

**FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-
NÜRNBERG**

INSTITUT FÜR INFORMATIK (MATHEMATISCHE MASCHINEN UND
DATENVERARBEITUNG)

Lehrstuhl für Informatik 10 (Systemsimulation)



**Abschlussbericht zum Innonet Projekt SOL:
Simulation und Optimierung innovativer Lasersysteme**

Christoph Pflaum

Technical Report 01-2011

Abschlussbericht zum Innonet Projekt SOL Simulation und Optimierung innovativer Lasersysteme

Präambel zum gesamten Abschlussbericht
und
Abschlussbericht des Teilvorhabens der
Universität Erlangen-Nürnberg
zum
Innovatives Netzwerk - IN 5559 –
von: Prof.Dr.Christoph Pflaum

Antragsteller:

Forschungseinrichtungen:

1. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

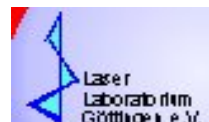
Schlossplatz 4
91054 Erlangen



Prof. Dr. Christoph Pflaum
Institut für Informatik
Cauerstraße 6
91058 Erlangen
pflaum@informatik.uni-erlangen.de

2. Laser-Laboratorium Göttingen e.V.

Dr. Klaus Mann
Hans-Adolf-Krebs-Weg 1
37077 Göttingen
Tel.: 0551 – 5035 - 41
Fax: 0551 – 5035 - 99
kmann@llg.gwdg.de



Unternehmen:

1. InnoLas GmbH

Herr Kelnberger
Justus-von-Liebig-Ring 8
82152 Krailling / München
Tel.: 089 899360 0
Fax: 089 899 360
Kelnberger@innolas.com



2. IB Laser AG

Am Schlangengraben 16
Dr. Massmann
13597 Berlin
Tel.: 030 33774 - 444
Fax: 030 33774 - 477
info@ib-laser.com



3. OptoPrecision GmbH

Dr. Martin Nägele
Auf der Höhe 15
28357 Bremen
Tel.: 0421 9496 118
Fax: 0421 9496 198
Martin.naegele@optoprecision.de



4. Xiton Photonics GmbH

Dr. Jürgen Bartschke
Opelstraße 10
67661 Kaiserslautern
Tel.: 0631 6275915
Fax: 0179 212 59078
JBartschke@xiton-photonics.com



5. LAS-CAD GmbH

Dr. Konrad Altmann
Brunhildenstrasse 9
80639 München
Tel.: 089 173607
Fax: 089 172594
Dr.altmann@las-cad.com



6. Metrolux GmbH

Dr. Karsten Fischer
Bertha-von-Suttner-Straße 5
37085 Göttingen
Tel.: 0551 79767 0
Fax: 0551 79767 13
c.fischer@metrolux.de



7. PHYWE Systeme GmbH

Herr Markus Grumann
Robert-Bosch-Breit 10
37079 Göttingen
Tel.: 0551 604 0
Markus.Grumann@Phywe.de



8. GWU Lasertechnik

Herr Gunter Warmbier
Talstr. 3
50374 Erftstadt-Friesheim
Tel.: 02235 955 220
Fax: 02235 756 32
info@gwu-group.de



Während des Projektes entstand ein sehr guter Kontakt zur Firma cleanLASER:

Clean-Lasersysteme GmbH
Herr Göhre
Dornkaulstraße 6
DE 52134 Herzogenrath
bei Aachen

Tel. +49 (0) 2407/9097-0
Fax +49 (0) 2407/9097-111

info@cleanlaser.de

Die Kooperation zu der Firma cleanLASER war für das Projekt sehr hilfreich.

Präambel zum gesamten Abschlussbericht

Von der Forschungseinrichtung *Laser-Laboratorium-Göttingen (LLG)* wurde von Herrn Schäfer und Herrn Mann ein eigener Abschlussbericht zum Teilvorhaben:

Aufbau eines Modengenerators und Charakterisierung komplexer Strahlungsfelder mittels Wignervertelung und Hartmann-Shack Wellenfrontsensoren

erstellt. Dieser Teil des Abschlussberichts wurde getrennt erstellt.

