



50 JAHRE LASER

# Wann ist ein Laser ein Laser?

Die Suche nach neuen Materialien und Konzepten geht weiter

Stefan Jorda

Weitere Informationen finden sich im Online-Inhaltsverzeichnis dieser Ausgabe auf [www.physik-journal.de](http://www.physik-journal.de).

In den Siebzigerjahren bastelte Theodor Hänsch in Stanford einen Laser, der nur aus einem einzigen Tropfen einer Farbstofflösung bestand und ganz ohne optische Elemente auskam. Daraufhin postulierte sein Mentor Arthur Schawlow, dass sich jedes Material als Lasermedium eignet, wenn man nur stark genug pumpt. Ein legendäres Experiment mit zwölf Sorten Wackelpudding unterschiedlicher Geschmacksrichtungen belehrte den Laserpionier jedoch eines Besseren. Dennoch geht auch heute die Suche nach neuen Lasermaterialien und grundlegend neuen Konzepten weiter. Schließlich locken innovative Anwendungen und grundlegend neue wissenschaftliche Erkenntnisse.

Bei den Materialien sind organische Halbleiter wie konjugierte Polymere besonders attraktiv, da „Plastik“ als Lasermedium biegsam, billig und praktisch ist. Während organische Leuchtdioden und Displays bereits in kommerziellen Produkten ihre Vorteile beweisen, ist ein elektrisch gepumpter Polymerlaser immer noch Zukunftsmusik. Bislang geht bei den *organischen Lasern* kein Weg am optischen Pumpen vorbei.

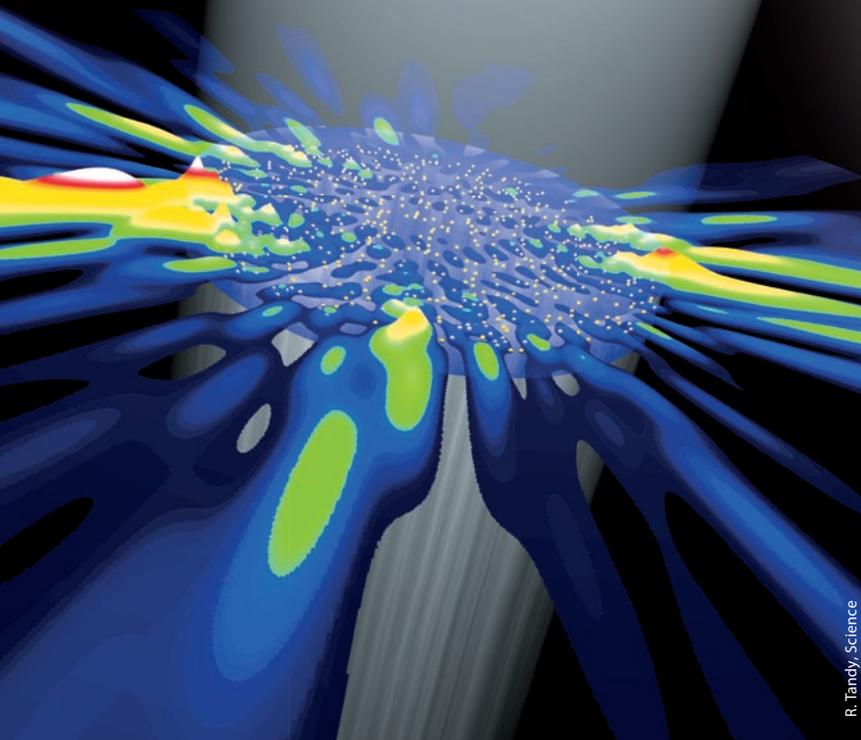
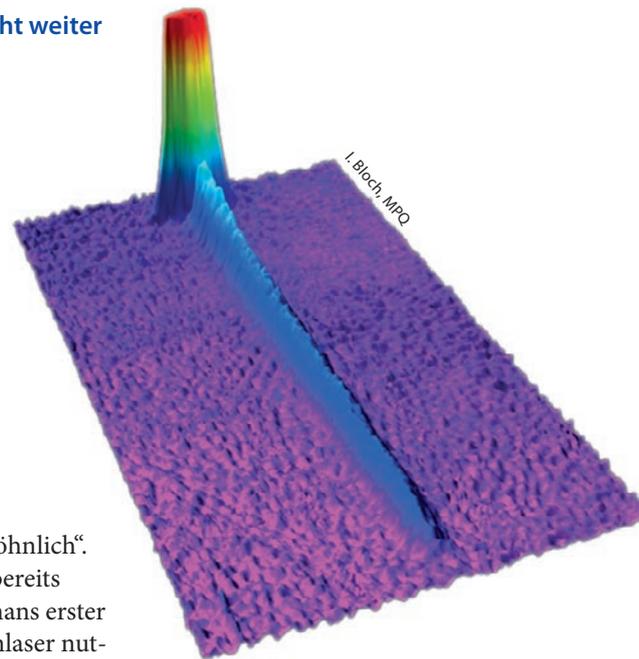
Auch wenn sie ein (noch) exotisches Lasermedium nutzen, ist die Bauweise eines organischen Lasers

