KAPITEL 1

Einleitung

Die industrielle Mikromaterialbearbeitung mit Lasern wird heute zumeist von gütegeschalteten Festkörperlasern mit Impulsdauern im Nanosekundenbereich dominiert. Dies ist im Wesentlichen auf deren hohe Ausgangsleistung, den niedrigen Anschaffungspreis und einen robusten, über Jahre optimierten industrietauglichen Aufbau dieser Systeme zurückzuführen. Speziell im Bereich der präzisen Mikrostrukturierung begrenzt jedoch die thermische Natur des Materialabtrags durch auftretende Mikrorisse, starke Schmelzbildung und die daraus folgende Notwendigkeit der Nachbehandlung des Werkstücks die Qualität der Bearbeitungsergebnisse und die Wirtschaftlichkeit der Verfahren [1, 2].

Bereits Mitte der 90er Jahre wurde daher in einer Vielzahl von Untersuchungen gezeigt, dass sich beim Einsatz von Ultrakurzpuls-Lasern im Femtosekundenbereich infolge der geringen Wechselwirkungszeit zwischen Licht und Materie der Wärmeeintrag in das bearbeitete Medium signifikant verringern lässt. Durch die weitgehende Vermeidung einer thermischen Schädigung der Umgebung und einer deutlichen Reduktion der Schmelzbildung führte die Verwendung ultrakurzer Laserimpulse zu Bearbeitungsergebnissen mit bis dato unerreichter Präzision und eröffnete eine große Zahl neuer Anwendungsfelder [3–11]. Beispielsweise ermöglichte die nichtlineare Absorption bei der hohen Intensität der Femtosekunden-Impulse durch Mehrphotonenprozesse nun auch die präzise Bearbeitung von Medien, die bei der Laserwellenlänge nahezu transparent sind.

Als Standardmaterial für die Erzeugung von Femtosekunden-Impulsen hat sich seither vor allem Ti:Saphir etabliert, so dass der Markt der Ultrakurzpuls-Strahlquellen heute weitgehend von Systemen basierend auf diesem Lasermedium beherrscht wird. Dies ist im Wesentlichen auf die hervorragenden thermischen und optischen Eigenschaften von Ti:Saphir zurückzuführen, welches über eine außerordentlich gute Wärmeleitfähigkeit, einen verhältnismäßig großen Emissionswirkungsquerschnitt sowie breite Absorptionsbänder und Emissionslinienbreiten verfügt. Diese erlauben die Erzeugung von Impulsdauern im Bereich weniger Femtosekunden und machen Ti:Saphir so zum idealen Material für durchstimmbare Ultrakurzpuls-Oszillatoren und -Verstärkersysteme [12].

Einem breiten industriellen Durchbruch der Mikromaterialbearbeitung mit ultrakurzen Impulsen stehen jedoch bisher eine Reihe von Problemen im Wege, die sich im Wesentlichen auf das verwendete Lasermaterial zurückführen lassen. Der vielleicht schwerwiegendste Nachteil beim Einsatz von Ti:Saphir besteht in der Notwendigkeit der Anregung im sichtbaren Spektralbereich, meist zwischen 500 und 550 nm. Da keine kostengünstigen Hochleistungs-Diodenlaser mit einer Emission in diesem Wellenlängenbereich zur Verfügung stehen, erfolgt die Anregung üblicherweise durch diodengepumpte infrarote Festkörperlaser basierend auf Nd:YAG oder Nd:YVO_4, die anschließend durch Erzeugung der zweiten Harmonischen in einem nichtlinearen Kristall ins Grüne frequenzkonvertiert werden. Dies macht die erforderlichen Pumpquellen für Ti:Saphir aufwändig und kostenintensiv. Zusätzlich ist es erforderlich, die hohe Spitzenintensität der Femtosekunden-Impulse vor deren Verstärkung durch eine zeitliche Streckung bis in den Bereich einiger Nanosekunden zu reduzieren, um so eine selbstinduzierte Zerstörung des Verstärkers zu verhindern. Später werden die Impulse dann wieder in den Femtosekundenbereich komprimiert, häufig verbunden mit hohen Transmissionsverlusten in einer Anordnung aus optischen Strichgittern. Diese Technik wird als *Chirped Pulse Amplification* (CPA) bezeichnet [13, 14] und stellt ein Standardverfahren zur Verstärkung von Femtosekunden-Impulsen dar [15–18]. Impulse mit einer Dauer von 20 fs direkt aus einem Ti:Saphir regenerativen Verstärker wurden bereits vor einiger Zeit demonstriert [19] und sind mittlerweile kommerziell erhältlich [20]. So wurde ein System vorgestellt, welches 60 fs Impulse mit einer mittleren Leistung von 6.5 W und einer signifikant höheren Wiederholrate von 20 kHz generiert [21]. Die prinzipiellen Nachteile dieser Systeme bleiben jedoch bestehen, trotz der bedeutenden Fortschritte, die über die Jahre erzielt wurden. Sie machen Ti:Saphir Verstärker zu sehr komplexen, kostenintensiven und relativ ineffizienten Systemen. Hinzu kommt, dass die Wiederholrate kommerzieller Systeme meist auf etwa 5 kHz beschränkt bleibt, was ihren breiten Einsatz im industriellen Umfeld aufgrund des geringen Durchsatzes der Produktion zusätzlich erschwert.