Inhalt:

1. KURZBESCHREIBUNG	1
1.1 AUFGABENSTELLUNG:	1
1.2 VORAUSSETZUNGEN UNTER DENEN DAS PROJEKT DURCHFÜHRT WURDE:	1
1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS:.....	2
1.4 STAND DER TECHNIK:	3
1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN:	4
2. EINGEHENDE DARSTELLUNG	5
2.1 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG:	5
2.2 NUTZEN UND VERWERTUNG:	6
2.3 FORTSCHRITT AUF DEM FORSCHUNGSGEBIET BEI ANDEREN STELLEN:	7
2.4 VERÖFFENTLICHUNGEN	8
3. ZWEI VERÖFFENTLICHUNGEN ALS ANLAGE	8

1. Kurzbeschreibung

1.1 Aufgabenstellung:

Die Aufgabenstellungen des Projektes waren:

I. Entwicklung neuer Algorithmen für die Simulation von Festkörperlasern (Erlangen)

Es sollten Algorithmen zur Berechnung der Strahlqualität und des Modenprofils von Festkörperlasern entwickelt werden. Hierzu sollte ein Algorithmus, basierend auf einer Multimodensimulation (MMS) implementiert und weiter entwickelt werden. Dieser Algorithmus sollte in die Software der Firma Lascad eingebaut werden. Des Weiteren sollte ein Algorithmus zur Berechnung des Modenprofils basierend auf einer Finite-Elemente-Analyse entwickelt werden.

II. Aufbau eines Modengenerators als einfaches Testsystem (Göttingen)

In der Optik-Gruppe des Laser-Laboratoriums sollte zur Qualifizierung der Simulations-Software ein Modengenerator aufgebaut werden, d.h. ein einfacher Laserresonator, der aus einer minimalen Anzahl optischer Elemente besteht.

III. Aufbau komplexer Resonatoren (KMU's)

Mit Hilfe der neuen Simulations-Algorithmen sollte die Entwicklung von innovativen Resonatoren, wie sie die Realisierung neuartiger Lasersysteme erfordert, nachhaltig unterstützt werden.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Projekt durchgeführt wurde:

Die Firma Lascad besitzt eine Software zur Simulation von Festkörperlasern. Alle anderen Firmen haben Erfahrung in der Entwicklung von Festkörperlasern oder allgemein im Bereich optischer Systeme.

Die Arbeitsgruppe von Herrn Pflaum an der Universität Erlangen-Nürnberg besitzt langjährige Erfahrung im Bereich der Simulation von Festkörperlasern. Das Laser Laboratorium Göttingen besitzt eine langjährige Erfahrung im Bereich der Entwicklung von Festkörperlasern und anderer optischer Systeme.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens:

Das Projekt bestand aus 5 Teilen mit einzelnen Arbeitspaketen.

Projektteil 1: Multi-Moden-Simulation (MMS)

Arbeitspaket 1.1: Erste Implementierung des Multi-Moden-Simulation (MMS)

(Universität Erlangen-Nürnberg)

Arbeitspaket 1.2: Verbesserung der Multi-Moden-Simulation (MMS)

(Universität Erlangen-Nürnberg)

⇒ Meilenstein 1: Implementierung einer ersten Multimoden-Simulation (MMS) in LASCAD.

