

Dissertation

# Skalierung der Signalmodenanzahl in Erbium-dotierten Faserverstärkern für optische Übertragungssysteme mit Modenmultiplex

Steffen Jeurink

August 2021



Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik

Genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dortmund.

Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Peter M. Krummrich, TU Dortmund
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Klaus Petermann, TU Berlin
Ort und Tag der Einreichung:	Dortmund, 03.06.2020
Ort und Tag der mündlichen Prüfung:	Dortmund, 23.11.2020

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Zunächst gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter M. Krummrich, der mir die Möglichkeit zur Promotion eröffnet hat und mir während meiner Zeit am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der TU Dortmund stets unterstützend zur Seite stand. Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Petermann danke ich für viele konstruktive Diskussionen bei gemeinsamen Projekttreffen und für die Bereitschaft, die Zweitprüferschaft dieser Arbeit zu übernehmen.

Für das Korrekturlesen dieser Arbeit bedanke ich mich bei Christian Spenner, Inga Rittner, Julia Jeurink und Thien Trang Do. Außerdem bedanke ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik für viele hilfreiche Fachdiskussionen und Anregungen.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich stets unterstützt hat.



# Kurzfassung

Studien zur Internetnutzung zeigen, dass in den vergangenen Jahrzehnten ein exponentieller Anstieg des globalen Datenverkehrs stattgefunden hat und dass dieser sich in den nächsten Jahren fortsetzen wird. Treiber dieses Anstiegs sind aktuell Musik- und Video-Streaming sowie in naher Zukunft Computerspiele-Streaming und das Internet-of-Things. In der Vergangenheit konnten optische Weitverkehrs-Übertragungssysteme mit dem steigendem Bedarf skalieren und gleichzeitig die Kosten pro übertragenem Bit gesenkt werden. Seit dem Ende der 1980er Jahre stieg die Übertragungskapazität pro Glasfaser um einen Faktor  $> 10^4$ .

In absehbarer Zeit werden die heute verwendeten Einmodensysteme jedoch die theoretisch maximale Übertragungskapazität pro Faser erreichen. Eine weitere Steigerung der gesamten Übertragungskapazität ist dann nur durch den parallelen Betrieb mehrerer solcher Systeme möglich. In der Forschung wird nach Möglichkeiten gesucht, die eine Senkung der Kosten pro Bit durch eine Steigerung der Übertragungskapazität pro Faser, vergleichbar mit denen der Einmodensysteme in den letzten Jahrzehnten, versprechen. Raummultiplexverfahren bieten ein solches Potenzial durch Ausnutzung des letzten verbliebenen Freiheitsgrades zum Signalmultiplex: des Raumes. Ein Raummultiplexverfahren kann sich wirtschaftlich nur durchsetzen, wenn es eine Steigerung der Übertragungskapazität um zwei Größenordnungen erlaubt und mit bestehenden Multiplexverfahren, wie dem Wellenlängenmultiplex, gemeinsam betrieben werden kann. Außerdem sollte die Anzahl der räumlichen Kanäle im Betrieb aufgerüstet werden können, um die Übertragungskapazität zu steigern. Raummultiplex mit Vielmodenfasern ist ein vielversprechendes Verfahren, das diesen Anforderungen entspricht. Für das gewählte Multiplexverfahren sollte außerdem ein Verstärker verfügbar sein, mit dem alle Signalkanäle simultan verstärkt werden können. In dieser Arbeit werden Erbium-dotierte Faserverstärker für optische Übertragungssysteme mit Modenmultiplex auf die genannten Kriterien hin untersucht. Die in Einmodensystemen verwendeten Erbium-dotierten Faserverstärker erlauben eine energieeffiziente, breitbandige Verstärkung von Signalen in der optischen Ebene. Das Hauptproblem in der Verwendung Erbium-dotierter Faserverstärker für Vielmodenfasern liegt in der Erzielung identischer Signalgewinne für alle Signalmoden. Unterschiedliche Gewinne für verschiedene Signalmoden können zu Verschlechterungen der Signalqualität führen.

Mit den durchgeführten Arbeiten konnte gezeigt werden, dass sich Erbium-dotierte Faserverstärker eignen, um mehr als 100 Signalmoden in Kombination mit bestehenden Multiplexverfahren in zukünftigen Übertragungssystemen mit Modenmultiplex simultan zu verstärken. Verschiedene Verfahren zur Angleichung der Gewinne aller räumlichen Kanäle, durch Anpassung der Pumpleistung, der radialen Verteilung der Erbium-Dotierung im Faserkern sowie unter Ausnutzung von Sättigungseffekten, werden vorgestellt. Außerdem werden Szenarien untersucht, bei denen die Anzahl der räumlichen Kanäle zur Laufzeit erhöht wird, um eine Steigerung der Übertragungskapazität zu erreichen.

Insgesamt zeigt diese Arbeit, dass die Anzahl der nutzbaren räumlichen Kanäle zukünftiger

Modenmultiplexsysteme vermutlich nicht durch die Verwendung von optischen Verstärkern limitiert wird.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2. Theoretische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1. Aufbau eines optischen Übertragungssystems . . . . .	7
2.2. Multiplexverfahren in optischen Übertragungssystemen . . . . .	9
2.2.1. Zeitmultiplex . . . . .	10
2.2.2. Wellenlängenmultiplex . . . . .	11
2.2.3. Polarisationsmultiplex . . . . .	12
2.2.4. Raummultiplex . . . . .	13
2.3. Ausbreitungsfähige Moden in Glasfaser . . . . .	16
2.3.1. Wellengleichung . . . . .	17
2.3.2. Brechzahlprofile . . . . .	18
2.3.3. Effektive Modenfeldflächen . . . . .	22
2.4. Störeffekte in optischen Übertragungssystemen . . . . .	22
2.4.1. Dämpfung . . . . .	23
2.4.2. Modendispersion und Modenkopplung . . . . .	24
2.4.3. Modenabhängige Verluste und Gewinne . . . . .	26
2.5. Erbium-dotierte Faserverstärker . . . . .	27
2.5.1. Energieniveaus und Linienverbreiterung . . . . .	27
2.5.2. Drei-Niveau-Laser und Ratengleichungen . . . . .	30
2.5.3. Leistungspegelverläufe . . . . .	33
2.5.4. Rauschverhalten . . . . .	34
2.5.5. Sättigungsverhalten . . . . .	35
2.5.6. Wellenlängenabhängigkeit des Gewinns . . . . .	39
2.5.7. Modenabhängigkeit des Gewinns . . . . .	40
2.5.8. Kaskadierung optischer Verstärker . . . . .	42
2.5.9. Numerische Simulation des Verstärkerhaltens . . . . .	43
<b>3. Modenabhängige Sättigung vielmodiger EDFA</b>	<b>47</b>
3.1. Gradientenbrechzahlprofil . . . . .	47
3.2. Stufenbrechzahlprofil . . . . .	54
3.3. Vergleich der Brechzahlprofile . . . . .	59
<b>4. Einfluss des Sättigungsverhaltens in einem Aufrüstszenario</b>	<b>61</b>
4.1. MDG in Abhängigkeit der Modenanzahl . . . . .	62
4.2. Rauschzahlen und Pumpleistung . . . . .	63
<b>5. Optimierung des Erbium-Dotierungsprofils</b>	<b>67</b>
5.1. Überlappintegrale zwischen Erbium-Dotierung und Signalmoden . . . . .	68

---

5.2. Optimierte Dotierungsprofile mit Gradientenbrechzahlprofil . . . . .	70
5.3. Optimierte Erbium-Dotierungsprofile mit Stufenbrechzahlprofil . . . . .	72
<b>6. Optimierung der Pumpleistungsverteilung bei 1480 nm</b>	<b>77</b>
6.1. Signal-Pump Überlappintegrale . . . . .	77
6.2. Iterative Optimierung der Pumpleistungsverteilung . . . . .	80
6.3. Zweistufiger Aufbau . . . . .	85
<b>7. Optimierung der Pumpleistungsverteilung durch Linearisierung im Arbeitspunkt</b>	<b>93</b>
7.1. Untersuchung einer skalierbaren Anzahl an Signalmoden . . . . .	94
7.2. Variation des Kernradius . . . . .	97
7.3. Kombination mit WDM . . . . .	100
<b>8. Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>105</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>109</b>
<b>Anhang</b>	<b>117</b>
<b>A. Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>117</b>

# 1. Einleitung und Motivation

Im Jahr 2022 wird es weltweit voraussichtlich 28,5 Milliarden mit dem Internet verbundene Geräte geben, die einen Datenverkehr von 396 Exabytes pro Monat erzeugen [1]. Im Vergleich zum Jahr 2017 mit 122 Exabyte pro Monat entspricht dies einem Anstieg um 26 % pro Jahr [1]. In Abbildung 1.1 ist eine Schätzung des Cisco Visual Networking Index für den weltweiten Datenverkehr bis zum Jahr 2022 dargestellt. Es ist ein exponentieller Anstieg an benötigter Übertragungskapazität zu erkennen. Auch in der weiter zurückliegenden Vergangenheit stieg

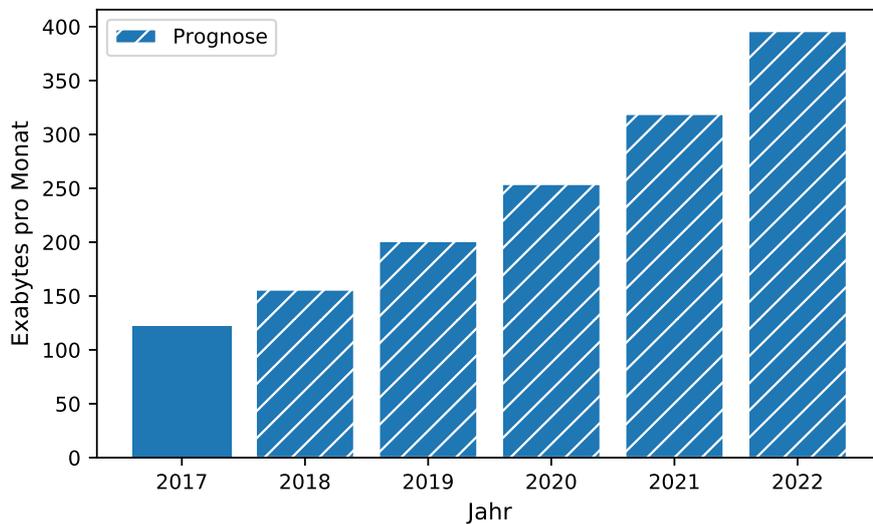


Abbildung 1.1.: Schätzung des weltweiten Datenverkehrs in Exabytes pro Monat von 2017 bis 2022 [1].

die weltweit benötigte Übertragungskapazität exponentiell an. In Tabelle 1.1 ist der weltweite Datenverkehr seit 1992 aufgetragen. Die im Jahr 1992 pro Tag übertragenen Daten wurden 1997 in einer Stunde und 2002 bereits in einer Sekunde übertragen. Wiederum 15 Jahre später wurden im Durchschnitt bereits 46 000 GB an Daten pro Sekunde übertragen.

Die jährlichen Wachstumsraten in den letzten Jahren an verschiedenen großen Internetknotenpunkten sind jedoch sehr unterschiedlich. Während die jährliche Wachstumsrate am Internetknoten DE-CIX in Frankfurt etwa 20 % beträgt, weist der Internetknoten AMS-IX in Amsterdam eine Wachstumsrate von 30 % pro Jahr auf und der Internetknoten SIX in Seattle sogar eine Wachstumsrate von 60 % pro Jahr [2–4]. Neben örtlichen Unterschieden verzeichnen auch einzelne Anwendungsbereiche ein deutlich stärkeres Wachstum als das in [1] prognostizierte globale Wachstum. In den vergangenen Jahren nahm vor allem das Streaming von immer höher auflösenden Videoinhalten stark zu. Im Jahr 2018 wurde 57,69 % des weltweiten Downstream-Datenverkehrs durch Video-Streaming erzeugt [5]. Die Anzahl der pro Minute hochgeladenen

Stunden an Videoinhalten auf YouTube steigt pro Jahr um etwa 50 % und die Nutzungsdauer des Streaming-Dienstes Netflix steigt pro Jahr sogar um 70 % (Stand: 2017) [6].

Tabelle 1.1.: Weltweiter Datenverkehr seit 1992 in Gigabyte pro Sekunde (GB/s) [1].

Jahr	Weltweiter Datenverkehr
1992	0,0012 GB/s bzw. 100 GB pro Tag
1997	0,028 GB/s bzw. 100 GB pro Stunde
2002	100 GB/s
2007	2000 GB/s
2017	46 600 GB/s

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der weltweite Bedarf an Übertragungskapazität exponentiell ansteigt und dass sich dieser Trend auch in Zukunft fortsetzen wird. Es stellt sich also die Frage, wie dieses exponentielle Wachstum durch zukünftige Weitverkehrs-Übertragungssysteme realisiert werden kann.

Glasfasernetze bilden, in Form von Unterseekabeln zur Verbindung von Kontinenten über mehrere 1000 km, zur Langstreckenübertragung an Land über bis zu 1000 km und zur Verbindung von Knotenpunkten in Metronetzen über einige 10 km, das Rückgrat des Internets. In Glasfasern werden Datensignale auf optische Strahlung im nahen Infrarotbereich moduliert, die durch Totalreflexion in der Faser geführt wird. Auf diese Weise kann die Strahlung nicht an den Seiten einer Glasfaser austreten und wird verlustarm in der Glasfaser übertragen. Durch die hohe Frequenz der Strahlung stehen in diesen optischen Wellenleitern große Bandbreiten im Bereich mehrerer THz zur Verfügung, während gleichzeitig eine niedrige Dämpfung von etwa 0,2 dB/km erreicht wird. In Kombination mit den niedrigen Herstellungskosten für Glasfasern von einigen wenigen Euro pro Kilometer machen diese Eigenschaften die optischen Übertragungssysteme zur einzigen Möglichkeit, Datenraten im Tbit/s-Bereich über große Distanzen im Bereich von 1000 km wirtschaftlich zu übertragen.

Bisher ist es gelungen, die exponentiell gestiegenen Datenmengen des Internets durch ein wachsendes Netz aus Glasfaserverbindungen zu übertragen. Durch eine ebenfalls exponentielle Erhöhung der Übertragungskapazität pro Glasfaser war es hierbei möglich, die Kosten pro übertragenem Bit an Nutzinformation kontinuierlich zu senken. Auf diese Weise konnte die verfügbare Übertragungskapazität erhöht werden, während die Kosten für den Endverbraucher annähernd konstant blieben oder sogar sanken. Die Übertragungskapazität kommerzieller optischer Übertragungssysteme der letzten Jahrzehnte ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Durch Fortschritte in der Optoelektronik stieg die Übertragungsrate pro Wellenlängenkanal exponentiell an [7]. In den 1990er Jahren stieg die Kapazität pro Faser außerdem durch die Einführung von Wellenlängenmultiplexbetrieb (WDM) und Erbium-dotierten Faserverstärkern (eng. Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA)) um 100 % pro Jahr an [7]. Die Anzahl der WDM-Kanäle stagniert allerdings bei  $\approx 100$  und die Steigerung der Übertragungskapazität pro Faser flachte auf etwa 20 % ab, da die verfügbare Verstärkerbandbreite der EDFA im C-Band mit WDM-Kanälen ausgefüllt ist.

Die Steigerung der nutzbaren Übertragungskapazität pro Faser wird jedoch voraussichtlich in einigen Jahren enden, da die Kapazität der verwendeten Einmodenfasern (eng. Single-Mode Fiber (SMF)) an physikalische Grenzen stößt [7–10]. Die maximal erreichbare spektrale Effizienz

einer SMF pro Polarisation beträgt je nach Abschätzung zwischen 8 bit/s/Hz und 8,8 bit/s/Hz für eine Übertragungsdistanz von 1000 km [10, 11]. Mit den Parametern aus [10] beträgt die maximale Übertragungskapazität in einer Standardeinmodenfaser, unter Verwendung von 4 THz an optischer Bandbreite, einer Übertragungsdistanz von 1000 km und einem optimalen Signal- zu Rauschleistungsverhältnis (eng. Signal-to-Noise Ratio (SNR)) von 27 dB, in etwa 64 Tbit/s. Bei geringerem SNR sinkt die Übertragungskapazität aufgrund des größeren Anteils der Rauschleistung im empfangenen Signal. Für höhere SNR sinkt die Übertragungskapazität durch die in Glasfasern auftretenden leistungsabhängigen nichtlinearen Effekte.

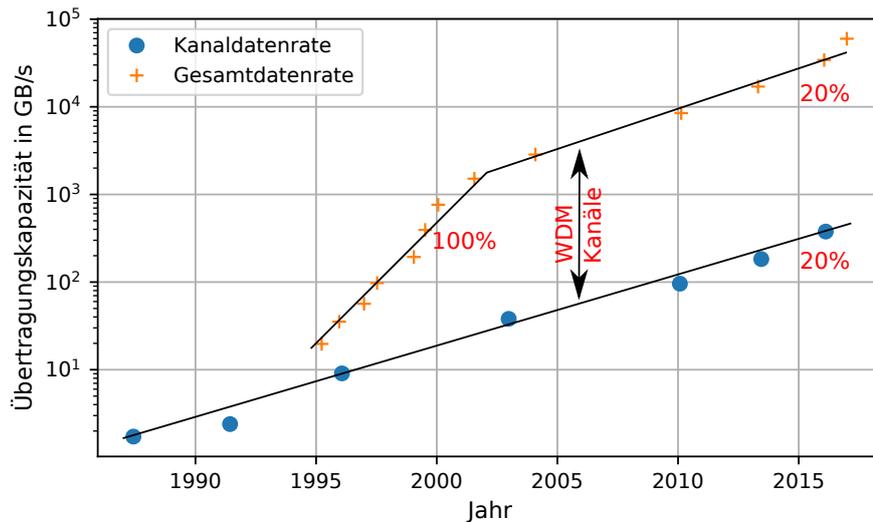


Abbildung 1.2.: Übertragungskapazität optischer Übertragungssysteme von 1986 bis 2017. Abschnittsweise ist jeweils die jährliche Steigerung in % dargestellt. [6]

Um auch in Zukunft die benötigte Übertragungskapazität für das Internet bei einer gleichzeitigen Reduktion der Kosten pro Bit bereitstellen zu können, sind technische Innovationen notwendig. Mit den heute verwendeten SMF ist eine Kapazitätssteigerung durch einen parallelen Betrieb mehrerer Einmodensysteme zwar möglich, würde allerdings zu einem linearen Anstieg der Herstellungs- und Betriebskosten führen. Es wird folglich nach einer Möglichkeit gesucht, mit der sich, ähnlich zur Einführung von WDM, eine Steigerung der Übertragungskapazität pro Faser um den Faktor 50 – 100 erreichen lässt. Als eine solche Möglichkeit werden seit einigen Jahren Raummultiplexverfahren (eng. Space-Division Multiplexing (SDM)) untersucht. Andere Multiplexverfahren wie Polarisationsmultiplex (eng. Polarization-Division Multiplexing (PDM)) oder WDM werden in heutigen Systemen bereits genutzt und sind nicht in der Lage, eine weitere signifikante Steigerung der Übertragungskapazität zu liefern. Unter Raummultiplex wird im Allgemeinen die gleichzeitige Übertragung von Signalen in räumlich zueinander orthogonalen Kanälen verstanden. Im einfachsten Fall kann dies ein Bündel aus Glasfasern sein, mit dem mehrere Einmodensysteme parallel betrieben werden. Bei Verwendung eines solchen Faserbündels steigen allerdings der Energieverbrauch des Übertragungsnetzwerks und die Anschaffungskosten für die Netzelemente linear mit der Anzahl der Fasern an. Alternativen, die eine stärkere Systemintegration erlauben, stellen die Verwendung von Mehrmodenfasern (MMF) und Mehrkernfasern (eng. Multicore Fiber (MCF)) dar. In beiden Fällen wird eine einzelne Faser verwendet, in der zusätzliche räumliche Kanäle geschaffen werden. In einer Mehr-

kernfaser dienen mehrere Faserkerne als räumliche Kanäle, wohingegen in der Mehrmodenfaser die ausbreitungsfähigen Fasermode als räumliche Kanäle genutzt werden. Mit beiden Ansätzen lassen sich Synergien ausnutzen, um durch Integration von Komponenten Kosten einzusparen. Beispielsweise lassen sich alle räumlichen Kanäle mit nur einem einzigen optischen Verstärker verstärken, anstatt für jede Faser eines Faserbündels einen eigenen Verstärker zu verwenden. Mithilfe von Modenmultiplex (eng. Mode-Division Multiplexing (MDM)) in MMF lassen sich im Vergleich zur Verwendung von Mehrkernfasern höhere Packungsdichten räumlicher Kanäle in der Glasfaser erreichen. Auch die optischen Verstärker lassen sich für MMF, aufgrund der höheren räumlichen Packungsdichte der Signalkanäle, effizienter realisieren als für Mehrkernfasern. In dieser Arbeit sollen daher Erbium-dotierte Faserverstärker für MDM-Systeme untersucht werden [12].

Neben den Kosten zur Datenübertragung stellt der Energieverbrauch als solches und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen eine Herausforderung für zukünftige Übertragungssysteme dar. In den letzten Jahren lag der Anteil der Informations- und Kommunikationstechnik an den weltweiten Treibhausgasemissionen bei 2% [13, 14]. Energieeffiziente, hoch-integrierte MDM-Systeme können helfen, die Treibhausgasemissionen bei der Herstellung und dem Betrieb der zukünftigen globalen Kommunikations-Infrastruktur zu senken.

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene MDM-Systeme entwickelt und experimentell demonstriert. Erste experimentelle Untersuchungen zu Systemen mit Modenmultiplex stammen bereits aus dem Jahr 1982 [15]. Seit den 2010er Jahren wird MDM jedoch verstärkt untersucht, um die Übertragungskapazität pro Faser zu steigern. In allen Bereichen konnten hierbei große Fortschritte erzielt werden. Modenmultiplexer und Demultiplexer sind kommerziell für bis zu 45 Signalmoden verfügbar [16] und wurden experimentell für bis zu 210 Moden demonstriert [17]. Übertragungsfasern für 55 [18] oder sogar 150 [19] Signalmoden wurden ebenfalls entwickelt. Übertragungsexperimente wurden für MDM-Systeme mit bis zu 45 Signalmoden durchgeführt [20]. Experimente mit vielen Signalmoden über lange Distanzen sind bisher nicht durchgeführt worden, da keine passenden Verstärker für eine hohe Anzahl an Signalmoden entwickelt wurden. Optische Faserverstärker wurden für eine gleichzeitige Verstärkung von bis zu 10 Signalmoden demonstriert [21–24]. Aktuell wurde außerdem eine Methode zur Charakterisierung eines MDM-EDFA mit 45 Signalmoden vorgestellt [25]. Bisherige Übertragungsexperimente, welche zur Signalverstärkung einen MDM-EDFA verwendeten, nutzten 3 oder 6 Signalmoden [26–29]. Als Hauptproblem für den Entwurf eines MDM-EDFA wird in der Literatur die Abhängigkeit des Signalgewinns vom Modus angenommen, in dem das Signal geführt wird. Ein zu großer modenabhängiger Gewinn (eng. Mode-Dependent Gain (MDG)) kann zu Signaldegradationen führen [30–33]. Um den MDG in MDM-EDFA zu minimieren, wurden verschiedene Ansätze vorgestellt. Beispielsweise kann die Erbium-Dotierungsdichte im Kern der Verstärkerfaser oder die Pumpleistungsverteilung am Eingang der Verstärkerfaser optimiert werden [34–36]. Bisherige Untersuchungen ergaben, dass eine Angleichung der Gewinne aller räumlichen Kanäle mit steigender Anzahl an Signalmoden zu komplex wird [37]. Neben einem geringen MDG ist, wie in Einmodensystemen, eine ausreichend hohe Verstärkung zum Ausgleich der Übertragungsverluste und gutes Rauschverhalten notwendig.

Das Ziel der Arbeiten war, die Skalierbarkeit von MDM-EDFA zu höheren Anzahlen an Signalmoden ( $\geq 100$ ) numerisch zu untersuchen. Dabei wurde überprüft, ob prinzipielle Hindernisse bei der Angleichung der Gewinne der Signalmoden oder dem Erzielen eines guten Rauschverhaltens für alle Signalmoden vorliegen. Die Skalierbarkeit der Modenanzahl wurde zusätzlich in

---

verschiedenen Aufrüstszenarien untersucht. Hierbei wurde geprüft, ob sich die vorgeschlagenen Strategien zum Betrieb des Verstärkers mit einer veränderlichen Anzahl an Signalmoden eignen. Ähnlich zum Ausbau von WDM-Systemen, kann in einem solchen Szenario die Übertragungskapazität des Systems durch das Hinzufügen räumlicher Kanäle gesteigert werden, ohne die Übertragungsfaser austauschen zu müssen. Ein solches Vorgehen sorgt für eine Minimierung des Aufwandes beim Aufbau und senkt die finanzielle Hürde, MDM-Systeme einzusetzen, da Systeme mit nur einem kleinen Teil der verfügbaren räumlichen Kanäle in Betrieb genommen werden können.

Zunächst soll in Kapitel 2 eine kurze Einführung in die Grundlagen gegeben werden, welche für diese Arbeit wichtig sind. In Kapitel 3 wird untersucht, inwiefern sich das Sättigungsverhalten der einzelnen Signalmoden in einem MDM-EDFA unterscheidet. Die Untersuchungen werden für verschiedene Anzahlen an Signalmoden und verschiedene Brechzahlprofile der Erbium-dotierten Faser (EDF) durchgeführt. In Kapitel 4 wird der Einfluss von Sättigungseffekten auf einen MDM-EDFA mit bis zu 36 Signalmoden untersucht, dessen Signalmodenanzahl inkrementell erhöht wird. In Kapitel 5 wird mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate das Erbium-Dotierungsprofil des Verstärkers für verschiedene Brechzahlprofile optimiert, um konstante Gewinne für alle Signalmoden zu erreichen. Außerdem werden in Kapitel 6 und 7 Verfahren zur Optimierung der Pumpleistungsverteilung bei verschiedenen Pumpwellenlängen und Brechzahlprofilen des EDFA beschrieben. Die vorgestellten Verfahren werden in Aufrüstszenarien mit mehr als 100 Signalmoden angewendet und ihre Eignung zur Erzielung konstanter Gewinne für verschiedene Anzahlen von Signalmoden untersucht.



## 2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden notwendige Grundlagen optischer Übertragungssysteme erläutert. Hierzu gehört der allgemeine Aufbau, einsetzbare Multiplexverfahren sowie typische Störeffekte in optischen Übertragungssystemen. Besonderes Augenmerk wird auf die Erläuterung zum Aufbau, zu den Eigenschaften und zur Modellierung von EDFA gelegt.

### 2.1. Aufbau eines optischen Übertragungssystems

In diesem Abschnitt soll der allgemeine Aufbau eines optischen Übertragungssystems dargestellt werden. Im Allgemeinen besteht ein optisches Weitverkehrs-Übertragungssystem aus einem Sender, einer Übertragungsstrecke und einem Empfänger. In realen Systemen können ebenfalls vermaschte Netze mit mehreren Sendern und Empfängern aufgebaut werden. Solche Systeme mit einer Übertragungsstrecke von einigen 100 km bis zu mehr als 1000 km bilden das Rückgrat des Internets. In Abbildung 2.1 ist schematisch ein optisches Übertragungssystem mit Räummultiplexbetrieb dargestellt.

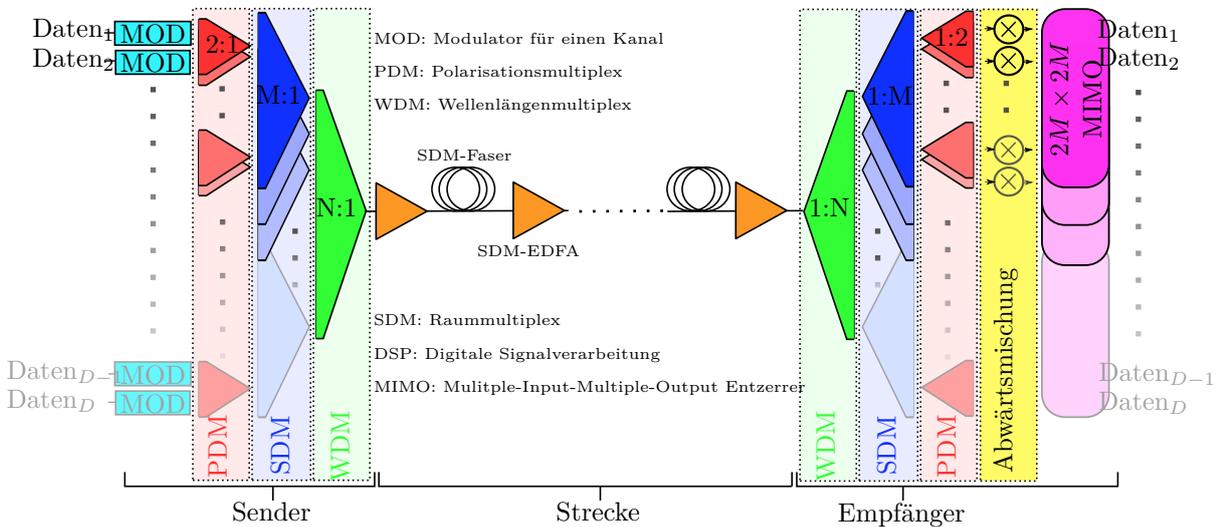


Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung eines optischen Übertragungssystems mit Polarisations-, Wellenlängen- und Räummultiplex, bestehend aus einem Sender, der Übertragungsstrecke und einem Empfänger. In dem abgebildeten Übertragungssystem werden zwei Polarisierungen,  $N$  Wellenlängenkanäle und  $M$  räumliche Kanäle zur Signalübertragung verwendet. Insgesamt werden  $D = 2N \cdot M$  Datenkanäle übertragen.

Dem Sender kommt die Aufgabe zu, einen Strom von Eingangsdaten auf eine Trägerschwingung im nahen Infrarotbereich zu modulieren. Für die betrachteten kohärenten Weitverkehrssysteme werden überwiegend Trägersignale im C-Band mit Wellenlängen um 1550 nm verwendet. Als Trägerschwingung wird üblicherweise ein Lasersignal eingesetzt. Die Modulation des Lasersignals erfolgt in optischen Weitverkehrs-Übertragungssystemen üblicherweise in Amplitude und Phase. Durch die Verwendung höherstufiger Modulationsformate können auf diese Weise mehrere Datenbits pro Zeitschlitz übertragen werden. Höherstufige Modulationsformate stellen allerdings ebenfalls höhere Anforderungen an den SNR am Empfänger. Verschiedene Arten des Signalmultiplex werden im Sender angewendet. Wie in Abbildung 2.1 zu erkennen, können verschiedene Multiplexverfahren kombiniert werden und grundsätzlich zwei Polarisierungen,  $N$  Wellenlängenkanäle und  $M$  räumliche Kanäle verwendet werden. Auf die Funktionsweisen der einzelnen Multiplexverfahren wird in Abschnitt 2.2 genauer eingegangen. In Abbildung 2.1 nicht dargestellt sind die Wandlung von der elektrischen in die optische Ebene, die Sendelaser und die Sendefilter.

Als Übertragungsstrecke werden in heutigen Weitverkehrssystemen Glasfasern auf Basis von Quarzglas ( $\text{SiO}_2$ ) verwendet. Eine Glasfaser besitzt im Allgemeinen eine erhöhte Brechzahl im Kernbereich der Faser, um eine Wellenführung zu ermöglichen. Die Brechzahl einer Glasfaser kann im Herstellungsprozess durch die Zugabe verschiedener Dotierstoffe verändert werden. Eine Anhebung der Brechzahl lässt sich durch eine Dotierung mit Germanium oder Phosphor bewirken, während eine Absenkung der Brechzahl durch eine zusätzliche Dotierung mit Bor oder Fluor erreicht werden kann [38, Kap. 3.1]. Wird ein Lasersignal in den Kernbereich der Glasfaser eingekoppelt, so wird dieses durch Totalreflexion im Faserkern geführt, solange der Winkel der Einkopplung unterhalb des Grenzwinkels der Totalreflexion liegt. Im Vergleich zur Datenübertragung über weite Strecken mit elektrischen Leitungen bieten Glasfasern entscheidende Vorteile. Geringe Dämpfungen im Bereich von  $\approx 0,2$  dB/km sind erreichbar. Gleichzeitig stehen aufgrund der hohen Trägerfrequenz mehrere THz an Bandbreite zur Verfügung. Im Vergleich bieten Digital Subscriber Line (DSL) oder Drahtlosnetzwerke wie Wireless Local Area Network (WLAN) verfügbare Bandbreiten von einigen 10 MHz.

Üblicherweise ist die optische Übertragungsstrecke unterteilt in Streckenabschnitte mit einer Länge von  $\sim 100$  km. Zwischen den Streckenabschnitten wird jeweils eine Signalverstärkung vorgenommen, um die Faserdämpfung zu kompensieren. Zur Signalverstärkung haben sich optische Faserverstärker in Form von EDFA durchgesetzt. Ein EDFA erlaubt die Verstärkung des modulierten Signals in der optischen Ebene mit einer Verstärkerbandbreite von  $\sim 4$  THz im Bereich um 1540 nm. Folglich können alle WDM-Kanäle innerhalb dieses Wellenlängenbereichs mit nur einem EDFA verstärkt werden. Neben EDFA existieren weitere Faserverstärker auf Basis anderer Metalle der Seltenen Erden, stimulierter Raman-Streuung sowie parametrische Verstärker auf Basis von Vierwellenmischung. Der Fokus in dieser Arbeit liegt allerdings auf der Untersuchung von EDFA.

Dem Empfänger kommt die Aufgabe zu, das empfangene Signal nacheinander zu demultiplexen, mit dem Signal eines Lokaloszillators zu überlagern, von der optischen in die elektrische Ebene zu wandeln, das Signal zu demodulieren, eine digitale Signalverarbeitung durchzuführen und schließlich die empfangenen Symbole zu entscheiden. Hierbei werden lineare Störeffekte des Übertragungskanals kompensiert, die in Kapitel 2.4 genauer behandelt werden. Aufgaben der digitalen Signalverarbeitung (eng. Digital Signal Processing (DSP)) sind unter anderem die Taktrückgewinnung und die Trägerphasenschätzung sowie die Kompensation von chromatischer

Dispersion und Polarisationsmodendispersion. Unter Verwendung von Polarisations- oder Raummultiplex kann es zur Kopplung zwischen einzelnen Signalkanälen kommen. Zur Kompensation dieser Kopplung wird ein Multiple-Input-Multiple-Output-Entzerrer (MIMO) eingesetzt, welcher die inverse Kanal-Übertragungsfunktion nachbildet und die lineare Kopplung zwischen den Kanälen rückgängig macht. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, ist in Abbildung 2.1 lediglich der MIMO-Entzerrer und nicht die gesamte DSP dargestellt.

## 2.2. Multiplexverfahren in optischen Übertragungssystemen

In diesem Kapitel werden verschiedene Arten des Multiplex in optischen Übertragungssystemen vorgestellt. Als Multiplexverfahren werden im folgenden Verfahren bezeichnet, welche die gemeinsame Nutzung eines Übertragungsmediums durch verschiedene Signalkanäle ermöglichen. Wie in Abbildung 2.2 dargestellt, werden im Folgenden die vier Freiheitsgrade Zeit, Frequenz, Polarisation und Raum behandelt.

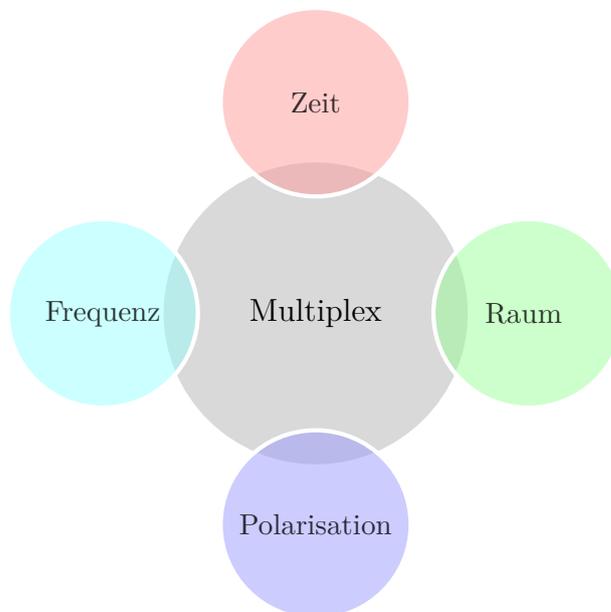


Abbildung 2.2.: Verfügbare Freiheitsgrade zum Signalmultiplex in optischen Übertragungssystemen.

In heutigen Weitverkehrssystemen werden Zeit-, Polarisations- und Wellenlängenmultiplex sowie höherstufige Modulationsformate in einer Faser eingesetzt. Kommerziell erhältliche Systeme erreichen Datenraten von bis zu 600 Gbit/s pro Wellenlängenkanal [39]. Die maximal erreichbare Übertragungskapazität eines Kanals mit additivem weißen gaußverteilterm Rauschen kann nach Shannon beschrieben werden mit [40]:

$$C = M \cdot B \cdot 2 \cdot \log_2(1 + \text{SNR}). \quad (2.1)$$

Der Logarithmus-Term beschreibt die spektrale Effizienz der Übertragung in einer linearen Polarisation und hängt vom SNR ab. Der Faktor 2 beschreibt eine Übertragung in beiden

orthogonalen linearen Polarisationszuständen. Die Faktoren  $M$  und  $B$  beschreiben die Anzahl an verfügbaren räumlichen Kanälen und die verfügbare Bandbreite. Die spektrale Effizienz kann beispielsweise durch Ausnutzung höherstufiger Modulationsformate und Fehlerkorrekturverfahren gesteigert werden, ist aber nach Gleichung 2.1 immer durch den SNR begrenzt. Zusätzlich wirken sich Erhöhungen des SNR nur logarithmisch auf die Übertragungskapazität aus. Da sich die Signalleistung aufgrund von Limitierungen durch nichtlineare Effekte nicht beliebig steigern lässt, ist der SNR in realen Systemen begrenzt. In der Literatur wird die Kombination aus dem Shannon-Limit und dem durch nichtlineare Effekte begrenztem SNR auch nichtlineares Shannon-Limit genannt. Die skalierbaren Freiheitsgrade für die Kapazität einer Glasfaser in diesem einfachen Modell sind folglich die Faktoren  $M$  und  $B$ . Während die verfügbare Bandbreite durch die optischen Verstärker auf das C-Band begrenzt ist und durch Hinzunahme des benachbarten L-Bandes um einen Faktor 2–3 steigen kann, kann der Faktor  $M$  durch die Verwendung von Vielmodenfasern und Mehrkernfasern potenziell um einen Faktor 100 gesteigert werden. Zusätzlich werden bei einer Verwendung von C- und L-Band in einem Übertragungssystem für jedes Band einzelne Verstärker benötigt, während ein einzelner MDM-EDFA potenziell in der Lage, ist alle verfügbaren räumlichen und spektralen Kanäle zu verstärken. Raummultiplex bietet folglich ein bisher ungenutztes Potenzial zur Steigerung der Kapazität einer einzelnen Faser, welches vergleichbar ist mit der Steigerung der Übertragungskapazität durch die Einführung des Wellenlängenmultiplexbetriebs.

Die verfügbaren Multiplexverfahren und ihr Potenzial zur Steigerung der Übertragungskapazität pro Faser sollen im Folgenden genauer betrachtet werden.

### 2.2.1. Zeitmultiplex

Eine Art des Multiplexens in optischen Übertragungssystemen stellt das Zeitmultiplex-Verfahren (eng. Time-Domain Multiplex (TDM)) dar. In Abbildung 2.3 ist schematisch ein Übertragungssystem mit TDM dargestellt. Verschiedene Datenströme geringer Datenrate werden stückweise nacheinander in einem Kanal mit großer Datenrate übertragen.

Zeitmultiplex kann zwar zur Verschachtelung und effizienteren Ausnutzung der verfügbaren Übertragungskapazität einer einzelnen Glasfaser verwendet werden, es kann jedoch die maximale Übertragungskapazität der Glasfaser nicht erhöhen.

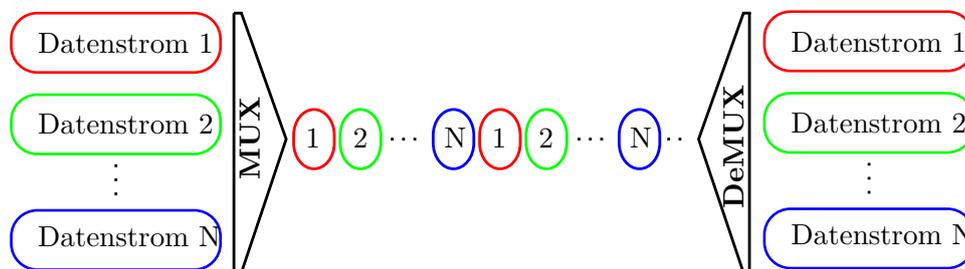


Abbildung 2.3.: Verschachtelung vieler Nutzkanäle mit geringer Datenrate in einen Kanal mit hoher Datenrate, mittels TDM-Verfahren.

### 2.2.2. Wellenlängenmultiplex

Optischen Übertragungssystemen stehen im C-Band von 1530 nm bis 1565 nm etwa 4 THz an Bandbreite zur Verfügung. Da verfügbare elektrische Komponenten diese Bandbreite nicht voll ausnutzen können, kann pro modulierte optischen Trägersignal immer nur ein kleiner Bruchteil von einigen zehn GHz zur Datenübertragung verwendet werden. Um die verfügbare Bandbreite trotzdem nutzen zu können, wird üblicherweise Wellenlängenmultiplex (WDM) verwendet.

Das prinzipielle Vorgehen bei Verwendung von WDM ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Hierbei werden Nutzsignale auf verschiedene, benachbarte Trägerfrequenzen moduliert und das Gesamtspektrum in der Glasfaser übertragen. Im Empfänger werden die einzelnen Kanäle mit einem Demultiplexer getrennt und einzeln in die elektrische Ebene gewandelt. Da bis zu 100 WDM-Kanäle in einer Glasfaser übertragen werden können und diese auch verschiedene Bandbreiten sowie Modulationsformate aufweisen können, sind WDM-Systeme sowohl kostengünstig als auch flexibel und bilden eine der Grundlagen für den rasanten Kapazitätsanstieg pro Glasfaser kommerzieller Systeme der vergangenen Jahrzehnte. Als Multiplexer und Demultiplexer für WDM-Kanäle können Dünnschichtfilter und Zeilen-Wellenleiter-Gitter verwendet werden [41, Kap. 3.2]. Die Einführung von WDM ist eng verknüpft mit der Einführung der EDFA, welche alle verwendeten WDM-Kanäle einer Faser zeitgleich verstärken können. Eine breitbandige Verstärkung aller WDM-Kanäle ist mit elektrooptischen Regeneratoren, welche aus einem Empfänger und einem Sender bestehen und das Signal in der elektrischen Ebene regenerieren, nicht möglich. Die Kosten für eine Signalverstärkung in der elektrischen Ebene würden folglich linear mit der Anzahl der Wellenlängenkanäle ansteigen, da jeder WDM-Kanal einzeln verstärkt werden müsste. Während elektrooptische Regeneratoren für die Übertragung einzelner WDM-Kanäle verwendet werden können, ist eine Verwendung von EDFA für heutige WDM-Systeme mit  $\approx 100$  WDM-Kanälen mit insgesamt geringeren Kosten verbunden.

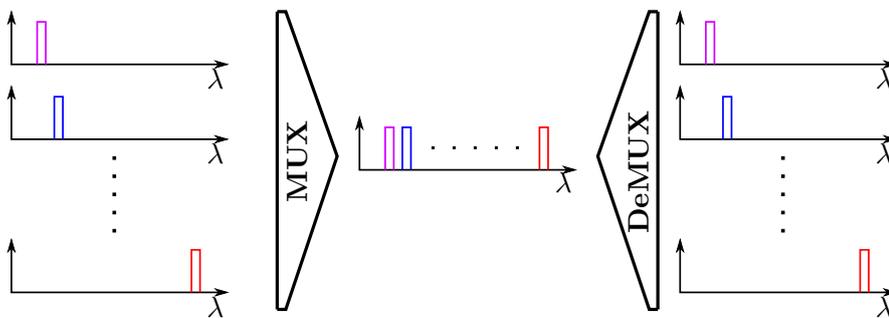


Abbildung 2.4.: Schematische Darstellung eines WDM-Systems. Datensignale werden auf verschiedene Trägerfrequenzen moduliert und gemeinsam in einer einzelnen Glasfaser übertragen.

Die verfügbare Gesamtübertragungskapazität ist durch die verfügbare Bandbreite begrenzt. Die verfügbare Bandbreite ist wiederum begrenzt durch die Gewinnspektren optischer Faserverstärker. Am häufigsten wird zur Übertragung in optischen Weitverkehrsnetzen das C-Band verwendet. Zur Signalverstärkung in diesem Bereich werden EDFA verwendet. Kommerzielle Systeme sind außerdem für das L-Band von 1565 nm bis 1625 nm entwickelt worden.

Die verfügbare Datenrate pro Faser kann allerdings auch durch WDM nicht um mehrere Grö-

Benordnungen gesteigert werden. Die Verwendung weiterer Frequenzbänder in der Nähe des Dämpfungsminimums von Glasfasern, zusätzlich zum C-Band, würde keinen Kapazitätsgewinn in ausreichender Größenordnung bewirken, um den zukünftigen Kapazitätsanforderungen zu entgegen. Bei einer Verwendung von C-Band und L-Band mit einer kombinierten Bandbreite von 10 THz kann die Übertragungskapazität lediglich um den Faktor 2.5 gesteigert werden [9]. Selbst unter gemeinsamer Nutzung des O-, E-, S-, C- und L-Bandes mit einer kombinierten Bandbreite von etwa 50 THz im Bereich zwischen 1260 nm und 1625 nm ließe sich lediglich eine Kapazitätssteigerung um den Faktor 13 erreichen. Bei diesem Ansatz wären allerdings durchschnittliche Dämpfungen von 0,36 dB im O-Band zu erwarten [42]. Bisherige Arbeiten verwenden zur Verstärkung eine Kombination mehrerer Faserverstärker. Konkret ist die Verwendung von Praseodym-, Neodym-, Thulium- und Erbium-dotierten Faserverstärkern für verschiedene Frequenzbänder nach jedem Streckenabschnitt notwendig [42]. Dies würde dem Gedanken der Senkung der Kosten pro übertragenem Bit durch die kombinierte Verstärkung aller Signale in einem Faserverstärker widersprechen.

### 2.2.3. Polarisationsmultiplex

Das Polarisationsmultiplex-Verfahren verwendet die beiden orthogonalen linearen Polarisationen des optischen Trägersignals als jeweils eigenen Übertragungskanal. Beiden Polarisationen kann getrennt ein Nutzsignal aufmoduliert werden. Im Empfänger werden beide Polarisationen durch einen Polarisationsstrahlteiler getrennt und in die elektrische Ebene gewandelt. Da in beiden verwendeten Polarisationen jeweils verschiedene WDM-Kanäle übertragen werden können, ist es möglich, WDM mit PDM zu kombinieren. In Abbildung 2.5 ist das Prinzip des Polarisationsmultiplex schematisch dargestellt.

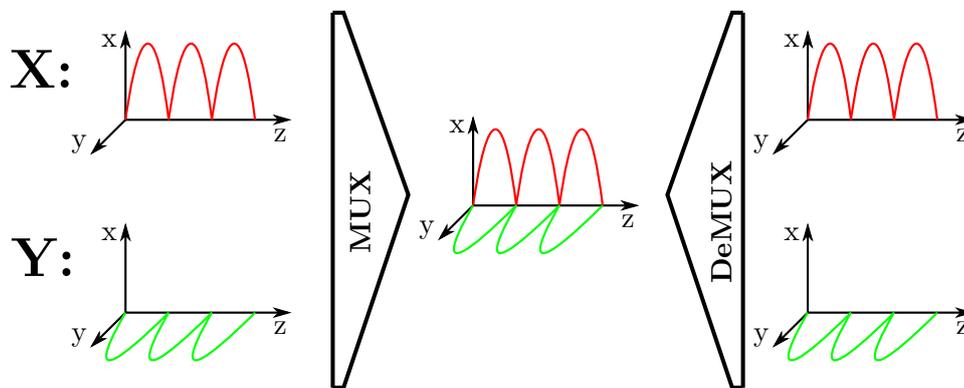


Abbildung 2.5.: Schematische Darstellung eines PDM-Systems. Zwei orthogonal zueinander polarisierte Trägerschwingungen werden jeweils getrennt mit Datensignalen moduliert und gemeinsam in einer Glasfaser übertragen.

Da die Signale verschiedener Polarisationen miteinander koppeln können, ist im Empfänger ein MIMO-Entzerrer notwendig. Dieser prägt dem empfangenen Signal die inverse Kanalübertragungsfunktion auf und kann somit die Kopplung zwischen den Polarisationen auf der Übertragungsstrecke rückgängig machen. Am Ausgang des MIMO-Entzerrers sind die Datensignale beider Polarisationen rekonstruiert.

In heute üblichen optischen Weitverkehrssystemen wird bereits PDM verwendet, so dass beide verfügbaren Polarisationen eingesetzt werden. Durch PDM ist folglich keine weitere fundamentale Steigerung der Übertragungskapazität pro Faser zu erwarten.

### 2.2.4. Räummultiplex

Als Räummultiplexverfahren werden alle Verfahren zusammengefasst, welche zueinander orthogonale räumliche Kanäle zur gleichzeitigen Übertragung von optischen Signalen verwenden. Im Folgenden wird gezeigt, dass Räummultiplex, anders als die bisher benannten Multiplexverfahren, eine bedeutende weitere Steigerung der Übertragungskapazität pro Faser ermöglicht.

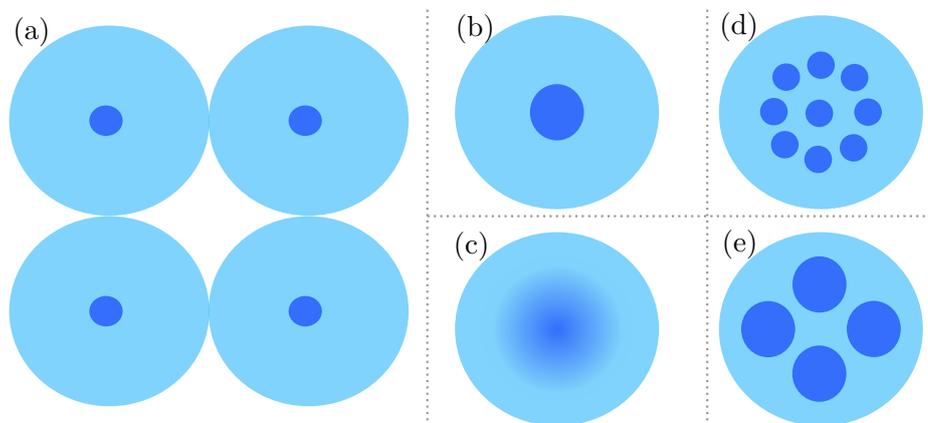


Abbildung 2.6.: Schematische Darstellung des Querschnitts eines Einmodenfaserbündels (a), einer Mehrmodenfaser (Few-Mode Fiber) (b), einer Vielmodenfaser (Multimode Fiber) (c), einer Einmoden-Mehrkernfaser (d) und einer Mehrmoden-Mehrkernfaser (e). Das Verhältnis des Kerndurchmessers zum Manteldurchmesser ist in dieser Darstellung zur besseren Sichtbarkeit vergrößert.

In Abbildung 2.6 sind verschiedene Fasertypen zur Realisierung eines Räummultiplexbetriebs schematisch dargestellt. Im einfachsten Fall kann ein Bündel aus Einmodenfasern verwendet werden, wobei jeweils eine Einmodenfaser einen räumlichen Kanal darstellt. Ein solches Faserbündel kann beispielsweise die Sendelaser oder die Pumplaser der optischen Verstärker gemeinsam verwenden, um Kosten einzusparen. Um eine höhere Packungsdichte der Kanäle auf der Übertragungsstrecke zu erreichen und eine weitere Integration zu ermöglichen, können Fasern mit mehreren Kernen, sogenannte Mehrkernfasern, verwendet werden. Eine weitere Erhöhung der räumlichen Packungsdichte lässt sich unter Verwendung von Mehrmodenfasern erreichen, wobei jeder einzelne ausbreitungsfähige Modus als räumlicher Übertragungskanal genutzt werden kann. In der englischsprachigen Literatur wird hierbei zwischen Few-Mode Fasern (FMF) mit wenigen Moden ( $\lesssim 15$ ) und Multimode Fasern (MMF), in denen bei der Signalwellenlänge über 100 Moden ausbreitungsfähig sein können, unterschieden. Diese Fasern besitzen meist ein Gradientenbrechzahlprofil, um die Laufzeitunterschiede der einzelnen Moden in der Faser zu verringern. Da es in dieser Arbeit um Untersuchungen zur Skalierbarkeit von MDM-Systemen zu großen Anzahlen an Signalmoden gehen soll, werden Multimode Fasern betrachtet, weil diese die höchste Packungsdichte bieten.

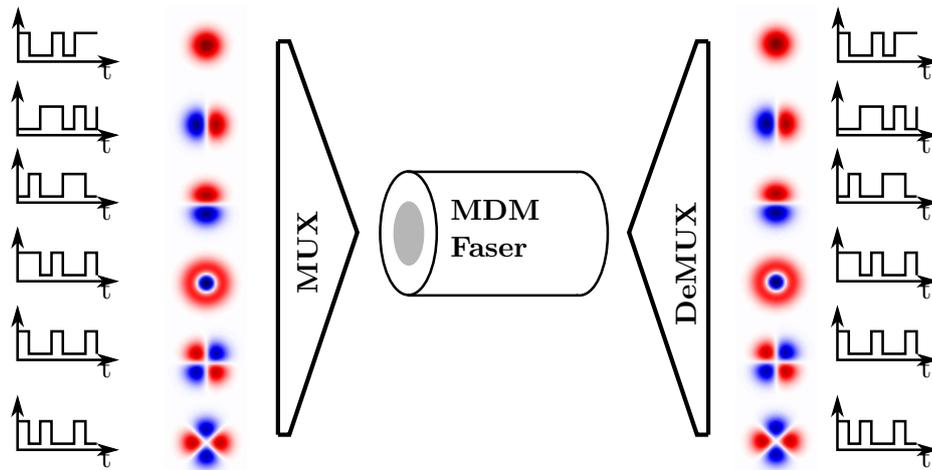


Abbildung 2.7.: Schematische Darstellung eines Übertragungssystems mit Modenmultiplex. Auf verschiedene ausbreitungsfähige Moden der Glasfaser können verschiedene Signalkanäle moduliert werden. Im Empfänger können die Signale der einzelnen Moden getrennt werden.

