



Frank Ellrich (Autor)

Modellierung und Meßtechnik von Ultrakurzimpuls-Raman-Faserverstärkern



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1981>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung

In diesem einleitenden Kapitel wird zunächst etwas allgemeiner auf die optischen Verstärker und ihre Verwendung in der Nachrichtentechnik eingegangen. Einem groben Überblick über die historische Entwicklung der optischen Nachrichtentechnik, speziell der Verstärker, folgt die Feststellung des aktuellen Standes der Technik. Danach werden die Ziele und die zum Erreichen dieser Ziele notwendigen Arbeiten vorgestellt. Abschließend folgt eine kurze Zusammenfassung über die Inhalte der einzelnen Kapitel der vorliegenden Arbeit.

1.1 Optische Verstärker in der Nachrichtentechnik

1.1.1 Historische Entwicklung

Die Anfänge der optischen Nachrichtentechnik lassen sich streng genommen bis zu den ersten menschlichen Wesen zurückführen, die sich durch Rauchzeichen über längere Strecken hinweg verständigen konnten. Diese Technik der Nachrichtenübertragung im freien Raum entwickelte sich im Laufe der Zeit immer weiter. So nutzten die Griechen, wie auch später die Römer, das Dunkel der Nacht, um mit Hilfe von Fackelzeichen das gesamte Alphabet digital (!) zu übertragen. Unter Verwendung von maximal zwei mal fünf Fackeln erreichte man damals schon eine Übertragungsrate von bis zu acht Zeichen pro Minute. Heutzutage würde man von einer Bitrate von 0,13 Bit/s sprechen.

Eine aus der griechischen Mythologie bekannte optische Nachrichtenübertragung beschreibt Aischylos¹ in seiner Tragödie „Agamemnon“. So ließ der Anführer der Griechen, Agamemnon, mit Feuerzeichen die Nachricht vom Fall Trojas von Kleinasien nach Griechenland zu seiner Frau Klytämnestra übermitteln. Dabei wurde die Nachricht über acht „Relaisstationen“ übertragen [Ais59].

Weiterentwicklungen dieser Art der Übertragungstechnik mündeten 1794 in dem, nach dem Erfinder Claude Chappe² benannten, Chappeschen Flügeltelegraphen, der dann später von den Soldaten Napoleons zur Nachrichtenübermittlung eingesetzt wurde. Ebenfalls militärischer Nutzen wurde aus dem in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelten Heliographen gezogen, bei dem gespiegeltes Sonnenlicht zur Übertragung verwendet wurde. 1880 schließlich entwarf Alexander Graham Bell³ ein Gerät zur Sprachübertragung mittels modulierten Lichtsignalen und nannte es „Photophon“. Dies geschah noch bevor Heinrich

¹ Aischylos, auch Äschylus: der älteste der großen griechischen Tragödiendichter (um 525 – 456 v. Chr.)

² Claude Chappe: französischer Naturwissenschaftler (1763 – 1805)

³ Alexander Graham Bell: schottischer Erfinder (1847 – 1922)

Hertz seine grundlegenden Arbeiten über die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen veröffentlicht hatte [Bau81].