(Universität Erlangen-Nürnberg und Lascad)

Projektteil 2: FEA Modenberechnung

Arbeitspaket 2.1: FEA Modenberechnung 1. Teil *(Universität Erlangen-Nürnberg)*

Arbeitspaket 2.2: FEA Modenberechnung 2. Teil *(Universität Erlangen-Nürnberg)*

Arbeitspaket 2.3: Verbesserung der Löser *(Universität Erlangen-Nürnberg)*

Arbeitspaket 2.4: Einbau der FEA Modensimulation in LASCAD

(Universität Erlangen-Nürnberg, Lascad)

Projektteil 3: Zeitabhängige FEA Simulation

Arbeitspaket 3.1: Entwicklung einer zeitabhängigen FEA Simulation

(Universität Erlangen-Nürnberg)

Arbeitspaket 3.2: Einbau der zeitabhängigen FEA Simulation in LASCAD

(Universität Erlangen-Nürnberg, Lascad)

Arbeitspaket 3.3: Optimierung der zeitabhängigen FEA Simulation

(Universität Erlangen-Nürnberg)

⇒ Meilenstein 2: Implementierung einer ersten FEA-Moden-Simulation.

Projektteil 4: Modengenerator (Laser Laboratorium Göttingen)

Arbeitspaket 4.1: Entwicklung eines Modengenerators

Arbeitspaket 4.2: Vergleich Simulation und Experiment

Arbeitspaket 4.3: Modengenerator für verschiedene technische Anwendungen

⇒ [Meilenstein 3](#): Aufbau des Modengenerators

(siehe Abschlussbericht des LLG)

Projektteil 5: Verbesserung der Modelle (alle Partner)

Arbeitspaket 5: Untersuchung der Abhängigkeit des Modenprofils von der Pumpleistung

(siehe auch Abschlussbericht des LLG)

Projektteil 6: Laseroptimierung (alle Partner)

Arbeitspaket 6.1: Laseroptimierung durch Simulation und Messung der zeitlichen Dynamik

Arbeitspaket 6.2: Laseroptimierung durch Messungen mit Hartmann-Shack Sensor

(siehe Abschlussbericht des LLG)

1.4 Stand der Technik:

Entwicklung neuer Algorithmen für die Simulation von Festkörperlasern (Erlangen)

Die zu implementierenden Algorithmen basieren auf Veröffentlichungen die in der Arbeitsgruppe von Herrn Pflaum entstanden sind:

- a) Veröffentlichung Multimodensimulation (MMS):

B. Heubeck and C. Pflaum:

Numerical Simulation of Multiple Modes in Solid State Lasers.

Proceedings of SPIE, 6190, 61900X (2006). DOI: 10.1117/12.661514.

- b) Veröffentlichungen zur Modenberechnung mit Finiten Elementen:

K. Altmann, C. Pflaum, D. Seider.

Three-Dimensional Finite Element Computation of Laser Cavity Eigenmodes,

Applied Optics-LPE , vol. 43, issue 9, page 1892, 2004.

Stand der Technik zur Simulation von Festkörperlasern sind

- die Gauss-Modenanalyse
- die Beam-Propagation Methode (BPM) mit dem Iterationsverfahren von Fox und Li
- Ratengleichungen für den Grundmode in einem Laserresonator

Nach Stand der Technik war die Berechnung der Strahlqualität von insbesondere Q-switch-Lasern nicht möglich. Auch die Einbeziehung von Lochblenden und Gausschen-Auskoppel-Spiegel war nur mit der BPM möglich. Diese Verfahren ist jedoch sehr rechenaufwendig und schwierig in der praktischen Anwendung.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

Die entwickelte Multimodensimulation (MMS) wurde in die Software der Firma Lascad eingebaut und verkauft. In dieser Software wird MMS „Dynamic Mode Analysis (DMA)“ genannt. Da durch diese Software Strahlqualität und Ausgangsleistung von Festkörperlasern sehr genau simuliert werden können, hat die Firma cleanLASER aus Herzogenrath bei Aachen diese Software von Lascad erworben und angewendet. Ein Mitarbeiter von cleanLASER hat sich an die Arbeitsgruppe von Herrn Pflaum gewendet und seine positiven Erfahrungen mit der im Innonet Projekt SOL entwickelten Software mitgeteilt. Daraus sind konstruktive wissenschaftliche Gespräche zur Weiterentwicklung und Verbesserung der Software entstanden.

