

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpulsverstärkern im Scheibenlaserdesign

von Dr.-Ing. Daniel Müller
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr. Ursula Keller

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.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2005

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2005

ISBN 3-8316-0508-4

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Liste der verwendeten Symbole	11
Extended Abstract	17
1 Einleitung	21
1.1 Motivation	21
1.2 Inhalt und Gliederung	22
2 Regenerativer Yb:YAG Kurzpulsverstärker im Scheibenlaserdesign 25	
2.1 Grundlagen	25
2.1.1 Der Scheibenlaser	25
2.1.2 Kurzpulsverstärkersysteme	27
2.1.3 Kurzpulsverstärker auf Scheibenlaserbasis	28
2.2 Aufbau und Funktionsweise des Verstärkersystems.....	29
2.2.1 Überblick.....	34
2.2.2 Seedlaser und Strahlverlauf zum Pulspicker	35
2.2.3 Strahlverlauf im Pulspicker	36
2.2.4 Strahlverlauf im Verstärker (ohne Resonator).....	37
2.2.5 Strahlverlauf im Resonator	38
2.2.6 Funktion der restlichen Komponenten.....	40
2.2.7 Gesichtspunkte des Resonatordesigns	41
2.2.8 Notwendigkeit eines Pulspickers	44
2.3 Theoretisches Modell des regenerativen Verstärkers	44
2.3.1 Zielsetzung der Modellierung.....	45
2.3.2 Modell der Verstärkungsphase	46
2.3.2.1 Ratengleichungen für die Verstärkung im Doppeldurchgang	46
2.3.2.2 Lösung der Ratengleichungen	50
2.3.2.3 Materialparameter von Yb:YAG für den Verstärkungsprozess	50
2.3.2.4 Rekursive Berechnung der Verstärkungsphase	51
2.3.2.5 Differenzialgleichungen für die Verstärkungsphase	53
2.3.3 Modell der Pumpphase	55
2.3.3.1 Aufstellen der Ratengleichung.....	55

2.3.3.2	Integration der Ratengleichungen	57
2.3.3.3	Materialparameter von Yb:YAG für den Pumpprozess.....	58
2.3.4	Kriterien zur Optimierung des Systems	59
2.3.4.1	Ziele der Optimierung	60
2.3.4.2	Wirkungsgrad der Verstärkungsphase	60
2.3.4.3	Wirkungsgrad der Pumpphase	62
2.3.4.4	Umlaufzahl und akkumulierte Energiedichte	64
2.4	Messtechnik und Verifizierung des Modells.....	66
2.4.1	Bestimmung der Pulsenergie	66
2.4.2	Bestimmung der extrahierbaren Energiedichte.....	67
2.4.2.1	Methode 1: Messung der Verstärkung.....	67
2.4.2.2	Methode 2: Messung der Fluoreszenzstrahlung	70
2.4.3	Mess- und Diagnosesystem mit angepasster Datenakquisitionsrate.....	73
2.4.3.1	PC-Messkarte und Signalkonditionierung	73
2.4.3.2	Software zur Datenakquisition und Echtzeitvisualisierung	75
2.4.4	Überprüfung des Modells anhand experimenteller Daten	77
2.4.4.1	Modell der Pumpphase.....	77
2.4.4.2	Modell der Verstärkungsphase.....	79
2.4.4.3	Erweiterung des Modells der Verstärkungsphase.....	81
3	Pulsenergieschwankungen im rückwirkungsfreien Verstärkersystem	85
3.1	Einführung zu Schwankungen	85
3.1.1	Schwankungen der Eigenschaften von Laserpulsen.....	85
3.1.2	Unterscheidung von Schwankungen und Fluktuationen.....	87
3.2	Die wichtigsten Störquellen und die Art ihrer Einflussnahme.....	88
3.2.1	Gruppierung der Störquellen.....	88
3.2.2	Schwankungen der Pulsenergie vor der Verstärkung	88
3.2.3	Schwankungen der Gesamtverstärkung.....	90
3.2.4	Schwankungen der Gesamtverluste	91
3.3	Betriebsparameter zur Reduktion von Pulsenergieschwankungen	92
3.3.1	Schwankungen der Anzahl der Umläufe	93
3.3.2	Schwankungen der Anfangspulsenergie	94
3.3.3	Schwankungen der extrahierbaren Energiedichte.....	94
3.3.4	Schwankungen der Umlaufverluste	97
4	Pulsenergiefluktuation durch Rückwirkungen im Verstärkersystem..	99
4.1	Einführung zur nichtlinearen Dynamik.....	99
4.1.1	Nichtlineare Dynamik und Chaos bei Lasern	99