Mehrkerntfasern lassen sich in gekoppelte und ungekoppelte Mehrkerntfasern unterteilen. Bei ungekoppelten Mehrkerntfasern sind die Abstände zwischen den einzelnen Kernen so groß, dass zwischen den Kernen nur geringe Wechselwirkungen auftreten. Bei gekoppelten Mehrkerntfasern liegen die Kerne näher zusammen, sodass bei der Superposition der Modenfelder aller Kerne auch von Supermoden die Rede ist. Mehrkerntfasern wurden bisher mit bis zu 100 einzelnen Faserkernen und einem Manteldurchmesser von 320  $\mu\text{m}$  vorgestellt [43]. Auch Fasern mit mehreren Faserkernen, in denen jeweils mehrere Signalmode ausbreitungsfähig sind, wurden vorgestellt. Die bisher größte Anzahl an räumlichen Kanälen konnte mit einer solchen Kombination von MDM mit einer MCF erreicht werden. Bis zu 117 räumliche Kanäle in einer Faser mit 39 dreimodigen Faserkernen wurden zur Datenübertragung verwendet [44]. Das bisher größte Produkt aus Datenrate und Faserlänge konnte unter Verwendung einer Faser mit 19 Kernen und eines Mehrkernverstärkers für das C- und L-Band erreicht werden [45].

### Modenmultiplex

Die höchste räumliche Packungsdichte lässt sich unter Verwendung der orthogonalen transversalen Modenfelder von FMF und MMF erreichen. Bei FMF und MMF wird die Geometrie und Dotierung des Faserkerns so gewählt, dass mehrere Moden bei der Signalwellenlänge ausbreitungsfähig sind. Jedem dieser selektiv anregbaren Moden kann ein Datensignal aufgeprägt werden, sodass die Kapazität eines Mehrmodensystems proportional zur Anzahl der verwendeten Signalmode ansteigt.

Der schematische Aufbau eines MDM-Systems ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Im Sender werden  $M$  Datenströme auf die  $M$  Signalmode der Übertragungsfaser aufgeteilt. Das kombinierte Signal wird in einer einzelnen MMF übertragen. Da jeder Modus wiederum in beiden Polarisierungen und verschiedenen Wellenlängen übertragen werden kann, ist eine Kombination von MDM mit PDM und WDM möglich.

Zur Einkopplung der verschiedenen Datenkanäle in die Moden der Glasfaser werden räumliche Multiplexer und Demultiplexer benötigt. Der erste experimentelle Nachweis eines MDM-Systems mit zwei Moden in einer mehrmodigen 10 m langen Gradientenindexfaser wurde 1982 von Berdagué und Facq erbracht [15]. Als Modenmultiplexer und Demultiplexer wurden hierbei Blenden verwendet, welche jeweils einen der beiden verwendeten Moden abschatteten.

Zur Erzeugung bestimmter Moden kann mit Freistrahlaufbauten dem Ausgangsstrahl einer Einmodenfaser mit einer Phasenmaske die Phase eines höheren Modus aufgeprägt werden. Anschließend kann dieser Modus in eine MMF eingekoppelt werden. Da allerdings bei diesem Ansatz für jeden verwendeten Modus ein zusätzlicher 50/50-Koppler in die optische Achse eingebracht werden muss, entstehen für hohe Modenanzahlen hohe Einfügedämpfungen. Zur Lösung dieses Problems wurden Multiplexer auf Basis von Photonic Lanterns, Spatial Light Modulators (SLM) und Multi-Plane Light Conversion (MPLC) entwickelt. Photonic Lanterns bestehen aus vielen einmodigen Fasern, welche in einem getaperten Übergang in eine Mehrmodenfaser überführt werden [46]. Hierbei ist in modenselektive Photonic Lanterns, bei denen die Ausbreitungskonstanten der Einmodenfasern mit denen der jeweils anzuregenden Moden übereinstimmen und modenunselektive Photonic Lanterns, bei denen jeder Eingang in einen anderen transversalen Ort der Mehrmodenfaser hineinstrahlt, zu unterscheiden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, mittels MPLC mehrere Phasenmasken mit jeweils einem kurzen Stück Freistrahlausbreitung zu kaskadieren. Hierbei wird ein Bündel aus Gaußschen Strahlen am Anfang der Kaskade in die Überlagerung der gewünschten Moden am Ausgang umgewandelt. Jeder Gaußsche Strahl wird hierbei in einen Modus am Ausgang des Multiplexers umgewandelt. Die Gaußschen Strahlen am Eingang werden üblicherweise durch Einmodenfasern angeregt. Theoretisch lässt sich mit einer solchen Anordnung jede unitäre Transformation der transversalen Feldverteilung vornehmen [47]. MPLC Modenmultiplexer für bis zu 45 Moden sind kommerziell erhältlich [16] und Multiplexer für bis zu 210 Moden wurden experimentell demonstriert [17]. Für experimentelle Untersuchungen können außerdem Aufbauten mit rekonfigurierbaren Multiplexern auf Basis von SLM verwendet werden, bei denen die verwendeten Phasenmasken durch geeignete Ansteuerung verändert werden können [48]. Grundsätzlich können Modenmultiplexer auch als Demultiplexer verwendet werden, indem Eingang und Ausgang vertauscht werden.

MDM-Systeme lassen sich in ungekoppelte und gekoppelte Systeme unterteilen. Bei ungekoppelten Systemen wird das Brechzahlprofil der Übertragungsfaser so gewählt, dass die effektiven Brechzahlen  $n_{\text{eff}}$  der einzelnen Moden einen möglichst großen Abstand voneinander besitzen und Modenkopplung somit minimiert wird [49]. Dadurch, dass die effektiven Brechzahlen  $n_{\text{eff}}$  der ausbreitungsfähigen Moden einen großen Abstand zueinander aufweisen müssen, lassen sich Fasern mit geringer Kopplung zwischen allen Moden bei konstantem Brechzahlprung nur für wenige Moden konzipieren. Für eine steigende Anzahl an ausbreitungsfähigen Moden wird es zwangsläufig Modenpaare geben, deren  $n_{\text{eff}}$  einen zu geringen Abstand besitzen. Deutlich größere Anzahlen an Signalmoden lassen sich erreichen, wenn eine Kopplung zwischen den einzelnen Signalmoden zugelassen wird. Aufgrund von dispersiven Effekten und der Kopplung zwischen den Moden, ist im Empfänger wie auch beim Polarisationsmultiplex oder unter Verwendung stark koppelnder Mehrkernfasern ein MIMO-Entzerrer notwendig. Am Beispiel eines  $6 \times 6$  MIMO-Systems wurde gezeigt, dass sich Modenkopplung zwischen allen verwendeten Signalmoden und beiden Polarisierungen mit einem MIMO-Entzerrer kompensieren lässt [50, 51]. Aufgrund von guten Modendispersionseigenschaften wurden in den vergangenen Jahren vornehmlich Vielmodenfasern mit Gradientenbrechzahlprofil in Systemexperimenten eingesetzt [18, 19, 52].

Experimentelle Untersuchungen mit Übertragung von 36 Moden über 2 km [53] und 45 Moden über 26,5 km [20] wurden durchgeführt. Hierbei wurde jeweils eine MIMO-Entzerrung über alle Moden und beide linearen Polarisationszustände ( $72 \times 72$  bzw.  $90 \times 90$ ) vorgenommen. Diese Ergebnisse zeigen, dass auch MDM-Systeme mit einer hohen Anzahl von räumlichen Kanälen möglich sind. Eine weitere Möglichkeit ist es, die schwache Kopplung zwischen den Modengruppen auszunutzen und die Moden einer einzelnen Modengruppe zur Übertragung von Informationen zu nutzen. Hierzu konnte gezeigt werden, dass eine Übertragung in einer einzelnen Modengruppe über 90 km mit einem  $12 \times 12$  MIMO-Entzerrer möglich ist. Anfang 2019 wurde außerdem nachgewiesen, dass eine solche Übertragung in jeder der untersten 9 Modengruppen einer Gradientenfaser mit  $50 \mu\text{m}$  Kerndurchmesser über eine Länge von 27 km möglich ist [54]. Hierbei ist festzuhalten, dass der Bitfehlerquotient bei der Übertragung einzelner Modengruppen größer ist als bei gleichzeitiger Verwendung und MIMO-Entzerrung aller Signalmoden.

### 2.3. Ausbreitungsfähige Moden in Glasfaser

Dieses Kapitel befasst sich mit Grundlagen zu Modenfeldern in Glasfasern. Ausgehend von den Maxwell'schen Gleichungen wird die Berechnung der linear polarisierten (LP) Modenfelder beschrieben. Anschließend wird auf die geläufigsten Brechzahlprofile und die daraus resultierenden Modenfelder und Ausbreitungskonstanten eingegangen.

Die Berechnung der Feldverteilungen einer Glasfaser wird aufgrund von Symmetrieüberlegungen in Zylinderkoordinaten durchgeführt. In Abbildung 2.8 ist die Lage des verwendeten Koordinatensystems in der Faser dargestellt.

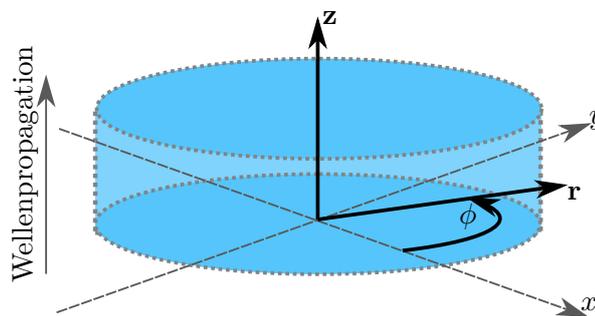


Abbildung 2.8.: Schematische Darstellung eines Faserabschnitts mit eingezeichnetem kartesischem Koordinatensystem und Zylinderkoordinatensystem.

### 2.3.1. Wellengleichung

Um die Feldverteilungen der ausbreitungsfähigen Moden in einer gegebenen Faser zu berechnen, müssen die Maxwell'schen Gleichungen gelöst werden [38, Kap. 5.2]:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0, \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2.4)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \left( \vec{J} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right). \quad (2.5)$$

Diese Gleichungen setzen die elektrische Feldstärke  $\vec{E}(r, \phi, z, t)$ , die elektrische Verschiebungsdichte  $\vec{D}(r, \phi, z, t)$ , die elektrische Stromdichte  $\vec{J}(r, \phi, z, t)$ , die magnetische Feldstärke  $\vec{H}(r, \phi, z, t)$  und die magnetische Flussdichte  $\vec{B}(r, \phi, z, t)$  miteinander in Beziehung. Hierbei bezeichnet  $\rho$  eine elektrische Raumladungsdichte,  $\mu$  die magnetische Permeabilität und  $\varepsilon$  die elektrische Permittivität. Für die in dieser Arbeit betrachtete Glasfaser kann Quellen- und Ladungsfreiheit angenommen werden ( $\vec{J} = 0$ ;  $\rho = 0$ ). Das Fasermaterial wird als nicht-magnetisch angenommen, so dass die magnetische Permeabilität des Vakuums verwendet wird ( $\mu = \mu_0$ ). Außerdem wird das Fasermaterial als homogenes, isotropes Medium mit konstantem  $\varepsilon$  angenommen. Die vereinfachten Gleichungen lauten somit:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0, \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0, \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (2.9)$$

Um die elektrische Feldstärke in einer Differentialgleichung angeben zu können, wird der Rotationsoperator auf Gleichung 2.8 angewandt. Mit der Vektoridentität  $\nabla \times (\nabla \times \vec{x}) = \nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{x}) + \nabla^2 \vec{x}$  ergibt sich:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \underbrace{\nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{E})}_{=0} + \nabla^2 \vec{E} = -\nabla \times \left( \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (2.10)$$

Die obige vektorielle Gleichung 2.10 für das elektrische Feld in kartesischen Koordinaten vereinfacht sich weiter zu drei skalaren Wellengleichungen für die jeweiligen Komponenten. In typischen Glasfasern kann von einer schwachen Inhomogenität ( $\Delta \varepsilon \approx 0$ ) ausgegangen werden, so dass näherungsweise die skalaren Wellengleichungen verwendet werden können. Die Moden, welche unter dieser Näherung berechnet werden, werden auch linear polarisierte Moden genannt [55]. Mit der Darstellung der elektrischen Feldstärke als Phasor  $\vec{E}(r, \phi, z, t) = \Re \left\{ \vec{E}(r, \phi, z) \cdot \exp^{j\omega t} \right\}$ , der Wellenzahl  $k_0 = 2\pi/\lambda$ , der elektrischen Permittivität  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ , der Lichtgeschwindigkeit  $c_0 = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$  und dem Laplace Operator  $\nabla^2$  in Zylinderkoordinaten, ergibt sich für die x-Komponente der elektrischen Feldstärke:

$$\nabla^2 \underline{E}_x = -\mu_0 \varepsilon \omega^2 \underline{E}_x = -k_0^2 \varepsilon_r \underline{E}_x. \quad (2.11)$$

Als Ansatz für das elektrische Feld wird

$$\underline{E}_x(r, \phi, z) = \Lambda(r) \left\{ \begin{array}{c} \sin(l\phi) \\ \cos(l\phi) \end{array} \right\} \cdot \exp^{-j\beta z} \quad (2.12)$$

gewählt. Somit ergibt sich:

$$\nabla^2 \underline{E}_x + k_0^2 \varepsilon_r \underline{E}_x = 0, \quad (2.13)$$

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} - \beta^2 + k_0^2 \varepsilon_r \right] \Lambda(r) \left\{ \begin{array}{c} \sin(l\phi) \\ \cos(l\phi) \end{array} \right\} = 0, \quad (2.14)$$

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{l^2}{r^2} - \beta^2 + k_0^2 n(r)^2 \right] \Lambda(r) \left\{ \begin{array}{c} \sin(l\phi) \\ \cos(l\phi) \end{array} \right\} = 0. \quad (2.15)$$

Um die Ausbreitungskonstanten und Feldverteilungen der ausbreitungsfähigen Moden einer Faser mit der rotationssymmetrischen Brechzahlverteilung  $n(r) = \sqrt{\varepsilon_r(r)}$  zu bestimmen, wird das Eigenwertproblem 2.15 numerisch gelöst. Es können jeweils nur für eine diskrete Anzahl an Ausbreitungskonstanten  $\beta_{l,p}$  Lösungen für die Feldverteilung  $\Lambda(r)$  gefunden werden, welche für große  $r$  zu null konvergieren. Zur Berechnung dieser Ausbreitungskonstanten und der Modenfelder werden im Allgemeinen numerische Modenlöser verwendet.

In dieser Arbeit kommen verschiedene Modenlöser zum Einsatz. Wenn nicht anders beschrieben, werden die radialen Feldverteilungen der LP-Moden mithilfe von Finiten Differenzen in einem Matlab Skript berechnet, das dem Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik freundlicherweise von der University of Queensland zur Verfügung gestellt wurde [56]. Die Ausbreitungskonstante  $\beta_{l,p}$  eines Modus lässt sich ebenfalls als effektive Brechzahl  $n_{\text{eff},l,p} = \beta_{l,p}/k_0$  verstehen. Jeder berechnete  $LP_{l,p}$ -Modus mit der Umfangsordnung  $l$  und der radialen Ordnung  $p$  kommt in zweifacher (für  $l \neq 0$ ) bzw. einfacher (für  $l = 0$ ) Entartung vor. Diese Entartungen kommen durch die  $\left\{ \begin{array}{c} \sin(l\phi) \\ \cos(l\phi) \end{array} \right\}$  Unterscheidung in Gleichung 2.14 zustande. Alle LP-Moden lassen sich außerdem sowohl für die x- als auch für die y-Komponente des elektrischen Feldes berechnen. In der Literatur wird manchmal eine Zählweise angewandt, bei der diese Polarisationsmoden ebenfalls als räumliche Moden aufgefasst werden und die Anzahl der LP-Moden somit verdoppeln. In dieser Arbeit sind jedoch immer die Modenfelder einer Polarisation (der x-Komponente des elektrischen Feldes) gemeint, wenn von einer Anzahl an Moden geschrieben wird.

### 2.3.2. Brechzahlprofile

Die Modenfelder einer Glasfaser sind bestimmt durch die Brechzahlverteilung in der  $xy$ -Ebene der Faser. Das Brechzahlprofil wird als unabhängig von  $z$  angenommen. Für azimuthal symmetrische Profile wird das Brechzahlprofil in Abhängigkeit von  $r$  angegeben. In dieser Arbeit werden vor allem Stufenindexfasern und Gradientenindexfasern betrachtet. Das Brechzahlprofil einer Stufenfaser wird definiert als:

$$n(r) = \begin{cases} n_k & \text{für } r \leq r_k, \\ n_m & \text{für } r > r_k. \end{cases} \quad (2.16)$$

Hierbei ist  $n_k$  die Kernbrechzahl,  $n_m$  die Mantelbrechzahl und  $r_k$  der Kernradius der Glasfaser. Das Brechzahlprofil einer Gradientenindexfaser ist definiert als:

$$n^2(r) = \begin{cases} n_k^2 - 2(n_k^2 - n_m^2) \left( \frac{r}{r_k} \right)^\alpha & \text{für } r \leq r_k \\ n_m^2 & \text{für } r > r_k. \end{cases} \quad (2.17)$$

Die Form des Gradientenprofils kann über den Profilexponenten  $\alpha$  eingestellt werden. Für  $\alpha \rightarrow \infty$  geht das Gradientenbrechzahlprofil in ein Stufenbrechzahlprofil über. Als weitere Hilfsgrößen können die numerische Apertur  $A_N$ , der Phasenparameter  $B$  und der Faserparameter  $V$  definiert werden:

$$A_N = \sin(\theta_{\max}) = \sqrt{n_k^2 - n_m^2}, \quad (2.18)$$

$$B = \frac{n_{\text{eff}}^2 - n_m^2}{n_k^2 - n_m^2}, \quad (2.19)$$

$$V = k_0 r_k \sqrt{n_k^2 - n_m^2} = k_0 r_k A_N. \quad (2.20)$$

Die numerische Apertur wird als Maß für den Sinus des maximalen Akzeptanzwinkels der Faser  $\theta_{\max}$  verwendet. Mithilfe des Faserparameters und des Phasenparameters lassen sich Aussagen über die ausbreitungsfähigen Moden in einer Glasfaser treffen. Eine grobe Abschätzung für die Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden in beiden Polarisierungen kann mit dem Faserparameter erfolgen. In einer Stufenfaser sind demnach ungefähr  $M = V^2/2$ -Moden ausbreitungsfähig, während in einer Gradientenfaser mit  $\alpha = 2$  ungefähr  $M = V^2/4$ -Moden ausbreitungsfähig sind [38, Kap. 5.2].

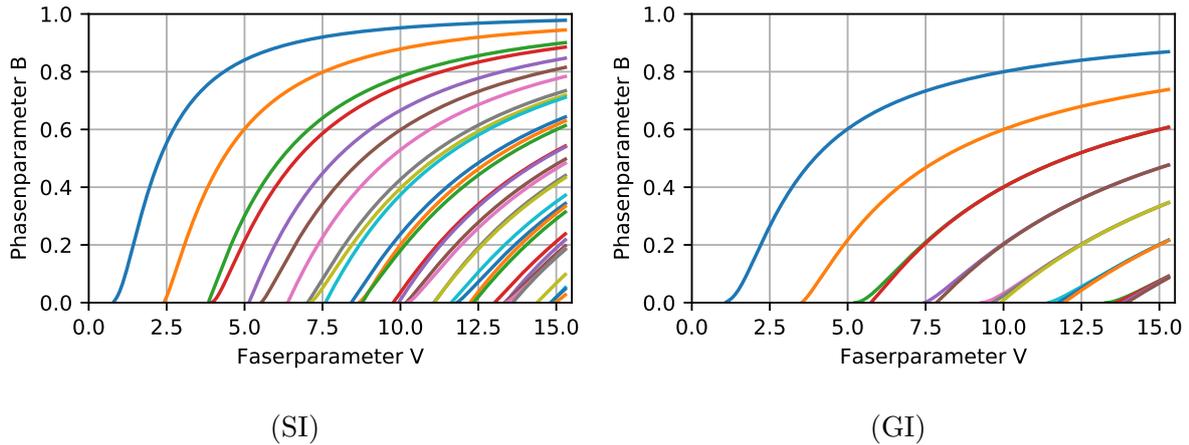


Abbildung 2.9.: B-V-Diagramme für eine Stufenindexfaser (SI) und eine Gradientenindexfaser mit  $\alpha = 2$  (GI). Entartete LP-Moden sind zusammengefasst dargestellt. Die einzelnen Linien stehen hierbei für die einzelnen Moden. Zur besseren Unterscheidung einzelner Linien sind diese unterschiedlich gefärbt.

Für eine genauere Bestimmung der Führung einzelner Moden in einer Glasfaser kann ein B-V-Diagramm erstellt werden, in dem der Phasenparameter  $B$  für alle Moden über dem Faserparameter  $V$  aufgetragen wird. In Abbildung 2.9 sind die B-V-Diagramme für eine Stufenfaser und eine Gradientenfaser mit  $\alpha = 2$  dargestellt. Die Brechzahlprofile sind beispielhaft in Abbildung 2.10 dargestellt. Der Faserparameter  $V$  wird variiert, indem der Kernradius der Faser erhöht wird. Es ist zu erkennen, dass für einen festen Faserparameter ungefähr doppelt so viele Moden in der Stufenfaser ausbreitungsfähig sind wie in der Gradientenfaser. Außerdem ist erkennbar, dass sich die Moden in der Gradientenfaser in Modengruppen mit nahezu identischem Phasenparameter  $B$  aufteilen, während bei der Stufenfaser keine solche Regelmäßigkeit zu erkennen ist. Die entarteten LP-Moden und die beiden Polarisationszustände eines Modus

besitzen im B-V-Diagramm identische Verläufe, da ein Brechzahlprofil mit einem kreisförmigen Faserkern und nur einem geringen Brechzahlsprung angenommen wird.

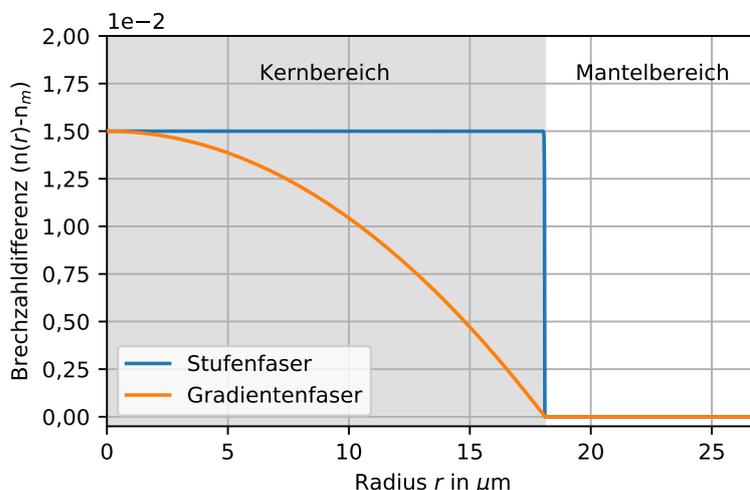


Abbildung 2.10.: Beispielhafte Darstellung eines Gradienten- und eines Stufenbrechzahlprofils. Mantel- und Kernbereich des Brechzahlprofils sind farblich voneinander abgegrenzt.

Die transversalen Feldverteilungen der ersten 10 Moden in einer Gradientenfaser sind in Abbildung 2.11 dargestellt. Jeder Modus ist nur in einer linearen Polarisierung dargestellt, es existiert allerdings jeweils ein Modus mit identischer Ausbreitungskonstante und Feldamplitude in der orthogonalen Polarisierung. Die LP-Moden in beiden Polarisierungen besitzen nahezu identische Feldverteilungen, da eine schwache Inhomogenität angenommen wird. In den Zeilen sind die Moden dargestellt, welche zu einer Modengruppe gehören. Die Modengruppen bestehen jeweils aus den Moden in einer Gradientenfaser, welche nahezu identische Ausbreitungskonstanten besitzen. Die Anzahl der Moden in einer Modengruppe pro orthogonaler Polarisierung steigt mit der Ordnung der Modengruppe inkrementell an (1, 2, 3, 4...). In einer Faser mit  $N_{\text{MG}}$  Modengruppen ergibt sich die Anzahl der Moden  $M$  folglich zu:

$$M = \sum_{n=1}^{N_{\text{MG}}} n = \frac{N_{\text{MG}}(N_{\text{MG}} + 1)}{2}. \quad (2.21)$$

Der Begriff Modengruppen wird in der Literatur allerdings manchmal auch für die Entartungen der  $\text{LP}_{a/b}$ -Moden oder nahezu entartete Gruppen von Vektormoden verwendet. In dieser Arbeit soll allerdings obige Definition der Modengruppen, als Gruppen von LP-Moden mit ähnlichem Phasenparameter  $B$  in Gradientenfasern, verwendet werden.

In aktuellen experimentellen Veröffentlichungen werden häufig Gradientenfasern ähnlich zu bestehenden OM4-Fasern mit  $50\ \mu\text{m}$  Kerndurchmesser nach internationalen Standards verwendet [57–59]. Für diese Fasern ist der Herstellungsprozess ausgereift und im Vergleich zu Stufenfasern lassen sich bessere Modendispersionseigenschaften durch die Verwendung eines Gradientenindexprofils erzielen [60, Kap. 2.2.2; 18]. Die bisherigen Gradientenfasern sind allerdings nicht auf eine Übertragung im C-Band ausgelegt, da sie größtenteils zur Kommunikation

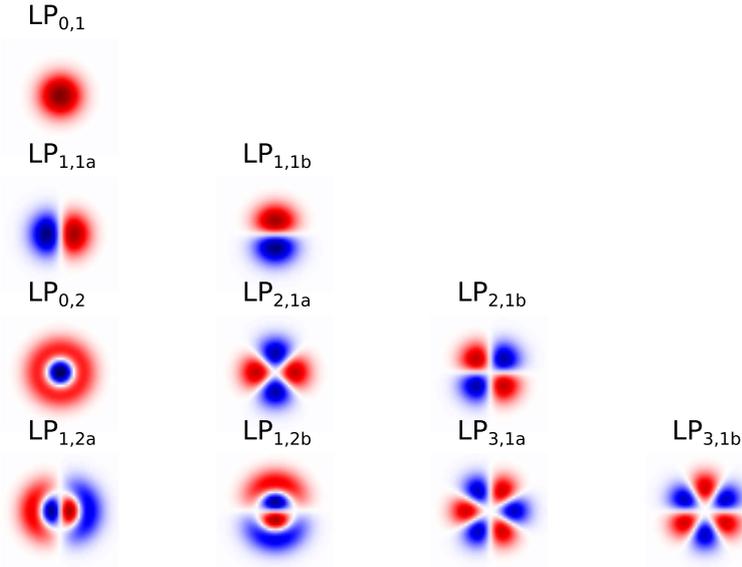


Abbildung 2.11.: Modenfelder der ersten 10 LP-Moden in einer Gradientenindexfaser.

über kürzere Strecken mit Wellenlängen um 850 nm verwendet werden. Mit einem optimierten Gradientenindexprofil lassen sich die Laufzeitunterschiede zwischen den einzelnen Moden auch im Bereich um 1550 nm minimieren, was zu einer geringeren Komplexität des MIMO-Entzerrers führt [18, 61].

In dieser Arbeit werden Gradientenfaser als Übertragungsfaser angenommen, für die ein EDFA entwickelt werden soll. Für die Verstärkerfaser bedeutet dies, dass dieselben Moden ausbreitungsfähig sein sollten wie in der Übertragungsfaser, um eine Überkopplung von Leistung zwischen verschiedenen Moden durch Stoßkopplung am Übergang zwischen Verstärkerfaser und Übertragungsfaser zu vermeiden. Die ausbreitungsfähigen Moden einer Gradientenindexfaser mit 50  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser, ähnlich zur Faser aus [18], sind in Tabelle 2.1 aufgetragen. Außerdem soll in dieser Arbeit die Konvention verwendet werden, dass die Reihenfolge der Moden auf die Modengruppen in der Übertragungsfaser mit Gradientenbrechzahlprofil, wie in Tabelle 2.1, bezogen sind. Ein  $\text{LP}_{l,p}$ -Modus befindet sich nach dieser Konvention unabhängig vom verwendeten Brechzahlprofil in der Modengruppe:

$$\text{MG}(\text{LP}_{l,p}) = 2p - l - 1. \quad (2.22)$$

Innerhalb der Modengruppen findet eine Sortierung nach aufsteigender Umfangsordnung  $l$  statt. Auf diese Weise entsprechen die Modenordnungen der Signalmoden beider Fasertypen immer demselben  $\text{LP}_{l,p}$ -Modus. Bei einer Sortierung nach effektiven Brechzahlen in beiden Fasern ist dies nicht zwingend der Fall, da je nach Brechzahlprofil verschiedene Moden für verschiedene Faserparameter ausbreitungsfähig werden.

<b>MG 1:</b>	LP <sub>0,1</sub>																		
<b>MG 2:</b>	LP <sub>1,1a</sub>	LP <sub>1,1b</sub>																	
<b>MG 3:</b>	LP <sub>0,2</sub>	LP <sub>2,1a</sub>	LP <sub>2,1b</sub>																
<b>MG 4:</b>	LP <sub>1,2a</sub>	LP <sub>1,2b</sub>	LP <sub>3,1a</sub>	LP <sub>3,1b</sub>															
<b>MG 5:</b>	LP <sub>0,3</sub>	LP <sub>2,2a</sub>	LP <sub>2,2b</sub>	LP <sub>4,1a</sub>	LP <sub>4,1b</sub>														
<b>MG 6:</b>	LP <sub>1,3a</sub>	LP <sub>1,3b</sub>	LP <sub>3,2a</sub>	LP <sub>3,2b</sub>	LP <sub>5,1a</sub>	LP <sub>5,1b</sub>													
<b>MG 7:</b>	LP <sub>0,4</sub>	LP <sub>2,3a</sub>	LP <sub>2,3b</sub>	LP <sub>4,2a</sub>	LP <sub>4,2b</sub>	LP <sub>6,1a</sub>	LP <sub>6,1b</sub>												
<b>MG 8:</b>	LP <sub>1,4a</sub>	LP <sub>1,4b</sub>	LP <sub>3,3a</sub>	LP <sub>3,3b</sub>	LP <sub>5,2a</sub>	LP <sub>5,2b</sub>	LP <sub>7,1a</sub>	LP <sub>7,1b</sub>											
<b>MG 9:</b>	LP <sub>0,5</sub>	LP <sub>2,4a</sub>	LP <sub>2,4b</sub>	LP <sub>4,3a</sub>	LP <sub>4,3b</sub>	LP <sub>6,2a</sub>	LP <sub>6,2b</sub>	LP <sub>8,1a</sub>	LP <sub>8,1b</sub>										
<b>MG 10:</b>	LP <sub>1,5a</sub>	LP <sub>1,5b</sub>	LP <sub>3,4a</sub>	LP <sub>3,4b</sub>	LP <sub>5,3a</sub>	LP <sub>5,3b</sub>	LP <sub>7,2a</sub>	LP <sub>7,2b</sub>	LP <sub>9,1a</sub>	LP <sub>9,1b</sub>									

Tabelle 2.1.: Die 55 LP-Moden einer 50  $\mu\text{m}$  Gradientenindexfaser mit einer numerischen Apertur von  $A_N = 0.21$  und einem Profilexponenten von  $\alpha = 1.94$  bei 1550 nm. Jeweils eine Modengruppe, bestehend aus LP-Moden mit nahezu identischer Ausbreitungskonstante ist in einer Zeile dargestellt.

### 2.3.3. Effektive Modenfeldflächen

Die Angabe der transversalen Größe der Feldverteilung eines Modus ist aufgrund von Nulldurchgängen sowohl in radialer als auch in azimuthaler Richtung nicht trivial. Standardangaben wie die Breite des  $1/e$  Abfalls lassen sich aufgrunddessen nicht berechnen. Eine Lösung ist die Definition einer effektiven Modenfeldfläche  $A_{\text{eff}}$ :

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\int \int |\mathbf{E}_x(r, \phi)|^2 dA)^2}{(\int \int |\mathbf{E}_x(r, \phi)|^4 dA)}. \quad (2.23)$$

In Abbildung 2.12 sind die numerisch berechneten effektiven Modenfeldflächen in einer Stufenfaser und in einer Gradientenfaser dargestellt, in denen bei 1550 nm jeweils die 55 Signalmoden aus Tabelle 2.1 ausbreitungsfähig sind. Die Gradientenfaser hat einen Kerndurchmesser von 50  $\mu\text{m}$  und die Stufenfaser hat einen Kerndurchmesser von 37,12  $\mu\text{m}$ . Beider Fasern besitzen eine numerische Apertur von  $A_N = 0.21$  bei einer Wellenlänge von 1550 nm. Es ist zu erkennen, dass bei der Gradientenfaser die effektiven Modenfeldflächen mit steigender Modenordnung ansteigen. Der Grundmodus besitzt in diesem Fasertyp die kleinste effektive Modenfeldfläche.

In der Stufenfaser besitzt der Grundmodus die größte effektive Modenfeldfläche. Für höhere Modenordnungen sinkt die effektive Modenfeldfläche ein wenig ab. Im Vergleich zur Gradientenfaser ist allerdings ein weniger starker Trend erkennbar. Die Moden der Stufenfaser besitzen insgesamt jeweils eine ähnlichere Größe im Kernbereich als die der Gradientenfaser.

## 2.4. Störeffekte in optischen Übertragungssystemen

In diesem Abschnitt sollen Störeffekte in optischen Übertragungssystemen erläutert werden, welche für das weitere Verständnis der Arbeit notwendig sind. Allgemein lassen sich Störeffekte in fasergebundenen optischen Übertragungssystemen unterteilen in:

- Dämpfung,

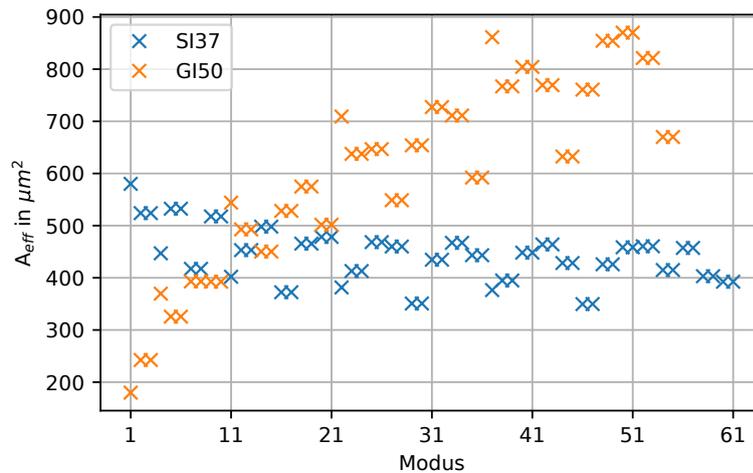


Abbildung 2.12.: Effektive Modenfeldflächen  $A_{eff}$  der Moden einer Stufenfaser mit  $37,12\ \mu\text{m}$  Kerndurchmesser und einer Gradientenfaser mit  $50\ \mu\text{m}$  Kerndurchmesser. Die Sortierung der Moden erfolgt nach den Modengruppen der Gradientenfaser und steigender Umfangsordnung, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben.

- chromatische Dispersion (CD),
- Modendispersion (MD) und Polarisationsmodendispersion (PMD),
- modenabhängige Gewinne (MDG), modenabhängige Verluste (MDL) und polarisationsabhängige Verluste (PDL),
- nichtlineare Effekte.

Chromatische Dispersion, die als Folge der Abhängigkeit der Brechzahl von der Wellenlänge der optischen Strahlung entsteht und zu Inter-Symbol-Interferenz durch unterschiedliche Laufzeiten verschiedener spektraler Signalkomponenten führen kann, soll in dieser Arbeit nicht näher erläutert werden. Ebenso werden leistungsabhängige nichtlineare Effekte, welche zu einer Obergrenze der Signaleingangsleistung führen und somit den SNR im Empfänger begrenzen, nicht behandelt. An dieser Stelle sei daher auf die entsprechende Fachliteratur zu diesen Themen verwiesen [62, Kap. 1; 38, Kap. 4.8].

### 2.4.1. Dämpfung

Das Signal in einer Glasfaser wird aufgrund verschiedener Faktoren entlang der Faser gedämpft. Im Allgemeinen wird die Dämpfung einer Glasfaser pro Länge in dB/km angegeben. In heutigen  $\text{SiO}_2$ -basierten Einmodenfasern können Dämpfungen unter  $0,2\ \text{dB/km}$  im Dämpfungsminimum um  $1550\ \text{nm}$  erreicht werden. In Abbildung 2.13 ist das Dämpfungsspektrum einer  $\text{SiO}_2$  Faser dargestellt. Die Gesamtdämpfung in Glasfasern setzt sich, in der Nähe des C-Bandes, aus der Rayleigh-Streuung im niedrigen Wellenlängenbereich, der Infrarot-Absorption im hohen Wellenlängenbereich und der Absorption durch Molekülschwingungen von OH-Bindungen zusammen [41, Kap. 2.1].

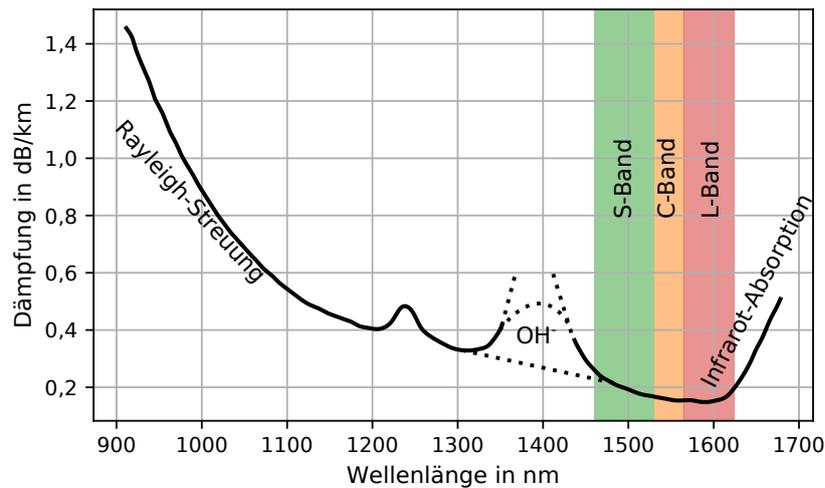


Abbildung 2.13.: Typisches Absorptionsspektrum einer Glasfaser. Die wichtigsten Übertragungsbänder sind farblich markiert. [41, Kap. 2.1]

Dämpfung durch Rayleigh-Streuung wird durch mikroskopische Dichteschwankungen im Glas hervorgerufen, welche bei der Faserherstellung unvermeidbar sind. An diesen Schwankungen kann die optische Strahlung gestreut werden, was sich als Dämpfung entlang der Faser bemerkbar macht. Der Einfluss der Rayleigh-Streuung sinkt mit steigender Wellenlänge  $\lambda$  mit  $\lambda^{-4}$ . [41, Kap. 2.1]

Die Infrarot-Absorption wird durch molekulare Resonanzen bei Wellenlängen um  $7\ \mu\text{m}$  hervorgerufen, welche sich durch die amorphe Struktur der Glasfaser bis in den sichtbaren Spektralbereich aufweiten. Mit steigender Wellenlänge steigt der Einfluss an. [41, Kap. 2.1]

Die Dämpfung durch OH-Bindungen in der Nähe von  $1400\ \text{nm}$  ist vor allem bei älteren Fasern ausgeprägt. Durch bessere Herstellungsverfahren konnte die Entstehung von OH-Bindungen bei der Faserherstellung deutlich reduziert und somit die Dämpfung gesenkt werden. [41, Kap. 2.1]

Aufgrund der niedrigen Dämpfung können mit Glasfasern mehrere  $100\ \text{km}$  Übertragungsdistanz erreicht werden, ohne eine Signalregeneration oder Verstärkung erforderlich zu machen. Um eine erfolgreiche Datenübertragung auch über längere Distanzen zu gewährleisten, muss die Dämpfung der Glasfaser kompensiert werden. Hierzu findet typischerweise eine Verstärkung des Signals mit Faserverstärkern statt. Am häufigsten werden hierzu EDFA verwendet, welche zwischen den Faserabschnitten positioniert werden. Typische Faserabschnitte mit einer Länge von  $80\ \text{km}$  bis  $100\ \text{km}$  weisen Dämpfungen von  $\approx 16\ \text{dB}$  bis  $\approx 25\ \text{dB}$  auf.

### 2.4.2. Modendispersion und Modenkopplung

Aufgrund des Brechzahlprofils verändern sich die effektiven Brechzahlen  $n_{\text{eff}}$  nicht nur mit der Wellenlänge des Signals, sondern auch für verschiedene Moden. Bei der Übertragung des Signals in mehr als einem geführten Modus breiten sich die Signalanteile in den verschiedenen Moden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus. Diese Modendispersion führt, wie die chromatische Dispersion, zu einer Aufweitung eines zu übertragenden Signalimpulses und kann somit zu ISI

führen, wenn ein Signalkanal mehreren Moden aufgeprägt wird. Reine Modendispersion, ohne eine Kopplung zwischen den Moden, beeinflusst die Signalqualität in MDM-Systemen jedoch nicht. Tritt Kopplung zwischen den verwendeten Moden auf, beispielsweise bei der Verwendung von stark koppelnden MMF zur Signalübertragung, wird die Kombination aus Modendispersion und Modenkopplung oft statistisch beschrieben. Unter Verwendung eines MIMO-Entzerrers kann die Modendispersion auch bei vorhandener Modenkopplung kompensiert werden [50, 51].

Modendispersion kann sowohl durch verschiedene geführte Moden, als auch durch verschiedene Polarisationszustände in einer realen Faser entstehen. Die auch in Einmodensystemen auftretende PMD entsteht durch Imperfektionen in der Faserherstellung und Verlegung. An auftretenden Störstellen ist die Faser lokal doppelbrechend und das Signal kann prinzipiell auf zwei zufällig orientierten und unterschiedlich schnellen Wegen propagieren. Die PMD wird häufig numerisch durch ein Wellenplattenmodell mit einer Kaskade aus zufällig orientierten, doppelbrechenden Faserabschnitten beschrieben. [38, Kap. 4.15]

Polarisationszustände lassen sich unter anderem im Stokesraum darstellen [38, Kap. 4.15]. Hierbei wird ein Polarisationszustand durch einen dreidimensionalen Stokes-Vektor  $\vec{s}$  beschrieben. Für eine bestimmte Einmodenfaser lassen sich zwei Hauptzustände der Polarisation (eng. Principle State of Polarisation (PSP)) definieren. Wird einer der beiden Hauptzustände am Eingang der Faser angeregt, so ist der Polarisationszustand am Faserausgang in erster Näherung unabhängig von kleinen Änderungen der Frequenz [38, Kap. 4.15]. Diese beiden Polarisationszustände sind gleichzeitig die Zustände mit der kleinsten bzw. größten Laufzeit durch die Faser. Der Laufzeitunterschied  $\tau$  der beiden Hauptzustände der Polarisation wird als differentielle Gruppenlaufzeit (eng. Differential Group Delay (DGD)) bezeichnet.

Eine allgemeinere Beschreibung der Polarisationsmodendispersion kann über den PMD-Vektor  $\vec{\tau}_{\text{PMD}}$  erfolgen [63]:

$$\vec{\tau}_{\text{PMD}} = \frac{\tau}{2}\hat{p} + \left(-\frac{\tau}{2}\right)(-\hat{p}) = \tau\hat{p}. \quad (2.24)$$

Hierbei beschreibt  $\tau$  den DGD Wert und  $\hat{p}$  den Stokes-Vektor des langsamen Hauptzustandes der Polarisation. Der PMD-Vektor zeigt somit in Richtung des langsamen Hauptzustandes der Polarisation und sein Betrag entspricht dem DGD-Wert. Eine alternative Schreibweise bildet die Summe aus den Stokes-Vektoren des langsamen PSP  $\hat{p}$  und des schnellen PSP  $(-\hat{p})$ , gewichtet mit den jeweiligen Gruppenlaufzeiten  $\tau$  [64]. Der DGD folgt einer Maxwell-Statistik. Der Mittelwert der DGD Statistik  $\langle DGD \rangle$  wird als PMD-Wert bezeichnet und steigt mit der Quadratwurzel der Faserlänge  $\sqrt{L}$  an. Als Kennzahl für Einmodenfasern wird oft der PMD-Koeffizient  $\text{PMD}_{\text{koef}} = \langle DGD \rangle / \sqrt{L}$  verwendet, welcher die Faserlänge  $L$  einbezieht und die Einheit ps/ $\sqrt{\text{km}}$  besitzt.

Das beschriebene Vorgehen kann unter Verwendung von generalisierten Stokes-Vektoren auf Mehrmodenfasern erweitert werden [65]. Aus den PSP werden generalisierte Principle Modes (PM), von denen es die gleiche Anzahl gibt, wie ausbreitungsfähige Moden in der Faser (inklusive Polarisationsdiversität  $2M$ ) [66, 67]. Der zweidimensionale PMD-Vektor wird zu einem allgemeinen  $(4M^2 - 1)$ -dimensionalen MD-Vektor  $\vec{\tau}$ , der aus der gewichteten Summe aller Stokes-Vektoren  $\hat{p}_i$ , gewichtet mit ihren jeweiligen Laufzeitdifferenzen  $\tau_i$ , besteht [64, 65]:

$$\vec{\tau} = \sum_{i=1}^{2M} \hat{p}_i \tau_i. \quad (2.25)$$

Prinzipiell kann Modendispersion durch einen MIMO-Entzerrer kompensiert werden. Die Komplexität der verwendeten Filter hängt hierbei stark von den auftretenden Laufzeitunterschieden ab, welche die benötigte Gedächtnislänge des Filters beeinflussen. Für größere Laufzeitunterschiede werden größere Gedächtnislängen benötigt. Während die durch PMD in Einmodensystemen benötigte Gedächtnislänge des MIMO im Bereich einiger 10 ps liegt, kann diese für MDM um Größenordnungen ansteigen. Die Komplexität der verwendeten MIMO-Entzerrer steigt folglich an, da die benötigte Gedächtnislänge und somit die Anzahl der benötigten Filtertaps steigt [61]. Die akkumulierte MD kann durch die Verwendung eines optimierten Gradientenbrechzahlprofils [60, Kap. 2.2.2; 18] und durch passende Verkettung von Fasern mit positiver und negativer akkumulierter Laufzeitdifferenz verringert werden [54, 68–70].

Die akkumulierte MD hängt außerdem stark von der Kopplung zwischen den Moden ab. Während für Fasern mit geringer Modenkopplung die akkumulierte MD linear mit der Faserlänge  $L$  ansteigt, steigt sie für Fasern mit starker Kopplung zwischen allen Moden mit  $\sqrt{L}$  an [70]. Starke Modenkopplung in der Übertragungsfaser kann folglich helfen, den Einfluss der MD zu verringern.

### 2.4.3. Modenabhängige Verluste und Gewinne

Die einzelnen Signalmoden eines MDM-Systems können durch verschiedene Einflüsse unterschiedliche Dämpfungen erfahren. Diese können unterteilt werden in MDL, hervorgerufen durch nicht-ideale Komponenten oder die Dämpfung der Faser und MDG, welches in optischen Verstärkern entstehen kann. In bestehenden Einmodensystemen treten mit polarisationsabhängigen Verlusten (eng. Polarisation Dependent Loss (PDL)) ähnliche Effekte auf. In typischen Einmodensystemen sind PDL-Werte von unter 0,1 dB pro EDFA erreichbar [71].

MDG und MDL führen zu Signalverschlechterungen, selbst wenn ein idealer MIMO-Entzerrer angenommen wird [30–33]. Durch MDG und MDL kommt es sowohl zu einer Verringerung der mittleren Übertragungskapazität als auch zu einer Erhöhung der Ausfallwahrscheinlichkeit des Übertragungssystems. Durch starke Kopplung der einzelnen Signalmoden oder die explizite Verwendung eines Modenmischers kann der Einfluss über alle Moden gemittelt und somit abgeschwächt werden [32]. In [31] konnte gezeigt werden, dass sich die Einflüsse von MDG und MDL auf die Übertragungsqualität für viele Faserabschnitte angleichen. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass der Einfluss von MDG und MDL mit der Anzahl der stark miteinander gekoppelten Moden abnehmen [30].

Da in dieser Arbeit EDFA behandelt werden, wird im Folgenden auf den MDG genauer eingegangen. Dieser kann auf unterschiedliche Arten quantifiziert werden. Eine Möglichkeit ist die Verwendung des Spitze-Spitze Wertes  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ :

$$\text{MDG}_{\text{pp}} = \max [G_i - G_j] \text{ mit } i, j = \{1, 2, \dots, M_s\}. \quad (2.26)$$

Hierbei sind  $G_{i/j}$  die Gewinne der  $M_s$  Signalmoden in einem MDM-EDFA. Diese Definition ist in der Literatur häufig zu finden und gerade im Kontext von mehrmodigen optischen Verstärkern üblich. Eine weitere Definition bildet die Quadratwurzel des quadratischen Mittels der differentiellen Gewinne  $g_i = |G_i - \langle G \rangle|$  der einzelnen Moden vom mittleren Gewinn  $\langle G \rangle$  [72]:

$$\text{MDG}_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{M_s} \sum_i^{M_s} g_i^2}. \quad (2.27)$$

Hierbei wird angenommen, dass  $\sum_i^{M_s} g_i = 0$  gilt, also die Summe aller differentiellen Gewinne verschwindet. Für ein System, in dem alle Signalmoden zufällig und stark mit allen anderen Signalmoden koppeln, wird sich der  $\text{MDG}_{\text{rms}}$  Wert mit  $\text{MDG}_{\text{rms,akk}} = \text{MDG}_{\text{rms}} \cdot \sqrt{N_{\text{seg}}}$  akkumulieren, wobei  $N_{\text{seg}}$  die Anzahl der verwendeten Faserabschnitte bezeichnet. In dieser Arbeit werden je nach Situation beide Definitionen des MDG verwendet.

## 2.5. Erbium-dotierte Faserverstärker

Ihren Siegeszug haben die optischen Übertragungssysteme unter anderem den Erbium-dotierten Faserverstärkern (EDFA) zu verdanken, welche 1987 zuerst beschrieben wurden [73, 74]. Die Signalverstärkung in einem EDFA basiert auf der Vervielfachung von Signalphotonen mittels stimulierter Emission durch angeregte Erbium-Ionen. Die Anregung der Erbium-Ionen in ein höheres Energieniveau findet durch Pumpstrahlung mit einer höheren Photonenenergie als die der Signalstrahlung statt.

Durch die Möglichkeit zur Verstärkung von Signalen in der optischen Ebene ist eine kostengünstige und einfache Alternative zur sonst notwendigen Signalregeneration in der elektrischen Ebene gegeben. Ein weiterer Vorteil des EDFA ist die Möglichkeit, das gesamte C-Band und somit alle darin enthaltenen WDM-Kanäle simultan verstärken zu können. Heute ist der Einsatz von EDFA die am häufigsten verwendete Methode zur Signalverstärkung in optischen Übertragungssystemen.

Der schematische Aufbau eines typischen zweistufigen EDFA ist in Abbildung 2.14 dargestellt. Die Anregung der Erbium-Ionen in ein höheres Energieniveau erfolgt durch Pumpstrahlung, welche in eine Glasfaser mit Erbium-Dotierung eingekoppelt wird. Die angeregten Erbium-Ionen können anschließend durch stimulierte Emission optische Signale verstärken. Zur Überwachung des Betriebszustandes werden an verschiedenen Stellen geringe Anteile der Signalleistung ausgekoppelt und gemessen. Zur Angleichung der Gewinne der WDM-Kanäle werden zwischen den Verstärkerstufen ein variables optisches Dämpfungsglied (VOA) und ein spektrales Gewinnflättungsfilter (eng. Gain Flattening Filter (GFF)) verwendet. Am Zwischenabgriff können Dispersions-kompensierende Fasern (eng. Dispersion Compensating Fiber (DCF)) zum Ausgleich der chromatischen Dispersion verwendet werden, falls diese nicht in der elektrischen Ebene kompensiert wird. [75, Kap. 4.3]

### 2.5.1. Energieniveaus und Linienverbreiterung

Die Grundlage der Erbium-dotierten Faserverstärker bilden Erbium-Ionen, welche in eine Glasmatrix eingebettet sind. Erbium besitzt die Ordnungszahl 68 im Periodensystem der chemischen Elemente und wird zu den Metallen der Seltenen Erden gezählt.

Im Bohr-Sommerfeldschen Atommodell können die Elektronen eines Erbium-Atoms unterschiedliche Energieniveaus besetzen, welche auch als Elektronenschalen bezeichnet werden. Der Zustand eines Elektrons wird über die Wellenfunktion beschrieben, welche über vier Quantenzahlen  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$  und  $m_s$  bestimmt ist. Je nach Hauptquantenzahl  $n$  ergibt sich eine begrenzte Anzahl an Werten für die Nebenquantenzahl  $l$ , die magnetische Drehimpulsquantenzahl  $m_l$  und die magnetische Spinquantenzahl  $m_s$ . Nach dem Pauli-Prinzip kann jede Kombinationen von Quantenzahlen

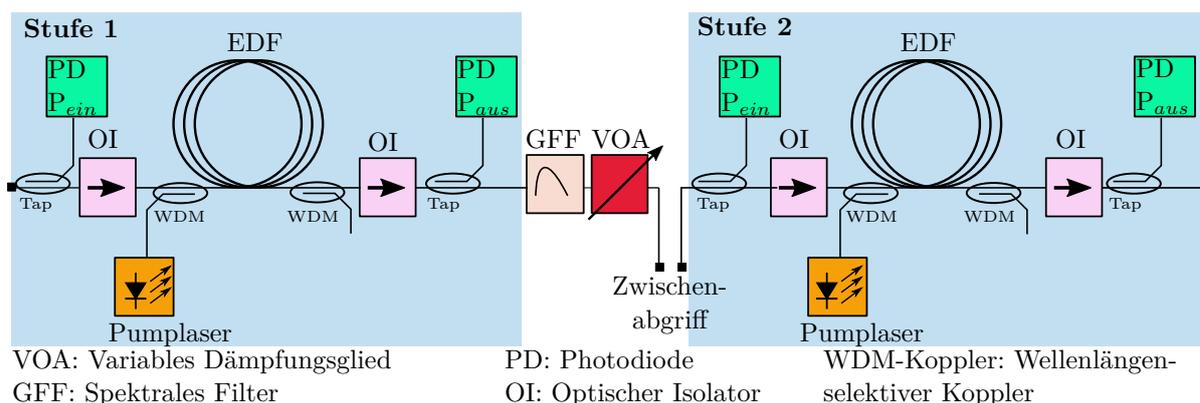


Abbildung 2.14.: Schematische Darstellung des Aufbaus eines typischen EDFA. Ein zweistufiger Aufbau erlaubt die Verwendung eines passiven Filters (GFF) zwischen beiden Stufen zur Angleichung der Gewinne aller WDM-Kanäle. Über WDM-Koppler wird die Pumpleistung ein- und ausgekoppelt. Tap-Koppler erlauben eine Leistungsmessung vor und nach der EDF. Ein VOA zwischen beiden Stufen wird verwendet, um die dynamische Gewinnverkipfung für verschiedene Arbeitspunkte auszugleichen. Am Zwischenabgriff können zusätzliche Komponenten, wie DCF, eingebaut werden. [75, Kap. 4.3]

nur von maximal einem Elektron eingenommen werden. Die Hauptquantenzahl entspricht der Elektronenschale und die Nebenquantenzahl der sogenannten Unterschale. Im Folgenden werden die Unterschalen mit Buchstaben (s, p, d, f, g, ...) anstatt ganzer Zahlen bezeichnet.

