

# Der transparente Laser

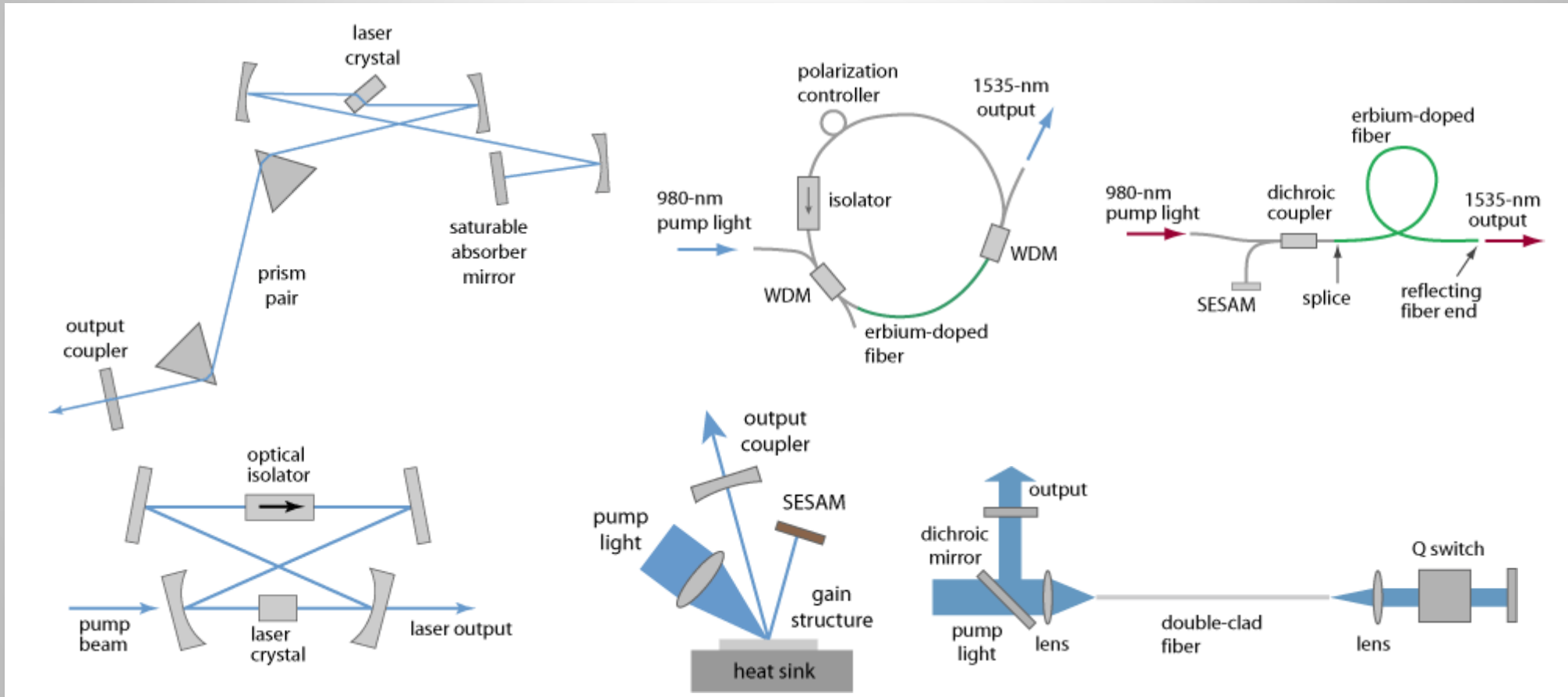
Gedanken über ein grundlegendes  
Problem der Laserentwicklung  
und Modellierung als eine Lösung

Gedanken und Einsichten von  
**Dr. Rüdiger Paschotta, RP Photonics Consulting GmbH**

[www.rp-photonics.com/software\\_d.html](http://www.rp-photonics.com/software_d.html)