4.1.2	Ursachen von Instabilitäten und Chaos im regenerativen Verstärker	101
4.1.3	Grundlagen eindimensionaler diskreter dynamischer Systeme	101
4.1.3.1	Definition	102
4.1.3.2	Ruhelage und deren Stabilität	102
4.1.3.3	Periodenverdopplung und Übergang ins Chaos	103
4.2	Abbildungsvorschrift und Ruhelage der extrahierbaren Energiedichte	104
4.2.1	Zerlegung der Abbildungsvorschrift eines Verstärkungszyklus	104
4.2.2	Abbildungsvorschrift der Pumpphase	105
4.2.3	Abbildungsvorschrift der Verstärkungsphase	106
4.2.4	Vollständiger Verstärkungszyklus und Pulsenergiedichte	108
4.2.5	Einfluss der Ruhelage auf den optischen Wirkungsgrad	108
4.3	Berechnung der Grenze des stabilen Betriebs	110
4.3.1	Berechnung der Ableitung ϕ'_{Pump}	110
4.3.2	Berechnung der Ableitung ϕ'_{Verst}	111
4.3.3	Betriebsparameter für stabile Ruhelagen	114
4.4	Der Weg ins Chaos beim regenerativen Verstärker	116
4.4.1	Zeitreihenanalyse der Fluoreszenz und der Ausgangspulsenergie	116
4.4.2	Analyse der Bifurkationsdiagramme	119
4.5	Betriebsparameter für Stabilität, Periodenverdopplung oder Chaos	122
4.5.1	Einfluss der Repetitionsrate	122
4.5.2	Einfluss der Pulsenergie vor der Verstärkung	124
4.5.3	Einfluss der Pumpleistung	127
4.5.4	Einfluss der Umlaufverluste	129
5	Stabilisierung der Pulsenergie	131
5.1	Ansätze zur Stabilisierung des regenerativen Verstärkers	131
5.1.1	Reduktion von äußeren Störeinflüssen	131
5.1.2	Stabilisierung der Versorgungsgeräte und des optischen Aufbaus	132
5.1.3	Verwendung geeigneter Betriebsparameter	133
5.1.4	Konzeptionelle Modifikationen	134
5.1.5	Regelung des Verstärkers	135
5.2	Regelkonzepte für den regenerativen Verstärker	137
5.2.1	Regelung über die Anzahl der Umläufe	137
5.2.2	Regelung über die Pumpleistung	141
5.2.3	Regelung über Zusatzverluste	142
5.2.4	Regelung über die Anfangspulsenergie	144

6 Zusammenfassung der Ergebnisse	147
Literaturverzeichnis.....	151
A Anhang	157
A.1 Justage des Verstärkersystems	157
A.2 Integration der Ratengleichungen des Verstärkungsprozesses	159
A.2.1 Ausgangspunkt.....	159
A.2.2 Energieerhaltung.....	160
A.2.3 Lösung für kurze Pulse	160
A.2.4 Lösung für lange Pulse.....	162
Danksagung	165