In einer Glasmatrix liegt das Erbium als  $\text{Er}^{3+}$ -Ion mit der Elektronenkonfiguration  $[\text{Xe}]4f^{11}5s^25p^6$  vor. In dieser Notation werden, ausgehend vom Edelgas Xenon, die zusätzlichen Elektronen nach der Notation [Hauptschale][Unterschale]<sup>Anzahl</sup> angegeben. Die Energieniveaus ergeben sich aus den Quantenzahlen mit der Besonderheit, dass unterschiedliche Kombinationen von Quantenzahlen zu denselben Energieniveaus führen können. Man spricht von entarteten Zuständen. Die resultierenden Energieniveaus der  $\text{Er}^{3+}$ -Ionen werden mit  $2^{S+1}L_J$  bezeichnet, wobei  $S$  die Summe der Elektronenspins,  $J$  den gesamten Drehimpuls und  $L$  die Summe der Bahndrehimpulse bezeichnet. Es ist hierbei Konvention, statt der numerischen Bezeichnung für  $L$ , wie bei den Unterschalen, die Bezeichner (S, D, P, F, G, ...) zu verwenden. Der Grundzustand des  $\text{Er}^{3+}$ -Ions wird als  $^4I_{15/2}$  bezeichnet. In Abbildung 2.15 sind die verschiedenen Energieniveaus und einige Übergänge von Erbium-dotiertem Quarzglas dargestellt. [76, Kap. 4]

Die diskreten Energieniveaus der  $\text{Er}^{3+}$ -Ionen werden im Wirtsmaterial durch verschiedene Effekte verbreitert. Durch die endliche mittlere Lebensdauer  $\tau$  des  $\text{Er}^{3+}$ -Ions in einem Energiezustand ist die Energie  $E$  dieses Zustandes mit einer Unschärfe  $\Delta E \approx \hbar/\tau$  behaftet [77, Kap. 21]. Das reduzierte Plancksche Wirkungsquantum  $\hbar$  ist mit dem Planckschen Wirkungsquantum  $h$  definiert als  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ . Hierdurch nimmt die homogene Linienbreite mit abnehmender Lebensdauer zu. Die Lebensdauer wird in Festkörpern durch das Auftreten von Gitterschwingungen begrenzt. Diese sogenannte homogene Linienverbreiterung hat spektral die Form einer Lorentzkurve [76, Kap. 4].

Durch Wechselwirkungen mit den elektromagnetischen Feldern der umliegenden Atome des Wirtsmaterials wird die Entartung der Energieniveaus aufgehoben. Die Energieniveaus spalten

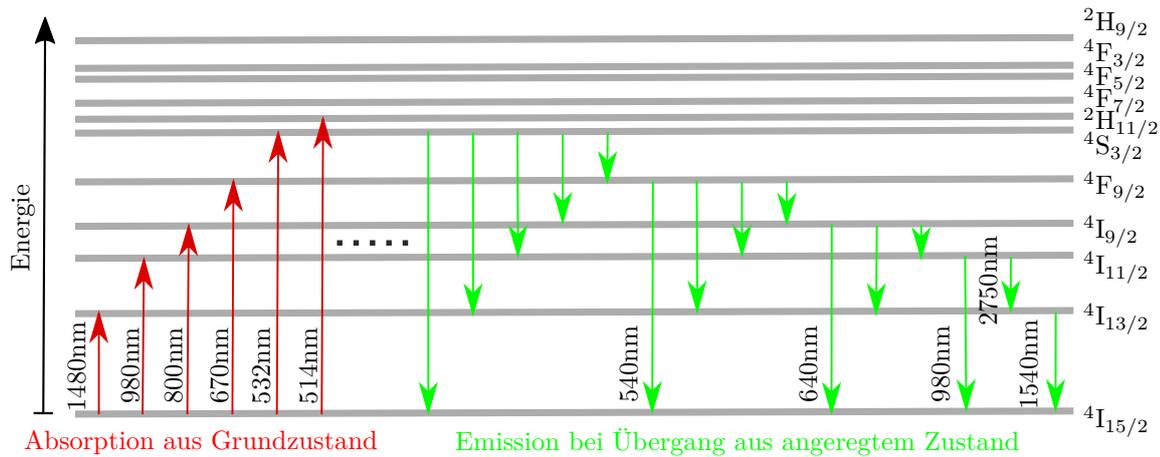


Abbildung 2.15.: Schematische Darstellung einiger Energieniveaus der Erbium-Ionen sowie die korrespondierenden Wellenlängen für Übergänge zwischen den Energieniveaus. [76, Kap. 4]

sich in Unterniveaus auf und verbreitern somit effektiv die Linienform. Dieser Effekt wird auch Stark-Effekt und die entstandenen Unterniveaus Stark-Niveaus genannt [76, Kap. 4]. An unterschiedlichen Orten unterscheiden sich die Wechselwirkungen der Erbium-Ionen mit dem Wirtsmaterial und somit auch die Aufspaltung in die Stark-Niveaus. Durch diese Randomisierung der Stark-Niveaus ergibt sich insgesamt eine Überlagerung aus vielen zueinander verschobenen Lorentzkurven. Dieser Effekt wird inhomogene Linienverbreiterung genannt.

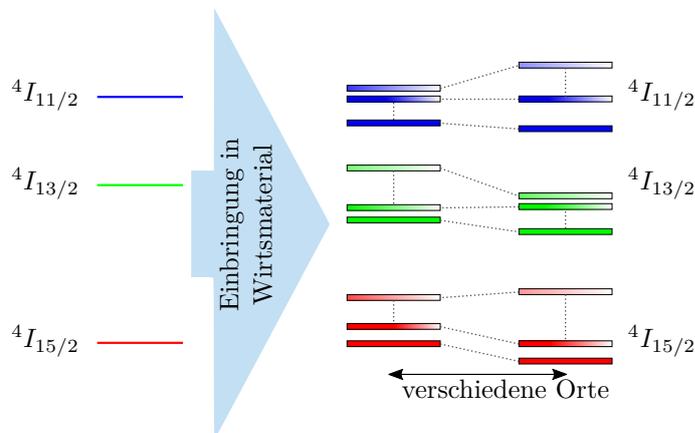


Abbildung 2.16.: Schematische Darstellung der Aufspaltung der diskreten Energieniveaus durch homogene und inhomogene Linienverbreiterung. Auf der linken Seite des Pfeils sind die Energieniveaus eines isolierten Erbium-Ions dargestellt und auf der rechten Seite die örtlich unterschiedliche Aufspaltung in Stark-Niveaus.[78]

Der Einfluss der homogenen und inhomogenen Linienverbreiterung ist schematisch in Abbildung 2.16 dargestellt. Die diskreten Energieniveaus verbreitern sich durch die Einbringung in das Wirtsmaterial homogen. Außerdem spalten sich die Energieniveaus in Stark-Niveaus auf, welche sich entlang der Faser unterscheiden. Die spektrale Linienverbreiterung der relevanten Energie-

niveaus wird in der Praxis durch Absorptions- und Emissionswirkungsquerschnittsspektren  $\sigma_{a/e}$  beschrieben, welche die Wahrscheinlichkeit für einen Übergang zwischen zwei Energieniveaus bei unterschiedlichen Wellenlängen beschreiben.

### 2.5.2. Drei-Niveau-Laser und Ratengleichungen

Relevant für die Anwendung als Faserverstärker in der optischen Übertragungstechnik sind die Energieniveaus  ${}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4I_{13/2}$  und  ${}^4I_{11/2}$ , die im Folgenden als das Grundniveau, das obere Laserniveau und das obere Pumpniveau bezeichnet werden. Ein EDFA wird daher oft als Drei-Niveau-Lasersystem modelliert [76, Kap. 4]. Ein reduziertes Energiediagramm ist in Abbildung 2.17 dargestellt. Mittels Absorption von Photonen der Pumpstrahlung bei 980 nm werden Erbium-Ionen in das obere Pumpniveau gehoben. Von diesem gehen sie mit einer kurzen Lebensdauer von wenigen  $\mu\text{s}$  in das obere Laserniveau über. Erbium-Ionen im oberen Laserniveau können strahlend durch stimulierte Emission oder durch spontane Emission vom oberen Laserniveau in das Grundniveau zurückgelangen.

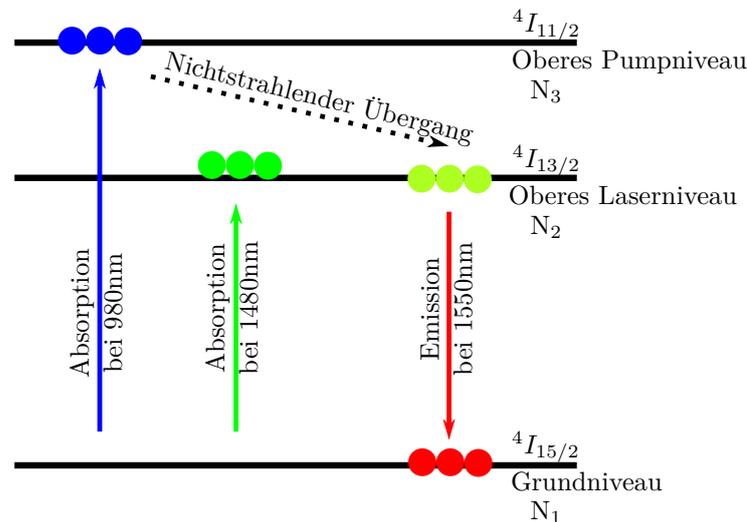


Abbildung 2.17.: Schematische Darstellung der drei üblicherweise zur Signalverstärkung verwendeten Energieniveaus und relevanter Übergänge in EDFA.

Stimulierte Emission beschreibt den gewünschten Prozess der Signalverstärkung, bei dem ein bereits vorhandenes Signalphoton mit passender Wellenlänge, durch den Übergang des Erbium-Ions vom oberen Laserniveau in das Grundniveau, kopiert wird. Die Kopie des Signalphotons besitzt exakt die Ausbreitungsrichtung, Phase, Polarisierung und Wellenlänge des ursprünglichen Signalphotons. Das ursprüngliche Signalphoton muss hierzu eine Wellenlänge im Bereich des Emissionswirkungsquerschnittsspektrums der Erbium-dotierten Faser aufweisen. [76, Kap. 4]

Spontane Emission beschreibt die zufällige Erzeugung von Photonen beim spontanen Übergang von Erbium-Ionen vom oberen Laserniveau in das Grundniveau. Die erzeugten Photonen besitzen zufällige Eigenschaften und eine Wellenlänge im Bereich der Energiedifferenz des Übergangs. Spontan emittierte Photonen in Ausbreitungsrichtung des Signals, werden diesem als Rauschen

hinzugefügt. Die Rauschleistung wird, wie die Signalleistung, entlang der Faser verstärkt und auch als verstärkte spontane Emission (eng. Amplified Spontaneous Emission (ASE)) bezeichnet.

Die Übergangsraten zwischen den einzelnen Energieniveaus lassen sich mithilfe von Ratengleichungen beschreiben [76, Kap. 1]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_{13}N_1 + R_{31}N_3 - W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + A_{21}N_2, \quad (2.28)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - A_{21}N_2 + A_{32}N_3, \quad (2.29)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{13}N_1 - R_{31}N_3 - A_{32}N_3. \quad (2.30)$$

Hierbei beschreibt  $N_1(r, \phi, z)$  die Besetzungsdichte des Grundniveaus,  $N_2(r, \phi, z)$  die Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus und  $N_3(r, \phi, z)$  die Besetzungsdichte des oberen Pumpniveaus. Die Dotierungsdichte des Wirtsmaterials mit Erbium-Ionen wird mit  $\rho$  bezeichnet. Außerdem beschreiben  $R_{13/31}$ ,  $W_{12/21}$  und  $A_{32/21}$  die Übergangsraten zwischen den Niveaus. Der Faktor  $R_{ij}$  beschreibt hierbei die Pumpraten,  $W_{ij}$  die Raten stimulierter Emission und  $A_{ij}$  die Raten der spontanen Übergänge. Im Folgenden wird der stationäre Zustand betrachtet. Es gilt folglich  $dN_i(r, \phi, z)/dt = 0$  und die Ratengleichungen können nun umgeschrieben werden zu:

$$N_1(r, \phi, z) = \rho \frac{(1 + W_{21}\tau_{21}) \left(1 + \frac{R_{13}}{A_{32}}\right)}{(1 + W_{21}\tau_{21}) \left(1 + \frac{R_{13}+R_{31}}{A_{32}}\right) + (1 + W_{12}\tau_{21}) \left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{13}\tau_{21}}, \quad (2.31)$$

$$N_2(r, \phi, z) = \rho \frac{R_{13}\tau_{21} + W_{12}\tau_{21} \left(1 + \frac{R_{13}}{A_{32}}\right)}{(1 + W_{21}\tau_{21}) \left(1 + \frac{R_{13}+R_{31}}{A_{32}}\right) + (1 + W_{12}\tau_{21}) \left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{13}\tau_{21}}, \quad (2.32)$$

$$N_3(r, \phi, z) = \rho - N_1(r, \phi, z) - N_2(r, \phi, z). \quad (2.33)$$

Die Lebensdauer im oberen Laserniveau liegt üblicherweise bei  $\tau_{21} = \frac{1}{A_{21}} \approx 10$  ms und die Lebensdauer im oberen Pumpniveau bei  $\tau_{32} = \frac{1}{A_{32}} \approx 8$   $\mu$ s [76, Kap. 4].

Die Übergangsraten zwischen den Energieniveaus  $W_{12}$ ,  $W_{21}$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{31}$ ,  $A_{32}$  und  $A_{21}$  sind definiert als:

$$W_{12}(r, \phi, z) = \sum_{i=0}^{M_{s+ASE}} \frac{\sigma_a(\nu_s)}{h\nu_s} P_{s+ASE,i} \Psi_{s+ASE,i}(r, \phi, z), \quad (2.34)$$

$$W_{21}(r, \phi, z) = \sum_{i=0}^{M_{s+ASE}} \frac{\sigma_e(\nu_s)}{h\nu_s} P_{s+ASE,i} \Psi_{s+ASE,i}(r, \phi, z), \quad (2.35)$$

$$R_{13}(r, \phi, z) = \sum_{k=0}^{M_p} \frac{\sigma_a(\nu_p)}{h\nu_p} P_{p,k} \Psi_{p,k}(r, \phi, z), \quad (2.36)$$

$$R_{31}(r, \phi, z) = \sum_{k=0}^{M_p} \frac{\sigma_e(\nu_p)}{h\nu_p} P_{p,k} \Psi_{p,k}(r, \phi, z), \quad (2.37)$$

$$A_{32}(r, \phi, z) = \frac{1}{\tau_{32}}, \quad (2.38)$$

$$A_{21}(r, \phi, z) = \frac{1}{\tau_{21}}. \quad (2.39)$$

Hierbei beschreibt  $P_{s+ASE,i}$  die Leistung eines spektralen oder räumlichen Kanals der Signal- oder ASE-Strahlung mit einer Wellenlänge um 1550 nm und  $P_{p,k}$  die Leistung eines räumlichen Kanals der Pumpstrahlung mit einer Wellenlänge um 980 nm. Weiterhin beschreiben  $\tau_{32}$  und  $\tau_{21}$  die mittlere Lebensdauer im oberen Pumpniveau bzw. im oberen Laserniveau, bevor ein spontaner Übergang in das darunterliegende Niveau erfolgt, sowie  $\Psi_{s+ASE,i}$  und  $\Psi_{p,k}$  die normierten Leistungsdichteverteilungen der jeweiligen transversalen Moden. Die normierte Leistungsdichteverteilung  $\Psi_i(r, \phi)$  ist mit der transversalen Leistungsdichteverteilungen  $S_i(r, \phi)$  und der Gesamtleistung  $P_i = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty S_i(r, \phi) r dr d\phi$  eines Modus allgemein definiert als:

$$\Psi_i(r, \phi) = \frac{S_i(r, \phi)}{P_i} = \frac{S_i(r, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty S_i(r, \phi) r dr d\phi}. \quad (2.40)$$

Die Absorptions- und Emissionswirkungsquerschnittsspektren  $\sigma_a$  und  $\sigma_e$  werden eingeführt, um die Linienverbreiterung im Drei-Niveau-Modell zu berücksichtigen. Sie beschreiben die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen den Energieniveaus bei verschiedenen Wellenlängen. Für verschiedene Kodotierungen lassen sich verschiedene Wirkungsquerschnittsspektren erzeugen und somit das Gewinnspektrum des EDFA anpassen. Verschiedene Wirkungsquerschnittsspektren im Bereich der Signalwellenlänge sind in Abbildung 2.18 dargestellt. Während Typ 1 einer Erbium-dotierten Germanosilikatglas-Faser entspricht, ist bei Typ 2 und Typ 3 eine Kodotierung mit Aluminium vorhanden, um einen möglichst breiten spektralen Bereich mit konstantem Emissionsspektrum um 1550 nm zu erreichen [76, Kap. 4].

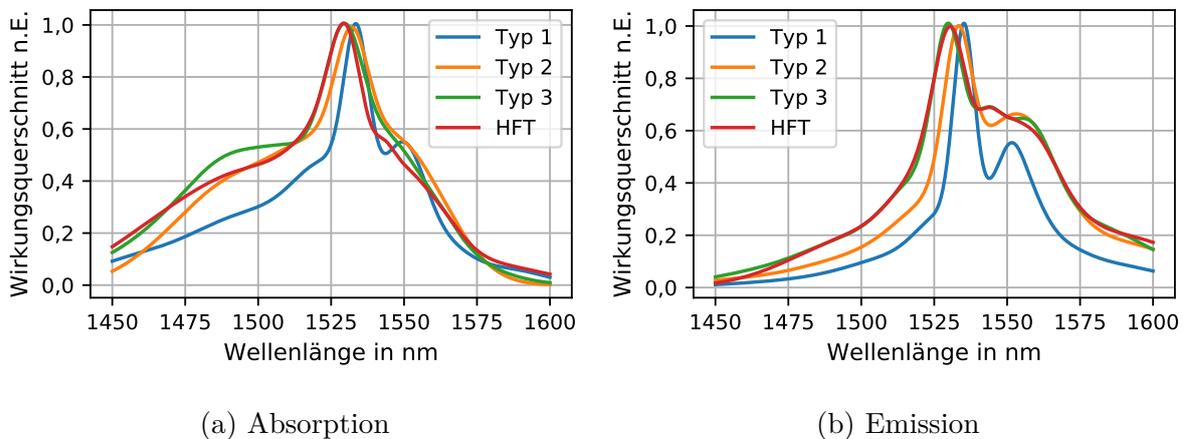


Abbildung 2.18.: Wirkungsquerschnittsspektren verschiedener Erbium-dotierter Fasern in normierten Einheiten (n.E.). Dargestellt sind Spektren des Typs 1–3 aus [76, Kap. 4] sowie ein am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik bestimmtes Spektrum "HFT".

Für nahezu voll invertierte Verstärkerfasern ist das Gewinnspektrum des Verstärkers ähnlich zum Emissionswirkungsquerschnittsspektrum. Als vollständige Inversion wird in diesem Zusammenhang der Zustand bezeichnet, bei dem sich alle Erbium-Ionen im oberen Laserniveau befinden. Die Besetzungsdichten sind somit im Vergleich zum nicht gepumpten EDFA invertiert. Im Bereich des C-Bands zwischen 1530 nm und 1560 nm, welches für die Signalübertragung genutzt wird, soll ein möglichst flaches Gewinnspektrum erzielt werden. Es ist zu erkennen,

dass die Fasern des Typs 3 und für das gemessene "HFT" Spektrum einen flachen Rücken im gewünschten Spektralbereich aufweisen. Die Faser des Typs 1 weist eine deutliche Absenkung im Bereich um 1540 nm auf. Im Folgenden werden, sofern nicht anders angegeben, die "HFT"-Querschnittsspektren zur Simulation des Verstärkerverhaltens verwendet. Für numerische Berechnungen ist es sinnvoll, die Emissions- und Absorptionsspektren in kompakter Form anzugeben. Hierzu kann mit

$$\sigma(\lambda) = \sum_i a_i e^{-4 \log 2 \frac{(\lambda - \lambda_i)^2}{\Delta \lambda_i^2}}, \quad (2.41)$$

aus der Halbwertsbreite  $\Delta \lambda_i$ , der Mittenwellenlänge  $\lambda_i$  und der Amplitude  $a_i$  das jeweilige Querschnittsspektrum errechnet werden. Die Wirkungsquerschnittsspektren werden hierbei durch eine Summe von Gauß-Kurven angenähert. Die Parameter für die Fasern des Typs 1, 2 und 3 finden sich in [76, Kap. 4]. In Tabelle 2.2 sind die Parameter für das gemessene Spektrum "HFT" aufgelistet.

Die verwendeten Übergangsraten aus Gleichung 2.34-2.37 beinhalten in jedem Ortspunkt eine Summation der örtlichen Leistungsdichten, was einer inkohärenten Überlagerung entspricht. Alternativ kann eine kohärente Überlagerung verwendet werden, um Schwebungseffekte zwischen den Signalmoden zu untersuchen [79–81]. Aufgrund von breitbandiger Pumpstrahlung und modulierten Signalleistungen in Kombination mit der langsamen Reaktion der Besetzungsdichten auf Änderungen der Eingangsleistungen, kann in realen Systemen von einer inkohärenten Überlagerung ausgegangen werden. Im Gegensatz zur Übertragungsfaser kann für die Verstärkerfaser außerdem Modenkopplung zwischen den Signalmoden und zwischen den Pumpmoden vernachlässigt werden, da die Erbium-dotierte Faser nur wenige Meter lang ist [82].

Tabelle 2.2.: Parameter zur Berechnung der verwendeten "HFT" Emissions- und Absorptionswirkungsquerschnittsspektren mit Formel 2.41.

Absorptionsspektrum			Emissionsspektrum		
$\lambda_i$	$\Delta \lambda_i$	$a_i$	$\lambda_i$	$\Delta \lambda_i$	$a_i$
1465.9	49.17	0.153	1500.9	54.46	0.195
1502.8	55.55	0.403	1525.0	28.61	0.335
1525.5	26.13	0.321	1531.2	13.99	0.600
1530.4	13.38	0.484	1542.9	8.72	0.184
1543.0	8.05	0.102	1548.1	12.23	0.223
1547.5	14.25	0.133	1556.9	17.81	0.234
1556.5	24.57	0.269	1561.8	26.91	0.265
1579.0	45.30	0.076	1589.4	52.76	0.192
Amplitude für $a$		$2.57 \cdot 10^{-25}$	Amplitude für $a$		$2.25 \cdot 10^{-25}$

### 2.5.3. Leistungspegelverläufe

Die Veränderung der Leistungen aller Signalkanäle  $P_{s,i}$ , Pumpkanäle  $P_{p,k}^\pm$  und ASE-Kanäle  $P_{\text{ASE},i}^\pm$  entlang der EDF lässt sich beschreiben durch ein gekoppeltes Differentialgleichungssystem [76,

Kap. 4]:

$$\frac{dP_{s,i}(z)}{dz} = P_{s,i}(z) \int \int \Psi_{s,i}(r, \phi, z) [N_2(r, \phi, z)\sigma_e(\nu_s) - N_1(r, \phi, z)\sigma_a(\nu_s)] dA, \quad (2.42)$$

$$\frac{dP_{p,k}^\pm(z)}{dz} = \mp P_{p,k}^\pm(z) \int \int \Psi_{p,k}(r, \phi, z) N_1(r, \phi, z)\sigma_a(\nu_p) dA, \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ASE,k}^\pm(z)}{dz} &= \pm P_{ASE,i}^\pm(z) \int \int \Psi_{s,i}(r, \phi, z) [N_2(r, \phi, z)\sigma_e(\nu_{ASE}) - N_1(r, \phi, z)\sigma_a(\nu_{ASE})] dA \\ &\quad \pm m_g \sigma_e(\nu_{ASE}) h \nu_{ASE} \Delta \nu \int \int N_2(r, \phi, z) \Psi_{s,i}(r, \phi, z) dA. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Der Degenerationsfaktor  $m_g$  beschreibt die Anzahl der räumlich entarteten Versionen eines Modus. Für Moden, welche in beiden Polarisierungen vorliegen, wird folglich der Wert  $m_g = 2$  angenommen. Das ASE-Spektrum wird unterteilt in Abschnitte mit der spektralen Breite  $\Delta \nu$  und der Frequenz  $\nu_{ASE}$ , in denen die Generation der ASE als jeweils konstant angenommen wird. In dieser Arbeit wird die ASE bei den Frequenzen der Signalkanäle berechnet. Um Ausläufer der ASE außerhalb des Signalspektrums zu berücksichtigen, werden zusätzliche ASE Kanäle außerhalb des Signalspektrums verwendet. Auf diese Weise kann eine Sättigung des Verstärkers durch die Summenleistung der ASE berücksichtigt werden.

Als Hilfsgröße zur Beschreibung der Inversion des EDFA lässt sich außerdem der spontane Emissionsfaktor  $\eta_{sp}$  mit  $\eta = \sigma_e/\sigma_a$  definieren als:

$$\eta_{sp} = \frac{\eta N_2}{\eta N_2 - N_1}. \quad (2.45)$$

#### 2.5.4. Rauschverhalten

In EDFA wird sowohl das Eingangsrauschen verstärkt als auch neues Rauschen erzeugt. Durch spontane Emission vom oberen Laserniveau in das Grundniveau, werden Photonen auch innerhalb des Signalbandes erzeugt, welche eine zufällige Phase und Richtung aufweisen. Spontan emittierte Photonen, welche in die Eigenwelle eingekoppelt werden und sich kodirektional zum Signal ausbreiten, können als additives Rauschen die Signalqualität verschlechtern.

Das Rauschverhalten eines optischen Verstärkers lässt sich durch die sogenannte Rauschzahl  $F$  beschreiben, welche definiert ist als Verhältnis des optischen Signal-Rausch-Abstands am Verstärkereingang  $SNR_{O,Ein}$  zum optischen Signal-Rausch-Abstand am Verstärkerausgang  $SNR_{O,Aus}$ :

$$F = \frac{SNR_{O,Ein}}{SNR_{O,Aus}}. \quad (2.46)$$

Der  $SNR_O$  beschreibt den Signal-Rausch-Abstand in der elektrischen Ebene, der durch Effekte in der optischen Ebene verursacht wird, unter Annahme eines idealen Photodetektors. Am Ausgang der EDF kann der  $SNR_O$  beschrieben werden mit [38, Kap. 22.3]:

$$SNR_{O,Aus} = \frac{G^2 \langle n(0) \rangle^2}{\sigma^2}. \quad (2.47)$$

Hierbei beschreibt  $G(z)$  den Gewinn entlang der EDF,  $\langle n(0) \rangle$  die mittlere Anzahl an Signalphotonen pro Bitdauer am Fasereingang und  $\sigma^2$  die Varianz, die der Rauschphotonenzahl pro Bitdauer

entspricht. Am Eingang der Faser wird ideales Quantenrauschen einer Poisson-verteilter Photonenstatistik angenommen, wie sie ein Laser erzeugt. Unter Annahme einer Poissonverteilung gilt für die Varianz  $\sigma^2 = \langle n(0) \rangle$ . Für den  $\text{SNR}_{\text{O, Ein}}$  am Eingang der Faser gilt folglich [38, Kap. 22.3]:

$$\text{SNR}_{\text{O, Ein}} = \frac{\langle n(0) \rangle^2}{\sigma^2} = \langle n(0) \rangle. \quad (2.48)$$

Die Varianz  $\sigma^2$  setzt sich aus dem Signal-Schrotrauschen, dem Signal-ASE-Überlagerungsrauschen, dem ASE-ASE-Überlagerungsrauschen und dem ASE-Schrotrauschen zusammen [38, Kap. 22.3]. Insgesamt ergibt sich für die Rauschzahl des Verstärkers:

$$F = \frac{1}{G} \left( 1 + 2N + \frac{2N^2}{G^2 \langle n(0) \rangle} + \frac{2N}{G^2 \langle n(0) \rangle} \right). \quad (2.49)$$

Die Anzahl der Rauschphotonen wird hierbei mit  $N$  bezeichnet. Für Verstärker mit einem genügend hohen Produkt aus Signaleingangsleistung und Gewinn spielen der dritte und vierte Summand in der Klammer keine Rolle und können vernachlässigt werden. Die Rauschzahl ist dann gegeben durch

$$F = \frac{1 + 2N}{G} = \frac{1}{G} (1 + 2N) = \frac{1 + 2\eta_{\text{sp}} (G - 1)}{G} = \frac{1}{G} \left( 1 + \frac{2S_{\text{ASE}}}{h\nu} \right), \quad (2.50)$$

mit dem Planckschen Wirkungsquantum  $h$  und der Leistungsdichte der ASE  $S_{\text{ASE}}$  pro Polarisation.

Die Rauschzahl eines EDFA kann niemals kleiner als eins sein, da der EDFA dem Signal stets Rauschen durch spontane Emission hinzufügt ( $\text{SNR}_{\text{O, Aus}} < \text{SNR}_{\text{O, Ein}}$ ). Für hohe Gewinne gilt  $F = 2\eta_{\text{sp}}$ . Da der spontane Emissionsfaktor in diesem Arbeitsbereich minimal  $\eta_{\text{sp}} = 1$  sein kann, ist die minimale Rauschzahl für hohe Gewinne gegeben als  $F_{\text{min}} = 2 = 3 \text{ dB}$ . Diese Grenze wird in der Literatur auch oft als Quantenlimit der Rauschzahl bezeichnet. [38, Kap. 22.3]

In üblichen Systemen werden EDFA mit einer Wellenlänge der Pumpstrahlung von 980 nm oder 1480 nm betrieben. Eine Pumpwellenlänge von 980 nm hebt die Erbium-Ionen in das obere Pumpniveau. Aufgrund der geringen Lebensdauer in diesem Energieniveau gehen die  $\text{Er}^{3+}$ -Ionen schnell in das obere Laserniveau über, so dass die Besetzungsdichte des oberen Pumpniveaus gering bleibt. Die Wahrscheinlichkeit für eine Absorption ist, anders als beim Pumpen mit 1480 nm, deutlich höher als die Wahrscheinlichkeit für stimulierte Emission. Es lässt sich ein spontaner Emissionsfaktor nahe 1 erreichen. Die Rauschzahl befindet sich somit nah am Quantenlimit.

Unter Verwendung von Pumpstrahlung bei 1480 nm werden Erbium-Ionen direkt in das obere Laserniveau angehoben. Mit zunehmender Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus sinkt allerdings die Wahrscheinlichkeit für eine weitere Absorption von Pumpphotonen durch Erbium-Ionen. Folglich lässt sich keine vollständige Inversion erreichen und die Rauschzahl unter Verwendung dieser Pumpwellenlänge liegt bei vergleichbaren Betriebszuständen höher als unter Verwendung von Pumpstrahlung bei 980 nm.

### 2.5.5. Sättigungsverhalten

Aufgrund des Energieerhaltungssatzes können Signalleistung und die ASE bei einer endlichen Pumpleistung nicht unendlich verstärkt werden. In Abbildung 2.19(a) sind die Leistungsverläufe

des Signals, der Pumpstrahlung und der ASE-Leistung entlang der EDF dargestellt. Beispielhaft wird hierfür eine 15 m lange Faser mit 6 Signalmoden bei 1550 nm, einem Kerndurchmesser von  $9,4\ \mu\text{m}$  sowie einer numerischen Apertur von  $0,27$  gewählt. Als Pumpstrahlung werden alle 17 ausbreitungsfähigen Pumpmoden bei  $980\ \text{nm}$  gleichermaßen angeregt. Der gesamte Kernbereich ist mit einer Dotierdichte von  $5 \cdot 10^{24}\ \text{m}^{-3}$  mit Erbiumionen dotiert. Dargestellt ist die Summenleistung aller Signalkanäle, der Pumpstrahlung sowie jeweils die Summenleistung der vorwärts und der rückwärtslaufenden ASE.

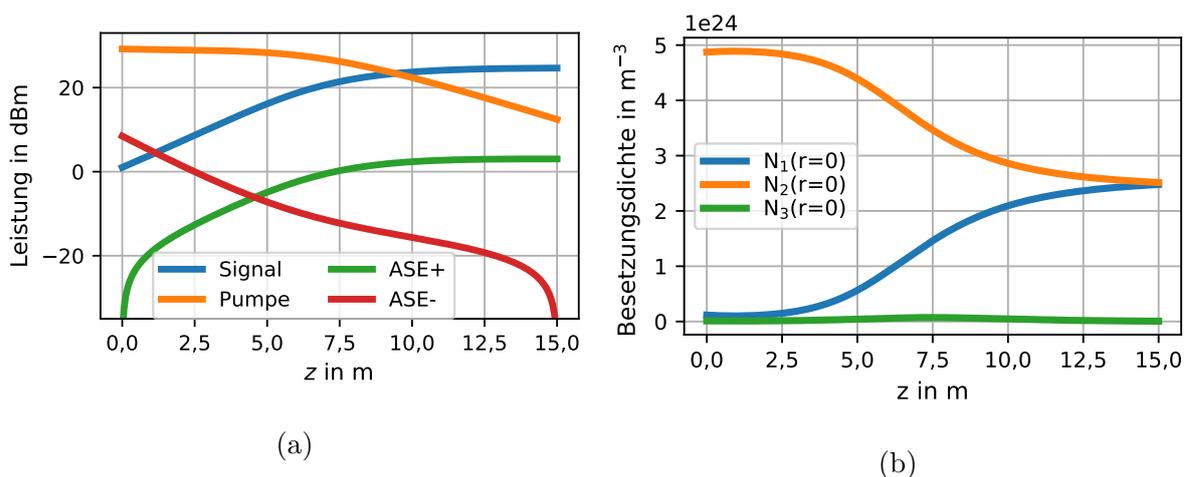


Abbildung 2.19.: Leistungspegelverläufe der Signal-, Pump- und Rauschleistungen entlang der Faser (a). Dargestellt sind jeweils die Summenleistungen aller spektralen und räumlichen Kanäle. Außerdem dargestellt sind die Besetzungsdichten der betrachteten Energieniveaus auf der Faserachse bei  $x = y = 0$  (b).

Am Fasereingang werden Signal- und Pumpleistung eingekoppelt. Die Signalleistung beträgt  $-22\ \text{dBm}$  pro räumlichem und spektralem Kanal unter Verwendung von 50 äquidistant zwischen  $1530\ \text{nm}$  und  $1560\ \text{nm}$  verteilten WDM-Kanälen pro Modus. Die Pumpleistung beträgt  $0,83\ \text{W}$ . Durch stimulierte Emission zusätzlicher Signalphotonen steigt die Signalleistung entlang der Faser an. Im vorderen Bereich ist der Leistungsanstieg steiler als im hinteren Bereich der Faser, da im vorderen Bereich die Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus höher ist. Im hinteren Bereich der Faser reicht die vorhandene Pumpleistung nicht mehr aus, um das Signal weiter zu verstärken. Die Pumpleistung für  $z \geq 10\ \text{m}$  ist unter den Wert für die örtliche Transparenz gesunken. Aufgrund der hohen Signalleistung wird die Faser für  $z \geq 10\ \text{m}$  transparent. Die Rate der stimulierten Emission übersteigt die Rate der spontanen Emission. Man spricht in diesem Fall von Gewinnsättigung, da der Verstärker durch eine hohe Signaleingangsleistung gesättigt wird.

Die Pumpleistung nimmt entlang der Faser ab, da diese entlang der Faser absorbiert wird. Aufgrund der sinkenden Pumpleistung nimmt die Besetzungsdichte des Grundniveaus im hinteren Bereich der Faser zu. Entlang der gesamten Faser entsteht Rauschleistung durch spontane Emission. Relevant sind die Anteile der spontan emittierten Rauschleistung, welche in einen der verwendeten Signalmoden eingekoppelt werden. Diese spontan emittierten Rauschphotonen werden schließlich durch stimulierte Emission verstärkt und ASE genannt. Die Leistung der vorwärtslaufenden ASE vergrößert sich vom Fasereingang zum Faserausgang und bestimmt die

Rauschzahl des Verstärkers. Die rückwärtslaufende ASE gelangt zwar nicht als Rauschen zum Empfänger, kann allerdings bei großen Faserlängen und geringen Signaleingangsleistungen eine so große Leistung entwickeln, dass die Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus am Eingang der Faser absinkt und der EDFA lokal in Sättigung geht. Dies kann ebenfalls zu einer Erhöhung der Rauschzahl führen.

In Abbildung 2.19(b) sind die Besetzungsdichten des oberen Pumpniveaus, des oberen Laserniveaus und des Grundniveaus entlang der Faserachse dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Bereich des Fasereingangs näherungsweise vollständige Besetzungsinversion vorliegt. Im hinteren Bereich der Faser sinkt die Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus ab, da nicht mehr genügend Pumpleistung vorhanden ist, um die Besetzungsinversion aufrechtzuerhalten. Die Signalleistung steigt nicht weiter an. Am Fasereingang ist ebenfalls eine Absenkung der Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus zu erkennen. Durch die lange EDF kann sich die ASE in Rückwärtsrichtung akkumulieren und besitzt am Fasereingang genügend Leistung, um eine Absenkung der Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus zu erzeugen.

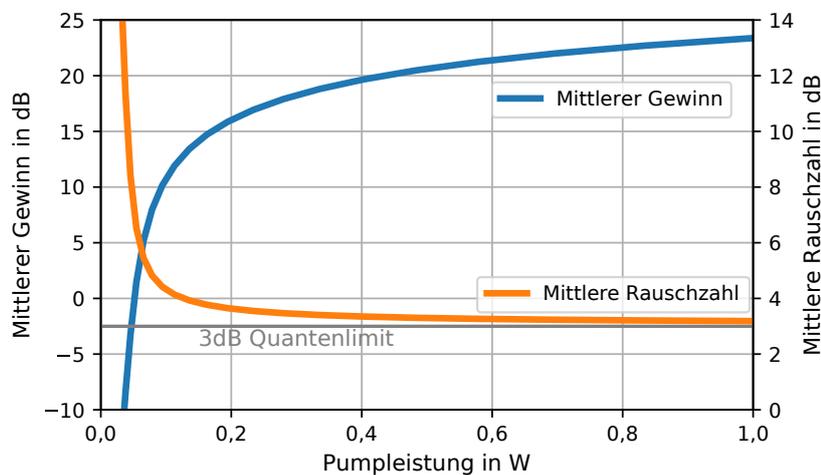


Abbildung 2.20.: Mittlerer Gewinn eines EDFA mit vier Signalmode und 50 Signalwellenlängen für verschiedene Pumpleistungen. Außerdem ist zu jeder Pumpleistung jeweils die resultierende mittlere Rauschzahl aller räumlichen und spektralen Kanäle dargestellt.

Sowohl der Gewinn, als auch die Rauschzahl eines EDFA hängen von der Pumpleistung ab. In Abbildung 2.20 ist die Abhängigkeit des mittleren Gewinns aller Signalkanäle und der mittleren Rauschzahl aller Signalkanäle von der Pumpleistung dargestellt. Die Simulationsparameter sind identisch zu denen der vorherigen Simulation. Hierbei sind verschiedene Betriebsbereiche des EDFA abhängig von der Pumpleistung zu erkennen. Im Bereich geringer Pumpleistung erfährt das Signal einen negativen Gewinn. Es ist nicht genügend Pumpleistung vorhanden, um eine ausreichend hohe Anzahl an Erbium-Ionen entlang der Faser in das obere Laserniveau zu heben. Die im Grundniveau verbliebenen Erbium-Ionen absorbieren in diesem Fall die Signalleistung. Für eine steigende Pumpleistung steigt auch der Gewinn des Verstärkers an. Für weiter steigende Pumpleistungen beginnt der Gewinn weniger stark anzusteigen. In diesem Betriebszustand befinden sich nahezu alle Erbium-Ionen entlang der Faser im oberen Laserniveau und eine steigende Pumpleistung kann nur zu einem geringen Teil von den Erbium-Ionen absorbiert

werden. Man spricht auch von einem Ausbleichen der Pumpabsorption. Der Anteil der Erbium-Ionen im oberen Laserniveau und somit der Signalgewinn ist durch die endliche Anzahl an Erbium-Ionen begrenzt.

Für den Fall der vollständigen Inversion ( $N_2 \approx \rho$ ) wird auch von einem linearen Betrieb des EDFA gesprochen. In diesem Arbeitspunkt wird die Absorption von Pumpphotonen durch die Anzahl der verfügbaren Erbium-Ionen begrenzt. Solange vollständige Inversion entlang der Faser vorhanden ist, steigt die Ausgangsleistung proportional zur Eingangsleistung an. Der Gewinn des Verstärkers ist folglich unabhängig von der Eingangsleistung. Man spricht auch vom Kleinsignalbetrieb. Aus Gleichung 2.42 ergibt sich die homogene lineare Differentialgleichung:

$$\frac{dP_{s,i}(z)}{dz} = P_{s,i}(z)\rho\sigma_e, \quad (2.51)$$

unter der Annahme einer konstanten Dotierung im Kernbereich  $\rho$  und einer ausreichend starken Führung des betrachteten Signalmodus im Kern ( $\int \int \Psi_i(r, \phi)\rho(r, \phi)drd\phi \approx \rho$ ). Als Lösung ergibt sich die Vorschrift zur Berechnung der Ausgangsleistung eines EDFA mit einer Faserlänge  $L$  bei vollständiger Inversion:

$$P_{\text{out},i} = P_{\text{in},i} \cdot e^{(\rho\sigma_e L)}. \quad (2.52)$$

In logarithmischen Einheiten steigt der Gewinn folglich linear mit der Faserlänge an. Dieser Zusammenhang gilt allerdings nur, solange die Annahme der vollständigen Inversion gilt. Für eine zu lange Faser oder eine zu hohe Signaleingangsleistung wird die Pumpleistung nicht mehr ausreichen, um alle Erbium-Ionen zu invertieren.

Bei genügend hoher Signaleingangsleistung reicht die vorhandene Pumpleistung entlang des EDFA nicht aus, um an jedem Ort entlang der Faser für eine Verstärkung des Signals zu sorgen. Ab einem Punkt entlang der Faser beginnt der Signalgewinn zu stagnieren. Die Wahrscheinlichkeit für die stimulierte Emission eines Signalphotons wird folglich gleich oder kleiner der Wahrscheinlichkeit einer Absorption.

In Abbildung 2.21(a) sind die Gewinne einzelner räumlicher und spektraler Signalkanäle eines MDM-EDFA für verschiedene Pumpleistungen dargestellt. Da die entarteten  $LP_{a,b}$ -Moden in diesem Modell identische Gewinne erfahren, sind sie in den folgenden Graphen jeweils zusammengefasst dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Pumpleistung der Gewinn aller Kanäle ansteigt. Mit steigendem Gewinn beginnt außerdem der Einfluss des Emissionswirkungsquerschnittsspektrums auf das Gewinnspektrum zu steigen. Bei 1533 nm bildet sich der höchste Gewinn aus. In Abbildung 2.21(b) sind außerdem die Rauschzahlen aller räumlichen und spektralen Kanäle bei verschiedenen Pumpleistungen dargestellt. Mit steigender Pumpleistung und somit steigendem Gewinn, sinkt die Rauschzahl für alle Kanäle ab. Außerdem ist zu erkennen, dass die Rauschzahl für geringe Pumpleistungen bei niedrigen Signalwellenlängen am größten ist.

Das beschriebene Sättigungsverhalten gilt bei einem EDFA nur für niederfrequente Signale. Aufgrund der relativ hohen Lebensdauer der Erbium-Ionen im oberen Laserniveau von  $\tau_{21} = 100 \mu\text{s} \dots 12 \text{ ms}$  kann der Arbeitspunkt des Verstärkers nur Signalpegeländerungen mit Frequenzen unter  $\approx 100 \text{ MHz}$  folgen. Schnellere Signaländerungen werden von den Ionen im oberen Laserniveau abgefangen. Die Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus sorgt folglich für einen Puffer zur Verstärkung hochfrequenter Signalanteile. Die Modulation eines Datensignals in einem optischen Übertragungssystem erfolgt üblicherweise im Bereich  $> 10 \text{ GHz}$ . Sie ist somit um

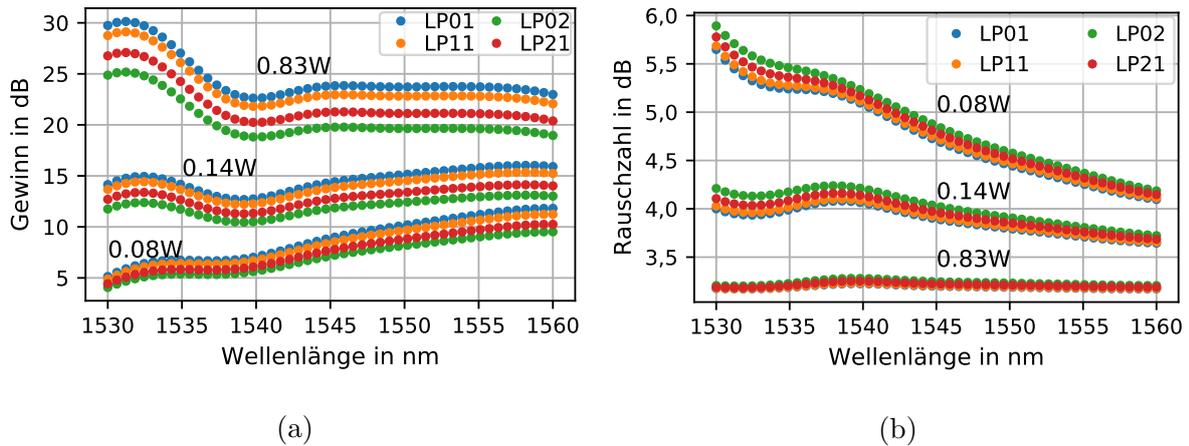


Abbildung 2.21.: Gewinnspektren der  $LP_{0,1}$ ,  $LP_{1,1a/b}$ ,  $LP_{2,1a/b}$  und  $LP_{0,2}$ -Moden (a) sowie die Rauschzahlen aller spektralen und räumlichen Kanäle (b) für verschiedene Pumpleistungen.

Größenordnungen schneller als diese Grenzfrequenz und kann verzerrungsfrei verstärkt werden. Diese Eigenschaft wird auch Pseudolinearität des EDFA genannt. Lediglich der Mittelwert der Signalleistung bzw. die niederfrequenten Signalanteile bestimmen den Arbeitspunkt des EDFA. [60, Kap. 3.1.2]

### 2.5.6. Wellenlängenabhängigkeit des Gewinns

Aufgrund der Form der Emissions- und Absorptionswirkungsquerschnittsspektren  $\sigma_{e/a}$  werden verschiedene Wellenlängenkanäle unterschiedlich verstärkt. Im Fall einer ausreichend invertierten EDF, bestimmt die Form des Emissionsswirkungsquerschnittsspektrums das Gewinnspektrum, wie in Abbildung 2.21 dargestellt. Spektrale Komponenten bei 1530 nm werden stärker verstärkt als Komponenten bei 1560 nm.

Um einen möglichst großen Wellenlängenbereich mit WDM-Kanälen befüllen zu können, muss der Gewinn des EDFA im gesamten Spektralbereich möglichst konstant sein. Die unterschiedliche Verstärkung einzelner WDM-Kanäle akkumuliert sich mit jedem Verstärker entlang der Übertragungstrecke auf. Am Empfänger unterscheiden sich somit die Eingangsleistungen der jeweiligen Photodioden der einzelnen WDM-Kanäle. Dies führt zu einer Verschlechterung der Übertragungsqualität und kann sogar den Dynamikbereich des Empfängers übersteigen. Ohne Maßnahmen zur Angleichung der Gewinne kann nur der flache Rücken des Verstärkungsspektrums von  $\approx 1540$  nm bis  $\approx 1560$  nm genutzt werden (vgl. Abbildung 2.21).

Zur Angleichung der Gewinne aller WDM-Kanäle haben sich passive optische Filter durchgesetzt, welche die überschüssige Leistung in spektralen Bereichen mit hohem Gewinn herausfiltern [83]. Hierzu haben sich langperiodische Faser-Gitter (LPG) aufgrund ihrer kompakten und kostengünstigen Bauart, ihrer guten Wellenlängencharakteristik und ihrer geringen Temperaturempfindlichkeit durchgesetzt. Ein LPG koppelt mithilfe einer periodischen Modulation des Brechungsindex Leistung aus einem im Kern geführten Modus der EDF in einen Mantelmodus. Aufgrund der

Periodizität der Brechzahlmodulation ist dieser Vorgang wellenlängenabhängig und kann als spektrales Filter verwendet werden. [84; 38, Kap. 22.5]

Passive optische Filter lassen sich im Vergleich zu aktiven Filtern kostengünstig herstellen, können allerdings einer Änderung des Gewinnspektrums im Betrieb des Systems nicht folgen. Oftmals wird daher eine Gewinnregelung angewandt, um in Kombination mit einem passiven Filter flache Gewinnspektren in einem weiten Arbeitsbereich zu erzeugen. Eine weitere Möglichkeit bietet die Verwendung eines VOA zwischen den Verstärkerstufen eines zweistufigen EDFA. Dieses kann verwendet werden, um das Gewinnspektrum zu verkippen und somit an die Anforderungen des passiven Filters anzupassen (vgl. Abbildung 2.14). [75, Kap. 4.3]

### 2.5.7. Modenabhängigkeit des Gewinns

In einem MDM-EDFA können viele Signalmoden mit jeweils unterschiedlicher räumlicher Aufteilung im Kern der aktiven Faser verstärkt werden. Je nach Pumpkonfiguration und Erbium-Dotierungsprofil, besitzen nicht alle Signalmoden die gleiche transversale Überlappung mit Erbium-Ionen im oberen Laserniveau. Dies führt nach Gleichung 2.42 zu unterschiedlichen Verstärkungen für die verschiedenen Moden.

Unterschiedliche Gewinne einzelner Signalmoden wirken sich ähnlich wie modenabhängige Verluste auf die Signalqualität aus. In kohärenten MIMO-Übertragungssystemen können MDG und MDL die Wahrscheinlichkeit für Systemausfälle erhöhen [30–33]. Neben den MDM-EDFA, die in der Literatur als die Hauptquelle für MDG und MDL angenommen werden, kann MDL von Komponenten wie Modenmultiplexern, Kopplern, Schaltern, Modenmischern, Spleißen etc. erzeugt werden [85, 86]. In einem MDM-Übertragungssystem akkumulieren sich MDG und MDL entlang der Strecke. In einem System ohne Modenkopplung summieren sich die Gewinnunterschiede linear auf, während starke Kopplung zwischen allen Moden dafür sorgen kann, dass der akkumulierte MDG/MDL nur mit der Wurzel der Faserlänge ansteigt [72]. Es ist ratsam, auch im Kontext anderer potenzieller MDL-Quellen, MDG im MDM-EDFA so weit wie möglich zu minimieren, um die Stabilität von MDM-Systemen zu erhöhen.

Die Freiheitsgrade, welche sich zur Anpassung der Gewinne verschiedener Signalmoden ergeben, sind in Abbildung 2.22 schematisch dargestellt. Neben einer Anpassung des Brechzahlprofils und der Erbium-Dotierung, kann die transversale Verteilung der Pumpleistungsdichte zur Angleichung der Signalgewinne optimiert werden.

In der Literatur sind einige Versuche unternommen worden, die Erbium-Dotierung so anzupassen, dass eine möglichst gleichmäßige Überlappung des invertierten Erbiums mit der aktiven Faser erreicht wird. Für die ersten drei Signalmoden wurde gezeigt, dass eine ringförmige Erbium-Dotierung im äußeren Bereich des Kerns der aktiven Faser zu einer Angleichung der Gewinne der Moden führt [87, 88]. Für die vier Moden  $LP_{1,1a/b}$  und  $LP_{2,1a/b}$  wurde ebenfalls gezeigt, dass eine ringförmige Erbium-Dotierung ausreicht, um Gewinnunterschiede von unter 1 dB bei einem mittleren Gewinn von  $\approx 20$  dB zu erreichen [36]. Unter Verwendung von Moden mit einer geringen radialen Ordnung reicht es folglich aus, den niedrigeren Gewinn der Moden höherer Ordnung bei konstanter Dotierung des gesamten Kerns durch eine Erhöhung der Erbium-Dotierungsdichte im äußeren Kernbereich auszugleichen. Für 10 ausbreitungsfähige Moden wurden simulativ Erbium-Dotierungsprofile für eine aktive Faser mit Stufenbrechzahlprofil ermittelt [37]. Hierbei zeigte sich, dass für eine zunehmende Anzahl an Signalmoden komplizierte

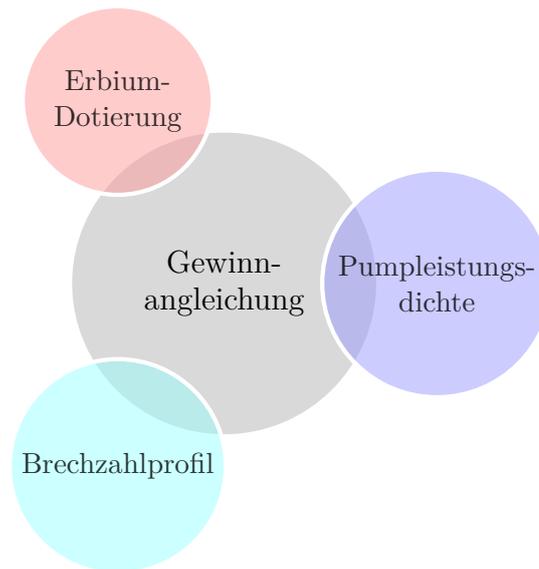


Abbildung 2.22.: Verfügbare Freiheitsgrade zur Anpassung der modalen Gewinne in einem MDM-EDFA.