Schon seit längerem konzentrieren sich daher zahlreiche Forschungsaktivitäten auf die Untersuchung alternativer Lasermaterialien, welche sich zum direkten Pumpen mit Diodenlasern im nahen Infrarot eignen. Ytterbium-dotiertes YAG (Yb:YAG) oder seit kurzem auch Yb:KGW (Yb:KGd$(WO_4)_2$) und Yb:KYW (Yb:KY$(WO_4)_2$) stehen heute vielfach im Mittelpunkt der Untersuchungen. Diese können im Bereich zwischen 940 und 980 nm effizient mit Hochleistungs-Diodenlasern basierend auf InGaAs angeregt werden, während die Linienbreite des Laserübergangs bei 1030 nm groß genug für die Erzeugung und Verstärkung von Femtosekunden-Impulsen ist. Durch die einfache elektronische Struktur des Yb^{3+}-Ions und die Lage der entsprechenden Energieniveaus gibt es praktisch keine zum Laserbetrieb parasitären Effekte wie „Upconversion“, „Excited State Absorption“ oder „Concentration Quenching“ [22].

Regenerative Verstärkersysteme basierend auf Yb:YAG werden schon länger untersucht [23] und gerade erst wurde über die Erzeugung von 30 W mittlerer Leistung bei einer Wiederholrate von 50 kHz mit einer Impulsdauer von 5 ps berichtet [24]. Die Wolframate Yb:KGW und Yb:KYW bieten nicht die gleiche mechanische Stabilität wie Yb:YAG, sind jedoch durch ihre größere Verstärkungsbandbreite in der Lage kürzere Impulse von 100 fs und darunter zu erzeugen. Dies macht jedoch weiterhin eine zeitliche Verlängerung der Impulse erforder-

lich, sei es durch einen separaten Strecker oder resonatorinterne dispersive Elemente, während die sich anschließende Rekompression zu zusätzlichen Verlusten führt [25–28]. Kommerzielle diodengepumpte Femtosekunden-Systeme basierend auf Ytterbium-dotierten Laserkristallen beginnen jetzt langsam den Markt zu erschließen. So wurde gerade ein regenerativer Yb:KGW Verstärker vorgestellt, der 500-fs-Impulse mit einer mittleren Leistung von 4 W bei einer Wiederholrate von 7 kHz liefert [29].

Zahlreiche Untersuchungen mit Ti:Saphir Verstärkersystemen schienen in der Vergangenheit die Vermutung nahe zu legen, dass Impulsdauern im Bereich von 100 fs zum Erreichen höchstmöglicher Präzision und Qualität bei der Bearbeitung verschiedenster Materialien erforderlich sind. Zumindest im Falle von Metallen zeigen jüngste Forschungsergebnisse jedoch, dass mit Pikosekunden-Impulsen im Bereich von 10 ps mit der richtigen Strategie nahezu gleichwertige Ergebnisse erzielt werden können [30–33]. Dies ist auf das bei der Bearbeitung entstehende heiße Plasma aus freien Elektronen zurückzuführen, welches seine Energie nur vergleichsweise langsam über einen Zeitraum von einigen zehn Pikosekunden auf die Atome und Ionen des Materials überträgt. Somit ergibt sich keine zwangsläufige Notwendigkeit dafür, kürzere Impulsdauern zu verwenden, da dieser Prozess auch bei der Anregung mit Femtosekunden-Impulsen nicht schneller abläuft. Der Energieübertrag vom Plasma auf das umgebende Material hat insbesondere auch zur Folge, dass selbst bei der Bearbeitung mit Femtosekunden-Impulsen ein gewisser Anteil an Schmelze unvermeidbar bleibt.

