

Laserentwicklung mit Methode

Rüdiger Paschotta, RP Photonics Consulting GmbH, Zürich, CH

Die Entwicklung eines Lasers kann das Budget und den Zeitplan rasch sprengen, wenn unerwartete Probleme auftreten und man diese mit nachträglichen Maßnahmen lösen muss, die häufig mit Nebenwirkungen behaftet sind. Es gibt aber Methoden, um solche Gefahren zumindest stark zu reduzieren.

Wer an Entwicklungsprojekten arbeitet, hat meist auch Situationen erlebt, in denen ein Projekt in ernsthafte Schwierigkeiten geriet. Wesentliche Stolpersteine waren anfangs nicht erkennbar. Das zuerst entdeckte Problem erschien noch lösbar, zog dann aber langwierige Änderungen nach sich, die wiederum neue Probleme aufwarfen. Die Kosten liefen aus dem Ruder, während die Geduld des auf das Produkt wartenden Kunden ausgiebig getestet wurde. Am Ende war die erhoffte Marge dahin und das Vertrauen des Kunden erschüttert.

„Fallen“ bei der Laserentwicklung

Die Lasertechnik ist ein komplexes Gebiet mit vielen möglichen physikalischen Effekten, die gerade bei Neuentwicklungen mit unerwarteter Stärke auftreten und vor allem auch auf unerwartete Weise zusammenwirken können. Hierfür seien ein paar Beispiele genannt:

- Es ist nicht möglich, kurze Laserresonatoren mit überall großer Lasermode zu bauen, die gleichzeitig gewisse Anforderungen an die Stabilität z.B. gegenüber thermischen Linseneffekten im Laserkristall erfüllen. Dieser Zusammenhang kann einen längeren Resonator, eine kleinere Lasermode oder einen Strahlfokus auf einem Endspiegel erzwingen.
- Passiv modengekoppelte Laser können in vielen Fällen nicht gleichzeitig für eine sehr kurze Pulsdauer und eine sehr hohe Repetitionsrate ausgelegt werden. Überraschenderweise kann eine gute Strahlqualität der Pumpquelle den Kompromiss zwischen beiden Zielen entscheidend leichter machen. Aus ganz anderen Gründen sind auch mit gütegeschalteten Lasern oft kürzere Pulse realisierbar, wenn eine Pumpquelle mit guter Strahlqualität zur Verfügung steht.
- Die thermische Belastung des sättigbaren Absorbers eines modengekoppelten Hochleistungslasers kann entscheidend