„gewöhnlich“. Wie bereits Maimans erster Rubinlaser nutzen sie ein optisch

aktives Medium mit Besetzungsinversion sowie die Rückkopplung in einem Resonator mit Auskoppelspiegel, um Licht zu verstärken – insofern machen sie dem in Anlehnung an den Maser von Gordon Gould 1957 eingeführten Akronym für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ alle Ehre.

Heute existieren aber auch zahlreiche mehr oder weniger ausgefallene Typen, die keinen Resonator benötigen oder keine Inversion und daher die Frage aufwerfen: Wann ist ein Laser überhaupt ein Laser? Konsens scheint darüber zu herrschen, dass der Verstärkungsprozess, der in der Regel oberhalb einer gewissen Pumpschwelle einsetzt, das wesentliche Element ist.

Daher ist es auch nicht ungewöhnlich, dass ein Laser rein äußerlich gar nicht wie ein optisches Gerät aussieht. So ähnelt ein *Freie-Elektronen-Laser* (FEL) wie FLASH am DESY in Hamburg eher einem Teilchenbeschleuniger als einem Laser. Tatsächlich bildet ein Linearbeschleuniger sein Herzstück: Er liefert hochrelativistische Elektronen, die anschließend in den periodischen Magnetfeldern von sog. Undulatoren (**Abb. rechts unten**) abgelenkt werden und dabei weiches Röntgenlicht abstrahlen. Auf Grund eines Selbstverstärkungsprozesses ist dieses Licht im Gegensatz zu einer Synchrotronstrahlungsquelle allerdings kohärent, ganz wie es sich für einen Laser gehört. Auch der Verstärkungsprozess passt: Es gibt ein „aktives Lasermedium“, nämlich den Elektronenstrahl, und die „stimulierte Emission“ findet von höherer zu niedrigerer kinetischer Energie der Elektronen statt. Ein Resonator ist allerdings überflüssig: Ein einziger Durchgang des Elektronenstrahls durch den Undulator genügt, um



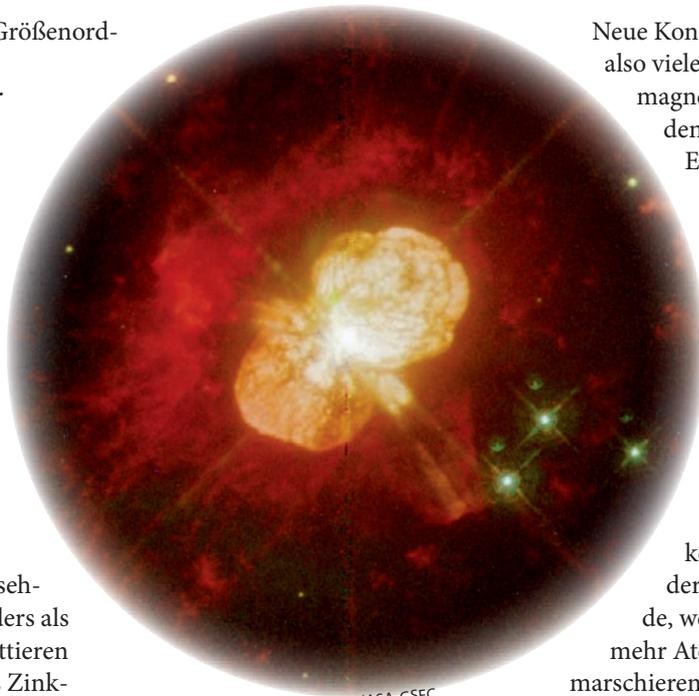
die Strahlung um viele Größenordnungen zu verstärken.

Auch ein **Zufallslaser** kommt ohne Resonator aus. Die Rückkopplung entsteht dabei nicht aufgrund der Reflexion an Spiegeln, sondern durch Vielfachstreuung in einem stark ungeordneten dielektrischen Medium. Der Zufall kommt ins Spiel, weil sich die Ausbreitungsrichtung der Lichtwellen bei den einzelnen Streueignissen in unvorhersehbarer Weise ändert. Anders als gewöhnliche Typen emittieren Zufallslaser, die z. B. aus Zinkoxidpulver bestehen, in alle Richtungen.

