelwert gefunden wurde, sich jedoch am Ende des DAC-Bereichs ( $4095 = 0xFFFF$ ) befindet. So lange der ermittelte DAC-Wert größer oder gleich `0xFFFF - 0x100` ist, wird ein Fehler gemeldet. Diese Fehlerbehandlung ist für den Suchalgorithmus der positiven Flanke wichtig. Sind keine Fehler bei der Suche nach dem entsprechenden DAC-Wert für die Bias-Spannung aufgetreten, so kann die Suche nach der positiven Steigung erfolgen. Dabei soll beachtet werden, dass das optische Signal den Schwankungen bzw. dem Rauschen unterliegt. Somit wird noch einmal ab dem gefundenen Leistungsmittelwert `0x100` DAC-Schritte weitergesucht und der Leistungsmittelwert mit der aktuellen Leistung verglichen. Ist in den `0x100` DAC-Schritten die aktuelle Leistung größer als der Leistungsmittelwert, dann ist die positive Steigung gefunden. Der Bereich von `0x100` wurde deshalb so groß gewählt, damit sich die oben erwähnten Schwankungen des optischen Signals nicht auswirken. Damit wurde die optimale Bias-Spannung des Modulators basierend auf dem obigen Algorithmus gefunden und auch gleichzeitig eingestellt.

In der Funktion `main` ist die Überlaufrate von `TCC0` auf `500Hz` eingestellt und von `TCC1` ist diese gleich geblieben, wie bei Quellcode von `MD10` oder `LaserSource1`. Auch in der Haupt-ISR von `MD40` kann gewählt werden, ob DACs und ADC kontinuierlich oder einmalig aktualisiert werden und die entsprechende LED wird aktualisiert. Weiterhin erfolgt die Umschaltung zwischen manueller und Software-Steuerung der Spannungen  $V_{\text{XP}}$  und  $V_{\text{AMP}}$ . Bei der Aktualisierung des ADCs, wird der Wert der Photodiode ausgelesen und gleich danach in entsprechende Watt umgerechnet. Die Tab. 4.2 enthält die Register-Initialwerte.

Register-Parameter	Initialwert	Beschreibung
VAMP	0x0FFF	1,98 V
VXP	0x0800	1,1 V
VBIAS	2100	3,42 V
Config	0x4003	Kontinuierliche Aktualisierung; $V_{XP}$ und $V_{AMP}$ manuell

Tabelle 4.2: Initialwerte der Register von MD40

#### 4.2.1.2 Software

Im Vergleich zur Software der Laserdiodenansteuerung (Kap. 3.4.3.2) haben die beiden Modulatoransteuerungen leicht unterschiedliche grafische Benutzeroberflächen, basierend auf den verschiedenen Eigenschaften der Modulatoren.

#### Benutzerschnittstelle von MD10

In der Abb. 4.7 ist die Benutzerschnittstelle von MD10 dargestellt. Zu sehen ist die *Setup*-Gruppe, diese hat völlig die gleiche Funktion wie die *Setup*-Gruppe aus Abb. 3.17. In der *Parameter*-Gruppe werden die Spannungen mit einem Schieberegler eingestellt. Weiterhin kann, zwischen einer kontinuierlichen oder einmaligen Aktualisierung gewählt werden, wie schon im Kap. 4.2.1.1 besprochen. Durch Betätigung der Schaltfläche *Send all values above and update status below* werden alle geänderten Optionen der *Parameter*-Gruppe übernommen. In der *Diagnose*-Gruppe werden einerseits der aktuelle Wert des Konfigurationsregisters und andererseits die Kalibrationsparameter der Spannungsumrechnung angezeigt.

#### Benutzerschnittstelle von MD40

Die grafische Benutzeroberfläche von MD40 ist in Abb. 4.8 gezeigt und unterscheidet sich zur Benutzerschnittstelle von MD10 nur in der *Parameter*-Gruppe. Diese enthält zusätzlich die Umschaltung zur softwaregesteuerten Einstellung der Spannungen  $V_{AMP}$  und  $V_{XP}$ . Werden diese Checkboxen nicht ausgewählt, so erfolgt die Einstellung manuell über Potentiometer. Außerdem wird noch die Kalibrationsinformation der Biasspannung des Modulators in dieser Gruppe ausgeführt, mit der dazugehörigen Information über aufgetretene Fehler.

### 4.3 Messergebnisse

#### 4.3.1 Frequenzgang

Die Frequenzgänge der Modulatoransteuerungen wurden mit dem schnellen Netzwerkanalysator der Firma R&S aufgenommen. Der Frequenzgang von MD10 ist bis 5 GHz flach, absolut der Spezifikation entsprechend (Abb. 4.9).

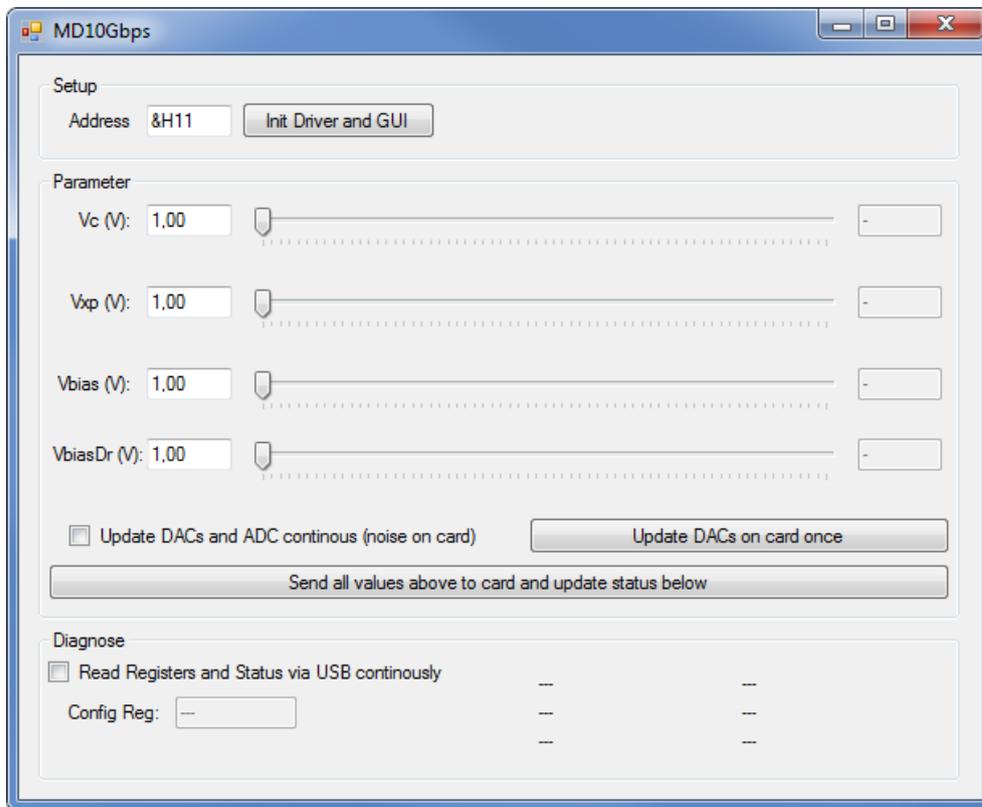


Abbildung 4.7: Benutzerschnittstelle der 10 Gbit/s Modulation

Die Vermessung von MD40 ist nur begrenzt möglich, zumal das vorhandene Messequipment nicht ausreichend schnell ist. Der verwendete optische Empfänger hat eine obere Grenzfrequenz bei 12 GHz, bei welcher auch die Übertragungsfunktion von MD40 in Abb. 4.10 stark abnimmt. Bis zu dieser Grenzfrequenz ist der Frequenzgang von MD40 völlig flach. Da ein schneller optischer Empfänger, min. 20 GHz, nicht vorhanden ist, kann auch der eigentliche Frequenzgang bei höheren Frequenzen nicht festgestellt werden. Die messbaren Werte decken sich mit den Werten aus dem Datenblatt, d.h. man kann in erster Näherung die in den Datenblättern gegebenen Grenzen für das MD40 annehmen.

### 4.3.2 Augendiagramm

Das Augendiagramm Abb. 4.11 von MD10 wurde mit einer Datenrate von 10 Gbit/s gemessen. Die untere Linie des Auges bzw. die Null-Bits entsprechen einer optischen mittlere Leistung von 0,28 mW und die obere Linie, also die Einser-Bits haben eine mittlere Leistung von 3,34 mW. Daraus ergibt sich ein recht hohes ER von 12. Die mittlere Bias-Leistung beträgt 1,81 mW. MD10 kann auch problemlos mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von 10 Gbit/s (Abb. 4.12) moduliert werden, jedoch ist hier die Grenze erreicht.

Wie schon oben erwähnt hat der optische Empfänger eine obere Grenzfrequenz bei 12 GHz,

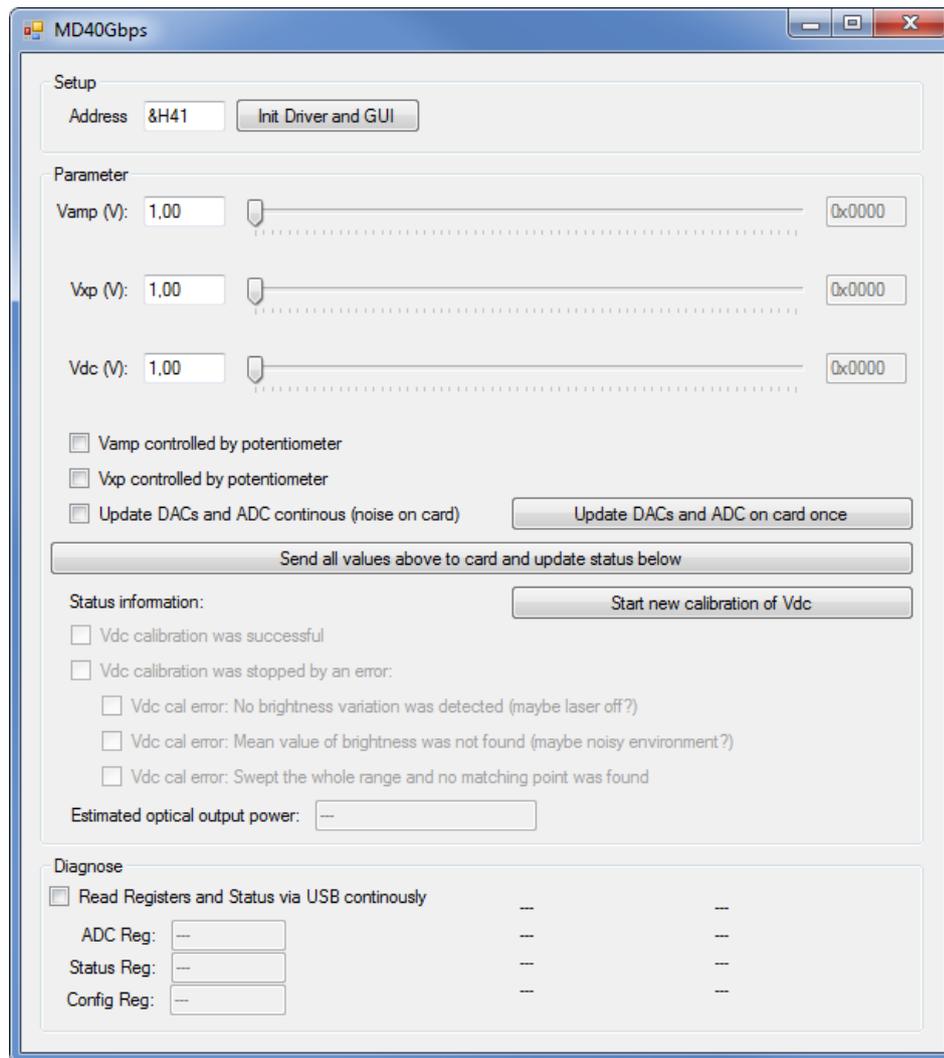


Abbildung 4.8: Benutzerschnittstelle der 40 Gbit/s Modulation

wodurch der MD40 nur etwa bis zur Hälfte seiner spezifizierten Datenrate messbar ist (Abb. 4.13). Bei einer Datenrate von etwa 20 Gbit/s zeigt sich ein deutlich geöffnetes Auge.

In der Abb. 4.14 ist mit einem langsamen (50 MHz) Sinus-Signal die Linearität des Modulators gemessen worden. Dazu wurde ein ER von etwa 10 gewählt, dieses ER liegt knapp unter dem maximal erreichbaren ER, hat aber bereits eine hohe Linearität. In der Abb. 4.14 zeigt sich, dass einerseits die Bias-Spannung richtig gewählt wurde und andererseits die Aussteuerung noch annähernd sinusförmiges Ausgangssignal erlaubt. Bei einer Fehlerhaften Aussteuerung vergleiche Abb. 4.1b wäre entweder das obere oder das untere Ende des Sinussignals verzerrt oder im Extremfall sogar gefaltet.