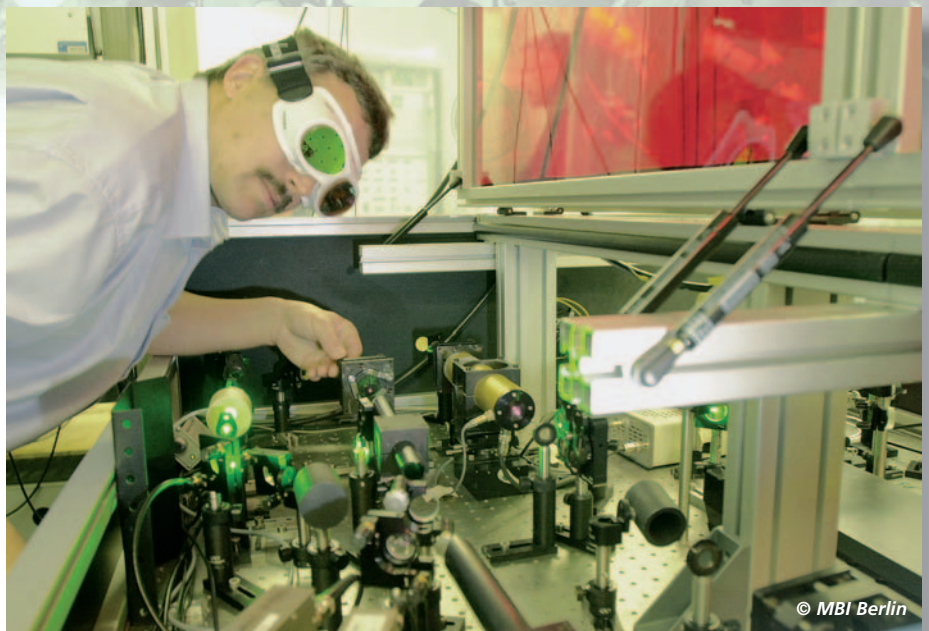


Bild 1: Wenn in dieser Phase der Laserentwicklung noch wesentliche Probleme identifiziert und gelöst werden müssen, kann dies recht aufwändig werden

reduziert werden durch Änderungen am Gesamtdesign des Lasers (u.U. ohne Modifikation des Absorbers selbst), die aber eine kleine Modengröße im Lasermedium oder große Wirkungsquerschnitte des Laserübergangs voraussetzen. Mit diesem Wissen lassen sich Probleme mit dem Absorber oft weitaus leichter lösen als durch Fokussieren auf den Ort, an dem der Rauch aufsteigt.

Diese Beispiele zeigen, dass verschiedene Aspekte eines Designs oft nicht separat korrigiert werden können oder sollten: Eine Maßnahme verlangt oft diverse andere Anpassungen und kann so leicht Eigenschaften beeinflussen, die man zunächst nicht als im Zusammenhang mit dem ursprünglichen Problem stehend erkannt hat. Schlimmer noch ist es, wenn man durch eine lange Folge mühsamer Versuche feststellen muss, dass gewisse ein-

zeln leicht erreichbare Parameter in der Kombination nicht realisierbar sind, oder zumindest dass dies ganz überraschende Bedingungen an bestimmte Komponenten stellt. Aufgrund solcher Komplikationen können Entwicklungsprojekte unerwartet schwierig und teuer werden (**Bild 1**).

Sich deswegen nicht mehr auf Neuland vorzuwagen, kann für ein innovatives Unternehmen nicht die Konsequenz sein. Die Margen aber mit höheren Aufschlägen abzusichern, ist in einem Umfeld mit vielfältiger Konkurrenz ebenfalls keine Option. Es verbleibt nur die Möglichkeit, die Pläne auf Herz und Nieren zu prüfen, bevor potentiell teure Schritte unternommen werden. Eine solche Prüfung mag schwierig und aufwändig erscheinen, aber man vergleiche den Aufwand beispielsweise der sauberen Ausarbeitung eines Laserdesigns, inklusive der quantitativen Prüfung

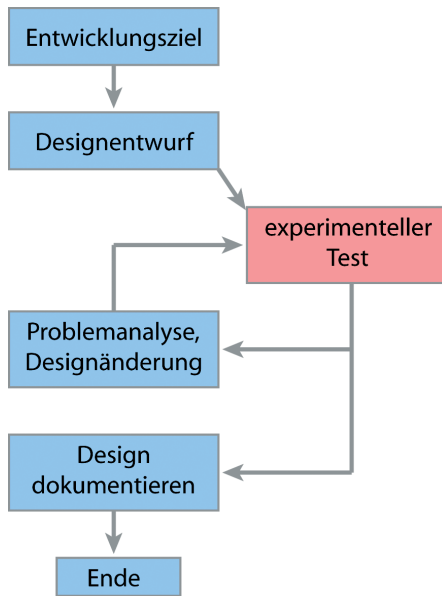


Bild 2: Schematischer Ablauf eines ineffizienten Entwicklungsprozesses. Das Problem besteht darin, dass der aufwändige Teil der experimentellen Tests in einer Schleife liegt, die u.U. häufig durchlaufen werden muss

der wichtigsten Parameter und ggf. der Korrektur erkannter Probleme noch am Schreibtisch, mit den Kosten, die ein entgleistes Projekt wie oben angedeutet leicht verursachen kann. Selbst wenn ein solcher Verlauf nur mit 20% Wahrscheinlichkeit eintreten wird, sind die drohenden Kosten und andere Nebenwirkungen (z.B. verspieltes Kundenvertrauen) weitaus schwerwiegender.