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung:

Erlangen:

In Erlangen wurden die Zuwendungen im Wesentlichen für Personal verwendet:

- a) Wissenschaftlicher Mitarbeiter: Matthias Wohlmuth
- b) Studentische Hilfskraft: Matthias Heinen.

Von Herrn Wohlmuth, Herrn Pflaum und weiteren Mitarbeitern wurde eine umfangreiche Software entwickelt. Diese beinhaltet eine Multimodensimulation (MMS) und einen FEA Modenberechnung. Letztere kann jedoch noch nicht auf realistische Laserresonatoren angewendet werden kann. Des Weiteren beinhaltet die Software eine zeitabhängige thermische Linsen-Berechnung mit Finiten Elementen. Herr Heinen hat die Entwicklung der graphischen Oberfläche für die Multimodensimulation (MMS) unterstützt.

Durch die Zuwendungen wurde ein wichtiges Ziel des Projektes erreicht:

Das innovative Verfahren MMS zur Berechnung der Strahlqualität und Ausgangsleistung von Festkörperlasern wurde im Projekt in LASCAD eingebaut und weiterentwickelt. Anders als ursprünglich vorgesehen wurde dieses Verfahren auf Wunsch der Firma Lascad auf für Q-switch Laser, Gaussche Auskoppelspiegel und Lochblenden im Resonator erweitert. Diese Weiterentwicklungen der Multimodensimulation (MMS) waren sicher für alle beteiligten im Projekt zum Vorteil und sinnvoll, da gerade Q-switch Laser für technische Anwendungen sehr wichtig sind und die beteiligten Firmen an der Simulation von Q-switch Lasern sehr interessiert sind.

Für die aufwendigen Forschungsarbeiten war die Einstellung eines wissenschaftlichen Mitarbeiters auf jeden Fall notwendig.

2.2 Nutzen und Verwertung:

Die Ergebnisse des Projektes sind für die Firma Lascad, den Forschungseinrichtungen und den beteiligten Laser-Firmen von Nutzen:

a) Nutzen für die Firma Lascad:

Die Firma Lascad verkauft die im Innonet SOL entwickelte Software Multimodensimulation (MMS) unter dem Namen dynamische Modenanalyse (DMA). Diese Software beinhaltet auch die Implementierung von Ratengleichungen. Da die Firma Lascad vor dem Projekt keine zeitabhängige Simulation von Ratengleichungen anbieten konnte und Wettbewerber aus den USA Simulationen von Ratengleichungen anbieten, konnte die Firma Lascad durch das Projekt seine Marktposition stärken. Einen sehr großen Marktvorteil erhält die Firma Lascad durch die DMA Software dadurch, dass DMA eine genaue Berechnung der Strahlqualität und Ausgangsleistung auch für Q-switch Laser mit komplizierten Resonatorstrukturen ermöglicht. Die Berechnung der Strahlqualität ist in anderen kommerziellen Programmen nicht möglich. Die genauen Verkaufszahlen des DMA Programms sind uns nicht bekannt, doch es ist anzunehmen, dass Lascad DMA an eine große Anzahl von Kunden verkaufen konnte.

b) Nutzen für die Universität Erlangen-Nürnberg:

Aus dem Projekt entstanden für die Universität Erlangen-Nürnberg wertvolle Veröffentlichungen. Insbesondere entstand eine Veröffentlichung in der sehr anerkannten Zeitschrift *Optics Express*. Durch das Projekt hat die Arbeitsgruppe von Herrn Pflaum eine weltweite einzigartige Stellung erlangt, da andere Forschungseinrichtungen keine Software besitzen mit denen man die Strahlqualität von zum Beispiel Q-switch Lasern genau berechnen kann. Darauf aufbauend werden zurzeit mehrere neue Forschungsprojekte im Bereich der Simulation von Festkörperlaser beantragt.

