

Sascha Reuter

---

**Numerische Modellierung und experimentelle  
Charakterisierung der physikalischen  
Eigenschaften von modengekoppelten  
Femtosekunden-Yb:YAG und Yb:KGW Lasern**

---



Cuvillier Verlag Göttingen

**Numerische Modellierung und experimentelle  
Charakterisierung der physikalischen  
Eigenschaften von modengekoppelten  
Femtosekunden-Yb:YAG und Yb:KGW Lasern**

Sascha Reuter

Dissertation

D386

Vom Fachbereich Physik der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Erlangung des akademischen Grades  
„Doktor der Naturwissenschaften“  
genehmigte Dissertation

Betreuer: Prof. Dr. Richard Wallenstein  
Zweitgutachter: Prof. Dr. René Beigang

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 30.04.2004

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2004

Zugl.: (TU) Kaiserslautern, Univ., Diss., 2004

ISBN 3-86537-101-9

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2004

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2004

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-101-9

Es ist schwieriger, ein Vorurteil zu  
zertrümmern, als ein Atom.  
(Albert Einstein)



# Abstract

## **Numerical modelling and experimental characterization of modelocked femtosecond Yb:YAG and Yb:KGW lasers**

In this thesis, the development of laser sources emitting ultrashort pulses with high average power and repetition rate was realized. The generation of ultrashort laser pulses is performed with self-stabilizing additive-pulse-modelocking of Yb:YAG and Yb:KGW laser sources.

The characterization of the physical properties of the respective laser materials was the basis for numeric modelling of efficient Yb:YAG and Yb:KGW three-level-lasers. The optical excitation of these lasers was optimized by numeric simulations. Thermal effects inside the laser crystals were calculated from the distribution of the absorbed pump power. The results of these simulations were used to develop the concept of the experimental resonator setups.

For the Yb:YAG cw laser, a maximum output power of 6 W at an absorbed pump power of 15.5 W was experimentally demonstrated. This corresponds to an optical conversion efficiency of 40 %. With the combination of two Yb:YAG laser rods inside one resonator, the output power was increased to 11 W at an absorbed pump power of 32 W.

The maximum output power of the Yb:KGW cw laser was 3.1 W with an absorbed pump power of 10.2 W.

The output beam of all demonstrated lasers was diffraction limited ( $M^2 < 1.1$ ) and linearly polarised with a polarisation-ratio of 99.9 %. For the first time a rate equation model for a quasi-three-level-system was set up, taking into account both the reabsorption of the laser light as well as the thermal occupation of the upper and lower laser levels. The calculated values of the rate equation model were in good agreement with the output powers experimentally achieved.

These continuously emitting lasers build the basis for the development of the modelocked laser sources. For the generation of ultrashort laser pulses, the method of additive-pulse-modelocking was employed. In contrast to the use of a semiconductor saturable absorber, this method is well-suited to avoid Q-switched-mode-locking at high repetition rates.

Within the scope of this thesis, the master equation for the additive-pulse-modelocked laser including arbitrary losses in the coupled nonlinear cavity was set up for the first time. The solution of the master equation allowed to predict the group-delay-dispersion and self-phase-

modulation required to obtain self-stabilizing soliton modelocking.

For the first time, a self-stabilizing additive-pulse-modelocked Yb:YAG laser was demonstrated in the range of positive net-dispersion. In this regime, the pulse duration obtained was 1.1 ps with a spectral bandwidth of 2.2 nm. The average power of the laser pulses was 5.5 W at an absorbed pump power of 15.5 W and at a pulse repetition rate of 80 MHz.

In the regime of negative net-dispersion a self-stabilizing additive-pulse-modelocked Yb:YAG soliton-laser was developed and demonstrated. With a net-dispersion of  $-4000 \text{ fs}^2$ , pulses with a duration of  $< 700 \text{ fs}$  and a spectral width of  $> 1.65 \text{ nm}$  were generated. The average power of these laser pulses was 4 W at a pulse repetition rate of 80 MHz. Using a Yb:YAG dual rod oscillator, the average pulse power was increased to 7.2 W at an absorbed pump power of 32 W. The generated pulses had a duration of 520 fs and a spectral width of 2.4 nm.

Furthermore an additive-pulse-mode-locked Yb:YAG soliton-laser with a pulse repetition rate as high as 160 MHz was realized. The generated pulses had a duration of 770 fs and a spectral width of 1.8 nm. The average output power was 3.5 W. The self-stabilization of the mode-locking was experimentally verified over several hours.