Schnell erkannte man, daß das Übertragungsmedium „Luft“ kein sehr verlässliches Medium war, denn Natureinflüsse wie Regen, Schnee und Nebel beeinträchtigten die Qualität der Übertragung sehr nachteilig. Deshalb lösten sowohl die vergleichsweise zuverlässige, drahtgebundene Nachrichtenübertragung mit Hilfe von elektrischen Signalen als auch die Funkübertragungstechnik die optische Übertragungstechnik für eine sehr lange Zeit ab. Lediglich für Spezialanwendungen, zum Beispiel im militärischen Bereich, wo es auf die Abhörsicherheit ankam, wurden die optischen Nachrichtenübermittlungsmethoden noch eingesetzt. Ein Wechsel des Übertragungsmediums Luft zu Dielektrika, wie zum Beispiel Wasser, wurde zwar schon 1870 von John Tyndall⁴ vorgeschlagen, um unter Ausnutzung der Totalreflexion eine Lichtführung herbeizuführen. Doch erst 1934 wurde diese Idee wieder von Norman R. French aufgegriffen, um sich die optische Nachrichtenübertragung über Glasstäbe patentieren zu lassen. Die technische Realisierung einer optischen, drahtgebundenen Nachrichtenübertragung jedoch mußte zuerst auf die Erfindung des Lasers im Jahre 1960 durch Theodore Harold Maiman⁵ warten. Zusammen mit den Erfolgen von Corning Glass Works (USA) in der Reduktion der Faserdämpfung unterhalb von 20 dB/km, war der Weg der modernen optischen Nachrichtenübertragung über Langstrecken Anfang der 70er Jahre geebnet [Brü97]. Theoretisch fast unbegrenzte Übertragungskapazität erreichte man 1977 mit der Entwicklung der Einmodenglasfaser, die in verschiedenen Variationen noch heute Stand der Technik ist. In den folgenden Jahren ging es also „nur“ darum, diese Übertragungskapazität, zumindest teilweise, technisch nutzbar zu machen.

Die mittlerweile relativ geringe, aber dennoch vorhandene Faserdämpfung durch Absorption und Streuung der übertragenden Photonen begrenzte die maximal erreichbaren Übertragungslängen. Deshalb kamen zunächst im Bereich unterhalb von einem Gigahertz opto-elektronische Signalregeneratoren, sogenannte Repeater zum Einsatz [DDS02]. In den 80er Jahren erreichte man dann durch die Einführung von Einmoden DFB-Lasern Übertragungsraten im Gbit/s-Bereich [Hau04]. Weitere Erhöhungen der Übertragungsrate kamen bei etwa 40 Gbit/s zum Erliegen, da es auch elektronisch aufwendiger wurde, die Signalregeneration zu bewerkstelligen. Außerdem mußten bei einer Bitratenerhöhung alle Repeater aufgrund der bitratenspezifischen Elektronik längs einer Übertragungsstrecke

⁴ John Tyndall: irischer Physiker, Naturalist und Erzieher (1820 – 1893)

⁵ Theodore Harold Maiman: US-amerikanischer Physiker (geb. 1927)

komplett ausgetauscht werden [DDS02], was bei transatlantischen Verbindungen mit enormem Aufwand und sehr hohen Kosten verbunden war.

Dieses Kostenproblem förderte die Entwicklung von rein optischen Verstärkungsmethoden, die bitratentransparent eingesetzt werden konnten. Der zuerst eingesetzte „Photonenmultiplikator“ war der optische Halbleiterverstärker. Dieser zeichnete sich durch eine annehmbare Polarisationsempfindlichkeit und eine hohe und sehr breitbandige Verstärkung von bis zu 30 dB und 35 nm 3 dB-Halbwerts-Bandbreite (FWHM) aus. Als nachteilig stellte sich sowohl die nichtlineare, von der Signalleistung abhängige Verstärkung als auch die hohen Kopplungsverluste durch den Medienwechsel von Halbleiterchip zu Faser mit Verlusten von etwa 3 dB pro Facette heraus [EII02]. Diese Nachteile konnten durch die Entwicklung von sogenannten Faserverstärkern überwunden werden. Den Anfängen in 1987 um Emmanuel Desurvire folgten zu Beginn der Neunziger ein Sturm auf die Entwicklung von Erbium-dotierten Faserverstärkern (EDFA) [DDS02]. Diese überzeugten durch noch höhere Verstärkungsbandbreiten im Bereich von bis zu 40 nm, geringe Koppelverluste und hohe Verstärkungen im Bereich von 30 dB bis 40 dB. Gleichzeitig erwies sich der EDFA bei hohen Verstärkungen mit minimalen Rauschzahlen im Bereich von 3,1 dB [Lam92] bis typischerweise 5 dB als sehr rauscharm.