c) Nutzen für die Laser-Firmen:

Die beteiligten Laserfirmen hatten das Recht die aktuellen Versionen von LASCAD inklusive der im Projekt entwickelten DMA Software kostenlos zu erhalten. Von

folgenden Firmen konnten wir Informationen über die Optimierung und das Design neuer Lasersysteme mit Hilfe dieser Software erhalten:

- i) Xiton Photonics: Simulation und Optimierung eines vorhandenen Lasers mit einem Kristall vom Typ Nd:YVO₄.
- ii) InnoLas: Simulation und Optimierung verschiedener endgepumpter Nd:YAG Laser. Die Simulationen haben geholfen neue Lasersysteme schneller zu entwickeln.
- iii) cleanLASER: Entwicklung eines neuen seitlich gepumpten Nd:YAG Lasers hoher Leistung (etwa 1000W). Nach Auskunft der Firma cleanLASER wäre die Entwicklung dieses neuen Lasersystems ohne Verwendung der neuen Simulationstechniken nicht möglich gewesen.

2.3 Fortschritt auf dem Forschungsgebiet bei anderen Stellen:

Die Berechnung der Strahlqualität von Festkörperlasern ist eine wichtige und wissenschaftliche schwierige Fragestellung. In den letzten Jahren wurde immer wieder versucht mit Hilfe der Beam-Propagation-Methode (BPM) diese zu berechnen. Teilweise ist dies unter hohem Rechenaufwand gelungen. Bekannt ist jedoch, dass die BPM nur sehr beschränkte Einsatzmöglichkeiten hat. Diese Forschungsergebnisse sind mehr als 10 Jahre alt. Uns ist nicht bekannt, dass in den letzten Jahren andere Forschungsgruppen neue innovative Verfahren zur Berechnung der Strahlqualität von Lasern entwickelt haben. Die in dem Projekt entwickelte neue Methode und in LASCAD verfügbare Berechnungsmethode zur Berechnung der Strahlqualität ist daher hoch innovativ und wird einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung neuer Lasersysteme haben.

2.4 Veröffentlichungen

- Wohlmuth, M., Pflaum, C., "Dynamic Multimode Analysis of High-Power 3-level Lasers , " Physics Procedia 5 (Invited paper), 291-298 (2010).
- Wohlmuth, M., Altmann, K., Hemmer, M., Goehre, M., Pflaum, C., Richardson, M., Proceedings of "Dynamic Multimode Analysis of High-Power Lasers with Super-Gaussian Beam Profile Using Precombined Gaussian Modes" , OSA ASSP 2010, AMB25 (2010).
- Wohlmuth, M., Altmann, K., Pflaum, C., "Dynamic 3D modeling of solid state laser resonators using a coupled thermo-optical finite element analysis" , Proceedings of SPIE Vol. 7578, 7578-2H (2010)
- M. Wohlmuth, C. Pflaum, K. Altmann, M. Paster, C. Hahn, Dynamic multimode analysis of Q-switched solid state laser cavities, Opt. Express 17(20), pp. 17303-17316, 2009.
- Wohlmuth, M., Altmann, K., Pflaum, C., "New Approaches for the Dynamic 3-D Simulation of Solid-State Lasers", Proceedings of OSA ASSP 2009, OSA ASSP 2009, TuB20 (2009).
- Wohlmuth, M., Altmann, K., Pflaum, C. "Finite element simulation of solid state laser resonators", Proceedings of SPIE Vol. 7194, 7194-16 (2009).
- Wohlmuth, M., Pflaum, C., "3-dimensional simulation of solid state lasers," Proceedings of SPIE Vol. 6998, 69980I (2008)
- Pflaum, C., Wohlmuth, M., "3-dimensional simulation of the solid state lasers," Proceedings of SPIE Vol. 6871, 687106 (2008).

3. Zwei Veröffentlichungen als Anlage