1 Einleitung

1.1 Motivation

Kurzpulslasersysteme, die auf einem einzigen optischen Tisch Platz finden, erzeugen heute Laserstrahlen, die aufgrund ihrer geringen Pulslänge eher Laserpunkte genannt werden müssten, und deren Spitzenleistung mit der eines Kernkraftwerks vergleichbar ist. Dank einer stetig wachsenden Zahl von Anwendungen besteht an dieser Technologie neben dem wissenschaftlichen auch ein großes wirtschaftliches Interesse. In Deutschland wird die Entwicklung von Kurzpulslasersystemen deshalb von öffentlichen Forschungsinstituten und von der Industrie gemeinsam vorangetrieben, nachdem sie 1999 mit dem Förderverband „Femtosekundentechnologie“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung angestoßen wurde. Am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) wurde bei der Realisierung derartiger Systeme von Beginn an auf das Scheibenlaserkonzept gesetzt. Es besitzt den für Kurzpulslaser entscheidenden Vorteil, dass bei einer Skalierung der Ausgangspulsenergie die flächenbezogene Belastung des laseraktiven Materials nicht zunimmt. Nach ersten beachtlichen Erfolgen mit diesem Konzept standen der Nutzung des tatsächlichen Potenzials des Scheibenlaserprinzips aber auch Schwierigkeiten im Weg:

- Die bis dato kommerziell verfügbaren elektrooptischen Schalter, mit denen die Laserpulse in das Verstärkersystem ein- und ausgekoppelt werden, waren stör anfällig und erreichten nicht die benötigten langen Schaltdauern.
- Die Zerstörschwelle und die Formtreue der Scheiben entsprachen den Anforderungen des Dauerstrichbetriebs, erwiesen sich aber bei kurzen Laserpulsen bzw. großen Strahlquerschnitten als unzureichend.
- Beim Versuch, die Ausgangsleistung zu steigern, wurden Pulsenergiefluktuationen beobachtet und es war vorerst unklar, inwieweit diese die Ausgangspulsenergie und die Repetitionsrate beim regenerativen Verstärker auf Basis des Scheibenlaser begrenzen.

In jedem der Punkte wurden durch die Anstrengungen im und außerhalb des IFSW innerhalb der letzten Jahre Fortschritte erzielt. Als unerwartet langwierig und mühevoll erwies sich dabei die Verbesserung der Scheiben, aber auch die Optimierung der Pockelszellen. Obwohl bei beiden Punkten der Weg im Prinzip vorgezeichnet war, mussten viele Detailfragen geklärt und nicht wenige Rückschläge hingenommen werden, um dem Ziel schrittweise näher zu kommen. Davon unterschied sich auf angenehme Weise die Untersuchung der rätselhaften chaotischen Fluktuationen, mit deren Auftreten nicht gerechnet wurde und für die es vorerst auch keine Erklärung gab. Diesem interessanten Phänomen, das zudem eine nicht zu unterschätzende

praktische Relevanz besitzt, auf den Grund zu gehen war eine äußerst spannende Herausforderung.

1.2 Inhalt und Gliederung

Die Ergebnisse aus der Entwicklung und Optimierung von mehreren Kurzpulsverstärkersystemen auf Basis des Scheibenlasers erlauben und erfordern es, für diese Dissertation eine begrenzte Themenauswahl zu treffen. Diese fiel auf das, aus Sicht des Autors, interessanteste Thema, die Frage nach der Stabilität der Pulsenergie. Dafür bleiben andere wichtige Aspekte, wie das Resonatordesign, die Weiterentwicklung der Pockelszellen oder die Skalierung der Ausgangsleistung in dieser schriftlichen Ausarbeitung unberücksichtigt. Das Thema wurde auch deshalb gewählt, weil anzunehmen ist, dass die Ergebnisse im Gegensatz zum aktuellen Stand der Leistungskalierung auch nach Drucklegung dieser Arbeit noch von Interesse sind. Die Problematik von Fluktuationen und Schwankungen der Ausgangspulsenergie wird auch künftige Lasersysteme betreffen. Trotz der Fokussierung auf die Pulsenergiestabilität werden in dieser Arbeit aber auch viele grundlegende und allgemeine Aspekte diskutiert; schließlich ist das Verständnis des stabilen Betriebs die Voraussetzung zur Analyse der Instabilitäten.