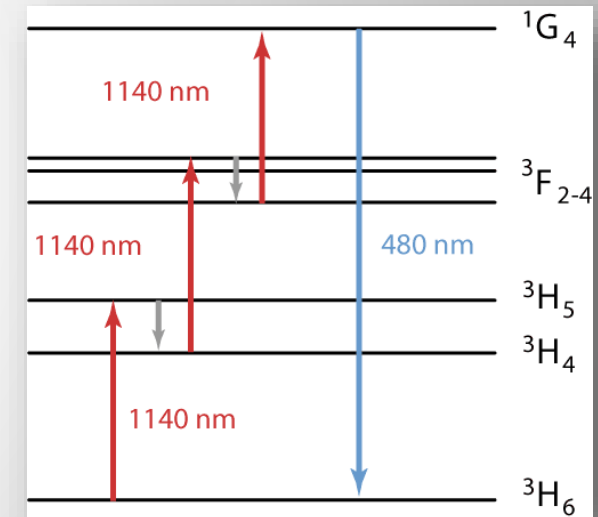
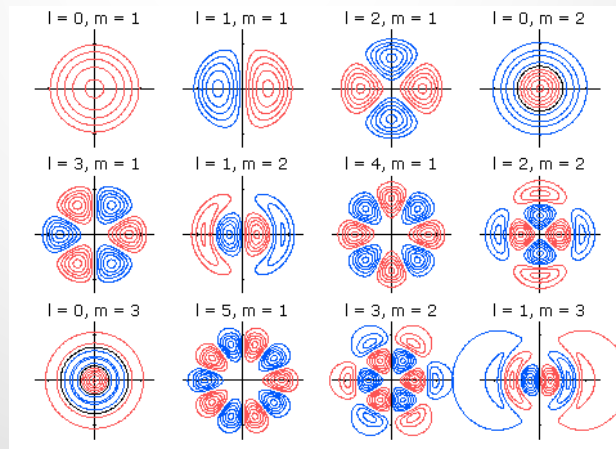
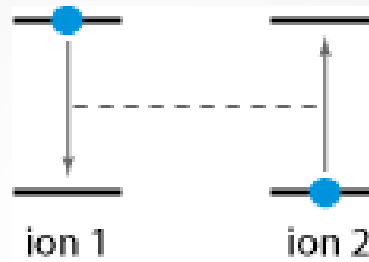
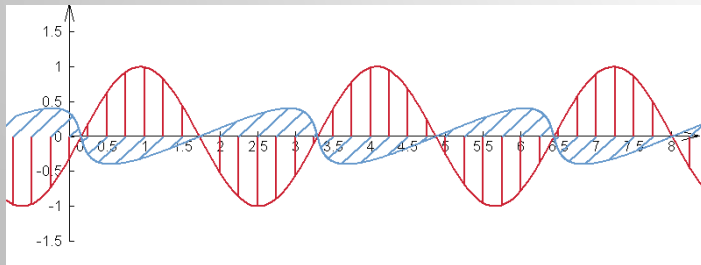
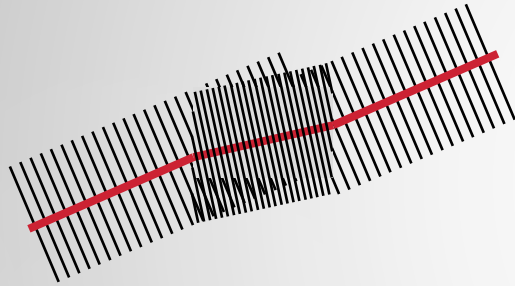
# Das Design eines Laserprodukts

- Das **Design** definiert, welche Komponenten verwendet werden, wie sie platziert werden, etc.



# Die Basis eines Designs

- ▶ Solch ein Design basiert immer auf mehr oder weniger detaillierten **gedanklichen Vorstellungen über interne Vorgänge**, z. B. das Pumpen laseraktiver Ionen, stimulierte Emission, Resonatormoden, etc.



# Was können Sie bei experimentellen Tests lernen?

- ▶ Jedes Design muss sich letztendlich **bei experimentellen Tests bewähren**: bauen Sie den Laser, schalten Sie ihn an und sehen Sie, was passiert.
- ▶ Experimentelle Tests können jedoch häufig nur ermitteln, inwieweit die erreichte **Performance** den Erwartungen entspricht; **wichtige Fragen können jedoch unbeantwortet bleiben**:
  - ▶ Warum ist die Performance so schlecht?
  - ▶ Was genau passiert innerhalb des Lasers?
  - ▶ Was ist die Ursache für ein beobachtetes seltsames Verhalten?
- ▶ Ein Grundproblem von Lasern: Sie können nicht in den Laserkristall, eine aktive Faser oder einen Frequenzverdopplung hineinschauen, um **zu sehen, was intern geschieht**. Sie können nicht einmal ihr Powermeter oder einen Beam Profiler in den Laserresonator stellen.

# Der Laser als „Black Box“

- ▶ Ihr experimenteller Laseraufbau verhält sich als eine Art „**Black Box**“: Sie können prüfen, was herauskommt, aber nicht was darin passiert.



