

Leistungsskalierung von Lasern

Echte Skalierbarkeit bedeutet weit mehr als eine einfache Erhöhung der Leistung

● Leistungsskalierbarkeit ist ein wichtiges Konzept, welches gewisse Laserdesigns auszeichnet, andere dagegen nicht. Was genau bedeutet jedoch Leistungsskalierung? Welche Bedeutung hat sie für die Praxis? Und welche Methoden werden verwendet?

Höher, weiter, schneller – bei Lasern bedeutet dies oft das Streben nach höheren Ausgangsleistungen. In diesem Zusammenhang ist in der wissenschaftlichen und technischen Literatur häufig von Leistungsskalierung (engl. *power scaling*) die Rede – leider aber in vielen Fällen ohne Beachtung dessen, was das Wort eigentlich bedeutet. Eine genauere Kenntnis des Konzepts der Leistungsskalierung ist sehr nützlich, insbesondere für den Vergleich von Konstruktionsprinzipien im Hinblick auf ihr Potenzial für weitere Verbesserungen. Deshalb verdient das Prinzip der Skalierung eine vertiefte Beschäftigung.

Echte Skalierbarkeit eines Lasersystems [1] bedeutet weit mehr, als dass mit konsequenter Optimierung noch mehr an Leistung herauszuholen sein sollte: Es geht um die Existenz eines genau beschreibbaren systematischen Verfahrens, welches im Prinzip in wiederholbarer Weise erlaubt, aus einem gegebenen Laserdesign ein anderes zu erhalten, das z. B. doppelt so viel Ausgangsleistung liefert – und dies wohlgerneht, ohne die wesentlichen Probleme zu verstärken. Beispielsweise darf die Skalierungsprozedur nicht dazu führen, dass ohnehin schon recht hohe optische Intensitäten noch höher werden und man damit beim Skalieren bald die Zerstörschwelle von Materialien überschreitet. Auch die kritischen Anforderungen an benötigte Komponenten – etwa betreffend die „brightness“ von Pumpdioden – dürfen nicht immer schwerer zu erfüllen sein. Man kann also nicht von Leistungsskalierung sprechen, wenn die Strahlen zweier linear polarisierter Pumpdioden an einem Polarisator kombiniert werden (weil dieses Verfahren

DER AUTOR

RÜDIGER PASCHOTTA

Rüdiger Paschotta ist Experte in Gebieten wie Lasertechnik, nichtlineare Optik und Faseroptik. Er hat sich zunächst einen internationalen Ruf als Forscher erworben und dann 2004 die Firma RP Photonics Consulting gegründet. Seitdem arbeitet Paschotta für verschiedenste Firmen der Photonik-Industrie. Er ist ebenfalls bekannt als der Verfasser der Encyclopedia of Laser Physics and Technology.



Dr. Rüdiger Paschotta
RP Photonics Consulting GmbH
Kurfürstenstr. 63
CH-8002 Zürich
Tel.: 0041 44 201 02 60
E-Mail: Paschotta@rp-photonics.com

zu einem unpolarisierten Pumpstrahl führt, also nicht wiederholbar ist), oder wenn bei Verdopplung der Leistung die Intensität im Lasermedium von 40 auf 80 % der Zerstörschwelle steigt.

Eine echte Skalierungsprozedur kann klar formuliert werden, etwa in der folgenden Form:

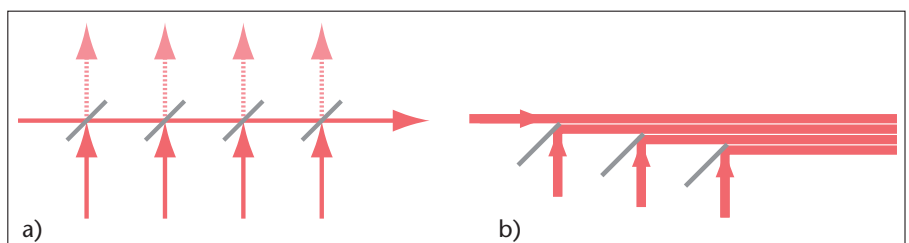


ABBILDUNG 1: a) Kombination von Strahlen einzelner Laser an Strahlteilern: Die nach oben gehenden Strahlen werden durch destruktive Interferenz am Strahlteiler weitgehend unterdrückt; b) Kombination von Strahlen mit seitlicher Verschiebung: Es entsteht ein kombinierter Strahl mit größerer Fläche, aber kleinerer Divergenz.