Neben Einleitung und Zusammenfassung besteht diese Arbeit aus vier in sich abgeschlossenen Kapiteln, die, wie in Abb. 1.1 dargestellt, aufeinander aufbauen. Kap. 2 ist dem Aufbau des Verstärkersystems, dem dazugehörigen theoretischen Modell und der verwendeten Messtechnik gewidmet. In diesem Grundlagenkapitel wird die Pulsenergiestabilität noch bewusst ausgeklammert, so dass es für sich genommen auch als eigenständige Einführung zum Themengebiet „Regenerative Verstärker im Scheibenlaserdesign“ gesehen werden kann. Da dies die erste Dissertation zu diesem Themengebiet ist, wurde den Grundlagen etwas mehr Platz eingeräumt. Auf dieser Basis aufbauend werden in Kap. 3 Schwankungen und in Kap. 4 Fluktuationen der Ausgangspulsenergie voneinander getrennt behandelt. (Im Sprachgebrauch dieser Arbeit werden Pulsenergieschwankungen durch Schwankungen

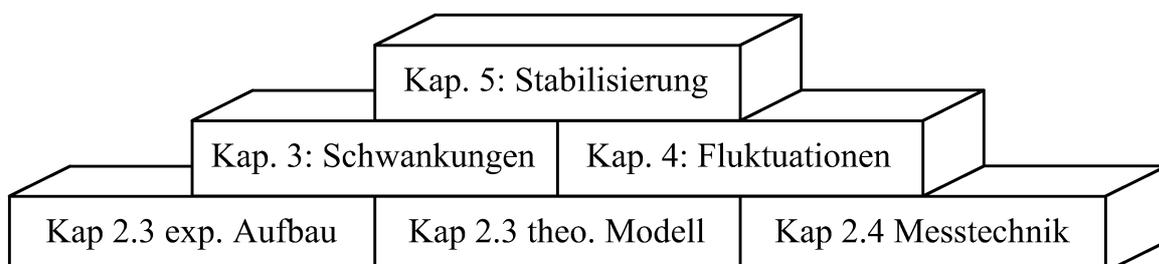


Abbildung 1.1: Aufbau dieser Arbeit. Die drei Unterkapitel von Kapitel 2 bilden die Grundlage für die weitere Arbeit. Kapitel 3 und Kapitel 4 sind weitgehend unabhängig voneinander, basieren aber beide auf Kapitel 2. Kapitel 5 setzt Kapitel 3 und Kapitel 4 voraus.

anderer Größen, z.B. durch die Änderung der Kühlwassertemperatur, verursacht, während Pulsenergiefluktuationen auch ohne äußere Störungen allein durch die Dynamik des Verstärkungsprozesses entstehen.) In beiden Kapiteln wird zuerst untersucht, wodurch jeweils die Abweichungen von einer konstanten Ausgangspulsenergie entstehen. Die Analyse der jeweiligen Mechanismen erlaubt es dann, Richtlinien zur Wahl vorteilhafter Betriebsparameter zu erstellen. Darüber hinausgehende Maßnahmen zur Stabilisierung der Ausgangspulsenergie werden in Kap. 5 diskutiert.

Die Wahl der Gliederung schließt eine strikte Trennung zwischen eigenen Überlegungen und bekannten Ergebnissen nach Kapiteln aus. Genauso wenig gibt es eine Trennung zwischen Theorie- und Experimentalteil. Die Modelle und die daraus abgeleiteten Aussagen werden jeweils im selben Kapitel experimentell überprüft.