Die technologischen Herausforderungen werden bei der Mikromaterialbearbeitung mit Pikosekunden-Impulsen entscheidend herabgesetzt: So können zum einen Neodym-dotierte Lasermaterialien wie Nd:YAG oder Nd:YVO_4 verwendet werden, welches heute Standardmaterialien für effiziente diodengepumpte Festkörperlaser sind. Zum anderen kann bei diesen Impulsdauern üblicherweise auf CPA verzichtet werden, da die auftretenden Leistungsdichten wesentlich geringer sind. Auf diese Weise sollten sich mit Pikosekunden-Impulsen bedeutend einfachere, zuverlässigere und kostengünstigere Ultrakurzpuls-Strahlquellen realisieren lassen, welche besser an die Anforderungen der Industrie angepasst sind. Abbildung 1.1 deutet schematisch an, wie die genannten Aspekte den Aufbau eines Pikosekunden-Lasers im direkten Vergleich zu einem herkömmlichen Ti:Saphir Verstärkersystem vereinfachen.

Die Erzeugung von Pikosekunden-Impulsen hoher Energie in Nd:YAG wurde in der Vergangenheit bereits intensiv untersucht [34–37]. Die vergleichsweise geringe Verstärkungsbandbreite des Lasermediums von lediglich 0.6 nm beschränkt die Dauer der erzeugten Impulse jedoch auf etwa 20–50 ps. Heute stehen daher vor allem Materialien wie Nd:YVO_4 [38–42] und Nd:$GdVO_4$ [43] im Blickpunkt der Untersuchungen, mit denen sich aufgrund der größeren Linienbreite Impulse im Bereich von 10 ps effizient erzeugen und verstärken lassen.

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit zielten darauf ab, kompakte und effiziente Strahlquellen für Impulse hoher Energie im Pikosekundenbereich zu konzipieren und aufzubauen. Hierzu mussten zunächst die zum Seeden der Verstärker erforderlichen Oszillatoren realisiert werden, bevor entsprechende regenerative Verstärkersysteme untersucht werden konnten. Das Arbeiten mit Impulsdauern im Pikosekundenbereich ermöglichte die Verwendung Neodym-dotierter Materialien wie Nd:YVO_4 und Nd:$GdVO_4$, die effizient mit Diodenlasern angeregt werden können und sich aufgrund ihrer thermischen und optischen Eigenschaften