Um die Ausgangsleistung des ursprünglichen Laserdesigns zu verdoppeln, verdoppelt man die Pumpleistung und die Modenfläche des Laserstrahls im Verstärkungsmedium, reduziert den Parameter X auf die Hälfte und halte Parameter Y konstant, woraus ersichtlich hervorgeht, dass man den wesentlichen Limitationen $L1$ und $L2$ nicht deutlich näher kommt.

Praktisch alle grundlegenden Aspekte der Leistungsskalierung lassen sich auf Verstärkersysteme übertragen, weswegen eine getrennte Diskussion für Verstärker (etwa regenerative Verstärker für ultrakurze Pulse) nicht notwendig ist. Ebenfalls ergeben sich ähnliche Gesichtspunkte, wenn die Skalierung anderer Parameter diskutiert wird, z. B. der Repetitionsrate von gütegeschalteten oder modengekoppelten Lasern.

Kombination von Strahlen

Beginnen wir mit einem konzeptionell einfachen, wenn auch nicht sehr attraktiven Verfahren der Leistungsskalierung, angewandt auf Faserlaser. Um die n -fache Leistung des einzelnen Lasers zu erhalten, kombiniere man die Faserenden von n gleichen Lasern so, dass ihre Endflächen in einer Ebene dicht aneinander liegen und die Ausgangsstrahlen zu einem Strahl verschmelzen. Offensichtlich kann man dieses Verfahren im Prinzip beliebig weit treiben, da dann lediglich mehr Faserlaser der bereits existie-

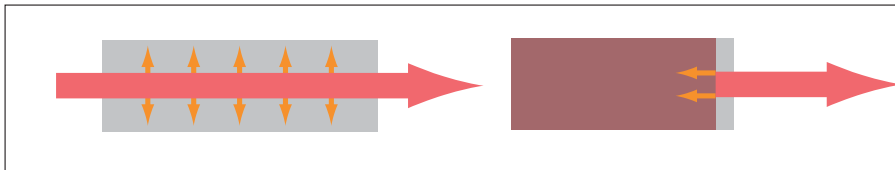


ABBILDUNG 2: a) Geometrie des Stablasers: Die Wärme (Pfeile in orange) fließt transversal zur Strahlrichtung ab, was eine thermische Linse mit Aberrationen erzeugt; b) Geometrie des Scheibenlasers: Die Wärme fließt in Strahlrichtung in den Kühlkörper ab.

renden Art benötigt werden. Allerdings wird die Strahlqualität des kombinierten Strahls mit zunehmendem n immer schlechter (da die emittierende Fläche ansteigt, während die Strahldivergenz etwa gleich bleibt), und die brightness liegt sogar weit unter der des einzelnen Faserlasers.

Es gibt jedoch Möglichkeiten, Strahlen so zu kombinieren, dass die Strahlqualität erhalten bleibt:

- Wenn es sich um axial einmodige Laser (*single frequency lasers*) mit stabiler linearer Polarisation handelt, können ihre Strahlen mit gewöhnlichen Strahlteilern (mit geeigneten Reflektivitäten) kombiniert werden, wenn die relative Phase der Strahlen stabilisiert werden kann – etwa mit Hilfe geeigneter optischer Rückkopplung, oder mit einem automatischen Regelsystem. Es gibt Methoden dieser Art, die nicht einmal einmodigen Betrieb voraussetzen. Die nach oben gehenden Strahlen in Abb. 1a werden durch destruktive Interferenz am Strahlteiler weitgehend unterdrückt.

- In ähnlicher Weise ist es möglich, Laserstrahlen so nebeneinander zu setzen, dass ein kombinierter Strahl mit größerer Fläche, aber kleinerer Divergenz entsteht (Abb. 1b). Auch hier ist eine phasenstarre Kopplung polarisierter Strahlen notwendig; sonst nimmt die Strahldivergenz nicht ab, und die Strahlqualität verschlechtert sich.
- Wenn alle Laser unterschiedliche Emissionswellenlängen haben, kann man ihre Strahlen mit dichroitischen Spiegeln kombinieren. In Abbildung 1a ist dann jeder Spiegel so beschaffen, dass er die von links kommenden Strahlen aufgrund ihrer Wellenlänge durchlässt, den von unten kommenden Strahl jedoch reflektiert. Dieses Verfahren setzt freilich der Zahl kombinierbarer Strahlen eine Grenze – die allerdings hoch sein kann, wenn die Strahlen schmalbandig und die Laser breit abstimmbare sind.