- ▶ Dieses Problem ist typisch für die Photonik, nicht aber für die Elektronik: dort können Sie z. B. leicht Spannungen an verschiedenen Orten überprüfen.  
Die wichtigsten Unterschiede: Lichtfelder können komplizierte räumliche Strukturen aufweisen und werden durch diagnostische Instrumente stark beeinflusst.
- ▶ Das Problem: Wie sollen Sie nun **Probleme lösen, ohne ihre Ursachen zu verstehen? Mit Versuch und Irrtum??**

# Der transparente Laser – ein Traum?

- ▶ Stellen Sie sich vor, Sie könnten einen **Laser aus transparenten Komponenten** bauen, so dass Sie **einfach sehen können, was darin geschieht**:
  - ▶ Was sind die optischen Intensitäten an jedem Ort und zu jeder Zeit im Laserkristall, einer Faser oder einem Frequenzverdoppler?  
(mit Auflösungen von Mikrometern, Nano- oder Femtosekunden)
  - ▶ Wie entwickelt sich die Strahlqualität im Laser während des Pulsaufbaus?
  - ▶ Wie entwickelt sich der Anregungsgrad der laseraktiven Ionen?
- ▶ Klar, das wäre toll – endlich könnten Sie herausfinden, was innen genau passiert und wie Sie Probleme beheben können – aber ist das nicht nur ein Traum? (Wo gibt es solche Komponenten??)
- ▶ Die gute Nachricht: Sie können sehr wohl ganze Laser mit transparenten Komponenten erzeugen – siehe die nächste Seite!

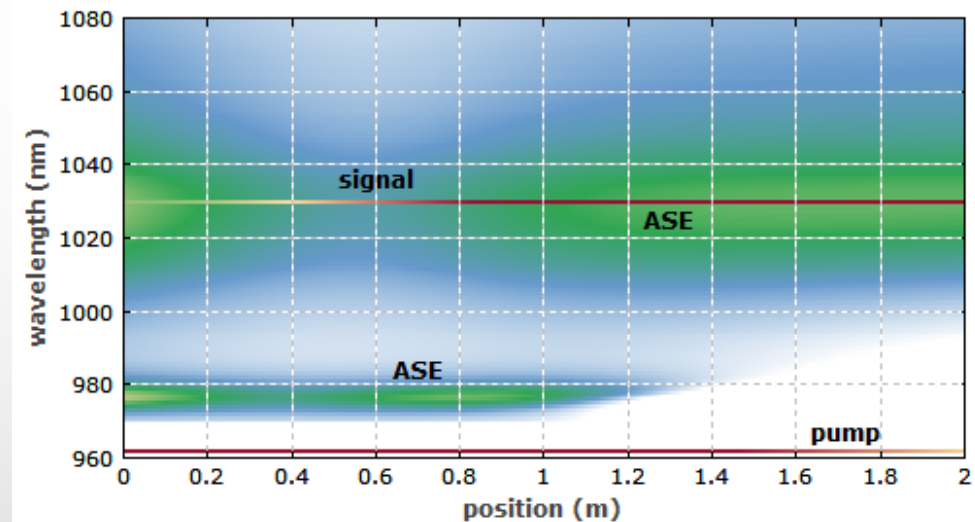
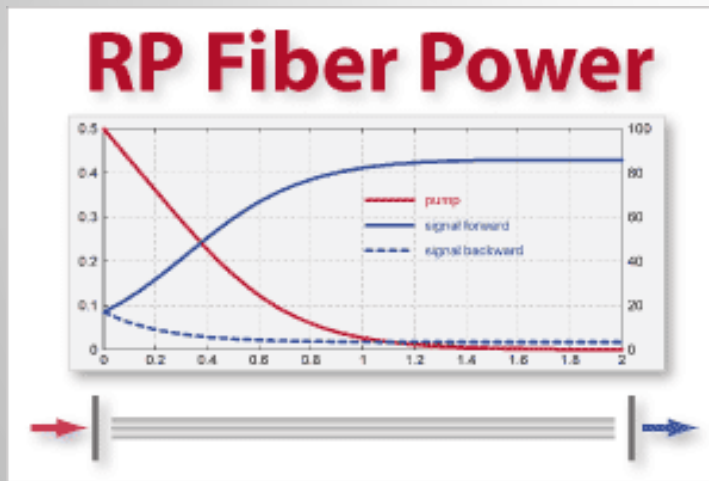


# Der transparente Laser

- ▶ Der Trick: Erzeugen Sie ein **Computermodell Ihres Lasers**, welches
  - ▶ eine vereinfachte Beschreibung des Geräts enthält (z.B. die Länge der aktiven Faser, die Dotierungskonzentration im Faserkern, Wirkungsquerschnitte der aktiven Ionen, etc.)
  - ▶ alle wesentlichen Prozesse simuliert
  - ▶ die beobachtbare Performance daraus berechnet
  - ▶ alle Resultate schön darstellt – beobachtbare Größen genauso wie interne Details – z. B. numerisch oder in graphischen Diagrammen
- ▶ Hierfür brauchen Sie:
  - ▶ einen gewöhnlichen PC
  - ▶ geeignete Software
  - ▶ Daten aller Komponenten
  - ▶ ein gutes Verständnis und/oder kompetente technische Unterstützung