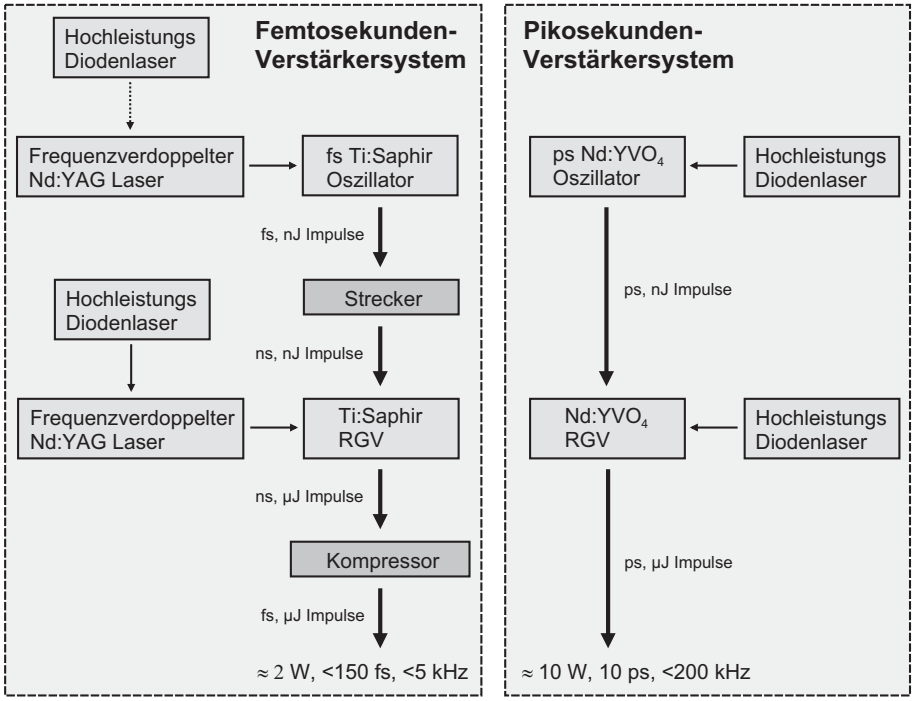

Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau eines typischen Femtosekunden Ti:Saphir Verstärkersystems und eines direkt diodengepumpten Nd:YVO_4 Verstärkers mit Pikosekunden-Impulsdauern (RGV: Regenerativer Verstärker). Nähere Erläuterungen finden sich im Text.

hervorragend zur Konstruktion von Hochleistungs-Festkörperlasern eignen. Deren hohe Effizienz, Stabilität und einfacher Aufbau wurde vor allem auch dadurch gewährleistet, dass auf *Chirped Pulse Amplification* verzichtet werden konnte.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 wird eine Einführung in die der Arbeit zugrunde liegenden physikalischen Grundlagen und experimentellen Techniken gegeben. Dies umfasst die Methode der regenerativen Verstärkung zur Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse hoher Energie, die Grundlagen der Modenkopplung und eine kurze Einführung in die Elektrooptik zum tieferen Verständnis der Funktionsweise schneller optischer Schalter. Eine Übersicht der optischen und physikalischen Eigenschaften von Nd:YVO_4 und Nd:$GdVO_4$ schließt das Kapitel ab. Kapitel 3 beschreibt zunächst den Aufbau und die Charakterisierung der modengekoppelten Oszillatoren als Quellen ultrakurzer Laserimpulse, bevor in den Kapiteln 4 und 5 die entsprechenden Verstärkersysteme basierend auf Nd:YVO_4 und Nd:$GdVO_4$ im Detail vorgestellt und diskutiert werden. Dabei erzeugte die Nd:YVO_4 Strahlquelle Impulse mit einer Dauer von etwa 11 ps und einer maximalen Impulsenergie von 0.5 mJ bei einer Wiederholrate von 20 kHz, die anschließend durch nichtlineare Frequenzkonversion auch in den sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich konvertiert wurden. Das Nd:$GdVO_4$ System arbeitete bei einer bedeutend höheren Repetitionsrate von 200 kHz und lieferte dort Impulse mit einer Dauer von unter 7 ps und einer Energie von etwa 60 μJ. Abschließend werden in Kapitel 6 die erzielten Ergebnisse noch einmal kurz zusammengefasst.

KAPITEL 2

Grundlagen

Das folgende Kapitel befasst sich mit den theoretischen Grundlagen und den technologischen Hintergründen der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen. Es wird ein Überblick sowohl über die experimentellen Methoden, die für diese Untersuchungen zur Anwendung kamen, als auch über die optischen und physikalischen Eigenschaften der zentralen Komponenten gegeben.

Zunächst wird in Abschnitt 2.1 ausführlich die Methode der regenerativen Verstärkung zur Erzeugung von ultrakurzen Impulsen hoher Energie vorgestellt, bevor Abschnitt 2.2 prinzipiell die verschiedenen Möglichkeiten zur Erzeugung kurzer optischer Impulse durch passive Modenkopplung darstellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der in dieser Arbeit angewandten Modenkopplung in sättigbaren Halbleiterabsorbern.

Schnelle optische Modulatoren sind eine Grundvoraussetzung der technischen Realisierung von regenerativen Verstärkersystemen. Abschnitt 2.3 widmet sich daher den Grundlagen der Elektrooptik und den Materialeigenschaften der in den realisierten Verstärkersystemen verwendeten Pockels-Zellen.

Zum Abschluss des Kapitels wird in Abschnitt 2.4 ein kurzer Überblick über die Eigenschaften der in den experimentellen Untersuchungen eingesetzten Lasermaterialien Nd:YVO_4 und Nd:$GdVO_4$ gegeben.

2.1 Regenerative Verstärkung ultrakurzer Lichtimpulse

Zur Erzeugung ultrakurzer Impulse hoher Energie im Piko- und Femtosekundenbereich ist die regenerative Verstärkung ein etabliertes Verfahren [13, 34, 44, 45]. Da diese experimentelle Methode auch in den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit zum Einsatz kommt, soll sie im Folgenden näher erläutert werden.