Erbium-Dotierungsprofile nötig sind. Ebenfalls für 10 Moden wurden Methoden verwendet, welche das Dotierungsprofil nicht nur in radialer Richtung, sondern ebenso in azimuthaler Richtung optimieren [89, 90]. Hierbei deutet sich an, dass für eine Angleichung der Gewinne vieler Signalmoden, entsprechend komplizierte alternierende Dotierungsprofile nötig sind. In Kapitel 5 dieser Arbeit werden optimierte Dotierungsprofile für Fasern mit bis zu 55 Signalmoden vorgestellt.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Anpassung der räumlichen Verteilung der Pumpstrahlung dar [34, 35, 91]. Hierbei wird die Pumpleistung auf eine solche Weise auf die einzelnen Moden der Pumpstrahlung verteilt, dass die Verteilung des dadurch ins obere Laserniveau angeregten Erbiums für eine Angleichung der modalen Gewinne sorgt. Im Gegensatz zur Anpassung der Erbium-Dotierung gibt es hierbei keine technologischen Beschränkungen für die räumliche Verteilung der Pumpleistungen. Die Steilheit der Flanken in radialer Richtung der resultierenden Pumpleistungsdichte ist durch die Feldverteilungen der einzelnen Moden gegeben und hängt nicht von technologischen Beschränkungen, wie der maximal erreichbaren Flankensteilheit der Erbium-Dotierung, ab. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass das Verhalten des EDFA im laufenden Betrieb durch Anpassung der Pumpstrahlungsverteilung verändert werden kann. Auf diese Weise können einem System beispielsweise Signalmoden zur Erhöhung der Kapazität hinzugefügt werden, ohne den Verstärker austauschen zu müssen. Die Anpassung der Pumpstrahlung kann adaptiv mithilfe eines SLM geschehen, der zwischen der Pumpstrahlung und dem WDM-Koppler zur Einkopplung der Pumpleistung in die aktive Faser platziert wird [82, 92]. Experimentell wurde gezeigt, dass sich die Gewinne von vier Signalmoden in einer EDF mit einer erhöhten Konzentration an Erbium-Ionen im äußeren Kernbereich und unter alleiniger Verwendung des  $LP_{2,1}$  Pumpmodus bei 980 nm angleichen lassen [91]. Numerisch konnte gezeigt werden, dass unter Verwendung eines optimierten Erbium-Dotierungsprofils die Gewinne von 10 Signalmoden durch eine Optimierung der transversalen Pumpleistungsdichte auf bis zu 0,12 dB angeglichen werden können [93]. Außerdem wurde gezeigt, dass die Pumpmoden rotationssym-

metrisch gewählt werden sollten, um eine Abhängigkeit des Gewinns vom Rotationswinkel der Signalmoden zu vermeiden [94]. In Kapitel 6 und Kapitel 7 dieser Arbeit werden Verfahren zur Optimierung der Pumpleistungsverteilung zur Angleichung der Gewinne von mehr als 100 Signalmoden vorgestellt.

Neben einer Angleichung der Signalgewinne durch eine Optimierung der Erbium-Dotierung oder der radialen Verteilung der Pumpleistungsdichte kann das Brechzahlprofil der Faser angepasst werden, um den MDG zu beeinflussen. Da der Gewinn der Signalmoden von ihrem Überlapp mit Erbium-Ionen im oberen Laserniveau abhängt, sorgt eine bessere Führung der Moden im Kernbereich für eine Angleichung der Signalgewinne, wenn man annimmt, dass alle Erbium-Ionen im Kernbereich die gleiche Pumpleistungsdichte sehen. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die Verwendung eines Gradienten-, anstatt eines Stufenbrechzahlprofils, als auch die Verwendung eines Grabens im Brechzahlprofil nahe dem Kernbereich zu einer Verringerung des MDG führen kann [95]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eine aktive Faser zu verwenden, in der mehr Moden ausbreitungsfähig sind als zur Signalübertragung verwendet werden sollen. Werden nur die Moden mit hohem Phasenparameter als Signalmoden verwendet, so werden für diese Moden geringe Gewinnunterschiede erzielt [21]. Auf Basis dieses Vorgehens wurde der MDM-EDFA mit der bisher größten Anzahl an Signalmoden von theoretisch bis zu 36 Signalmoden und einem  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ -Wert von weniger als 0,5 dB experimentell demonstriert [23]. Obwohl laut den Autoren theoretisch 36 Signalmoden verwendet werden können, wurden Ergebnisse für einen Betrieb mit nur 10 Signalmoden vorgestellt, da Schwierigkeiten bei der Anregung einzelner Moden bestünden. Ebenfalls erprobt wurde die Verwendung einer Mehrkern-EDF in Verbindung mit adiabatischen Taper-Übergängen zur Übertragungsfaser. Ergebnisse unter Verwendung einer EDF mit 6 Faserkernen zur Verstärkung der 6 Moden einer Mehrmodenfaser wurden in [96] vorgestellt. Durch die Verwendung einer Mehrkernfaser wird eine starke Modenkopplung erzeugt, die zur Verringerung des Einflusses von MDG, MDL und MD beiträgt. Auch der umgekehrte Ansatz, also die Verwendung eines mehrmodigen EDFA für ein Mehrkern-Übertragungssystem, wurde demonstriert [97]. Ebenso kann ein Modenmischer zwischen zwei Verstärkerstufen verwendet werden, um den MDG zu reduzieren [24]. Des Weiteren wurden Verfahren vorgestellt, bei denen EDF mit verschiedenen Dotierungsprofilen kaskadiert werden, um den MDG zu minimieren [98]. Eine weitere Möglichkeit zur Angleichung der modalen Gewinne stellt die bereits aus WDM-Systemen bekannte Verwendung eines Filters dar, welches die überschüssige räumliche Leistung herausfiltert. Dieses Filter kann entweder passiv ausgeführt werden, um Kosten zu sparen oder aktiv, um eine dynamische Gewinnangleichung für verschiedene Betriebszustände vornehmen zu können [82].

Durch die Wahl eines zu großen Kerndurchmessers der aktiven Faser wird die Pumpeffizienz gesenkt, wenn direkt in den Faserkern gepumpt wird. Wird Mantelpumpen verwendet, beispielsweise unter Verwendung eines Mehrkern-EDFA für MDM-Systeme, so ist die Pumpeffizienz durch die Querschnittsfläche des inneren Mantels gegeben. Da die Inversion der Erbium-Ionen von der Pumpleistungsdichte im Faserkern abhängt, führt eine Vergrößerung der gepumpten Querschnittsfläche stets zu einer Erhöhung der benötigten Pumpleistung [12, 99].

### 2.5.8. Kaskadierung optischer Verstärker

Wie in Abbildung 2.14 dargestellt, werden EDFA typischerweise mehrstufig aufgebaut. Für eine Kaskade von optischen Verstärkern ist nur das Rauschverhalten des ersten Verstärkers von

Bedeutung, solange dieser einen genügend hohen Gewinn aufweist und zwischen den Stufen nicht zu viel Dämpfung eingefügt wird. Für eine Kette von Verstärkern kann die effektive Gesamtzuschusszahl mit der Friis Formel berechnet werden [100]:

$$F_{\text{Ges}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} \dots + \frac{F_N - 1}{G_1 G_2 \dots G_{N-1}}. \quad (2.53)$$

Hierbei stellen  $G_i$  die Gewinne und  $F_i$  die Rauschzahlen der jeweiligen Stufen dar. Aufgrund dieser Beziehung ist es möglich, einen Verstärker zu entwerfen, der aus mehreren Stufen besteht und dessen Rauschverhalten größtenteils durch die erste Stufe bestimmt wird. Nur die erste Stufe muss ein gutes Rauschverhalten aufweisen, während nachfolgende Stufen auf eine effiziente Verstärkung optimiert werden können. Für EDFA wird oft die Kombination aus einer bei  $\approx 980$  nm ins obere Pumpniveau gepumpten ersten Stufe und einer bei  $\approx 1480$  nm ins obere Laserniveau gepumpten zweiten Stufe verwendet. Mit der ersten Stufe lässt sich eine höhere Inversion der Erbium-Ionen erreichen, was zu einer niedrigen Rauschzahl führt. Die zweite Stufe hingegen ermöglicht, aufgrund der größeren Anzahl von Photonen pro Watt der Pumpstrahlung, eine höhere Pumpeffizienz, da bei gleicher Leistung mehr Pumpphotonen vorhanden sind, die jeweils ein Erbium-Ion in das obere Laserniveau anregen können. Durch das direkte Pumpen in das obere Laserniveau ist die maximal mögliche Inversion allerdings begrenzt, was wiederum zu einem höheren spontanen Emissionsfaktor  $\eta_{\text{sp}}$  und somit zu einer höheren Rauschzahl führt.

Für WDM-Systeme ist es sinnvoll, dass alle spektralen Kanäle den gleichen Gewinn erfahren. Aus diesem Grund wird dem EDFA ein spektrales Filter nachgeschaltet, welches die Gewinne der WDM-Kanäle angleicht [75, Kap. 4.3]. In einem zweistufigen Aufbau ist es von Vorteil, das spektrale Filter zwischen den beiden Verstärkerstufen zu platzieren, um weniger Leistung durch die Dämpfung zu verlieren. Die Rauschzahl einer solchen Anordnung ergibt sich unter der Annahme, dass das Filter einen Gewinn von  $1/L$  aufweist und eine Rauschzahl von  $L$  [41, Kap. 4]:

$$F_{\text{Ges}} = F_1 + \frac{L - 1}{G_1} + \frac{F_2 - 1}{G_1/L} \quad (2.54)$$

$$= F_1 + \frac{LF_2 - 1}{G_1}. \quad (2.55)$$

Hierbei beschreibt  $L$  die Dämpfung des Filters. Aufgrund dieser Beziehung ist ebenfalls ersichtlich, warum das spektrale Filter nicht vor der ersten Stufen platziert wird, um noch mehr Leistung zu sparen. Die dominante Rauschzahl wäre dann die des Filters, dessen Dämpfung  $L$  durchaus bei einigen dB liegen kann.

### 2.5.9. Numerische Simulation des Verstärkerverhaltens

Die Lösung des gekoppelten Differentialgleichungssystems (2.42,2.43,2.44) erfolgt numerisch. Hierzu wird üblicherweise die Faser dreidimensional entlang  $x, y$  und  $z$  diskretisiert, wobei  $z$  die Signalausbreitungsrichtung ist. Die Differentialgleichung wird in  $z$ -Richtung mit Finiten Differenzen angenähert. Sowohl am Anfang als auch am Ende der aktiven Faser sind Randwerte zu berücksichtigen. Am Anfang der Faser ist die Signaleingangsleistung für alle Signalkanäle, die Pumpleistung aller Pumpkanäle in Vorwärtsrichtung sowie der Anfangswert der ASE in Vorwärtsrichtung gegeben. Am Faserende bestehen Randwerte für die Kanäle der rückwärtslaufenden

ASE sowie der rückwärtslaufenden Pumpkanäle. In Abbildung 2.23 ist die Propagationsrichtung der Signal-, Rausch- und Pumpleistungen anschaulich dargestellt. Außerdem sind die an den jeweiligen Faserenden bekannten Randwerte der Leistungen farblich dargestellt. Da an keinem Faserende die Randwerte zu allen Leistungen bekannt sind, müssen spezielle Verfahren zur Lösung dieses Randwertproblems angewandt werden. Hierbei wird in der Literatur zwischen der Shooting-Methode und der Relaxationsmethode unterschieden [76, Kap. 4].

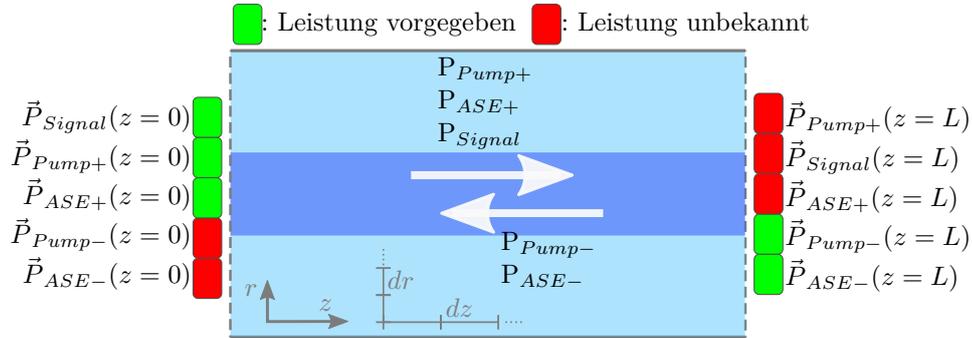


Abbildung 2.23.: Schematische Darstellung der EDF. Dargestellt sind jeweils die Ausbreitungsrichtungen der Leistungen und ob Randbedingungen für die Leistungen am Eingang und Ausgang vorliegen.

Bei Verwendung der Shooting-Methode wird der Leistungsverlauf der rückwärtslaufenden Leistungen approximiert, so dass Randwerte für diese Leistungen am Fasereingang geraten werden. Mit diesem vollständigen Set von Anfangsbedingungen wird nun das Differentialgleichungssystem (2.42,2.43,2.44) in Vorwärtsrichtung berechnet. Die Ergebnisse für die Leistungen in Rückwärtsrichtung werden mit den realen Randwerten am Ende der Faser verglichen und die Approximation am Anfang der Faser iterativ angepasst. Die Anpassung der Randwerte der verschiedenen räumlichen und spektralen Kanäle muss hierzu passend gewählt werden, um eine Konvergenz der Leistungen zu erreichen. [76, Kap. 4]

Bei der Relaxationsmethode werden keine Randwerte am Fasereingang approximiert. Zunächst wird das Differentialgleichungssystem (2.42,2.43,2.44) in Vorwärtsrichtung ohne die rückwärtslaufenden Leistungen berechnet. Die resultierenden Leistungen dieses Durchlaufs werden gespeichert. Im nächsten Schritt wird das Differentialgleichungssystem (2.42,2.43,2.44) in Rückwärtsrichtung gelöst. Die Leistungen der vorwärtslaufenden Anteile werden hierbei nicht verändert, gehen jedoch in die Berechnung der Besetzungsdichten ein. Dieses Vorgehen wird wiederholt, bis die Leistungen der einzelnen Anteile am Ende der Faser konvergieren. [76, Kap. 4]

Im Fall einer rotationssymmetrischen Pump- und Signalleistungsverteilung entfällt die azimuthale Abhängigkeit der Besetzungsdichte. Diese Annahme wird in realistischen Systemen erfüllt, da die Addition der Leistungsdichten der entarteten LP-Moden sich jeweils in ihrer azimuthalen Abhängigkeit aufheben. Dies lässt sich unter Annahme der azimuthalen Abhängigkeit aus Gleichung 2.14 mit dem trigonometrischen Pythagoras  $\sin^2(\Phi) + \cos^2(\Phi) = 1$  zeigen. Für MIMO-MDM-Systeme ist es aufgrund von starker Kopplung zwischen den entarteten Moden unwahrscheinlich, dass nur jeweils einer der beiden entarteten Moden verwendet wird. Unter dieser Annahme kann das Differentialgleichungssystem (2.42,2.43,2.44) vereinfacht werden. Die Modenfelder und die Besetzungsdichten der Energieniveaus müssen nur mit radialer Abhängigkeit berechnet werden. Im Folgenden wird diese Vereinfachung für alle Berechnungen verwendet, um

die benötigte Rechenzeit zu verringern.

In dieser Arbeit wird der Differentialgleichungslöser des Python SciPy Paketes verwendet [101]. Im Gegensatz zu den in [JK 1–3] verwendeten Vorwärtsdifferenzen kann ein verbessertes Konvergenzverhalten erreicht werden.



## 3. Modenabhängige Sättigung vielmodiger EDFA

Ein Erbium-dotierter Faserverstärker kann entlang der Faser in Sättigung gehen. Durch die Sättigung sinkt die Wahrscheinlichkeit der stimulierten Emission eines zusätzlichen Signalphotons und die Wahrscheinlichkeit für eine Absorption steigt an. Die Signalleistung steigt entlang der Faser zunächst weniger steil an und kann bei langen Fasern im Kleinsignalbetrieb sogar zu sinken beginnen. Dieses Verhalten wurde bereits in Kapitel 2.5.5 beschrieben.

Bei Verwendung von MDM in Vielmodenfasern stellt sich die Frage nach dem Sättigungsverhalten der einzelnen verwendeten Signalmode und dem Einfluss des Sättigungsverhaltens auf die Gewinne der einzelnen Signalmode. Die unterschiedlichen transversalen Feldverteilungen der Signalmode besitzen grundsätzlich verschiedene Überlappungen mit dem aktiven Medium und besitzen Maxima ihrer Leistungsdichte an radial unterschiedlichen Orten im Kern der EDF. Es ist folglich denkbar, dass die verfügbare Pumpleistung in einem Bereich der Faser nicht ausreicht, um für eine weitere Verstärkung eines Modus zu sorgen, während die Maxima der Leistungsdichte eines anderen Modus in einem Bereich liegt, in dem genügend Pumpleistung vorhanden ist, um für eine hohe Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus zu sorgen. Um dieses Verhalten genauer zu untersuchen, wurden Simulationen durchgeführt, deren Ergebnisse in diesem Kapitel dargestellt werden sollen. Hierbei sollen sowohl MDM-EDFA untersucht werden, die mit der maximal verfügbaren Anzahl an Signalmode betrieben werden, als auch MDM-EDFA, bei denen nur ein Teil der ausbreitungsfähigen Mode als Signalmode verwendet wird.

Diese Untersuchung des Sättigungsverhaltens wurde teilweise bereits in [JK 1] veröffentlicht. In [JK 1] wurde allerdings nur eine einzelne Signalwellenlänge mit einem einzelnen ASE-Kanal verwendet. Die Sättigung, welche bei zu langen Fasern durch die akkumulierte ASE einsetzen kann, wurde somit vernachlässigt. In diesem Kapitel wird die potenzielle Sättigung durch ASE berücksichtigt und ein WDM-Signal mit 100 spektralen Signalkanälen pro Modus angenommen. Die Untersuchungen in [JK 1] beziehen sich außerdem auf einen EDFA mit Gradientenbrechzahlprofil und 50  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser, um Modenkopplung am Übergang zwischen EDFA und Übertragungsfaser zu vermeiden. In dieser Arbeit soll zusätzlich ein MDM-EDFA mit Stufenbrechzahlprofil untersucht werden.

### 3.1. Gradientenbrechzahlprofil

Die Übertragungsfaser in aktuellen MDM-Übertragungsexperimenten weist ein Gradientenbrechzahlprofil auf, da sich mit diesem Brechzahlprofil bessere Modendispersionseigenschaften für viele Signalmode im Vergleich zum Stufenbrechzahlprofil erreichen lassen [60, Kap. 2.2.2; 18; 52]. Eine EDF mit einem identischen Brechzahlprofil wie die Übertragungsfaser hat den

Vorteil, dass es nur zu geringem Übersprechen durch Stoßkopplung am Übergang zwischen der Übertragungsfaser und der Verstärkerfaser kommt. Zunächst soll daher eine EDF mit Gradientenbrechzahlprofil untersucht werden. Das Brechzahlprofil der verwendeten Faser ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Der Kerndurchmesser beträgt  $50\ \mu\text{m}$ . Im Kernbereich der EDF wird eine konstante Dotierungsdichte der Erbium-Ionen von  $5 \cdot 10^{24}\ \text{m}^{-3}$  angenommen. Im Mantelbereich wird ein Graben im Brechzahlprofil mit einer Breite von  $3,37\ \mu\text{m}$ , einer Tiefe von  $6,5 \cdot 10^{-3}$  und einem Abstand von  $1,25\ \mu\text{m}$  zum Kernbereich verwendet, ähnlich zu [18]. Anders als in der Übertragungsfaser wird ein solcher Graben in der aktiven Faser verwendet, um eine bessere Konzentration der Modenfelder im Kernbereich der Faser zu erreichen und dadurch den  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  zu verringern und nicht, um die Laufzeiten der einzelnen Signalmoden anzugleichen [95].

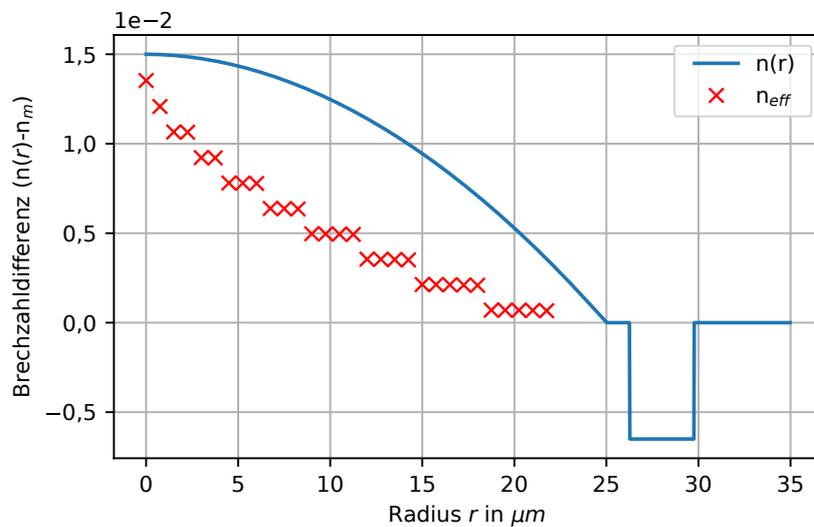


Abbildung 3.1.: Brechzahlprofil einer Gradientenfaser mit  $50\ \mu\text{m}$  Kerndurchmesser und 55 ausbreitungsfähigen Moden bei  $1550\ \text{nm}$ . Die effektiven Brechzahldifferenzen der Moden sind in rot aufgetragen. Vollständig entartete LP-Moden sind zusammengefasst dargestellt und die Modenordnung steigt zur besseren Lesbarkeit in Richtung der Abszisse an.

In der betrachteten EDF sind 55 Moden bei  $1550\ \text{nm}$  ausbreitungsfähig, deren effektive Brechzahlen relativ zur Mantelbrechzahl in Abbildung 3.1 dargestellt sind. Die entarteten  $\text{LP}_{a/b}$ -Moden sind nicht einzeln aufgetragen, da sie identische effektive Brechzahlen besitzen. Die ausbreitungsfähigen Moden bei  $1550\ \text{nm}$  teilen sich in 10 Gruppen von Moden mit jeweils nahezu identischen effektiven Brechzahlen innerhalb der Modengruppen auf. Bei der verwendeten Pumpwellenlänge von  $980\ \text{nm}$  sind 136 Moden ausbreitungsfähig. Es werden 50 Wellenlängenkanäle äquidistant verteilt zwischen  $1530\ \text{nm}$  und  $1560\ \text{nm}$  simuliert und ein vielmodiger Pumplaser angenommen, der alle 136 verfügbaren Pumpmoden bei  $980\ \text{nm}$  im Kern der aktiven Faser gleichermaßen anregt. Die Faserlänge wird zu  $15\ \text{m}$  gewählt, da die Signalpegelverläufe so am Faserende gerade ihr Maximum erreichen und der Verstärker in Sättigung betrieben wird. Die verwendeten Simulationsparameter sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Tabelle 3.1.: Simulationsparameter zur Untersuchung des Sättigungsverhaltens einer EDF mit Gradientenbrechzahlprofil.

Kerndurchmesser	50 $\mu\text{m}$
Numerische Apertur	0.21
Profilexponent	1.94
Faserlänge	15 m
Anzahl Signalmoden	55 bzw. 36
Anzahl Signalwellenlängen	50
Eingangsleistung pro spektralem und räumlichem Kanal	-22 dBm
Mittlerer Gewinn aller Kanäle	25 dB
Anzahl Pumpmoden (980 nm)	136
Pumpleistung	13,08 W bzw. 9,47 W
Erbium-Dotierung im Kern	$5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$
Anzahl Diskretisierungspunkte in $z$ -Richtung	350
Anzahl Diskretisierungspunkte in $r$ -Richtung	300

### Verstärkung aller 55 Signalmoden

Zunächst werden alle 55 ausbreitungsfähigen Moden bei 1550 nm als Signalmoden verwendet. Die benötigte Pumpleistung für einen mittleren Gewinn aller Signalkanäle von 25 dB beträgt 13,08 W.

Im Folgenden soll der Verlauf der Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus  $N_2(r, z)$  in diesem Betriebszustand betrachtet werden. Die relative Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus kann als Maß für die Wahrscheinlichkeit einer stimulierten Emission am entsprechenden Ort verwendet werden. An Orten mit einer hohen relativen Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus ergibt sich eine höhere Wahrscheinlichkeit für stimulierte Emission eines zusätzlichen Signalphotons als an Orten mit einer geringen relativen Besetzungsdichten. Bezogen auf das Sättigungsverhalten des Verstärkers in Kombination mit der in MDM-Systemen hohen Signaleingangsleistung bedeutet dies, dass Gebiete in der Faser mit einer geringen relativen Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus stärker von Gewinnsättigung betroffen sind als solche mit einer hohen Besetzungsdichte.

In Abbildung 3.2(b) ist der Signalleistungsverlauf pro Modus und der maximale  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  aller WDM-Kanäle entlang der EDF dargestellt. Die Signalleistungen sind hierbei die Summe der Leistungen aller Wellenlängenkanäle eines Modus. Der Signalpegelverlauf des Grundmodus ist rot hervorgehoben. Betrachtet man die Signalpegelverläufe der einzelnen Moden entlang der Faser, so fällt auf, dass die Moden auch im Bereich hoher Inversion nahe dem Fasereingang unterschiedliche Verstärkungen erfahren. Die unterschiedlichen Verstärkungen der Signalmoden lassen sich durch die verschiedenen räumlichen Überlappungen der jeweiligen Leistungsdichteverteilungen in radialer Richtung mit den Erbiumionen im oberen Laserniveau erklären. Je größer die räumliche Überlappung der Modenfelder mit dem invertierten Erbium ist, desto größer ist die Verstärkung dieses Modus. Im Fall einer starken Inversion des gesamten Kernbereichs der Faser begründen sich die verschiedenen Gewinne der Moden somit überwiegend aus den unterschiedlich starken Führungen der einzelnen Moden durch den Kern der EDF. In der Nähe des Fasereingangs steigt der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  aufgrund dieses Effektes in logarithmischen Einheiten linear an. Der Effekt, dass die

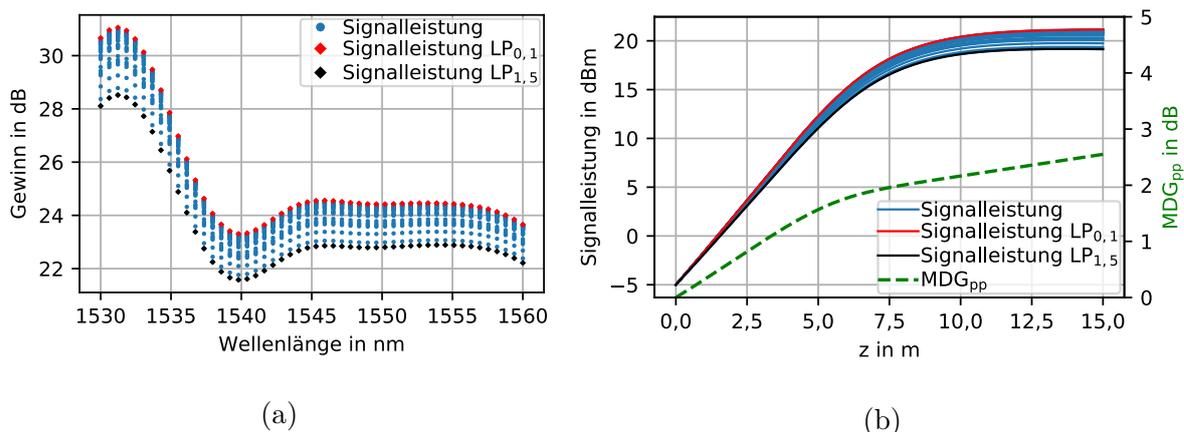


Abbildung 3.2.: Gewinnspektren am Ausgang des Verstärkers für 55 Signalmoden unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils (a). Verlauf der Signalleistung aller Moden und des MDG<sub>pp</sub> entlang der Faser (b). Der Gewinn sowie die Signalleistung des LP<sub>0,1</sub> und des LP<sub>1,5</sub> sind jeweils rot bzw. schwarz hervorgehoben.

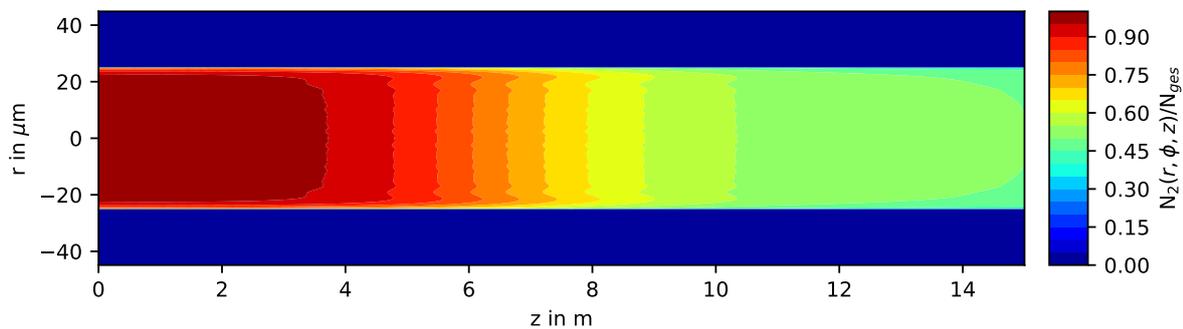
unterschiedlich starke Führung der Moden durch den Faserkern zu unterschiedlichen Gewinnen führt, ist in der Literatur für MDM-EDFA zuerst im Kontext dreimodiger Verstärker gezeigt worden [34–36].

Entlang der Faser flacht der Anstieg der Signalleistungen aufgrund der sinkenden Pumpleistung ab. Die maximale Signalleistung wird am Ende der Faser erreicht. Entlang der gesamten Faser besitzt der LP<sub>0,1</sub>-Modus an jedem Ort die höchste und der LP<sub>1,5</sub>-Modus an jedem Ort die geringste Signalleistung aller Moden. Die Sättigung der Signalleistung setzt nach etwa 7 m ein. Nach Einsetzen der Sättigung nimmt die Steigung des MDG<sub>pp</sub> ab. Trotzdem steigt der MDG<sub>pp</sub> entlang der gesamten Faser monoton an.

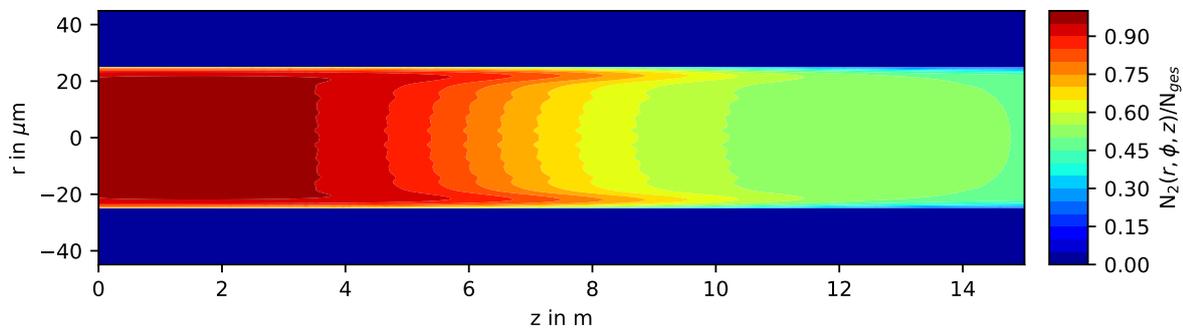
In Abbildung 3.2(a) sind die Gewinnspektren aller räumlichen Kanäle dargestellt. Das Gewinnspektrum des Grundmodus ist rot eingefärbt. Es ist zu erkennen, dass der Grundmodus in dieser Konfiguration die größte Verstärkung erfährt. Dies kann damit begründet werden, dass der Grundmodus in der verwendeten Faser der Modus mit der kleinsten effektiven Modenfeldfläche und der stärksten Führung im Kern der Faser ist.

In Abbildung 3.3(a) ist die radial aufgelöste relative Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus entlang der Faser dargestellt. Wie zu erwarten, nimmt die Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus durch die Gewinnsättigung entlang der Verstärkerfaser ab. Die relative Besetzungsdichte sinkt in der Mitte des Faserkerns ( $r = 0$ ) von  $\approx 1$  am Fasereingang auf  $\approx 0.45$  am Faserende ab. Außerdem ist zu erkennen, dass die Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus in radialer Richtung nur wenig schwankt. Die Gewinnsättigung setzt für alle Moden im Bereich zwischen  $z = 6$  m und  $z = 10$  m ein. Alle Signalmoden erfahren eine ähnliche Verstärkung und besitzen ein ähnliches Sättigungsverhalten. Entlang der gesamten EDF ist die Besetzungsdichte im äußeren Kernbereich ( $r > 21 \mu\text{m}$ ) geringer als in der Fasermitte. Dieses Verhalten entsteht durch das verwendete Gradientenbrechzahlprofil in Kombination mit einer konstanten Erbium-Dotierungsdichte im Kern der EDF und wird in Abschnitt 3.3 genauer betrachtet. Auch in Abbildung 3.2(b) ist zu erkennen, dass die Gewinne aller Signalmoden bei  $z \approx 7,5$  m stagnieren,

da die Gewinnsättigung einsetzt.



(a) 55 Signalmoden



(b) 36 Signalmoden

Abbildung 3.3.: Räumlich aufgelöste relative Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus einer EDF mit Gradientenbrechzahlprofil unter Verwendung vielmodiger Pumpstrahlung sowie 55 (a) bzw. 36 (b) Signalmoden.

### Nicht-Verwendung der Moden höchster Ordnung

Es stellt sich die Frage, wie sich das Sättigungsverhalten des EDFA verändert, wenn sich die Anzahl der verwendeten Signalmoden und somit die Leistungsdichteverteilung am Eingang der Faser verändert. Die Anzahl der verwendeten Pumpmoden wird im Vergleich zur vorherigen Simulation nicht verändert.

Aufgrund hoher Biegeverluste und Kopplung mit den Mantelmoden wird in der Literatur allgemein angenommen, dass in einer typischen Gradientenfaser mit 50  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser die Modengruppen höchster Ordnung nicht zur Signalübertragung über weite Distanzen verwendet werden können [18, 20]. Ein sinnvoller Betriebspunkt ist somit die Verwendung von nur 36 der 55 ausbreitungsfähigen Moden zur Signalübertragung, also 8 der 10 ausbreitungsfähigen Modengruppen. Dies entspricht einer Nicht-Verwendung der beiden Modengruppen höchster Ordnung. Um, wie im ersten Fall, einen in logarithmischen Einheiten mittleren Gewinn aller Signalkanäle von 25 dB zu erreichen, wird die Pumpleistung auf 9,47 W verringert.

In Abbildung 3.4(b) ist der Signalpegelverlauf entlang der Erbium-dotierten Faser mit einer

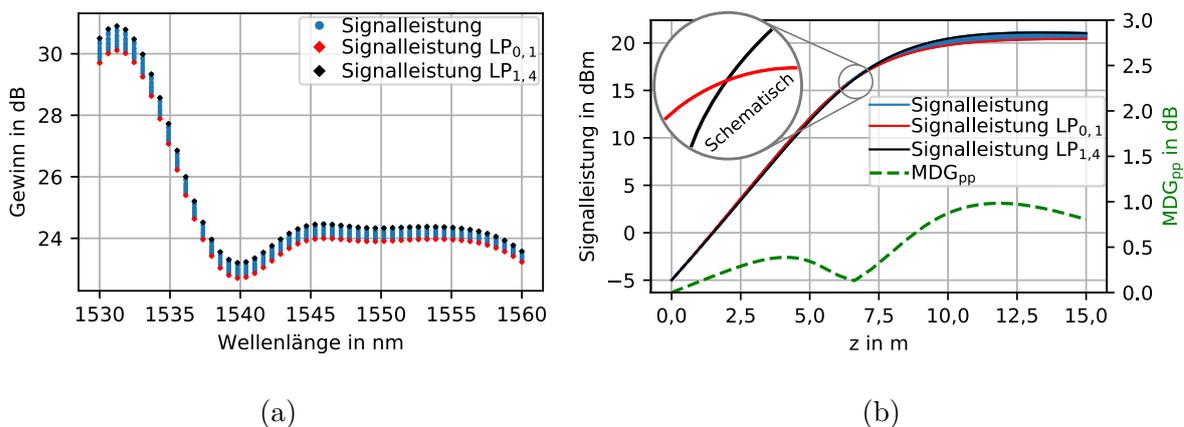


Abbildung 3.4.: Gewinnspektren am Ausgang des Verstärkers für 36 Signalmoden unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils (a). Verlauf der Signalleistung aller Moden und des MDG<sub>pp</sub> entlang der Faser (b). Der Gewinn sowie die Signalleistung des LP<sub>0,1</sub>- und LP<sub>1,4</sub>-Modus sind jeweils rot bzw. schwarz hervorgehoben.

vielmodigen Pumpkonfiguration, identisch zum ersten Szenario, aber nur 36 der 55 ausbreitungsfähigen Signalmoden dargestellt. Der Leistungsverlauf des Grundmodus und des LP<sub>1,4</sub>-Modus sind farbig hervorgehoben. In der Nähe des Fasereingangs erfährt der Grundmodus, wie zu erwarten, die größte Verstärkung, da dieser aufgrund der stärksten Führung aller Signalmoden durch den Faserkern den größten Überlapp mit den im Faserkern invertierten Erbium-Ionen aufweist. Am Eingang der Faser sind aufgrund der hohen Pumpleistung und der geringen Signalleistung nahezu alle Erbium-Ionen invertiert. Der MDG<sub>pp</sub> steigt in diesem Bereich in logarithmischen Einheiten linear in  $z$ -Richtung an. Die Steigung ist aufgrund der Nicht-Verwendung der Moden höchster Ordnung im Vergleich zu Abbildung 3.2(b) geringer. Im Unterschied zur vorherigen Simulation ist außerdem zu erkennen, dass die Signalmoden an verschiedenen Orten entlang der Faser in Gewinnsättigung gehen. Der Grundmodus beginnt entlang der Faser zuerst in Sättigung zu gehen und die Moden höherer Ordnung zuletzt. Am Faserausgang besitzt der Grundmodus die geringste Leistung aller Signalmoden. Der LP<sub>1,4</sub>-Modus, der in der Nähe des Fasereingangs die geringste Verstärkung erfährt, geht als letzter in Sättigung und weist kurz vor dem Faserausgang die höchste Leistung auf.

In Abbildung 3.4(a) sind die Gewinnspektren der einzelnen Moden dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der rot markierte Grundmodus für alle Signalwellenlängen den geringsten Gewinn erfährt, obwohl er den größten Überlapp mit der Erbium-Dotierung aufweist.

Dieses Verhalten ergibt sich durch die radiale Abhängigkeit des Verhältnisses von Pump- zu Signalleistung. Hierbei ist zu beachten, dass in der betrachteten Faser mit Gradientenbrechzahlprofil die effektive Modenfeldfläche, wie in Abbildung 2.12 dargestellt, mit der Modenordnung ansteigt. Die nicht als Signalmoden verwendeten Moden der 9. und 10. Modengruppe besitzen die größten effektiven Modenfeldflächen und große Teile der Leistung dieser Moden befindet sich im äußeren Bereich des Faserkerns. Die Leistungsdichte der Pumpmoden ist in diesem Bereich allerdings trotzdem vorhanden, da eine vielmodige Pumpquelle verwendet wird. Im äußeren Bereich des Faserkerns gibt es somit ein höheres Pump- zu Signalleistungsverhältnis als im inneren Bereich. Die radiale Abhängigkeit der Verhältnisses von Pump- zu Signalleistung

stung führt dazu, dass wie in Abbildung 3.3(b) dargestellt, die Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus und somit die Wahrscheinlichkeit für stimulierte Emission im inneren Bereich des Kerns um  $r < 18 \mu\text{m}$  entlang der Faser stärker abnimmt als im äußeren Bereich bei  $r \approx 21 \mu\text{m}$ . Entlang der Faser ergibt sich im Bereich zwischen 5 m und 11 m eine Überhöhung der relativen Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus im äußeren Kernbereich. Die Besetzungsdichte ist im äußeren Bereich des Faserkerns um bis zu 20% höher als in der Fasermitte. In diesem Bereich tritt Gewinnsättigung für die Moden niedriger Ordnung, wie dem  $\text{LP}_{0,1}$ -Modus, auf und die lokale Verstärkung dieser Moden sinkt. Die Signalmode niedriger Ordnung erfahren folglich im vorderen Bereich der Faser den höchsten und im Bereich der Überhöhung der Besetzungsdichte im äußeren Bereich des Faserkerns den geringsten Gewinn pro Länge aller Moden.

Aufgrund dieses Effektes kehrt sich die Reihenfolge der Signalmode nach aufsteigender Leistung entlang der Faser um. Durch diese Umkehrung besitzt der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  entlang der Faser ein Minimum. In Abbildung 3.5 ist die Ordnung der Moden mit der größten sowie der kleinsten Signalleistung entlang der Faser dargestellt. Die Vertauschung der Moden mit hoher und niedriger Leistung nach etwa 7 m ist zu erkennen.

Weiterhin ist zu erkennen, dass der  $\text{LP}_{1,4}$ -Modus am Faserende bereits nicht mehr der Modus mit der höchsten Leistung ist. Auch in Abbildung 3.4(b) ist zu erkennen, dass der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  am Ende der Faser leicht abnimmt. Für längere Fasern würde die Pumpleistung im gesamten Faserkern abnehmen und ein zweites Minimum des  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  in der Nähe des Faserendes entstehen [JK 1]. Je nach Eingangsleistung des EDFA kann es allerdings bei einer langen EDF zur unerwünschten Sättigung in der Nähe des Fasereingangs durch die entgegen dem Signal propagierende ASE kommen und das hier sichtbare Minimum des MDG verschwindet.

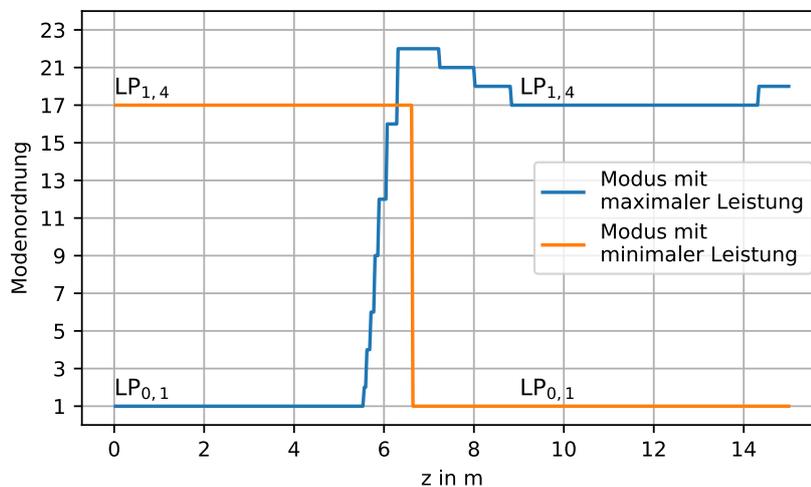


Abbildung 3.5.: Ordnung des Modus mit der minimalen bzw. maximalen Signalleistung am Ort  $z$ . Die Modenordnung ergibt sich nach der Konvention aus Abschnitt 2.3.2. Die Entartungen der  $\text{LP}_{l,pa/b}$ -Moden sind zur eindeutigen Darstellung jeweils zusammengefasst.

Die gezeigten Sättigungseffekte können relevant sein für Betriebszustände, in denen der EDFA eine radiale Abhängigkeit des Verhältnisses von Pump- zu Signalleistung aufweist. Beispielsweise

ist dies der Fall in Szenarien, in denen nicht alle Signalmoden zur Übertragung verwendet werden, wie hier angenommen. Auch eine Veränderung der Anzahl an verwendeten Signalmoden eines sich im Betrieb befindenden Systems ohne eine Anpassung der Pumpleistungsverteilung, kann zu einer Veränderung des Sättigungsverhaltens des Verstärkers führen. Beispielsweise kann die Anzahl an Signalmoden zur Laufzeit des Systems skaliert werden, um die Übertragungskapazität zu steigern. Der Einfluss des Sättigungsverhaltens im Kontext eines solchen Aufrüstszenarios wird in Abschnitt 4 betrachtet. Potentiell kann die modenabhängige Sättigung nicht nur als störender Effekt betrachtet werden, sondern durch die Wahl einer Faserlänge in der Nähe des  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  Minimums auch bei der Minimierung des MDG hilfreich sein. Für die untersuchte Faser kann bei einer Faserlänge von 7,5 m ein  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  von unter 0,5 dB erreicht und trotzdem ein Gewinn von mehr als 20 dB erzielt werden. Die kürzere Faser würde allerdings weniger stark in Sättigung betrieben und eine schlechtere Pumpeffizienz erreichen. In jedem Fall sollte das Sättigungsverhalten abhängig von der Anzahl der verwendeten Signalmoden beim Entwurf zukünftiger MDM-EDFA berücksichtigt werden.

## 3.2. Stufenbrechzahlprofil

Unter der Annahme, dass sich die Signalmoden verlustarm und mit geringer Modenkopplung von der Übertragungsfaser mit Gradientenbrechzahlprofil und 50  $\mu\text{m}$  Kernradius in eine EDF mit Stufenbrechzahlprofil überführen lassen, kann eine solche EDF ebenfalls zur Verstärkung der Signalmoden untersucht werden.

Zunächst soll eine EDF mit Stufenbrechzahlprofil entworfen werden. Hierzu wird, bei einer im Vergleich zum bisher verwendeten Gradientenbrechzahlprofil identischen numerischen Apertur von 0,21, der Kernradius so gewählt, dass die 55 Moden ausbreitungsfähig sind, welche auch in der angenommenen Übertragungsfaser ausbreitungsfähig sind (vgl. Tabelle 2.1). Das resultierende Stufenbrechzahlprofil mit einem Kerndurchmesser von 37,12  $\mu\text{m}$  ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Durch das veränderte Brechzahlprofil sind zusätzlich zu den geforderten 55 Moden der Übertragungsfaser weitere Moden bei der Signalwellenlänge ausbreitungsfähig. Insgesamt besitzt die verwendete Stufenfaser 61 ausbreitungsfähige LP-Moden bei 1550 nm. Um eine bessere Vergleichbarkeit zur Gradientenfaser zu erreichen, werden die zusätzlichen Moden  $\text{LP}_{8,2a/b}$ ,  $\text{LP}_{10,1a/b}$  und  $\text{LP}_{11,1a/b}$  in diesem Abschnitt ebenfalls als Signalmoden verwendet, so dass in beiden Fasern jeweils alle ausbreitungsfähigen Signalmoden verwendet werden. Auch in dieser Faser wird ein Graben im Brechzahlprofil nahe dem Faserkern verwendet, um den MDG zu verringern [95]. Die Dotierungsdichte des Kernbereichs mit Erbium-Ionen wird, wie im vorigen Kapitel, zu  $5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$  gewählt. Die Faserlänge beträgt 15 m. Es wird eine vielmodige Pumpquelle bei 980 nm angenommen, welche alle 158 ausbreitungsfähigen Moden bei der Pumpwellenlänge gleichmäßig anregt. Die Simulationsparameter sind in Tabelle 3.2 aufgelistet.

### Verstärkung aller 61 Signalmoden

Zunächst wird das Verstärkerverhalten unter Verwendung aller 61 Signalmoden betrachtet. Die Pumpleistung zur Erreichung des gewünschten mittleren Gewinns von 25 dB beträgt 13,99 W.

In Abbildung 3.7(a) sind die Gewinnspektren der Signalmoden und in Abbildung 3.7(b) ihr Leistungspegelverlauf entlang der Faser dargestellt. Der in rot dargestellte Grundmodus erfährt

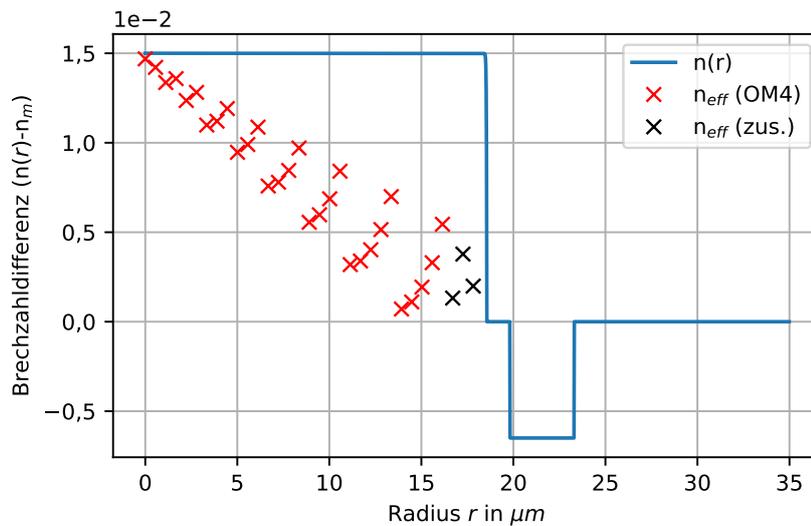


Abbildung 3.6.: Stufenbrechzahlprofil mit 37,12  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser und 61 ausbreitungsfähigen Moden bei 1550 nm. Die effektiven Brechzahldifferenzen der Signalmode und der zusätzlich ausbreitungsfähigen Moden sind ebenfalls dargestellt. Zur besseren Lesbarkeit steigt die Modenordnung in Richtung der Abszisse an.

Tabelle 3.2.: Simulationsparameter zur Untersuchung des Sättigungsverhaltens einer EDF mit Stufenbrechzahlprofil.

Kerndurchmesser	37,12 $\mu\text{m}$
Numerische Apertur	0.21
Faserlänge	15 m
Anzahl Signalmode	61, 55 oder 36
Anzahl Signalwellenlängen	50
Eingangsleistung pro Kanal	-22 dBm
Mittlerer Gewinn aller Kanäle	25 dB
Anzahl Pumpmode (980 nm)	158
Pumpleistung	13,99 W, 12,68 W oder 8,67 W
Erbium-Dotierung im Kern	$5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$
Anzahl Diskretisierungspunkte in $z$ -Richtung	350
Anzahl Diskretisierungspunkte in $r$ -Richtung	300

den höchsten Gewinn aller Moden. Der Modus mit dem geringsten Überlapp mit dem Kernbereich ist der  $\text{LP}_{1,5}$ -Modus. Dieser ist in beiden Abbildungen schwarz dargestellt und erfährt entlang der gesamten Faser und für alle WDM-Kanäle den geringsten Gewinn. Es ist zu erkennen, dass ähnlich zur Simulation der Gradientenfaser, alle Moden in etwa am selben Ort entlang der Faser in Sättigung gehen und der MDG entlang der Faser ansteigt. Unter Verwendung des Stufenbrechzahlprofils steigt der MDG nach Einsetzen der Sättigung jedoch nicht weiter an. Am Faserende besitzt für alle WDM-Kanäle der  $\text{LP}_{1,5}$ -Modus den geringsten und der  $\text{LP}_{0,1}$ -Modus den höchsten Gewinn.

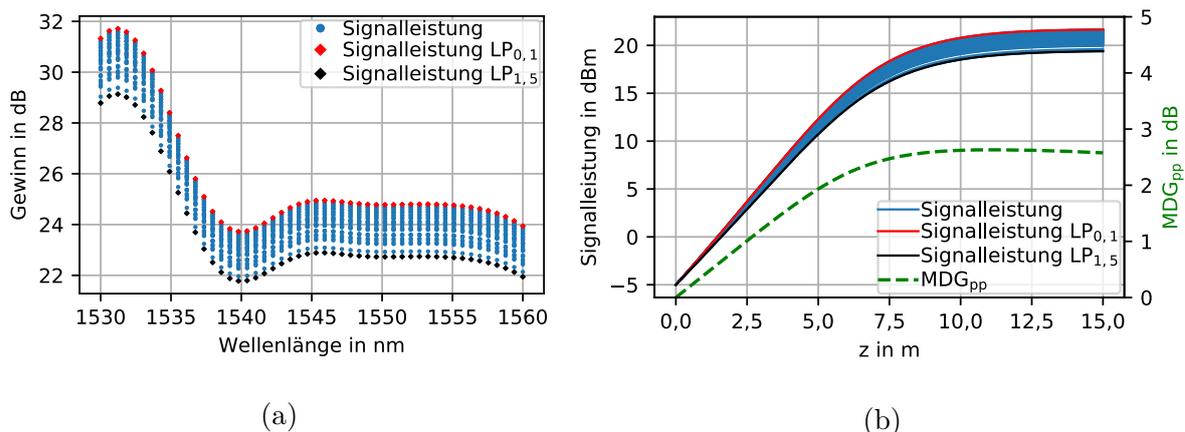


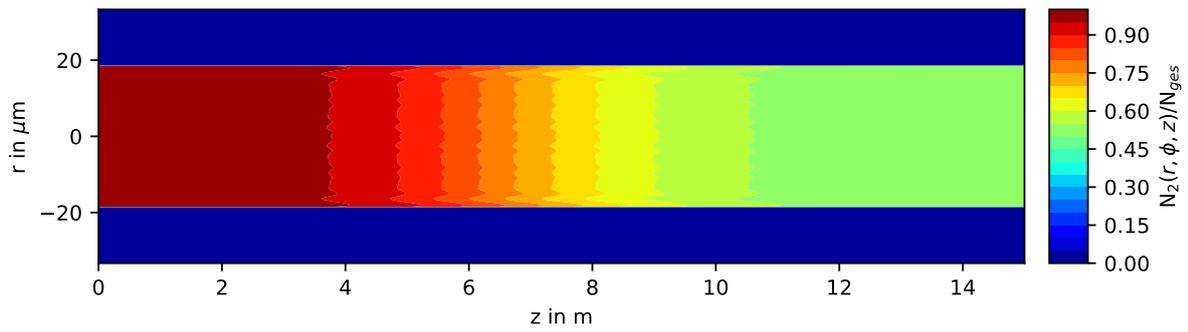
Abbildung 3.7.: Gewinnspektrum unter Verwendung von 61 Signalmoden (a) sowie des Leistungspegelverlaufs jedes Signalmodus und der Verlauf des MDG<sub>pp</sub> entlang der Faser (b). Der LP<sub>0,1</sub>-Modus und der LP<sub>1,5</sub>-Modus sind jeweils farblich hervorgehoben.

Die relative Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus, welche in Abbildung 3.8(a) räumlich aufgelöst dargestellt ist, weist eine leichte Überhöhung im äußeren Bereich des Faserkerns auf. Im Vergleich zur Untersuchung des Gradientenbrechzahlprofils in Abbildung 3.3(a) fällt auf, dass die Besetzungsdichte im Faserkern für  $r \approx r_k$  unter Verwendung des Stufenbrechzahlprofils im Vergleich zur Fasermitte nicht absinkt. Die Summenleistungsdichte aller Moden einer Gradientenfaser ist an den Rändern der Faser deutlich geringer als die Summenleistungsdichte in einer Stufenfaser. Aufgrund des in beiden Fällen konstant mit Erbium-Ionen dotierten Kernbereichs, ergibt sich für die Stufenfaser eine höhere Inversion am äußeren Rand des Faserkerns. Auf die Verteilung der Leistungsdichten in den verschiedenen Brechzahlprofilen wird in Abschnitt 3.3 eingegangen.