# Beispiel: Design von Faserlasern

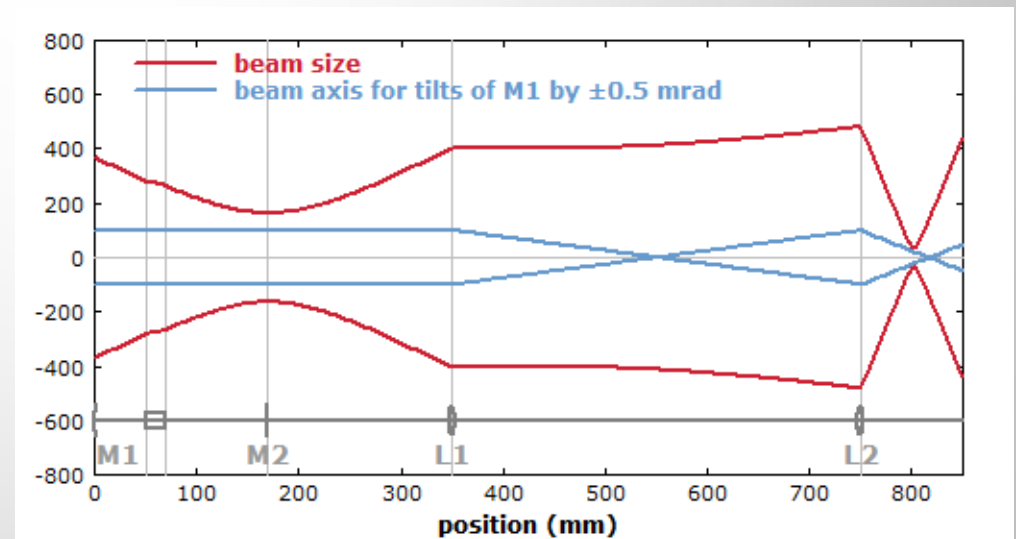
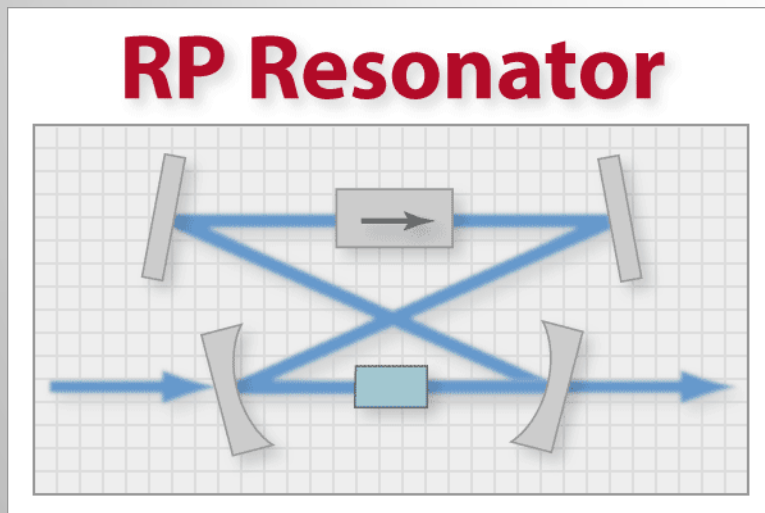
- ▶ Eine leistungsfähige **Faseroptiksoftware** (z. B. [RP Fiber Power](#)) kann
  - ▶ die Pumpabsorption und Verstärkung in einer aktiven Phase berechnen
  - ▶ die Strahlpropagation numerisch simulieren (z. B. mit Biegeeffekten)
  - ▶ die Entwicklung ultrakurzer Pulse simulieren (mit chromatischer Dispersion, Nichtlinearitäten etc.)
- ▶ Benutzen Sie das um zu verstehen, wie Faserlaser und –verstärker wirklich funktionieren, und um sie gezielt zu optimieren.





