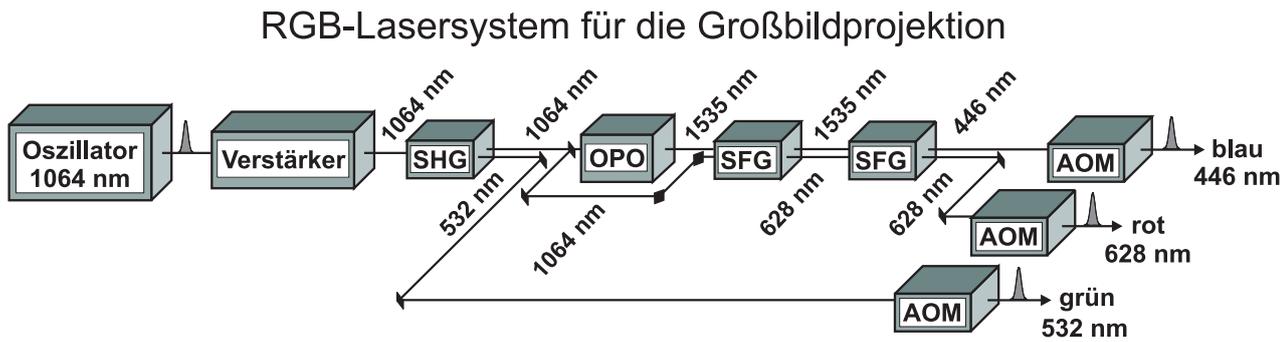


# Kapitel 1

## Einleitung

Die Erforschung des Lichtes prägte in besonderer Weise den Werdegang der modernen Physik. Die damit verbundene Entstehung neuer optischer Technologien ist eine der Triebfedern des technologischen Fortschritts. Das 21. Jahrhundert wird auf Grund dieser Entwicklung häufig als „Jahrhundert des Photons“ bezeichnet. Der industrielle Vormarsch der optischen Technologien ist stark mit der Erfindung des Lasers verknüpft (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Dieser ermöglicht Licht als hochpräzises Werkzeug nutzbar zu machen.

Das Spektrum der Anwendungen des Lasers ist vielfältig. Es umfasst viele Technologiebereiche der modernen Gesellschaft wie beispielsweise die Medizin, industrielle Fertigung, Information und Kommunikation und nicht zuletzt die Wissenschaft. Je nach Anwendung kann hierbei der Laser unterschiedliche Betriebszustände einnehmen. Insbesondere zwei Betriebszustände teilen sich den Löwenanteil des Spektrums der Laseranwendungen: Der Dauerstrichbetrieb, bei dem der Laser kontinuierlich die gleiche Leistung abgibt, und der modengekoppelte Betrieb, bei dem der Laser seine Leistung geballt in Form von kurzen Lichtblitzen – *Pulsen* – emittiert. Speziell die Entwicklung der sogenannten Ultrakurzpulslaser mit Pulsdauern im Piko- ( $10^{-12}$  s) und Femtosekundenregime ( $10^{-15}$  s) sind aus Industrie, Medizin und Forschung nicht mehr wegzudenken. Sie ermöglichen unter anderem Strukturierung im Sub-Mikrometerbereich, Augen-, Zahnbehandlungen und Chirurgie mit enormer Präzision bei gleichzeitiger Minimalbelastung des angrenzenden biologischen Gewebes und somit des Patienten und optische höchstauflösende Spektroskopie. Abb. 1.1 illustriert als konkretes Beispiel für den Einsatz eines Ultrakurzpulslasers das Funktionsprinzip eines RGB(Rot, Grün, Blau)–Lasersystems wie es von der Firma JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH für die industrielle Großbildprojektion entwickelt wurde. Kernstück bildet ein ps–Nd:YVO<sub>4</sub>–Laser bei einer Emissionswellenlänge von 1064 nm, der Pulse mit einer Dauer zwischen 5 – 10 ps und einer Pulswiederholrate von 80 MHz emittiert. Nachträgliche Verstärkung der Pulse und unterschiedliche nichtlineare Frequenzkonversionsschritte liefern Pulse mit den Farben Rot, Grün und Blau, die mithilfe einer Modulationseinheit bestehend aus akusto–optischen Modulatoren passend gemischt werden. Die Verwendung des Ultrakurzpulslasers hat hier zwei Vorteile: Zum einen ermöglichen die hohen Pulsspitzenleistungen eine effektive nichtlineare Frequenzkonversion und zum anderen verhindert die kurze Kohärenzlänge und das breite Spektrum der Pulse das Auftreten von In-



