

# **Spektral beherrschter Raman-Faserlaser**

Der Technischen Fakultät der  
Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Grades

**Doktor-Ingenieur**

vorgelegt von

**Johannes Hagen**  
(Dipl.-Ing. Universität Erlangen-Nürnberg)

Erlangen 2007

Als Dissertation genehmigt von  
der Technischen Fakultät  
der Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung :	26. November 2007
Tag der Promotion :	07. März 2008
Dekan :	Prof. Dr.-Ing. J. Huber
Berichterstatter :	Prof. Dr.-Ing. B. Schmauß Prof. Dr. C. Pflaum

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

**Johannes Hagen**

**Spektral beherrschter Raman-Faserlaser**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7167-1

ISSN 1866-6043

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Licht als elektromagnetische Welle . . . . .	5
2.1.1	Wellengleichung . . . . .	5
2.1.2	Polarisation . . . . .	7
2.1.3	Glasfasern als optische Wellenleiter . . . . .	9
2.1.4	Dämpfung, Dispersion und Nichtlinearität . . . . .	15
2.2	Faserlaser - Prinzip und Entwicklungen . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Raman-Frequenzkonversion</b>	<b>23</b>
3.1	Theoretische Modelle der Raman-Streuung . . . . .	23
3.1.1	Klassisches qualitatives Modell . . . . .	23
3.1.2	Quantenmechanisches Modell . . . . .	24
3.2	Theoretische Beschreibung des Raman-Faserlasers . . . . .	30
3.2.1	Prinzip . . . . .	30
3.2.2	Mathematische Beschreibung und analytische Lösungsansätze . . . . .	32
3.3	Kerr-Effekte im Raman-Faserlaser . . . . .	36
3.3.1	FWM, SPM und XPM . . . . .	37
3.3.2	Spektrale Verbreiterung durch FWM . . . . .	41
3.3.3	Analytische Modelle für FWM im Raman-Faserlaser . . . . .	43
3.4	Weitere nichtlineare Effekte bei hohen spektralen Leistungsdichten . . . . .	44
3.4.1	Stimulierte Brillouin-Streuung . . . . .	45
3.4.2	Catastrophic Fiber Fuse . . . . .	51
3.5	Eigenschaften spezieller Raman-Fasern . . . . .	53
3.5.1	Polarisationserhaltende Fasern . . . . .	53

3.5.2	Dotierung, Modenfelddurchmesser und Dämpfung . . .	55
<b>4</b>	<b>Aufbau und Konzepte</b>	<b>57</b>
4.1	Raman-Faserlaser - Aufbau . . . . .	57
4.1.1	Pumplaser . . . . .	58
4.1.2	Polarisationssteller . . . . .	60
4.1.3	Fasertypen . . . . .	62
4.1.4	Fiber Bragg Gratings . . . . .	65
4.1.5	Optimierung der spektralen Leistungsdichte mittels gechirpten Gittern . . . . .	68
4.2	Raman-MOPA als Alternativkonzept . . . . .	73
<b>5</b>	<b>Frequenzverdoppelter Raman-Faserlaser zur Erzeugung gelben Lichts</b>	<b>79</b>
5.1	Strahlquellen für den gelben Spektralbereich . . . . .	79
5.2	Grundlagen der optischen Frequenzverdopplung . . . . .	81
5.3	Kristalleigenschaften von $\text{LiNbO}_3$ . . . . .	89
5.4	Versuchsaufbau für Single-Pass-Betrieb . . . . .	91
<b>6</b>	<b>Numerische Simulationsmodelle für Raman-Faserlaser</b>	<b>95</b>
6.1	Simulation eines Raman Faserlasers mit monofrequenten Sto- keswellen . . . . .	95
6.1.1	Simulation mittels Schießverfahren . . . . .	96
6.1.2	Simulation mittels Kollokationsverfahren . . . . .	97
6.1.3	Diskussion resonatorinterner Leistungsverläufe . . . . .	98
6.2	Simulation eines Raman-Faserlasers mit spektral aufgelöster Stokeswelle . . . . .	101
6.2.1	Der Split-Step-Fourier-Algorithmus . . . . .	102
6.2.2	Numerisches Lasermodell . . . . .	106
6.2.3	Diskussion und Verifikation . . . . .	112
6.2.4	Vergleich mit bereits publiziertem Simulationsmodell . . . . .	118
6.3	Simulation eines Raman Master Oscillator Power Amplifier . . . . .	120
<b>7</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>123</b>
7.1	Raman-Faserlaser . . . . .	123
7.1.1	Raman-Faserlaser - Charakterisierung bei unterschied- lichen Systemparametern . . . . .	123