Die **Abb. links unten** zeigt die berechnete Emission eines planaren Zufallslasers, der senkrecht dazu optisch gepumpt wird.

Ein Resonator ist also offenbar kein unverzichtbares Element. Wie sieht es dann mit der Besetzungsinversion zwischem dem oberen und dem unteren Laserniveau aus, die durch Pumpen erzeugt wird? Normalerweise ist diese notwendig, damit die stimulierte Emission von Photonen gegenüber deren Reabsorption dominiert – sonst wäre keine Verstärkung möglich. In den 90er-Jahren gelang es allerdings zu zeigen, dass auch **Laser ohne Inversion** möglich sind. Der Clou besteht darin, mithilfe eines externen Laserfelds zusätzliche Kohärenz zwischen Zuständen des aktiven Mediums so zu erzeugen, dass die Reabsorption stark unterdrückt wird. Dadurch ist Verstärkung möglich, obwohl der obere Zustand kaum besetzt ist. Die Hoffnungen, mit inversionslosen Lasern kohärente UV- oder Röntgenstrahlung zu erzeugen, haben sich bislang aber nicht erfüllt, sodass es in den letzten Jahren um diesen Ansatz still geworden ist.

Grundsätzlich springt ein Laser erst dann an, wenn die stimulierte Emission die spontane Emission überwiegt – daher muss die Pumpleistung in der Regel eine Schwelle überschreiten. Gelingt es allerdings, die spontane Emission zu unterdrücken, so sind Laser denkbar, die schon bei wesentlich geringeren Strömen arbeiten. Halbleiter-Nanostrukturen, die in einen Mikroresonator oder einen photonischen Kristall mit passenden Bandlücken eingebettet sind, könnten hier den Durchbruch zu effizienten, schwellenlosen Mikrolasern bringen. Auch der am stärksten abgespeckte Typ weist keine Schwelle auf: Beim **Ein-Atom-Laser** befindet sich nur ein einzelnes Atom im Resonator und emittiert Lichtquanten in die Resonatormode. Für Anwendungen eignet sich dieser Laser sicher nicht, aber er erlaubt es, fundamentale Fragen zur Wechselwirkung von Licht mit Materie zu beantworten.



NASA-GSFC

Neue Konzepte und Ideen gibt es also viele, um kohärente elektromagnetische Strahlung mit den unterschiedlichsten Eigenschaften zu erzeugen. Aber ist das Laserkonzept auf Licht beschränkt? Keineswegs, wie das Beispiel des **Atomlasers** zeigt, der kohärente Materiewellen aus einem Bose-Einstein-Kondensat erzeugt (**Abb. links oben**): Die Verstärkung kommt hier bereits bei der Kondensation zustande, wenn sukzessive immer mehr Atome im Gleichschritt marschieren. Für einen Atomlaser

benötigt man dann „nur“ noch einen geeigneten Mechanismus, um die kohärenten Atome aus der Falle auszukoppeln. Da die Zahl der Atome (anders als bei Photonen) allerdings erhalten ist, entleert sie sich schnell, und bislang ist es nicht gelungen, für kontinuierlichen Nachschub zu sorgen. Dies wäre für Anwendungen z. B. in der Lithografie aber unerlässlich. Neben Atomen wurden in den letzten Jahren auch Gitterschwingungen von Ionen (Phononen) in einer Falle oder bosonische Quasiteilchen in Festkörpern wie Oberflächenplasmonen (surface plasmons) im Zusammenhang mit „Laseraktivität“ diskutiert. Schnell waren dazu auch die nicht sonderlich kreativen Akronyme Phaser bzw. Spaser erfunden – letzterer basiert auf Nanoteilchen aus Gold und ging im vergangenen Jahr als kleinster Laser durch die Medien.

Der vermutlich größte bekannte Laser sprengt hingegen jedes irdische Labor: Die UV-Spektren des veränderlichen Sterns Eta Carinae weisen auf eine Laseraktivität in diesem etwa 7000 Lichtjahre entfernten und sehr leuchtstarken Stern hin, der in einem gewaltigen und rätselhaften Materieausbruch vor rund 160 Jahren die beiden pilzförmigen Wolken des Homunkulus-Nebels ausgestoßen hat (**Abb. oben**). Dass die Natur ihm einen Schritt voraus war, hätte Theodor Maiman sicherlich überrascht.



DESY