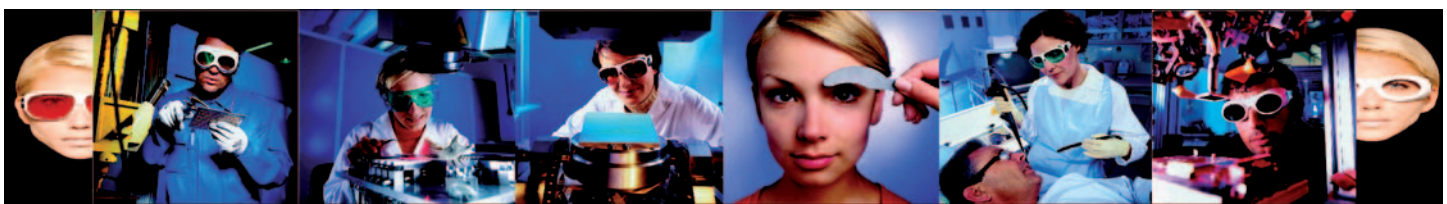
DIE FIRMA

RP Photonics Consulting GmbH
Zürich, Schweiz

RP Photonics Consulting bietet Beratungs-Dienstleistungen von einem hoch qualifizierten Laserexperten zu Themen wie Laser und Verstärker, nichtlineare Optik, Faseroptik, ultrakurze Pulse, Vielschichtsysteme und Rauschen in der Optik. Die Dienstleistungen umfassen Produktdesigns, Problemlösungen, Berechnungen und Simulationen, Softwareentwicklung, unabhängigen Vergleich von Technologien oder Produkten, due diligence (für Investoren), sowie Mitarbeiterschulung am Ort des Kunden. Weitere Infos unter: www.rp-photonics.com

Leistungsskalierung am einzelnen Laser: Stab- vs. Scheibenlaser

Die Erhöhung der Anzahl von Lasern bei der oben diskutierten Methode der Skalierung hat natürlich praktische Nachteile. Man hält deswegen Ausschau nach Verfahren, die die Leistung eines einzelnen Lasers skalierbar machen. Freilich erkennt man, dass die meisten Lasertypen nicht leistungsskalierbar sind. Dies sei am Beispiel des Stablasers, basierend auf Nd:YAG, erläutert. Im Prinzip kann man höhere Leistungen ohne höhere Intensitäten im Laserkristall erhalten, indem man die Modenflächen in Proportion zur



**Laser?
Ja.
Augenschutz?**



Die weltweit größte Auswahl an Laserschutzprodukten!
Besuchen Sie uns auf folgenden Messen:

Arbeitsschutz aktuell, Karlsruhe, 27.-29.9.2006
VISION 2006, Stuttgart, 7.-9. November 2006
MEDICA 2006, Düsseldorf, 15.-19. November 2006

LASERVISION we protect your eyes

LASERVISION GmbH
Siemensstr. 6
DE-9766 Fürth
Germany

Phone +49(0)911 9736 8100
Fax +49(0)911 9736 8199
Mail info@lv.g
Web www.lv.g

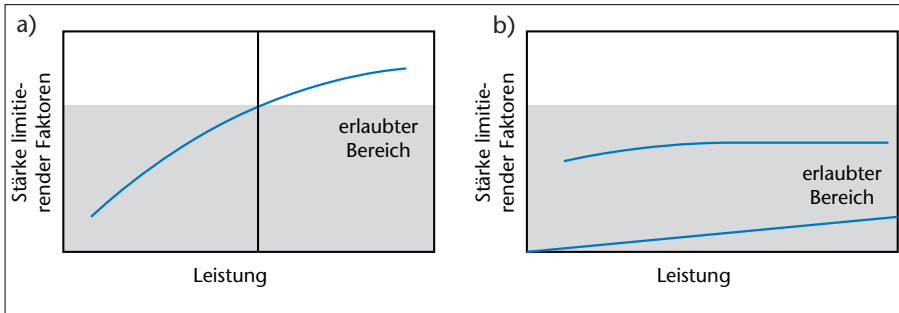


ABBILDUNG 3: a) Leistungserhöhung bei einem nicht skalierbaren Lasertyp führt einen oder mehrere kritische Parameter unweigerlich aus dem erlaubten Bereich heraus. Die vertikale Linie markiert die Leistungsgrenze. Diese kann durch diverse Maßnahmen noch ein Stück weit verschiebbar sein; b) Leistungserhöhung bei einem skalierbaren Lasertyp bringt den kritischsten Parameter kaum näher an die erlaubte Grenze. Es gibt in der Praxis jedoch andere Parameter (untere Linie), die bei wesentlichen höheren Leistungen schließlich die Skalierbarkeit begrenzen werden.