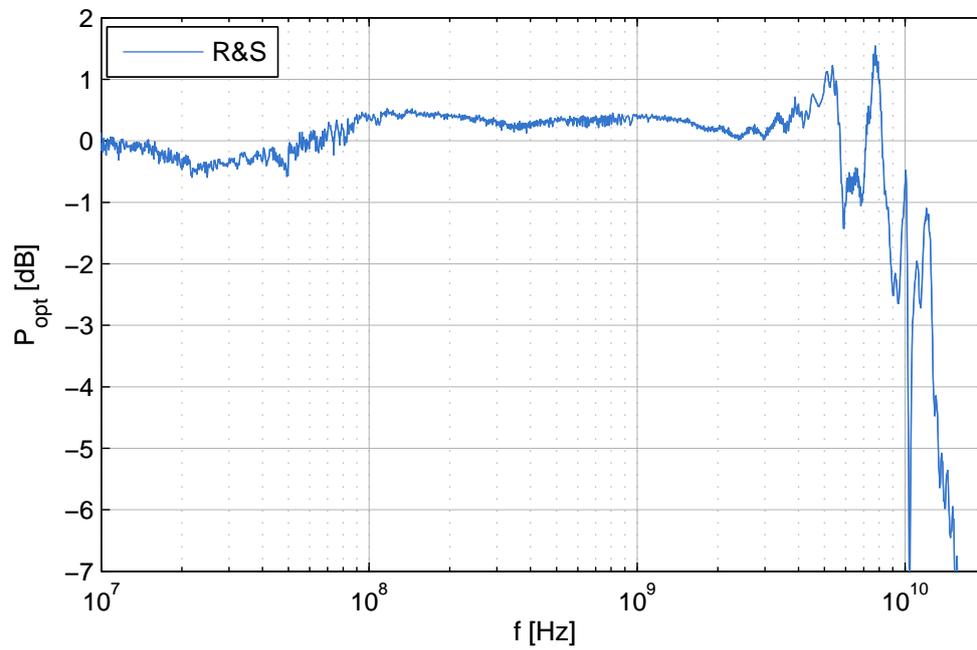


Abbildung 4.9: Gemessener Frequenzgang von MD10

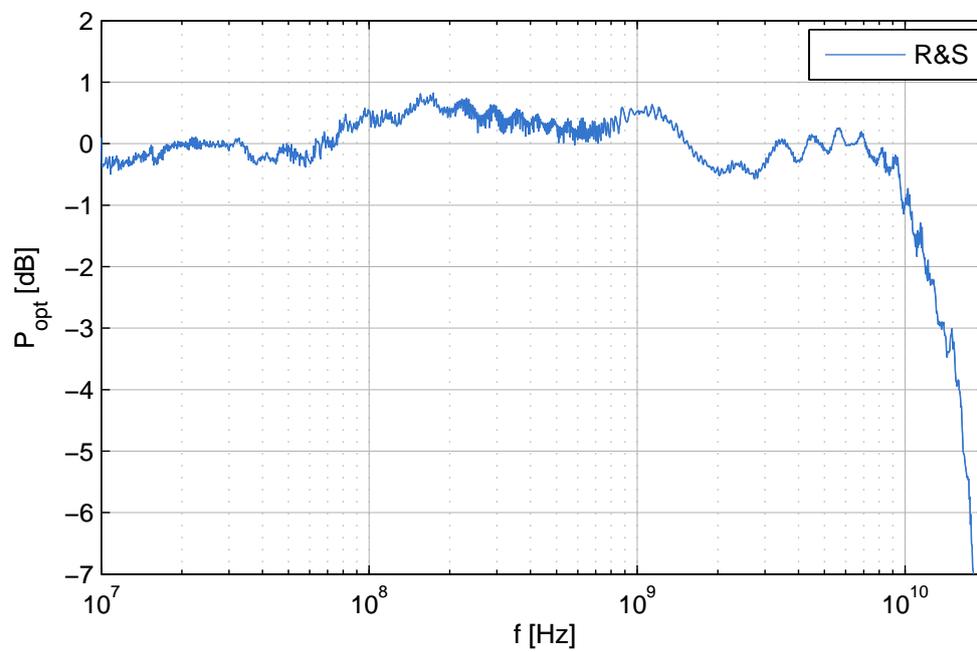


Abbildung 4.10: Gemessener Frequenzgang von MD40

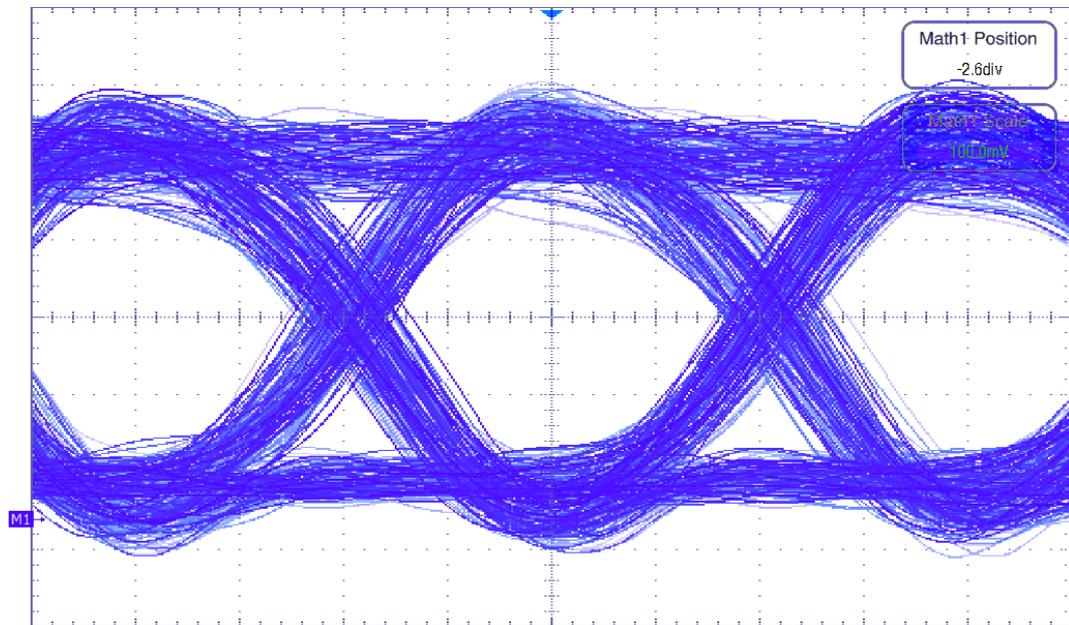


Abbildung 4.11: DC-Auge von MD10 bei einer Datenrate von 10 Gbit/s

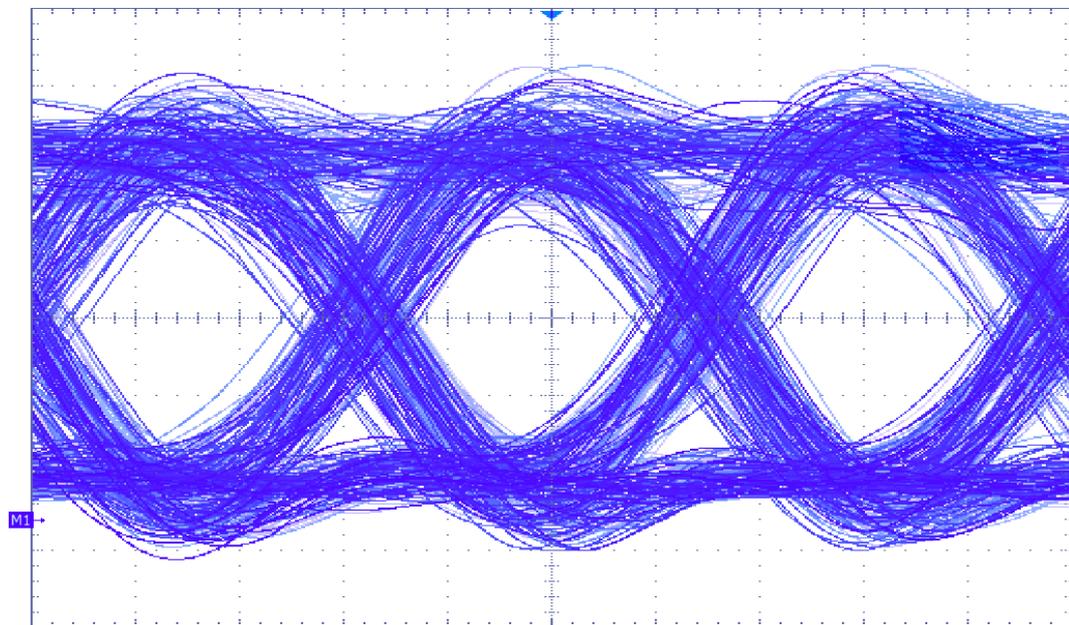


Abbildung 4.12: DC-Auge von MD10 bei einer Datenrate von 12 Gbit/s

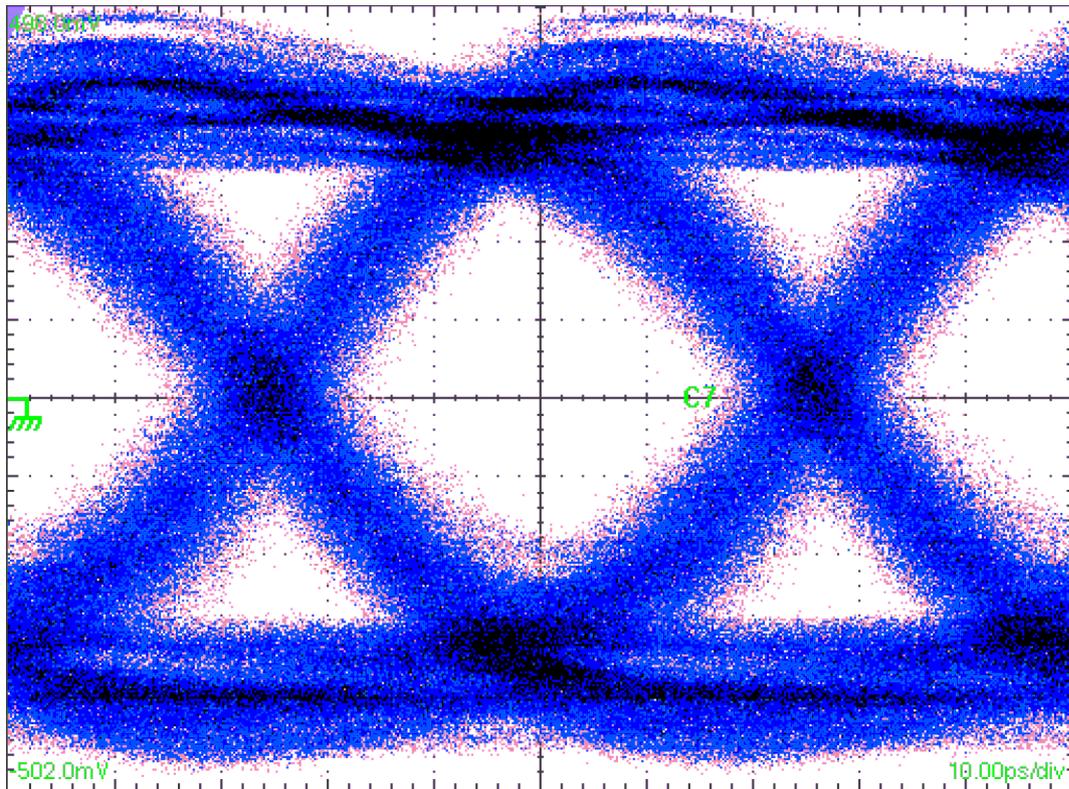


Abbildung 4.13: AC-Auge von MD40 bei einer Datenrate von 20 Gbit/s

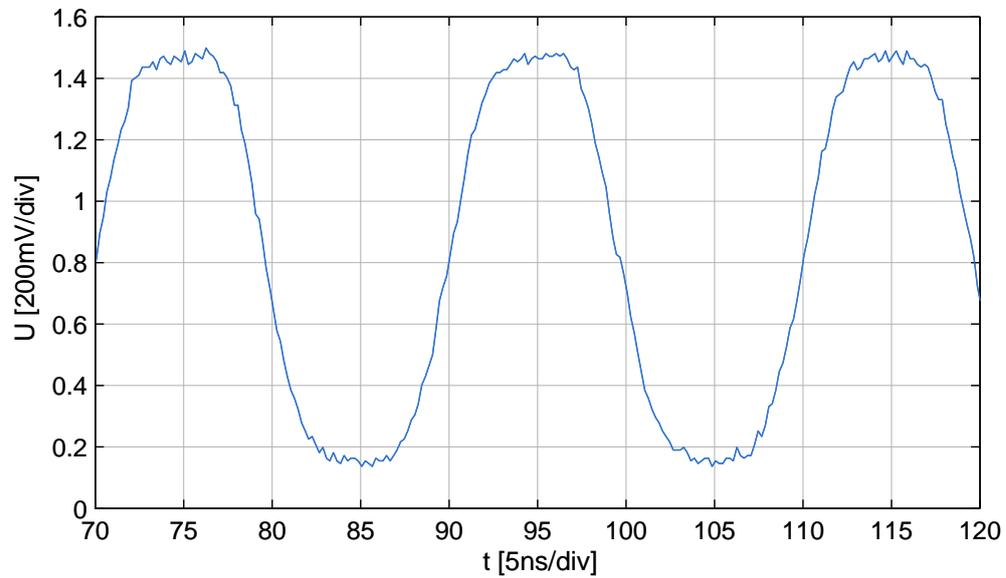


Abbildung 4.14: Extinktionsverhältnis von MD40



## 5 Leistungsanpassung

Um z.B. verschiedene Längen des optischen Übertragungsweges zu simulieren, sollen die optischen Quellen auch in ihrer Ausgangsleistung in einem weiten Bereich einstellbar sein. Mit Hilfe eines steuerbaren optischen Dämpfungsgliedes ist es möglich nicht nur verschiedene Signalformen, sondern auch unterschiedliche Lichtleistungen programmgesteuert ablaufen zu lassen. Weiteres kann mit einem integrierten Leistungsmesser die aktuelle Leistung am Ausgang der Laserquelle während einer Messung erfasst und auch überwacht werden. Dieses wird nun im Einzelnen kurz erläutert.

### 5.1 Steuerbares optisches Dämpfungsglied

Es gibt verschiedene Technologien, um das optische Signal einer Faser in einem sehr weiten Bereich ( $>40$  dB) reproduzierbar variabel abzuschwächen. Eine davon benutzt den Neutraldichtefilter, doch der kosteneffizientere optische Abschwächer für das SM-Fasersystem ist der so genannte Sperrfilter-Typ (Abb. 5.1a). Diese Abschwächer verwenden eine bewegliche Sperre, welche in den aufgeweiteten aber kollimierten Strahlengang geschwenkt werden kann. Diese Sperre schattet dabei einen Teil des Lichtes ab und die Ausgangsintensität verändert sich. Der zweite Typ der variabel einstellbaren optischen Abschwächer (Abb. 5.1b) benutzt statt einer Sperre einen Neutraldichtefilter. Dies ist ein Graukeil der in den eng kollimierten Strahl eingeschoben wird. Dies hat den großen Vorteil, dass der Abschwächer modenunempfindlich ist, da der gesamte Strahl homogen abgeschwächt wird. Daher wird dieser Abschwächertyp bei den Multimodefasern (MMF) eingesetzt, die über den Strahlquerschnitt keine homogene und vor allem zeitlich konstante Leistungsverteilung besitzen. Die Dämpfungsglieder können manuell einstellbar oder motorgesteuert sein. Im Falle eines elektrisch steuerbaren Abschwächers kommt dazu noch ein Schrittmotor, ein Getriebe und ein Endschalter, um die Filter mit Hilfe von elektrischen Signalen steuern zu können.

In der vorliegenden Arbeit sind nur Komponenten mit SM-Fasern vorzufinden. Daher werden steuerbare Sperrfilter-Abschwächer verwendet. Die Motorsteuerung hat den Vorteil, dass basierend auf der integrierten Leistungsmessung auch beliebige optische Ausgangsleistungen automatisiert angefahren werden können.

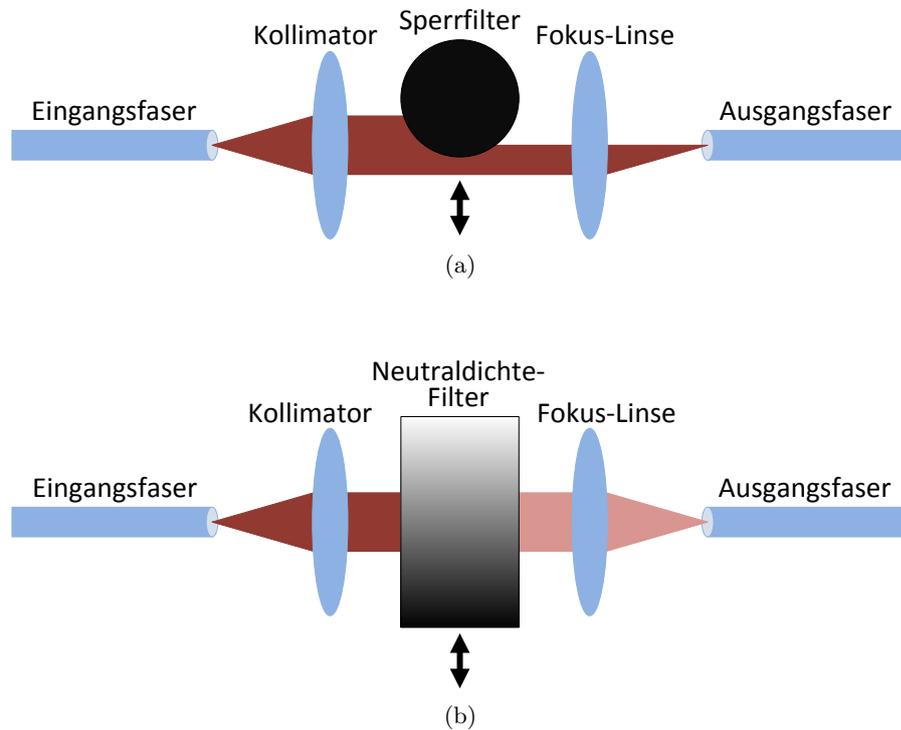


Abbildung 5.1: Variabel einstellbare optische Dämpfung nach (a) Sperrfilter- und (b) Neutralsdichtefilter-Prinzip

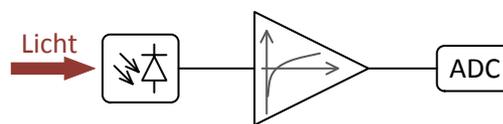


Abbildung 5.2: Prinzipschaltplan des logarithmischen Leistungsmessers

## 5.2 Leistungsmesser

Die Messung optischer Leistung erfolgt mit Hilfe eines optischen Empfängers. Der grundlegende Messaufbau eines Leistungsmessers ist in Abb. 5.2 veranschaulicht. Das Licht fällt auf eine InGaAs Photodiode, welche für die Telekom-Wellenlängen empfindlich ist. Die Photodiode wandelt das optische Signal in einen elektrischen Strom um, welcher anschließend verstärkt wird. Da Leistungen über viele Größenordnungen, etwa 8 Dekaden, aufzulösen sind, wären mit einem linearen Verstärker zu viele Bits nötig, jedoch mit einem logarithmischen Verstärker sind 12 oder 14 Bits ausreichend. Demzufolge kann eine brauchbare Auflösung erzielt werden, so dass sowohl bei 1 nW als auch bei 10 mW ein verwendbares Messsignal geliefert wird.