7.1.2	Raman-Faserlaser - Zeitverhalten . . . . .	133
7.2	Raman Master Oscillator Power Amplifier . . . . .	136
7.2.1	Master Oscillator - Charakterisierung bei unterschiedlichen Systemparametern . . . . .	137
7.2.2	Power Amplifier - Charakterisierung bei unterschiedlichen Systemparametern . . . . .	140
7.3	Frequenzverdopplung . . . . .	144
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>149</b>
<b>9</b>	<b>Summary</b>	<b>153</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>155</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>161</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>165</b>



# Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen und Abkürzungen

## Naturkonstanten

Symbol	Wert	Einheit	Bedeutung
$c_0$	$2,99792458 \cdot 10^8$	$\text{ms}^{-1}$	Vakuumlichtgeschwindigkeit
$e$	2,718281828	1	EULERSche Zahl
$h$	$6,626075 \cdot 10^{-34}$	Js	PLANCKSches Wirkungsquantum
$k$	$1,380658 \cdot 10^{-23}$	J/K	BOLTZMANN-Konstante
$q_e$	$1,602 \cdot 10^{-19}$	As	Elementarladung
$\varepsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-12}$	$\text{AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$	Dielektrizitätskonstante
$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$	Permeabilitätskonstante

## Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
$a$	m	Geometriegröße
$A$	$\sqrt{W}$	Normierte Feldamplitude
$A_{eff}$	$\text{m}^2$	Effektive Modenfläche
$b$	m	Geometriegröße
$\vec{B}$	T	Magnetische Flußdichte
$B$	1	Normierte Ausbreitungskoordinate
$c$	m/s	Lichtgeschwindigkeit
$d$	m	Geometriegröße
$d_{eff}$	m/V	Effektiver d-Koeffizient
$\vec{D}$	$\text{As/m}^2$	Dielektrische Verschiebungsdichte

Symbol	Einheit	Beschreibung
$D$	$\text{s}^2/\text{m}$	Dispersionskoeffizient (üblich: $[\text{ps}/\text{nm}/\text{km}]$ )
$\mathcal{D}$	$1/\text{m}$	Linearer Operator beim SSF
$\vec{E}$	$\text{V}/\text{m}$	Vektor der elektrischen Feldstärke
$E$	$\text{V}/\text{m}$	Amplitude der elektrischen Feldstärke
$f$	$\text{Hz}$	Frequenz
$F$	$1$	Strukturfunktion
$g_B$	$\text{m}/\text{W}$	Materialspezifischer Brillouin-Verstärkungskoeffizient
$G_R$	$1$	Raman-Verstärkung
$g_R$	$\text{m}/\text{W}$	Materialspezifischer Raman-Verstärkungskoeffizient
$\vec{H}$	$\text{A}/\text{m}$	Vektor der magnetischen Feldstärke
$I$	$\text{A}$	Strom
$I_{TEC}$	$\text{A}$	Strom TEC
$\vec{J}$	$\text{A}/\text{m}^2$	Vektor der Stromdichte
$J_L$	$1$	Besselfunktion
$K_L$	$1$	Hankelfunktion
$\vec{k}$	$1/\text{m}$	Wellenzahlvektor
$L$	$\text{m}$	Geometriegröße
$L_b$	$\text{m}$	Schwebungslänge
$L_c$	$\text{m}$	Kohärenzlänge
$L_{eff}$	$\text{m}$	Effektive Faserlänge
$\vec{M}$	$\text{A}/\text{m}$	Magnetisierung
$n$	$1$	Brechungsindex
$N$	$1$	Photonenanzahl
$\mathcal{N}$	$1/\text{m}$	Nichtlinearer Operator beim SSF
$NA$	$1$	Numerische Apertur
$n_{eff}$	$1$	Effektiver Brechungsindex einer Glasfaser
$n_K$	$1$	Brechungsindex des Kernmaterials einer Glasfaser
$n_M$	$1$	Brechungsindex des Mantelmaterials einer Glasfaser
$\vec{P}$	$\text{As}/\text{m}^3$	Polarisierung
$P$	$\text{W}$	Leistung
$P_i$	$\text{W}$	Leistung der Stokesordnung $i$ ( $i \in 0, 1, 2, \dots$ )
$P_P$	$\text{W}$	Pumpleistung
$P_S$	$\text{W}$	Stokes(Signal)-Leistung
$P_{S,MO}$	$\text{W}$	Stokes-Ausgangsleistung des MO
$P_{S,PA}$	$\text{W}$	Stokes-Ausgangsleistung des PA
$P_{0,15}$	$\text{W}$	Leistung innerhalb einer Bandbreite von $0,15 \text{ nm}$
$P_{3dB}$	$\text{W}$	Leistung innerhalb der $3\text{-dB}$ -Bandbreite