Seit den Anfängen der 90er Jahre ging man über, die Übertragungskapazität nicht durch das Erhöhen der Bitrate eines einzelnen Kanals zu erreichen, sondern nutzte die linearen Eigenschaften der Glasfaser zum gleichzeitigen Übertragen von Kanälen bei verschiedenen Trägerwellenlängen. Durch den Zusammenschluß von mehreren Signalkanälen erreichte man Übertragungsraten von Hunderten von Gbit/s [Bro04]. Diese Möglichkeit der Übertragungskapazitätserhöhung bezeichnet man als Wellenlängen-Multiplex-Technik (WDM). Der Zusammenschluß vieler Kanäle hatte zur Folge, daß man je nach Anzahl und Leistung pro Kanal lokale Leistungsspitzen in der Faser durch die unvermeidbare Leistungsakkumulation aller Signale erhalten konnte. Als Folge machten sich nun neben den linearen Problemen, wie der Dämpfung, der chromatischen Dispersion und der Polarisationsmodendispersion, auch noch nichtlineare Effekte bemerkbar. Der nichtlineare Kerr-Effekt ruft Selbstphasenmodulation (SPM), Kreuzphasenmodulation (XPM) und die Vierwellenmischung (FWM) längs der Übertragungsstrecke hervor. Ab bestimmten Leistungspegeln beeinflußten sich die Kanäle auch noch zusätzlich durch die auftretende nichtlineare, stimulierte Raman- und Brillouin-Streuung (SRS, SBS) [EII02].

Ein Hauptproblem beim Einsatz von EDFAs bestand darin, ein möglichst glattes Verstärkungsspektrum zu erhalten, um alle Kanäle gleichermaßen zu verstärken. Dies konnte

durch spektral gewichtetes Abdämpfen der Verstärkung mittels zusätzlicher Filter (Gain Flattening Filter) oder durch speziell dotierte Doppelmantelfasern (Double Cladding Fibers) erreicht werden [Kim00]. Aus energetischen Gründen erwies sich diese Vorgehensweise als nicht sehr effizient, weshalb man versuchte, durch neue Wirtsmaterialien ein breiteres und flacheres Verstärkungsspektrum zu erzeugen [Ell02].

Die spektrale Beschränkung der Kanalzahl beim EDFA begünstigte schließlich den Einsatz des Raman-Faserverstärkers (RFA), da dessen spektrale Lage der Verstärkung nur von der verwendeten Pumpwellenlänge bestimmt wird. Durch die Kombination mehrerer Pumpen bei unterschiedlichen Pumpwellenlängen mit unterschiedlichen Pumpleistungen war es denkbar, breitere und weitgehend ebene Verstärkungsspektren zu erhalten, siehe Unterabschnitt 6.1.2.2. Zwar fanden erste Versuche bezüglich Raman-Verstärkung in optischen Fasern bereits in den 70er Jahren statt [Sto73], und man erkannte in den 80ern auch schon deren Nutzbarkeit bei der faseroptischen Signalübertragung [Mol86]. Es dauerte jedoch noch etwa weitere 20 Jahre, bis der Raman-Faserverstärker technisch nutzbar gemacht werden konnte. Das hatte hauptsächlich damit zu tun, daß der RFA im Gegensatz zum EDFA sehr viel leistungsstärkere Pumpquellen benötigt. Deren Entwicklung, vor allem als kompakte Halbleiter-Laserquellen in der Mitte der 90er Jahre, ließ das Interesse an dem RFA wieder aufkeimen. Seitdem ist der Raman-Verstärker Thema zahlreicher Untersuchungen und Veröffentlichungen, die sich beispielsweise mit den verschiedenen Pumpkonzepten, dem Rauschen oder Kombinationen aus RFAs mit EDFAs und sogar optisch parametrischen Verstärkern (OPAs) befassen.