2.1.1 Überblick über das Verfahren der regenerativen Verstärkung

Prinzipiell handelt es sich bei einem regenerativen Verstärker um eine Multipass-Anordnung, bei der ein einzelner kurzer Lichtimpuls mehrfach ein verstärkendes Medium durchläuft, bis die gesamte im Medium zur Verfügung stehende Verstärkung abgebaut ist. Die Anzahl der Durchgänge durch das Medium ist dabei nicht von der Geometrie vorgegeben, sondern kann durch den experimentellen Aufbau frei gewählt werden. In der Zeitspanne bis zur Verstärkung des nächsten Impulses kann sich die Inversion des Mediums anschließend regenerieren. Der prinzipielle Aufbau eines solchen Systems ist in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt.

Der so genannte Seed-Laser bildet den Ausgangspunkt des Systems und erzeugt die zu verstärkenden, ultrakurzen optischen Impulse. Dabei handelt es sich meist um optisch angeregte Festkörperlaser mit verhältnismäßig niedrigen mittleren Ausgangsleistungen im Bereich zwischen etwa 100 mW und einigen Watt. Zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse werden diese Systeme passiv modengekoppelt, zumeist entweder durch den Einsatz von sättigbaren Halbleiterabsorbern oder durch die Erzeugung einer Kerr-Linse. Diese Verfahren sind Gegenstand der Diskussion in Abschnitt 2.2 und werden dort näher erläutert. Die zeitliche Dauer der erzeugten Impulse liegt im Femto- und Pikosekundenbereich und ist im Wesentlichen abhängig von der Verstärkungsbandbreite des gewählten Lasermaterials. Für typische Festkörpermaterialien wie Ti:Saphir [46–48], Yb:Glas [49], Yb:KGW [50–52] und Yb:KYW [53, 54] liegt diese im Bereich zwischen 10 und etwa 200 fs, während für Yb:YAG [55, 56], Nd:YVO_4 [57], Nd:$GdVO_4$ [58–60] und Nd:YAG [61] Impulsdauern zwischen 0.5 und 20 ps üblich sind. Die Wiederholrate der erzeugten Impulse wird durch die optische Länge des Laserresona-

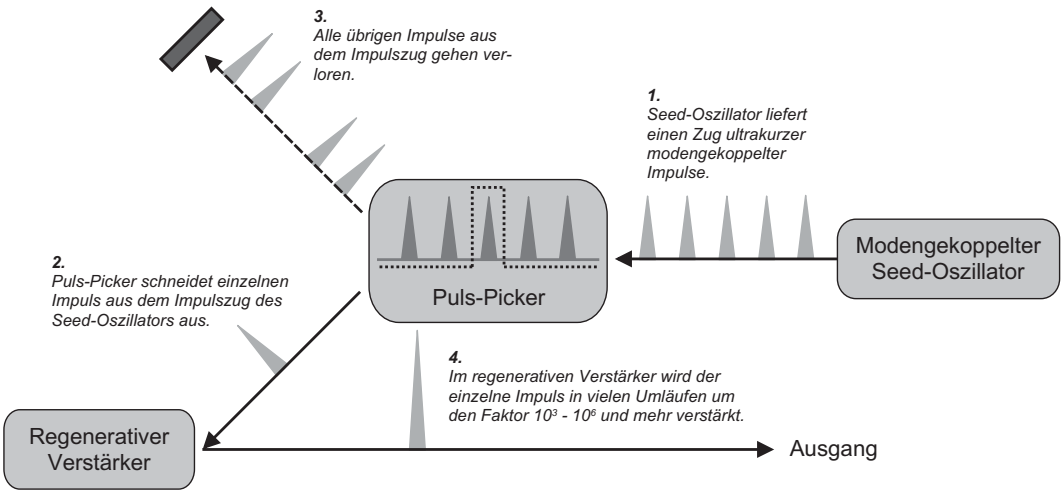

Abbildung 2.1: Schema der Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse hoher Energie in einem regenerativen Verstärkersystem. Zunächst erzeugt ein modengekoppelter Seed-Oszillator einen kontinuierlichen Zug ultrakurzer Impulse (1). Aus dem Impulszug wird in einem Puls-Picker ein einzelner Impuls ausgeschnitten (2). Der restliche Impulszug – und damit der Großteil der mittleren Leistung des Seed-Lasers – wird geblockt und geht verloren (3). Der einzelne ausgeschnittene Impuls absolviert eine Reihe von Umläufen im regenerativen Verstärker und kann so um viele Größenordnungen verstärkt werden (4).