Was geprüft werden kann

Nach Abwägung der Kosten mag immer noch ein Zweifel bleiben: Lassen sich überhaupt alle potentiellen Probleme von vornherein vermeiden? Freilich kann selbst mit sorgfältiger Vorbereitung niemand garantieren, dass bei der Umsetzung nichts Unerwartetes passieren wird. Die Erfahrung zeigt aber, dass die meisten unerwarteten Probleme keineswegs völlig neu sind. Wenn etwa der Prototyp eines Lasers partout nicht die gewünschte Strahlqualität oder Pulsdauer erreichen möchte, so liegt dies in der Regel an Faktoren, die ein in der vorgelagerten Problemanalyse erfahrener Experte durchaus hätte erkennen können – vielleicht nicht mit einem Blick, aber bei genauerer Analyse, ggf. mit Hilfe einiger Berechnungen beispielsweise zu den zu erwartenden thermischen Linseneffekten und zur Reaktion des Laserresonators hierauf. Der Zeitaufwand für solche Berechnungen beträgt oft nur einige Stunden – fast vernachlässigbar gegenüber

der Gefahr zeitraubender Rückschläge. Das Erkennen eines Problems ist natürlich nur der Anfang; darauf folgt die Identifikation der besten Maßnahmen. Beispielsweise mag ein längerer Laserkristall mit niedrigerer Dotierungsdichte in manchen Fällen eine Lösung sein, aber bevor entsprechende Kristalle bestellt, eingebaut und getestet werden, sollte man wissen, ob die Strahlqualität der Pumpquelle hierfür ausreichen wird, ob die Nichtlinearität des Kristalls im Falle eines modengekoppelten Lasers nicht zu groß wird, und ob es keine bessere Lösung gibt – beispielsweise ein verbessertes Resonatordesign, das eventuell noch andere Vorteile mit sich bringt. Dies kann zwar eine komplexe Aufgabe sein, eben weil jede mögliche Maßnahme eine Vielzahl von Folgewirkungen haben kann. Allerdings sind in der frühen Planungsphase diverse Änderungen am Design noch ohne nennenswerten Aufwand machbar, was für später entdeckte Probleme oft nicht gilt.

Aus diesen Gründen ist es im Sinne größtmöglicher Effizienz sehr wichtig, eine besonders erfahrene Person in dieser Projektphase einzusetzen – wenn nötig, einen externen Berater, der für diese Aufgabe auch nicht unbedingt sehr viel Zeit benötigt. Natürlich könnte der Berater auch als "trouble shooter" herangezogen werden, sobald tatsächlich Probleme auftreten. Der Aufwand für die dann nötigen Änderungen wird aber leicht sehr viel größer.

Die Rolle des Laserdesigns

Wie kommt man zu einem Laserdesign, und welche Rolle spielt es im Entwicklungsprozess? Hier gibt es sehr unterschiedliche Ansätze, mit entsprechend unterschiedlicher Effizienz. Vielfach wird das Laserdesign als Nebenprodukt eines iterativen Entwicklungsprozesses im Labor betrachtet, welches man ganz am Ende noch zu Zwecken der Dokumentation anfertigt (siehe **Bild 2**): Der Resonator ist nun länger als gedacht, weil der kürzere nicht stabil funktioniert hat, deswegen war eben noch der ungünstig platzierte Faltspiegel nötig, und weil letzterer so nahe beim Kristall stehen muss, braucht man noch einen speziell angefertigten Spiegelhalter, usw. Bei einer besseren Methodik (**Bild 3**) steht das Laserdesign im Zentrum der Arbeiten. Für die erste Phase des Projekts, die im Wesentlichen am Schreibtisch stattfindet, ist ein sauber ausgearbeitetes Design das Ziel der Bemühungen. Dieses Design ist eine genaue Beschreibung des Aufbaus mit allen wesentlichen Daten zu Pumpquelle, Lasermedium, Spiegeln, Linsen, Halterungen etc., sowie deren Positionen