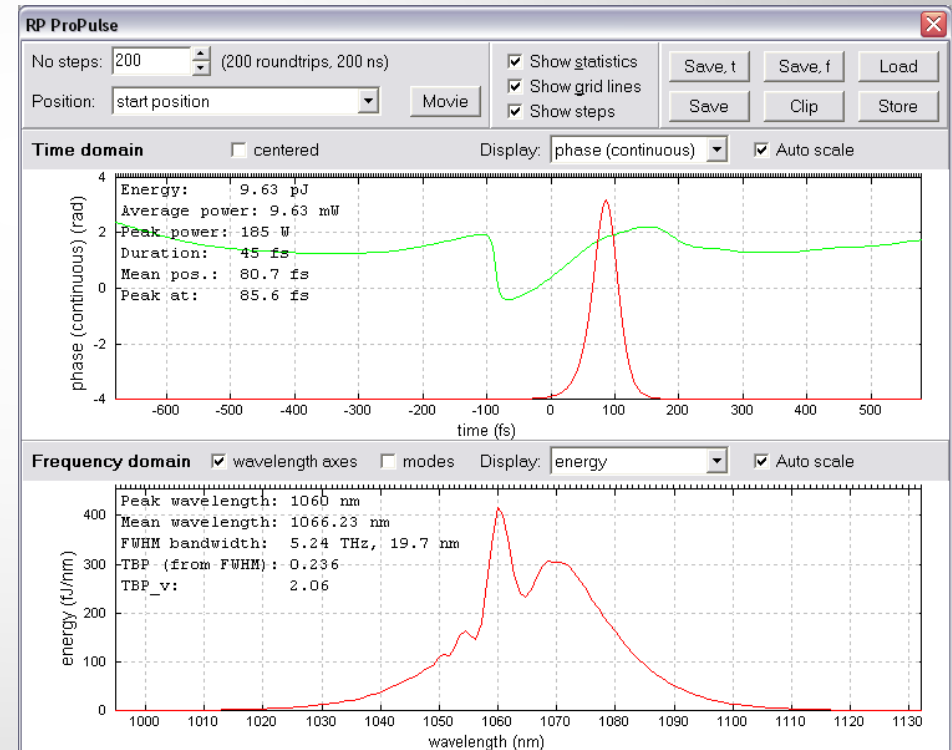
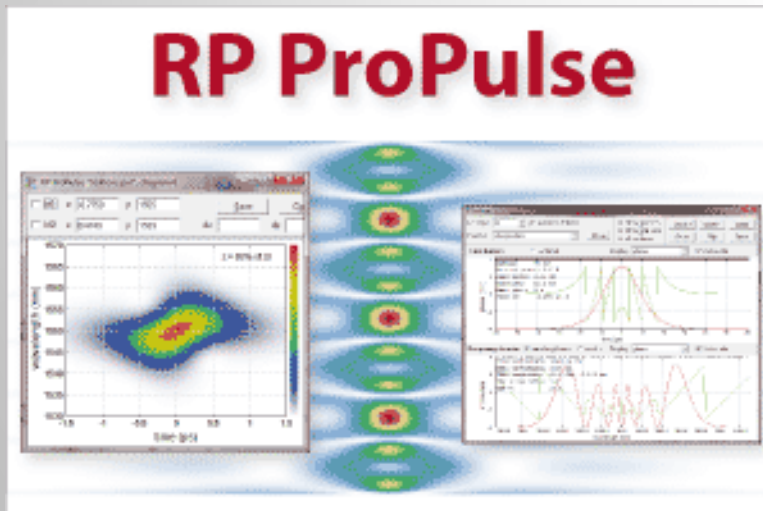
# Beispiel: Laserresonator-Design

- ▶ Eine gute **Resonatordesign-Software** (z. B. [RP Resonator](#)) kann alle Eigenschaften von Resonatormoden berechnen:
  - ▶ Modengrößen z. B. im Laserkristall, einem Frequenzverdoppler oder auf Laserspiegeln
  - ▶ ihre Empfindlichkeit auf thermische-Linsen-Effekte und Dejustage
- ▶ Nutzen Sie dies, um zu verstehen, wie Laserresonatoren funktionieren, und um bessere Laser zu entwickeln.



# Beispiel: modengekoppelte Laser

- ▶ Eine **Pulspropagation-Software** (z. B. [RP ProPulse](#)) kann simulieren wie sich ultrakurze Pulse in modengekoppelten Lasern, Verstärkern, OPOs etc. entwickeln.
- ▶ Lernen Sie damit z. B., von welchen Parametern die Stabilität der Pulse und die Performance abhängen.



# Die Arbeit mit Lasermodellen

- ▶ Es ist offensichtlich sehr nützlich, ein Tool zu haben, welches die genauen Vorgänge z. B. in Lasern und Verstärkern aufdeckt: So **arbeiten Sie nicht mehr im Blindflug, sondern verstehen und lösen die Probleme auf effiziente Weise.**
- ▶ Im Folgenden lernen Sie im Detail, wie man ein solches Computermodell nutzt,
  - ▶ um ein gutes Prototyp-Design zu finden,
  - ▶ um Ihren Laser zu verstehen, selbst wenn zunächst Diskrepanzen auftreten,
  - ▶ um Ihr endgültiges Produktdesign zu entwickeln, und
  - ▶ um Probleme mit unerwartetem Verhalten zu lösen.