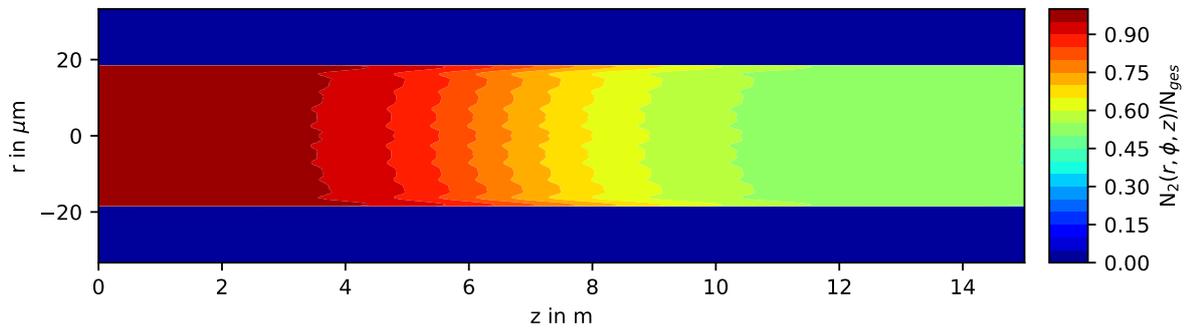
#### Nicht-Verwendung der Moden höchster Ordnung

Werden anstatt aller 61 Moden nur 36 Moden zur Signalübertragung verwendet, so ergeben sich die in Abbildung 3.9 dargestellten Gewinnspektren (a) und Signalpegelverläufe (b). Die Pumpleistung wird zur Erreichung eines mittleren Gewinns von 25 dB aller räumlichen und spektralen Signalkanäle auf 8,67 W gesenkt.

Im Gegensatz zur Gradientenfaser, welche unter Nicht-Verwendung der Modengruppen höchster Ordnung ein stark modenabhängiges Sättigungsverhalten zeigte, sind diese Effekte unter Verwendung eines Stufenbrechzahlprofils weniger stark ausgeprägt. Der Grundmodus erfährt in der Nähe des Fasereingangs den höchsten Gewinn aller Moden. Am Ende der Faser ist der Grundmodus zwar nicht der am stärksten verstärkte Modus, aber auch nicht, wie im Fall des Gradientenbrechzahlprofils, der Modus mit dem geringsten Gewinn. Entlang der gesamten Faser besitzt der LP<sub>1,4</sub>-Modus die geringste Leistung aller verwendeten Signalmoden. In Abbildung 3.10(a) sind die Ordnungen der Moden mit höchster und niedrigster Signalleistung entlang der Faser unter Verwendung von 36 Signalmoden dargestellt. Mit einsetzender Sättigung verschiebt sich die Ordnung des Modus mit der größten Signalleistung zu höheren Signalmoden. Insgesamt erfährt der LP<sub>4,1</sub>-Modus die größte Verstärkung in dieser Konfiguration.

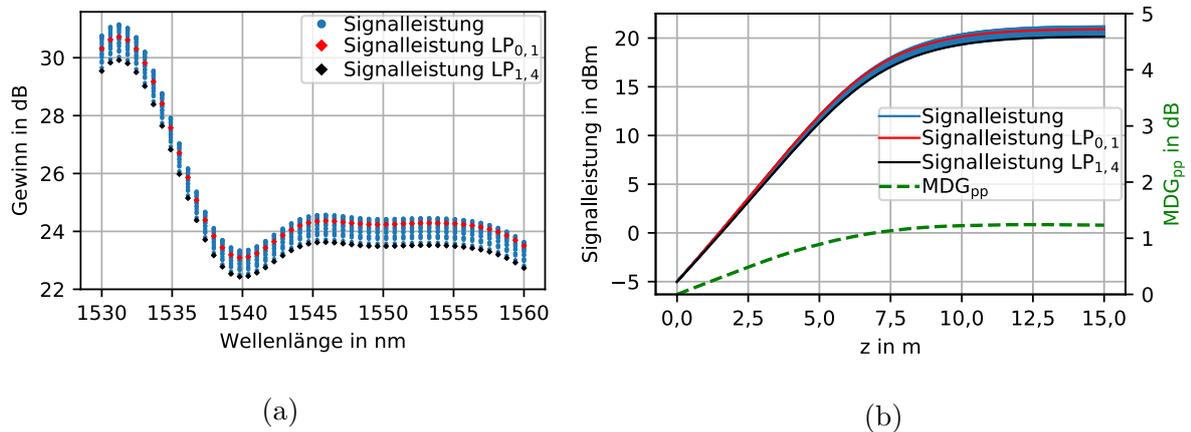


(a) 55 Signalmoden



(b) 36 Signalmoden

Abbildung 3.8.: Räumlich aufgelöste relative Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus einer EDF mit Stufenbrechzahlprofil unter Verwendung vielmodiger Pumpstrahlung sowie 61 (a) bzw. 36 (b) Signalmoden.



(a)

(b)

Abbildung 3.9.: Gewinnspektren (a) und Signalpegelverläufe entlang der Faser (b) für alle räumlichen Kanäle. Der LP<sub>0,1</sub> und der LP<sub>1,4</sub>-Modus sind jeweils in Rot bzw. Schwarz hervorgehoben. Außerdem ist in (b) der MDG<sub>pp</sub> entlang der Faser dargestellt.

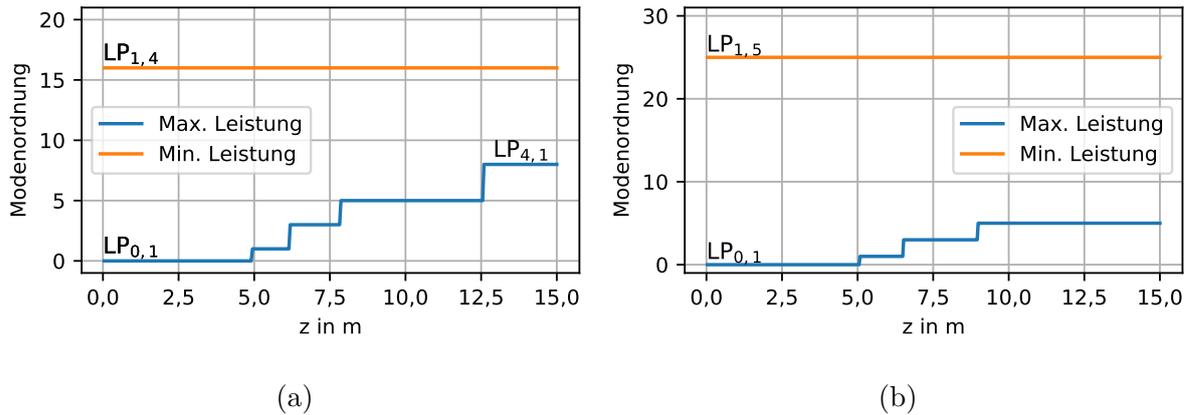


Abbildung 3.10.: Modenordnung des Modus mit der minimalen bzw. der maximalen Signalleistung am Ort  $z$  entlang der Faser unter Verwendung von 36 (a) bzw. 55 (b) Signalmoden. Entartete LP-Moden sind zur eindeutigen Darstellung zusammengefasst.

Die relative Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus ist in Abbildung 3.8(b) dargestellt und weist eine leichte Überhöhung im äußeren Kernbereich um  $r = 18 \mu\text{m}$  auf. Allerdings ist diese deutlich weniger stark ausgeprägt und liegt näher am Übergang zwischen Kern und Mantel als unter Verwendung des Gradientenbrechzahlprofils. Die maximale Überhöhung im äußeren Kernbereich um  $r \approx 18 \mu\text{m}$  beträgt 14% im Vergleich zu 21% im Fall des Gradientenbrechzahlprofils. Außerdem fällt auf, dass eine Überhöhung nur in einem kleinen radialen Abschnitt mit einer Breite von  $\approx 1 \mu\text{m}$  besteht, im Vergleich zu einem  $\approx 5 \mu\text{m}$  breiten Abschnitt unter Verwendung des Gradientenbrechzahlprofils. Der in Abbildung 3.9(b) dargestellte  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  ist im Vergleich zur Simulation mit 61 Signalmoden zwar gesunken, dies lässt sich allerdings über die Nicht-Verwendung der Moden höherer Ordnung erklären, welche einen geringeren Überlapp mit dem Erbium-dotierten Faserkern aufweisen. Eine solche Verringerung des  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  durch die Nicht-Verwendung der Moden höherer Ordnung zur Signalübertragung in einer EDF mit Stufenbrechzahlprofil konnte bereits experimentell für 10 Moden gezeigt werden [21, 23].

Eine Simulation unter Verwendung von 55 Signalmoden, einer angepassten Pumpleistung von 12,68 W zur Erreichung eines mittleren Gewinns aller Kanäle von 25 dB und ansonsten gleichbleibenden Simulationsparametern wird ebenfalls durchgeführt. Auch hier zeigt sich, dass der Verstärker ein modenabhängiges Sättigungsverhalten aufweist und der Grundmodus, trotz des größten Überlapps mit dem Faserkern, nicht die höchste Verstärkung erfährt. Die Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus weist in diesem Fall ebenfalls eine leichte Überhöhung für  $r \approx r_k$  im Vergleich zur Fasermite auf. In Abbildung 3.10(b) ist die Ordnung des Modus mit der höchsten und der niedrigsten Signalleistung entlang der Faser dargestellt. Der Modus mit der höchsten Signalleistung ist zunächst der Grundmodus. Mit einsetzender Sättigung verschiebt sich die Ordnung des Modus mit der höchsten Leistung allerdings zu höheren Modenordnungen. Im Vergleich zur Verwendung von 36 Signalmoden ist dieser Effekt allerdings schwächer ausgeprägt. Und die Ordnung des Modus mit dem höchsten Gewinn am Faserende ist geringer.

Verstärkerfasern mit Stufenbrechzahlprofil weisen demnach in den untersuchten Fällen ein leicht modenabhängiges Sättigungsverhalten auf. Die Abhängigkeit des MDG und der Signalgewinne

von der Anzahl der verwendeten Signalmoden ist mit den verwendeten Parametern jedoch schwächer als unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils. Ein Minimum des MDG entlang der Faser ist nicht zu erkennen.

### 3.3. Vergleich der Brechzahlprofile

Das unterschiedliche modenabhängige Sättigungsverhalten der EDF mit Gradienten- und Stufenbrechzahlprofil in den vorangegangenen Simulationen lässt sich über die räumliche Verteilung der Leistungsdichteverteilungen der Moden innerhalb des Faserkerns erklären. Hierzu sind in Abbildung 3.11 die Summen der normierten modalen Leistungsdichten der beiden Fasertypen für verschiedene Anzahlen an Modengruppen bei 1550 nm dargestellt. Für die Gradientenfaser

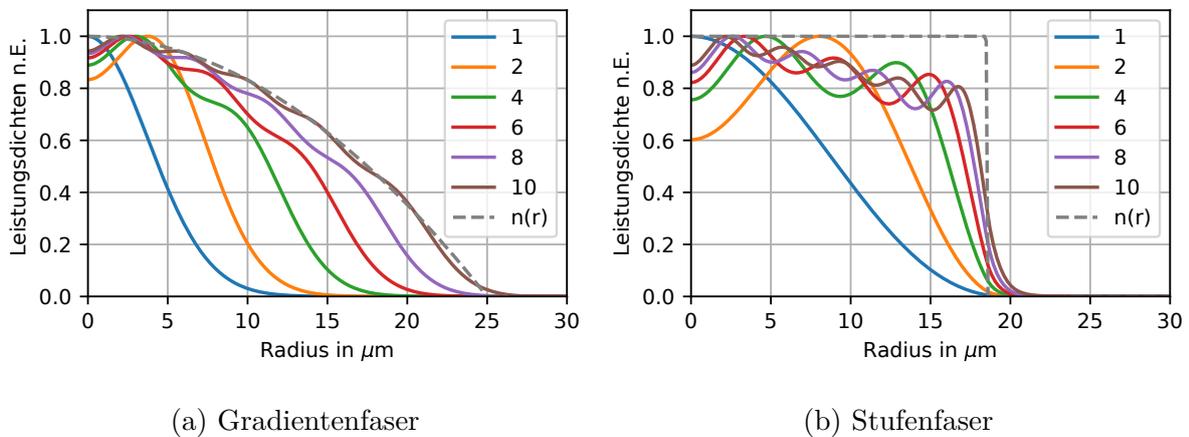


Abbildung 3.11.: Radiale Verteilung der aufsummierten normierten Leistungsdichteverteilungen der Moden bei 1550 nm einer Gradientenfaser mit 50  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser (a) und einer Stufenfaser mit 37,12  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser (b) für verschiedene Anzahlen an Modengruppen. Dargestellt ist jeweils die Summenleistung aller Modengruppen. In grau ist das jeweilige Brechzahlprofil zum Vergleich angedeutet.

ist zu erkennen, dass mit steigender Modenanzahl die aufsummierte Leistungsdichte aller Modengruppen weiter an den Rand des Kerns reicht. Generell gilt bei einer solchen Faser, dass die effektive Modenfeldfläche der Moden mit ihrer Ordnung ansteigt. Moden höherer Ordnung nehmen folglich einen größeren Teil des Kerns in Anspruch und besitzen größere Teile ihrer Leistungsdichte im äußeren Kernbereich (vgl. Abbildung 2.12 in Kapitel 2.3). Durch diese Eigenschaft kann eine radiale Abhängigkeit des Verhältnisses von Pump- zu Signalleistung erzeugt werden, indem Signalmoden höherer Ordnung vernachlässigt werden. Die Summation der Leistungsdichten der Stufenfaser ändert sich nicht in einem solchen Maße mit der Anzahl der verwendeten Moden. Auch die Moden niedrigerer Ordnung erstrecken sich in weit von der Faserachse entfernte Bereiche des Kerns. Eine Nicht-Verwendung einzelner Modengruppen führt nicht sofort zu einer genügend starken radialen Abhängigkeit des Verhältnisses von Pump- zu Signalleistung, um ein Absenken des MDG zu bewirken.

In beiden Fasern besitzt jedoch der  $\text{LP}_{0,1}$ -Modus den größten Überlapp mit dem Kernbereich

und der  $LP_{1,5}$ -Modus den geringsten Überlapp mit dem Faserkern. Unter Verwendung von nur 36 Signalmoden besitzt in beiden Fasern der  $LP_{1,4}$ -Modus den geringsten Überlapp mit dem Faserkern.

In den vorangegangenen Abschnitten wird das räumliche Sättigungsverhalten eines MDM-EDFA untersucht, indem Signalmoden höherer Ordnung für die Signalübertragung vernachlässigt werden, während alle verfügbaren Pumpmoden bei 980 nm genutzt werden. Unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils führt die Nicht-Verwendung von Signalmoden höchster Ordnung zu einem räumlichen Missverhältnis von Pump- zu Signalleistung, welches zu einer Umkehrung der Reihenfolge der modalen Signalleistungen und zu einem Minimum des  $MDG_{pp}$  entlang der Faser führt. Durch geeignete Wahl der Faserlänge kann der MDG in diesem Fall minimiert werden. Unter Verwendung eines stufenförmigen Brechzahlprofils tritt dieser Effekt weniger stark auf, da die Signalmoden einer Stufenfaser räumlich gleichmäßiger im Kern verteilt sind. Nichtsdestotrotz kann gezeigt werden, dass modenabhängige Sättigung auch unter Verwendung von Stufenbrechzahlprofilen einen Einfluss auf den MDG haben kann.

## 4. Einfluss des Sättigungsverhaltens in einem Aufrüstszenario

Wird die Anzahl der Signalmoden im Großsignalbetrieb verändert, so verändert sich das Sättigungsverhalten des MDM-EDFA aufgrund der geänderten Leistungsdichteverteilung der überlagerten Signalmoden am Eingang der Faser. Dieses Verhalten und der Einfluss auf den MDG wurde im vorherigen Kapitel simulativ untersucht. Gerade für ein Aufrüstszenario, bei dem die Anzahl der Signalmoden eines sich im Betrieb befindenden MDM-Systems schrittweise erhöht wird, um die Übertragungskapazität zu steigern, sind die geänderten Leistungsdichteverteilungen und deren Einfluss auf den MDG relevant. In diesem Abschnitt soll daher der Einfluss der Anzahl der verwendeten Signalmoden auf das Sättigungsverhalten und den MDG in einem solchen Szenario untersucht werden.

Aufgrund des größeren Einflusses modenabhängiger Sättigung in EDF mit Gradientenbrechzahlprofil im Vergleich zu einem Stufenbrechzahlprofil, wird ein solches Brechzahlprofil in diesem Kapitel untersucht. Als Übertragungsfaser wird ebenfalls eine Gradientenfaser mit 50  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser angenommen, deren Brechzahlprofil in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Als realitätsnahes Szenario wird angenommen, dass die Anzahl der zur Signalübertragung verwendeten Modengruppen in jedem Aufrüstschrift um eine Modengruppe erhöht wird, um die Übertragungskapazität zu steigern. Hierzu wird angenommen, dass die Kopplung zwischen den einzelnen Modengruppen in der Übertragungsfaser schwach ist [18]. Da das Brechzahlprofil der aktiven Faser identisch zu dem der Übertragungsfaser gewählt ist, wird Modenkopplung durch Stoßkopplung am Übergang zwischen der Verstärkerfaser und der Übertragungsfaser nur in geringem Umfang auftreten. Eine Kopplung von Signalleistung in ungenutzte Modengruppen hätte eine Verschlechterung der Signalqualität am Empfänger zur Folge, da die Signalanteile in den ungenutzten Moden nicht detektiert würden. Die verwendeten Simulationsparameter sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Als Bewertungskriterium wird in diesem Abschnitt, neben dem  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ , der  $\text{MDG}_{\text{rms}}$  verwendet, welcher eine vollständigere Beschreibung von Systemen mit starker Modenkopplung zwischen allen verwendeten Moden erlaubt. Obwohl zur Durchführung der Aufrüstung eine schwache Kopplung zwischen den Modengruppen der Übertragungsfaser angenommen wird, wird der Fall zugelassen, dass die verwendeten Modengruppen stark miteinander koppeln. Dies kann beispielsweise absichtlich durch die Verwendung eines Modenmischers geschehen, der verwendet wird, um den Einfluss der Modendispersion zu verringern [102]. Es ist zu beachten, dass hierbei nur eine Kopplung zwischen den jeweils verwendeten Signalmoden zugelassen wird, um weiterhin eine Kopplung in nicht verwendete Modengruppen zu vermeiden. Eine Kopplung mit ungenutzten Moden ist nach wie vor unerwünscht. Wie im vorherigen Abschnitt wird eine vielmodige Pumpquelle verwendet, welche alle 136 ausbreitungsfähigen Pumpmoden bei 980 nm gleichmäßig anregt. Die Dotierung des Kernbereichs mit Erbium-Ionen beträgt  $1,5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$ . In diesem Abschnitt werden die Feldverteilungen der Pump- und Signalmoden mit dem kommerziellen

#### 4. Einfluss des Sättigungsverhaltens in einem Aufrüstzenario

Tabelle 4.1.: Simulationsparameter zur Untersuchung des Einflusses des Sättigungsverhaltens eines MDM-EDF mit einer variablen Anzahl an Signalmoden.

Kerndurchmesser	50 $\mu\text{m}$
Numerische Apertur	0.21
Profilexponent	1.94
Faserlänge	10 m, 11 m, ..., 20 m
Anzahl Signalmoden	1, 3, 6, 10, 15, 21, 28, 36
Anzahl Signalwellenlängen	100
Eingangsleistung pro spektralem und räumlichem Kanal	-25 dBm
Mittlerer Gewinn aller Kanäle	20 dB
Anzahl Pumpmoden (980 nm)	136
Erbium-Dotierung im Kern	$1,5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$
Anzahl Diskretisierungspunkte in $z$ -Richtung	500
Anzahl Diskretisierungspunkte in $r$ -Richtung	151

Programm JCMWave bestimmt [103]. Die Ergebnisse in diesem Abschnitt wurden bereits in [JK 4] veröffentlicht. Im Gegensatz zu [JK 4] wird in dieser Arbeit potenzielle Sättigung der EDFA durch ASE berücksichtigt. Die Simulationsparameter, wie beispielsweise die Erbium-Dotierungsdichte, unterscheiden sich teilweise von denen im vorherigen Abschnitt. Dies sollte jedoch keinen Einfluss auf die Gültigkeit der getroffenen Schlussfolgerungen haben.

#### 4.1. MDG in Abhängigkeit der Modenanzahl

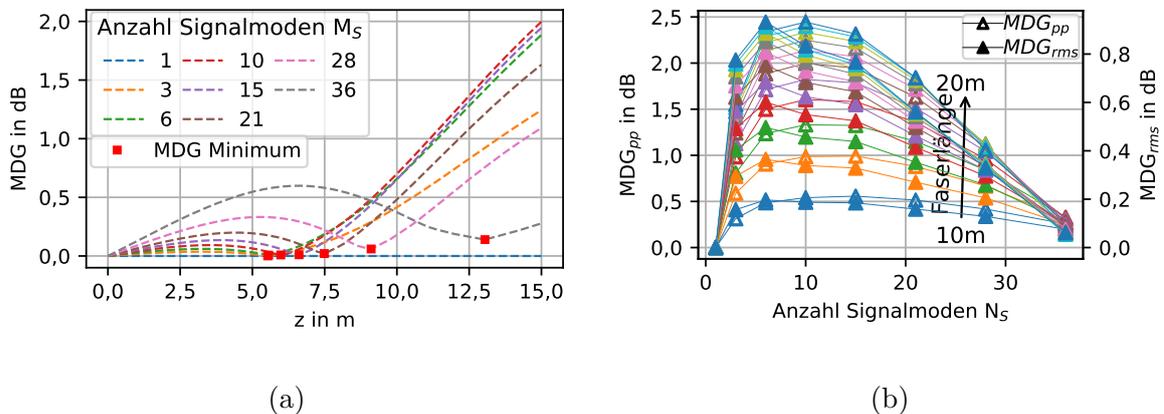


Abbildung 4.1.: Darstellung des MDG<sub>pp</sub> entlang der Faser für eine 15 m lange EDF mit einer unterschiedlichen Anzahl an Signalmoden (a); Darstellung des MDG<sub>pp</sub> und des MDG<sub>rms</sub> über der Anzahl an Signalmoden für verschiedene Faserlängen in Schritten von je 1 m (b).

In Abbildung 4.1(a) ist der Verlauf des MDG<sub>pp</sub> entlang der Faser für verschiedene Anzahlen an Signalmodengruppen dargestellt. Die hierbei verwendete Faser hat eine Länge von 15 m. Jeweils mit einem roten Rechteck ist das Minimum des MDG<sub>pp</sub> für die jeweilige Anzahl an

Signalmoden markiert. Es ist zu erkennen, dass sich für alle Modenanzahlen  $M_S > 1$  aufgrund der modenabhängigen Sättigung ein Minimum des  $MDG_{pp}$ , ähnlich zu Abschnitt 3.1, ausbildet. Das Minimum liegt für weniger als 21 Signalmoden zwischen 5 m und 7,5 m und steigt mit der Anzahl der Signalmoden auf 13 m für 36 Signalmoden. Dieses Verhalten kann dadurch erklärt werden, dass die aufsummierte Leistungsdichte der Signalmoden, welche zum Einsetzen der Gewinnsättigung führt, wie in Abbildung 3.11(a) dargestellt, für eine kleinere Anzahl an Signalmoden einen kleineren Bereich des Kerns einnimmt. Hierdurch ist für eine kleinere Anzahl an Signalmoden immer mehr Pumpleistungsdichte im äußeren Kernbereich vorhanden. Die Überhöhung der Besetzungsdichte im äußeren Kernbereich bildet sich somit näher am Fasereingang aus und der  $MDG_{pp}$  erreicht ein Minimum. Hinter dem Minimum beginnt der  $MDG_{pp}$  bis zum Faserende anzusteigen.

Der  $MDG_{pp}$  und der  $MDG_{rms}$  am Ende der Faser sind in Abbildung 4.1(b) für verschiedene Faserlängen über der Anzahl an verwendeten Signalmoden dargestellt. Zunächst lässt sich festhalten, dass der  $MDG_{pp}$  und der  $MDG_{rms}$  ein ähnliches Verhalten aufweisen. Für geringe Anzahlen an Signalmoden ( $M_S < 10$ ) steigt der  $MDG_{pp}$ -Wert für alle Faserlängen an. Für eine größere Anzahl an Signalmoden ( $M_S > 10$ ) sinkt der  $MDG_{pp}$  mit der Anzahl der verwendeten Signalmoden. Der beschriebene Verlauf ist für alle betrachteten Faserlängen zu erkennen. Für kurze Fasern ist ein niedrigerer  $MDG_{pp}$ -Wert erreichbar als für längere Fasern, wenn ein identischer mittlerer Signalgewinn aller Signalkanäle von 20 dB erreicht wird. Bei einer Faserlänge von 10 m liegt der  $MDG_{pp}$  für alle Aufrüstschritte unter 0,5 dB, während bei einer Faserlänge von 20 m ein maximaler  $MDG_{pp}$  von 2,4 dB erreicht wird. Dieses Verhalten lässt sich durch die höhere mittlere Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus für kürzere Fasern erklären, da mit sinkender Faserlänge mehr Pumpleistung für einen identischen Gewinn benötigt wird. Während längere Fasern bereits in Sättigung gehen, befinden sich die Verstärker mit kurzer Faserlänge in einem nahezu linearen Betriebspunkt und somit in der Nähe ihres maximal erreichbaren Gewinns pro Länge. Außerdem ist zu erkennen, dass sich der MDG in beiden Definitionen, unter Verwendung von 36 Signalmoden, nur schwach mit der Faserlänge verändert. Unter Verwendung von 10 Signalmoden ist jedoch eine starke Abhängigkeit des MDG von der Faserlänge erkennbar.

## 4.2. Rauschzahlen und Pumpleistung

Neben dem MDG sollen ebenfalls die Rauschzahlen und Pumpleistungen in diesen Betriebszuständen untersucht werden. In Abbildung 4.2(a) ist die benötigte Pumpleistung zur Erreichung des gewünschten mittleren Gewinns aller räumlichen und spektralen Kanäle von 20 dB für verschiedene Faserlängen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die benötigte Pumpleistung mit zunehmender Faserlänge abnimmt. Während eine 10 m lange EDF eine Pumpleistung von mehr als 20 W benötigt, können EDF mit einer Länge von bis zu 14 m mit einer Pumpleistung von unter 5 W betrieben werden. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass für kurze EDF zur Erreichung des gleichen Gewinns ein höherer Gewinn pro Faserlänge benötigt wird als für längere Fasern. Zur Erreichung eines höheren Gewinns pro Faserlänge wird eine höhere Pumpleistung benötigt. Eine kurze EDF wird in diesem Fall über die gesamte Faserlänge nahe ihres maximal erreichbaren Gewinns pro Faserlänge betrieben. In diesem Zustand wird für eine weitere Erhöhung des Signalgewinns eine größere Zunahme an Pumpleistung benötigt als in einer längeren Faser, welche sich stärker in Gewinnsättigung befindet (vgl. Kapitel 2.5.5).

#### 4. Einfluss des Sättigungsverhaltens in einem Aufrüstszenario

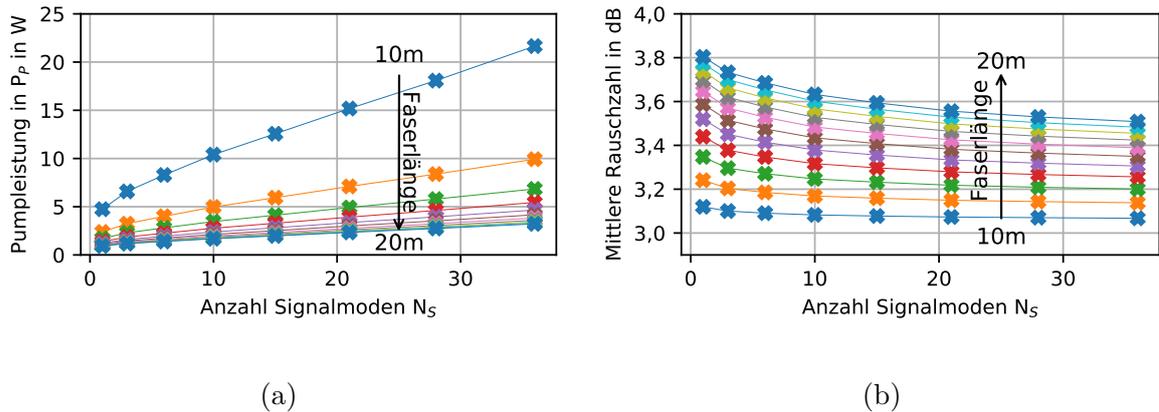


Abbildung 4.2.: Die benötigte gesamte Pumpleistung zur Erreichung eines mittleren Gewinns von 20 dB über der Anzahl der verwendeten Signalmoden in einem Aufrüstszenario für verschiedene Faserlängen (a); Die Rauschzahl über der Anzahl an Signalmoden für verschiedene Faserlängen (b). Die Faserlängen unterscheiden sich jeweils um 1 m.

Die resultierenden über alle WDM-Kanäle gemittelten Rauschzahlen sind in Abbildung 4.2(b) dargestellt. Es ist die Mittelung über die Rauschzahlen aller räumlichen und spektralen Kanäle dargestellt. Zunächst ist zu erkennen, dass die mittlere Rauschzahl mit abnehmender Faserlänge sinkt. Von 3,8 dB bei einer Faserlänge von 20 m sinkt die mittlere Rauschzahl auf 3,1 dB für eine Faserlänge von 10 m ab. Dies lässt sich durch die insgesamt höhere Pumpleistung und somit höhere Besetzungsdichte, insbesondere am Eingang der Verstärkerfaser, erklären. Der spontane Emissionsfaktor  $\eta_{sp}$  nähert sich durch die höhere Besetzungsdichte an den Minimalwert  $\eta_{sp} = 1$  an und die Rauschzahl sinkt. Auch für eine Erhöhung der Signalmodenzahl ist eine Verringerung der Rauschzahl erkennbar. Für längere EDF ist eine stärkere Abhängigkeit der mittleren Rauschzahl von der Anzahl an Signalmoden erkennbar. Während die Absenkung der mittleren Rauschzahl für die längste simulierte Faser  $\approx 0,3$  dB beträgt, ist für die kürzeste Faser eine Absenkung um  $\approx 0,05$  dB erkennbar. Diese Verringerung lässt sich durch die zur Verstärkung vieler Signalmoden benötigte höhere Pumpleistung erklären, welche wiederum zu einer Erhöhung der Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus in der Nähe des Fasereingangs führt.

Im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Berücksichtigung der Sättigung durch die ASE aus [JK 4] sind kaum Abweichungen bei den erzielten Rauschzahlen und beim MDG sowie bei den benötigten Pumpleistungen zu erkennen. Geringe Abweichungen treten vor allem für kleine Anzahlen an Signalmoden auf, da in diesen Fällen die Signalleistung im Vergleich zur Leistung der ASE geringer ist. Nichtsdestotrotz liefern die Berechnungen aus [JK 4] nahezu identische Ergebnisse und führen zu den gleichen Schlussfolgerungen.

Für die Auslegung eines MDM-EDFA in einem Aufrüstszenario lässt sich folglich festhalten, dass der MDG sich für verschiedene Aufrüstschnitte durch modenabhängige Sättigungseffekte verändern kann. Unter Annahme einer vielmodigen Pumpstrahlung kann der MDG mit einer steigenden Anzahl an Signalmoden sinken. Die modenabhängigen Sättigungseffekte helfen folglich in diesem Fall bei der Angleichung der Signalgewinne eines MDM-EDFA. Außerdem lässt sich aus

den Ergebnissen ableiten, dass es nicht ausreicht, den MDM-EDFA ausschließlich für den finalen, voll ausgebauten Zustand auszulegen. Es muss bei der Systemauslegung darauf geachtet werden, dass der MDG für alle potenziell möglichen Anzahlen an Signalmoden innerhalb der gewünschten Toleranzen liegt. Durch die Verwendung einer kurzen EDF, welche nahezu im linearen Betrieb verwendet wird, kann sowohl eine Rauschzahl in der Nähe des Quantenlimits erreicht werden, als auch der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  minimiert werden. Im Gegenzug steigt allerdings die benötigte Pumpleistung stark an, so dass die Signalverstärkung mit einer derart kurzen Faser ineffizient wäre. Es ist folglich ein Kompromiss zwischen benötigter Pumpleistung und den erreichbaren Werten für den  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  sowie des Rauschverhaltens bei der Auslegung eines MDM-EDFA nötig.



## 5. Optimierung des Erbium-Dotierungsprofils

Zur Minimierung der Gewinnunterschiede der Signalmoden in einem MDM-EDFA können, wie in Abschnitt 2.5.7 beschrieben, verschiedene Freiheitsgrade ausgenutzt werden. Ein Freiheitsgrad zur Minimierung des MDG ist das Erbium-Dotierungsprofil  $\rho(r)$  im Faserkern. In diesem Kapitel soll die Optimierung des Erbium-Dotierungsprofils in radialer Richtung beschrieben werden. Die Optimierung wird durchgeführt, um möglichst geringe Gewinnunterschiede zwischen den Signalmoden zu erreichen.

In der Literatur wurden solche Untersuchungen bisher für Verstärker mit bis zu 10 Signalmoden durchgeführt. Für Verstärker mit 3 Signalmoden ( $LP_{0,1}$  und  $LP_{1,1a/b}$ ) wird im Allgemeinen eine Erhöhung der Erbium-Konzentration im äußeren Kernbereich empfohlen [36, 88]. Hierbei reicht bereits ein einziger Ring aus, der einen höheren Überlapp mit den  $LP_{1,1a/b}$ -Moden als mit dem  $LP_{0,1}$ -Modus besitzt und so deren Gewinn stärker anhebt als den Gewinn des  $LP_{0,1}$ -Modus. Die Konzentration des Erbiums im äußeren, höher dotierten, Bereich des Faserkerns wird so weit erhöht, dass die Gewinne der 3 Signalmoden angeglichen sind. Unter Verwendung von 8 Signalmoden wird ein alternierendes Profil mit einem hoch dotierten Bereich in der Mitte des Faserkerns zur Anpassung des Gewinns des  $LP_{0,2}$ -Modus und einem hoch dotierten Bereich im äußeren Bereich des Kerns zur Anpassung der Gewinne der  $LP_{1,1a/b}$ -,  $LP_{2,1a/b}$ - und  $LP_{4,1a/b}$ -Moden eingesetzt [104]. Für diese geringe Modenanzahl kann also eine Gewinnangleichung erfolgen, indem die Dotierungsdichte der Erbium-Ionen in radialer Richtung angepasst wird. Für eine größere Anzahl an Moden sind folglich mehr Freiheitsgrade im Dotierungsprofil notwendig. Eine Optimierung des MDG für 10 Signalmoden wurde in [37] erreicht, indem mehrere verschieden breite Ringe im Kernbereich mit unterschiedlichen Erbium-Dotierungsdichten versehen wurden. Hierbei wurden 23 Pumpmoden bei 980 nm mit ebenfalls optimierter Pumpleistung verwendet. In [90] wurde mithilfe einer evolutionären Optimierung das Erbium-Dotierungsprofil für 10 Signalmoden sowohl in radialer Richtung als auch in azimuthaler Richtung unter Verwendung von wahlweise einem oder beiden  $LP_{1,1a/b}$ -Moden als Pumpmoden optimiert. In der Literatur wurde geschlussfolgert, dass sich eine Angleichung der Gewinne aller Moden auf  $MDG_{pp} < 0,12$  dB als zu schwierig erweist [37].

In [JK 2] wurde über eine Angleichung des Erbium-Dotierungsprofils für Gradienten- und Stufenfasern mit 50  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser berichtet. In diesem Abschnitt sollen die Arbeiten aus [JK 2] auf Stufenfasern mit 55 Signalmoden und einem Kerndurchmesser von 37,12  $\mu\text{m}$  erweitert werden, um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen Gradienten- und Stufenbrechzahlprofil zu erzielen. Außerdem werden die folgenden Simulationen mit 50 WDM-Kanälen durchgeführt, welche äquidistant zwischen 1530 nm und 1560 nm verteilt sind, anstatt eines einzelnen Wellenlängenkanals wie in [JK 2].

Die Brechzahlprofile und effektiven Brechzahlen der Signalmoden der verwendeten Fasern sind in Abbildung 3.1 und 3.6 dargestellt.

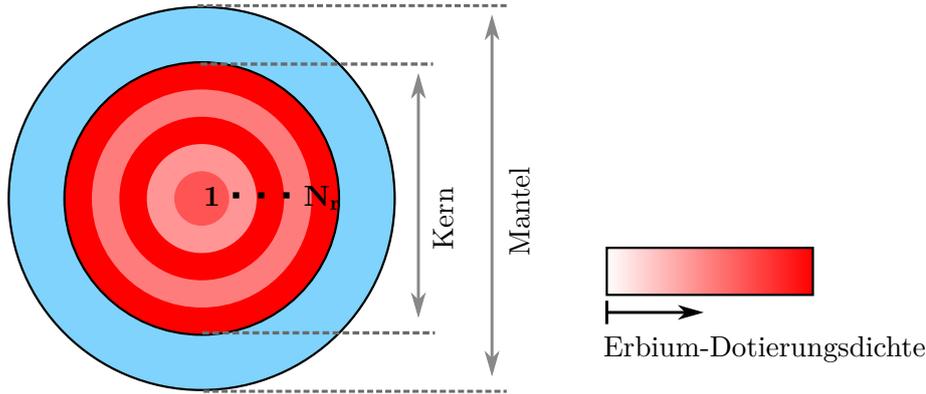


Abbildung 5.1.: Schematische Darstellung des Querschnitts einer EDF mit einer Anzahl  $N_r$  an verschiedenen mit Erbium dotierten konzentrischen Ringen im Kernbereich. Die Dotierungsdichte der einzelnen Ringe soll numerisch optimiert werden, um die Gewinne der Signalmoden anzugleichen.

## 5.1. Überlappintegrale zwischen Erbium-Dotierung und Signalmoden

Maßgeblich für den Gewinn eines Modus ist dessen Überlappung mit der Region des invertierten Erbiums  $N_2(r, z)$ . Wird eine vollständige Inversion aller vorhandenen Erbium-Ionen im Kernbereich angenommen, so hängt die Verstärkung eines Signalmodus nur vom Überlapp seiner normierten transversalen Leistungsdichteverteilung mit der transversalen Verteilung der Erbium-Dotierung ab. Als vollständige Inversion wird hierbei der Zustand bezeichnet, bei dem sich alle Erbium-Ionen im oberen Laserniveau befinden. Für die Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus  $N_2$  gilt also entlang der gesamten Faser:  $N_2(r, z) = \rho(r, z)$ . Gleichung 2.42 vereinfacht sich somit zu:

$$\frac{dP_{s,i}}{dz} = P_{s,i} \sigma_e(\nu_s) \underbrace{\int \int \Psi_{s,i}(r, \phi) \rho(r, \phi) dA}_{\text{Überlappintegral } \Omega_i} \quad (5.1)$$

Hierbei bezeichnet das Überlappintegral  $\Omega_i$  die Auswertung des Flächenintegrals über dem Produkt aus normierter transversaler Leistungsdichteverteilung des  $i$ -ten Modus  $\Psi_{s,i}(r, \phi)$  und der radialen Verteilung der Erbium-Dotierungsdichte  $\rho(r, \phi)$ .

Nahezu vollständige Inversion lässt sich beispielsweise mithilfe von Mantelpumpen bei ausreichend großen Pumpleistungen erreichen [21]. Alternativ kann die Pumpleistungsverteilung im Kern so gewählt werden, dass eine höhere Pumpleistung im Bereich einer erhöhten Erbium-Dotierung vorliegt. Beispielsweise kann der  $LP_{0,1}$ -Pumpmodus zur Invertierung eines höher dotierten Bereichs in der Mitte der Faser und die  $LP_{4,1a/b}$ -Pumpmoden zur Invertierung eines höher dotierten Rings im äußeren Kernbereich einer EDF mit 6 Signalmoden verwendet werden [104]. Ein solches Vorgehen steigert, im Vergleich zum Mantelpumpen mit hoher Leistung, die Pumpeffizienz, da die erforderliche Pumpleistungsdichte zur Erreichung der Inversion innerhalb einer kleineren Querschnittsfläche erreicht werden muss.

In diesem Betriebszustand lassen sich einige weitere Vereinfachungen ableiten. Da der spontane Emissionsfaktor aus Formel 2.45 in diesem Fall  $\eta_{sp} = 1$  ist, ergibt sich eine Rauschzahl von 3 dB

für alle Kanäle. Mit Gleichung 5.1 ergibt sich ein konstanter Gewinn pro Faserlänge. Daraus lässt sich ableiten, dass der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  in logarithmischen Einheiten ebenfalls linear mit der Faserlänge und somit mit dem Gewinn in dB ansteigt.

Es stellt sich die Frage, wie die Verteilung der Erbium-Ionen in radialer Richtung aussehen sollte, um die Überlappintegrale  $\Omega_i$  aller Signalmoden anzugleichen. Der Kernbereich wird hierzu, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, radial in  $N_r$  konzentrische Ringe gleicher Breite eingeteilt, deren Erbium-Dotierung im Folgenden optimiert werden soll. Die Untersuchungen werden jeweils für eine Gradientenfaser mit  $50 \mu\text{m}$  Kerndurchmesser und eine Stufenfaser mit  $37,12 \mu\text{m}$  Kerndurchmesser durchgeführt. Die Simulationsparameter für die folgenden Untersuchungen sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1.: Simulationsparameter zur Simulation des Verstärkerverhaltens mit einem optimierten Erbium-Dotierungsprofil.

	<b>Gradientenfaser</b>	<b>Stufenfaser</b>
Kerndurchmesser	$50 \mu\text{m}$	$37,12 \mu\text{m}$
Numerische Apertur	0.21	0.21
Faserlänge	variabel	variabel
Anzahl Signalmoden	55,45 bzw. 36	55,45 bzw. 36
Anzahl Signalwellenlängen	50	50
Eingangsleistung pro spektr. und räuml. Kanal	$-25 \text{ dBm}$	$-25 \text{ dBm}$
Mittlerer Gewinn aller Kanäle	20 dB	20 dB
Erbium-Dotierung im Kern	optimiert	optimiert
Anzahl Diskretisierungspunkte in $z$ -Richtung	500	500
Anzahl Diskretisierungspunkte in $r$ -Richtung	300	300

Für beide Fasern wird numerisch das Überlappintegral  $\Delta\Omega_{ij}$  aller Signalmoden  $i$  mit jedem der Erbium-dotierten Ringe  $j$  ermittelt. Die entstehende Matrix  $\mathbf{A}$  beschreibt die Stärke des Einflusses der Dotierungsdichte jedes Rings auf die Überlappintegrale der Signalmoden. Es ergibt sich ein lineares Gleichungssystem mit der Matrix der Überlappintegrale  $\mathbf{A}$ , den gewünschten Überlappintegralen  $\Omega_{\text{soll},i}$  für eine Anzahl an  $M_S$  Signalmoden und den Dotierungsdichten  $\rho_j$  jedes der einzelnen  $N_r$  Erbium-dotierten Ringe, in die der Kernbereich unterteilt ist:

$$\vec{\Omega}_{\text{soll}} = \begin{pmatrix} \Omega_{\text{soll},1} \\ \vdots \\ \Omega_{\text{soll},i} \\ \vdots \\ \Omega_{\text{soll},M_S} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\Omega_{11} & \cdots & \Delta\Omega_{1N_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta\Omega_{M_S 1} & \cdots & \Delta\Omega_{M_S N_r} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \vdots \\ \rho_j \\ \vdots \\ \rho_{N_r} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \cdot \vec{\rho}. \quad (5.2)$$

$\vec{\Omega}_{\text{soll}}$  wird für eine Angleichung der Gewinne aller  $M_S$  Signalmoden konstant gewählt. Dieses Gleichungssystem wird numerisch mit dem non-negative least squares (NNLS) Verfahren nach dem Vektor der Dotierungen der einzelnen Ringe gelöst [101]. Der Gleichungslöser berechnet hierbei die Erbium-Dotierungsprofile, welche das kleinste mittlere Fehlerquadrat zwischen den gewünschten und den resultierenden Überlappungen der einzelnen Moden mit dem Erbium-Dotierungsprofil erzeugen. Durch die Wahl des NNLS Löser ergeben sich ausschließlich physikalisch sinnvolle

Dotierungsdichten mit  $\rho_j > 0$ . Dieses Vorgehen ist zur Veranschaulichung in Abbildung 5.2 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die Erbium-Dotierung angepasst werden kann,

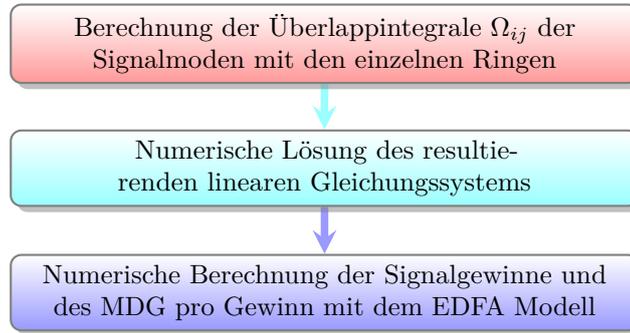


Abbildung 5.2.: Schematische Darstellung des verwendeten Vorgehens zur Optimierung des Erbium-Dotierungsprofils und der Berechnung des resultierenden MDG.

ohne einen spürbaren Einfluss auf das Brechzahlprofil zu haben [36, 37].

### 5.2. Optimierte Dotierungsprofile mit Gradientenbrechzahlprofil

Die Ergebnisse der Optimierung des Erbium-Dotierungsprofils für eine Faser mit Gradientenbrechzahlprofil sind in Abbildung 5.3 mithilfe von 55 Signalmoden und  $N_r = 4$ ,  $N_r = 7$  und  $N_r = 10$  dotierten Ringen dargestellt. In allen drei Fällen ist eine Erhöhung der Erbium-Konzentration im äußersten Ring erkennbar. Unter Verwendung einer höheren Anzahl an dotierten Ringen, steigt die Dotierungsdichte des äußeren Rings an. Der zweitäußerste Erbium-dotierte Ring besitzt eine leicht abgesenkte Dotierungsdichte. Der restliche Bereich des Faserkerns ist nahezu konstant mit Erbium-Ionen dotiert.

Die resultierenden  $\text{MDG}_{pp}$ -Werte bei einem mittleren Gewinn von 25 dB aller räumlichen und spektralen Kanäle sind in Abbildung 5.4(a) für verschiedene Anzahlen an Ringen  $N_r$  und verschiedene Anzahlen an Signalmoden dargestellt. Bei Verwendung von 55 Signalmoden können die Gewinnunterschiede bei einer Optimierung von 9 Ringen auf unter 0,05 dB gesenkt werden. Der höher dotierte Bereich im äußeren Kernbereich hat dann eine Breite von  $\Delta r = 2,78 \mu\text{m}$ . Außerdem sind die erreichbaren  $\text{MDG}_{pp}$ -Werte für den Fall dargestellt, dass die Optimierung unter Berücksichtigung von nur 45 oder 36 Signalmoden durchgeführt wird. Da in diesen Fällen die Moden mit dem geringsten Überlapp mit dem Kernbereich vernachlässigt werden, sinkt der  $\text{MDG}_{pp}$  bereits für einen konstant mit Erbium dotierten Faserkern ab. Zur Angleichung der Gewinne werden ebenfalls weniger Ringe benötigt, eine Angleichung der Gewinne von 36 Signalmoden bis auf eine verbleibende Abweichung von unter 0,05 dB ist bereits mit  $N_r = 4$  Ringen möglich. Der höher dotierte Bereich im äußeren Kernbereich hat für diesen Fall eine Breite von  $\Delta r = 6,25 \mu\text{m}$ .

Zur Erklärung dieses Verhaltens können die effektiven Modenfeldflächen der Signalmoden  $A_{\text{eff},i}$  sowie deren Überlappungen  $\Omega_i$  mit einem konstant mit Erbium dotierten Faserkern herangezogen werden. Beide Metriken sind in Abbildung 5.4(b) dargestellt. Zunächst ist zu erkennen, dass die Moden niedrigerer Ordnung eine geringere Fläche im Kernbereich einnehmen als die Moden höherer Ordnung. Der  $\text{LP}_{0,1}$ -Modus nimmt beispielsweise nur etwa 20 % der

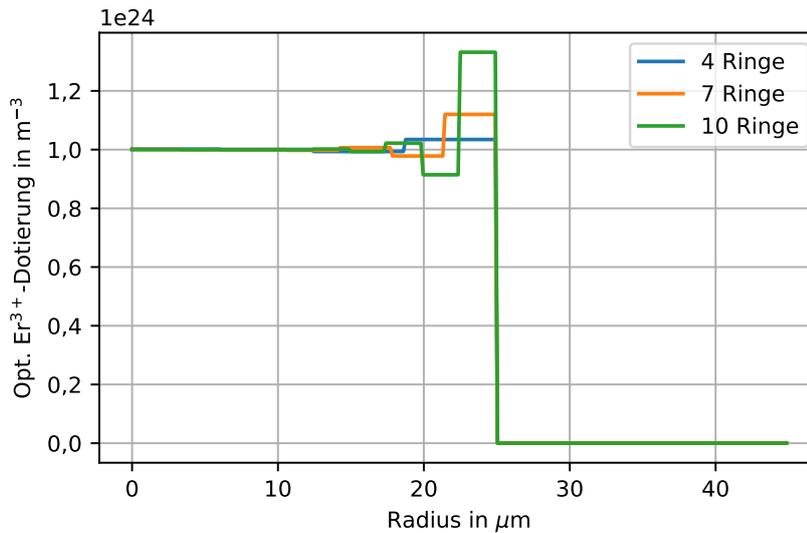


Abbildung 5.3.: Optimiertes Erbium-Dotierungsprofil für 55 Signalmoden unter Verwendung von verschiedenen Anzahlen an Ringen  $N_r$  für ein Gradientenbrechzahlprofil.

Fläche des Modus mit der größten effektiven Modenfeldfläche ein. Gleichzeitig besitzen die Moden niedrigerer Ordnung den größten Überlapp mit dem Kernbereich und erfahren somit die höchsten Gewinne. Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, befinden sich die Moden niedriger Ordnung unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils relativ konzentriert in der Mitte des Kernbereichs (vgl. Abbildung 3.11). Für die ersten 28 Signalmoden befinden sich die Modenfelder mit  $\Omega_i > 0.999$  nahezu vollständig im Faserkern. Der Signalgewinn bei vollständiger Inversion ist für diese Moden also sehr ähnlich. Die Moden höherer Ordnung ( $i \geq 29$ ) hingegen besitzen geringere Überlappintegrale  $\Omega_i$  mit dem Kernbereich. Der Signalmodus, welcher den geringsten Überlapp mit Kernbereich und somit in diesem Szenario den geringsten Gewinn bei einem konstant Dotierungsdichte im Faserkern aufweist, ist der  $LP_{1,5}$ -Modus mit  $\Omega_i = 0.97$ .

Die Moden höherer Ordnung, deren Überlapp mit der Erbium-Dotierung durch die Optimierung erhöht werden soll, besitzen aufgrund der höheren effektiven Modenfeldflächen einen größeren Anteil ihrer Leistung im äußeren Bereich des Faserkerns als die Moden niedriger Ordnung. Da sich am äußeren Rand der Faser somit hauptsächlich die Moden höherer Ordnung befinden, kann durch eine Erhöhung der Erbium-Dotierungsdichte in diesem Bereich der Gewinn dieser Moden selektiv gesteuert werden. Der Gewinn der Moden niedrigerer Ordnung wird dabei nur wenig beeinflusst, da deren Modenfelder im Bereich der erhöhten Dotierungsdichte nur schwach sind. Je mehr Ringe dem Algorithmus zur Verfügung gestellt werden, desto schmaler kann die Breite des äußersten Rings gewählt werden. Durch die Absenkung der Dotierungsdichte des zweit-äußersten Rings kann außerdem dafür gesorgt werden, dass durch eine Mittelung der Einfluss des äußersten Rings für bestimmte Moden abgeschwächt wird, welche ähnliche Anteile ihrer Leistungsdichte in beiden Bereichen besitzen.

Die berechneten Dotierungsprofile für 55 Signalmoden können in einem EDFA verwendet werden, indem die Anzahl der Signalmoden zur Laufzeit des Systems verändert wird, solange für eine ausreichende Invertierung im gesamten Kernbereich gesorgt wird. Die Ergebnisse in diesem Abschnitt decken sich sehr gut mit den Ergebnissen aus [JK 2]. Durch die Verwendung eines

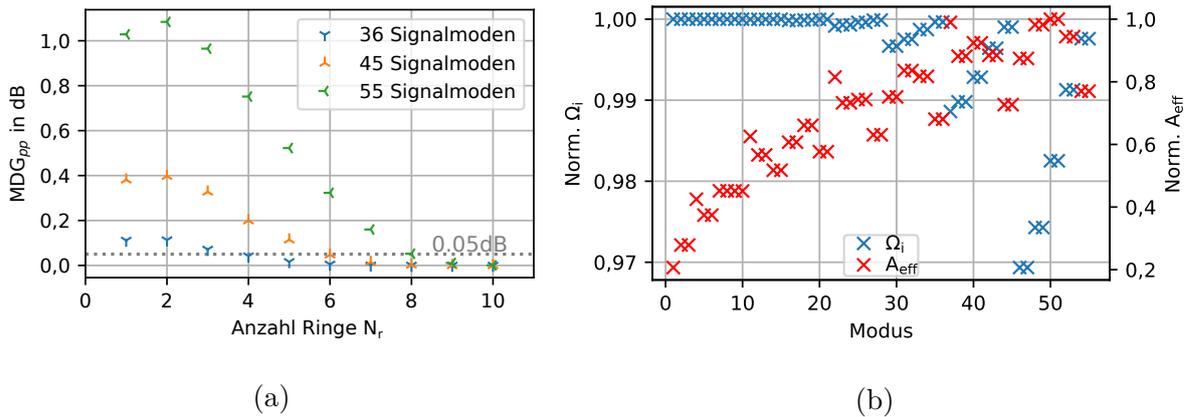


Abbildung 5.4.: Resultierender MDG<sub>pp</sub> unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils für verschiedene  $N_r$  und Anzahlen an Signalmoden (a); Effektive Modenfeldflächen  $A_{eff,i}$  und Überlappungen der Signalmoden mit dem Kernbereich  $\Omega_i$  (b).

verbesserten Gleichungslösers konnte für die Simulationen in diesem Abschnitt außerdem ein leicht verbessertes Konvergenzverhalten erreicht werden.

### 5.3. Optimierte Erbium-Dotierungsprofile mit Stufenbrechzahlprofil

Die resultierenden Erbium-Dotierungsprofile unter Verwendung eines Stufenbrechzahlprofils sind in Abbildung 5.5 für verschiedene Anzahlen an ringförmigen Bereichen  $N_r$  dargestellt.