For the first time, an additive-pulse-modelocked Yb:KGW soliton-laser was experimentally demonstrated. The generated laser pulses had a duration of 240 fs and a spectral width of 5 nm. The average output power was 1.5 W at a pulse repetition rate of 100 MHz.

An Yb:YAG cw-laser with an output power exceeding 30 W was realized by scaling the absorbed pump power to a value of 87.5 W. The laser radiation was diffraction limited with a value of  $M^2 < 1.1$ .

Employing the method of additive-pulse-modelocking, it was possible to generate laser pulses as short as 670 fs with a spectral width of 1.9 nm. The average output power of the laser pulses was 21.1 W at an absorbed pump power of 87.5 W and a pulse repetition rate of 120 MHz. This is the highest average output power of a femtosecond-laser with a pulse repetition rate above 100 MHz reported to date.

For all laser sources demonstrated in this thesis, the results predicted by the master-equation were in good agreement with the measured values of pulse duration and spectral width of the laser pulses. In the regime of negative net-dispersion, the self-stabilization resulted in the independence of the pulse duration from the cavity detuning.

The modelling and the characterization of the laser sources developed in this work proofed the self-stabilization of additive-pulse-modelocking for pulse durations in the fs-regime.

# Kurzzusammenfassung

## **Numerische Modellierung und experimentelle Charakterisierung der physikalischen Eigenschaften von modengekoppelten Femtoskunden-Yb:YAG und Yb:KGW Lasern**

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung von Ultrakurzpuls-Strahlquellen hoher mittlerer Leistung bei gleichzeitig hoher Repetitionsrate. Zur Erzeugung ultrakurzer Impulse wurden Yb:YAG und Yb:KGW Laser mit Hilfe der selbststabilisierenden Additiv-Puls-Modenkopplung kontinuierlich modengekoppelt.

Die Charakterisierung der physikalischen Eigenschaften der Lasermaterialien diente als Grundlage für die Modellierung von effizient angeregten Yb:YAG und Yb:KGW Quasi-Drei-Niveau-Lasern. Die optische Anregung dieser Laser wurde anhand numerischer Simulationen optimiert. Aus der Verteilung der absorbierten Pumpleistung wurden die thermischen Effekte in den Laserkristallen berechnet. Die Ergebnisse der Simulationen bildeten die Grundlage zur Konzipierung der experimentellen Resonatoraufbauten.

Für den kontinuierlich emittierenden Yb:YAG Laser wurde bei einer absorbierten Pumpleistung von 15.5 W die maximale Ausgangsleistung von 6 W erreicht. Dies entspricht einer optischen Konversionseffizienz von ca. 40 %. Durch die Kombination zweier Yb:YAG Kristalle in einem Resonator wurde die Ausgangsleistung auf 11 W bei einer absorbierten Pumpleistung von 32 W erhöht.

Die maximale Ausgangsleistung des entwickelten kontinuierlich emittierenden Yb:KGW Lasers von 3.1 W wurde bei einer absorbierten Pumpleistung von 10.2 W erreicht.

Die emittierte Strahlung war für alle Laser beugungsbegrenzt ( $M^2 < 1.1$ ) und zu über 99.9 % linear polarisiert. Zur Berechnung der Laserausgangsleistung wurde erstmals ein Raten-gleichungsmodell eines Quasi-Drei-Niveau Systems aufgestellt, das sowohl die Reabsorption der Laserstrahlung, als auch die thermische Besetzung des oberen und unteren Laserniveaus berücksichtigt. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung der experimentell bestimmten Ausgangsleistungen mit den Ergebnissen des Ratengleichungsmodells.

Die kontinuierlich emittierenden Laser bildeten die Basis zur Entwicklung der modengekoppelten Strahlquellen. Um Selbstgüteschaltung bei hohen Repetitionsraten zu vermeiden, wurde das Verfahren der Additiv-Puls-Modenkopplung dem Einsatz eines sättigbaren Halbleiter-Absorbers zur Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse vorgezogen.

Im positiven Dispersionsbereich wurde erstmalig ein selbststabilisierender APM Yb:YAG Laser mit einer Impulsdauer von 1.1 ps und einer spektralen Breite von 2.2 nm experimentell realisiert. Die Impulse hatten dabei eine mittlere Leistung von ca. 5.5 W bei einer absorbierten Pumpleistung von 15.5 W und einer Wiederholrate von 80 MHz.