## 5.3 Ansteuerung der Leistungsanpassung

Die Ansteuerung der Leistungsanpassung beinhaltet die Abschwächung des optischen Signals und gleichzeitig die Ermittlung der aktuellen optischen Leistung. In Abb. 5.3 ist der Schaltplan zu finden. Dieser wurde aus älteren Projekten übernommen. Der blau markierte Teil mit den nötigen Verbindungen wird zur Leistungsanpassung verwendet. Der Schaltplan enthält einen motorgesteuerten optischen Dämpfer mit einem Schrittmotortreiber IC9. Das optische Signal wird nach dem Abschwächer mit einem 90:10 Fasersplitter aufgeteilt. 10% der optischen Leistung gelangen zum optischen Empfänger, für die Leistungsmessung und die restlichen 90% werden zum Ausgang geführt. Für die zwei Laserquellen wurden auch zwei Platinen mit optischen Bauteilen der passenden Wellenlängen gefertigt.

### 5.3.1 Computergestützte Steuerung

Die Slave-Platinen der beiden Leistungsanpassungsplatinen sind identisch mit den Slaves der Laserdiodenansteuerung und der Modulatoransteuerung, somit läuft in den Modulen der Leistungsanpassung die Kommunikation gleich wie bei dem Modul „Laser“ (Kap. 3.4.3) und dem Modul „Modulation“ (Kap. 4.2.1) ab. In den folgenden Kapiteln wird kurz auf die Firmware und die Software eingegangen.

#### 5.3.1.1 Firmware

In der Firmware der Module „Leistungsanpassung“ werden die gleichen Bibliotheksmodule `_BaseFunctions` und `_I2C_Slave_Basic` benutzt, wie in der Laser-Modul-Firmware (Kap. 3.4.3.1). Da die Ansteuerung der Leistungsanpassung einen optischen Abschwächer hat, wird für diesen in der Firmware die Kalibrierung im Unterprogramm `CalibrateAttenuator` vorgenommen. Wird der Motor des Abschwächers in Betrieb genommen, so soll für diesen eine definierte Position (Home) sichergestellt werden. Dazu dient eine Lichtschranke im inneren des optischen Abschwächers, die an einer Stelle des Abschwächers ein Signal liefert. Um diese Position genau zu finden, wird zunächst der Motor schrittweise angesteuert, bis entweder die Lichtschranke ein Signal liefert oder eine maximale Schrittzahl erreicht wird. Wenn die Lichtschranke sofort nach dem ersten Schritt unterbrochen wird, so muss die Flanke der Lichtschranke gefunden werden. Im zweiten Schritt wird nun der Motor in die umgekehrte Richtung schrittweise angesteuert, solange bis das Signal der Lichtschranke wieder abreißt oder eine maximale Schrittzahl erreicht wird. Wenn die Flanke der Lichtschranke erkannt wurde, so ist die exakte Anfangsposition bekannt und der Abschwächer damit in der „Home“ Position. Falls in beiden Schritten die Lichtschranke nicht reagiert und die maximale Schrittzahl erreicht wird, so liegt ein Hardware-Fehler vor (Schrittmotortreiber, Motor, Getriebe, Abschwächer, Lichtschranke mit Auswertung oder Verkabelung zur Slave Platine). Dieser Fehler wird im dritten Schritt behandelt, indem die erste LED zu blinken beginnt.

Die Überlaufraten der Zähler werden auch hier, wie in der Firmware der Laserdiodenansteuerung Kap. 3.4.3.1, in der Funktion `tt main` festgelegt. Die Überlaufrate des Zählers `TCC0`

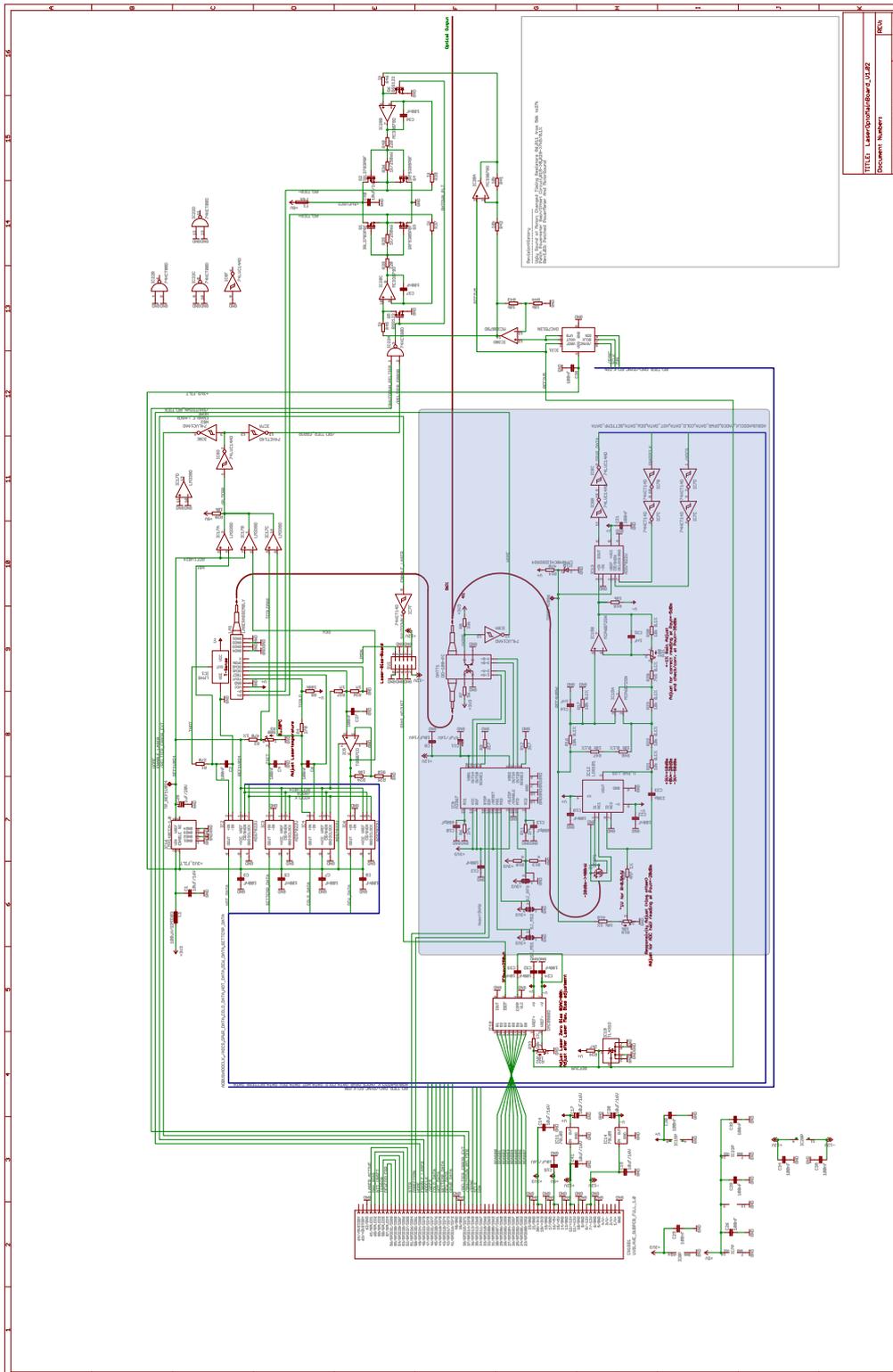


Abbildung 5.3: Kompletter Schaltplan der Leistungsanpassung

beträgt 500 Hz, welcher ebenfalls die Haupt-ISR ist. TCC1 hat eine Überlaufrate von 2 kHz. In der Haupt-ISR werden am Anfang den LEDs die Funktionsanweisungen erteilt und danach die Werte der Photodiode aus dem ADC ausgelesen. Daraufhin wird der Abschwächer behandelt. Er hat zwei Funktionsmodi zur Auswahl, zum einen eine Leistungsabschwächung nach vorgegebenen Schritten des Motors. Damit kann die Leistung in den feinsten, von der Hardware vorgegebenen Schritten, geregelt werden. Zum anderen nach Vorgabe eines gewünschten Leistungswertes, wobei zusätzlich eine erlaubte Abweichung (Hysterese) vom gewünschten Leistungswert eingestellt werden kann. Diese Einstellung einer erlaubten Abweichung ist nötig, denn die Laserdioden liefern, vor allem bei niedrigen Leistungswerten, leicht schwankende optische Leistungen. Der Motor würde die ganze Zeit regeln, was zur Schädigung des Motors, der Mechanik und des Abschwächers führen kann, daher wird eine definierte Abweichung erlaubt. Eine LED in der Frontplatte und ein Bit in einem der Statusregister zeigen an, dass die Einstellung eines gewünschten Wertes abgeschlossen ist. Die Regelzeit kann dabei durchaus Sekunden betragen und die Messaufbau-Steuerung muss abwarten, bis der Regelvorgang abgeschlossen ist, damit die optische Leistung wieder stabil für weitere Messungen zur Verfügung steht.

### 5.3.1.2 Software

In Abb. 5.4 ist die grafische Benutzeroberfläche der beiden Leistungsanpassungen zu sehen. Die **Setup**-Gruppe ist identisch mit der aus dem Kap. 3.4.3.1. Wie in den Benutzerschnittstellen der schon beschriebenen Module der Laserquelle, werden auch hier in der **Parameter**-Gruppe die Einstellungen mit einem Schieberegler vorgenommen. Dabei kann die Abschwächung entweder über Motorschritte oder über einen Leistungswert eingestellt werden, jeweils mit der Auswahl der richtigen Checkbox. Weiterhin kann die, in der Firmware erklärte, Hysterese eingestellt werden. Mit der Betätigung der Schaltfläche **Send and read all values above and update GUI values** werden die Parameteränderungen übernommen und alle Werte einmal ausgelesen. Sollen die Werte automatisch erneuert werden, so ist es durch die Aktivierung der Checkbox in der **Diagnose**-Gruppe möglich.

## 5.4 Messergebnisse

In Abb. 5.5 wurde die Genauigkeit des internen logarithmischen Leistungsmessers überprüft. Im Diagramm dargestellt ist der intern gemessene ADC-Wert im Vergleich zu einem Leistungswert eines externen optischen Leistungsmessgerätes. Man sieht, dass über einen weiten Bereich der ADC-Wert dem gewünschten Verlauf folgt. Die Kurven wurden sowohl für das Modul „LA1550“ als auch für das Modul „LA1310“ aufgenommen.

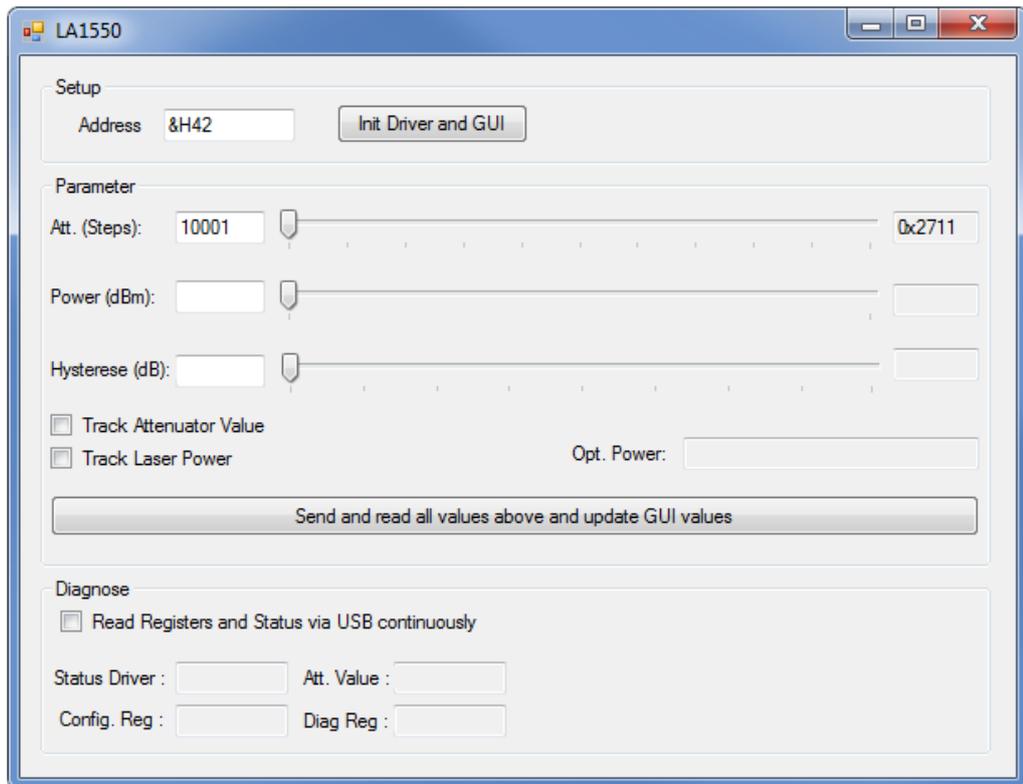


Abbildung 5.4: Benutzerschnittstelle der Leistungsanpassung

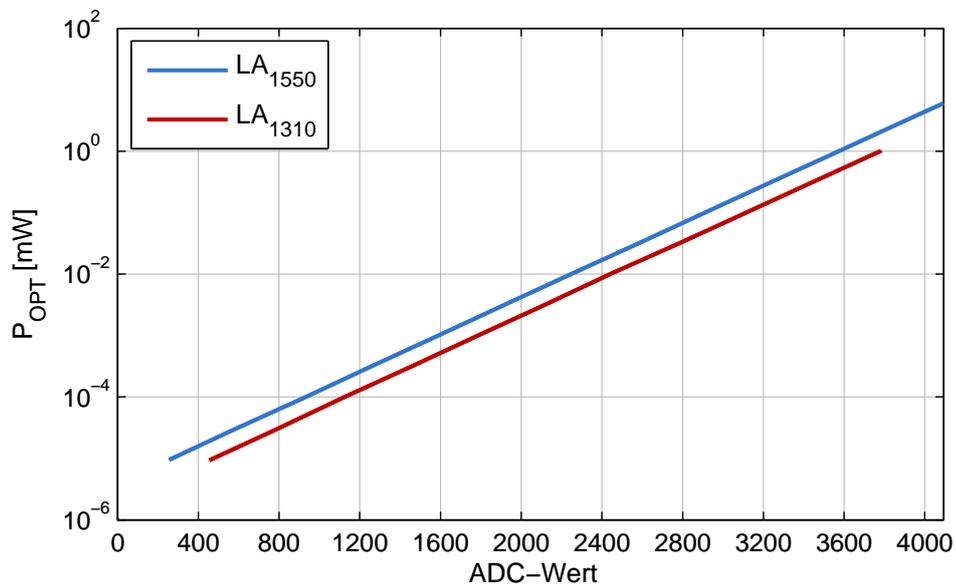


Abbildung 5.5: Gemessene Ausgangsleistungskennlinien der internen logarithmischen Leistungsmesser

## 6 Burst Mode

Wie bereits in Kap. 2.3 erläutert ist der Burst-Mode für optische Empfänger, die im Zeitschlitzverfahren unterschiedliche Sender empfangen, eine neuartige und durchwegs kritische Anforderung. Wie bei konventionellen Datenstrecken erhält der Empfänger ein kontinuierliches schnelles Datensignal, aber er muss beim Wechsel auf einen anderen Sender in der Lage sein, sich sehr schnell an einen anderen Mittelwert und möglicherweise eine andere Modulationstiefe des empfangenen Signals anzupassen. Um solche Empfänger zu Testen, wurde in dieser Arbeit das beschriebene System entwickelt. Damit ist es möglich ein kontinuierliches Datensignal jederzeit in der Spitzenleistung und damit auch mittlere Leistung definiert zu variieren. Für die Umsetzung des Burst-Mode-Betriebs werden die direkt modulierte Laserdiode und zusätzlich die externe Modulation eingesetzt. Dabei wird nicht gezeigt, wie schnell die Modulation erfolgen kann, oder wo sich die Grenzen der Modulation befinden, denn diese Messungen wurden in den vorherigen Kapiteln vorgestellt. Bei den Messungen im Burst-Mode-Betrieb wird das Augenmerk auf die Form der Signale gelegt, daher werden diese bei niedrigen Datenraten aufgenommen, was die Umsetzung der Messungen vereinfacht.