1.1.2 Stand der Technik

Der Raman-Faserverstärker wird heutzutage als Schlüsselkomponente in modernen Übertragungssystemen gehandelt. Dabei findet er gerade wegen seiner verteilten, rauscharmen und spektral breiten Verstärkung besonders in optischen, hochbitratigen Langstreckenübertragungssystemen Einsatz. Es gibt diesbezüglich fast keinen Feldversuch mehr ohne Raman-Faserverstärker, insbesondere im Zusammenhang mit der Wellenlängen-Multiplextechnik (WDM) [Cha05], [Gro04], [Gup03], [Mor03], [Nie00], [Suz00]. Ebenso wird er vorzugsweise in sehr unwegsamem Gelände eingesetzt, wie zum Beispiel beim sogenannten „island-hopping“, wo es schwierig ist, Zwischenverstärker unterzubringen. Dies ist etwa auf den Philippinen – einer Inselgruppe aus 7107 einzelnen Inseln – der Fall [Ful05]. In den letzten Jahren leidet besonders die IT- und KT-Branche spürbar unter der wirtschaftlichen Rezession, was ein langsames Wachstum der Übertragungskapazität zur Folge hat: Komplette 40 Gbit/s-Systeme sind bereits fertig entwickelt und warten darauf, die

10 Gbit/s-Systeme abzulösen. Sogar 160 Gbit/s-Systeme sind bereits im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, aber noch weit von der Einführung entfernt. Laut den ITG-News vom Juli 2004 steigt durch die Herausforderungen hinsichtlich des weltweiten Wettbewerbs, der Schonung der Umwelt und der mit der demografischen Entwicklung verbundenen Frage des „gesünder Älterwerdens“, die Hoffnung auf ein stärkeres Wachstum der Branche [ITG04].

„Our members are seeing exponential growth in data traffic and a corresponding demand for higher bandwidth.“ Mit diesem positiven Kommentar faßt Karl Gass von den Sandia National Laboratories, Vorsitzender des Optical Internetworking Forum (OIF) der Physical Layer User Group, im Juli 2005 die Mitgliederversammlung der OIF in Brüssel zusammen. Dort erörterte man die Voraussetzungen für die Einführung der 100, 120 und 160 Gbit/s-Schnittstelle zur physikalischen Ebene der OIF-Benutzergruppen [Fi705].

Obwohl die technischen Vorteile bei einer Einführung der 40 Gbit/s-Systeme gegenüber denen mit 10 Gbit/s Übertragungskapazität zur Kostenreduktion führen würden, hängt eine Umstellung sehr stark von der Entwicklung des Datenverkehrs ab. Unter der Voraussetzung gleichbleibenden Wachstums wird die Einführung der 40 Gbit/s-Systeme laut [HaT04] voraussichtlich nicht später als 2006 bis 2007 kommen. Bei sinkendem Wachstum wird jedoch erst 2008 mit einer Umstellung gerechnet. Geht man von den Erfahrungswerten der letzten Jahre aus, welche sich in einer Verdopplung der Übertragungskapazität alle drei Jahre manifestieren läßt, dann werden die 160 Gbit/s-Systeme wohl in etwa acht Jahren Einzug halten [HaT04]. Erfolgreiche Übertragungsexperimente mit 160 Gbit/s konnten ja schon während der European Conference on Optical Communication 2003 (ECOC 03) in Rimini gezeigt werden [Brg03], [Sch03], [Suz03], [Mur03]. Bei einem rein auf Simulationen beruhendem Vergleich zwischen 16 x 10 Gbit/s, 4 x 40 Gbit/s und 1 x 160 Gbit/s von der TU Berlin [Hod03] beispielsweise zeigte die serielle 160 Gbit/s-Übertragung mit Abstand die besten Ergebnisse.

Aus ökonomischer Sicht jedoch liegen momentan die 10 Gbit/s-Systeme noch weit vor den 160 Gbit/s-Systemen, weshalb ein möglicher Einführungstermin von 160 Gbit/s-Systemen wohl noch längere Zeit auf sich warten läßt.

1.2 Ziele und durchzuführende Arbeiten

Nichts desto trotz wird die Nachfrage an Bandbreite und die Steigerung der Übertragungsrate mit zunehmender Zeit weiter ansteigen. Eine Steigerung der Übertragungsrate kann zum Beispiel durch die schon oben erwähnte Wellenlängen-Multiplextechnik beim Übergang zur sogenannten dichten Wellenlängen-Multiplextechnik-Technik (DWDM) erfolgen. Jedoch gibt

es auch dort Grenzen. Zum einen im spektralen Mindestabstand zweier benachbarter Kanäle, um ein spektrales Übersprechen zu vermeiden, zum anderen in der gesamten technisch noch ökonomisch nutzbaren Gesamtbandbreite aller gemultiplexten Signale. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, die Übertragungsrate jedes einzelnen Kanals zu maximieren. Dies kann bis zu Frequenzen um die 40 GHz noch direkt, etwa durch elektrische Multiplextechniken, erfolgen. Wissenschaftler von der Universität in Texas (Austin, USA) haben hier Photodetektoren entwickelt, die imstande sind, bei einer hohen Konversionseffizienz optische Signale mit Bitraten bis zu 40 Gbit/s direkt zu verarbeiten [Fr205].