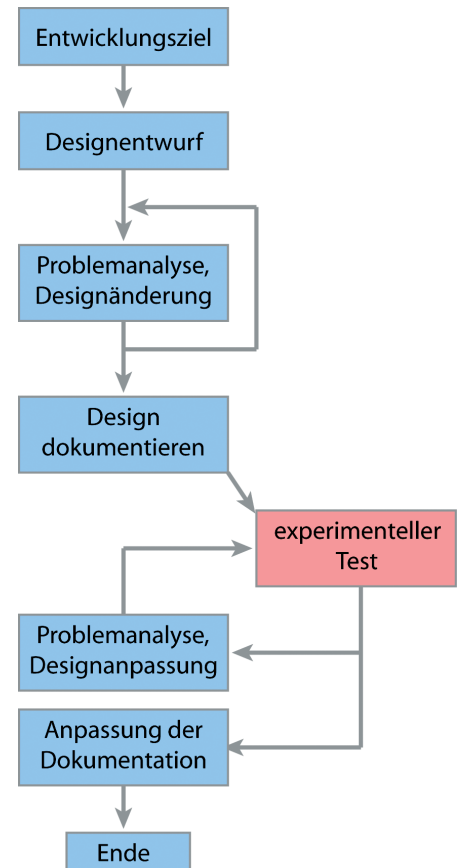


Bild 3: Ablauf einer Entwicklung mit methodischem Vorgehen. Ziel ist es, die meisten iterativen Anpassungen bereits am Schreibtisch vorzunehmen, um die abschließende Schleife möglichst wenig oft zu durchlaufen. Das Laserdesign entsteht hier im Wesentlichen bereits vor den Laborarbeiten. Zwar sind jetzt formell mehr Schritte als zuvor zu absolvieren, aber dies resultiert nur aus einer anderen zeitlichen Aufteilung und bedeutet keinen Mehraufwand

und Abstände. Dazu kommen die erwarteten Zahlenwerte für wichtige Kenngrößen wie z.B. die Stärke der thermischen Linse, Größe der Fundamentalmoden des Resonators im Laserkristall und an den Spiegeln, Ausgangsleistung und optische Leistung im Resonator sowie die Intensitäten an kritischen Punkten (wichtig insbesondere für gepulste Laser), bei passiv modengekoppelten Lasern auch die Stärke der Sättigung des Absorbers, berechnete oder abgeschätzte Effekte von Dispersion und Nichtlinearitäten usw.

Die Beschreibung des Laserdesigns ist dann Teil eines Dokuments, welches zuerst das Entwicklungsziel beschreibt (z.B. besondere Anforderungen), dann auch erwartete und für das Design geprüfte Effekte (z.B. mögliche Zerstörung optischer Komponenten oder Instabilität der Pulsformung), evtl.

auch Zwischenschritte und vorgesehene Tests für den Aufbau im Labor.

Wenn dieses Dokument erstellt ist, sollten die am Projekt beteiligten Personen die Details unbedingt zusammen durchgehen und dabei eventuell übersehene Punkte wie auch mögliche Verbesserungen diskutieren. Wenn man sich diese Diskussion spart – sicher nicht wegen des wirklich geringen Zeitaufwands, sondern z.B. mangels Disziplin oder Teamgeist – dann riskiert man, dass dadurch später weitaus aufwändigere Nachbesserungen nötig werden.

Das so erarbeitete Designdokument bildet nun eine exzellente Grundlage für ein effizientes Vorgehen im Labor. Und genau hier ist ja die Effizienz am meisten gefährdet. Solange ein Problem am Schreibtisch erkannt und dort gelöst wird, geht es oft nur um ein paar Stunden. Wenn aber der bereits aufgebaute Prototyp merkwürdige Phänomene aufzeigt, die womöglich nicht eindeutig auf die Ursache deuten, und dann z.B. langwierige Versuche mit modifizierten Resonatoren fällig werden, ist bald sehr viel mehr Zeit verspielt, als der gesamte oben beschriebene Designprozess benötigt. Und selbst wenn die Zahl der auftretenden Probleme durch eine sorgfältige Designarbeit nicht auf Null gedrückt, sondern nur auf ein Drittel reduziert wird, gewinnt man im Labor mehr als einen Faktor drei an Effizienz, weil einzelne Probleme erfahrungsgemäß besser zu verstehen und zu lösen sind als ein Gewirr von mehreren.