In dieser Arbeit wurde erstmals die Mastergleichung des APM Lasers für beliebige Verluste im angekoppelten Resonator aufgestellt und gelöst. Anhand der Lösung der Mastergleichung wurde die zur Selbststabilisierung benötigte Gruppengeschwindigkeitsdispersion und Selbstphasenmodulation berechnet.

Im Rahmen der vorgelegten Arbeit wurde erstmals ein selbststabilisierender Yb:YAG APM-Soliton-Laser experimentell realisiert. Bei einer Nettodispersion von ca. -4000 fs<sup>2</sup> wurden Impulsdauern von < 700 fs bei einer spektralen Breite von > 1.65 nm erreicht. Die mittlere Leistung der Impulse hatte einen Wert von ca. 4 W bei einer Wiederholrate von 80 MHz. Mit einer Leistungsskalierung durch den Einsatz zweier Laserstäbe in einem Resonator wurde die mittlere Leistung der Impulse auf 7.2 W bei einer absorbierten Pumpleistung von 32 W erhöht. Die zeitliche Dauer der erzeugten Impulse hatte dabei einen Wert von 520 fs bei einer spektralen Breite von 2.4 nm.

Bei einer Wiederholrate von 160 MHz des Yb:YAG APM-Soliton-Lasers wurden Impulse mit einer zeitlichen Dauer von 770 fs und einer spektralen Breite von 1.8 nm erzeugt. Die mittlere Leistung der Impulse hatte einen Wert von 3.5 W. Die Selbststabilisierung der Modenkopplung wurde über einen Zeitraum von drei Stunden experimentell belegt.

Desweiteren wurde im Rahmen dieser Arbeit erstmals ein additiv-puls-modengekoppelter Yb:KGW Soliton-Laser experimentell realisiert. Die erzeugten Impulse hatten eine zeitliche Dauer von 240 fs bei einer spektralen Breite von 5 nm. Die mittlere Leistung der Impulse hatte einen Wert von 1.5 W bei einer Repetitionsrate von 100 MHz.

Durch Erhöhen der absorbierten Pumpleistung auf 87.5 W wurde ein kontinuierlich emittierender Yb:YAG Laser mit einer Ausgangsleistung von über 30 W realisiert. Die Strahlung des Lasers war beugungsbegrenzt mit  $M^2 < 1.1$ .

Mit der selbststabilisierenden Additiv-Puls-Modenkopplung wurden, im Bereich negativer Gesamtdispersion, Lichtimpulse mit einer zeitlichen Dauer von 670 fs und einer spektralen Breite von 1.9 nm erzeugt. Die mittlere Leistung der Impulse hatte einen Wert von 21.1 W bei einer Wiederholrate von 120 MHz. Dies ist die größte bisher veröffentlichte mittlere Leistung eines Femtosekunden-Lasers mit einer Wiederholrate von > 100 MHz.

Die experimentell bestimmten Impulsdauern und spektralen Breiten waren für alle in dieser Arbeit vorgestellten Strahlquellen in guter Übereinstimmung mit den aus der Mastergleichung berechneten Werten. Die Selbststabilisierung im Bereich negativer Gesamtdispersion wurde aus der Unabhängigkeit der Impulsdauer von der Verstimmung der Resonatoren abgeleitet.

Die realisierten Lasersysteme belegen, dass die Additiv-Puls-Modenkopplung auch für Impulsdauern im fs-Bereich selbststabilisierendes Verhalten zeigt.