**Abb. 1.1:** Funktionsprinzip eines RGB-Lasersystems wie es von der Firma JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH für die industrielle Großbildprojektion entwickelt wurde. Grundlage dieses Systems bildet ein ps-Nd:YVO<sub>4</sub>-Laseroszillator bei einer Pulswiederholrate von 80 MHz. SHG: Erzeugung der zweiten Harmonischen, OPO: Optisch Parametrischer Oszillator, SFG: Summenfrequenzerzeugung, AOM: akusto-optischer Modulator.

terferenzerscheinungen im Fernfeld („Specklemuster“) auf der Projektionsleinwand und sichert somit eine herausragende Bild- und Farbqualität.

Das Verständnis der Lasereigenschaften und die Entwicklung neuer Methoden, die Laserdynamik zu manipulieren und gezielt anwendungsspezifisch einzustellen, ist die Grundlage der Vielfalt von Laseranwendungen. Im Verlauf der letzten Jahre haben sich vor allem passiv verwendete Bauelemente sogenannte sättigbare Halbleiterabsorberspiegel (SESAM) zur Modenkopplung von Festkörperlaser etabliert. Neben der Vorteile dieser resonatorinternen Bauelemente als kompakte kostengünstige Modenkoppler, leiden sie jedoch unter einer beschränkten Lebensdauer, die mit zunehmender resonatorinternen Leistung stark abnimmt und eine zusätzliche Kühlung des Elementes notwendig macht. Desweiteren neigen passiv modengekoppelte Laser über einen großen Parameterbereich in Abhängigkeit der Pumpleistung, des SESAM- und Resonatorentwurfs und der Pulsspitzenleistung zu Güteschaltungsinstabilitäten, welche zu starken Leistungsfluktuationen führen können.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines neuartigen optisch steuerbaren Verlustmodulators, der innerhalb eines Laseroszillators eingesetzt wird und aktiv oder passiv betrieben werden kann. Anwendung findet dieser Modulator in der aktiven Modenkopplung eines Festkörperlaser, in der Synchronisation der Pulswiederholraten unterschiedlicher unabhängiger Festkörperlaser und der Unterdrückung unerwünschter Güteschaltungsinstabilitäten.

Grundlage des Modulators bildet ein speziell entwickelter mittels moderner Halbleitertechnologie hergestellter Spiegel, der aus einer InGaAs-Schicht auf einem hochreflektierenden Braggspiegel besteht. Der Fresnel-Reflex an der InGaAs-Oberfläche bildet zusammen mit dem Braggspiegel ein Fabry-Pérot-Interferometer. Diese haben den Vorteil nichtlineare Eigenschaften innerhalb der aktiven Schicht – in unserem Fall der InGaAs-Schicht – resonant zu verstärken und Phasenmodulationen in Amplitudenmodulationen zu konvergieren. Ein positiver Nebeneffekt ist dabei die geringe thermische Belastung des Bauelementes.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt neben der theoretischen Modulierung der Modulatordynamik und der optischen Charakterisierung der Modulareigenschaften auf den unter-

schiedlichen vielfältigen Anwendungen des Modulators, der im weiteren Verlauf als *Fabry–Pérot–Modulator (FPM)* bezeichnet wird. Der FPM ersetzt jeweils einen resonatorinternen Spiegel des Lasers, dessen Dynamik kontrolliert werden soll, und wird entweder passiv betrieben oder durch eine amplituden- und frequenzmodulierte Lichtquelle optisch extern gesteuert. Als Beispiel für den passiven resonatorinternen Einsatz wird die erfolgreiche Unterdrückung von unerwünschten Güteschaltungsinstabilitäten am Beispiel eines diodengepumpten passiv modengekoppelten Nd:YAG–Lasers demonstriert.