In Abb. 6.1 ist ein Burst-Mode-Signal (in blau) der schnellen Laserquelle zu sehen. Zunächst wird mit dem externen MZM von MD40 mit einer Datenrate von 1 Gbit/s moduliert. Daraufhin wird LD1550 direkt mit einem langsamen Rechtecksignal moduliert. In der Abb. 6.1 ist es das grüne Signal und hat eine Frequenz von 20 MHz. Liegt nun eine Spannung von 0 V am Modulationseingang von LDT1550, so wird das optische Signal allein durch den MZM moduliert. In Abb. 6.1 ist es das erste Zoomfenster mit dem herausgenommenen Augendiagramm. Wird ein positives Modulationssignal an den externen Eingang der Laserdiode angelegt, so sinkt die optische Ausgangsleistung (s. Abb. 3.19). Das herausgenommene Augendiagramm mit der kleineren Leistung ist im zweiten Zoomfenster zu sehen. Weiterhin lässt sich mit der positiven Spannung das modulierte Signal von MZM komplett ausschalten, wie es in den Abbildungen 6.2 und 6.3 erkennbar ist. Desweiteren ist in diesen Abbildungen der Burst-Mode zunächst mit langen Pulsen und kurzer Ausschaltfolge und umgekehrt sichtbar. Besonders bei langen Pulsen ist gut zu erkennen, dass der Gleichanteil aufgrund der DC-Kopplung übertragen wird. Mit einem negativen Modulationssignal am externen Eingang der Laserdiode steigt die optische Ausgangsleistung entsprechend der Abb. 6.4.

Das Burst-Mode-Signal in Abb. 6.5 stammt vom externen MZM von MD10, welcher mit einer Datenrate von 10 Gbit/s moduliert wird und von LD1310, welche direkt mit einem langsamen 100 MHz Rechtecksignal (in grün) moduliert ist. In diesem Bild ist zu beachten, dass das Rechtecksignal logisch invertiert ist, daher steigt die Leistung bei positiv angelegter Spannung. Die dargestellten Bilder sind Beispiele, wie vielfältig die Signale der Module in Kombination sein können. Damit ist es möglich, Empfänger und ihre Eigenschaften in einem weiten Bereich mit hoher Qualität zu bestimmen und zukünftigen Modulationsverfahren den Weg zu ebnen.

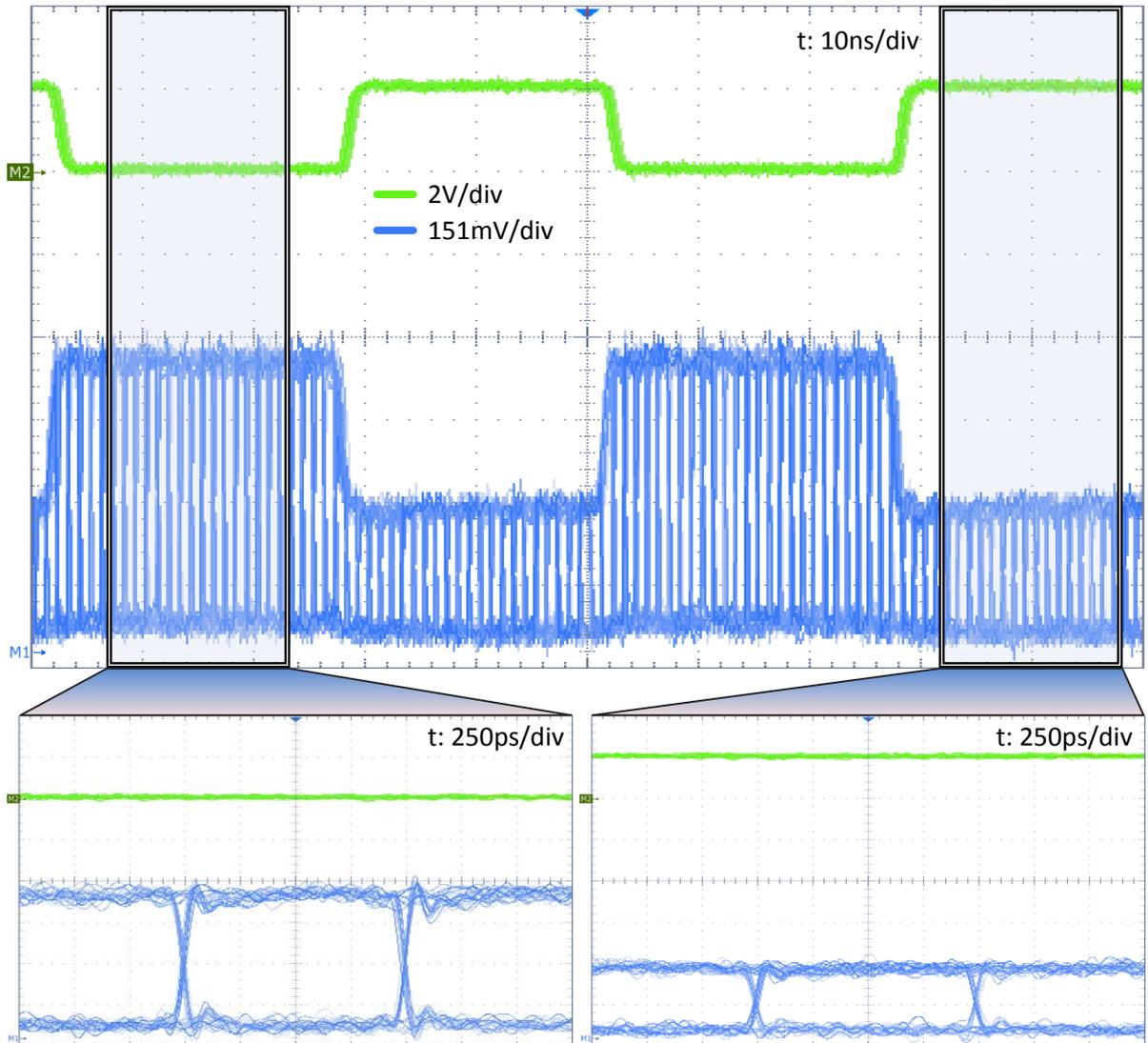


Abbildung 6.1: Burst-Mode der schnellen Laserquelle. Bias-Leistung der Laserdiode:  $P_{\text{bias}} = 13 \text{ mW}$ . Modulationsspannungen:  $V_{\text{AMP}} = 1,65 \text{ V}$ ,  $V_{\text{XP}} = 1,57 \text{ V}$ ,  $V_{\text{DC}} = -2,98 \text{ V}$ .