tors ($\nu_{\mathrm{rep}} = c/2nL$) bestimmt und beträgt für kommerziell verfügbare Systeme meist etwa 50–150 MHz. Daraus ergibt sich der zeitliche Abstand $1/\nu_{\mathrm{rep}}$ zwischen den Impulsen des Seed-Oszillators entsprechend zu etwa 10 ns. Aus der mittleren Leistung des Lasers und seiner Wiederholrate kann die Energie der erzeugten Impulse gemäß der Beziehung $E = P/\nu_{\mathrm{rep}}$ bestimmt werden, welche meist zwischen etwa hundert pJ und einigen zehn nJ beträgt. Ziel des regenerativen Verstärkersystems ist es, die Impulsenergie – abhängig von der speziellen Anwendung – um viele Größenordnungen in den Bereich von μJ, mJ oder auch J zu vervielfachen.

Hierzu ist es erforderlich, den Gewinn des Verstärkers nicht wie in einer linearen Verstärkerkette gleichmäßig über alle Impulse des Seed-Lasers zu verteilen, sondern in einem einzelnen Impuls zu konzentrieren. In einem Puls-Picker wird daher zunächst aus dem Impulszug des Oszillators ein einzelner Impuls ausgeschnitten (siehe Abbildung 2.1). Dafür sind in der Regel schnelle optische Schalter wie akusto- (AOM) und elektrooptische Modulatoren (EOM) erforderlich, die entweder durch Beugung oder Drehung der Polarisation die räumliche Trennung des geschalteten Impulses vom Restsignal ermöglichen [62]. Die Schaltzeit der Modulatoren sollte kleiner als der zeitliche Abstand der Seed-Impulse sein, da der Modulator sonst zu früh ein- bzw. zu spät abschaltet und so mehr als nur ein einziger Impuls ausgeschnitten wird. Für die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit kommen hierfür ausschließlich schnelle elektrooptische Schalter zum Einsatz, die auch als Pockels-Zellen bezeichnet werden und deren Schaltzeit meist deutlich unter 10 ns beträgt. Abschnitt 2.3 gibt eine kurze Einführung in die Funktionsweise von Pockels-Zellen, während in Kapitel 4.3 der Aufbau elektrooptischer Puls-Picker im Detail beschrieben wird.

Die Schaltvorgänge im Puls-Picker wiederholen sich periodisch und legen mit ihrer Frequenz die Repetitionsrate des gesamten Systems fest. Damit ermöglicht es der Puls-Picker, die hohe Wiederholrate der Impulse des Seed-Lasers von vielen MHz auf einen beliebigen Wert darunter herabzusetzen. Die spezielle Wahl der Repetitionsrate ist weitgehend abhängig von der gewünschten Anwendung und kann im Bereich zwischen einigen Hz und etwa 1 MHz liegen. Zur Erzeugung von Impulsen sehr hoher Energie wird man niedrige Wiederholraten bevorzugen, um auf diese Weise wenige Impulse effektiv verstärken zu können. Für andere Anwendungen sind hingegen hohe Repetitionsraten von größerem Interesse, welche dann im Wesentlichen durch die zur Verfügung stehenden optischen Schalter und die sinkenden Impulsenergien limitiert sind.

Der aus dem Impulszug des Seed-Lasers ausgeschnittene Impuls wird anschließend in den regenerativen Verstärker eingekoppelt. Der Rest des Impulszuges, der den Großteil der mittleren Leistung des Seed-Lasers beinhaltet, wird nicht benötigt und geblockt. Innerhalb des Verstärkers macht der Seed-Impuls viele Durchgänge durch das verstärkende Medium, bis dessen Inversion abgebaut ist. Der verstärkte Impuls wird anschließend ausgekoppelt und die Inversion hat bis zum nächsten eingekoppelten Seed-Impuls Zeit zur Regeneration. Dabei ist die Zeitspanne, in der der Seed-Impuls im Verstärker umläuft, im Allgemeinen wesentlich kleiner als der zeitliche Abstand bis zum nächsten eingekoppelten Impuls. Damit bestimmt die Repetitionsrate des Puls-Pickers direkt die dem verstärkenden Medium zur Verfügung stehende Regenerationszeit.