Der Großteil der Arbeit beschäftigt sich mit den Anwendungen des FPM als aktiv steuerbarem resonatorinternem Verlustmodulator. Diese Verwendung des FPM ermöglicht die in dieser Arbeit neuartig entwickelte universell anwendbare Methode zwei unabhängige Ultrakurz-pulslaser, deren Pulse unterschiedliche Dauern und Wellenlängen aufweisen, optisch zu synchronisieren. Synchronisierte Laser finden Anwendung in der optischen Spektroskopie, in der Frequenzmetrologie und in der Pulssynthese. Die in dieser Arbeit gezeigte Synchronisationsmethode besticht durch eine sehr gute Qualität (Restjitter  $< 1$  ps) und große Toleranzbereiche. Als Anwendung der synchronen Laser wird die Zwei–Farben–Anrege–Abfrage–Spektroskopie und die erstmalige Messung der Feldwiederholrate eines ps–Lasers demonstriert. Eine weitere Anwendung des FPM ist die optische aktive Modenkopplung eines ps–Nd:YVO<sub>4</sub>–Lasers. Der hierbei verwendete Laser entspricht dem gleichen Festkörperlaser, der im RGB–Lasersystem in Abb. 1.1 verwendet wird. Die herausstechenden Vorteile der Modenkopplung mithilfe des FPM sind die erreichten Pulsdauern, die in ihrer Kürze vergleichbar sind mit Dauern passiv erzeugter Pulse, und die minimale thermische Belastung des FPM. Die Modenkopplung von Lasern mittels des FPM ist somit ein aussichtsreicher Kandidat zur Modenkopplung von Hochleistungslasern.

## Gliederung der Arbeit

*Kapitel 2* beschreibt die Funktionsweise des FPM basierend auf einem nichtlinearen Fabry–Pérot–Interferometer. Es wird der genaue Aufbau des FPM sowie seine linearen optischen Eigenschaften gezeigt. Anschließend folgt die zeitliche und spektrale Simulation der FPM–Dynamik bei Anregung mit kurzen Laserpulsen. Als Grundlage dient ein Ratengleichungsmodell basierend auf den speziellen Eigenschaften angeregter Elektronen in einem Halbleiter.

*Kapitel 3* enthält zu Beginn eine kurze Zusammenfassung der zum Verständnis der Experimente notwendigen Grundlagen der aktiven und passiven Modenkopplungstheorie aufbauend auf der Mastergleichung der Modenkopplung. Anschließend wird als Beispiel der passiven Ansteuerung des FPM die Unterdrückung von Güteschaltungsinstabilitäten eines Nd:YAG–Lasers mithilfe des FPM demonstriert.

*Kapitel 4* diskutiert spektral und zeitlich aufgelöste Messungen der optischen Eigenschaften des FPM, durchgeführt mittels der Zwei–Farben–Anrege–Abfrage–Spektroskopie. Im Speziellen wird dabei der Einfluss variierender Ladungsträgerlebensdauern angeregter freier Elektronen innerhalb der InGaAs–Schicht des FPM studiert. Im Vergleich mit den theoretischen Ergebnissen aus Kapitel 2 werden die relevanten Parameter des FPM aus den Messungen extra-

hiert.

*Kapitel 5* illustriert die Experimente zur optischen Synchronisation eines ps-Nd:YVO<sub>4</sub>-Lasers mit einem fs-Titan:Saphir-Laser mithilfe des FPM. Nach der genauen Untersuchung der Synchronisation folgen zwei Anwendungen der synchronen Laser: Spektroskopie an Halbleitern mittels der Zwei-Farben-Anrege-Abfrage-Technik und die erstmalige Messung der Feldwiederholrate eines ps-Lasers.

*Kapitel 6* enthält die Ergebnisse der aktiven Modenkopplung eines ps-Nd:YVO<sub>4</sub>-Lasers durch den optisch gesteuerten FPM. Im Speziellen wird der Einfluss der Schaltzeit des FPM auf die erzeugte Pulsdauer studiert. Desweiteren wird gezeigt, dass der FPM zur harmonischen Modenkopplung des Laser benutzt werden kann und dass der FPM zusätzlich als Auskoppelspiegel dienen kann. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick, der erste Experimente zur Ansteuerung des FPM mit einer frequenz- und amplitudenmodulierten Laserdiode zeigt.