# Entwicklung eines Prototypen

- ▶ Bevor Sie irgendwelche Komponenten bestellen (was viel Geld und Zeit kostet), finden Sie das Design des Prototypen am Computer.
- ▶ Beschreiben Sie Ihre erste Vorstellung vom Design mit der Software und simulieren Sie die resultierende Performance.
- ▶ Prüfen Sie die Resultate genau:
  - ▶ Ist die Performance so gut wie erhofft?
  - ▶ Liegen alle Parameter in sicheren Regionen?
  - ▶ Gibt es allzu starke Sensitivitäten?
  - ▶ Falls etwas Unerwartetes passiert: Schauen Sie nach, was passiert. Wenn es irgendein Problem gibt, werden Sie es sicher verstehen! (In schwierigen Fällen nutzen Sie den technischen Support.)
- ▶ Verbessern Sie Ihr Design, bis Sie **ein gut funktionierendes Prototyp-Design** haben.
- ▶ All das lässt sich oft *in einem Arbeitstag* erledigen.

# Der Test im Labor

- ▶ Nun können Sie die realen Komponenten bestellen; Sie wissen nun, was Sie brauchen!
- ▶ Bauen Sie den Prototypen und testen Sie seine Performance.
- ▶ Wenn alles wie erwartet funktioniert: bestens, das ist Erfolg!
- ▶ Andernfalls:
  - ▶ Prüfen Sie, ob der Laser dem Design entspricht.  
Wurden z. B. Laserspiegel verwechselt (falsche Krümmungen)?
  - ▶ Prüfen Sie ggf. einzelne Komponenten: Entsprechen sie den Spezifikationen? (Bsp.: Pumpabsorption im Laserkristall)
  - ▶ Wenn Sie keine Diskrepanzen finden: Ist das Modell womöglich zu einfach? Haben Sie z. B. vergessen, ASE in einem Verstärker zu berücksichtigen?  
Wenn Sie gut gearbeitet haben (mit kompetentem Support), ist das unwahrscheinlich.

# ... und wenn die Resultate nicht übereinstimmen?

- ▶ Beachten Sie: Eine Diskrepanz zwischen Experiment und Simulation heißt nicht unbedingt, dass Ihr Modell falsch ist:
  - ▶ Ein Fehler im Modell (z. B. übersehener Effekt, falsche Daten oder einfach ein trivialer Fehler) könnte zwar der Grund sein.
  - ▶ Oft verhalten sich aber optische Komponenten nicht wie erwartet:
    - ▶ Der Hersteller mag die Spezifikationen verletzt haben.
    - ▶ Eine Komponente könnte beschädigt oder verschmutzt sein.
    - ▶ Sie könnten Komponenten verwechselt haben.
  - ▶ In anderen Fällen ist der Aufbau nicht richtig justiert, oder etwas stimmt nicht mit elektronischen Treibern.
- ▶ Diskrepanzen so früh wie möglich aufzudecken, ist nützlich!



# Sie könnten den Prototypen auch ohne ein Modell entwickeln ...

... aber Sie würden leicht Probleme einfangen – zum Beispiel:

- ▶ Sie könnten erst bei den Experimenten finden, dass Komponenten geändert werden müssen: Sie müssten neue Komponenten bestellen, also wieder Geld ausgeben und warten.
- ▶ Sie könnten Komponenten beschädigen, z. B. durch zu hohe optische Intensitäten. Also neue Komponenten bestellen, das Design abändern usw.
- ▶ Wenn beispielsweise die Pulserzeugung in einem modengekoppelten Laser instabil ist, kann das viele Ursachen haben, und es kann sehr lange dauern, die wirkliche Ursache zu finden und zu beheben.

Gefühlt endlose Probleme sind tatsächlich nicht selten ...

# Tests für Design-Änderungen

- ▶ **Jegliche Designänderung kann mit einem Computermodell schnell und verlässlich getestet werden:**
  - ▶ Sie müssen nicht extra neue Komponenten bestellen und im Labor testen. **Bestellen Sie erst später, was wirklich funktionieren kann!**
  - ▶ Wenn Ihr Design nicht wie erwartet funktioniert, finden Sie schnell heraus, woran es liegt, und beheben Sie das Problem.  
(Gescheiterte Experimente sind oft viel schwerer korrekt zu erklären!)
  - ▶ Eine Änderung der Performance im Modell kann nie durch Dejustage, Schmutz, beschädigte Komponenten, geänderte Temperaturen etc. entstehen. **Nichts ändert sich, was Sie nicht aktiv ändern!**  
→ Sie bekommen schlüssige Resultate!
  - ▶ Wenn's nicht geholfen hat, sind Sie sofort zurück beim ursprünglichen Modell; **kein umständlicher Rückbau ist nötig!**
- ▶ Vermeiden Sie die Verschwendung von Zeit und Geld; **arbeiten Sie mit solidem Verständnis und nicht etwa im Blindflug.**

# Der Weg zum Produktdesign

- ▶ Auch wenn der Prototyp gut funktioniert, mögen noch diverse Änderungen nötig sein:
  - ▶ Ihr Chef oder ein Kunde möchte noch mehr Performance ...
  - ▶ Gewisse Toleranzen (z. B. für die Justage) könnten sich als zu kritisch erweisen.
  - ▶ Vielleicht möchten Sie mit weniger oder mit kostengünstigeren Komponenten arbeiten.
- ▶ Wieder wird Ihnen ein Computermodell sehr dabei helfen, Ihr Design zu verbessern: Sie verstehen Sie die Auswirkungen jeglicher Designänderung ohne teure, zeitraubende und womöglich irreführende Experimente.