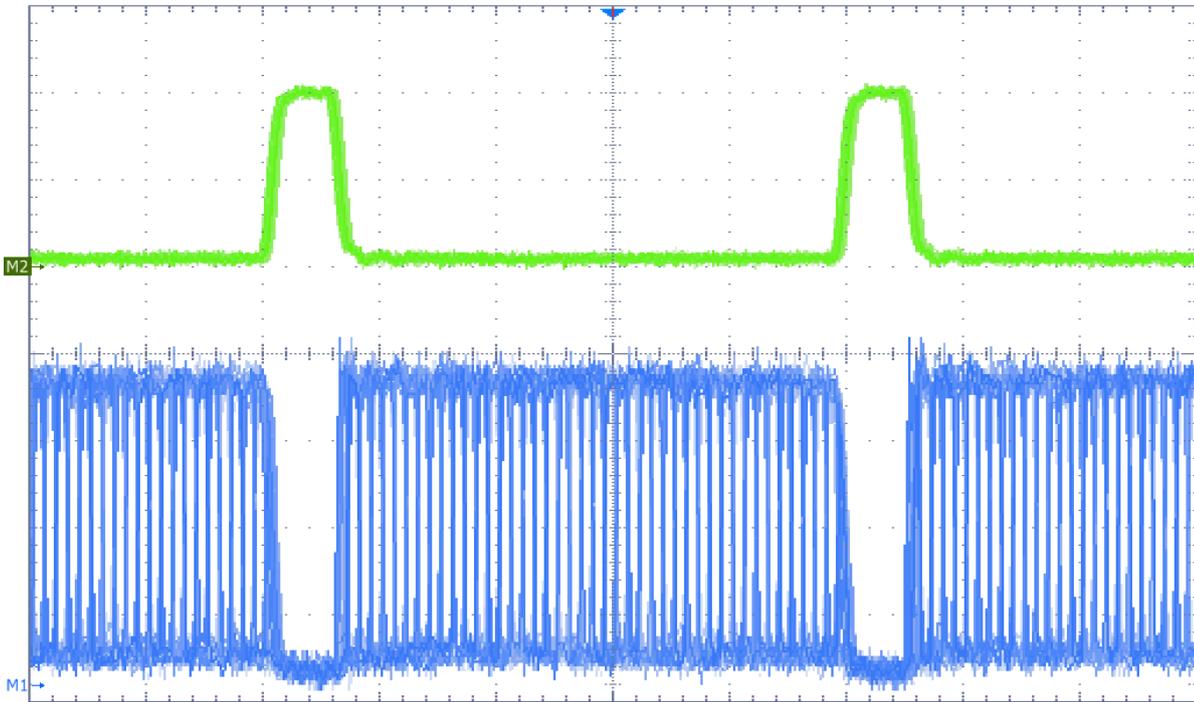


Abbildung 6.2: Burst-Mode der schnellen Laserquelle mit kurzer Ausschaltfolge

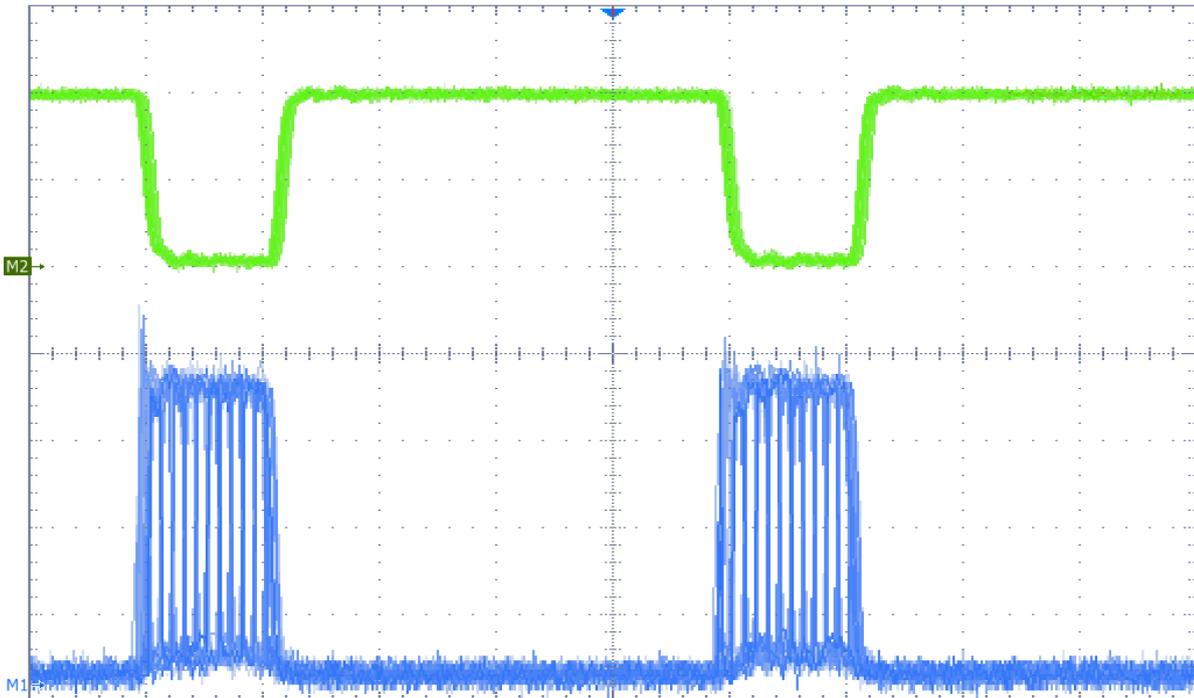


Abbildung 6.3: Burst-Mode der schnellen Laserquelle mit langer Ausschaltfolge

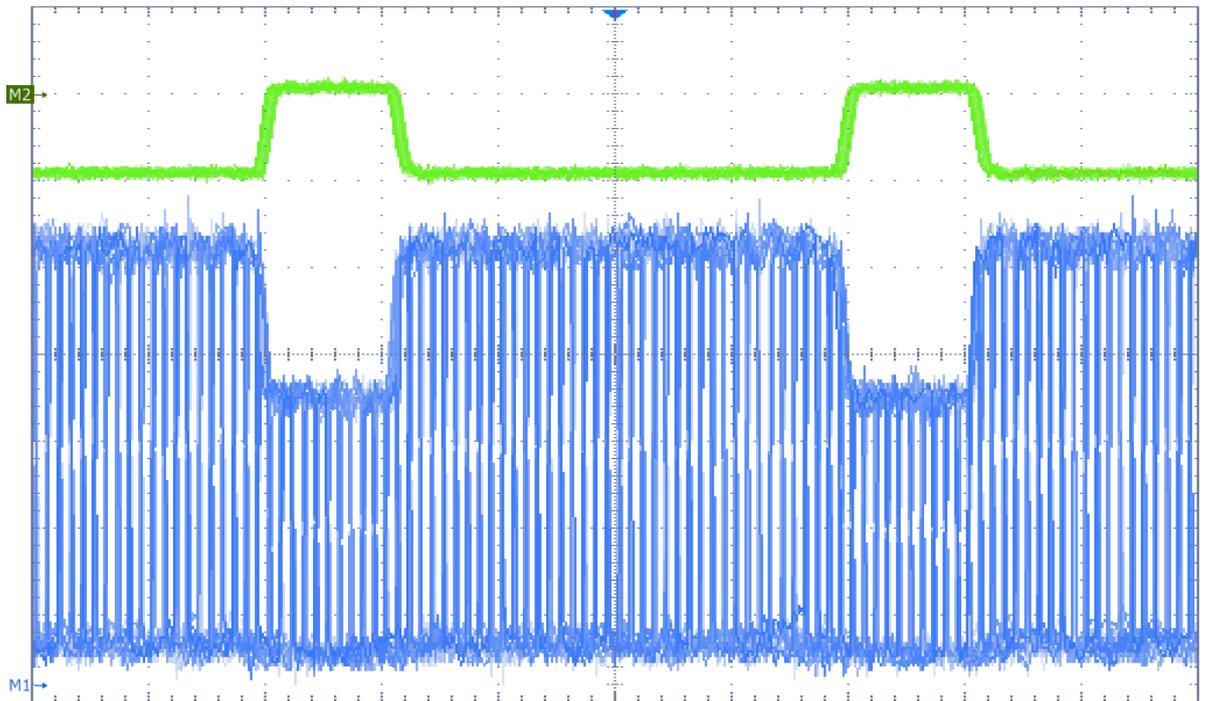


Abbildung 6.4: Burst-Mode der schnellen Laserquelle mit steigender Leistung

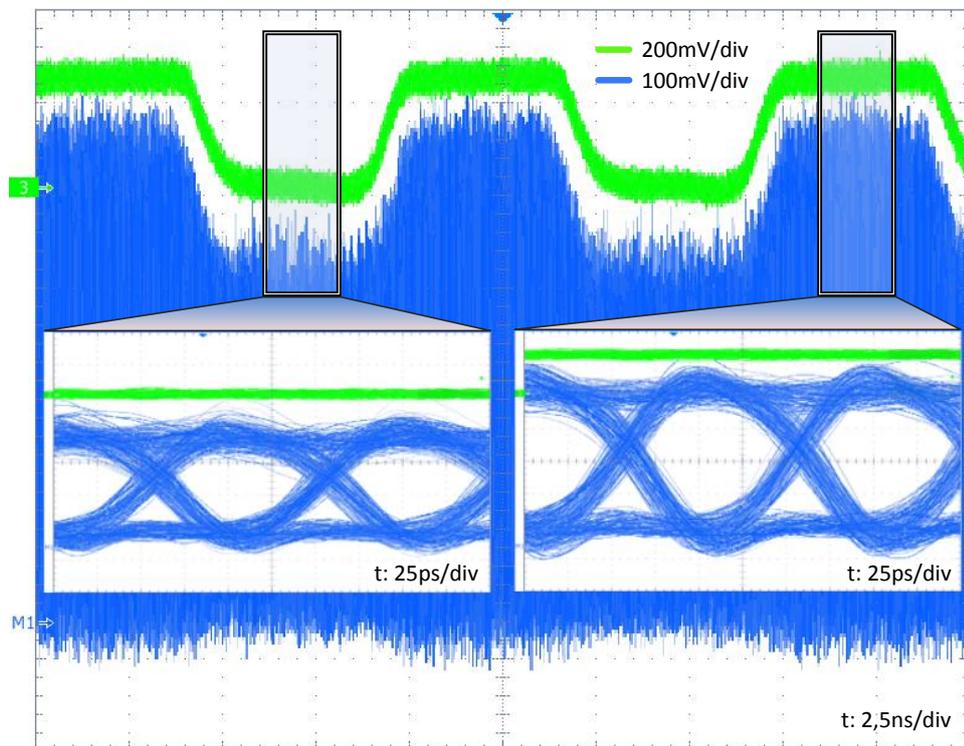


Abbildung 6.5: Burst-Mode der langsamen Laserquelle

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden optische Quellen für automatisierte Messsysteme entwickelt und durch Messungen geprüft. So entstand als Ergebnis ein Prüfstand zur Verifikation von optischen Empfängern. Die gesamte Entwicklung beruht auf Simulation, Modellierung der mechanischen Komponenten, Aufbau und Optimierung. Der modulare Aufbau dieser Laserquellen ermöglicht einen flexiblen Einsatz: So kann für bestimmte Anwendungen der Laser allein benutzt werden. Dabei stehen zwei Betriebsmodi zur Auswahl, zum einen der Dauerstrichmodus und zum anderen der Modulationsbetrieb der Laserdiode. Dementsprechend kann mit der optimierten Laseransteuerung LD1310 von 0 Hz bis 2 GHz und LD1550 von 0 Hz bis 1 GHz direkt moduliert werden. Hierbei haben sich wichtige Erkenntnisse über die direkte Modulation der verwendeten Laserdioden ergeben. Zum einen ist die Laserdiodenfassung von LD1550 beschränkt für eine Modulation geeignet, da das Butterfly-Gehäuse zu groß ist und dominante parasitäre Elemente enthält, welche den Frequenzgang verschlechtern. Bei LD1310 und LD1550 sind die laserbedingten Relaxationsoszillationen das bestimmende Glied, welches die maximale Frequenz bestimmt. Gerade bei LD1310 ließen sich diese verringern, wenn man einen FC/APC-Stecker verwenden würde, da damit die Rückflusdämpfung höher wäre. Als Abhilfe wird hier der Arbeitspunkt bei höheren Leistungen mit kleinerem Modulationshub gewählt, da dadurch die Ladungsträgerdichten in der Laserdiode konstanter sind. Durch diese Vorgangsweise wird jedoch ein kleineres Extinktionsverhältnis (ER) bei direkter Modulation in Kauf genommen. Sind höhere Übertragungsgeschwindigkeiten gefordert, so wird zusätzlich eines der Module für die externe Modulation verwendet. Mit diesen lässt sich auch ein großes ER von über 10 dB erreichen, jedoch ist die externe Modulation nicht DC-fähig. Mit dem dritten Modul „Leistungsanpassung“ wird die Laserleistung mittels eines variablen Abschwächers auf den gewünschten Wert für den Prüfling (DUT) gebracht, wobei die integrierte Leistungsmessung es zulässt, die Ausgangsleistung in einem weiten Bereich zu überwachen und auch zu regeln. Sowohl die Modulationsmodule als auch die Leistungsanpassungsmodule können, nicht nur für die hier entwickelten Laser, sondern auch für andere Laser der entsprechenden Wellenlängen eingesetzt werden.

Wird eine Laserquelle für andere Wellenlängen benötigt, so ist diese mit den Komponenten der vorliegenden Arbeit leicht realisierbar. Nur die Kernkomponenten (Laserdiode, Modulator, opt. Abschwächer) müssen getauscht werden, die Ansteuerschaltungen, die Firmware und die Software können nahezu unverändert oder leicht angepasst übernommen werden.

Das wichtigste Ergebnis dieser Diplomarbeit ist die Generierung von Burst-Mode-Signalen. Diese können erzeugt werden indem beim Modul „Laser“ der Modulationsbetrieb gewählt und dieses gemeinsam mit dem Modulationsmodul verwendet wird. Die Kombination der Module ermöglicht die Erzeugung beliebiger hochkomplexer Signalformen, die zeitlich variable Mittelwerte haben können. Die Generierung von Burst-Mode-Signalen im Sinne von FTTH-Diensten

stellt allerdings nur ein Beispiel der Anwendung des gebauten Testsystems dar. Ein weiteres Einsatzgebiet wäre die Generierung von sehr kurzen, wohl definierten Lichtimpulsen, wie sie bei der transienten Charakterisierung von Single-Photon Avalanche Dioden (SPAD) nötig sind. Dabei würden mit der DC-fähigen Laserquelle Lichtblöcke erzeugt werden, welche dann mit den schnellen Modulatoren auf kurze Pulse zugeschnitten werden.

# A Datenblätter

## A.1 Datenblatt von LD1310

DATA SHEET

OECA

LQ7-1310-2/P1-FCPC  
01.92.0050.1 - 2009-11-09

### LQ7-1310-2/P1-FCPC

#### Description

This device contains a laser diode of 1310 nm coupled to a polarization maintaining fiber (PMF) assembled with a FC-PC-connector. The laser welded device is designed for either printed circuit board or front plate mounting.

#### Applications

- Fiber optic communication
- Sensor technologies

#### Features

- PM-fiber, length 1 m, assembled with FC-PC-connector, connector key is oriented to the slow axis
- Laser class 1



Device can differ from picture.  
For details and pin out please refer to the drawing.

#### Absolute Maximum Ratings

$T_c = 25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	min.	max.	Unit
Reverse Voltage Laser Diode	$V_R$		2	V
Reverse Voltage Monitor Diode	$V_{Mon}$		20	V
Forward Current Monitor Diode	$I_{F Mon}$		2	mA
Operating Temperature	$T_{Op} = T_c$	-40	+85	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	$T_{Stg}$	-40	+85	$^\circ\text{C}$

#### Optical and Electrical Characteristics

$T_c = 25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Condition	min.	typ.	max.	Unit
Fiber Optical Power	$P_f$	PMF; 1m length	2			mW
Lasing Wavelength	$\lambda_p$	$P_f = 2 \text{ mW}$	1290	1310	1330	nm
Threshold Current	$I_{th}$			5	15	mA
Operating Current	$I_{Op}$	$P_f = 2 \text{ mW}$		30	45	mA
Operating Voltage	$V_{Op}$	$P_f = 2 \text{ mW}$		1.1	1.5	V
Monitor Current	$I_{Mon}$	$P_f = 2 \text{ mW}$ $V_{RMon} = 1 \text{ V}$	0.1	0.5	0.9	mA
Polarization Ratio		$P_f = 2 \text{ mW}$	100:1			

1/2

**OECA**

Handwerkerstraße 13  
Phone: +49 (0) 3342 36880  
eMail: info@oecca.de

OPTO-ELEKTRONISCHE  
COMPONENTEN  
UND APPLIKATIONEN GMBH  
15366 Hoppegarten  
Fax: +49 (0) 3342 3688 88  
Internet: [www.oecca.de](http://www.oecca.de)

represented by:

**hiv**

Rosenstraße 1  
Phone: +49 (0) 6834 96070  
eMail: info@halbleiter-iv.de

HALBLEITER - IMPORT  
UND VERTRIEBS GMBH

66787 Wadgassen  
Fax: +49 (0) 6834 9607 37  
Internet: [www.halbleiter-iv.de](http://www.halbleiter-iv.de)  
0958.09.11.D.OECA

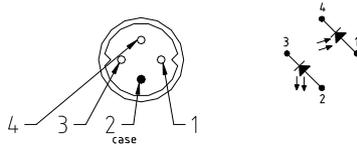
DIN EN ISO 9001:2000  
Certificate: TND806290G

**DATA SHEET**

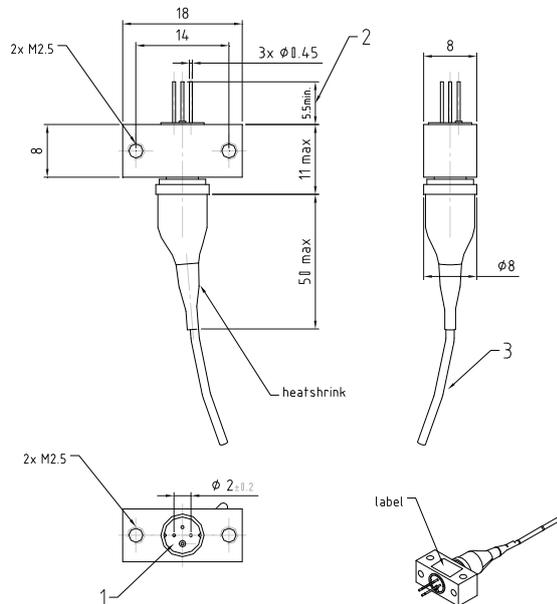
**OECA**

LQ7-1310-2f/P1-FCPC  
01.92.0050.1 - 2009-11-09

**Pin Out**



**Drawing**



- 1 - pinout according to specification
- 2 - typical length depends on used laser diode
- 3 - optical fiber according to specification, typical length 1m

tolerances acc. to DIN ISO 2768-m-H  
all dimensions in mm

Ordering code: LQ7-1310-2f/P1-FCPC - 01.92.0050.1

specifications subject to change without

2/2

**OECA**  
Handwerkerstraße 13  
Phone: +49 (0) 3342 36880  
eMail: info@oecca.de

**OPTO-ELEKTRONISCHE  
COMPONENTEN  
UND APPLIKATIONS GMBH**  
15366 Hoppegarten  
Fax: +49 (0) 3342 3688 88  
Internet: [www.oecca.de](http://www.oecca.de)

represented by:

**DIN EN ISO 9001:2000  
Certificate: TNO806290G**



Rosenstraße 1  
Phone: +49 (0) 6834 96070  
eMail: info@halbleiter-iv.de

**HALBLEITER - IMPORT  
UND VERTRIEBS GMBH**  
66787 Wadgassen  
Phone: +49 (0) 6834 9607 37  
Internet: [www.halbleiter-iv.de](http://www.halbleiter-iv.de)  
0958.09.11.D.OECA

OECA | Messprotokoll | LQ7-1310-2f/P1-FCPC

Order 209.179.01.00 for customer  
 Description LQ7-1310-2f/P1-FCPC  
 Artikel-Nr. 01.92.0050.1  
 PC (Win)-Datei \\SKORPION\USER\OECA\Order\Hp\_ASCII\2009\OCT09\J52AH3.2  
 HP (LIF)-Datei J52AH3\_2

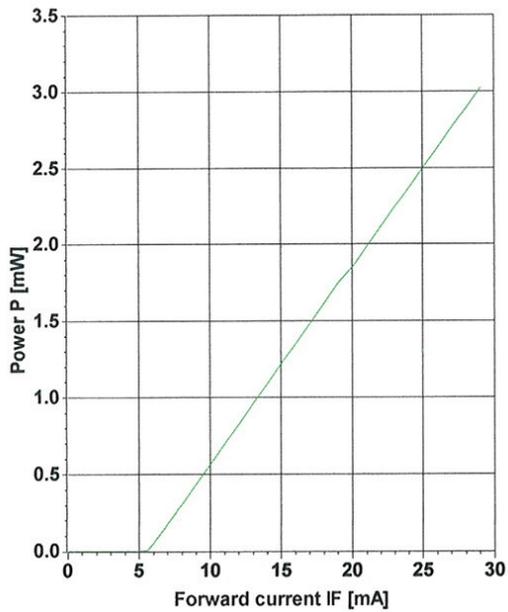
Powermeter=AQ2140 Sensor=AQ2742 @Lambda [nm]=1310  
 Meas.date=11 Nov 2009 Meas.time=16:23:57 Operator=Erbe  
 @TC [°C]=25

last Power [mW]=3.0269 OP: Power [mW]=3  
 last IF [mA]=29.09 OP: IF [mA]=28.8824  
 last Im [mA]=1.005 OP: Im [mA]=0.996194  
 last VF [V]=1.1  
 lth (Tang.) [mA]=5.60572

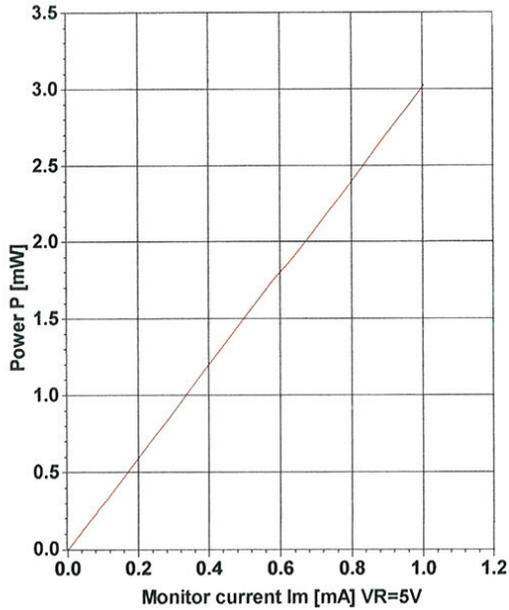
eta [W/A]=0.126973  
 Im/P [mA/mW]=0.332023

REM1=none  
 REM2=none

Power = f(IF)

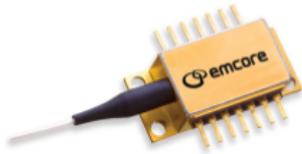


Power = f(Im)



## A.2 Datenblatt von LD1550

DATASHEET | FEBRUARY 05, 2010



### Applications

- DWDM
- CATV
- Free space optics

### Features

- 40, 50, 63 mW optical output power
- OC-48 pinout compatible
- *Telcordia Technologies™* GR-468 compliant
- PM fiber
- -20°C to +65°C operating temperature range
- Monitor photodiode

## Model 1772 DWDM High Power CW Source Laser

The 1772 laser component is characterized for use as a CW optical source in CATV and DWDM networks. The 1772 is dc-coupled with a built-in TEC, thermistor, and monitor photodiode. The device is mounted in a 14-pin, OC-48 pinout compatible butterfly package with the optical isolator mounted on the TEC. The 1772 incorporates a high efficiency coupling scheme to deliver 40 mW, 50 mW, and 63 mW of CW optical power.