Vor allem bei der regenerativen Verstärkung von Femtosekunden-Impulsen können die hohen auftretenden Spitzenintensitäten der Impulse nichtlineare Effekte wie Selbstfokussierung induzieren und so zu einer Zerstörung optischer Komponenten führen. Um dies zu verhindern, wird zur Reduzierung der Spitzenintensität vor dem Verstärker eine zeitliche Streckung der Seed-Impulse durchgeführt. Dies kann beispielsweise durch die Gruppengeschwindigkeitsdispersion in sehr langen optischen Single-Mode Fasern oder einer Anordnung aus optischen Gittern erfolgen, in denen die Impulsdauer um viele Größenordnungen bis in den Nanosekundenbereich verlängert wird [63]. Die zeitlich gestreckten Impulse werden dann regenerativ verstärkt und anschließend in einem Gitter-Kompressor wieder in den Femtosekundenbereich komprimiert [64–67]. Dieses Verfahren wird wegen der an den Impulsen durchgeführten Frequenzmodulation auch als *Chirped Pulse Amplification* (CPA) bezeichnet [13, 14]. Sie stellt die heute übliche Methode zur Erzeugung von Femtosekunden-Impulsen hoher Energie in kommerziellen Ti:Saphir Verstärkersystemen zur Mikromaterialbearbeitung dar.

2.1.2 Aufbau und Funktionsweise regenerativer Verstärker

In Abbildung 2.2 ist der einfachste Aufbau eines elektrooptisch geschalteten, regenerativen Verstärkers schematisch dargestellt. Dieser besteht aus dem verstärkenden Medium innerhalb eines Resonators mit Spiegeln ausschließlich hoher Reflektivität, der zusätzliche polarisationsselektive und -manipulative Elemente enthält. Im Prinzip handelt es sich um einen Laser mit einem Resonator hoher Güte und Komponenten zum Einkoppeln, Halten und Auskoppeln der zu verstärkenden Impulse. Dies wird durch eine Kombination aus Dünnschichtpolarisator (DSP), Viertelwellenplatte ($\lambda/4$) und Pockels-Zelle (PZ) ermöglicht, deren Zusammenspiel im Folgenden kurz erläutert werden soll.

Eine typische Schaltsequenz des regenerativen Verstärkers ist in Abbildung 2.3 grafisch dargestellt. In der Zeitspanne zwischen zwei eingekoppelten Seed-Impulsen ist keine Hochspannung an der Pockels-Zelle angelegt, so dass die Viertelwellenplatte in Kombination mit dem Polarisator zu maximalen Verlusten von näherungsweise 100 % im Resonator führt. Dies verhindert die Entstehung einer Laseroszillation des Verstärkers im kontinuierlichen Betrieb und führt zum Aufbau einer maximalen Inversion im verstärkenden Medium, vergleichbar der Situation in einem gütegeschalteten Laser im Zustand hoher Verluste des Resonators.

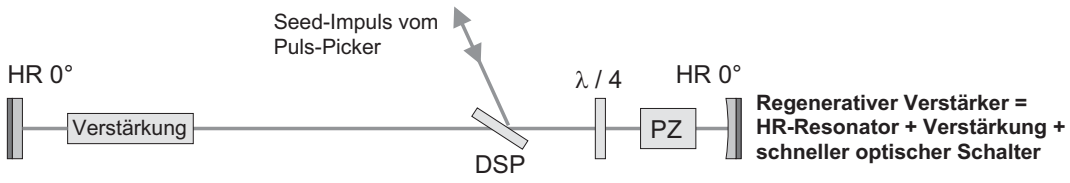

Abbildung 2.2: Prinzipieller Aufbau eines regenerativen Verstärkers: Der Verstärker besteht aus einem Resonator hoher Güte (HR: hochreflektierende Spiegel), dem verstärkenden Medium und einem schnellen optischen Schalter zum Einkoppeln, Halten und Auskoppeln der zu verstärkenden Impulse. Dies wird durch eine Kombination aus Pockels-Zelle (PZ), Viertelwellenplatte ($\lambda/4$) und Dünnschichtpolarisator (DSP) ermöglicht.