# Troubleshooting

- ▶ Wenn ein Gerät nicht funktioniert, wie es sollte, kann das oft an vielen Dingen liegen. Je nachdem, was es wirklich ist, können unterschiedliche Gegenmaßnahmen nötig sein.
- ▶ Wieder hilft Ihnen ein Computermodell, um vieles effizient zu prüfen, z. B.:
  - ▶ Könnte ein gewisser Effekt (den Sie bisher vernachlässigt haben) doch stark genug sein, um das Problem zu erklären?
  - ▶ Wäre das Problem durch Benutzung einer geänderten Komponente behoben? (Sie müssen das Teil nicht bestellen und ausprobieren, wenn das Modell Ihnen sagt, dass das nicht helfen würde!)
  - ▶ Wie kritisch sind bestimmte Parameter überhaupt? Würde das Design z. B. nur funktionieren, wenn Sie Komponenten mit extremer Genauigkeit justieren?

# So wächst Ihre Kompetenz

- ▶ Technische Kompetenz muss auf einem **qualitativen und quantitativen Verständnis** dessen beruhen, was in den Geräten vorgeht.
- ▶ Die Arbeit mit Modellen lenkt ihre Aufmerksamkeit genau auf dies – viel mehr als Experimente. (Sie können 1000 Laser im Labor bauen, ohne jemals zu sehen, was gewisse Phänomene verursacht!)
- ▶ Sie möchten auch **grundlegende Limitationen und unvermeidliche Designkompromisse genau verstehen**. Das Erreichen Sie durch Nachdenken, nicht durch Bauen und Messen.
- ▶ Sie können viel lernen, indem Sie **viele Dinge ausprobieren**. Ein Computermodell erlaubt solche Versuche auf schnelle, sichere und kostengünstige Weise. (Sie würden kaum allein aus Neugier viele Stunden investieren, um einen realen Laseraufbau zu ändern und neu zu justieren!)

# Neue Ideen

- ▶ Sie mögen hoffen, dass Sie morgen mit einer großartigen neuen Idee für Designverbesserungen oder ein neues Produkt aufwachen. Leider geschieht dies normalerweise nicht ...
- ▶ In der Realität **entstehen neue Ideen oft, nachdem Sie Ihre Gedanken auf gewisse Dinge fokussieren haben** – zum Beispiel
  - ▶ wenn Sie gewisse störende Effekte am Modell untersucht haben,
  - ▶ wenn Sie die grundlegende Ursache für ein Problem erkannt haben, oder
  - ▶ wenn Sie ein bemerkenswertes Muster beim Vergleich von Designs entdeckt haben.
- ▶ Neue Ideen entstehen sehr viel öfter, wenn Sie mit Modellen arbeiten; schließlich arbeiten Sie so genau an dem, was innerhalb der Geräte passiert.



# Schlussfolgerungen

- ▶ Ein **genaues Verständnis** dessen, was in Lasern vor sich geht, ist nicht nur schön zu haben, sondern **unentbehrlich für eine effiziente Arbeit**.
- ▶ Computermodule für Laser sind leistungsfähige Tools für die Entwicklung eines genauen Verständnisses – im Kern, indem man **den transparenten Laser realisiert**.
- ▶ Eine Arbeit basierend auf **Blindflug, Versuch und Irrtum im Labor** usw. ist **verschwenderisch und unprofessionell**.
- ▶ Die Benutzung von Computermodellen kostet einiges an Geld und Zeit, spart aber an anderer Stelle leicht ein Vielfaches der Kosten und Zeit ein.
- ▶ Die Frage ist also nicht, ob Sie sich den Einstieg in die Computermodellierung leisten können, sondern vielmehr, **ob Sie es sich leisten können, darauf zu verzichten!**