### Performance Highlights

Parameter	Min	Typ	Max	Units
Operating Case Temperature	-20	25	+65	°C
Wavelength	See Page 4			nm
Optical Output Power	40	-	-	mW
	50	-	-	
	63	-	-	
Threshold Current	-	-	40	mA
Operating Current	-	-	380	mA
RIN	-	-	-163	dB/Hz
RIN Through 65 km Fiber	-	-	-155	dB/Hz
SMSR	30	-	-	dB
Polarization Extinction Ratio (PMF pigtail)	17	-	-	dB
Optical Isolation	32	-	-	dB
Optical Return Loss	40	-	-	dB

See page 2 for specific test conditions.



**For more information on this and other products:**

Contact Sales at Emcore 626-293-3400, or visit [www.emcore.com](http://www.emcore.com).

**Model 1772 DWDM High Power  
CW Source Laser**

**DATASHEET | FEBRUARY 05, 2010**

**Absolute Maximum Ratings**

Stresses in excess of the absolute maximum ratings can cause permanent damage to the device. These are absolute stress ratings only. Functional operation of the device is not implied at these or any other conditions in excess of those given in the operational sections of the data sheet. Exposure to absolute maximum ratings for extended periods can adversely affect device reliability.

Parameter	Symbol	Condition	Min	Max	Units
Operating Case Temperature	T <sub>OP</sub>	continuous	-20	+65	°C
Storage Temperature	T <sub>STG</sub>	continuous	-40	+85	°C
Laser Forward dc Current	-	continuous	-	450	mA
Photodiode Reverse Voltage	V <sub>R,MPD</sub>	continuous	-	10	V
Laser Reverse Voltage	-	continuous	-	2	V
TEC current	I <sub>TEC</sub>	continuous	-	1.7	A
ESD	-	HBM: R = 1500 Ω, C = 100 pF	-500	500	V

**Electrical/Optical Characteristics**

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Operating Case Temperature <sup>1</sup>	T <sub>OP</sub>	-	-20	25	65	°C
Optical Output Power	P <sub>O</sub>	40 mW version, T = T <sub>set</sub> , I <sub>F</sub> = I <sub>OP</sub> 50 mW version, T = T <sub>set</sub> , I <sub>F</sub> = I <sub>OP</sub> 63 mW version, T = T <sub>set</sub> , I <sub>F</sub> = I <sub>OP</sub>	40 50 63	- - -	- - -	mW
Threshold Current	I <sub>TH</sub>	BOL	-	-	40	mA
Operating Current	I <sub>OP</sub>	40 mW version, BOL 50 mW version, BOL 63 mW version, BOL	- - -	- - -	330 380 380	mA
Laser Bias Forward Voltage	V <sub>OP</sub>	BOL, I <sub>F</sub> = I <sub>OP</sub>	-	-	2.5	V
Wavelength	λ <sub>OP</sub>	T = T <sub>set</sub> , I <sub>F</sub> = I <sub>OP</sub>	See Page 4			nm
Spectral Linewidth <sup>(1)</sup>	Δλ	T = T <sub>set</sub> , I <sub>F</sub> = I <sub>OP</sub> , FWHM	-	-	1.0	MHz
Optical Isolation	ISO	-	32	-	-	dB
Optical Return Loss	ORL	-	40	-	-	dB
Sidemode Suppression Ratio	SMSR	-	30	-	-	dB
Polarization Extinction Ratio	PER	I <sub>F</sub> = I <sub>OP</sub>	17	-	-	dB
Wavelength Drift Over T <sub>C</sub> Range	Δλ <sub>TOP</sub>	T = T <sub>OP</sub>	-	-	40	pm
Relative Intensity Noise	RIN	-	-	-	-163	dB/Hz
Monitor PD Current	I <sub>MPD</sub>	I <sub>F</sub> = I <sub>OP</sub> , V <sub>MPD</sub> = -5 V	100	-	2500	μA
Monitor PD Dark Current	I <sub>D</sub>	I <sub>OP</sub> = 0 mA, V <sub>MPD</sub> = -5 V	-	-	0.2	μA
Thermistor Resistance	R <sub>TH</sub>	T <sub>OP</sub> = 25 °C	9.5	10.0	10.5	KΩ
Thermistor Temp. Coefficients	T <sub>C</sub> TH	T <sub>OP</sub> = 25 °C	-	-4.4	-	%/°C
TEC Current	I <sub>TEC</sub>	-20°C < T <sub>C</sub> < +65°C	-1.0	-	+1.5	A
TEC Voltage	V <sub>TEC</sub>	-20°C < T <sub>C</sub> < +65°C	-2.0	-	+3.0	V

<sup>(1)</sup> Linewidth (Δν) is calculated using the below formula:

$$\Delta\nu = \Delta RIN(f) \{16\pi(D\lambda^2 L/c)^2 f^2\}^{-1}$$

Where:

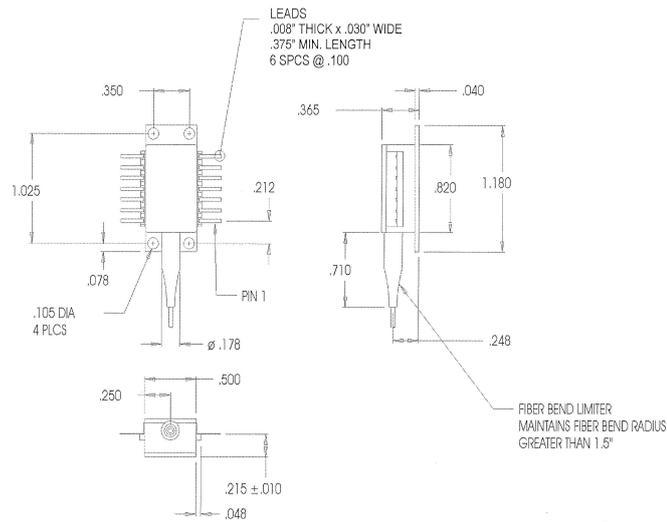
D = fiber dispersion; L = fiber length (65km); C = velocity of light in free space (3.00E+8); λ = opt center wavelength

ΔRIN(f) = RIN through fiber (RIN<sub>65km</sub> - RIN<sub>0km</sub>); f = the measurement frequency (860MHz)

**Model 1772 DWDM High Power  
CW Source Laser**

**DATASHEET | FEBRUARY 05, 2010**

**Outline Drawing**



**Pin Assignments**

Pin	Function
1	Thermistor
2	Thermistor
3	Laser DC Bias (-)
4	MPD Anode
5	MPD Cathode
6	TEC (+, current in cools)
7	TEC (-)
8	Case Ground
9	Case Ground
10	No Connection
11	Laser Common (+), case ground
12	Laser Modulation (-)
13	Laser Common (+)
14	No Connection

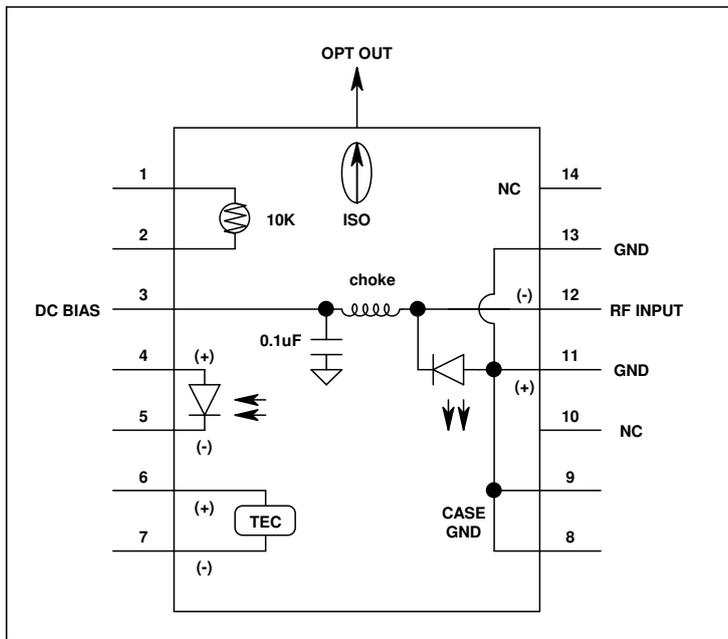
**Model 1772 DWDM High Power  
CW Source Laser**

**DATASHEET | FEBRUARY 05, 2010**

**ITU Grid Channel Numbering**

Please contact Emcore Sales for ITU wavelength channel availability.

**Package Schematic**



**Model 1772 DWDM High Power  
CW Source Laser**

DATASHEET | FEBRUARY 05, 2010

**Laser Safety**

**Class 1M Laser Product**

This product meets the appropriate standard in Title 21 of the Code of Federal Regulations (CFR). FDA/CDRH Class 1M laser product. This device has been classified with the FDA/CDRH under accession number 0220732. All Versions of this laser are Class 1M laser product, tested according to IEC 60825-1:2007/EN 60825-1:2007

Single-mode fiber pigtail with FC/APC connectors (standard).

Wavelength = 1.5  $\mu\text{m}$ .

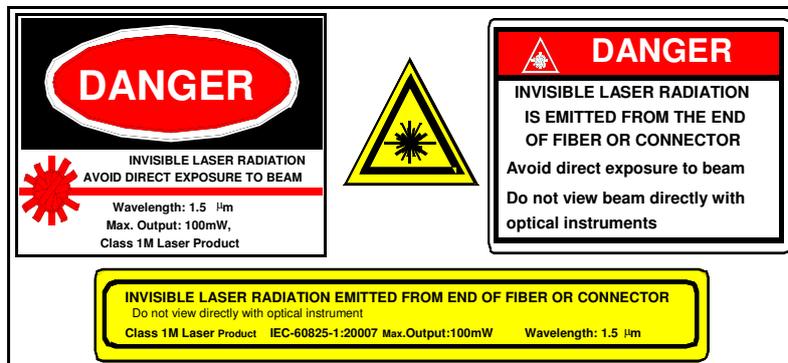
Maximum power = 100 mW.

Because of size constraints, laser safety labeling (including an FDA class 1M label) is not affixed to the module, but attached to the outside of the shipping carton.

Product is not shipped with power supply.

**Caution: Use of controls, adjustments and procedures other than those specified herein may result in hazardous laser radiation exposure.**

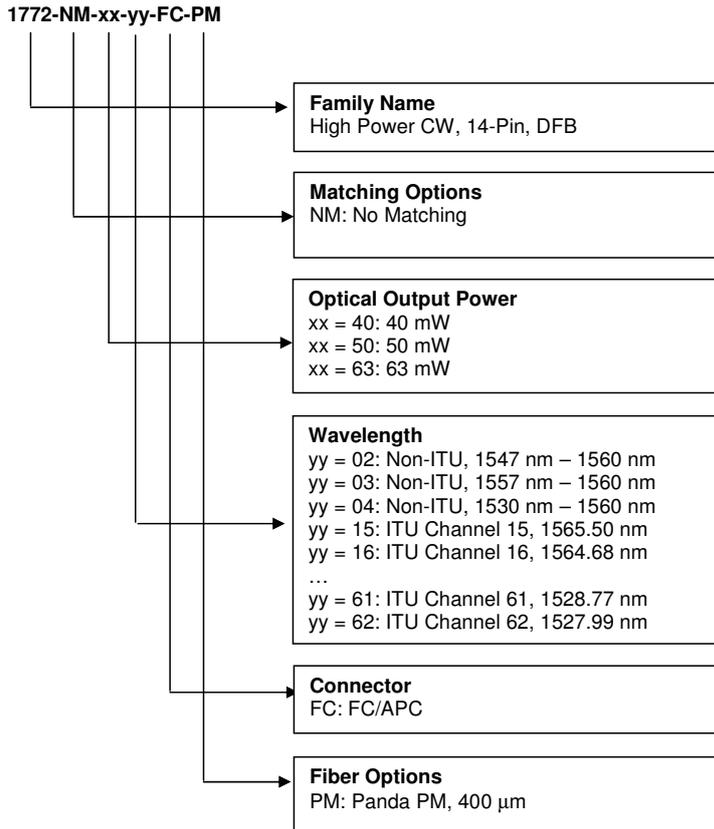
**Viewing the laser output with certain optical instruments (for example, eye loupes, magnifiers and microscopes) within a distance of 100 mm may pose an eye hazard.**



**Model 1772 DWDM High Power  
CW Source Laser**

**DATASHEET | FEBRUARY 05, 2010**

**Ordering Code Definitions**



**Example**

**1772-NM-63-43-FC-PM:** 1772, 63 mW minimum output power, ITU channel 43, 1542.94 nm, FC/APC, Panda PM, 400 micron buffer. Please contact Emcore Sales for current ITU wavelength channel availability.

Information contained herein is deemed to be reliable and accurate as of issue date. EMCORE reserves the right to change the design or specifications of product at any time without notice. EMCORE and the EMCORE logo are trademarks of EMCORE Corporation.

**TEST DATA SHEET – MODEL 1772 1550 nm HIGH POWER DFB  
CW SOURCE LASER MODULE**

		TDS-409334 Rev J		Ref: PS-1772		
		Date: 4/2/08				
Part Number: 1772-006-034 (Note 1,2)		S/N: F285413		DATE: 11/18/09		
OPERATOR: KP						
PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	MAX	MEASURED	UNIT
Fiber Output Power	$P_F$	$T=T_{op}, I_F=I_{op}$	See PS-1772		40.42	mW
Operating Current	$I_{OP}$	$T=T_{op}$	-	See PS-1772	290.1	mA
Operating Temperature	$T_{OP}$	$I_F = I_{op}$	See PS-1772	See PS-1772	33.06	°C
Threshold Current	$I_{TH}$	$T = T_{op}, BOL$	-	See PS-1772	24.22	mA
Slope Efficiency	$\eta$	$T = Top$	See PS-1772		0.138	mW/mA
Operating Voltage	$V_{OP}$	$T=T_{op}, I_F = I_{op}$	-	See PS-1772	1.93	V
Kink Free Operation	-	From $I_{th}+10$ mA to $1.15 \times I_{OP}$	-	-	Pass	Pass/Fail
Monitor Photo Diode Current	$I_{MPD}$	$T=T_{op}, I_F = I_{op}$ $V_{MPD}=5V$	See PS-1772	See PS-1772	497.4	µA
Center Wavelength - PS-1772	$\lambda$	$I_F=I_{op}$ mA, $T=T_{op}$ Tolerance: $\pm 0.05$	See PS-1772		1550.17	nm
Relative Intensity Noise Through Fiber	RIN-Through-Fiber	$T_{op} = 25^\circ C, I_F = I_{op}$ mA, measured at 860 MHz	-	See PS-1772	-159.31	dB/Hz
DC Side-Mode Suppression Ratio	SMSR	$T_{op}=25^\circ C, I_F=I_{op}$ mA	See PS-1772	-	57.65	dB
Polarization Error Ratio	PER	$Top=25^\circ C$	See PS-1772	-	30	dB
Slow Axis Alignment	-	$Top=25^\circ C, I_F=I_{op}$ mA	-	-	PASS	Pass/Fail

## Notes

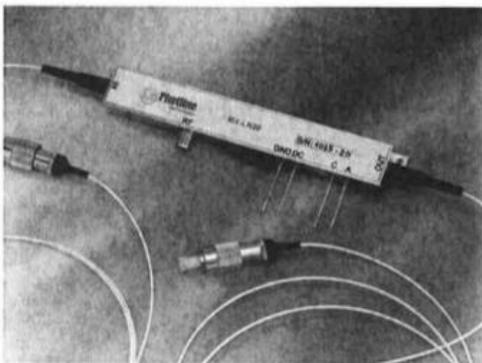
1. Numerical value to be consistent with PS-1772 part numbers.
2. Use ATP-20289 for testing parameters on TDS.

## A.3 Datenblatt von 10 Gbit/s Modulator



**Photline**  
Technologies

MX-LN-10/20 Lithium Niobate  
10 & 20 Gb/s Intensity Modulators



### Description

The MX-LN series of intensity modulators is a complete family of high performance modulators designed for integration in transmission systems and modules at 10 Gb/s or 20 Gb/s.

These modulators are built with titanium in-diffused lithium niobate waveguides that offer long-term stability and temperature independent performance.

MX-LN series boasts a chirp-free x-cut design which makes these modulators ideal for long and ultra-long haul transmission.