Pump- und Ausgangsleistung vergrößert. Jedoch werden dann sowohl die Temperatur im Laserkristall als auch die schädlichen thermischen Effekte immer stärker, sodass die Strahlqualität bei hohen Leistungen verschlechtert wird. Wichtig sind insbesondere die Aberrationen der thermischen Linse sowie thermisch induzierte Depolarisationseffekte. Es sind diverse Methoden bekannt, um solche Effekte zu reduzieren; beispielsweise kann man eine besonders gleichmäßige Pumpverteilung anwenden (was die Aberrationen der thermischen Linse reduziert), den Laserkristall stark kühlen (wodurch die Wärmeleitfähigkeit zunimmt) oder ein verbessertes Resonatordesign einsetzen (was den Einfluss der Aberrationen auf die Strahlqualität reduziert [2]). Solche Maßnahmen erlauben z. T. erhebliche Verbesserungen von Lasersystemen. Eine echte Leistungskalierbarkeit ergibt sich hieraus aber nicht, da diese Maßnahmen nicht wiederholbar sind.

Anders sieht es bei Scheibenlasern [1, 2] (*thin disk lasers*) aus. Hier hat der Laserkristall die Form einer dünnen Scheibe, die auf einem Kühlkörper montiert ist (Abb. 2b). Das zu verstärkende Laserlicht wird an einer Beschichtung zwischen Scheibe und Kühlkörper reflektiert. Die entstehende Wärme wird im Wesentlichen in Strahlrichtung – nicht etwa in transversaler Richtung, wie beim Stablasers – in den Kühlkörper geleitet. Da die Scheibendicke (typisch 100 µm) klein ist im Vergleich zum Strahldurchmesser, führt z. B. eine Verdopplung der Pumpleistung bei gleichzeitiger Verdopplung der Modenfläche *nicht* zu einer wesentlichen Temperaturerhöhung im Laserkristall. (Man beachte, dass die gekühlte Fläche ebenfalls zunimmt.) Die transversalen Temperaturgradienten werden sogar schwächer, hier-

mit auch die Brechkraft der thermischen Linse; dies gleicht allerdings gerade die höhere Empfindlichkeit einer größeren Mode auf Linsenwirkungen aus. Die Erhaltung der Strahlqualität ist somit über einen weiten Bereich von Leistungen möglich – absehbar auch weit über die heute erreichbaren Leistungen hinaus.

Der Scheibenlaser bleibt sogar leistungskalierbar, wenn er mit Hilfe eines sättigbaren Halbleiterspiegels (SESAMs) passiv modengekoppelt wird, um ultrakurze Pulse zu erzeugen [3]. Der SESAM hat nämlich die gleiche Geometrie und wird insbesondere nicht wesentlich heißer, wenn die Modenfläche hieraus genauso skaliert wird. Die Skalierungsprozedur sieht dann so aus, dass man die Ausgangsleistung verdoppelt, indem man die doppelte Pumpleistung anwendet, die Modenflächen in der Scheibe und auf dem SESAM (wie auch auf anderen Komponenten) verdoppelt sowie die Scheibendicke und die Resonatorlänge konstant hält. Man kann sehen, dass dies die Spitzenintensitäten der Pulse nicht vergrößert, auch nicht die Pulse verlängert und (was nicht ganz offensichtlich ist) dass die Neigung zu so genannten Q-switching-Instabilitäten ebenfalls nicht zunimmt.