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Inhaltsverzeichnis</b>                                        | <b>vii</b> |
| <b>1 Einleitung</b>                                              | <b>1</b>   |
| <b>2 Eigenschaften Ytterbium dotierter Lasermaterialien</b>      | <b>5</b>   |
| 2.1 Yb:YAG ( $\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) . . . . . | 5          |
| 2.1.1 Spektroskopische Eigenschaften . . . . .                   | 5          |
| 2.1.2 Thermische und mechanische Eigenschaften . . . . .         | 10         |
| 2.1.3 Optische Eigenschaften . . . . .                           | 11         |
| 2.2 Yb:KGW ( $\text{Yb:KGd}(\text{WO}_4)_2$ ) . . . . .          | 11         |
| 2.2.1 Spektroskopische Eigenschaften . . . . .                   | 11         |
| 2.2.2 Thermische und mechanische Eigenschaften . . . . .         | 14         |
| 2.2.3 Optische Eigenschaften . . . . .                           | 15         |
| <b>3 Kontinuierlich emittierende Ytterbium-Laser</b>             | <b>19</b>  |
| 3.1 Optische Anregung von Quasi-Drei-Niveau Systemen . . . . .   | 19         |
| 3.2 Charakterisierung der Pumpquellen . . . . .                  | 20         |
| 3.2.1 Pumpquelle für Yb:YAG . . . . .                            | 20         |
| 3.2.2 Pumpquelle für Yb:KGW . . . . .                            | 22         |
| 3.3 Simulation der Pumpleistungsdichte . . . . .                 | 23         |
| 3.3.1 Yb:YAG . . . . .                                           | 24         |
| 3.3.2 Yb:KGW . . . . .                                           | 25         |
| 3.4 Modellierung der thermischen Effekte . . . . .               | 26         |
| 3.4.1 Wärmeentwicklung in Laserkristallen . . . . .              | 26         |
| 3.4.2 Temperatur- und Brechungsindexprofil . . . . .             | 27         |
| 3.4.3 Thermisch induzierte Spannungen . . . . .                  | 28         |
| 3.4.4 Modellierung der thermischen Effekte in Yb:YAG . . . . .   | 29         |
| 3.4.5 Modellierung der thermischen Effekte in Yb:KGW . . . . .   | 31         |
| 3.5 Berechnung der Ausgangsleistung . . . . .                    | 33         |
| 3.6 Experimentelle Ergebnisse . . . . .                          | 39         |
| 3.6.1 Yb:YAG . . . . .                                           | 39         |

|          |                                                                    |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.6.2    | Yb:KGW . . . . .                                                   | 42        |
| <b>4</b> | <b>Prinzip der solitären Modenkopplung</b>                         | <b>45</b> |
| 4.1      | Modenkopplung . . . . .                                            | 45        |
| 4.1.1    | Aktive Modenkopplung . . . . .                                     | 46        |
| 4.1.2    | Passive Modenkopplung . . . . .                                    | 46        |
| 4.1.2.1  | Modenkopplung mit einem sättigbaren Absorber . . . . .             | 47        |
| 4.1.2.2  | Kerr-Linsen Modenkopplung . . . . .                                | 49        |
| 4.1.2.3  | Additiv-Puls-Modenkopplung . . . . .                               | 51        |
| 4.2      | Wechselwirkung Licht-Materie . . . . .                             | 52        |
| 4.2.1    | Intensitätsabhängigkeit des Brechungsindex . . . . .               | 52        |
| 4.2.2    | Operator der Selbstphasenmodulation . . . . .                      | 54        |
| 4.2.3    | Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex . . . . .              | 54        |
| 4.2.4    | Operator der Dispersion . . . . .                                  | 55        |
| 4.2.5    | Nichtlineare Schrödinger-Gleichung . . . . .                       | 56        |
| 4.2.6    | GVD-Kompensation mit Prismen . . . . .                             | 57        |
| 4.2.7    | GVD-Kompensation mit einem Gires-Tournois-Interferometer . . . . . | 59        |
| 4.2.8    | Dispersionskompensation mit Chirp-Spiegeln . . . . .               | 62        |
| <b>5</b> | <b>Theorie der solitären Modenkopplung</b>                         | <b>65</b> |
| 5.1      | Linearisierte Operatoren der Mastergleichung . . . . .             | 66        |
| 5.1.1    | Verstärkendes Medium . . . . .                                     | 66        |
| 5.1.2    | Verluste . . . . .                                                 | 67        |
| 5.1.3    | Dispersion der Gruppengeschwindigkeit . . . . .                    | 67        |
| 5.1.4    | Selbstphasenmodulation . . . . .                                   | 68        |
| 5.1.5    | Zusätzlicher Phasenterm . . . . .                                  | 68        |
| 5.1.6    | Zeitverschiebung des Impulses . . . . .                            | 68        |
| 5.1.7    | Angekoppelter Resonator . . . . .                                  | 68        |
| 5.2      | Mastergleichung der Additiv-Pulse-Modenkopplung . . . . .          | 73        |
| 5.3      | Lösung der Mastergleichung . . . . .                               | 74        |
| 5.3.1    | Zeitverschiebung und Frequenzverstimmung . . . . .                 | 75        |
| 5.3.2    | Impulsdauer und Chirp-Parameter . . . . .                          | 75        |
| 5.3.3    | Stabilitätsbedingung . . . . .                                     | 77        |
| 5.3.4    | Zusätzliche Phasenverschiebung des Impulses . . . . .              | 77        |
| 5.4      | Diskussion der Ergebnisse . . . . .                                | 77        |
| <b>6</b> | <b>Experimentelle Ergebnisse der Modenkopplung</b>                 | <b>81</b> |
| 6.1      | Yb:YAG Oszillator mit einer Wiederholrate von 80 MHz . . . . .     | 81        |
| 6.1.1    | Modenkopplung im Bereich positiver Dispersion . . . . .            | 81        |
| 6.1.2    | Dispersionskompensation mit Prismen . . . . .                      | 86        |