Jenseits dieser Grenze jedoch muß man auf optische Multiplextechniken übergehen. Hier bietet sich bei Einkanalbetrachtung das optische Zeitmultiplex (OTDM) an. Analog zum elektrischen Zeitmultiplex (ETDM) werden die zu verknüpfenden, optischen Signalströme zeitlich gegeneinander verzögert und dann in einem Multiplexer vereint. Wichtig ist hierbei, daß die Halbwertsbreite der RZ-codierten Impulse kleiner ist als der Kehrwert der Übertragungsrate, damit es nicht zu einem Impulsübersprechen zwischen den einzelnen, zeitversetzten Kanälen kommt. Erhöht man die Übertragungsrate, so muß die Halbwertsbreite der Signalimpulse reduziert werden. Üblicherweise geht man dabei von einem Tastverhältnis von etwa 0,3 aus. Für 160 Gbit/s-Systeme zum Beispiel beträgt die Bitdauer 6,25 ps, weshalb man Impulse mit Halbwertsbreiten vorzugsweise im Bereich von etwa 1,9 ps verwendet. Es wird ersichtlich, daß weitere Steigerungen der Bitrate Halbwertsbreiten im Bereich kleiner als eine Pikosekunde fordern werden. Erreicht bzw. unterschreitet man genau diese Grenze des Pikosekunden-Bereichs, so wird die Beschreibung der Impulsausbreitung mit Hilfe der sonst üblichen nichtlinearen Schrödinger-Gleichung mit dem Ansatz der sich langsam verändernden Einhüllenden zunehmend ungenauer und muß dementsprechend erweitert werden [Agr95], [Agr98].

Natürlich erfahren die kurzen Impulse längs der Faserausbreitung auch Verluste, wie sie auf faseroptischen Übertragungsstrecken etwa durch Absorption und Streuung üblich sind [Ell01], [Hul96]. Diese Verluste gilt es natürlich ebenso zu kompensieren. Da die zeitlich sehr kurzen Impulse mit abnehmender Halbwertsbreite in ihrer spektralen Breite zunehmen, müssen die eingesetzten Verstärker ebenfalls sehr breitbandig sein. Hier bietet sich der Raman-Faserverstärker mit seiner sehr großen spektralen Verstärkungsbandbreite an. Da der Verstärkungskoeffizient des Raman-Faserverstärkers, wie im folgenden noch gezeigt wird, alles andere als spektral glatt verläuft, kann es aufgrund der spektralen Breite dieser zeitlich sehr kurzen Impulse, zu Impulsverzerrungen kommen. Unterschiedliche Frequenzbereiche

werden dann unterschiedlich stark gewichtet. Außerdem kann es aufgrund des Raman-Effektes sogar innerhalb des Impulses selbst zu einem Übersprechen von höheren zu niedrigeren Frequenzanteilen kommen. Dieses Phänomen wird als Intra-Puls Raman-Streuung (IPRS) bezeichnet.

Das Ziel dieser Arbeit ist es nun, die Einflüsse einer passiven faseroptischen Ausbreitung auf die ultrakurzen Impulse mit Halbwertsbreiten unterhalb einer Pikosekunde mathematisch zu modellieren und numerisch berechnen zu können. Die Modelle sollen anschließend durch den Vergleich zwischen simulierten und praktisch gemessenen Daten verifiziert werden. Dazu müssen entsprechende Experimente aufgebaut werden. Im nächsten Schritt sind die Modelle dahingehend zu erweitern, daß das Verhalten eines Raman-Faserverstärkers bei der Übertragung ultrakurzer Impulse beschrieben werden kann. Diese Modelle gilt es ebenfalls durch Experimente meßtechnisch zu verifizieren.