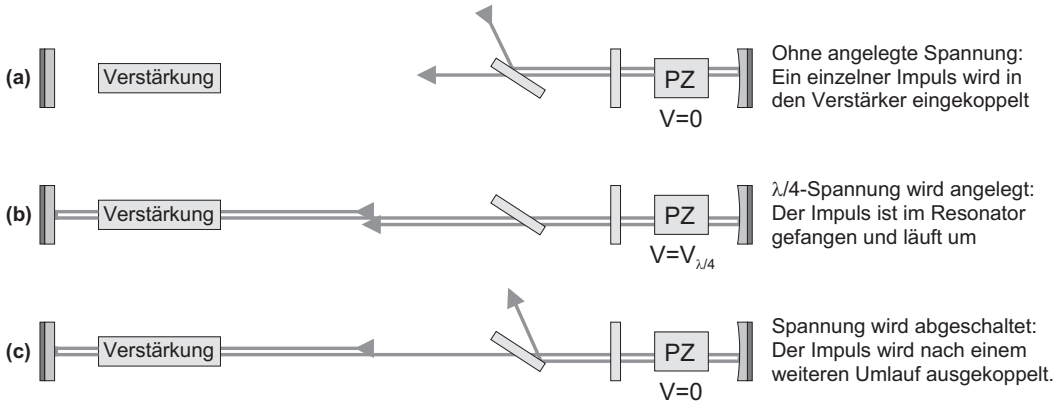

Abbildung 2.3: Typische Schaltsequenz eines regenerativen Verstärkers: Ohne Anlegen einer Spannung an die Pockels-Zelle dreht ein Doppeldurchgang durch die Viertelwellenplatte die Polarisation des Seed-Impulses um 90°, so dass er in den Resonator des Verstärkers eingekoppelt wird *(a)*. Nach Anlegen der $\lambda/4$-Spannung an die Pockels-Zelle kompensieren sich die Phasenverschiebungen von Zelle und Viertelwellenplatte im Doppeldurchgang, so dass der Impuls im Resonator gefangen wird. Er läuft in jedem Umlauf zweimal durch den Laserkristall und wird verstärkt *(b)*. Nach dem Abbau der Verstärkung im Medium wird die Spannung an der Zelle abgeschaltet und der Impuls nach einem weiteren Doppeldurchgang durch die Viertelwellenplatte aus dem Resonator ausgekoppelt *(c)* [68].

Ein einzelner Seed-Impuls wird nun, wie in Abbildung 2.3a skizziert, in den Resonator des Verstärkers injiziert. Der Impuls sei senkrecht zur Tischebene linear polarisiert und werde am Polarisator reflektiert. Da die Pockels-Zelle abgeschaltet ist, erfährt die lineare Polarisation des Impulses beim zweimaligen Passieren der Viertelwellenplatte insgesamt eine 90°-Drehung, ist also parallel zur Tischebene polarisiert, so dass er durch den Polarisator transmittiert wird.

Die Pockels-Zelle wird nun mit ihrer Schaltspannung angesteuert, so dass sich die $\lambda/4$-Phasenverzögerungen von Viertelwellenplatte und Zelle zu einer $\lambda/2$-Verzögerung addieren und so zu einer 90°-Drehung der linearen Polarisation im Einfachdurchgang durch die beiden Komponenten führen (Abbildung 2.3b). Dabei ist es erforderlich, dass die vollständige $\lambda/4$-Spannung anliegt, sobald der Impuls nach einem Umlauf im Resonator wieder die Pockels-Zelle erreicht. Ansonsten wird keine vollständige Drehung der Polarisation erreicht, und es werden elliptische Anteile induziert, die am Polarisator zu zusätzlichen Verlusten führen. Die Pockels-Zelle wird daher meist an einem Ende des Resonators positioniert, damit annähernd die gesamte Umlaufzeit im Resonator für das Schalten der Zelle zur Verfügung steht. Da die Schaltzeit der Pockels-Zelle typischerweise vorgegeben ist, stellt sie eine untere Schranke für die Umlaufzeit des Impulses im Resonator dar. Die Resonatorlänge wird somit durch die Schaltzeit der Pockels-Zelle bestimmt.

Im Zweifachdurchgang durch die Viertelwellenplatte und die Pockels-Zelle erfährt die Orientierung der linearen Polarisation des Impulses keine Änderung, so dass er für die Dauer des Hochspannungsimpulses an der Pockels-Zelle im Resonator des Verstärkers gefangen ist. Somit kann die Anzahl der Umläufe im Verstärker über die Dauer des Hochspannungsimpulses an der Pockels-Zelle bestimmt werden. Bei jedem Umlauf macht der Impuls zwei Durchgänge