---

|          |                                                                         |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.1.3    | Dispersionskompensation mit GTI-Spiegeln . . . . .                      | 88         |
| 6.2      | Yb:YAG Zweistab Oszillator mit einer Wiederholrate von 80 MHz . . . . . | 90         |
| 6.3      | Yb:YAG Oszillator mit einer Wiederholrate von 160 MHz . . . . .         | 91         |
| 6.4      | Yb:KGW Oszillator mit einer Wiederholrate von 100 MHz . . . . .         | 95         |
| <b>7</b> | <b>Leistungsskalierung des Yb:YAG fs-Oszillators</b>                    | <b>101</b> |
| 7.1      | Charakterisierung der Hochleistungs-Pumpquelle . . . . .                | 101        |
| 7.2      | Simulation der Pumpleistungsdichte . . . . .                            | 104        |
| 7.3      | Simulation der thermischen Effekte . . . . .                            | 106        |
| 7.4      | Kontinuierlich emittierender Yb:YAG Hochleistungslaser . . . . .        | 107        |
| 7.5      | Additiv-Puls-Modenkopplung des Yb:YAG Hochleistungslasers . . . . .     | 110        |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                                  | <b>117</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                                             | <b>121</b> |



# Kapitel 1

## Einleitung

Diodengepumpte Festkörperlaser sind aufgrund ihrer vielfachen Anwendungsmöglichkeiten von großer technologischer Bedeutung. Neue Lasermaterialien sowie Diodenlaser mit hoher räumlicher und spektraler Leistungsdichte sind Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung im Bereich hocheffizienter Festkörperlaser.

Der entscheidende Vorteil von diodengepumpten Festkörperlasern gegenüber lampengepumpten Systemen ist der hohe Gesamtwirkungsgrad. Dies hat eine vergleichsweise geringe thermische Belastung und damit eine gute Strahlqualität auch bei hohen Pump- bzw. Laserleistungen zur Folge. Das Vordringen in höhere Leistungsklassen bei guter Strahlqualität ist wichtig für die Anwendung diodengepumpter Festkörperlaser z. B. zum Schweißen, Schneiden, Beschriften etc. in der Materialbearbeitung. Ein weiterer Vorteil ist, dass aufgrund der geringen Kühlanforderungen eine Miniaturisierung und damit die Herstellung kompakter Lasersysteme für medizinische oder messtechnische Anwendungen möglich ist.

Die Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse im Piko- und Sub-Pikosekunden-Bereich eröffnet weitere Anwendungsmöglichkeiten, z. B. für die Untersuchung extrem schneller Prozesse in Biologie, Physik und Chemie [Zew88].

Aufgrund der hohen Spitzenleistung und der guten Strahlqualität lassen sich ultrakurze Lichtimpulse in andere Spektralbereiche konvertieren. Dazu zählt die Erzeugung von sichtbarem Licht aus infraroten Laserimpulsen zur Anwendung in der Laserdisplaytechnologie [Ruf98]. Mit optisch nichtlinearen Modenkopplungsverfahren wie Kerrlinsen-Modenkopplung, Additiv-Puls-Modenkopplung oder dem Einsatz eines sättigbaren Halbleiter-Absorbers lassen sich kompakte und zuverlässige Ultrakurzpuls-Strahlquellen realisieren. Mit dem Verfahren der Kerrlinsen-Modenkopplung konnten die bisher kürzesten Impulse mit einer Dauer von unter 5 fs direkt aus einem Laser erzeugt werden [Bal97]. Um ultrakurze Laserimpulse hoher mittlerer Leistung zu erzeugen, werden sättigbare Absorber auf Halbleiterbasis verwendet [Pas01]. Mit einem sättigbaren Halbleiter-Absorber konnte die bisher höchste mittlere Leistung von 60 W für Impulsdauern im sub-ps Bereich erreicht werden [Inn03]. Zur Unterdrückung der Selbstgüteschaltung des sättigbaren Absorbers war die Wiederholrate der Impulse auf unter