Freilich wird auch beim Scheibenlaser die Skalierbarkeit irgendwo ihre Grenzen finden. Die mechanische Belastung des Kristalls nimmt beim Skalieren zu, und die Aufbringung der Scheibe auf den Kühlkörper mit guter Wärmeleitfähigkeit, geringer Verspannung und guter Reproduzierbarkeit ist nicht ganz einfach. Solche Probleme können allerdings durch weitere Reduktion der Scheibendicke, mit einigen technischen Kniffen und evtl. durch Verbindung der dotierten Scheibe mit einer undotierten dickeren Scheibe beherrscht werden. Bei großen

Modenradien in dünnen Scheiben wird irgendwann die Verstärkung in transversaler Richtung so groß, dass erhebliche Verluste durch verstärkte Spontanemission (*amplified spontaneous emission*, ASE) entstehen – ein echtes Problem, welches für dünnere Scheiben noch stärker wird, allerdings erst bei Leistungen von vielen Kilowatt pro Scheibe auftritt. Beim modengekoppelten Laser ergeben sich schon bei geringeren Leistungen Probleme mit der Dispersionskompensation bei hohen Leistungen; die hieraus entstehenden Grenzen sind allerdings noch nicht bekannt.

Kombination von Laserköpfen

Für Stablasers gibt es ferner die Methode, mehrere Laserköpfe (also Laserkristalle mit Pump- und Kühlvorrichtungen) in einem einzelnen Laserresonator zu kombinieren. Bei geeignetem Resonatordesign (z. B. mit „periodischen Resonatoren“) lässt sich im Prinzip erreichen, dass thermische Strahlverzerrungen bei Erhöhung der Anzahl von Laserköpfen nicht zunehmen. Dieses Verfahren wurde allerdings noch nicht sehr weit getrieben. Denkbar (und vereinzelt praktiziert) ist ebenfalls, die Aberrationen einzelner Laserköpfe zu kompensieren, z. B. mit Hilfe adaptiver Optik.

Natürlich lässt sich dieses Verfahren auch für Scheibenlasers anwenden – und dies besonders einfach, da die thermischen Effekte in den Scheiben ohnehin relativ schwach sind. Die genannte Begrenzung durch ASE gilt natürlich für jeden Scheibenlaserkopf einzeln und begrenzt die Kombination von Leistungen nicht. Somit ist klar, dass die Grenze für einen Scheibenlaser mit mehreren Laserköpfen ein Vielfaches derjenigen des einzelnen Lasers sein wird. Es werden bereits Scheibenlasers mit mehrfachen Laserköpfen produziert, wobei allerdings die Skalierungsgrenzen für die einzelnen Laserköpfe noch nicht erreicht sind.

Ein praktischer Vorteil der Verwendung mehrfacher Laserköpfe ist natürlich, dass dieser modulare Ansatz die Realisierung verschiedener Leistungen auf der Basis eines einzigen Typs von Laserkopf ermöglicht. Andererseits sind Produktionskosten und Raumbedarf in der Regel höher als bei Lösungen mit einem einzigen Laserkopf.

Faserlaser und Faserverstärker

Die Leistung aus einer Faser mit feststehender Modenfläche zu erhöhen, ist für echte Leistungskalierung keine Option, da hierbei

die optischen Intensitäten in der Faser immer weiter zunehmen. Die heute erreichten Intensitäten sind bereits sehr hoch; auch wenn die Zerstörschwelle der Fasern noch etwas höher ist, wirken sich diverse Nichtlinearitäten (z. B. der Raman-Effekt) oft bereits limitierend aus. Voraussetzung für echte Skalierung wäre also, dass die Modenfläche wie beim Scheibenlaser mitskaliert wird. Dem sind jedoch enge Grenzen gesetzt, zumindest wenn die Strahlqualität erhalten bleiben soll: Man braucht dann nämlich in der Regel eine einmodige Faser, und die damit erreichbare Modenfläche ist vorläufig und vielleicht auch längerfristig auf die Größenordnung von $1000 \mu\text{m}^2$ begrenzt. Das „Führungsvermögen“ der Faser wird bei großen Flächen nämlich immer schwächer, sodass die geführte Mode extrem empfindlich z. B. auf Biegen, aber auch auf Fluktuationen der Zusammensetzung des Glases reagiert. Für mehrmodige Fasern, die einmodig betrieben werden, gelten ähnliche (etwas höhere) Grenzen.