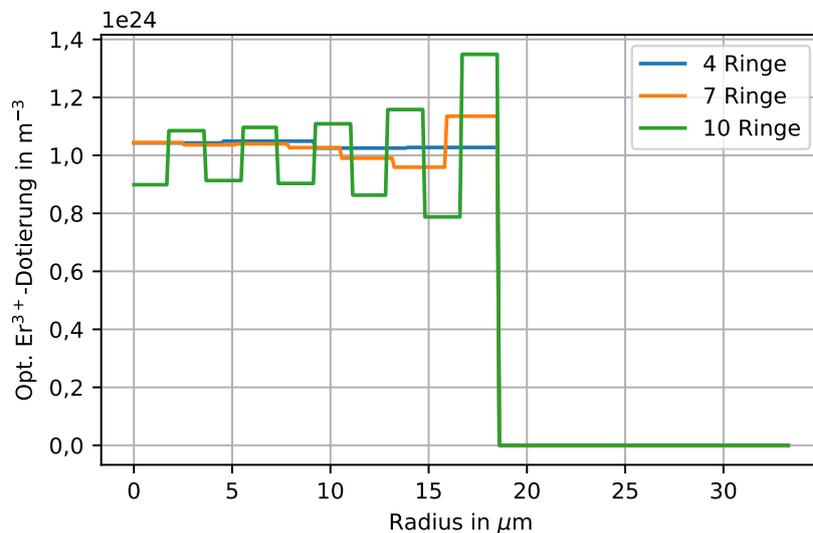


Abbildung 5.5.: Optimierte Erbium-Dotierungsprofile für 55 Signalmoden und verschiedene Anzahlen an dotierten Ringen  $N_r$  unter Verwendung eines Stufenbrechzahlprofils.

Unter Verwendung eines Stufenbrechzahlprofils ergibt der verwendete Algorithmus mit  $N_r = 10$

ein stark alternierendes Erbium-Dotierungsprofil. Eine selektive Verstärkung der Moden höherer Ordnung durch eine Erhöhung der Erbium-Dotierungsdichte im äußeren Bereich des Kerns, wie im Fall der Gradientenindexfaser, scheint nicht möglich zu sein.

Die erreichbaren  $\text{MDG}_{pp}$  Werte für verschiedene Anzahlen an Erbium-dotierten Ringen und Signalmoden sind in Abbildung 5.6(a) dargestellt. Auch unter Verwendung eines Stufenbrechzahlprofils lassen sich die Gewinne der einzelnen Signalmoden bis auf eine verbliebene Abweichung von 0,05 dB angleichen. Zur Angleichung der Gewinne von 55 Signalmoden sind 10 Ringe notwendig. Hierbei besitzt der am stärksten dotierte äußerste Ring eine um mehr als 60 % höhere Dotierungsdichte als der direkt benachbarte Ring mit der geringsten Dotierungsdichte. Unter Verwendung von 45 Signalmoden werden 9 und unter Verwendung von 36 Signalmoden 8 Ringe benötigt, um einen  $\text{MDG}_{pp}$  unter 0,05 dB zu erreichen. Auch in diesen Fällen ergeben sich alternierende Verteilungen der Erbium-Dotierungsdichte.

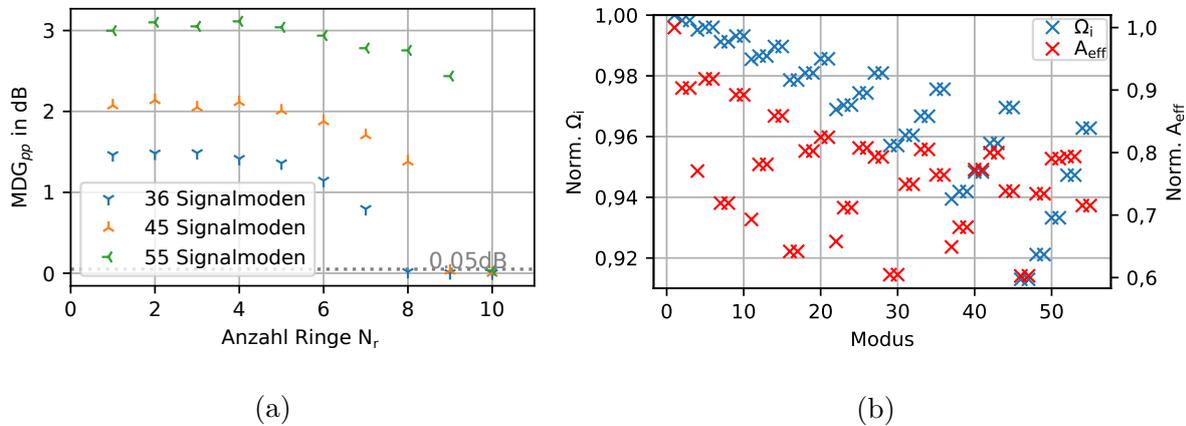


Abbildung 5.6.:  $\text{MDG}_{pp}$  für verschiedene Anzahlen an Signalmoden  $M$  und dotierten Ringen  $N_r$ ; Effektive Modenfeldflächen  $A_{\text{eff},i}$  und Überlappungen der Signalmoden mit dem Kernbereich  $\Omega_i$  (b).

Es stellt sich die Frage, warum eine Angleichung der Gewinne in einer Stufenfaser nicht ebenfalls mit einer Erhöhung der Dotierungsdichte im äußeren Kernbereich zu realisieren ist. Dies lässt sich durch die verschiedenen effektiven Modenfeldflächen der Signalmoden in den unterschiedlichen Fasern erklären. Die effektiven Modenfeldflächen  $A_{\text{eff}}$  und die Überlappungen  $\Omega_i$  der einzelnen Signalmoden mit einem konstant dotierten Kernbereich für den Fall einer Stufenfaser sind in Abbildung 5.6(b) dargestellt.

Unter Verwendung eines Stufen- anstatt eines Gradientenbrechzahlprofils weisen die effektiven Modenfeldflächen  $A_{\text{eff}}$  eine geringere und die Überlappintegrale  $\Omega_i$  eine größere Schwankung auf. Die größeren effektiven Modenfeldflächen in der Gradientenfaser können durch den höheren Kerndurchmesser erklärt werden. Die insgesamt größeren Überlappintegrale der Leistungsdichteverteilungen der Signalmoden mit dem Kernbereich können über die bessere Führung der Moden in der Gradientenfaser erklärt werden. In der Literatur konnte bereits gezeigt werden, dass sich unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils geringere MDG erzielen lassen [95, 105].

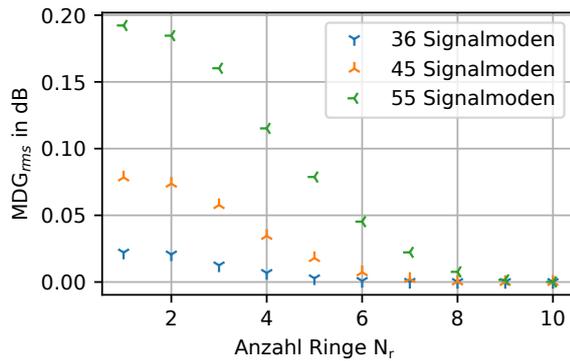
Aufgrund der hohen effektiven Modenfeldflächen der Moden niedriger Ordnung lässt sich in der Stufenfaser kein Bereich in radialer Richtung ausmachen, in dem die Moden höherer

Ordnung selektiv verstärkt werden können. Erst unter Verwendung von 10 Ringen gelingt eine Angleichung der Gewinne mit stark alternierenden Dotierungsprofilen. Moden höherer Ordnung können selektiv verstärkt werden, indem die Dotierung in Bereichen der Intensitätsmaxima dieser Moden erhöht wird. Insbesondere gilt dies für  $LP_{l,p}$ -Moden mit einer hohen radialen Ordnung  $p$ . Die Moden niedrigerer radialer Ordnung hingegen besitzen in radialer Richtung größere Bereiche hoher Intensität, welche sich mit mehreren der alternierend dotierten Ringe überschneiden und zu einer Mittelung des Einflusses führen. Die Überlappintegrale der Moden niedriger Ordnung werden folglich durch ein stark alternierendes Dotierungsprofil im Vergleich zu einer konstanten Dotierung des Kernbereichs nur schwach beeinflusst, da sich Bereiche mit erhöhter und abgesenkter Besetzungsdichte gegenseitig aufheben.

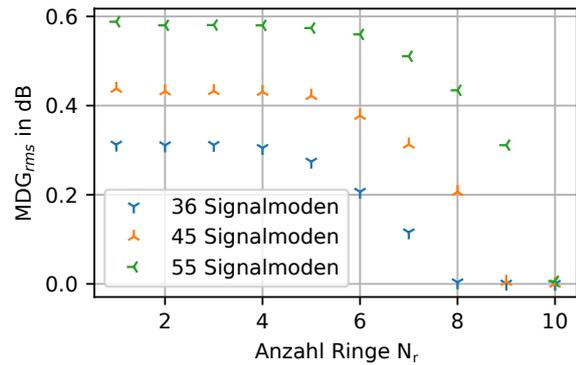
Der Grundmodus besitzt sowohl die größte Überlappung mit dem Kernbereich, als auch die größte Modenfeldfläche aller 55 Signalmoden. Die geringste Modenfeldfläche und ebenfalls die geringste Überlappung mit dem Kernbereich besitzt der  $LP_{1,5}$ -Modus. Um beispielhaft eine selektive Anhebung des Gewinns des  $LP_{1,5}$ -Modus zu erreichen, muss die Erbium-Dotierung folglich Erhöhungen bei den fünf Intensitätsmaxima des  $LP_{1,5}$  in radialer Richtung aufweisen. Gleichzeitig muss aber durch eine Verringerung der Dotierungsdichte in den Intensitätsminima des  $LP_{1,5}$  dafür gesorgt werden, dass sich die mittlere Dotierungsdichte entlang des Radius für die restlichen Moden nicht verändert. Je größer die radiale Ordnung der verwendeten Signalmoden ist, desto schwieriger wird es, ein Dotierungsprofil zu finden, das diese Anforderung für alle Signalmoden erfüllt. Die entstehenden, in radialer Richtung alternierenden Dotierungsprofile deuten sich bereits unter Verwendung eines Dotierungsprofils mit drei ringförmigen Abschnitten an [104]. In [JK 2] wurde außerdem eine EDF mit Stufenbrechzahlprofil, 50  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser und bis zu 105 Signalmoden untersucht. Auch in diesem Fall konnte ein radial alternierendes Erbium-Dotierungsprofil zur erfolgreichen Angleichung der Gewinne aller Signalmoden verwendet werden.

Bei beiden Fasertypen ist in Abbildung 5.4(a) und Abbildung 5.6(a) zu erkennen, dass der  $MDG_{pp}$  für  $N_r = 2$  schlechter ist als bei einer konstanten Dotierung ( $N_r = 1$ ). Da der NNLS-Algorithmus das mittlere Fehlerquadrat minimiert und nicht den  $MDG_{pp}$ , kann es vorkommen, dass das Fehlerquadrat der Überlappungen sinkt, der Spitze-zu-Spitze-Wert der Überlappintegrale jedoch ansteigt. Es empfiehlt sich, zusätzlich den in Abbildung 5.7 dargestellten  $MDG_{rms}$  zu betrachten. Dieser bildet laut Definition das Optimierungskriterium des Gleichungslösers besser ab und weist keine Verschlechterungen mit steigendem  $N_r$  auf. Die anhand des  $MDG_{pp}$  beschriebenen Trends lassen sich auch am  $MDG_{rms}$  erkennen.

Dieser Abschnitt zeigt, dass sich die modenabhängigen Gewinne in der Theorie durch eine Optimierung der Erbium-Dotierung angleichen lassen. Unter der Annahme einer vollständigen Inversion aller Erbium-Ionen können für einen mittleren Gewinn aller Kanäle von 20 dB mit optimierten Dotierungsprofilen sowohl  $MDG_{pp}$  als auch  $MDG_{rms}$  nahe an 0 dB erzielt werden. Für dieses Ergebnis sind allerdings scharf abgegrenzte Bereiche stark unterschiedlicher Dotierung nötig. Während für die Gradientenfaser ein hoch dotierter Ring im äußeren Kernbereich mit einer Breite von etwa 2,78  $\mu\text{m}$  zur Angleichung der modalen Gewinne benötigt wird, sind für Stufenindexfasern stark alternierende und zusätzlich sehr schmale Erbium-dotierte Ringe mit einer Breite von etwa 1,86  $\mu\text{m}$  notwendig. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Angleichung der Gewinne aller Signalmoden in einer EDF mit Gradientenbrechzahlprofil ein weniger kompliziertes Profil ergibt. Dem Autor sind allerdings keine Berichte von einer Optimierung des Dotierungsprofils einer EDF mit Gradientenbrechzahlprofil bekannt. Es ist folglich noch zu klären, ob sich zukünftig



(a) Gradientenbrechzahlprofil



(b) Stufenbrechzahlprofil

Abbildung 5.7.: Resultierender  $MDG_{rms}$  mit einem optimierten Erbium-Dotierungsprofil über der Anzahl der verwendeten Erbium-dotierten Ringe im Faserkern unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils (a) und eines Stufenbrechzahlprofils (b).

Faser mit einer erhöhten Dotierungsdichte von Erbiumionen im äußeren Kernbereich herstellen lassen, ohne das Brechzahlprofil zu stark zu beeinflussen. Prinzipiell ist allerdings für beide Brechzahlprofile eine Angleichung der Gewinne aller Signalmoden auch für große Anzahlen an Signalmoden ( $>50$ ) erreichbar.



## 6. Optimierung der Pumpleistungsverteilung bei 1480 nm

Zur Minimierung des MDG eines MDM-EDFA kann neben der Anpassung der Erbium-Dotierung, welche im vorherigen Kapitel behandelt wurde, auch die Leistungsdichteverteilung der Pumpstrahlung optimiert werden. Im Falle nicht vollständiger Inversion der Erbium-Dotierung im Kernbereich der EDF hängt die Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus entlang der Faser und in transversaler Richtung von der Pumpleistungsdichteverteilung am Eingang der Faser ab. Hierzu werden die Eingangsleistungen der einzelnen Pumpmoden in die Faser so eingestellt, dass das resultierende Überlappintegral der einzelnen Signalmoden mit der invertierten Erbiumregion entlang der Faser möglichst für alle Signalmoden angeglichen wird. Hierbei ist zu beachten, dass die transversale Pumpleistungsdichteverteilung sich entlang der Faser, sowohl durch eine Dämpfung als auch durch potenziell modenabhängiges Sättigungsverhalten, unterscheidet. In der Literatur wurden ähnliche Verfahren zur Optimierung der Pumpstrahlung für Fasern mit bis zu 6 Moden untersucht und auch experimentell belegt [34, 91]. Simulatorisch wurde eine Anpassung der Pumpleistungen für bis zu 10 Moden ebenfalls untersucht [37, 93]. Durch die Verwendung eines SLM zur Anpassung der räumlichen Leistungsdichte der Pumpstrahlung am Eingang der Faser, wie in [82, 92], wird nicht für jeden Pumpmodus ein einzelner Laser benötigt.

In diesem Kapitel wird ein Verfahren vorgestellt, mit dessen Hilfe die Pumpleistung einzelner Pumpmoden bei 1480 nm iterativ optimiert wird, um die Gewinne aller Signalmoden anzugleichen. Ein Teil der Ergebnisse in diesem Kapitel wurde bereits in [JK 3] in ähnlicher Form veröffentlicht. Zusätzlich zu den bereits veröffentlichten Ergebnissen werden in dieser Arbeit Stufenbrechzahlprofile und ein zweistufiger MDM-EDFA mit bis zu 120 Signalmoden untersucht.

### 6.1. Signal-Pump Überlappintegrale

Im Folgenden sollen die Überlappintegrale zwischen den Pumpmoden und Signalmoden verschiedener Brechzahlprofile und Pumpwellenlängen betrachtet werden. Die Überlappintegrale dienen der Zuordnung von Pumpmoden zu demjenigen Signalmodus, welcher durch den betrachteten Pumpmodus möglichst selektiv verstärkt werden kann. Ziel ist es, zu jedem Signalmodus einen Pumpmodus zu finden, welcher den Gewinn des betrachteten Signalmodus stärker beeinflusst als den Gewinn aller anderen Signalmoden.

Durch die Verwendung eines bestimmten Pumpmodus steigt die Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus an den Orten der Faser an, an denen der Pumpmodus eine hohe Leistungsdichte besitzt. Ein Signalmodus wird hingegen verstärkt, wenn die Leistungsdichteverteilung des Signalmodus einen hohen örtlichen Überlapp mit Erbium-Ionen hat, welche sich im oberen Laserniveau befinden. Für einen hohen Wert des Überlappintegrals zwischen Pump- und Signalmoden kann also bei einer konstanten Erbium-Dotierung von einer höheren Verstärkung

## 6. Optimierung der Pumpleistungsverteilung bei 1480 nm

ausgegangen werden als bei geringem Überlapp. Je geringer das Überlappintegral, desto weniger effizient kann der jeweilige Pumpmodus zur Verstärkung des jeweiligen Signalmodus verwendet werden. Die Berechnung der Überlappintegrale  $\Omega_{ij}$  erfolgt mit:

$$\Omega_{ij} = \frac{(\iint |\mathbf{E}_i| |\mathbf{E}_j| dA)^2}{\iint |\mathbf{E}_i|^2 dA \iint |\mathbf{E}_j|^2 dA}. \quad (6.1)$$

Hierbei sind  $\mathbf{E}_i$  und  $\mathbf{E}_j$  die transversalen elektrischen Feldverteilungen zweier Moden, deren Überlappung berechnet werden soll.

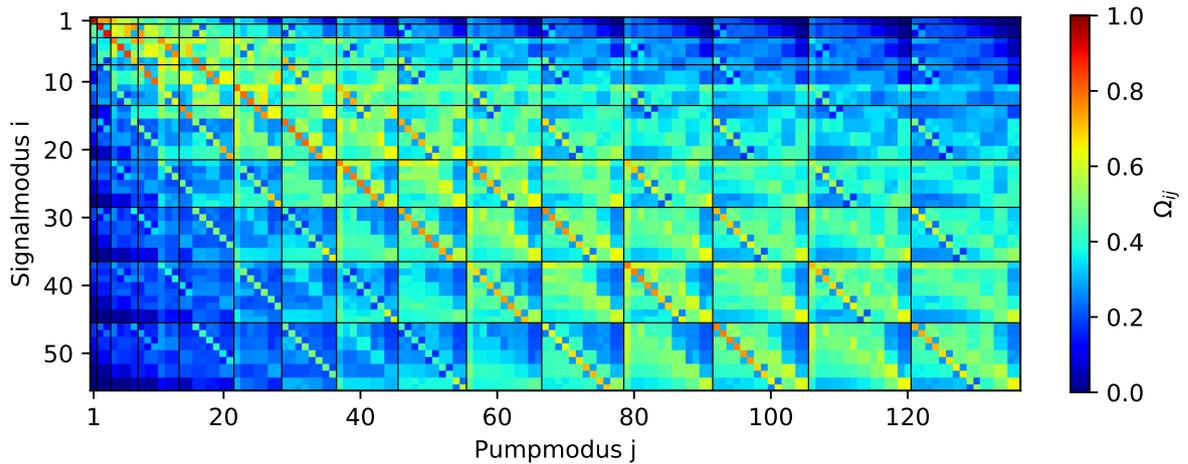


Abbildung 6.1.: Überlappung  $\Omega_{ij}$  der Signalmoden bei 1550 nm mit den Pumpmoden bei 980 nm einer Gradientenfaser mit 50  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser. Die Modengruppen sind jeweils durch dünne schwarze Linien voneinander abgegrenzt.

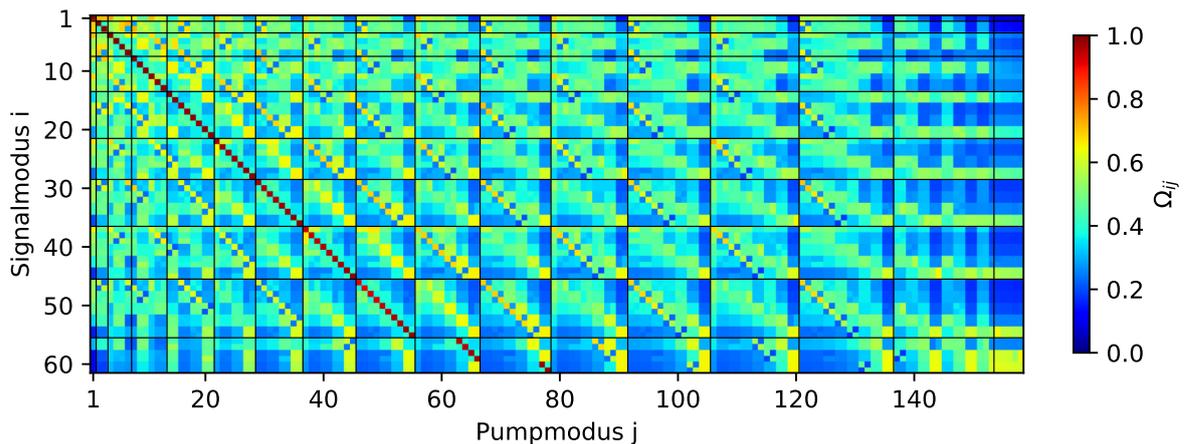


Abbildung 6.2.: Überlappung  $\Omega_{ij}$  der 61 Moden bei 1550 nm mit den Pumpmoden bei 980 nm einer Stufenfaser mit 37,12  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser. Die Modengruppen einer korrespondierenden Übertragungsfaser mit Gradientenbrechzahlprofil sind jeweils abgegrenzt.

Für eine Gradientenfaser mit einem Kerndurchmesser von  $50\ \mu\text{m}$  ist die Matrix der Überlappintegrale aller 55 Signalmoden mit allen 136 Pumpmoden bei einer Pumpwellenlänge von  $980\ \text{nm}$  in Abbildung 6.1 dargestellt. Das Brechzahlprofil der verwendeten Faser ist identisch zu denen in den vorherigen Kapiteln und in Abbildung 3.1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Signalmoden niedriger Ordnung einen hohen Überlapp mit Pumpmoden niedriger Ordnung aufweisen und geringere Überlapp mit den Moden höherer Ordnung. Signalmoden höherer Ordnung haben einen hohen Überlapp mit den Pumpmoden höherer Ordnung. Außerdem ist zu erkennen, dass, abgesehen von den ersten Modengruppen, die Überlappungen auf der Linie mit  $i = j$  gering ausfallen. Die Maxima und Minima der Signal- und Pumpleistungsdichten der Moden gleicher Ordnung befinden sich somit transversal an verschiedenen Orten. Beispielsweise wird der  $\text{LP}_{2,3a/b}$ -Modus bei  $980\ \text{nm}$  deutlich besser geführt als bei  $1550\ \text{nm}$  und befindet sich aufgrund des Gradientenbrechzahlprofils weiter im Inneren des Faserkerns. Der Überlapp des  $\text{LP}_{2,3a/b}$ -Modus bei  $980\ \text{nm}$  mit dem  $\text{LP}_{2,3a/b}$ -Modus bei  $1550\ \text{nm}$  ist somit gering. In Abbildung 6.1 sind die entarteten Versionen des  $\text{LP}_{2,3a/b}$ -Modus mit  $i = j = 23$  und  $i = j = 24$  dargestellt. Durch die bessere Führung der Moden bei  $980\ \text{nm}$  steigt die effektive Brechzahl des Modus im Vergleich zu  $1550\ \text{nm}$ . Durch das Gradientenbrechzahlprofil sinkt, bei steigender effektiver Brechzahl durch die bessere Führung des Modenfeldes im Kern, die effektive Modenfeldfläche. Für Signalmoden höchster Ordnung gibt es teilweise keine Pumpmoden mit einer Überlappung nahe 1, durch die eine selektive Verstärkung möglich wäre.

In Abbildung 6.2 ist die Überlappungsmatrix für eine Stufenfaser mit  $37,12\ \mu\text{m}$  Kerndurchmesser dargestellt. Die Faser besitzt, wie in den vorherigen Kapiteln, einen Graben im Brechzahlprofil. Das Brechzahlprofil dieser Faser ist identisch zu denen der vorherigen Kapitel und in Abbildung 3.6 dargestellt. Im Gegensatz zum Gradientenbrechzahlprofil ist eine Diagonallinie für  $i = j$  mit Überlappungen nahe 1 für die verwendeten 55 Signalmoden erkennbar. Pump- und Signalmoden gleicher Ordnung haben somit einen hohen Überlapp. Außerdem sind signifikante Überlappungen  $>0,5$  für  $i \ll j$  und  $i \ll j$  erkennbar. Auch ein Pumpmodus niedriger Ordnung besitzt folglich einen hohen Überlapp mit Signalmoden hoher Ordnung und umgekehrt. Eine Veränderung der Leistung eines Pumpmodus niedriger Ordnung würde somit auch die Signalgewinne der Moden höherer Ordnung beeinflussen. Dieses Verhalten lässt sich anschaulich auch durch die effektiven Modenfeldflächen der Moden in einer Faser mit Gradienten-, bzw. Stufenbrechzahlprofil aus Abbildung 2.12 erklären. Mit zunehmender Modenordnung steigt die effektive Modenfeldfläche in einer Gradientenfaser an. Bei einer Stufenfaser ist kein solcher Anstieg erkennbar. Außerdem hängen die effektiven Modenfeldflächen für ein Stufenbrechzahlprofil nicht sehr stark von der Wellenlänge ab, so dass beispielsweise der  $\text{LP}_{2,3a/b}$  bei  $1550\ \text{nm}$  eine Überlappung nahe 1 mit dem  $\text{LP}_{2,3a/b}$  bei  $980\ \text{nm}$  aufweist. Durch die weniger scharfe räumliche Trennung der Moden in der Stufenfaser besitzt jeder Signalmodus einen signifikanten Überlapp mit vielen verschiedenen Pumpmoden.

Die zusätzlichen 6  $\text{LP}_{k,ja/b}$  Signalmoden, welche in der Stufenfaser ausbreitungsfähig sind, besitzen hohe Überlappintegrale mit den  $\text{LP}_{k,ja/b}$  Pumpmoden bei  $980\ \text{nm}$ . Die Felder mit einer hohen Überlappung liegen nicht auf der Geraden  $i = j$ , da die Moden, wie in Kapitel 2.3 definiert, nicht nach den effektiven Brechungsindizes sortiert werden, sondern nach den Modengruppen der angenommenen Übertragungsfaser mit Gradientenbrechzahlprofil.

In Abbildung 6.3 sind die Überlappmatrizen zwischen den Signalmoden und den Pumpmoden bei  $1480\ \text{nm}$  für beide verwendeten Brechzahlprofile dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die größten Überlappintegrale für die 55 verwendeten Signalmoden jeweils für  $i = j$  auftreten.

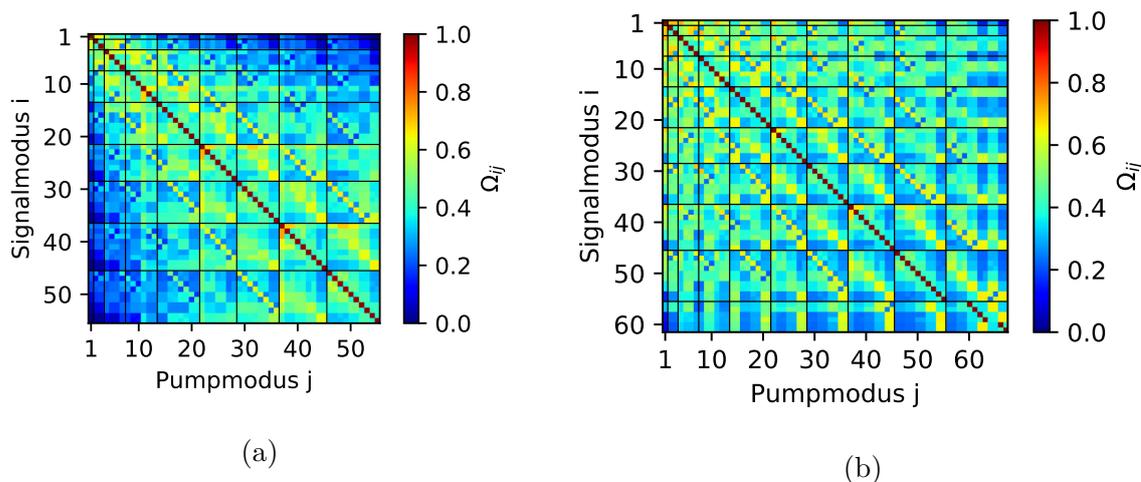


Abbildung 6.3.: Überlappung  $\Omega_{ij}$  der Moden bei 1550 nm mit den Pumpmoden bei 1480 nm unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils (a) sowie eines Stufenbrechzahlprofils (b). Die Modengruppen nach Formel 2.22 sind für die ersten 55 Moden jeweils durch schwarze Linien voneinander getrennt.

Durch die geringere Differenz zwischen Pump- und Signalwellenlänge weist in diesem Fall auch das Gradientenbrechzahlprofil Überlappungen zwischen Pump- und Signalmoden von  $\approx 1$  auf. Für Modenordnungen  $> 55$  liegen die größten Überlappintegrale aufgrund der Konvention zur Sortierung der Moden aus Kapitel 2.3 nicht auf der Linie  $i = j$ . Im Gegensatz zum Gradientenbrechzahlprofil weisen alle Pumpmoden der EDF mit Stufenbrechzahlprofil hohe Überlappintegrale mit Signalmoden niedriger sowie hoher Ordnung auf. Es sind vergleichsweise hohe Überlappungen  $> 0.5$  für  $i \ll j$  und  $i \gg j$  erkennbar. Unter Verwendung des Gradientenbrechzahlprofils weisen die Signalmoden eine hohen Überlapp mit Moden ähnlicher Ordnung  $i \approx j$  auf. Für  $i \ll j$  und  $i \gg j$  nehmen die Überlappintegrale jedoch ab. Es wird folglich erwartet, dass eine selektive Veränderung der Gewinne einzelner Signalmoden bei einer Pumpwellenlänge von 1480 nm, unter Verwendung eines Stufenbrechzahlprofils, schwieriger zu realisieren sein wird als unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils.

## 6.2. Iterative Optimierung der Pumpleistungsverteilung

Eine Möglichkeit, die Gewinne der einzelnen Signalmoden anzugleichen, kann sein, jedem Signalmodus einen Pumpmodus zuzuordnen der einen höheren Überlapp mit dem betrachteten Signalmodus besitzt als mit allen anderen Signalmoden [37]. Eine Veränderung der Pumpleistung dieses Modus führt dann beim korrespondierenden Signalmodus zu einer selektiven Veränderung des Gewinns. Durch einen iterativen Ansatz kann auf diese Weise der MDG minimiert werden, indem die Pumpleistungen der zu Signalmoden mit geringem Gewinn korrespondierenden Pumpmoden erhöht werden und die Pumpleistungen der zu Signalmoden mit hohem Gewinn korrespondierenden Pumpmoden verringert werden. Hierzu werden die Pumpmoden bei 1480 nm untersucht, da diese sowohl für ein Gradientenbrechzahlprofil als auch für ein Stufenbrechzahlprofil einen hohen Überlapp zwischen Pump- und Signalmoden gleicher Ordnung ( $i = j$ )

aufweisen.

Das Vorgehen, welches zur Optimierung der Pumpleistungen verwendet wird, ist in Abbildung 6.4 schematisch dargestellt. Hierbei werden genausoviele Pumpmoden bei 1480 nm verwendet, wie Signalmoden verstärkt werden sollen. Somit steht für jeden Signalmodus ein Pumpmodus zur Verfügung, der einen hohen Überlapp mit dem jeweiligen Signalmodus aufweist. Die Leistung jedes Signalmodus kann über die Leistung des korrespondierenden Pumpmodus angepasst werden. Nach einem Simulationsdurchlauf des EDFA wird die Pumpleistung im Modus mit dem geringsten Gewinn erhöht und im Modus mit dem höchsten Gewinn verringert. Die Schrittweite zur Anpassung der einzelnen Pumpleistungen ist hierbei  $\Delta P_1 = 5\%$ . Außerdem wird zum Erreichen eines gewünschten mittleren Gewinns aller Signalmoden von 25 dB die gesamte Pumpleistung um  $\Delta P_2 = 1\%$  verändert.

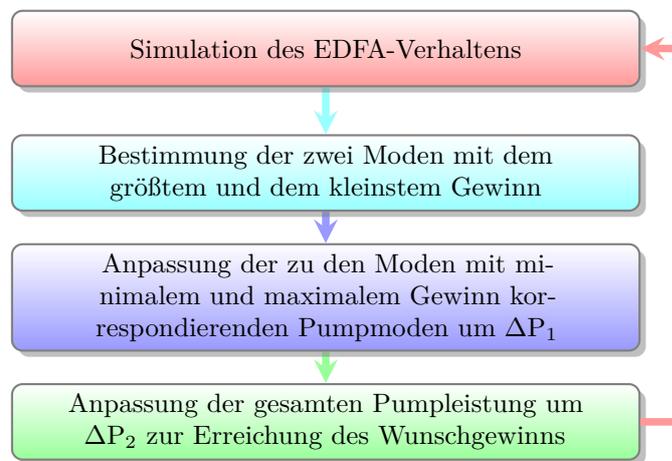


Abbildung 6.4.: Schematische Darstellung der iterativen Optimierung der räumlichen Pumpleistungsverteilung zur Minimierung des MDG.

Um die zur Simulation des Verstärkerverhaltens benötigte Rechenzeit zu minimieren, werden die folgenden Simulationen mit nur einem Wellenlängenkanal durchgeführt. Als Signalwellenlänge wird 1530 nm verwendet, da aufgrund des höchsten Gewinns bei dieser Wellenlänge auch der höchste MDG in einem einstufigen Verstärker ohne Anpassung der Pumpleistung erwartet wird. Da ebenfalls nur ein Wellenlängenkanal für die Berechnung der ASE verwendet wird, ist in diesen Simulationen eine Sättigung des Verstärkers durch die rückwärtslaufende ASE nicht berücksichtigt. Durch die relativ kurze Faserlänge von 10 m und die hohen Signaleingangsleistungen von  $-5$  dBm pro Modus, ist kein großer Einfluss aufgrund der Sättigung durch ASE auf den MDG zu erwarten. In Kapitel 6.3 wird außerdem das hier vorgestellte Verfahren in einem zweistufigen Aufbau unter Berücksichtigung der Sättigung durch ASE angewandt.

Es wird sowohl eine Faser mit Gradientenbrechzahlprofil und Kerndurchmesser  $50\ \mu\text{m}$ , als auch eine Faser mit Stufenbrechzahlprofil und Kerndurchmesser  $37,12\ \mu\text{m}$  betrachtet. Die Brechzahlprofile dieser beiden Fasertypen entsprechen denen der vorherigen Kapitel und sind in Abbildung 3.1 und Abbildung 3.6 dargestellt. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu [JK 3] zu erreichen, werden die Emissions- und Absorptionsspektren des Typs 3 verwendet [76, Kap. 4]. Die Eingangsleistung pro Modus beträgt  $-5$  dBm. Dies entspricht ungefähr der Summeneingangsleistung eines WDM-Signalkamms mit 100 Wellenlängenkanälen und wird verwendet, um den

EDFA in einem Arbeitspunkt, ähnlich zum WDM-Betrieb, zu betreiben. In diesem Abschnitt wird allerdings nur ein Wellenlängenkanal verwendet. Der gewünschte mittlere Gewinn aller Signalmoden des Verstärkers ist 25 dB.

Um die Skalierbarkeit des Ansatzes zu zeigen, werden verschiedene Anzahlen an Signalmoden verwendet. Die Anzahl der Signalmoden wird schrittweise um eine Modengruppe inkrementiert. Die Anzahl der Pumpmoden wird jeweils gleich der Anzahl der Signalmoden gewählt, um weiterhin einen Pumpmodus zur selektiven Beeinflussung jedes Signalmodus verwenden zu können. Unter der Annahme, dass der untersuchte MDM-EDFA in Kombination mit einer Gradientenfaser mit 50  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser als Übertragungsfaser verwendet wird, entspricht die Erhöhung der Modenzahl um jeweils eine Modengruppe einem realistischen Aufrüstszenario für die Übertragungskapazität in einem solchen System. Als Startwerte für die Pumpleistungen wird eine identische Pumpleistung in allen verwendeten Pumpmoden angenommen. Die Simulationsparameter sind in Tabelle 6.1 aufgelistet.

Tabelle 6.1.: Simulationsparameter zur iterativen Optimierung der Pumpstrahlung bei 1480 nm für verschiedene Brechzahlprofile.

	<b>Gradientenfaser</b>	<b>Stufenfaser</b>
Kerndurchmesser	50 $\mu\text{m}$	37,12 $\mu\text{m}$
Numerische Apertur	0.21	0.21
Faserlänge	10 m	10 m
Anzahl Signalmoden	3,6,...45,55	3,6,...45,55
Anzahl Signalwellenlängen	1	1
Signalwellenlänge	1530 nm	1530 nm
Eingangsleistung pro räumlichem Kanal	-5 dBm	-5 dBm
Mittlerer Gewinn aller Kanäle	25 dB	25 dB
Erbium-Dotierung im Kern	$1 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$	$1 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$
Anzahl Diskretisierungspunkte in $z$ -Richtung	350	350
Anzahl Diskretisierungspunkte in $r$ -Richtung	300	300

Die resultierenden  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ -Werte der Simulation über der Anzahl an Iterationen mit dem vorgestellten Algorithmus sind in Abbildung 6.5 dargestellt. Zunächst sollen die Ergebnisse unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils in Abbildung 6.5(a) diskutiert werden.

Es ist zu erkennen, dass unter Verwendung des Gradientenbrechzahlprofils der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  für alle Anzahlen an Signalmoden unter 0,15 dB gesenkt werden kann. Die  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ -Werte vor der Optimierung liegen jeweils im Bereich um  $\approx 3,5$  dB. Da jeweils nur zwei Pumpmoden pro Iteration in ihrer Leistung angepasst werden, konvergiert der Algorithmus langsamer, wenn mehr Signalmoden und somit mehr Pumpmoden verwendet werden. Nichtsdestotrotz lassen sich die Gewinne in allen betrachteten Fällen weitgehend angleichen. Im Vergleich zu [JK 3] werden weniger Schritte benötigt, um die vorgegebene  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ -Schwelle zu erreichen, da im hier verwendeten Simulationsmodell mit radialer Auflösung der Modenfelder die entarteten  $\text{LP}_{l,pa}$ - und  $\text{LP}_{l,pb}$ -Moden zusammengefasst betrachtet werden. Die entarteten Moden können zusammengefasst betrachtet werden, da sie in diesem Modell jeweils gleiche Leistungen besitzen. Im radial und azimuthal auflösenden Modell aus [JK 3] sind beispielsweise für eine Anpassung der Pumpleistungen beider  $\text{LP}_{1,1}$ -Moden zwei Iterationen notwendig, während im ausschließlich radial aufgelösten Modell nur eine Iteration benötigt wird.

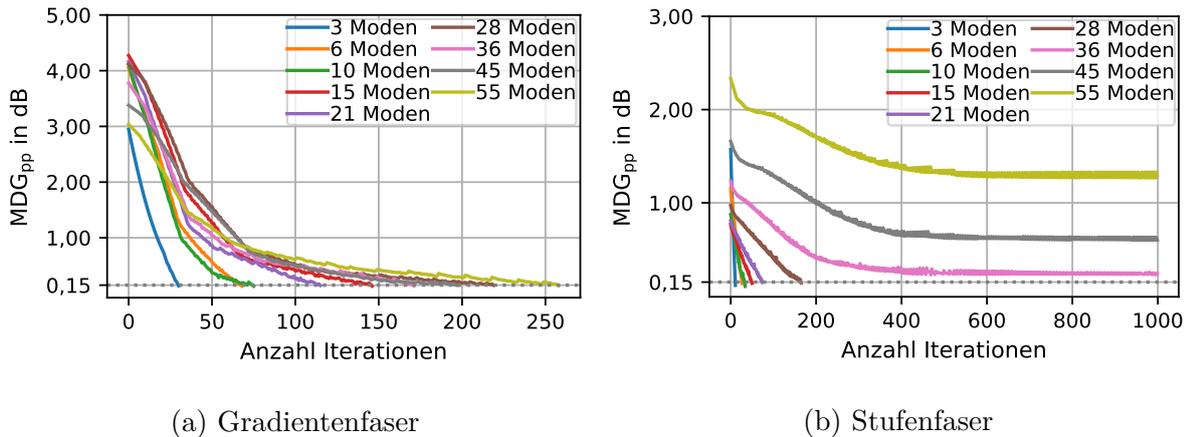


Abbildung 6.5.: MDG<sub>pp</sub> für verschiedene Anzahlen an Signalmoden über der Anzahl an Iterationen des vorgestellten Algorithmus. Die Ergebnisse sind dargestellt für ein Gradientenbrechzahlprofil (a) und ein Stufenbrechzahlprofil (b).

Unter Verwendung des Stufenbrechzahlprofils lässt sich der MDG<sub>pp</sub> ebenfalls für alle betrachteten Fälle verringern. Wie in Abbildung 6.5(b) dargestellt, kann der MDG<sub>pp</sub> für bis zu 28 Signalmoden unter das Abbruchkriterium bei 0,15 dB minimiert werden. Für 36, 45 und 55 Signalmoden ist dies allerdings nicht möglich. Der MDG<sub>pp</sub> konvergiert in diesem Fall gegen höhere Werte. Für 36 Moden können etwa 0,24 dB, für 45 Moden 0,60 dB und für 55 Moden lediglich 1,29 dB MDG<sub>pp</sub> erreicht werden. Bei Verwendung des Stufenbrechzahlprofils ist es folglich mit diesem Ansatz nicht möglich, die Moden höherer Ordnung selektiv zu verstärken. Dieses Verhalten kann mithilfe der Überlappintegrale aus Kapitel 6.1 erklärt werden. Jeder Pumpmodus weist einen signifikanten Überlapp sowohl mit Signalmoden niedriger Ordnung als auch Signalmoden hoher Ordnung auf. Die Verwendung eines einzelnen Pumpmodus zur selektiven Beeinflussung eines gewünschten Signalmodus scheint nicht möglich zu sein. Trotzdem kann es möglich sein, Kombinationen von Pumpmoden zu finden, welche für eine Angleichung der Gewinne sorgen. Mit dem in diesem Abschnitt vorgestellten, einfachen Vorgehen ist dies jedoch nicht möglich. In Kapitel 7 wird ein erweitertes Verfahren vorgestellt.

Die Verteilung der Pumpleistung auf die einzelnen Pumpmoden nach der Optimierung ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Die grau gestrichelten vertikalen Linien kennzeichnen die Modengruppen der Gradientenfaser nach Formel 2.22. Die entarteten  $LP_{l,pa/b}$ -Moden werden aufgrund der angenommenen radialen Symmetrie mit gleicher Leistung gepumpt. Für diese Moden ist daher jeweils die Summe der Pumpleistungen beider entarteter Moden dargestellt. Für beide verwendeten Brechzahlprofile werden bei der Angleichung der Signalgewinne Pumpleistungsdichteverteilungen errechnet, die zum Großteil aus den Pumpmoden höherer Ordnung bestehen. Für beide Brechzahlprofile wird somit deutlich, dass vor allem für die Signalmoden höchster Ordnung eine selektive Erhöhung des Gewinns erreicht werden muss. Hierzu werden vom Algorithmus die Leistungen der korrespondierenden Pumpmoden höchster Ordnung erhöht.

Im Fall der Gradientenfaser werden nahezu alle verfügbaren Pumpmoden in allen Ausbaustufen verwendet. Einige Pumpmoden der jeweils höchsten Modengruppe werden vom Algorithmus besonders stark verwendet. Andere Pumpmoden hingegen werden nur mit sehr geringen Leistungen verwendet. Unter Verwendung von 55 Signalmoden ist der  $LP_{1,5}$ -Modus der Modus mit der

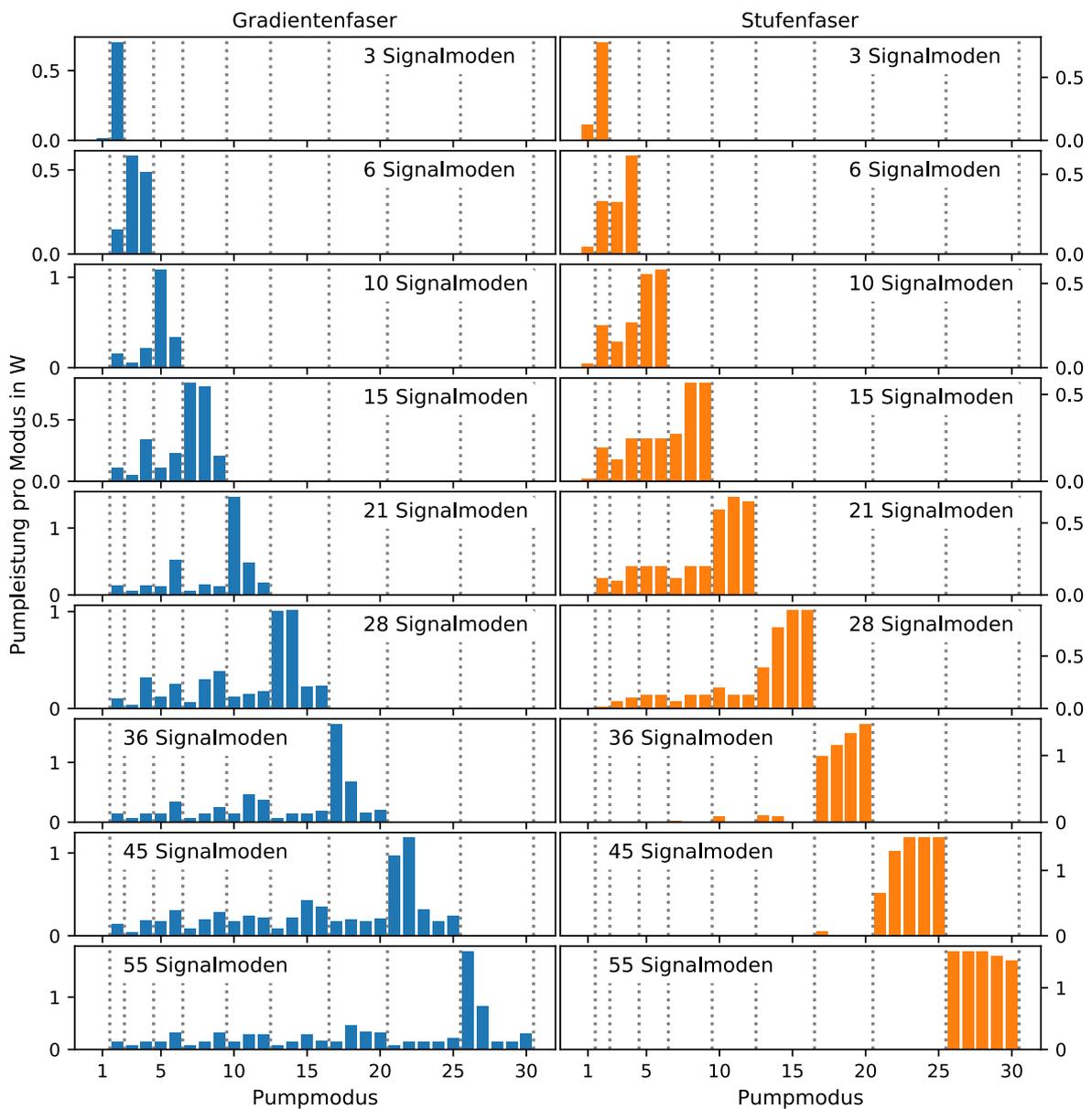


Abbildung 6.6.: Verteilung der Pumpleistung auf die einzelnen Pumpmoden bei 1480 nm für verschiedene Anzahlen an Signal- und Pumpmoden. Die Ergebnisse sind für eine EDF mit Stufenbrechzahlprofil (rechts) sowie für eine EDF mit Gradientenbrechzahlprofil (links) dargestellt. Durch die gestrichelten vertikalen Linien sind die Modengruppen der Gradientenfaser voneinander abgegrenzt.

größten Pumpleistung. Unter Verwendung von 36 Signalmoden wird wiederum der  $LP_{1,4}$ -Modus am stärksten gepumpt. Dies sind jeweils genau die Moden, welche unter den verwendeten Moden jeweils den geringsten Überlapp mit dem Kernbereich aufweisen (vgl. Abbildung 5.4(b)).

Im Fall des Stufenbrechzahlprofils werden die Pumpmoden der jeweils höchsten Modengruppen zur Angleichung der Gewinne benötigt. Unter Verwendung von 36, 45 und 55 Signalmoden

werden sogar nahezu ausschließlich die Pumpmoden der höchsten Modengruppe verwendet. In diesen Fällen ist der Algorithmus allerdings auch nicht in der Lage, den  $MDG_{pp}$  unter die vorgegebene Schwelle von 0,15 dB zu senken.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse die grundsätzliche Eignung des vorgestellten Algorithmus zeigen. Die modalen Gewinne eines MDM-EDFA für eine skalierbare Anzahl an Signalmoden können mithilfe einer Optimierung der Pumpleistungen einzelner Pumpmoden bei 1480 nm angeglichen werden. Insgesamt zeigt sich, dass eine EDF mit Gradientenbrechzahlprofil besser zur Angleichung der Gewinne mit dem vorgestellten Vorgehen geeignet ist, als eine EDF mit Stufenbrechzahlprofil.

### 6.3. Zweistufiger Aufbau

Ein EDFA, welcher bei 1480 nm gepumpt wird, besitzt zwar für hohe Ausgangsleistungen eine bessere Pumpeffizienz als ein bei 980 nm gepumpter EDFA, weist aber gleichzeitig durch die geringere mittlere Inversion der Erbium-Ionen entlang der Faser ein schlechteres Rauschverhalten auf.

Es bietet sich also an, einen zweistufigen Aufbau zu wählen, bei dem die Rauschzahl durch die erste Stufe mit 980 nm Pumpstrahlung bestimmt wird und die Pumpeffizienz sowie der MDG durch eine zweite Stufe mit 1480 nm Pumpstrahlung. Ein solcher Aufbau ist schematisch in Abbildung 6.7 dargestellt. Die erste Stufe wird hierbei mit vielmodiger Pumpleistung bei 980 nm gepumpt, welche alle von der Faser geführten Pumpmoden im Faserkern gleichermaßen anregt. Bei einem ausreichend hohen Gewinn in der ersten Stufe hängt die Rauschzahl der Verstärkerkaskade mit Formel 2.53 größtenteils von der Rauschzahl der ersten Stufe ab und die Rauschzahl der zweiten Stufe hat nur einen geringen Einfluss. Die zweite Stufe des Verstärkers kann dazu verwendet werden, eine hohe Ausgangsleistung zu erzielen und gleichzeitig mit dem im vorherigen Abschnitt vorgestellten Algorithmus die Modenabhängigkeit des Gewinns zu minimieren.

In [JK 3] wurden Ergebnisse zu einem solchen zweistufigen Verstärker für 36 Signalmoden mit jeweils 100 WDM-Kanälen vorgestellt. In diesem Abschnitt soll ein zweistufiger Verstärkeraufbau mit bis zu 120 Signalmoden untersucht werden. Außerdem werden verschiedene Aufrüstschrte des Systems mit unterschiedlichen Anzahlen an Signalmoden untersucht. Ein aufrüstbares Übertragungssystem bietet den Vorteil, dass zunächst eine Faserart verlegt werden kann und die Anzahl der zur Signalübertragung nutzbaren Signalmoden zur Laufzeit des Systems ausgebaut werden kann, um die Übertragungskapazität des Systems zu steigern. Für die verwendeten MDM-EDFA bedeutet dies, dass nicht nur der voll ausgebaute Zustand in der Verstärkerauslegung berücksichtigt werden darf, sondern auch die einzelnen Aufrüstschrte.

Im Folgenden soll das im vorherigen Abschnitt vorgestellte Verfahren zur Angleichung der Gewinne der Signalmoden eines EDFA benutzt werden, um alle 120 verwendbaren Moden einer Gradientenfaser mit 62,5  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser zu verstärken. Das verwendete Brechzahlprofil ist angelehnt an [19]. Das relative Brechzahlprofil und die relativen effektiven Brechzahlen der Signalmoden der verwendeten Faser sind in Abbildung 6.8 dargestellt. Die Faser besitzt einen Proflexponenten von 1.94 und eine numerische Apertur von 0.27. Im Abstand von 1  $\mu\text{m}$  zum Faserkern befindet sich ein Graben mit einer Breite von 5,5  $\mu\text{m}$  und einer Tiefe von  $8.62 \cdot 10^{-3}$  im

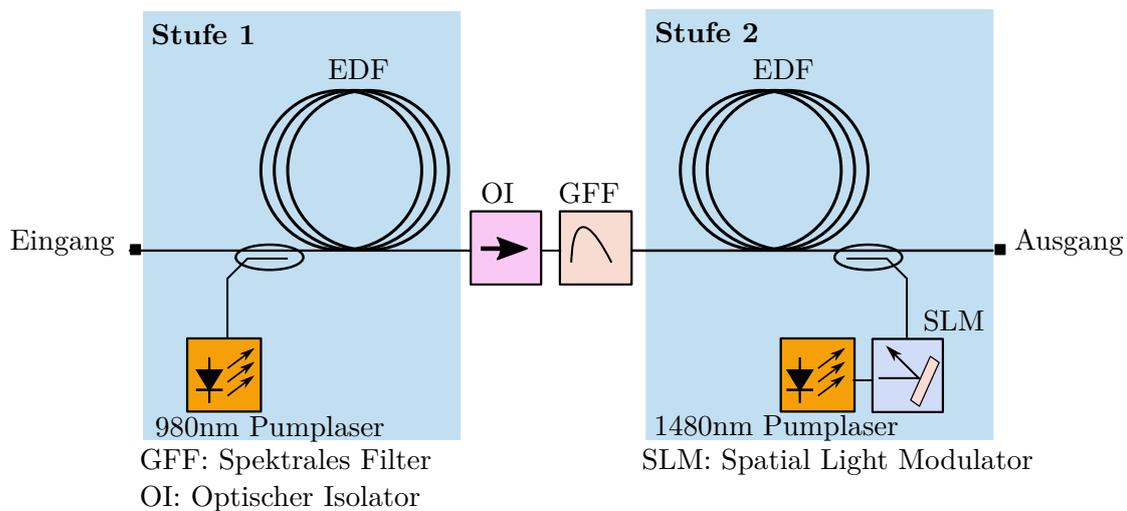


Abbildung 6.7.: Vereinfachte Darstellung eines zweistufigen Verstärkerbaus, bestehend aus einer rauscharmen ersten Stufe, welche bei 980 nm gepumpt wird und einer zweiten Stufe, welche bei 1480 nm gepumpt wird. Die Pumpleistungsdichteverteilung der zweiten Stufe kann durch einen SLM angepasst werden und zur Angleichung der Gewinne der Signalmoden verwendet werden. Zwischen beiden Stufen wird zur spektralen Einebnung der Gewinne ein spektrales Filter verwendet.

Brechzahlprofil. Insgesamt sind bei einer Wellenlänge von 1550 nm 153 Moden ausbreitungsfähig. Diese teilen sich in 17 Modengruppen ein, wobei die  $LP_{1,p}$ -Moden einer Modengruppe nahezu identische Ausbreitungskonstanten besitzen. In einer solchen Faser können jedoch nach [19] die beiden Modengruppen höchster Ordnung nicht zur Signalübertragung über weite Distanzen verwendet werden, da diese zu große Kopplungs- und Biegeverluste aufweisen. Es bleiben somit 120 Moden, welche zur Signalübertragung genutzt werden können. Allgemein wird angenommen, dass die Moden innerhalb einer Modengruppe entlang der Übertragungsstrecke stark miteinander koppeln, während zwischen den Modengruppen schwache Kopplung angenommen wird. Experimentell wurde in Fasern mit ähnlichen effektiven Brechzahldifferenzen ( $> 1,4 \cdot 10^{-3}$ ) zwischen den Modengruppen bereits gezeigt, dass eine MDM-Signalübertragung in den Signalmoden einer einzelnen Modengruppe möglich ist [54, 106].