Der Zusatznutzen

Durch Erstellen eines tragfähigen Laserdesigns vor der Laborarbeit wird in erster Linie die Realisierungsphase deutlich effizienter, und mit dem Entwicklungsaufwand sinkt das Risiko größerer Zeit- und Budget-

überschreitungen. Daneben sind aber auch folgende Faktoren nicht zu unterschätzen:

- Das Produkt wird meist besser, beispielsweise leistungsfähiger, zuverlässiger, kompakter oder leichter zu justieren.
- Die detaillierte Ausarbeitung des Designs führt zu einem klareren Verständnis der Zusammenhänge, was auch für zukünftige Projekte viele Vorteile bringt. Die Möglichkeiten und Grenzen späterer Weiterentwicklungen können so besser abgeschätzt werden.
- Auch andere Entwicklungsprojekte können von einem klar ausgearbeiteten Design-Dokument sehr profitieren. Selbst wenn grundlegende Unterschiede bestehen, ist oft ein Teil der zu berücksichtigenden Aspekte und anwendbaren Methoden bereits in handlicher Form beschrieben.
- Die Kompetenz des gesamten Teams profitiert von der Diskussion vorläufiger Design-Dokumente. Dies wäre nicht möglich, wenn einfach ein „wissender“ Mitarbeiter ins Labor geht und etwas aufbaut. Auch wenn ein Mitarbeiter später das Team verlässt, bleibt die angesammelte Kompetenz fester im restlichen Team verankert, wenn die Entwicklungsarbeit sauber dokumentiert und im Team diskutiert worden ist.

Fazit

Wegen der Komplexität der Zusammenhänge in Lasern ist eine schrittweise Annäherung an das gewünschte Entwicklungsergebnis nach der Methode "trial and error" häufig sehr ineffizient und riskant. Leider resultiert ein solches Vorgehen häufig gerade aus der Ungeduld von Ingenieuren oder auch von Vorgesetzten, die ein schnelles Resultat erzwingen wollen

und damit gerade das Gegenteil erreichen. Ein diszipliniertes methodisches Vorgehen, bei dem möglichst viele Probleme schon am Schreibtisch erkannt und gelöst werden, minimiert solche Risiken, führt zu besseren Produkten und erleichtert spätere Entwicklungen. Nicht zuletzt wird die Kompetenz des Teams gestärkt und im Team fester verankert. Die weit vorausschauende Designphase setzt freilich ein tiefes physikalisches Verständnis und viel Erfahrung voraus. Genau hier ist ggf. der Einsatz eines externen Beraters besonders effizient, auch wenn die Dringlichkeit in dieser frühen Projektphase weniger leicht zu erkennen ist als die für einen "trouble shooter" im Falle eines später entdeckten ernststen Problems. Gerade bei Zeitdruck oder knappem Budget sind solche Hilfen zur effizienten Gestaltung von Entwicklungsprozessen alles Andere als ein Luxus, auf den man verzichten kann.

Literaturhinweise

- [1] Encyclopedia of Laser Physics and Technology (www.rp-photonics.com/encyclopedia.html), Artikel über laser development, laser design und andere

Ansprechpartner

Dr. Rüdiger Paschotta
RP Photonics
Consulting GmbH
Kurfürstenstr. 63
CH-8002 Zürich
Tel. +41/44/20102-60
Fax +41/44/20102-59
eMail: paschotta@rp-photonics.com
Internet: www.rp-photonics.com



www.photonik.de ▶ Webcode 6009