Symbol	Einheit	Beschreibung
$p_{pol}$	1	Polarisationsfaktor
$\vec{r}$	m	Ortsvektor
$r$	m	Radius
$r_K$	m	Kernradius einer Glasfaser
$r_M$	m	Mantelradius einer Glasfaser
$R(z)$	m	Gaußstrahl-Krümmungsradius
$R_i$	1	Reflektivität für die Stokesordnung $i$ ( $i \in 0, 1, 2, \dots$ )
$R_{AG}$	1	Reflektivität Auskoppelgitter
$R_{TR}$	1	Reflektivität Totalreflektor
$S$	$s^3/m$	Dispersionssteigung (üblich: [ps/nm <sup>2</sup> /km])
$t$	s	Zeit
$U$	1	Abkürzung bei der Herleitung der Fasermode
$V$	1	Faserparameter ( $V$ -Zahl)
$V(m)^\pm$	1	Differentielle Ramanverstärkung
$v_a$	m/s	Schallgeschwindigkeit in der Glasfaser
$v_p$	m/s	Phasengeschwindigkeit
$v_g$	m/s	Gruppengeschwindigkeit
$w(z)$	m	Strahlradius des Gaußstrahls am Ort $z$
$w_0$	m	Tailenradius des Gaußstrahls
$w_I$	m	Petermann - I - Feldradius
$w_{II}$	m	Petermann - II - Feldradius
$w_G$	m	Gaußscher Feldradius
$x$	m	Raumkoordinate
$y$	m	Raumkoordinate
$z$	m	Raumkoordinate
$z_R$	m	Rayleigh-Länge
$Z_F$	$\Omega$	Feldwellenwiderstand
$\alpha$	1/m	Dämpfungsmaß
$\beta$	1/m	Phasenmaß
$\beta_i$	$s^i/m$	Dispersionsparameter Ordnung $i$ (üblich: [ps <sup><math>i</math></sup> /nm])
$\gamma$	1/W/m	Kerr-Nichtlinearitätskoeffizient
$\gamma_B$	1/W/m	Faserspezifischer Brillouin-Verstärkungskoeffizient
$\gamma_R$	1/W/m	Faserspezifischer Raman-Verstärkungskoeffizient
$\epsilon_r$	1	Relative Dielektrizitätszahl
$\varphi$	rad	Phase

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\phi$	1	Koordinate im Zylinderkoordinatensystem
$\Phi$	1	Strukturfunktion
$\Theta$	rad	Gaußstrahl-Öffnungshalbwinkel
$\vartheta$	K	Temperatur
$\xi_{x,y}$	1	Normierte Ausbreitungscoordinate für $x$ - und $y$ -Richtung
$\lambda$	m	Wellenlänge
$\lambda_B$	m	Bragg-Wellenlänge
$\eta$	1	Effizienz
$\eta_{NL}$	1/W/m	Nichtlineare SHG-Effizienz
$\eta_{RSHG}$	1/W	Nichtlineare Raman-SHG-Effizienz
$\omega$	1/s	Kreisfrequenz
$\Psi$	1	Strukturfunktion
$\chi^{(i)}$	$m^i/V^i$	Suszeptibilität der Ordnung $i$ ( $i \in 1, 2, 3\dots$ )
$\Xi_{mn}$	1	Strukturfunktion des Gaußstrahls der Ordnung $m, n$

## Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CFE	engl.: Catastrophic Fiber Fuse
CW	engl.: Continuous Wave
DFB-LD	engl.: Distributed Feedback Laser Diode
DG	Dämpfungsmitglied
DOP	engl.: Degree of Polarization
FBG	engl.: Fiber Bragg Grating
FFT	engl.: Fast Fourier Transform
FWM	engl.: Four Wave Mixing
HI-NL	engl.: Highly Nonlinear Fiber
LD	Laserdiode
MO	engl.: Master Oscillator
MOPA	engl.: Master Oscillator Power Amplifier
OSA	Optischer Spektralanalysator
PA	engl.: Power Amplifier
PCF	engl.: Photonic Crystal Fiber

PER	engl.: Polarization Extinction Ratio
PM	engl.: Polarization Maintaining
QPM	engl.: Quasi Phase Matching
RFL	Raman-Faserlaser
R-MOPA	Raman-MOPA
SAP	engl.: Stress Applying Parts
SBS	Stimulierte Brillouin-Streuung
SHG	engl.: Second Harmonic Generation
SMF	engl.: Standard Singlemode Fiber
SPM	engl.: Self Phase Modulation
SRS	Stimulierte Raman-Streuung
SSF	engl.: Split-Step-Fourier(-Algorithm)
TEC	engl.: Thermo Electric Cooler
TEM	Transversal elektro-magnetisch
TLS	engl.: Tunable Laser Source
UV	Ultraviolett
WDM	engl.: Wavelength Division Multiplex
XPM	engl.: Cross Phase Modulation
XPM-MI	engl.: XPM Induced Modulation Instability