Im Folgenden wird angenommen, dass aufgrund der schwachen Kopplung zwischen den Modengruppen, eine Erhöhung der Übertragungskapazität zur Laufzeit des Systems durch eine inkrementelle Erhöhung der Anzahl verwendeter Modengruppen durchgeführt werden kann. Im Empfänger müssten folglich alle verwendeten Signalmoden empfangen werden. Eine MIMO-Entzerrung kann je nach Modenkopplung entweder für alle verwendeten Signalmoden gleichzeitig stattfinden oder in jeder Modengruppe einzeln durchgeführt werden. Die Kapazität des Gesamtsystems ließe sich auf diese Weise in 15 Schritten auf die maximale Anzahl an räumlichen Kanälen ausbauen.

Um Modenkopplung am Übergang zwischen der Übertragungsfaser und der Verstärkerfaser zu vermeiden, wird das Brechzahlprofil der Verstärkerfaser identisch zu dem der Übertragungsfaser aus Abbildung 6.8 gewählt. Auf diese Weise kann eine Überkopplung von Signalleistung in nicht genutzte Modengruppen durch Stoßkopplung am Übergang der beiden Fasern minimiert werden.

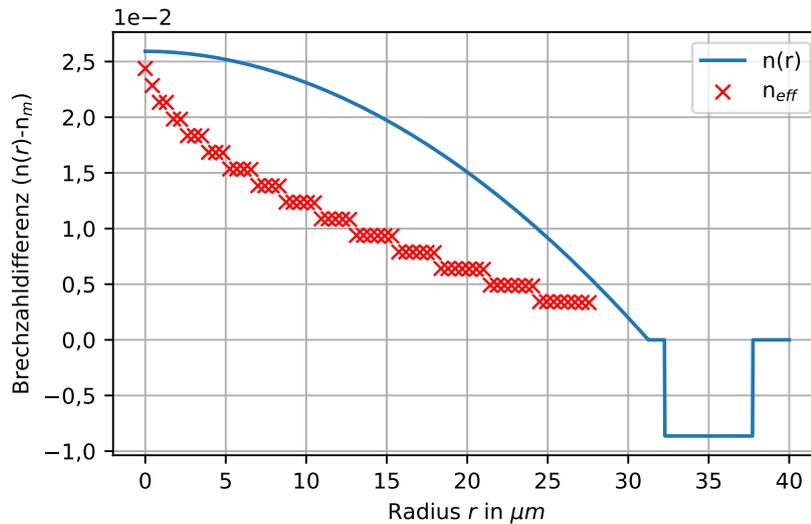


Abbildung 6.8.: Relatives Brechzahlprofil und relative effektive Brechzahlen aller ausbreitungsfähigen LP-Moden bei 1550 nm. Zur besseren Unterscheidbarkeit steigt die Modenordnung in Richtung der Abszisse an.

Im gesamten Kernbereich wird eine konstante Dotierung mit Erbium-Ionen angenommen. Die Dotierungsdichte beträgt  $\rho = 5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$ . Der Graben im Brechzahlprofil minimiert in der Verstärkerfaser den resultierenden MDG, da die Modenfelder stärker im Kern konzentriert werden [95, 105]. Es werden 100 WDM-Kanäle pro räumlichem Modus simuliert, welche äquidistant zwischen 1530 nm und 1560 nm verteilt sind. Pro räumlichem und spektralem Kanal wird eine Eingangsleistung von  $-25 \text{ dBm}$  verwendet. Die Simulationsparameter sind in Tabelle 6.2 aufgelistet.

Tabelle 6.2.: Simulationsparameter eines zweistufigen MDM-EDFA mit bis zu 120 Signalmoden und einer iterativen Optimierung der Pumpstrahlung bei 1480 nm in der zweiten Stufe.

	<b>Erste Stufe</b>	<b>Zweite Stufe</b>
Kerndurchmesser	62,5 $\mu\text{m}$	62,5 $\mu\text{m}$
Numerische Apertur	0.27	0.27
Faserlänge	10 m	18 m
Anzahl Signalmoden	1,3,6,...,120	1,3,6,...,120
Anzahl Signalwellenlängen	100	100
Pumpwellenlänge	980 nm	1480 nm
Eingangsleistung pro räumlichem und spektralem Kanal	$-25 \text{ dBm}$	-
Gewünschte Ausgangsleistung pro Kanal	$-5 \text{ dBm}$	3 dBm
Erbium-Dotierung im Kern	$5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$	$5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$
Anzahl Diskretisierungspunkte in $z$ -Richtung	350	500
Anzahl Diskretisierungspunkte in $r$ -Richtung	260	260

Zunächst soll das Verhalten der ersten Stufe untersucht werden. Die Pumpleistung wird jeweils

angepasst, um einen minimalen Gewinn von 20 dB für alle räumlichen und spektralen Kanäle zu erreichen. Der resultierende MDG ist in Abbildung 6.9(a) dargestellt. Sowohl der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  als auch der  $\text{MDG}_{\text{rms}}$  sind abgebildet. Der  $\text{MDG}_{\text{rms}}$  besitzt eine stärkere Aussagekraft über die Akkumulation des MDG in Systemen mit starker Kopplung zwischen allen Moden, da der MDG dann mit der Quadratwurzel der Anzahl an Faserabschnitten skaliert [72]. Obwohl schwache Kopplung zwischen den Modengruppen angenommen wird, kann eine starke Kopplung beispielsweise durch den Einsatz eines Modenmischers an diskreten Punkten entlang der Übertragungsfaser zur Verringerung des Einflusses der Modendispersion bewusst eingeführt werden [102]. Solange sich die Eingangleistungen der einzelnen Signalmoden durch die Mischung nicht stark unterscheiden, behalten die Ergebnisse aus diesem Kapitel auch für einen solchen Fall ihre Gültigkeit.

In Abbildung 6.9(a) ist zu erkennen, dass der MDG mit steigender Modenanzahl zunächst auf über 3 dB (pp) bzw. 1 dB (rms) ansteigt und anschließend zu sinken beginnt. Dieses Verhalten lässt sich auf die bereits in Kapitel 3 beschriebene modenabhängige Sättigung zurückführen und ist für beide Definitionen des MDG zu beobachten. Ähnlich zur Verwendung von bis zu 36 der maximal verfügbaren 55 Signalmoden in einer Gradientenfaser mit 50  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser (vgl. Kapitel 3.1), führt die modenabhängige Sättigung bei einer Verwendung von bis zu 120 der 153 ausbreitungsfähigen Moden in der hier verwendeten EDF zu einer Umkehrung der Reihenfolge der Signalgewinne. Am Ende der ersten Stufe erfährt folglich der  $\text{LP}_{0,1}$ -Modus den geringsten Gewinn aller verwendeten Moden. Während sich ein voll ausgebautes System mit 120 Signalmoden gegebenenfalls ohne zusätzliche MDG-Kompensation betreiben ließe, erscheint es erforderlich, für Ausbaustufen mit hohem MDG eine zusätzliche MDG-Kompensation zu verwenden.

In Abbildung 6.9(b) ist außerdem die mittlere Rauschzahl aller räumlichen und spektralen Kanäle sowie die Standardabweichung der Rauschzahl für alle Ausbaustufen dargestellt. Mit steigender Modenanzahl sinkt die mittlere Rauschzahl von 3,41 dB unter Verwendung eines Modus auf 3,16 dB unter Verwendung von 120 Signalmoden ab. Durch die Verwendung von mehr Signalmoden wird ebenfalls eine höhere Pumpleistung benötigt. Eine Erhöhung der Pumpleistung führt wiederum zu einer höheren Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus am Fasereingang und somit zu einer Verbesserung des Rauschverhaltens, da die Signalleistung am Fasereingang stärker ansteigen kann. Nichtsdestotrotz versprechen die errechneten Rauschzahlen auch für geringe Anzahlen an Signalmoden ein gutes Rauschverhalten nahe dem Quantenlimit. Die maximale Standardabweichung der Rauschzahlen für alle räumlichen und spektralen Kanäle ist mit  $\approx 0,06$  dB ebenfalls gering.

Nach der ersten Stufe folgt im zweistufigen Aufbau üblicherweise ein spektrales Filter, welches die Wellenlängenabhängigkeit des Signalgewinns reduzieren soll. In dieser Arbeit wird das Filter als ideal im Bezug auf den spektralen Verlauf der Einfügedämpfung angenommen und auf den  $\text{LP}_{0,1}$ -Modus ausgelegt. Da das Filter die spektralen Gewinne beider Stufen glätten soll, muss es zusammen mit der iterativen Optimierung der Pumpleistungen der zweiten Stufe angepasst werden. Nach dem Filter folgt die zweite Stufe, die unter anderem zur Minimierung des MDG verwendet wird.

Der Signalpegelverlauf entlang der ersten und zweiten Stufe für 10 Signalmoden bei einer Wellenlänge von 1550 nm ist exemplarisch in Abbildung 6.10(a) dargestellt. Die Signalleistung wird in der ersten Stufe von  $-25$  dBm auf über  $-5$  dBm erhöht. Durch das verwendete spektrale

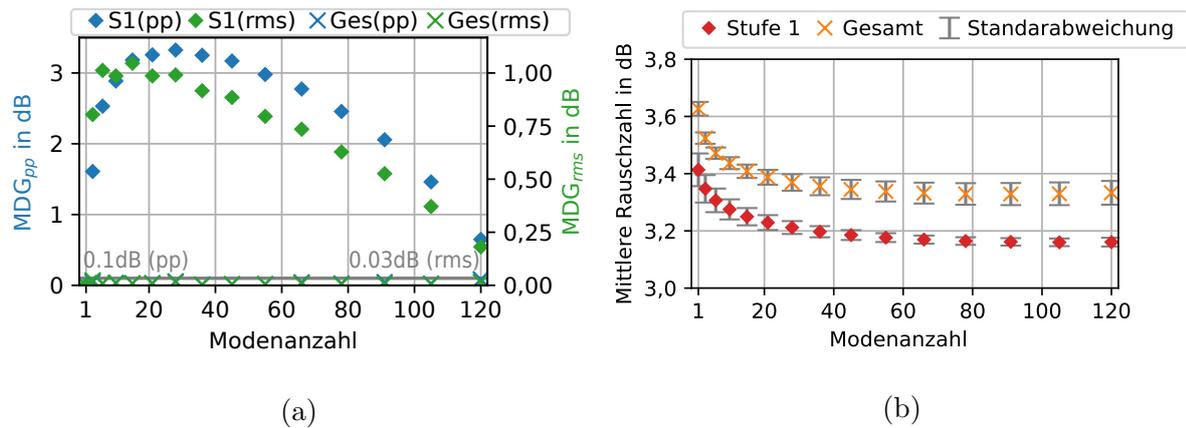


Abbildung 6.9.: Modenabhängiger Gewinn als  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ - sowie  $\text{MDG}_{\text{rms}}$ -Wert für die erste Stufe (S1) und die Kombination beider Verstärkerstufen (Ges) (a); Mittlere Rauschzahl aller räumlichen und spektralen Kanäle und deren Standardabweichung nach der ersten Stufe sowie für die Kombination beider Stufen (b).

Filter wird die Signalleistung leicht abgesenkt. Am Ausgang der zweiten Stufe liegt schließlich eine Signalleistung von 3 dBm für alle 10 Signalmoden vor. Es ist zu erkennen, dass der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  in der ersten Stufe entlang der Faser ansteigt und in der zweiten Stufe durch die optimierte Pumpleistungsverteilung minimiert wird. Zu Beginn der ersten Stufe, nach  $\approx 5$  m ist außerdem das  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ -Minimum erkennbar, welches durch die in Kapitel 3 beschriebene modenabhängige Sättigung entsteht. Aufgrund der geringen Anzahl an Signalmoden befindet sich das Minimum nah am Fasereingang der ersten Stufe.

Mithilfe der zweiten Stufe kann der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  am Ausgang des Verstärkers für alle verwendeten Anzahlen an Signalmoden auf unter 0,1 dB abgesenkt werden, wie in Abbildung 6.9(a) dargestellt ist. Der  $\text{MDG}_{\text{rms}}$  weist ein ähnliches Verhalten auf und kann am Ende der zweiten Stufe auf unter 0,03 dB abgesenkt werden. Die Rauschzahl des gesamten zweistufigen Verstärkers ist in Abbildung 6.9(b) dargestellt. Die Gesamtrauschzahl kann mit Formel 2.53 berechnet werden. Durch das schlechtere Rauschverhalten der zweiten Stufe wird die mittlere Rauschzahl des gesamten Verstärkers um  $\approx 0,2$  dB erhöht. Die zweite Verstärkerstufe hat jedoch aufgrund des hohen Gewinns der ersten Stufe keinen signifikanten Einfluss auf das Rauschverhalten des Gesamtsystems. Außerdem ist zu erkennen, dass die Rauschzahl analog zur ersten Stufe mit steigender Modenanzahl abnimmt. Dieses Verhalten wird auf die stärkere Inversion der Erbium-Ionen am Eingang der Faser zurückgeführt. Für alle Ausbaustufen ist ein rauscharmer Betrieb mit Rauschzahlen unter 3,7 dB möglich. Werden mehr als 20 Signalmoden verwendet sinkt die Rauschzahl des Gesamtsystems auf unter 3,4 dB.

In Abbildung 6.10(b) sind die benötigten Pumpleistungen beider Stufen dargestellt. Für beide Verstärkerstufen steigt die benötigte Pumpleistung mit der Anzahl der Signalmoden an. Für den voll ausgebauten Zustand mit  $120 \cdot 100 = 12.000$  räumlichen und spektralen Signalkanälen wird eine Pumpleistung von mehr als 20 W pro Stufe verwendet, um eine Ausgangsleistung von 3 dBm für jeden der 12.000 Kanäle zu erreichen. Für geringe Anzahlen an Signalmoden steigt die benötigte Pumpleistung der ersten Stufe steiler an als die der zweiten Stufe. Durch die Verwendung aller verfügbarer Pumpmoden in der ersten Stufe ist viel Pumpleistung im äußeren

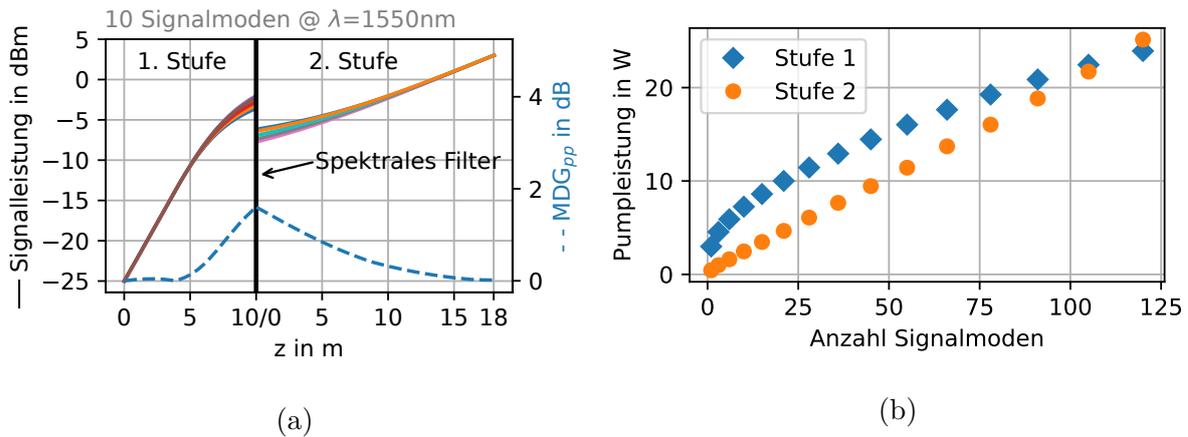


Abbildung 6.10.: Signalpegelverlauf entlang des zweistufigen MDM-EDFA für 10 Signalmoden bei einer Signalwellenlänge von 1550 nm (a). Die einzelnen Signalmoden sind in verschiedenen Farben dargestellt; Gesamte Pumpleistung für die erste und zweite Stufe des zweistufigen Verstärkeraufbaus (b).

Bereich des Faserkerns vorhanden, welche nicht zur Verstärkung des Signals genutzt werden kann, da die Signalmoden niedriger Ordnung stark im inneren des Kerns konzentriert sind. Für die zweite Stufe ist mit steigender Anzahl an Signalmoden ein linearer Anstieg der Pumpleistung zu erkennen. Da jeweils eine identische Anzahl an Pump- und Signalmoden verwendet wird, befindet sich unter Verwendung weniger Signalmoden keine nicht benötigte Pumpleistung im äußeren Bereich des Faserkerns. Allgemein ist zu beachten, dass die Pumpeffizienz kein Optimierungskriterium in dieser Arbeit ist. Der bekannte Kompromiss zwischen Rauschverhalten und Pumpeffizienz wurde in dieser Simulation in keine besondere Richtung optimiert, da die Minimierung des MDG im Vordergrund stand.

Die Signalspektren am Ausgang des zweistufigen MDM-EDFA sind in Abbildung 6.11 für ausgewählte Ausbaustufen dargestellt. Außerdem ist der MDG<sub>pp</sub> über der Wellenlänge dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Kanalleistungen am Ausgang leicht spektral verkippt sind. Dies lässt sich auf die unterschiedlichen Sättigungszustände der einzelnen Signalmoden zurückführen. Durch den wachsenden Einfluss des Absorptionswirkungsquerschnittsspektrums bei abnehmender Wahrscheinlichkeit für stimulierte Emission eines Modus wird das Gewinnspektrum dieses Modus beeinflusst. Da sich alle Moden in leicht unterschiedlichen Sättigungszuständen befinden, ergibt sich ein unterschiedlicher Einfluss für alle Moden. Für alle Signalmoden besitzt das Filter zur Reduzierung der spektralen Gewinnunterschiede den gleichen Frequenzgang. Aus diesem Grund ist auch der MDG<sub>pp</sub> abhängig von der Wellenlänge. Nichtsdestotrotz werden für alle Ausbaustufen flache Gewinnspektren und für alle Wellenlängen ein MDG<sub>pp</sub> unter 0,1 dB erreicht.

Die benötigten Pumpleistungsverteilungen für die verschiedenen Ausbaustufen des Systems sind in Abbildung 6.12 dargestellt. Die grau gestrichelten Linien trennen die Modengruppen der Gradientenfaser voneinander ab. Die Leistungen der entarteten  $LP_{l,pa/b}$ -Moden sind jeweils als Summenleistung beider entarteter Moden dargestellt, um die Lesbarkeit der Grafik zu erleichtern. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der ersten Verstärkerstufe die Eingangsleistungen pro spektralem und räumlichem Kanal nicht konstant sind. Am Eingang der zweiten Stufe ist bereits

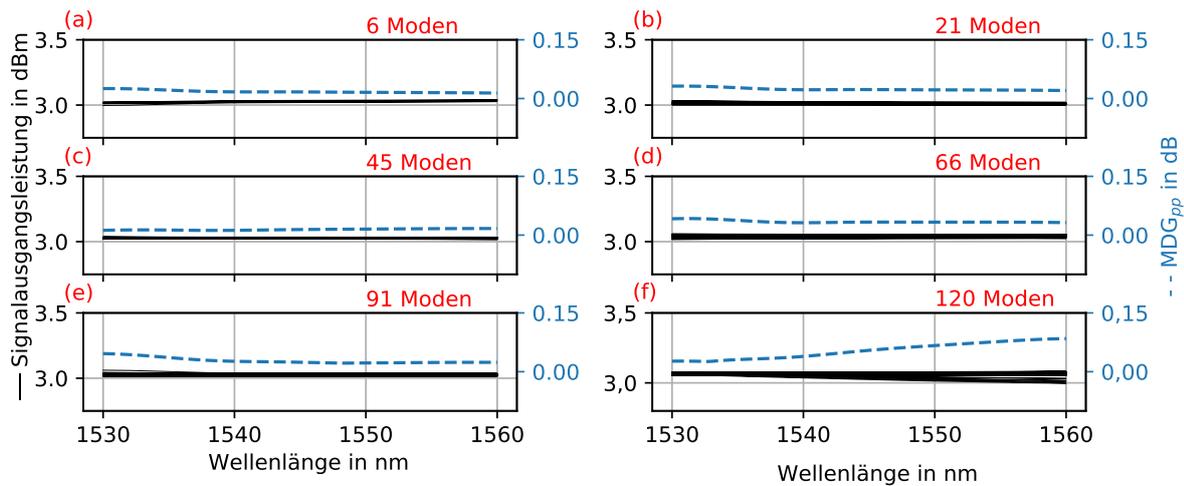


Abbildung 6.11.: Resultierende Gewinnspektren des zweistufigen MDM-EDFA für verschiedene Ausbaustufen. Neben dem Gewinnspektrum ist der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  über der Wellenlänge dargestellt.

der MDG der ersten Stufe vorhanden. Die Pumpleistungen in diesem Abschnitt sind folglich nicht mit denen aus Abbildung 6.6 vergleichbar. Während einige Pumpmoden vom Algorithmus auf mehr als 2 W angepasst werden, werden andere Pumpmoden auf nahezu 0 W abgesenkt. Es zeigt sich, dass in allen Fällen eher die Moden höherer Ordnung zur Signalverstärkung verwendet werden. Für einige Ausbaustufen, beispielsweise für 105 und 120 Signalmoden, werden nur weniger als 15 Pumpmoden mit einer Leistung von mehr als 0,5 W gepumpt. Die Pumpmoden welche mit Leistungen nahe 0 W gepumpt werden, könnten vernachlässigt werden, um die Anregung der Pumpstrahlung mit einem Modenmultiplexer zu vereinfachen. Untersuchungen in diese Richtung sind allerdings nicht Bestandteil der durchgeführten Arbeiten.

Mithilfe des beschriebenen Vorgehens lassen sich für alle räumlichen und spektralen Signalkanäle die Gewinnunterschiede auf unter 0,1 dB minimieren und Rauschzahlen nahe des Quantenlimits von 3 dB erreichen. Durch die Untersuchung einer aktiven Faser für bis zu 120 Signalmoden und 100 WDM-Kanälen konnte außerdem gezeigt werden, dass es keine prinzipiellen Probleme bei der Angleichung der Signalgewinne in einer solchen Faser gibt. Die Skalierbarkeit der Modenanzahl und somit der Kapazität zukünftiger MDM-Systeme sind somit vermutlich nicht durch die verwendeten MDM-EDFA limitiert. Wie bei der Einführung von WDM-Systemen, lässt sich die Übertragungskapazität mit MDM aus Sicht der optischen Verstärker unter den genannten Annahmen um den Faktor 120 steigern. Durch die Möglichkeit, die Pumpleistungsverteilung zur Laufzeit des Systems anzupassen, kann außerdem eine variable Anzahl an Signalmoden, beispielsweise durch ein Hochrüstszenario, rauscharm und mit geringem MDG verstärkt werden. Der Ausbau der räumlichen Kanäle in einem bereits verlegten optischen Übertragungssystem kann somit je nach Bedarf erfolgen, ohne den MDM-EDFA austauschen zu müssen.

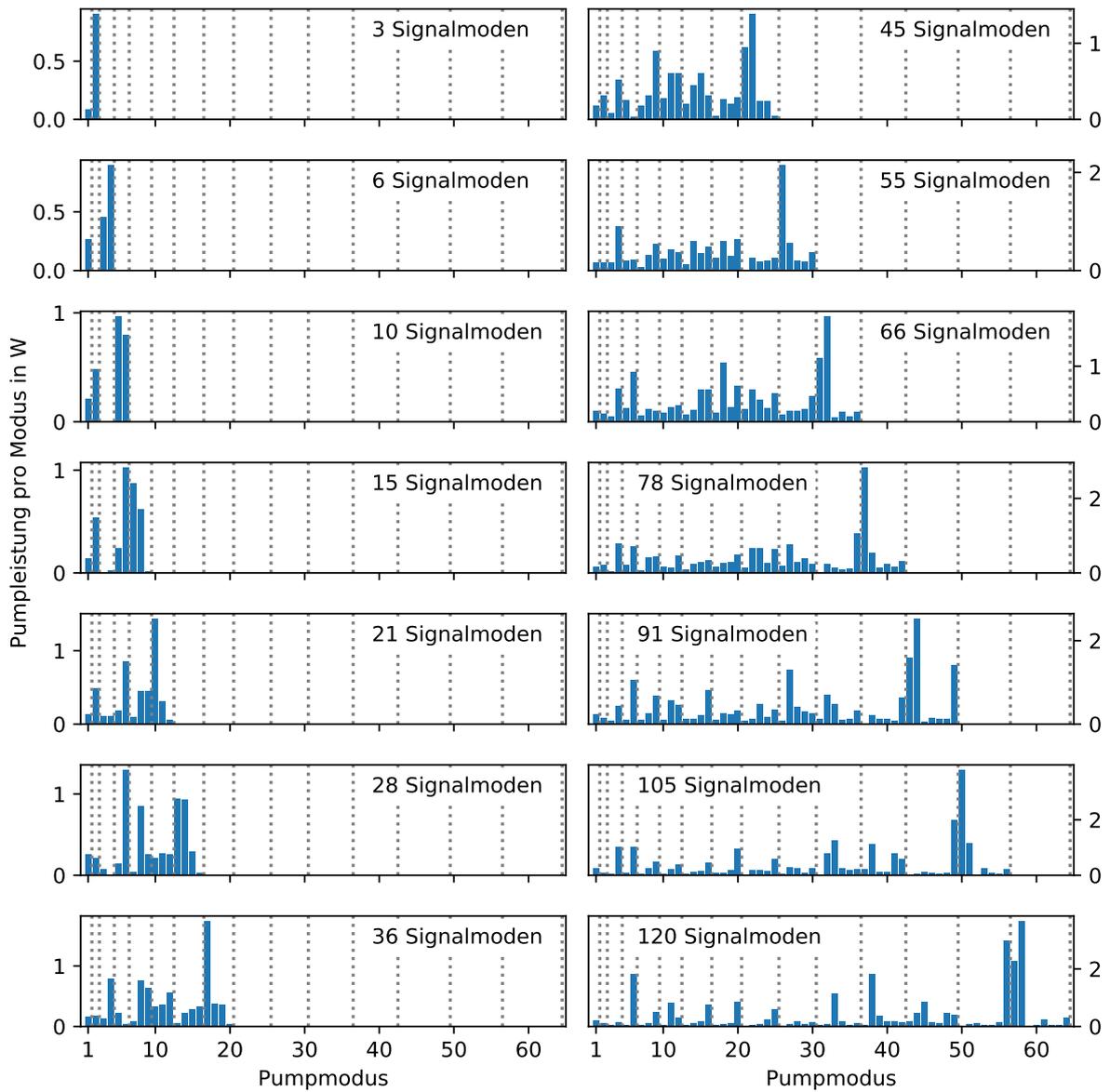


Abbildung 6.12.: Verteilungen der Pumpleistung in der zweiten Stufe auf die einzelnen Pumpmoden für verschiedene Anzahlen an verwendeten Signal- und Pumpmoden.

## 7. Optimierung der Pumpleistungsverteilung durch Linearisierung im Arbeitspunkt

Im vorigen Abschnitt wurde zur Optimierung der Pumpleistung ein intuitiver iterativer Ansatz verwendet, bei dem jedem Signalmodus ein Pumpmodus zugeordnet wurde. Um diesen Ansatz verwenden zu können, muss zu jedem Signalmodus ein Pumpmodus vorliegen, mit dem der Signalmodus einen signifikant größeren Überlapp besitzt als mit allen anderen Pumpmoden. Diese Einschränkung führt dazu, dass der Ansatz lediglich mit einer bei 1480 nm gepumpten EDF mit Gradientenbrechzahlprofil zufriedenstellend funktioniert. In diesem Abschnitt soll daher ein Konzept vorgestellt werden, mit dem es möglich ist, durch Linearisierung im Arbeitspunkt die Gewinne der Signalmoden durch Minimierung des quadratischen Fehlers unter Verwendung aller verfügbaren Pumpmoden anzugleichen. Die Untersuchungen beziehen sich auf Gradienten- und Stufenbrechzahlprofile unter Verwendung von Pumpstrahlung bei 980 nm und 1480 nm.

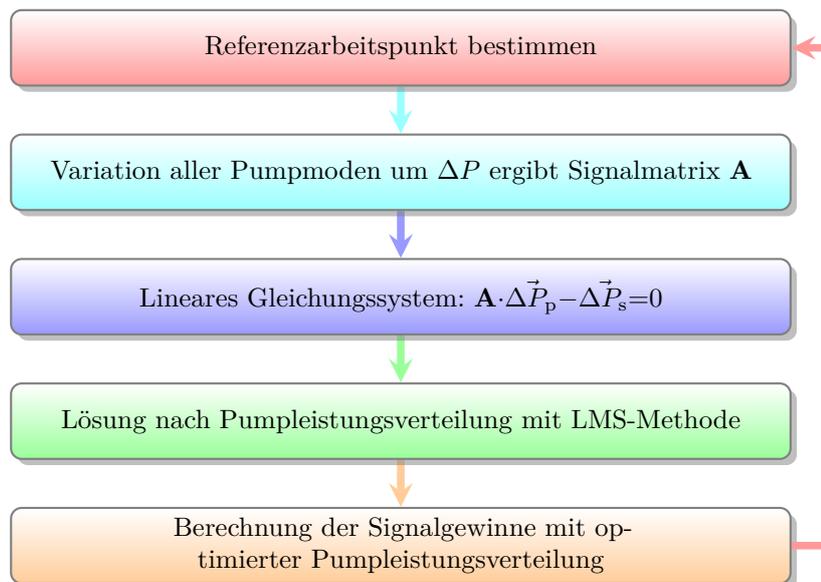


Abbildung 7.1.: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Optimierung der Pumpleistungen. Ausgehend von einem Referenzarbeitspunkt werden die Pumpleistungen mittels Linearisierung im Arbeitspunkt angepasst.

Das grundlegende Konzept ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Es werden  $M_s$  Signalmoden und  $M_p$  Pumpmoden verwendet. In einem Referenzarbeitspunkt werden zunächst die Signalpegelverläufe  $P_{s,\text{ref}}$  berechnet. Anschließend wird jeder Pumpmodus nacheinander um  $\Delta P_{p,\text{ref}} = 1 \text{ mW}$  verändert. Zu jeder Veränderung der Pumpleistung werden wiederum die Änderungen der Signalpegelverläufe  $\Delta P_{s,ij}$  im Vergleich zum Referenzarbeitspunkt berechnet. Die resultierenden

Änderungen der Ausgangsleistung bilden die Spalten einer Systemmatrix  $\mathbf{A}$ , die den Einfluss des  $j$ -ten Pumpmodus auf den  $i$ -ten Signalmodus beschreibt. Es ergibt sich ein lineares Gleichungssystem in Matrixschreibweise, bestehend aus der Systemmatrix  $\mathbf{A}$  und den Änderungen der Pump- und Signalleistungen  $\Delta P_p$  und  $\Delta P_s$ :

$$\begin{pmatrix} \Delta P_s^{1,1} & \dots & \Delta P_s^{1,M_p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta P_s^{M_s,1} & \dots & \Delta P_s^{M_s,M_p} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta P_p^1 \\ \vdots \\ \Delta P_p^j \\ \vdots \\ \Delta P_p^{M_p} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Delta P_s^1 \\ \vdots \\ \Delta P_s^i \\ \vdots \\ \Delta P_s^{M_s} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \cdot \vec{\Delta P}_p - \vec{\Delta P}_s = 0. \quad (7.1)$$

Für eine gewünschte Veränderung der Signalleistungen  $\Delta \vec{P}_s$  kann folglich die benötigte Veränderung der Pumpleistungen  $\Delta \vec{P}_p$  berechnet werden, indem das lineare Gleichungssystem gelöst wird. Die näherungsweise Lösung des Gleichungssystems erfolgt numerisch mit dem LMS-Löser der SciPy Softwarebibliothek [101]. Die gewünschte Veränderung ergibt sich als Differenz des Signalleistungsvektors im Referenzarbeitspunkt und der gewünschten identischen Ausgangsleistung für jeden Signalmodus. Mithilfe dieses Algorithmus ist es theoretisch allerdings auch möglich, verschiedene Ausgangsleistungen für verschiedene Moden zu erzielen, indem  $\Delta \vec{P}_s$  entsprechend gewählt wird.

Bei einem EDFA in Sättigung handelt es sich im Allgemeinen nicht um ein lineares System. Eine Linearisierung des Verhaltens ist nur in der Nähe des Arbeitspunktes möglich. Der Referenzarbeitspunkt, auf den sich die Leistungsänderungen beziehen, muss folglich nah am finalen Arbeitspunkt des EDFA liegen. Das in Abbildung 7.1 dargestellte Schema wird daher wiederholt durchlaufen, wobei das Ergebnis eines Durchlaufs jeweils als Referenzarbeitspunkt für den nächsten Durchlauf dient. Der Algorithmus wird abgebrochen, sobald der  $\text{MDG}_{pp}$  einen kritischen Wert von  $\text{MDG}_{pp, \text{Abbruch}} = 0,03 \text{ dB}$  unterschreitet oder die maximale Anzahl an Iterationen  $N_{\text{max}} = 5$  erreicht ist. Die Abbruchkriterien wurden empirisch ermittelt und dienen dazu, die Rechenzeit zu verringern.

## 7.1. Untersuchung einer skalierbaren Anzahl an Signalmoden

Im Folgenden soll der Algorithmus verwendet werden, um die modale Pumpleistungsverteilung von MDM-EDFA mit 3 bis 55 Signalmoden zu optimieren. Die Anzahl der Signalmoden wird jeweils um eine Modengruppe inkrementiert, um ein realistisches Aufrüstszenario abzubilden. Es werden Gradienten- und Stufenbrechzahlprofile mit einem Kerndurchmesser von  $50 \mu\text{m}$  bzw.  $37,12 \mu\text{m}$  untersucht. Die Brechzahlprofile beider Fasertypen sind in Abbildung 3.1 sowie Abbildung 3.6 dargestellt und entsprechen denen aus den vorherigen Kapiteln. Die Erbium-Konzentration im Kern wird als konstant mit  $\rho = 5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$  angenommen. Es sollen die beiden Pumpwellenlängen  $1480 \text{ nm}$  und  $980 \text{ nm}$  untersucht werden. Die Faserlänge des EDFA wird zu  $13 \text{ m}$  bei  $980 \text{ nm}$  Pumpwellenlänge und zu  $23 \text{ m}$  bei  $1480 \text{ nm}$  Pumpwellenlänge gewählt, um ein gutes Rauschverhalten zu erzielen, ohne die Pumpeffizienz zu sehr zu beeinträchtigen. Im Falle des direkten Pumpens in das obere Laserniveau muss die Faser, aufgrund des geringeren Gewinns pro Meter durch die geringere mittlere Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus, länger gewählt werden als für das Pumpen in das obere Pumpniveau mit  $980 \text{ nm}$ . Die Simulationsparameter dieses Abschnitts sind in Tabelle 7.1 aufgelistet.

Tabelle 7.1.: Simulationsparameter zur Optimierung der Pumpleistungsdichte eines MDM-EDFA mit verschiedenen Brechzahlprofilen, Pumpwellenlängen und Anzahlen an Signalmoden.

	Gradientenfaser		Stufenfaser	
Kerndurchmesser	50 $\mu\text{m}$		37,12 $\mu\text{m}$	
Pumpwellenlänge	980 nm	1480 nm	980 nm	1480 nm
Numerische Apertur	0.21		0.21	
Faserlänge	13 m	23 m	13 m	23 m
Anzahl Signalmoden	3,6,...,55		3,6,...,55	
Anzahl Signalwellenlängen	1 bzw. 50		1 bzw. 50	
Eingangsleistung pro Kanal	-5 dBm		-5 dBm	
Gewinn	25 dB		25 dB	
Erbium-Dotierung im Kern	$5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$		$5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$	
Diskretisierungspunkte $z$ -Richtung	300	400	300	400
Diskretisierungspunkte $r$ -Richtung	300		300	

Zunächst soll untersucht werden, ob sich eine Angleichung der Signalgewinne in einem Aufrüst-szenario in den betrachteten Fällen erzielen lässt. Um die benötigte Rechenzeit zu verringern, werden die Untersuchungen in diesem Abschnitt mit nur jeweils einem Wellenlängenkanal bei 1530 nm durchgeführt. Die Eingangsleistung pro Modus ist mit -5 dBm ähnlich zu der Summeneingangsleistung eines WDM-Systems gewählt, um einen vergleichbaren Betriebspunkt des EDFA zu erreichen. Hierbei ist zu beachten, dass ebenfalls nur ein ASE-Kanal verwendet wird. Eine mögliche Sättigung am Eingang des Verstärkers durch rückwärtslaufende ASE wird somit nicht berücksichtigt. Im weiteren Verlauf werden allerdings auch Ergebnisse unter Verwendung des hier vorgestellten Algorithmus in Kombination mit WDM und unter Berücksichtigung einer potenziellen Sättigung durch die ASE vorgestellt. Die Pumpleistung wird über die Optimierung so eingestellt, dass sich ein mittlerer Gewinn aller räumlichen Kanäle von 25 dB einstellt.

In Abbildung 7.2(a) sind die resultierenden  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ -Werte für beide Brechzahlprofile sowie Pumpwellenlängen dargestellt. Für das Gradientenbrechzahlprofil kann der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  bei beiden Pumpwellenlängen und allen untersuchten Anzahlen an Signalmoden unter die Abbruchgrenze des Algorithmus von  $\text{MDG}_{\text{pp,Abbruch}} = 0,03 \text{ dB}$  gesenkt werden. Für die 1480 nm Pumpwellenlänge konnte dies bereits in Kapitel 6 gezeigt werden. Eine Angleichung der Signalgewinne in Kombination mit der 980 nm Pumpwellenlänge ist allerdings mit dem Verfahren aus Kapitel 6 nicht möglich, da sich auf intuitive Weise keine Zuweisung von Pumpmoden bei 980 nm zu den Signalmoden finden lässt, welche für eine selektive Verstärkung der einzelnen Gewinne sorgt. Der in diesem Abschnitt vorgestellte Algorithmus ist nicht auf die Zuweisung von Pump- zu Signalmoden angewiesen, sondern kann alle verfügbaren Pumpmoden verwenden.

Auch für das Stufenbrechzahlprofil kann für bis zu 36 Signalmoden eine Angleichung der Signalgewinne unter die Abbruchgrenze erreicht werden. Für 45 Signalmoden erfolgt eine Angleichung nur mit der 980 nm Pumpwellenlänge. Für 55 Signalmoden ist eine Angleichung mit keiner der beiden Pumpwellenlängen mehr möglich. Das schlechtere Verhalten des Stufenbrechzahlprofils kann mit der weniger starken Führung der Moden im Faserkern begründet werden. Wie bereits in Kapitel 6 und Kapitel 3 beschrieben, steigt die effektive Modenfeldfläche der Moden in einer Gradientenfaser mit der Modenordnung an. Auch die Überlappintegrale zwischen Pump- und

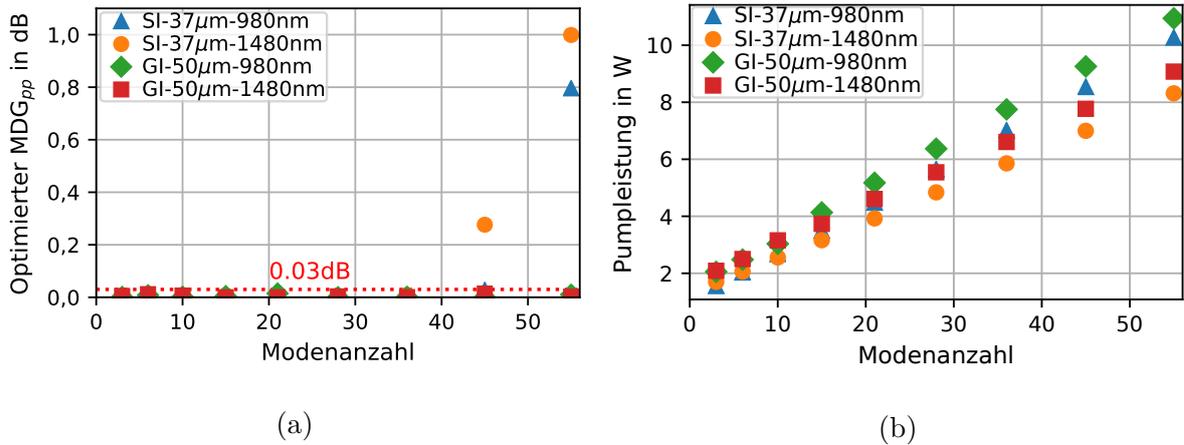


Abbildung 7.2.: MDG<sub>pp</sub> für verschiedene Anzahlen an Signalmoden, Pumpwellenlängen und Fasertypen nach Anwendung der vorgestellten Optimierung (a); Benötigte Pumpleistung unter Anwendung der optimierten Pumpleistungsdichten für verschiedene Anzahlen an Signalmoden, Pumpwellenlängen und Fasertypen (b).

Signalmoden zeigen für eine Gradientenfaser, dass Pumpmoden höherer Ordnung hauptsächlich einen hohen Überlapp mit den Signalmoden höherer Ordnung aufweisen und somit zur selektiven Verstärkung eben dieser Signalmoden verwendet werden können. Im Falle eines Stufenbrechzahlprofils besitzen auch die Moden niedriger Ordnung eine hohe effektive Modenfeldfläche. Die Überlappintegrale in Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3 zeigen ebenfalls einen hohen Überlapp zwischen Pumpmoden höherer Ordnung und Signalmoden niedrigerer Ordnung. Es ist folglich schwieriger, eine geeignete Kombination von Pumpmoden zu finden, welche eine selektive Verstärkung der Moden höherer Ordnung erlaubt. Durch die geringere Anzahl an verfügbaren Pumpmoden bei 1480 nm im Vergleich zu 980 nm ist außerdem ein schlechteres Ergebnis der Optimierung für diese Pumpwellenlänge zu erwarten. Insbesondere sind bei einer geringeren Pumpwellenlänge mehr  $LP_{l,p}$ -Moden mit höherer radialer Ordnung  $p$  vorhanden, welche eine radial feiner aufgelöste Anregung des Erbiums im Faserkern erlauben.

Die benötigten Pumpleistungen für alle vier Fälle sind in Abbildung 7.2(b) dargestellt. In allen Fällen steigt die benötigte Pumpleistung mit der Anzahl der zu verstärkenden Signalmoden von  $\approx 2$  W auf über 8 W an. Bei gleichem Faserparameter  $V$  sind in der Stufenfaser doppelt so viele Moden ausbreitungsfähig wie in der Gradientenfaser. Die Verwendung eines Stufenbrechzahlprofils führt aufgrund der höheren räumlichen Packungsdichte der Moden im Vergleich zum Gradientenprofil zu einer besseren Energieeffizienz des MDM-EDFA. Außerdem ist zu erkennen, dass für hohe Ausgangsleistungen ein mit 1480 nm gepumpter EDFA aufgrund der höheren Anzahl an Photonen pro Watt eine bessere Energieeffizienz aufweist als ein mit Pumpstrahlung bei 980 nm betriebener EDFA. Für beide Brechzahlprofile wird unter Verwendung von Pumpstrahlung bei 1480 nm etwa 2 W weniger Pumpleistung benötigt.

## 7.2. Variation des Kernradius

Es stellt sich die Frage, wie die Angleichung der Gewinne des MDM-EDFA für 45 und 55 Signalmoden unter Verwendung eines Stufenbrechzahlprofils erzielt werden kann. Eine Möglichkeit stellt die Verwendung einer Faser mit einem größeren Kernradius dar. Ein leicht vergrößerter Kernradius, bei unveränderter numerischer Apertur, sorgt dafür dass zum einen die gewünschten 55 Signalmoden besser im Kern der EDF geführt werden und zum anderen mehr Pumpmoden zur Verfügung stehen, welche zur Anpassung der Gewinne mit dem vorgestellten Algorithmus verwendet werden können. Die zusätzlich ausbreitungsfähigen Moden bei der Signalwellenlänge werden für die Signalübertragung bzw. -verstärkung nicht verwendet. Ein solches Konzept wurde bereits in [21, 23] in Kombination mit vielmodigem Mantelpumpen vorgestellt. Für die in dem Experiment anregbaren Signalmoden konnte dabei ein  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  unter 0,15 dB erzielt werden. Der Kerndurchmesser der aktiven Faser wird so gewählt, dass deutlich mehr Moden ausbreitungsfähig sind als zur Signalübertragung verwendet werden. Durch den vergrößerten Radius steigt der Faserparameter  $V$  an. Im B-V Diagramm steigt somit der Phasenparameter und dadurch die Stärke der Führung der Moden im Kern. Eine stärkere Führung der Moden führt wiederum zu einem höheren Überlapp mit dem Faserkern und somit im Kontext des EDFA zur gleichmäßigeren Verstärkung der Signalmoden.

Im Gegensatz zu [21, 23] soll in diesem Abschnitt nicht nur die bessere Führung der Moden im Kern ausgenutzt werden, sondern zusätzlich die verbesserte radiale Auflösung der Pumpmoden durch eine Optimierung der Pumpleistungsverteilung ausgenutzt werden. Aus Gründen der Pumpeffizienz soll der Faserkern hierbei so wenig wie möglich verbreitert werden, da ein zu groß gewählter Faserkern eine höhere Pumpleistung zur Erreichung derselben Pumpleistungsdichte im Faserkern erfordert. Die Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden je Faser und Wellenlänge ist in Tabelle 7.2 dargestellt.

Tabelle 7.2.: Parameter der verwendeten EDF.

Brechzahlprofil	Kerndurchmesser	Anzahl Moden bei		
		1550 nm	1480 nm	980 nm
Gradientenprofil	50 $\mu\text{m}$	55	55	136
Stufenprofil	37,12 $\mu\text{m}$	61	67	158
Stufenprofil	40 $\mu\text{m}$	69	76	172
Stufenprofil	42 $\mu\text{m}$	78	90	199
Stufenprofil	60 $\mu\text{m}$	160	-	405

In Abbildung 7.3(a) ist der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  für verschiedene Pumpwellenlängen sowie für optimierte und nicht optimierte Pumpleistungsverteilungen über dem Kerndurchmesser dargestellt. Der Fall einer nicht optimierten Pumpleistungsverteilung entspricht einem vielmodigen Pumplaser, der alle bei der jeweiligen Pumpwellenlänge ausbreitungsfähigen LP-Moden im Faserkern jeweils mit identischer Leistung anregt. Im Vergleich zu den vorherigen Simulationen in diesem Abschnitt wird lediglich der Kerndurchmesser der EDF und die Anzahl der verfügbaren Pumpmoden erhöht. Die zusätzlichen Signalmoden werden nicht als Signalkanäle verwendet und auch die Faserlängen bleiben konstant. Eine Erhöhung des Kernradius führt ohne weitergehende Optimierungen bereits zu einer verbesserten Gewinnangleichung der Signalmoden. Für beide Brechzahlprofile sinkt der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  von über 2 dB durch eine Erhöhung des Kerndurchmessers auf 42  $\mu\text{m}$  auf

unter 1,5 dB ab. Dieses Verhalten ist auf die stärkere Führung der verwendeten Signalmoden durch den Faserkern zurückzuführen. Es ist zu erkennen, dass mithilfe der Optimierung für alle untersuchten Kerndurchmesser und Pumpwellenlängen eine weitere Minimierung des  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  um jeweils mehr als 1 dB im Vergleich zur unoptimierten vielmodigen Pumpleistung erfolgt. Für einen Kerndurchmesser von  $42\ \mu\text{m}$  lassen sich  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ -Werte nahe Null erreichen. Da bei der Verwendung eines größeren Kerndurchmessers eine höhere Pumpleistung benötigt wird, ist in Abbildung 7.3(b) die benötigte Pumpleistung über dem Kernradius dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Pumpleistung nur schwach mit dem Kernradius ansteigt. Die optimierte Pumpleistung steigt insgesamt um 197 mW oder 1,9 % bei 980 nm bzw. 295 mW oder 3,5 % bei 1480 nm an. Die Kern-Querschnittsfläche steigt bei einer Erhöhung des Kernradius von  $37,12\ \mu\text{m}$  auf  $42\ \mu\text{m}$  um 28,02 % an. Der Anstieg der benötigten Pumpleistung ist also schwächer als der Anstieg der Kern-Querschnittsfläche.

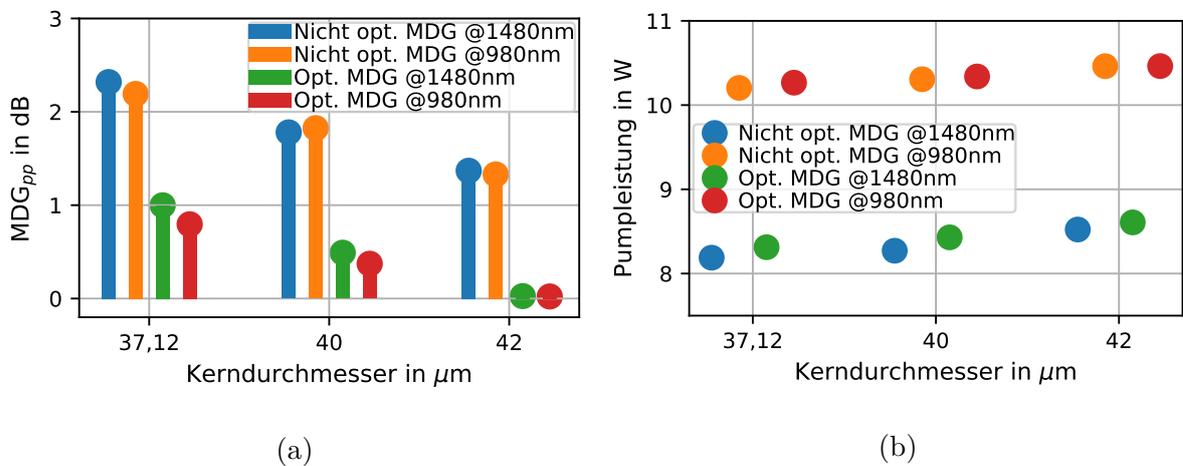


Abbildung 7.3.: Resultierende  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ -Werte eines MDM-EDFA mit Stufenbrechzahlprofil für verschiedene Kerndurchmesser und Pumpwellenlängen vor und nach der Optimierung der Pumpleistungsverteilung (a); Benötigte Pumpleistung für verschiedene Kerndurchmesser und Pumpwellenlängen (b).

Die Leistungen der einzelnen Pumpmoden bei 980 nm am Eingang der Faser sind in Abbildung 7.4 für das Gradientenbrechzahlprofil und ein Stufenbrechzahlprofil mit einem Kerndurchmesser von  $42\ \mu\text{m}$  dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in beiden Fällen unter Verwendung von 3 Signalmoden alle verfügbaren Pumpmoden verwendet werden. Für 6, 10 und 15 Moden scheinen für das Gradientenprofil einige diskrete Pumpmoden zur Angleichung der Signalgewinne auszureichen. Für dasselbe Brechzahlprofil werden allerdings für 36 und 45 Signalmoden wiederum nahezu alle Pumpmoden verwendet. Unter Verwendung des Stufenprofils scheinen die voll ausgebauten Systeme mit 36, 45 und 55 Signalmoden nur einige diskrete Pumpmoden zur Angleichung der Gewinne zu benötigen. Ebenfalls zeigt sich, dass zur Angleichung der Gewinne in der Stufenfaser mit  $42\ \mu\text{m}$  zu einem signifikanten Anteil die Pumpmoden höchster Ordnung verwendet werden, welche in den Fasern mit  $37,12\ \mu\text{m}$  und  $40\ \mu\text{m}$  Kerndurchmesser nicht ausbreitungsfähig sind. Neben der besseren Führung der verwendeten Signalmoden im Kern der EDF trägt also auch die größere Anzahl an verfügbaren Pumpmoden zu Angleichung der Gewinne bei.