Um die vorgegebenen Ziele zu erreichen, wird zunächst einmal vom einfachsten Betriebsfall eines Raman-Faserverstärkers ausgegangen: dem Dauerstrichbetrieb. Dazu werden zunächst Modelle erstellt, die in Visual C für Windows implementiert werden und das Verhalten des Raman-Verstärkers hinreichend genau beschreiben. Einfache, die Theorie verifizierende Messungen können hierzu im eigenen Labor gemacht werden. Da das Verhalten bei Dauerstrichbetrieb nicht ausdrücklich Gegenstand der Arbeit ist, werden weitergehende Vergleiche auf der Basis numerisch berechneter Daten mit einschlägigen Literaturstellen angestrebt.

Danach wird der Schritt hin zum Verhalten des Raman-Verstärkers bei der Übertragung von Impulsen mit Halbwertsbreiten bis in den Pikosekunden-Bereich gemacht. Da der Impuls auf der Faserstrecke durch Dispersion, Dämpfung und Nichtlinearitäten beeinflusst wird, und die Auswirkungen dieser Einflüsse mit der nichtlinearen Schrödinger-Gleichung gut beschrieben werden können, stellt diese das Fundament der mathematischen Modelle dar. Es gilt, den Raman-Effekt entsprechend einzubauen. Um nun die Übertragung der ultrakurzen Impulse mit Halbwertsbreiten unterhalb des Pikosekunden-Bereichs beschreiben zu können, muß das vorangegangene Modell nochmals erweitert werden. Dabei genügt es oberhalb der Grenze von zehn Femtosekunden Halbwertsbreite zu bleiben. Das daraus entstehende Modell deckt dann idealerweise alle vorangegangenen ab.

Die meßtechnische Verifikation der Raman-verstärkten oder auch unverstärkten Übertragung der ultrakurzen Signale setzt den Aufbau entsprechende Experimente voraus. Da lediglich die Signalquelle als kommerziell erworbenes Gerät vorhanden ist, gilt es neben dem Meßaufbau

selbst sowohl den Detektor für Impulse im Subpikosekunden-Bereich als auch eine geeignete Raman-Pumpquelle dazu aufzubauen.

1.3 Inhaltsübersicht

In diesem ersten Kapitel der vorliegenden Arbeit wurde bereits auf den historischen Verlauf der optischen Kommunikationstechnik eingegangen. Dabei sind in den vorangegangenen Abschnitten speziell die Entwicklung der optischen Verstärker beleuchtet und verschiedene Verstärkertypen nach Vor- und Nachteilen vorgestellt worden. Danach wurden die Ziele und die durchzuführenden Arbeiten beschrieben. Abschließend folgt nun diese Inhaltsübersicht über die einzelnen Kapitel der Arbeit.

Die Grundlagen des Raman-Faserverstärkers (RFA) werden in Kapitel zwei vorgestellt. Beginnend mit der Beschreibung und Erklärung des Raman-Effektes, nach dem der Verstärker benannt ist, über den Aufbau des Verstärkers bei den verschiedenen Pumpkonzepten, bis hin zu Definitionen spezieller Größen, die diesen Faserverstärker charakterisieren. Abschließend wird dabei noch auf die Rauscheigenschaften des RFA eingegangen.

Im anschließenden dritten Kapitel wird die Modellierung vorgenommen, indem die für die faseroptische Impulsausbreitung grundlegende nichtlineare Schrödinger-Gleichung hergeleitet wird mit Gültigkeit für Pulsbreiten bis zu einer Pikosekunde. Unterhalb dieser Grenze bis etwa 50 fs wird die nichtlineare Schrödinger-Gleichung hinsichtlich der zusätzlich auftretenden linearen und nichtlinearen Effekte in einem zweiten Schritt erweitert, und daraus wird die sogenannte generalisierte, nichtlineare Schrödinger-Gleichung entwickelt. Die Erweiterung zur Beschreibung des Impulsverhaltens für Pulsbreiten unterhalb der 50 fs – Grenze wird im Anschluß kurz beschrieben, um den Zusammenhang zwischen verzögerter nichtlinearer Antwort einer Glasfaserübertragung und dem Raman-Verstärkungsspektrum herzustellen. Abschließend wird das in dieser Arbeit verwendete Lösungsverfahren der nichtlinearen Schrödinger-Gleichung nach der Split-Step-Fourier-Methode (SSFM) vorgestellt.