Whether for point to point or for Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) optical transmissions, these modulators operate equally well with return-to-zero (RZ), non return-to-zero (NRZ) and duobinary modulation formats.

### Features

- Extended bandwidth for efficient FEC implementation and 12.5 Gb/s effective bit rate (MX-LN-10) or 25 Gb/s bit rate (MX-LN-20)
- SONET OC-192 and SDH STM-64 compatible (MX-LN-10)
- Optimized for NRZ and RZ modulation schemes
- Broad wavelength range for DWDM transmission; work in C and L bands
- Bias electrode separated from RF input for easy implementation (no need for bias T)
- Low drive voltage

### Options

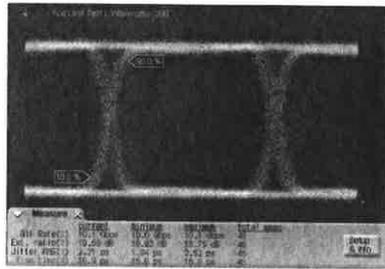
- Internal monitoring photodiode
- Choice of input and output fibers
- 1300 nm version
- CMD model with integrated RF driver
- MXPE model with very high extinction ratio for specific applications

### Related Equipments

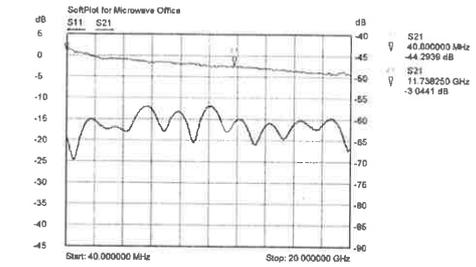
- Optimized external RF drivers : DR-GA series
- Bias Voltage Controller : MBC-1000
- ModBox's



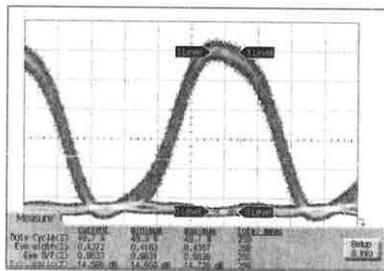
Typical  
CURVES



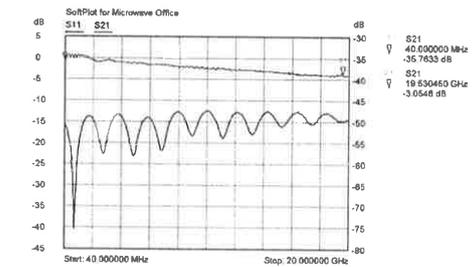
10 Gb/s NRZ eye diagram



MX-LN-10 electro-optic bandwidth

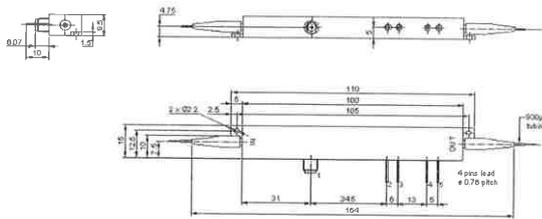


10 Gb/s RZ eye diagram



MX-LN-20 electro-optic bandwidth

Package  
FOOTPRINT



dimensions in mm

- 1 RF INPUT
- 2 GROUND
- 3 BIAS INPUT
- 4 PHOTODIODE CATHODE
- 5 PHOTODIODE ANODE





## MX-LN-10/20 Lithium Niobate 10 & 20 Gb/s Intensity Modulators

Specifications

Electrical		Min	Typ	Max
$V_{\pi}$ DC electrodes	V		6.5	7
MX-LN-10 $V_{\pi}$ RF electrodes @ 50 kHz	V		5.1	5.5
MX-LN-10 $V_{\pi}$ RF electrodes @ 10 Gb/s PRBS	V		5.5	6
MX-LN-20 $V_{\pi}$ RF electrodes @ 20 GHz	V		7.5	8
MX-LN-10 electro-optic bandwidth $S_{21}$ @-3 dB	GHz	10	12	
MX-LN-20 electro-optic bandwidth $S_{21}$ @-3 dB	GHz	18	20	
Ripple	dB		0.5	1
Electrical return loss $S_{11}$ 0-20 GHz	dB		-12	-10
Input resistance RF connector	$\Omega$		40	
Input resistance DC connector	$\Omega$		>1 M	
Internal photodiode responsivity (ref: input power) <sup>(1)</sup>	A/W	0.015	0.025	0.035
Optical				
Crystal	Lithium Niobate X-Cut Y-Prop			
Waveguide process	Titanium indiffusion			
Insertion loss	dB		-4	-5
Optical return loss	dB		<-40	
Wavelength dependent loss (1480-1600 nm)	dB		0.5	1
DC extinction ratio	dB	20	22	
MX-LN-10 dynamic extinction ratio @ 10 Gb/s PRBS NRZ	dB	13	14	
Chirp parameter		-0.1	0	0.1
MX-LN-10 BER power penalty @ 850 ps/nm, 10 Gb/s PRBS	dB	1.1	1.2	1.3
Extinction ratio of internal photodiode <sup>(1)</sup>	dB		3	6
Interfaces				
Input fiber	Polarization maintaining , SM-15-P-8/125UV/UV-400 length : 1.5 meter, buffer diameter : 900 $\mu$ m			
Output fiber	Single mode type , SMF-28 length : 1.5 meter, buffer diameter : 900 $\mu$ m			
Output fiber (option)	Polarization maintaining , SM-15-P-8/125UV/UV-400 length : 1.5 meter, buffer diameter : 900 $\mu$ m			
Package size	100 x 15 x 9.5 mm <sup>3</sup>			
Input RF connector	Wiltron Female K			
DC connectors	pin feed through diameter 1.0 mm			
Photodiode connectors <sup>(1)</sup>	pin feed through diameter 1.0 mm			
Environmental				
Operating temperature	0°C to +70°C			
Storage temperature	-40°C to +85°C			
Maximum ratings				
Maximum voltage on DC input	$\pm$ 20 V			
Maximum RF input power	+28 dBm			
Maximum optical input power	+20 dBm			

(1) : when option internal photodiode is selected



## A.4 Datenblatt von 10 Gbit/s Modulatortreiber



*LA Techniques Ltd*

**LA32-04-07**  
High Speed NRZ Driver Amplifier



The LA32-04-07 is a driver amplifier mainly intended for use as an NRZ optical modulator driver. It is able to support data rates up to 12 Gb/s with good pulse response and low jitter. Some of its key features are as follows.

- 30 kHz - 15 GHz Bandwidth
- $> 7 v_{pp}$  Eye Opening Output
- Low power dissipation ( $< 4$  W)
- Pulse symmetry adjustment
- Output level control
- Output level detector
- Bias-tee in output
- Hermetically sealed

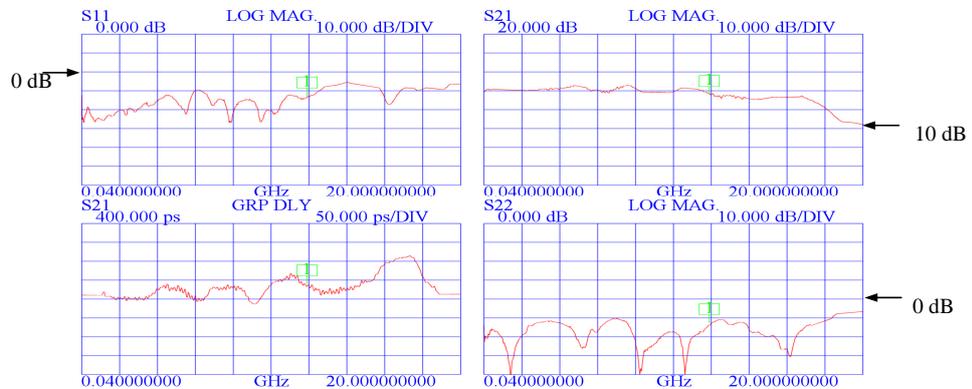
DW96629\_2 Apr 10

**Electrical Specification**  
(-5°C to +70°C Case Temperature)

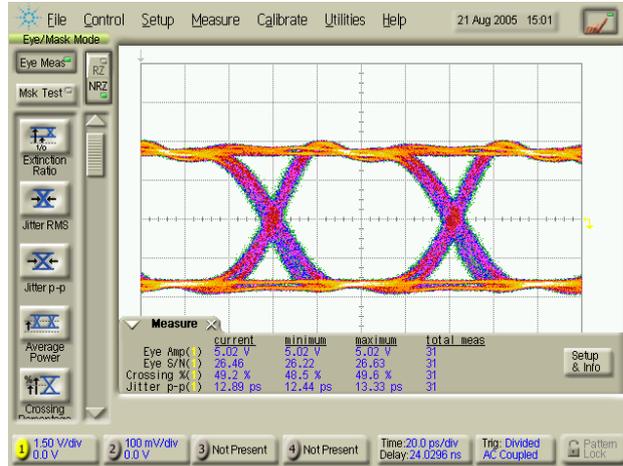
Parameter	Units	Min	Typ	Max
Bandwidth				
Low frequency 3 dB point	kHz	-	30	100
High frequency 3 dB point	GHz	12	15	-
Gain (mean, inverting)	dB	22	29	-
Gain ripple				
500 kHz - 10 GHz	dB	-	±2	-
Input range (no damage)	V <sub>pp</sub>	-	-	1.5
Input return loss (f < 10 GHz)	-	8	12	-
Output return loss (f < 12 GHz)	-	8	12	-
Output voltage <sup>2</sup> , V <sub>max</sub>	V <sub>pp</sub>	6.5	7.5	-
Output voltage range	V <sub>pp</sub>	3.5	-	V <sub>max</sub>
Output voltage control voltage	V	-10	-	0
Output with -10V control voltage	V <sub>pp</sub>	-	2.0	3.5
Detector output (Vref-Vdet) range <sup>4</sup>	mV	-300	-	0
Detector output resistance <sup>4</sup>	kΩ	-	1	-
Pulse characteristics <sup>1,2,3</sup>				
Rise / Fall time (10-90%)	ps	-	35	40
Pulse jitter	ps	-	-	12
Eye S/N	-	12	19	-
Pulse symmetry adjustment range <sup>1,3</sup>	%	45	-	55
Symmetry control voltage range	V	-5	-	+5
RF Output bias-T				
dc path resistance	kΩ	-	1.0	2
maximum voltage	V	-10	-	+15
Supply voltage (positive) <sup>5</sup>	V	+10.5	+11	+11.5
Supply current (positive) <sup>1,2,3</sup>	mA	-	280	380
Supply voltage (negative) <sup>5</sup>	V	-4.5	-5	-6
Supply current (negative)	mA	-	8	13
Operating case temperature	°C	-5	-	+70

- Notes:**
- 12 Gb/s 2<sup>23</sup>-1 PRBS data
  - 0.7 V<sub>pp</sub> input drive
  - Output set to 6 V<sub>pp</sub>. Jitter excludes measured test signal jitter
  - Vdet and Vref pins require external biasing using 2 resistors network
  - Supply voltage sequence: -5V to be applied before +11V
  - Output taken to be Eye Amplitude on Agilent 86100A oscilloscope

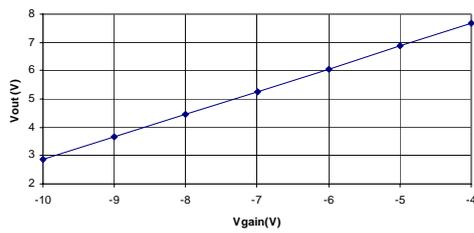
**Small Signal Characteristics**



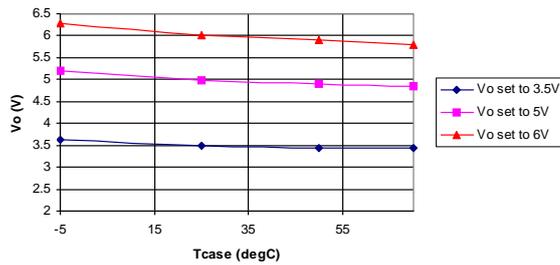
**12 Gb/s 2<sup>31</sup>-1 PRBS Eye Diagram  
Mean Eye Opening set to 5V**



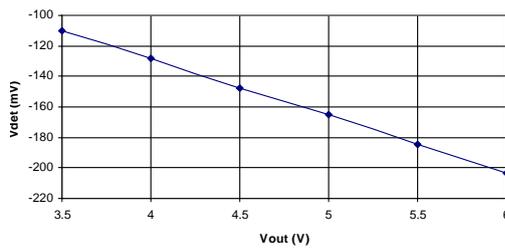
Variation of Eye Amplitude with Control Voltage



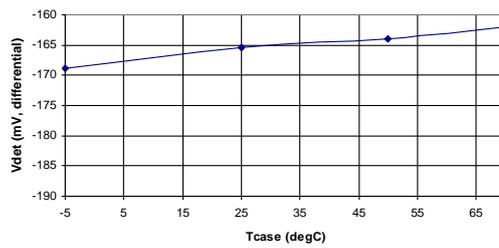
Output Amplitude vs Temperature



Detector Output (differential) vs Output Voltage

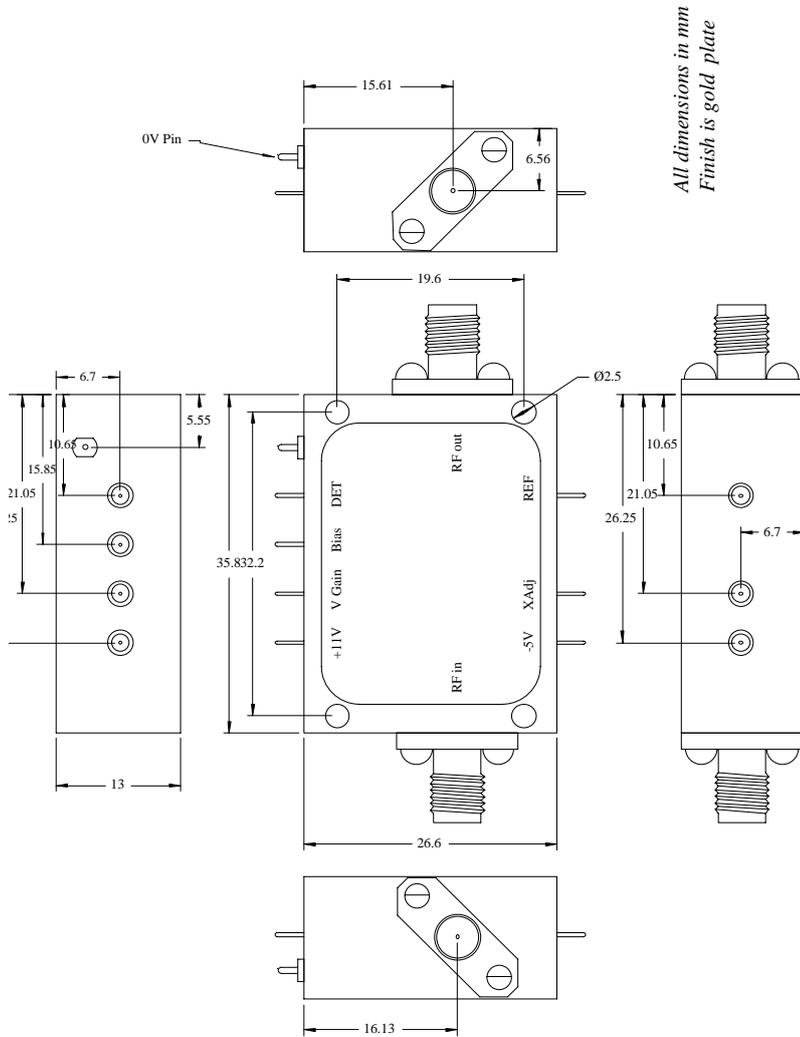


Detector Output (differential) vs Temperature (Vo set: 5V)

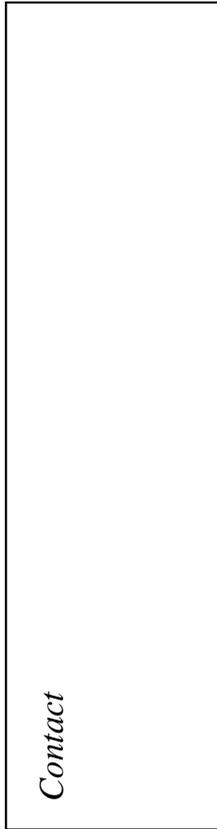


**Absolute Maximum Ratings**

Parameter	Specification	Parameter	Specification
Input Level (RF)	1.5 Vpp	Symmetry voltage (Xadj pin)	-6V to +6V
dc Level on any RF port	±15V	Bias voltage (Bias pin)	-10V to +15V
Supply voltage (+11V pin)	-2V to +12V	Bias pin current	+8 mA
Supply voltage (-5V pin)	-6V to +2V	dc Level on detector (Det pin)	±15V
Control voltage (Vc pin)	-16V to 0V	Storage temperature	-40 to +100°C



All dimensions in mm  
Finish is gold plate



Contact

Manufactured in the UK  
Specification subject to change without notification



LA Techniques Ltd  
Chancerygate Business Centre, Unit 5  
Red Lion Road, Surrey KT6 7RA, England  
[www.latechniques.com](http://www.latechniques.com)

## A.5 Datenblatt von 40 Gbit/s Modulator



### MX-LN INTENSITY MODULATOR ACCEPTANCE TESTS REPORT

This product is manufactured in France by **PHOTLINE Technologies**.