Die bisherigen Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass sich bei aktiven Fasern mit unter-

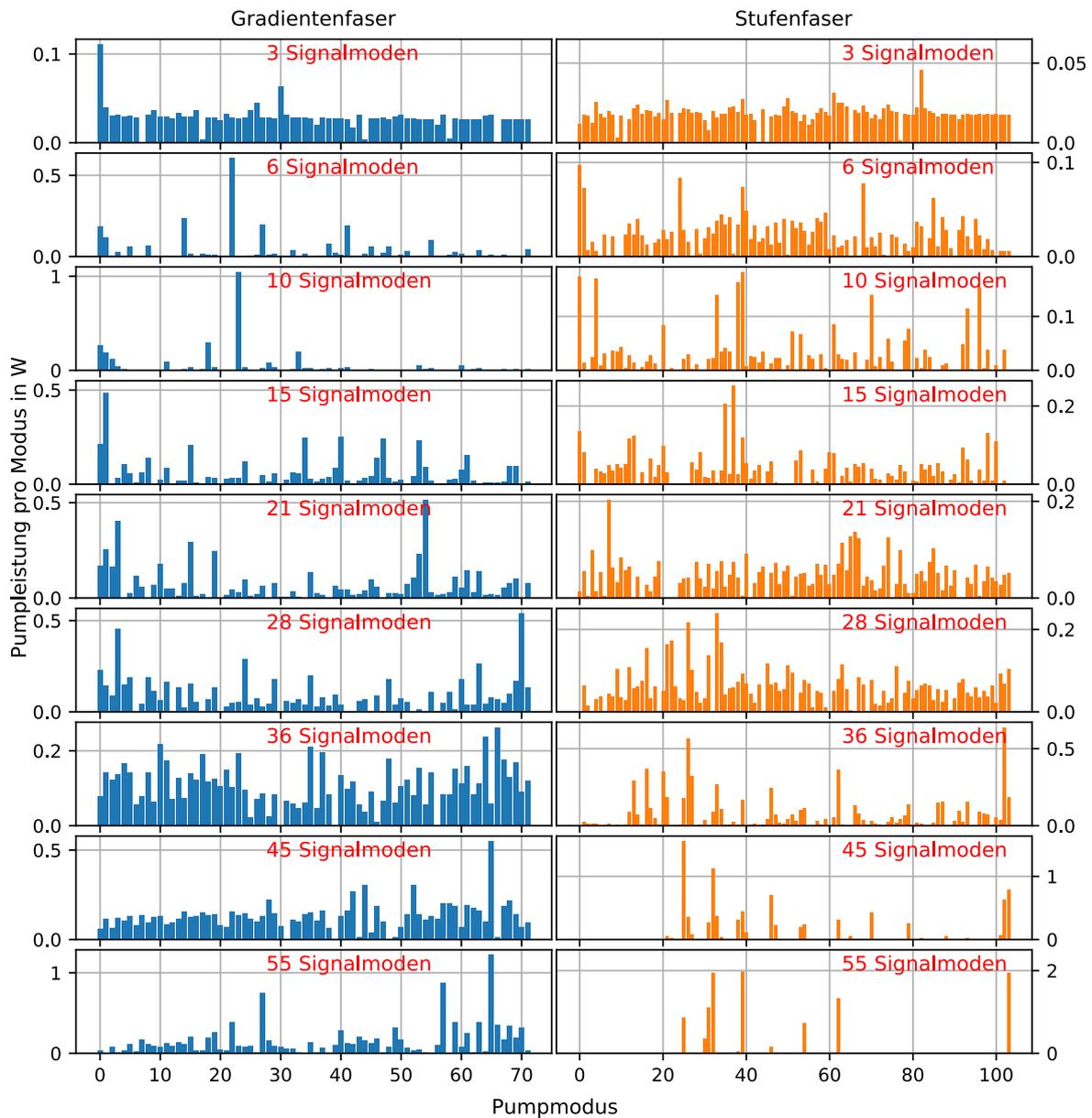


Abbildung 7.4.: Verteilung der Pumpleistung bei 980 nm auf die einzelnen Moden für Verstärkerfasern mit Gradientenbrechzahlprofil (links) und Stufenbrechzahlprofil (rechts) und einem Kerndurchmesser von  $50\ \mu\text{m}$  bzw.  $42\ \mu\text{m}$ . Die Pumpleistung in den entarteten  $LP_{l,pa/b}$  ist jeweils als Summe dargestellt.

schiedlichem Kernradius jeweils die Gewinne aller Moden mit starker Führung im Faserkern angleichen lassen und die Moden höchster Ordnung sich, aufgrund ihres hohen Überlapps mit dem Mantelbereich der Faser und des Fehlens von Pumpmoden mit einer ausreichend hohen radialen Ordnung, nicht selektiv beeinflussen lassen. Um dies zu überprüfen, soll eine Stufenfaser mit  $60\ \mu\text{m}$  Kerndurchmesser und bis zu 160 geführten Signalmoden bei 1550 nm untersucht werden. Außer der Erhöhung des Kerndurchmessers und der Anpassung der Anzahlen an Pump-

und Signalmoden, bleiben die restlichen Parameter der Simulation unverändert. Auch bei dieser Faser soll die Anzahl der Signalmoden inkrementell erhöht werden. In Abbildung 7.5 sind die resultierenden  $MDG_{pp}$ -Werte für ein Aufrüstszenario dargestellt, bei dem die Modenanzahl um jeweils eine Modengruppe erhöht wird. Bis zu 136 der 160 Signalmoden lassen sich in Modengruppen einer Gradientenfaser einteilen. Die restlichen Signalmoden werden in Schritten zu je 5 Moden erhöht. Es ist erkennbar, dass für alle untersuchten Modenanzahlen der  $MDG_{pp}$  im Vergleich zur unoptimierten vielmodigen Pumpstrahlung minimiert werden kann. Bis zu 105 Signalmoden lassen sich auf diese Weise mit einem  $MDG_{pp}$  von unter 0,03 dB verstärken. Für die restlichen Signalmoden steigt der  $MDG_{pp}$  mit der Anzahl der Moden an. Unter Verwendung von 160 Signalmoden beträgt der  $MDG_{pp}$  0,6 dB. Es zeigt sich folglich, dass auch bei einer aktiven Faser mit sehr großem Kerndurchmesser lediglich unter Verwendung der Moden höchster Ordnung kein MDG unter dem Abbruchkriterium erreicht werden kann. Für alle untersuchten

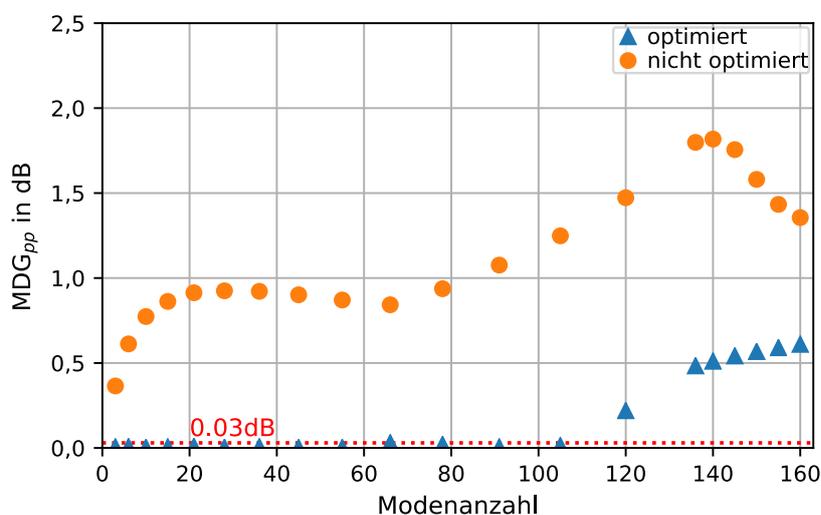


Abbildung 7.5.: Resultierender  $MDG_{pp}$  eines MDM-EDFA mit 60  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser, einer Pumpwellenlänge von 980 nm und Stufenbrechzahlprofil, jeweils mit und ohne Optimierung der Pumpleistungsdichte am Fasereingang.

Anzahlen an Signalmoden kann durch die Optimierung der Pumpleistungsdichteverteilung eine Verringerung des MDG im Vergleich zur gleichmäßigen Anregung aller Pumpmoden erzielt werden. Das nicht-monotone Verhalten des unoptimierten  $MDG_{pp}$  lässt sich auf ein modenabhängiges Sättigungsverhalten aufgrund der verschiedenen Leistungsdichteverteilungen der Signalmoden am Eingang der Faser für verschiedene Aufrüstschritte zurückführen. Dieser Effekt wurde in Kapitel 3 genauer betrachtet.

### 7.3. Kombination mit WDM

Zukünftige MDM-Systeme können nur eine Erhöhung der Kapazität pro Faser erreichen, wenn die bisher in kommerziell verfügbaren Systemen eingesetzten Multiplextechniken, vor allem WDM, weiterhin verwendet werden können. Daher soll im Folgenden ein kombinierter MDM-WDM-EDFA mit dem vorgestellten Optimierungsalgorithmus vorgestellt werden. Hierzu werden

50 WDM-Kanäle äquidistant zwischen 1530 und 1560 nm verteilt. Die Eingangsleistung jedes räumlichen und spektralen Kanals beträgt  $-22$  dBm. Die Optimierung wird bei einer Wellenlänge von 1540 nm durchgeführt. Es wird ein Gewinn von 20 dB bei 1540 nm angestrebt. Um einen geeigneten Arbeitspunkt zu bestimmen wird zunächst eine Optimierung mit nur 10 Wellenlängen durchgeführt und die Anzahl der Wellenlängenkanäle anschließend erhöht.

Die Gewinne aller spektralen und räumlichen Kanäle sind in Abbildung 7.6(a) dargestellt. Da der EDFA in einem schwach gesättigten Betriebspunkt betrieben wird, ist das Gewinnspektrum nur wenig verkippt und der maximale Gewinn tritt bei  $\approx 1530$  nm auf. Für beide Fasern konnte durch den Algorithmus ein Gewinn von 20 dB bei 1540 nm erzielt werden. Eine leicht unterschiedliche Verkipfung der Gewinnspektren verschiedener Moden ist erkennbar.

Die resultierenden  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ - und  $\text{MDG}_{\text{rms}}$ -Werte für eine aktive Faser mit Stufenbrechzahlprofil bei beiden untersuchten Wellenlängen ist in Abbildung 7.6(b) dargestellt. Die minimalen Werte treten in der Nähe der optimierten Wellenlänge von 1540 nm auf. Zu beiden Seiten des Spektrums steigt der MDG an. Dieses Verhalten lässt sich durch die spektrale Gewinnverkipfung der einzelnen Moden erklären. Da sich die Signalmoden jeweils in leicht unterschiedlichen Sättigungszuständen befinden, ist der Einfluss des Absorptionswirkungsquerschnittsspektrums für die Signalmoden verschieden. Im Vergleich zum Gewinnspektrum des zweistufigen Aufbaus in Abbildung 6.11 ist eine stärkere Abhängigkeit des MDG von der Wellenlänge zu erkennen. Eine mögliche Begründung ist der Aufbau des Verstärkers aus zwei Stufen in Abschnitt 6.3, bei dem sich die resultierenden Gewinnverkipfungen der ersten und zweiten Stufe gegenseitig teilweise aufheben können. Eine weitere Begründung kann die Tatsache sein, dass im zweistufigen Aufbau, aufgrund von Restriktionen in der Übertragungsfaser, die beiden Modengruppen höchster Ordnung nicht zur Signalübertragung genutzt wurden.

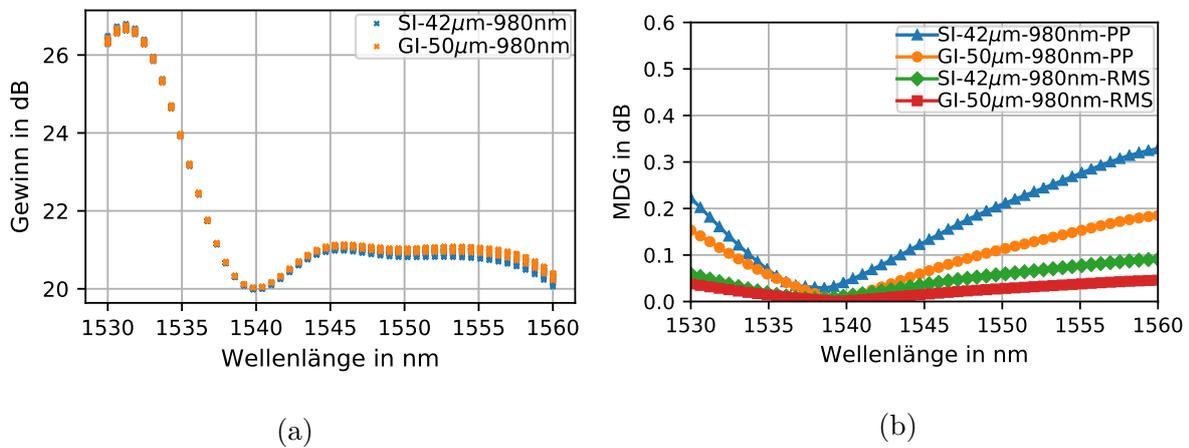
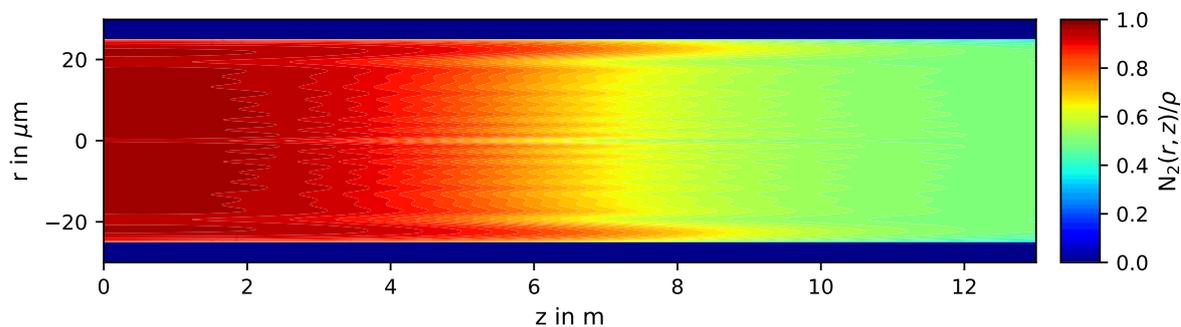
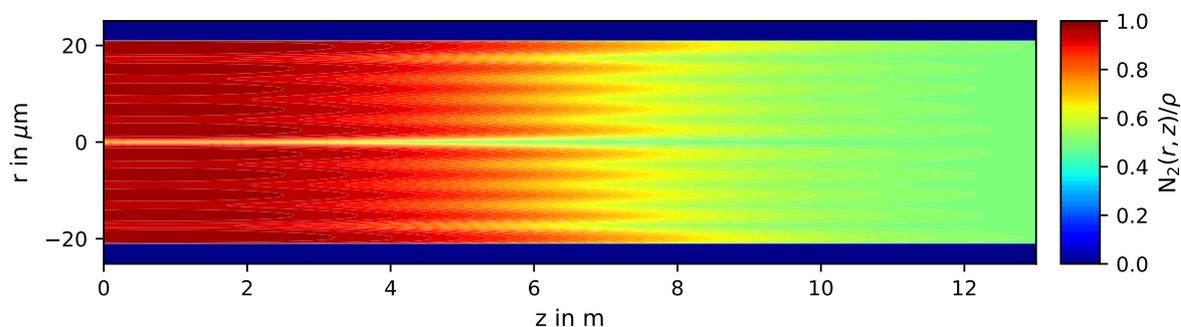


Abbildung 7.6.: Resultierende Gewinnspektren aller Signalmoden mit den optimierten Pumpleistungsverteilungen unter Verwendung verschiedener Fasertypen und einer Pumpwellenlänge von 980 nm (a); Resultierende  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ - und  $\text{MDG}_{\text{rms}}$ -Werte für beide verwendeten Fasertypen (b).

Für das Gradientenbrechzahlprofil lässt sich der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  für alle spektralen Kanäle auf unter 0,2 dB und der  $\text{MDG}_{\text{rms}}$  auf unter 0,05 dB minimieren. Unter Verwendung des Stufenbrechzahlprofils kann der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  auf unter 0,33 dB und der  $\text{MDG}_{\text{rms}}$  auf unter 0,1 dB minimiert werden.



(a) Gradientenbrechzahlprofil



(b) Stufenbrechzahlprofil

Abbildung 7.7.: Räumlich aufgelöste relative Besetzungsdichte des oberen Laserniveaus einer EDF mit Gradientenbrechzahlprofil (a) und Stufenbrechzahlprofil (b) unter Verwendung einer optimierten Pumpleistungsverteilung zur Angleichung der Gewinne von 55 Signalmoden.

Für das Verständnis der erzielbaren Gewinnangleichung ist es sinnvoll, die normierten Besetzungsdichten des oberen Laserniveaus für beide Fasertypen zu betrachten. In Abbildung 7.7 sind die normierten Besetzungsdichten des oberen Laserniveaus für beide Brechzahlprofile dargestellt. Für das Gradientenprofil ist eine Überhöhung der Besetzungsdichte im äußeren Bereich des Faserkerns zu erkennen. Dieser Bereich wird folglich mit einer hohen Pumpleistung versorgt. Im Inneren des Faserkerns ist eine leichte Schwankung in radialer Richtung erkennbar. Das Maximum am äußeren Rand des Faserkerns und das daran anschließende Minimum erinnern an das optimierte Erbium-Dotierungsprofil aus Abbildung 5.4(a). Die Schwankungen im Inneren des Faserkerns sind in Abbildung 5.4(a) nicht zu erkennen, können allerdings durch die Einteilung des Faserkerns in 10 Ringe in dieser Untersuchung auch nicht abgebildet werden. Für das Stufenbrechzahlprofil ergibt sich in radialer Richtung eine Verteilung mit 5 definierten Maxima in radialer Richtung. Das äußerste Maximum ist dabei das größte. Sowohl die Position als auch die Höhe der Maxima und Minima erinnert an das optimierte Erbium-Dotierungsprofil aus Abbildung 5.6(a). Insgesamt weisen die relativen Besetzungsdichten im Inneren des Faserkerns eine gute Übereinstimmung mit den optimierten Dotierungsprofilen aus Kapitel 5 auf.

Das Spektrum der Rauschzahlen für alle Signalmoden und beide Brechzahlprofile ist in Abbildung 7.8 dargestellt. Die Rauschzahlen schwanken spektral um  $\approx 0,1$  dB. Die Differenz der Rauschzahlen der Moden mit der größten bzw. kleinsten Rauschzahl sind in rot dargestellt. Für beide Fasertypen ergeben sich Rauschzahlunterschiede von unter  $0,55$  dB für alle betrachteten WDM-Kanäle. Außerdem ergeben sich für das Stufenbrechzahlprofil leicht geringere Rauschzahlunterschiede als für das Gradientenbrechzahlprofil. Die Rauschzahlen aller Kanäle liegen allerdings für beide Fasertypen nahe am Quantenlimit von  $3$  dB. Für alle Signalkanäle kann somit ein gutes Rauschverhalten erzielt werden.

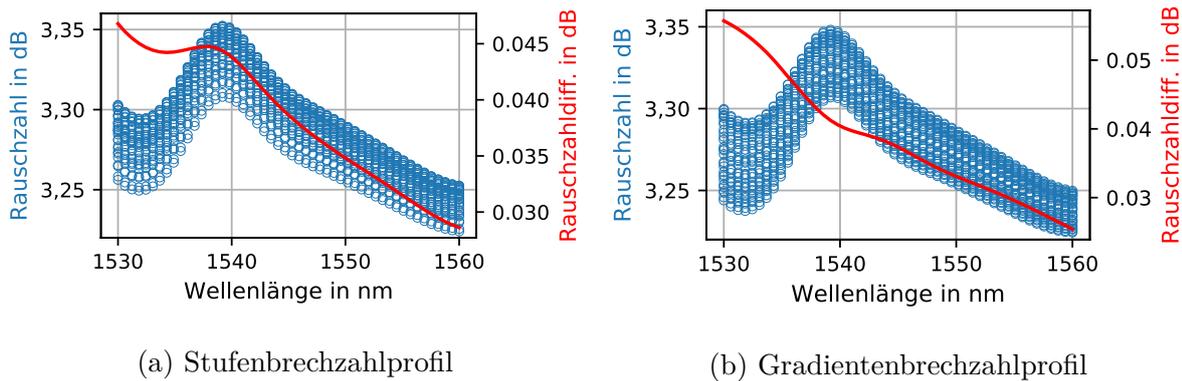


Abbildung 7.8.: Resultierende Rauschzahlen für alle räumlichen und spektralen Kanäle unter Verwendung einer optimierten Pumpleistungsverteilung und eines Stufen- (a) bzw. Gradientenbrechzahlprofils (b). In rot ist jeweils die Rauschzahldifferenz zwischen den Moden über der Wellenlänge eingezeichnet.

Insgesamt wird in diesem Kapitel gezeigt, dass sich in MDM-Systemen für aktive Fasern mit Gradienten- und Stufenbrechzahlprofil die Signalgewinne von bis zu 55 Moden durch eine Optimierung der Pumpleistungsdichteverteilung auf unter  $0,03$  dB angleichen lassen. Dieses Verhalten wurde sowohl für eine Pumpwellenlänge von  $980$  nm als auch für eine Pumpwellenlänge von  $1480$  nm gezeigt. In einer einzigen EDF lassen sich außerdem unterschiedlich viele Moden mit annähernd gleichen Gewinnen verstärken. Für beide betrachteten Brechzahlprofile und beide betrachteten Pumpwellenlängen ist somit der Betrieb eines MDM-EDFA in einem aufrüstbaren System möglich, bei dem die Anzahl der räumlichen Kanäle zur Laufzeit erhöht werden kann, um die Übertragungskapazität zu steigern. Bei Verwendung von Stufenbrechzahlprofilen für die EDF führen die Moden höchster Ordnung zu Schwierigkeiten bei der Angleichung der Gewinne. Dies kann sowohl unter Verwendung einer Stufenfaser mit  $37,12$   $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser als auch bei einer Faser mit  $60$   $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser beobachtet werden. Eine Erhöhung des Kerndurchmessers kann durch eine bessere Führung der verwendeten Moden im Faserkern und einer Erhöhung der Anzahl verwendbarer Pumpmoden dazu verwendet werden, um die Gewinne aller 55 verwendeten Signalmoden in einer Stufenfaser auf unter  $0,03$  dB anzugleichen. In Kombination mit WDM kann für 55 Signalmoden ein  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  unter  $0,1$  dB in der Nähe des optimierten WDM-Kanals erreicht werden. Es zeigt sich, dass der  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  mit einem Gradientenbrechzahlprofil für alle WDM-Kanäle auf unter  $0,20$  dB minimiert werden kann, während mit einem Stufenbrechzahlprofil Werte unter  $0,32$  dB erreicht werden. Mit den gewählten Parametern ist mit dem Gradientenbrechzahlprofil folglich eine bessere Gewinnangleichung erreichbar.

## *7. Optimierung der Pumpleistungsverteilung durch Linearisierung im Arbeitspunkt*

---

Es lässt sich abschließend festhalten, dass die Kapazität zukünftiger MDM-Systeme vermutlich nicht grundsätzlich durch Gewinnunterschiede der optischen Verstärker limitiert wird.

## 8. Zusammenfassung und Fazit

In dieser Arbeit wurde die Skalierbarkeit der Signalmodenzahl in Erbium-dotierten Faserverstärkern mit Modenmultiplex untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

In Kapitel 3 wurde der Einfluss des Sättigungsverhaltens auf den Verlauf des MDG entlang der EDF unter Verwendung von vielmodiger Pumpstrahlung untersucht. Für Systeme, die nicht alle in der EDF ausbreitungsfähigen Signalmoden verwenden, zeigt sich, dass der MDG entlang der EDF sinken kann, da die EDF ein radial abhängiges Sättigungsverhalten aufweist. Abhängig von der Anzahl der verwendeten Signalmoden bildet sich ein Minimum des MDG entlang der Faser aus. Es ist folglich in bestimmten Betriebszuständen möglich, den MDG eines MDM-EDFA durch passende Wahl der Faserlänge zu beeinflussen. Dieser Effekt ist allerdings nur für ein Gradientenbrechzahlprofil zu beobachten. Unter Verwendung eines Stufenbrechzahlprofils ist die Abhängigkeit des MDG von der Faserlänge schwächer ausgeprägt.

Außerdem ergeben sich verschiedene MDG je nach Anzahl der verwendeten Signalmoden. Beispielhaft konnte an einer EDF mit Gradientenbrechzahlprofil und 50  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser in Kapitel 4 gezeigt werden, dass unter Verwendung von 36 Signalmoden ein geringer  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  unter 0,5 dB erzielt werden kann, während sich unter Verwendung von 10 Signalmoden deutlich höhere  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  von bis zu  $\approx 2,5$  dB ergeben. Es ist folglich nicht ausreichend, einen MDM-EDFA ausschließlich für die maximale Anzahl an Signalmoden auszulegen. Im Gegenteil müssen bei der Systemauslegung alle möglichen Konfigurationen an Signalmoden, beispielsweise im Kontext eines aufrüstbaren Systems, betrachtet werden. Im Bezug auf die Faserlänge ergibt sich, für einen konstanten Gewinn, ein Kompromiss zwischen einem guten Rauschverhalten und geringen MDG kurzer Fasern sowie dem geringeren Pumpleistungsbedarf langer Fasern.

In Kapitel 5 wurde untersucht, wie das optimale Erbium-Dotierungsprofil aussehen müsste, um unter der Annahme einer vollständigen Invertierung aller Erbiumionen den MDG zu minimieren. Hierzu wurde der Faserkern transversal in verschiedene Anzahlen an ringförmigen Abschnitten eingeteilt, deren Dotierungsdichte mithilfe eines NNLS-Algorithmus optimiert wurde. Unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils zeigt sich, dass sich die Gewinne von 55 Signalmoden in einer EDF mit 50  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser im Wesentlichen durch eine Erhöhung der  $\text{Er}^{3+}$ -Dotierungsdichte im äußeren Kernbereich um  $\approx 34\%$  im Vergleich zur Dotierungsdichte auf der Faserachse und mit einer Breite von 2,78  $\mu\text{m}$  auf weniger als 0,05 dB angleichen lassen. Für eine EDF mit Stufenbrechzahlprofil und 37,12  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser ist hingegen eine stark alternierende Dotierungsdichte der jeweils 1,86  $\mu\text{m}$  breiten Ringe notwendig, um einen  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  unter 0,05 dB für 55 Signalmoden zu erzielen. Für eine Angleichung der Signalgewinne durch Optimierung der Erbium-Dotierung im Faserkern eignet sich somit das Gradientenbrechzahlprofil, durch die einfacher aufgebauten Erbium-Dotierungsprofile, besser.

In Kapitel 6 konnte gezeigt werden, dass der MDG durch eine Anpassung der Pumpleistungsverteilung minimiert werden kann, indem jedem Signalmodus ein Pumpmodus bei 1480 nm

zugewiesen wird, der einen höheren Überlapp mit dem betrachteten Signalmodus als mit jedem anderen Signalmodus besitzt. Durch die geringe Wellenlängendifferenz zwischen den Signal- und Pumpmoden besitzen die Pumpmoden jeweils einen großen Überlapp mit den korrespondierenden Signalmoden gleicher Ordnung und können zur selektiven Anpassung der Signalgewinne verwendet werden. Mit einem einfachen iterativen Verfahren, bei dem jeweils die Gewinne der Signalmoden mittels Anpassung korrespondierender Pumpmoden eingestellt werden, kann der MDG minimiert werden. Beispielhaft wurde dieses Vorgehen an den 55 Moden einer  $50\ \mu\text{m}$  Gradientenfaser und einer  $37,12\ \mu\text{m}$  Stufenfaser vorgestellt. Während sich der MDG unter Verwendung des Gradientenbrechzahlprofils auf unter  $0,15\ \text{dB}$  minimieren lässt, kann für ein Stufenbrechzahlprofil unter Verwendung von 55 Signalmoden keine Minimierung unter  $1,29\ \text{dB}$  erreicht werden. Außerdem wurde gezeigt, dass mit diesem Vorgehen in einem zweistufigen Verstärkerbau 120 Signalmoden mit jeweils 100 WDM-Kanälen in einer  $62,5\ \mu\text{m}$  EDF mit Gradientenbrechzahlprofil rauscharm und mit weniger als  $0,1\ \text{dB}$   $\text{MDG}_{\text{pp}}$  verstärkt werden können. Auch für Betriebspunkte des Verstärkers mit weniger als 120 Signalmoden konnte jeweils ein  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  unter  $0,1\ \text{dB}$  erreicht werden. Der Betrieb eines solchen Verstärkers mit verschiedenen Anzahlen an Signalmoden, beispielsweise durch eine Erhöhung der Signalmodenzahl zur Steigerung der Übertragungskapazität in einem Aufrüstszenario, ist somit prinzipiell möglich. In jedem Aufrüstschrift konnten für alle spektralen und räumlichen Kanäle Rauschzahlen in der Nähe des Quantenlimits und ein Gewinn von  $28\ \text{dB}$  erreicht werden.

In Kapitel 7 wurde ein weiteres Verfahren zur Optimierung der Pumpleistungsverteilung vorgestellt. Mit diesem auf einer Linearisierung im Arbeitspunkt basierenden Verfahren konnten geringe MDG unter  $0,03\ \text{dB}$  sowohl für Gradienten- als auch für Stufenbrechzahlprofile unter Verwendung von Pumpstrahlung bei  $1480\ \text{nm}$  oder  $980\ \text{nm}$  erreicht werden. Es konnte gezeigt werden, dass sich bei Verwendung aller 55 Signalmoden einer  $50\ \mu\text{m}$  Gradientenfaser und für beide Pumpwellenlängen  $\text{MDG}_{\text{pp}}$ -Werte unter  $0,1\ \text{dB}$  erzielen lassen. Für das Stufenbrechzahlprofil zeigte sich, dass eine Angleichung der Signalgewinne für die Modengruppen höchster Ordnung unter  $0,03\ \text{dB}$  nicht ohne Weiteres möglich ist. Nach Erhöhung des Kerndurchmessers von  $37,12\ \mu\text{m}$  auf  $42\ \mu\text{m}$  konnte für das Stufenbrechzahlprofil für 55 Signalmoden ebenfalls ein  $\text{MDG}_{\text{pp}}$  unter  $0,03\ \text{dB}$  erreicht werden. Dies führt zu einer besseren Führung der benötigten 55 Signalmoden im Faserkern und gleichzeitig zu einer Erhöhung der Anzahl an verfügbaren Pumpmoden. Außerdem wurde gezeigt, dass das vorgestellte Verfahren für beide betrachteten Brechzahlprofile ebenfalls in Kombination mit WDM anwendbar ist und sich Rauschzahlen nahe des Quantenlimits sowie geringe modenabhängige Gewinne unter  $0,32\ \text{dB}$  im gesamten C-Band erreichen lassen.

In dieser Arbeit wurde mithilfe verschiedener Verfahren gezeigt, dass auch unter Verwendung von mehr als 100 Signalmoden MDM-EDFA mit geringem MDG realisiert werden können. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen außerdem, dass zur Angleichung der Signalgewinne sowohl bei einer Anpassung des Erbium-Dotierungsprofils als auch bei einer Anpassung der Pumpleistungsverteilung unter Verwendung eines Gradientenbrechzahlprofils weniger Aufwand betrieben werden muss als bei einem Stufenbrechzahlprofil. Prinzipiell ist es jedoch mit beiden Brechzahlprofilen möglich, alle Kanäle eines kombinierten MDM-WDM-Systems simultan in einem einzigen EDFA rauscharm, energieeffizient und mit geringem MDG zu verstärken. Insgesamt deuten die Ergebnisse dieser Arbeit an, dass MDM-EDFA sich für Systeme mit vielen Moden zur simultanen Verstärkung aller Signalkanäle in der optischen Ebene eignen. Nachdem EDFA die Wegbereiter des Wellenlängenmultiplex waren, könnten sie eine ähnlich entscheidende Rolle

---

bei der Einführung des Modenmultiplex spielen.



# Literaturverzeichnis

## Eigene Veröffentlichungen

- [JK1] S. Jeurink und P. M. Krummrich. „Multimode EDFA Designs with Reduced MDG by Considering Spatially Dependent Saturation Effects“. In: *Konferenzband OFC*. W2A.57. San Diego, USA, März 2018.
- [JK2] S. Jeurink und P. M. Krummrich. „Optimization of the Erbium Doping Profile in Erbium-Doped Fiber Amplifiers for Mode-Division Multiplexing“. In: *Photonic Networks; 19. ITG Symposium*. Leipzig, DEU, Juni 2018.
- [JK3] S. Jeurink und P. M. Krummrich. „Multimode EDFA with Scalable Mode Selective Gain Control at 1480-Nm Pump Wavelength“. In: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 30.9 (2018), S. 849–852.
- [JK4] S. Jeurink und P. M. Krummrich. „Impact of MDM-EDFA Saturation Effects on Mode Scaling for Capacity Increases“. In: *Konferenzband OFC*. Th1B.3. San Diego, USA, März 2019.
- [JK5] C. M. Spenner, S. Jeurink und P. M. Krummrich. „Experimental Analysis of Inter Mode Group Coupling at Connectors in Graded Index Multi Mode Fibers“. In: *Photonic Networks; 20. ITG-Symposium*. Leipzig, DEU, Mai 2019.

## Literaturquellen

- [1] Cisco. *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022*. [Online; zugegriffen 7. August 2021]. 2019. URL: <https://cyrekdigital.com/pl/blog/content-marketing-trendy-na-rok-2019/white-paper-c11-741490.pdf>.
- [2] DE-CIX Frankfurt. *DE-CIX Frankfurt Statistics*. [Online; zugegriffen 7. August 2021]. 2020. URL: <https://www.de-cix.net/de/locations/germany/frankfurt/statistics>.
- [3] Amsterdam Internet Exchange. *Historical Monthly Traffic Volume*. [Online; zugegriffen 7. August 2021]. 2020. URL: <https://stats.ams-ix.net/historical.html?start=200101;%20years=18>.
- [4] Seattle Internet Exchange. *SIX Aggregate Traffic - 5 Minute Sampling*. [Online; zugegriffen 7. August 2021]. 2020. URL: <https://www.seattleix.net/statistics/#multiyear>.
- [5] Sandvine. *The Global Internet Phenomena Report*. [Online; zugegriffen 7. August 2021]. 2018. URL: <https://www.sandvine.com/hubfs/downloads/phenomena/2018-phenomena-report.pdf>.

- 
- [6] P. J. Winzer und D. T. Neilson. „From Scaling Disparities to Integrated Parallelism: A Decathlon for a Decade“. In: *J. Light. Technol.* 35.5 (2017), S. 1099–1115.
- [7] Peter J. Winzer u. a. „Fiber-Optic Transmission and Networking: The Previous 20 and the Next 20 Years“. In: *Opt. Express* 26.18 (2018), 24190–24239.
- [8] A. Chralyvy. „Plenary Paper: The Coming Capacity Crunch“. In: *Konferenzband ECOC*. Plenary Session 1.0.2. Wien, AUT, Sep. 2009.
- [9] R.J. Essiambre u. a. „Capacity Limits of Optical Fiber Networks“. In: *J. Lightwave Technol.* 28.4 (2010), S. 662–701.
- [10] R. J. Essiambre und R. W. Tkach. „Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks“. In: 100.5 (2012), S. 1035–1055.
- [11] Ronen Dar, Mark Shtaif und Meir Feder. „New Bounds on the Capacity of the Nonlinear Fiber-Optic Channel“. In: *Opt. Lett.* 39.2 (2014), S. 398–401.
- [12] Peter M. Krummrich und Simon Akhtari. „Selection of Energy Optimized Pump Concepts for Multi Core and Multi Mode Erbium Doped Fiber Amplifiers“. In: *Opt. Express* 22.24 (2014), S. 30267–30280.
- [13] Jens Malmodin und Dag Lundén. „The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015“. In: *Sustainability* 10.9 (2018), S. 187–208.
- [14] Global e-Sustainability Initiative (GeSI). *SMARTer2030*. [Online; zugegriffen 7. August 2021]. 2015. URL: [http://smarter2030.gesi.org/downloads/Full\\_report.pdf](http://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf).
- [15] S. Berdagué und P. Facq. „Mode Division Multiplexing in Optical Fibers“. In: *Appl. Opt.* 21.11 (1982), S. 1950–1955.
- [16] S. Bade u. a. „Fabrication and Characterization of a Mode-Selective 45-Mode Spatial Multiplexer Based on Multi-Plane Light Conversion“. In: *Konferenzband OFC*. Th4B.3. San Diego, USA, März 2018.
- [17] N. K. Fontaine u. a. „Scalable Mode Sorter Supporting 210 Hermite-Gaussian Modes“. In: *Konferenzband OFC*. Th4B.4. San Diego, USA, März 2018.
- [18] Pierre Sillard u. a. „50  $\mu\text{m}$  Multimode Fibers for Mode Division Multiplexing“. In: *J. Lightw. Technol.* 34.8 (2016), S. 1672–1677.
- [19] P. Sillard. „Few-Mode Fibers for Space Division Multiplexing“. In: *Konferenzband OFC*. Th1J.1. Anaheim, USA, März 2016.
- [20] R. Ryf u. a. „High-Spectral-Efficiency Mode-Multiplexed Transmission over Graded-Index Multimode Fiber“. In: *Konferenzband ECOC*. Th3B.1. Rom, ITA, Sep. 2018.
- [21] Nicolas K. Fontaine u. a. „Multi-Mode Optical Fiber Amplifier Supporting over 10 Spatial Modes“. In: *Konferenzband OFC*. Th5A.4. Anaheim, USA, März 2016.
- [22] M. Wada u. a. „Core-pumped 10-mode EDFA with Cascaded EDF Configuration“. In: *Konferenzband ECOC*. P.1.01. Valencia, ES, Sep. 2016.
- [23] Z. S. Eznavah u. a. „Ultra-Low DMG Multimode EDFA“. In: *Konferenzband OFC*. Th4A.4. San Diego, USA, März 2017.
- [24] M. Wada u. a. „Low Mode Dependent Gain Few-Mode EDFA with Fiber Based Mode Scrambler“. In: *Konferenzband OECC/PSC*. MC2-4. Fukuoka, JPN, Juli 2019.

- 
- [25] J. C. Alvarado-Zacarias, N. K. Fontaine u. a. „Assembly and Characterization of a Multimode EDFA Using Digital Holography“. In: *Konferenzband OFC*. Th1H.6. San Diego, USA, März 2020.
- [26] V. A. J. M. Sleiffer u. a. „20 X 960 Gb/s MDM-DP-32QAM Transmission over 60km FMF with Inline MM-EDFA“. In: *Konferenzband ECOC*. We.2.D.2. London, GBR, Sep. 2013.
- [27] E. Ip u. a. „146λ X 6 X 19-Gbaud Wavelength-and Mode-Division Multiplexed Transmission over 10 X 50-Km Spans of Few-Mode Fiber with a Gain-Equalized Few-Mode EDFA“. In: *J. Light. Technol.* 32.4 (2014), S. 790–797.
- [28] R. Ryf u. a. „72-Tb/s Transmission over 179-Km All-Fiber 6-Mode Span with Two Cladding Pumped In-Line Amplifiers“. In: *Konferenzband ECOC*. Tu.3.2.2. Valencia, ESP, Sep. 2015.
- [29] Y. Wakayama u. a. „266.1-Tbit/s Transmission over 90.4-Km 6-Mode Fiber with Inline Dual C+L-Band 6-Mode EDFA“. In: *J. Light. Technol.* 37.2 (2019), S. 404–410.
- [30] Peter J. Winzer und Gerard J. Foschini. „MIMO Capacities and Outage Probabilities in Spatially Multiplexed Optical Transport Systems“. In: *Opt. Express* 19.17 (Aug. 2011), S. 16680–16696.
- [31] Peter J. Winzer u. a. „Mode-Dependent Loss, Gain and Noise in MIMO-SDM Systems“. In: *Konferenzband ECOC*. Mo.3.3.2. Sep. 2014.
- [32] Ezra Ip u. a. „Impact of Mode-Dependent Loss on Long-Haul Transmission Systems Using Few-Mode Fibers“. In: *Konferenzband OFC/NFOEC*. W4I.4. Anaheim, USA, März 2016.
- [33] Keang-Po Ho und Joseph M. Kahn. „Mode-Dependent Loss and Gain: Statistics and Effect on Mode-Division Multiplexing“. In: *Opt. Express* 19.17 (2011), S. 16612–16635.
- [34] Neng Bai u. a. „Multimode Fiber Amplifier with Tunable Modal Gain Using a Reconfigurable Multimode Pump“. In: *Opt. Express* 19.17 (2011), 16601–16611.
- [35] Y. Jung u. a. „First Demonstration and Detailed Characterization of a Multimode Amplifier for Space Division Multiplexed Transmission Systems“. In: *Opt. Express* 19.26 (2011), B952–B957.
- [36] G. Le Cocq u. a. „Design and Characterization of a Multimode EDFA Supporting 4 Transverse Mode Groups for Modal Division Multiplexed Transmissions“. In: *Konferenzband ECOC*. Tu.3.F.4. Sep. 2012.
- [37] E. Ip. „Gain Equalization for Few-Mode Fiber Amplifiers Beyond Two Propagating Mode Groups“. In: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 24.21 (2012), S. 1933–1936.
- [38] E. Voges und K. Petermann. *Optische Kommunikationstechnik*. 1. Aufl. Springer, 2002.
- [39] Nokia. *PSE Super Coherent Technology*. [Online; zugegriffen 7. August 2021]. 2018. URL: <https://www.nokia.com/networks/technologies/pse-super-coherent-technology/#pse-3-taking-light-to-the-limit>.
- [40] C. E. Shannon. „A Mathematical Theory of Communication“. In: *The Bell System Tech. J.* 27.3 (1948), 379–423 und 623–656.
- [41] K. Grobe und M. Eiselt. *Wavelength Division Multiplexing*. 1. Aufl. John Wiley & Sons, Inc., 2014.

- 
- [42] A. Napoli u. a. „Perspectives of Multi-Band Optical Communication Systems“. In: *Konferenzband OECC*. 5B3-1. Jeju, KOR, Juli 2018.
- [43] K. Mukasa. „100-Core Fibers“. In: *Konferenzband OECC/PSC*. TuC3-3. Juli 2019.
- [44] J. Sakaguchi u. a. „228-Spatial-Channel Bi-Directional Data Communication System Enabled by 39-Core 3-Mode Fiber“. In: *J. Light. Technol.* 37.8 (2019), S. 1756–1763. ISSN: 1558-2213.
- [45] B. J. Puttnam u. a. „High Data-Rate and Long Distance MCF Transmission with 19-Core C+L Band Cladding-Pumped EDFA“. In: *J. Light. Technol.* 38.1 (2020), S. 123–130.
- [46] N. K. Fontaine u. a. „Evaluation of Photonic Lanterns for Lossless Mode-Multiplexing“. In: *Konferenzband ECOC*. Th.2.D.6. Amsterdam, NLD, Sep. 2012.
- [47] Guillaume Labroille u. a. „Efficient and Mode Selective Spatial Mode Multiplexer Based on Multi-Plane Light Conversion“. In: *Opt. Express* 22.13 (2014), S. 15599–15607.
- [48] J. Carpenter und T. D. Wilkinson. „Holographic Mode-Group Division Multiplexing“. In: *Konferenzband OFC/NFOEC*. OThN3. Los Angeles, USA, März 2011.
- [49] P. Sillard u. a. „Few-Mode Fiber for Uncoupled Mode-Division Multiplexing Transmissions“. In: *Konferenzband ECOC*. Tu.5.LeCervin.7. Genf, CHE, Sep. 2011.
- [50] R. Ryf u. a. „Space-Division Multiplexing over 10 Km of Three-Mode Fiber Using Coherent  $6 \times 6$  MIMO Processing“. In: *Konferenzband OFC/NFOEC*. PDPB10. Los Angeles, USA, März 2011.
- [51] Sebastian Randel u. a. „ $6 \times 56$ -Gb/s Mode-Division Multiplexed Transmission over 33-Km Few-Mode Fiber Enabled by  $6 \times 6$  MIMO Equalization“. In: *Opt. Express* 19.17 (2011), S. 16697–16707.
- [52] P. Sillard u. a. „Rescaled Multimode Fibers for Mode-Division Multiplexing“. In: *J. Light. Technol.* 35.8 (2017), S. 1444–1449.
- [53] R. Ryf u. a. „Mode-Multiplexed Transmission over 36 Spatial Modes of a Graded-Index Multimode Fiber“. In: *Konferenzband ECOC*. Tu1G.2. Rom, ITA, Sep. 2018.
- [54] S. Wittek u. a. „Mode-Multiplexed Transmission Within and Across Mode Groups of a Multimode-Fiber“. In: *Konferenzband OFC*. M2I.2. San Diego, USA, März 2019.
- [55] D. Gloge. „Weakly Guiding Fibers“. In: *Appl. Opt.* 10.10 (1971), S. 2252–2258.
- [56] Joel Carpenter. *Modelab Spatial Light Modulator Software*. Verwendung des 1D Matlab Modenlösers. 2019.
- [57] International Organization for Standardization (ISO). *Information Technology - Generic Cabling for Customer Premises - Part 1: General Requirements*. Standard ISO/IEC 11801. 2017.
- [58] International Telecommunication Union (ITU). *Characteristics of a 50/125  $\mu\text{m}$  Multimode Graded Index Optical Fibre Cable for the Optical Access Network*. Standard ITU G651.1. 2018. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.651.1>.
- [59] Telecommunications Industry Association (TIA). *Detail Specification for 850 $\mu\text{m}$  Laser Optimized, 50 $\mu\text{m}$  Core Diameter/125 $\mu\text{m}$  Cladding Diameter Class 1a Graded-Index Multimode Optical Fibers Suitable for Manufacturing OM<sub>4</sub> Cabled Optical Fiber*. Standard TIA/EIA 492AAAD. 2009.

- 
- [60] Reinhold Noé. *Essentials of Modern Optical Fiber Communication*. 1. Aufl. Springer, 2010.
- [61] S. Ö. Arik, D. Askarov und J. M. Kahn. „Effect of Mode Coupling on Signal Processing Complexity in Mode-Division Multiplexing“. In: *J. Light. Technol.* 31.3 (2013), S. 423–431.
- [62] G.P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*. 5. Aufl. Elsevier, 2013.
- [63] J. P. Gordon und H. Kogelnik. „PMD Fundamentals: Polarization Mode Dispersion in Optical Fibers“. In: 97.9 (2000), S. 4541–4550.
- [64] I. Roudas und J. Kwapisz. „Stokes Space Representation of Modal Dispersion“. In: *IEEE Photonics Journal* 9.5 (2017), S. 1–15.
- [65] Cristian Antonelli u. a. „Stokes-Space Analysis of Modal Dispersion in Fibers with Multiple Mode Transmission“. In: *Opt. Express* 20.11 (2012), S. 11718–11733.
- [66] Shanhui Fan und Joseph M. Kahn. „Principal Modes in Multimode Waveguides“. In: *Opt. Lett.* 30.2 (2005), S. 135–137.
- [67] Joel Carpenter, Benjamin Eggleton und Jochen Schröder. „Observation of Eisenbud–Wigner–Smith States As Principal Modes in Multimode Fibre“. In: *Nature Photonics* 9 (2015).
- [68] T. Sakamoto u. a. „Differential Mode Delay Managed Transmission Line for WDM-MIMO System Using Multi-Step Index Fiber“. In: *J. Light. Technol.* 30.17 (2012), S. 2783–2787.
- [69] S. Randel u. a. „Mode-Multiplexed 6×20-GBd QPSK Transmission over 1200-Km DGD-Compensated Few-Mode Fiber“. In: *Konferenzband OFC/NFOEC*. PDP5C.5. Los Angeles, USA, März 2012.
- [70] S. Ö. Arik, K. Ho und J. M. Kahn. „Group Delay Management and Multiinput Multioutput Signal Processing in Mode-Division Multiplexing Systems“. In: *J. Light. Technol.* 34.11 (2016), S. 2867–2880.
- [71] Lynn E. Nelson u. a. „Statistics of Polarization Dependent Loss in an Installed Long-haul WDM System“. In: *Opt. Express* 19.7 (März 2011), S. 6790–6796.
- [72] Karthik Choutagunta u. a. „Characterizing Mode-Dependent Loss and Gain in Multimode Components“. In: *J. Lightw. Technol.* 36.18 (2018), S. 3815–3823.
- [73] R. J. Mears u. a. „Low-Noise Erbium-Doped Fibre Amplifier Operating at 1.54 $\mu\text{m}$ “. In: *Electron. Lett.* 23.19 (1987), S. 1026–1028.
- [74] E. Desurvire, J. R. Simpson und P. C. Becker. „High-Gain Erbium-Doped Traveling-Wave Fiber Amplifier“. In: *Opt. Lett.* 12.11 (1987), S. 888–890.
- [75] J. Zyskind und A. Srivastara. „Optically Amplified WDM Networks“. In: 1. Aufl. Elsevier, 2011.
- [76] E. Desurvire. *Erbium-Doped Fiber Amplifier*. 1. Aufl. John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [77] Frank Pedrotti u. a. *Optik Für Ingenieure*. Springer, 2002.
- [78] C. R. Giles und E. Desurvire. „Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers“. In: *J. Lightwave Technol.* 9.2 (1991), S. 271–283.

- 
- [79] S. Akhtari und P. M. Krummrich. „Impact of Mode Beating Effects in Optical Multi-Mode Amplifiers for Space Division Multiplexing“. In: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 25.24 (2013), S. 2482–2485.
- [80] Simon Akhtari u. a. „Experimental Analysis of the Impact of Beating Between Signal Modes on Few-Mode Erbium Doped Fiber Amplifier Performance“. In: *Konferenzband OFC*. Tu3C.4. Anaheim, USA, März 2015.
- [81] E. Lim u. a. „Vector Mode Effects in Few Moded Erbium Doped Fiber Amplifiers“. In: *Konferenzband OFC/NFOEC*. OTu3G.2. Anaheim, USA, März 2013.
- [82] R. Nasiri Mahalati u. a. „Adaptive Modal Gain Equalization Techniques in Multi-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifiers“. In: *J. Lightw. Technol.* 32.11 (2014), S. 2133–2143.
- [83] M. Tachibana u. a. „Erbium-Doped Fiber Amplifier with Flattened Gain Spectrum“. In: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 3.2 (1991), S. 118–120.
- [84] A. M. Vengsarkar u. a. „Long-Period Fiber Gratings As Band-Rejection Filters“. In: *J. Light. Technol.* 14.1 (1996), S. 58–65.
- [85] E. Ip u. a. „Impact of Mode-Dependent Loss on Long-Haul Transmission Systems Using Few-Mode Fibers“. In: *Konferenzband OFC/NFOEC*. W4I.4. Anaheim, USA, März 2016.
- [86] Stefan Warm und Klaus Petermann. „Splice Loss Requirements in Multi-Mode Fiber Mode-Division-Multiplex Transmission Links“. In: *Opt. Express* 21.1 (2013), S. 519–532.
- [87] E. Ip u. a. „Experimental Characterization of a Ring-Profile Few-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier Enabling Gain Equalization“. In: *Konferenzband OFC/NFOEC*. JTh2A.18. Anaheim, USA, März 2013.
- [88] Qiongyue Kang u. a. „Accurate Modal Gain Control in a Multimode Erbium Doped Fiber Amplifier Incorporating Ring Doping and a Simple LP01 Pump Configuration“. In: *Opt. Express* 20.19 (2012), S. 20835–20843.
- [89] G. Le Cocq, Y. Quiquempois und L. Bigot. „Optimization Algorithm Applied to the Design of Few-Mode Erbium Doped Fiber Amplifier for Modal and Spectral Gain Equalization“. In: *J. Light. Technol.* 33.1 (2015), S. 100–108.
- [90] A. F. Herbst und M. A. Romero. „Optimum Design of Few-Mode EDFAs by Using Topology Optimization“. In: *Konferenzband NOC*. Lissabon, PRT, Juni 2016, S. 46–51.
- [91] Y. Jung u. a. „Reconfigurable Modal Gain Control of a Few-Mode EDFA Supporting Six Spatial Modes“. In: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 26.11 (2014), S. 1100–1103.
- [92] R. Nasiri Mahalati u. a. „Adaptive Control of Mode-Dependent Gain in Multi-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifiers“. In: *Konferenzband SUM*. TuC3.3. Waikoloa, USA, Juli 2013.
- [93] E. Ip. „Gain Equalization for Few-Mode Fiber Amplifiers with More Than Two Propagating Mode Groups“. In: *Konferenzband SUM*. WC2.4. Seattle, USA, Juli 2012.
- [94] S. Akhtari und P. M. Krummrich. „Optical Amplifier with Rotationally Symmetrical Pump Modes for Enhanced Mode Multiplexing“. In: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 24.23 (2012), S. 2097–2100.
- [95] Daulet Askarov und Joseph M. Kahn. „Design of Transmission Fibers and Doped Fiber Amplifiers for Mode-Division Multiplexing“. In: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 24.21 (2012), S. 1945–1948.

- 
- [96] J. C. Alvarado-Zacarias u. a. „Coupled-Core EDFA Compatible with FMF Transmission“. In: *Konferenzband OFC*. Th4A.3. März 2018.
- [97] M. Wada u. a. „Channel Scrambling and Amplification Technique with Multi-Mode EDFA for Multi-Core Transmission System“. In: *Konferenzband ECOC*. M.2.A.4. Düsseldorf, DE, Sep. 2015.
- [98] M. Salsi u. a. „A Six-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier“. In: *Proc. ECOC, 2012*, (). post-deadline paper Th.3.A.6.
- [99] P. M. Krummrich und K. Petermann. „Evaluation of Potential Optical Amplifier Concepts for Coherent Mode Multiplexing“. In: *Konferenzband OFC/NFOEC*. OMH5. Los Angeles, USA, März 2011.
- [100] H. T. Friis. „Noise Figures of Radio Receivers“. In: 32.7 (1944). (Correction, vol. 32, no. 12, p. 729, Dec 1944), S. 419–422.
- [101] Eric Jones, Travis Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open Source Scientific Tools for Python*. [Online; zugegriffen 7. August 2021]. 2001–2020. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [102] K. Ho und J. M. Kahn. „Statistics of Group Delays in Multimode Fiber with Strong Mode Coupling“. In: *J. Lightwave Technol.* 29.21 (2011), S. 3119–3128.
- [103] Jan Pomplun u. a. „Adaptive Finite Element Method for Simulation of Optical Nano Structures“. In: *Phys. Status Solidi B* 244.10 (2007), S. 3419–3434.
- [104] Q. Kang u. a. „Design of Four-Mode Erbium Doped Fiber Amplifier with Low Differential Modal Gain for Modal Division Multiplexed Transmissions“. In: *Konferenzband OFC/NFOEC*. OTu3G.3. Anaheim, USA, März 2013.
- [105] D. Askarov und J. M. Kahn. „Design of Multi-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifiers for Low Mode-Dependent Gain“. In: *Konferenzband SUM*. WC2.2. Seattle, USA, Juli 2012.
- [106] S. Wittek u. a. „6thMode-Group Multiplexer for Intra-Mode Transmission over 50- $\mu\text{m}$  GI-Multimode Fiber“. In: *Konferenzband SUM*. MF2.3. Waikoloa, USA, Juli 2018.



# A. Abkürzungsverzeichnis

**ASE** verstärkte spontane Emission (engl. Amplified Spontaneous Emission)

**CD** chromatische Dispersion

**DCF** Dispersionskompensierende Faser (engl. Dispersion Compensating Fiber)

**DGD** differentielle Gruppenlaufzeit (engl. Differential Group Delay)

**DSL** Digital Subscriber Line

**DSP** digitale Signalverarbeitung (engl. Digital Signal Processing)

**EDFA** Erbium-dotierter Faserverstärker (engl. Erbium-Doped Fiber Amplifier)

**EDF** Erbium-dotierte Faser (engl. Erbium-Doped Fiber)

**FMF** Mehrmodenfaser (engl. Few-Mode Fiber)

**GFF** Gewinnglättungsfilter (engl. Gain Flattening Filter)

**ISI** Inter-Symbol-Interferenz

**LMS** Methode der kleinsten Quadrate (engl. Least-Mean-Squares)

**LPG** langperiodisches Faser-Gitter

**LP** linear polarisiert

**MCF** Mehrkernfaser (engl. Multicore Fiber)

**MDG** modenabhängiger Gewinn (engl. Mode-Dependent Gain)

**MDL** modenabhängige Dämpfung (engl. Mode-Dependent Loss)

**MDM** Modenmultiplex (engl. Mode-Division Multiplexing)

**MD** Modendispersion

**MIMO** Multiple-Input Multiple-Output

**MMF** Vielmodenfaser (engl. Multimode Fiber)

**MPLC** Multi-Plane Light Conversion

**NNLS** nichtnegative Methode der kleinsten Quadrate (engl. Non-Negative Least Squares)

**PDL** polarisationsabhängige Dämpfung (engl. Polarisation Dependent Loss)

**PDM** Polarisations-Multiplex (engl. Polarisation-Division Multiplexing)

**PMD** Polarisationsmodendispersion

**PM** Principle Mode

**PSP** Hauptzustand der Polarisation (engl. Principle State of Polarisation)

**SDM** Raum-Multiplex (engl. Space-Division Multiplexing)

**SLM** Spatial Light Modulator

**SMF** Einmodenfaser (engl. Single-Mode Fiber)

**SNR** Signal-Rausch-Abstand (engl. Signal-to-Noise Ratio)

**TDM** Zeitmultiplex (engl. Time-Division Multiplex)

---

**VOA** variables optisches Dämpfungsglied (engl. Variable Optical Attenuator)

**WDM** Wellenlängen-Multiplex (engl. Wavelength-Division Multiplexing)

**WLAN** Wireless Local Area Network