Die Implementierung des Modells der Raman-Verstärkung in einer Faser wird im vierten Kapitel zuerst einmal für den einfachsten Fall des reinen Dauerstrichbetriebs (cw-Betrieb) formuliert. Anschließend wird ein Modell umgesetzt, welches die Auswirkungen des Raman-Faserverstärkers auf die Ausbreitung optischer Impulse bis in den Pikosekunden-Bereich beschreibt. Hierzu wird eine Fusion zwischen Raman-Verstärker im Dauerstrichbetrieb und Kurzimpulsausbreitung, wie sie getrennt voneinander im zweiten bzw. dritten Kapitel

vorgelegt wurden, erreicht. Abschließend folgt die Erweiterung der vorangegangenen Stufe hinsichtlich des Verhaltens von Raman-Faserverstärkern bei der Übertragung ultrakurzer Impulse im Subpikosenkunden-Bereich.

Im Rahmen des fünften Kapitels werden die Versuchsaufbauten vorgestellt, die für die Messungen der dann in Kapitel sechs dargestellten Meßergebnisse nötig waren. Im ersten Teil dieses Kapitels wird ein Experiment beschrieben, mit dem das Verhalten eines einfachen vorwärtsgepumpten Einkanal-Raman-Verstärkers bestimmt werden kann. Dazu wurden verschiedene Kennlinien des Verstärkers im Dauerstrichbetrieb aufgenommen. Der zweite Teil zeigt die Meßaufbauten zur Übertragung der ultrakurzen Impulse. Einem Aufbau, welcher die rein passive Propagation der Impulse beschreibt, folgt der eines bidirektional gepumpten Raman-Faserverstärkers. Dabei wird neben den Erläuterungen zum Aufbau selbst auch noch kurz auf die verwendeten Gerätschaften selbst eingegangen. Die als optische Schlüsselkomponenten bezeichneten Signalquelle und –senke sowie die Raman-Pumpe werden ausführlich im Anhang (Kapitel 10) beschrieben.

Das sechste Kapitel stellt sowohl die numerisch berechneten als auch die meßtechnisch erzielten Ergebnisse dar. Dabei findet zuerst ein Vergleich der Kennlinien eines einfachen Einkanal-Verstärkers beim Dauerstrichbetrieb zwischen den analytisch approximativ und numerisch berechneten sowie meßtechnisch erzielten Daten statt. Anschließend werden auf rein numerischer Basis verschiedene Pumpkonzepte mit Daten aus der Literatur verglichen. Die Simulations- und Meßergebnisse bei der Übertragung ultrakurzer Signale können anschließend aufgrund nicht modifizierbarer Randbedingungen nur näherungsweise miteinander verglichen werden. Dabei trennt man zwischen rein passiver Übertragung und der Übertragung bei aktiver Raman-Pumpe.

Im siebten Kapitel werden, basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel sechs, Schlußfolgerungen formuliert und in einem Ausblick auf weiterführende Arbeiten verwiesen. Das achte Kapitel faßt die vorliegende Arbeit zusammen und stellt die wichtigsten Ergebnisse noch einmal komprimiert dar.

Das neunte Kapitel bietet ähnlich dem vorangegangenen eine Zusammenfassung in englischer Sprache.

Im letzten Kapitel, dem Anhang, werden neben der ausführlichen Beschreibung der optischen Schlüsselkomponenten Kurzimpulsquelle, Raman-Pumpe sowie Kurzimpulsdetektor, die verwendeten mathematischen Definitionen aufgeführt. Weiterhin enthält der Anhang auch die üblichen Elemente wie eine Liste häufig verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen sowie abschließend das Literaturverzeichnis.