# Häufige Bedenken (1)

- ▶ **Ist die Modellierung für mich nicht zu schwierig oder zu zeitaufwendig?**
  - ▶ Das könnte sein, aber was wenn die Alternative bedeutet, im dunklen zu fischen, die Dinge nie richtig zu verstehen, Zeit und Geld zu verschwenden? Geben Sie nicht auf, sondern denken Sie wie folgt:
  - ▶ Die erste Frage sollte sein: **Was ist der effizienteste Ansatz für Ihre Produktentwicklung**: die Arbeit mit einem Computermodell oder ohne ein solches? (Dies hängt von den jeweiligen Umständen ab.)
  - ▶ Wenn ein Modell benötigt wird, ist die nächste Frage: **Wer sollte das tun?** Vielleicht ein Kollege von Ihnen; oder nutzen Sie einen kompetenten technischen Berater (→ fragen Sie RP Photonics!).
  - ▶ Beachten Sie, dass hochwertige Modellierungssoftware mit **kompetenter technischem Support** geliefert wird. Wenn Sie mit RP Photonics arbeiten, bedeutet dies allgemeine technische Beratung! **Sie werden nicht alleine gelassen!**

# Häufige Bedenken(2)

- ▶ **Wie kann ich wissen, ob meine Modelle realistisch sind?**
  - ▶ Modelle können tatsächlich unrealistisch sein. Wenn Sie sie jedoch sorgfältig entwickelt haben – ggf. mit kompetenter technischer Unterstützung vom Entwickler der Software –, sollten Sie hier kein Problem haben.
  - ▶ **Freuen Sie sich über gefundene Diskrepanzen** und betrachten Sie diese nicht etwa als ärgerlich: Schließlich können Sie daraus nützliche Dinge lernen, z. B.
    - ▶ dass gewisse Komponenten nicht so sind, wie Sie gedacht hätten
    - ▶ dass bestimmte Effekte wichtiger sind, als Sie erwartet hätten

# Häufige Bedenken(3)

- ▶ **Wie kann ich wissen, dass die Software korrekt arbeitet und die Daten der Komponenten korrekt sind?**
  - ▶ Natürlich brauchen Sie unbedingt eine Software, auf die Sie sich verlassen können. Im Idealfall wissen Sie, dass sie **von einem verlässlichen Experten mit bewiesener Kompetenz entwickelt** wurde.
  - ▶ Sie können (und sollten) Vertrauen Schritt für Schritt aufbauen, angefangen mit Analysen und Tests von einfacheren Konfigurationen.
  - ▶ Abweichungen der Daten von Komponenten sind tatsächlich nicht ungewöhnlich. Jedoch verschwindet dieses Problem ja keineswegs, einfach indem man nicht mit einem Computermodell arbeitet! Oft kann Ihnen ein Modell gerade dabei helfen, die Parameter von Komponenten zu überprüfen und genauere Datensätze zu erhalten, oder um Laserdesigns zu entwerfen, die weniger sensitiv auf die Variation gewisser Parameter reagieren.

# Werden Sie aktiv! (1)

Falls Sie nun beschlossen haben, dass Sie **nicht weiter im Blindflug arbeiten möchten**, sondern mit einem **klaren Verständnis**, um Ihre Produktentwicklung effizienter und schneller zu gestalten, können Sie **wie folgt vorgehen**:

- ▶ Identifizieren Sie die wichtigsten technischen Gebiete, abhängig davon, was genau Sie entwickeln, z. B.:
  - ▶ Design von Laserresonator
  - ▶ Laserdynamik (z. B. Q switching oder Pulsverstärkung)
  - ▶ Erzeugung ultrakurzer Laserpulse (mode locking, Verstärkersysteme)
- ▶ Überlegen Sie, was Sie gerne transparent machen würden, und welche Fragen Sie klären möchten, um schneller voranzukommen.
- ▶ Finden Sie heraus, welcher Anbieter am besten in der Lage ist, Ihnen passende **leistungsfähige Simulations- und Designsoftware** sowie **kompetenten, hilfreichen technischen Support** zu bieten.

# Werden Sie aktiv! (2)

- ▶ Wenn Sie selbst mit Computermodellierung beginnen möchten: Finden Sie heraus, welcher Anbieter am besten in der Lage ist, Ihnen passende **leistungsfähige Simulations- und Designsoftware** sowie **kompetenten, hilfreichen technischen Support** zu bieten.
- ▶ Wenn Sie diesen Ansatz in Ihrem Fall nicht für effizient halten: Finden Sie einen **technischen Berater**, von dem erwartet werden kann, dass er Ihnen **kompetente und verlässliche technische Beratung liefert**.
- ▶ Zugegebenermaßen bin ich hier nicht neutral, aber erwägen Sie, [RP Photonics](http://www.rp-photonics.com) zu kontaktieren!
  - ▶ Software: [http://www.rp-photonics.com/software\\_d.html](http://www.rp-photonics.com/software_d.html)
  - ▶ Consulting: [http://www.rp-photonics.com/consulting\\_d.html](http://www.rp-photonics.com/consulting_d.html)