Product identity
<b>MX-LN-40-PD-P-P-FA-FA</b>
Fabrication serial number
<b>2331-04</b>
Packaging serial number
<b>0967</b>

For detailed information about modulators parameters and measurement methods, please refer to the note "A Review Of Modulators Specifications". This document is downloadable from Photline Technologies website : [www.photline.com](http://www.photline.com)

10100011001010100101010101010111010110101101

01001011101010010011101011010110110110110101001010001

Open the eye with Photline – [www.photline.com](http://www.photline.com) - [contact@photline.com](mailto:contact@photline.com)

110101001011101010010



## MX-LN INTENSITY MODULATOR ACCEPTANCE TESTS REPORT

### Precautions of use :

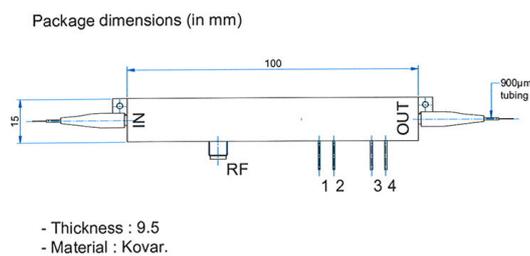
In order to avoid any damage to the modulator and to keep its performance at maximum, please pay a special attention to the following :

- When handling the modulator, do not apply any excessive tensile strength neither bend on the fiber pigtailed.
- Always keep the optical connectors end face protected and clean the optical connector end face with appropriate tissue before connecting.
- Clean RF connector with dry air before mating and use a torque wrench for tightening.
- Respect maximum ratings mentioned below.
- At the maximum optical power, fusion spliced are expressly recommended to avoid permanent damage on optical connectors.

Maximum Ratings		
Maximum voltage on DC input	V	+/-20
Maximum RF input power (CW mode)	dBm	+28
Maximum optical input power (CW mode)	dBm	+20

Environmental		
Operating temperature	°C	0 to 70
Storage temperature	°C	-40 to 85

### Product dimension and pin-out :



RF	RF INPUT
1	GROUND (NC when phase modulator)
2	BIAS INPUT ( NC when phase modulator)
3	PHOTODIODE CATHODE (when PD option is selected)
4	PHOTODIODE ANODE ((when PD option is selected)





## MX-LN INTENSITY MODULATOR ACCEPTANCE TESTS REPORT

Packaging-interfaces	
Input fiber	Polarization maintaining, Panda type
Output fiber	Polarization maintaining, Panda type
Input optical connector (orientation)	FC/APC – Key // slow axis
Output optical connector (orientation)	FC/APC – Key // slow axis
Input RF connector	50 $\Omega$ Wiltron female V
Input DC connector	Pin feed through diameter 1.0 mm
Output Internal Photodiode	Pin feed through diameter 1.0 mm
Fiber Length	1.5 meter, buffer diameter: 900 $\mu$ m
Package sizes	100 x 15 x 9.5 mm <sup>3</sup>

### Measured parameters

Electrical		
$V_{\pi}$ DC Port @ 100Hz @ 1550 nm	V	6.6
$V_{\pi}$ RF Port @ 50kHz @ 1550 nm	V	5.2
Electrical return loss $S_{11}$ 0.04 – 20 GHz	dB	<-10
Electro-optic bandwidth $S_{21}$ @ -3 dB, from 2 GHz	GHz	28
Internal photodiode responsivity (ref : input power)	AW	0.003
Optical		
Crystal: Lithium Niobate (LiNbO <sub>3</sub> )	Lithium Niobate X-cut Y-prop	
Waveguide process	Titanium indiffusion	
DC extinction ratio	dB	>25
Insertion loss	dB	3.8
Optical return loss	dB	<-45

Position	Name/Visa	Date
Test engineer	E. Leclerc	2009-12-18
Quality	V. Buin	2009-12-18

Photline technologies  
 Phone : +33 (0) 381 853 180  
 Fax : +33 (0) 381 811 557  
 16 rue Auguste Jouchoux  
 F-25000 Besançon -FRANCE

10100011001010100101010101010111010110101101  
 0100101110101001001110101101011011011010101001010001  
 110101001011101010010

Open the eye with Photline – [www.photline.com](http://www.photline.com) - [contact@photline.com](mailto:contact@photline.com)

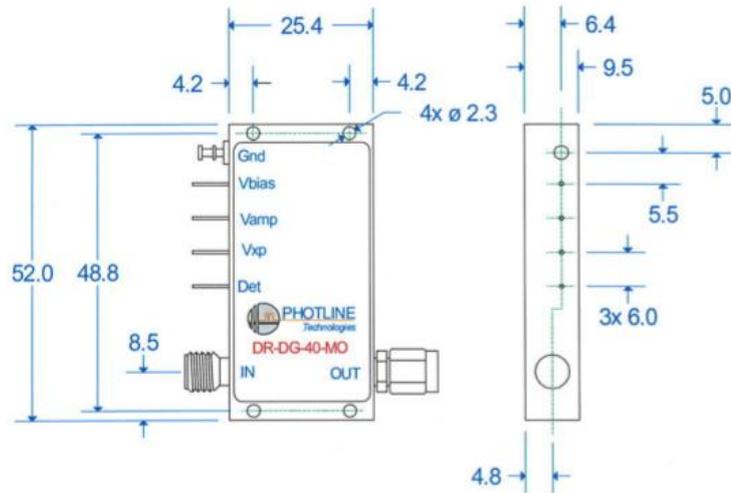
## A.6 Datenblatt von 40 Gbit/s Modulatortreiber



**Description:**

The DR-DG-40-MO is a non-inverting single-ended driver module for 40Gb/s applications.

**Package outline and pins (all dimensions in mm) :**



**Recommended Operating Sequence:**

**Bias on:**

1. Ensure that input RF source (for example Pulse Pattern Generator, PPG) is off
2. Attach a 50 Ohm load to output before supplying dc power to the amplifier
3. Connect ground to the ground pin
4. Apply 0 V to +Vbias pin
5. Apply 0 V to Vamp pin
6. Apply 0V to Vxp pin
7. Apply +8V to +8V pin
8. Switch RF source/PPG connected to driver input on (1V maximum)
9. Adjust dc voltage applied to Vamp pin between 0 V and +2 V for desired output voltage  
Adjust dc voltage applied to Vxp pin between 0 V to 2.2 V for desired cross point





## DRIVER DR-DG-40-MO USER GUIDE

### Bias off:

10. Disable RF source/PPG
11. Set Vamp to 0 V
12. Set Vxp to 0 V
13. Set VBias to 0 V

### Precautions:

- **GaAs FET driver amplifiers are sensitive to Electrostatic Discharge (ESD).**
- Ensure that connecting RF cables are discharged before connection to the driver input and output ports. Proper ESD precautions must be always followed before connecting and during handling, testing and using
- **Always ensure that the output port is 50 Ohms terminated before applying dc power.**
- **$V_{Bias}$ ,  $V_{amp}$  and  $V_{xp}$  must never be negative!**
- Respect all maxima and minima values in the "Absolute Maximum Ratings Table"
- $V_{amp}$  is used for gain control
- $V_{xp}$  is used for cross point control

Use adequate heat sink for thermal dissipation given in data sheet or order your driver with Photline heat sink option. Use specified operating bias voltage to avoid unnecessary power dissipation which will lead to the need of a larger heat sink!

### Absolute Maximum Ratings :

Parameter	Symbol	Unit	Min	Max
RF input voltage peak to peak	Vin	Vpp	-	1
Power supply voltage	Vbias	V	-	10
DC current	Idd	mA		400
Gain Control voltage	Vamp	V	0	2
Cross point control	Vxp	V	0	2.2V
Power Dissipation	Pdiss	W		3
Temperature of operation	Top	°C	-5	+ 70

10100011001010100101010101010111010110101101

01001011101010010011101011010110110110101001010001

Open the eye with Photline – [www.photline.com](http://www.photline.com) -

10101001011101010010

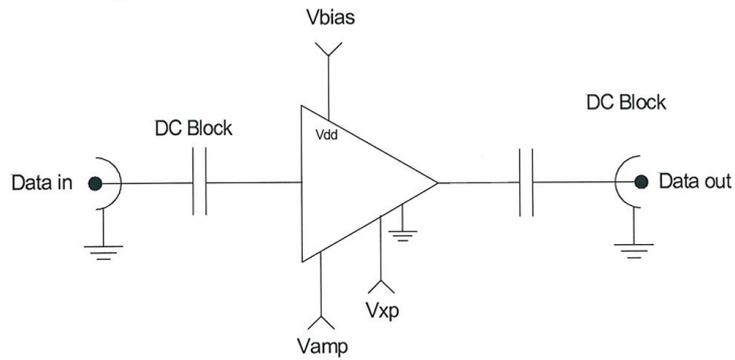


## DRIVER DR-DG-40-MO USER GUIDE

### DC Electrical Characteristics

Electrical ( DC & control PIN )				
	Min	Typ	Max	Unit
Vdd Driver voltage ( fixed )	7	8	10	V
Vdd Current consumption ( Idd )	-	300	370	mA
Vamp (Gain control voltage)	0	1.5	2	V
Vxp (Cross point control voltage)	0	2	2.2	V

### Electrical Schematic Diagram:



10100011001010100101010101010111010110101101

01001011101010010011101011010110110110110101001010001

Open the eye with Photline – [www.photline.com](http://www.photline.com) -

10101001011101010010

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Testaufbau zur Charakterisierung von optischen Empfängern . . . . .	3
2.2	Blockdiagramm einer optischen Quelle . . . . .	4
2.3	Bussystem . . . . .	5
2.4	Allgemeine Architektur des PON-Systems für FTTH-Umgebung . . . . .	6
3.1	1550 nm und 1310 nm Laserdioden in ihrem Gehäuse . . . . .	7
3.2	Gemessener Injektionsstrom als Funktion der Vorwärtsspannung (LD1550) . . . . .	8
3.3	Ausgangsleistung als Funktion des Eingangsstroms . . . . .	9
3.4	Monitorstrom als Funktion der Ausgangsleistung . . . . .	10
3.5	Berechnete Kennlinie von $R_{TH}$ als Funktion der Temperatur . . . . .	11
3.6	Gemessene Emissionsspektren . . . . .	11
3.7	Detaillierte Darstellung des gemessenen Spektrums von LD1310 . . . . .	12
3.8	DC-Simulationsmodell von LD1550 mit Gehäuse-Parasiten . . . . .	13
3.9	Darstellung von Ansteuerschaltungen zur Direktmodulation von Laserdioden . . . . .	15
3.10	Blockschaltbild des Laserdiodentreibers . . . . .	16
3.11	Gemessene optische Leistung in Abhängigkeit der DAC-Spannung . . . . .	19
3.12	Simulation des Frequenzganges der äußeren Schleife . . . . .	21
3.13	Simulation des Frequenzganges der inneren Schleife . . . . .	21
3.14	Berechnete Kennlinien von (a) Thermistor und (b) LM35 . . . . .	23
3.15	Schaltplan der Temperaturüberwachung . . . . .	24
3.16	Kompletter Schaltplan der Laserdiodenansteuerung . . . . .	25
3.17	Benutzerschnittstelle der Laserdiodenansteuerung . . . . .	28
3.18	Gemessene Leistungsmatrix von LDT1310 . . . . .	30
3.19	Gemessene Leistungsmatrix von LDT1550 . . . . .	30
3.20	Gemessener Frequenzgang der direkt modulierten LD1310 . . . . .	31
3.21	Gemessener Frequenzgang der direkt modulierten LD1550 . . . . .	32
3.22	DC-Auge der direkt modulierten LD1310 bei einer Datenrate von 1 Gbit/s . . . . .	33
3.23	AC-Auge der direkt modulierten LD1310 bei einer Datenrate von 3 Gbit/s . . . . .	34
3.24	AC-Auge der direkt modulierten LD1310 bei einer Datenrate von 6 Gbit/s . . . . .	34
3.25	DC-Auge der direkt modulierten LD1310 bei 1 Gbit/s mit größerem ER . . . . .	35
3.26	Rechteck bei 500 MHz der direkt modulierten LD1310 . . . . .	35
3.27	AC-Auge der direkt modulierten LD1550 bei einer Datenrate von 350 Mbit/s . . . . .	36
4.1	Mach-Zehnder-Modulator . . . . .	38
4.2	Gemessenes Einschaltverhalten der Versorgungsspannungen von MD10 . . . . .	39
4.3	Gemessenes Ausschaltverhalten der Versorgungsspannungen von MD10 . . . . .	40
4.4	Gemessene MD40-Kennlinien . . . . .	41

4.5	Kompletter Schaltplan der 10 Gbit/s-Modulation . . . . .	42
4.6	Kompletter Schaltplan der 40 Gbit/s-Modulation . . . . .	43
4.7	Benutzerschnittstelle der 10 Gbit/s Modulation . . . . .	47
4.8	Benutzerschnittstelle der 40 Gbit/s Modulation . . . . .	48
4.9	Gemessener Frequenzgang von MD10 . . . . .	49
4.10	Gemessener Frequenzgang von MD40 . . . . .	49
4.11	DC-Auge von MD10 bei einer Datenrate von 10 Gbit/s . . . . .	50
4.12	DC-Auge von MD10 bei einer Datenrate von 12 Gbit/s . . . . .	50
4.13	AC-Auge von MD40 bei einer Datenrate von 20 Gbit/s . . . . .	51
4.14	Extinktionsverhältnis von MD40 . . . . .	51
5.1	Variabel einstellbare optische Dämpfung . . . . .	54
5.2	Prinzipschaltplan des logarithmischen Leistungsmessers . . . . .	54
5.3	Kompletter Schaltplan der Leistungsanpassung . . . . .	56
5.4	Benutzerschnittstelle der Leistungsanpassung . . . . .	58
5.5	Gemessene Ausgangsleistungskennlinien des Leistungsmesser . . . . .	58
6.1	Burst-Mode der schnellen Laserquelle . . . . .	60
6.2	Burst-Mode der schnellen Laserquelle mit kurzer Ausschaltfolge . . . . .	61
6.3	Burst-Mode der schnellen Laserquelle mit langer Ausschaltfolge . . . . .	61
6.4	Burst-Mode der schnellen Laserquelle mit steigender Leistung . . . . .	62
6.5	Burst-Mode der langsamen Laserquelle . . . . .	62

*So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig,  
man muss sie für fertig erklären,  
wenn man nach Zeit und Umständen  
das mögliche getan hat.*

Johann Wolfgang von Goethe