35 MHz limitiert. Höhere Repetitionsraten steigern die Tendenz zur Selbstgüteschaltung, die eine Zerstörung des Halbleiter-Absorbers zur Folge haben kann [Hoe99b].

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Ultrakurzpuls-Strahlquellen mit mittleren Leistungen im Multiwatt-Bereich. Die angestrebten Impulsdauern liegen im Bereich  $< 1$  ps bei Wiederholraten von  $> 80$  MHz.

Das zu verwendende Lasermaterial muss anhand seiner thermischen und mechanischen Eigenschaften zur optischen Anregung mit hohen Leistungen geeignet sein. Desweiteren muss die Verstärkungsbandbreite hinreichend groß sein, um sub-ps Impulse erzeugen zu können. Beide Voraussetzungen sind für das Lasermaterial Yb:YAG gegeben. Mit diesem Lasermaterial sind kontinuierlich emittierende Multimode-Laser mit Ausgangsleistungen von über 1 kW realisiert worden [Hon00, Ste00]. Die Verstärkungsbandbreite von ca. 5 nm ermöglicht die Erzeugung von Impulsen mit einer zeitlichen Dauer bis hinunter zu 340 fs [Hoe99].

Ein weiteres vielversprechendes Lasermaterial ist Yb:KGW. Die maximale bisher erreichte Ausgangsleistung betrug für dieses Material 1.3 W [Bru00]. Aufgrund der Verstärkungsbandbreite von 10 nm sind Impulsdauern bis hinunter zu 112 fs erreichbar [Bru00].

Der Nachteil der Materialien Yb:YAG und Yb:KGW sind die niedrigen Werte des Wirkungsquerschnitts für stimulierte Emission. Die damit verbundenen hohen Sättigungsintensitäten machen die Entwicklung einer geeigneten Geometrie zur effizienten optischen Anregung notwendig. Desweiteren müssen die thermische und mechanische Belastung der Laserkristalle modelliert und in der Konzipierung der Lasersysteme berücksichtigt werden.

Das zu verwendende Modenkopplungs-Verfahren muss eine hinreichende Modulationstiefe zur Erzeugung ultrakurzer Impulse liefern. Desweiteren muss die Selbstgüteschaltung auch bei hohen Wiederholraten vollständig unterdrückt sein.

Aus diesem Grund wird ein auf der Additiv-Puls-Modenkopplung (APM) basierendes Verfahren zur Erzeugung der Laserimpulse verwendet. Auf der Basis eines Nd:YAG Lasers konnten mit dem Verfahren der Additiv-Puls-Modenkopplung bereits Impulse mit einer zeitlichen Dauer von 6.6 ps und einer mittleren Leistung von 6 W erzeugt werden [Fal92]. Die Repetitionsrate hatte dabei einen Wert von 82 MHz. Da die APM ein interferometrisches Verfahren zur Erzeugung ultrakurzer Impulse ist, muss im allgemeinen die relative Länge der gekoppelten Resonatoren bis auf Bruchteile der Wellenlänge konstant gehalten werden [Mit86].

Das in dieser Arbeit verwendete modifizierte Verfahren wurde zuerst für einen Nd:YVO<sub>4</sub> Laser demonstriert [Hen01]. Es konnten Impulse mit einer zeitlichen Dauer von 7.6 ps und einer mittleren Leistung von 18 W erzeugt werden. Die Repetitionsrate hatte einen Wert von 165 MHz. Der Impulsbetrieb war dabei selbststabilisierend ohne aktive Regelung der Resonatorlänge.

Um Impulsdauern von  $< 1$  ps zu erreichen, wird die Erzeugung von Solitonen im Bereich negativer Gesamtdispersion angestrebt. Der Wert der benötigten Nettodispersion soll sowohl