Man erkennt, dass der gewaltige Fortschritt der letzten Jahre betreffend die von Faserlasern erzeugten Leistungen eindeutig *nicht* das Resultat von Leistungsskalierung ist: Insbesondere wurden die optischen Intensitäten drastisch erhöht, und ein Spielraum für wesentliche weitere Steigerungen bleibt hier nicht; man stößt bereits an die Grenzen betreffend die Zerstörschwelle und Nichtlinearitäten. Ebenfalls stark erhöht wurde die dissipierte Leistung pro Meter Faserlänge. Hier besteht zumindest mit Wasserkühlung der Faser noch eine deutliche Steigerungsmöglichkeit, aber nur in Verbindung mit Modenflächen, die für sehr gute Strahlqualität zu groß werden. Es sei deswegen trotz der beeindruckenden Fortschritte der letzten Jahre die Prognose gewagt, dass sich zwar die Leistung pro Faser noch deutlich steigern lässt, aber dies nur mit schlechterer Strahlqualität, während für die Leistung bei beugungsbegrenzter Strahlqualität keine sehr starken Verbesserungen mehr möglich zu sein scheinen: Die Grenze wird vermutlich unterhalb von 10 kW liegen. Selbstverständlich gelten diese Grenzen nicht für Systeme, die Licht aus vielen Fasern kombinieren (siehe oben); jedoch fehlen diesen einige der wesentlichen Vorteile, die bisherige Faserlaser auszeichnen.

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass Leistungsskalierung von Lasern ein ziemlich klar (wenn auch nicht vollkommen präzise) definiertes Kon-

zept ist, welches sich jedoch nur auf ausgewählte Typen von Lasern anwenden lässt. Zu diesen existiert eine Skalierungsprozedur, die weitere Steigerungen der Leistungen erlaubt, ohne den wichtigsten Grenzen näher zu kommen. Freilich werden für jeden Ansatz früher oder später irgendwelche Grenzen auftauchen; insofern ist Skalierbarkeit in der Praxis immer auf einen (oft weiten) Bereich von Leistungen begrenzt. Dies wird von Abbildung 3a und 3b illustriert. Interessanterweise sind die Grenzen der Skalierbarkeit häufig völlig andere, als zu Beginn der Entwicklung gesehen wurden. So werden sie für Scheibenlaser guter Strahlqualität *nicht* durch die thermische Linsenwirkung gesetzt (die bei Stablasern limitierend wirkt), sondern vermutlich durch ASE.

Man mag sich fragen, ob die Skalierbarkeit wie hier diskutiert nicht ein akademisch interessanter Aspekt ist, der jedoch in der Praxis weniger wichtig ist als die praktisch erzielte höchste Leistung für einen Typ von Laser. Jedoch ist für die Beurteilung des Potenzials einer Technologie sehr wichtig zu erkennen, ob eine realistische Skalierungsprozedur existiert oder aber eine Grenze schon nahe ist, der man bei weiteren Steigerungen der Leistung unweigerlich noch näher kommen wird. In jedem Fall erfordert die Beurteilung solcher Grenzen eine genaue Kenntnis der jeweiligen Technologie sowie die Berücksichtigung der gesetzten Randbedingungen. Wichtig ist insbesondere, ob die Strahlqualität erhalten bleiben muss und ob die Wirkung von Nichtlinearitäten in ähnlicher Weise begrenzt werden muss.

Referenzen

- [1] Artikel in der „Encyclopedia of Laser Physics and Technology“ (<http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>) über power scaling of lasers, thin disk lasers, thermal lensing und andere in diesem Artikel verwendete Begriffe.
- [2] R. Paschotta, Beam quality deterioration of lasers caused by intracavity beam distortions, *Opt. Express* **14** (13), 6069 (2006).
- [3] R. Paschotta et al., Diode-pumped passively mode-locked lasers with high average power, *Appl. Phys. B* **70**, 25 (2000).
- [4] A. Giesen et al., Scalable concept for diode-pumped high-power solid state lasers, *Appl. Phys. B* **58**, 363 (1994)



NanoS
The Nanotech Journal

**3 Issues
+ 1 Guide**



The image shows a stack of NanoS journal covers. The top cover features a large orange sphere and the title 'Adhesion studies by nanoindentation'. Other covers in the stack show various scientific images and titles like 'Nanotech in automotive engineering', 'Customer answers', and 'Effective tools for modeling life'.

Next Issue: 16.10.06

**Topics:
Nanoparticles
Surface Science**

**Free sample copy
or media kit?**

**Order by E-Mail:
aanders@wiley-vch.de
or by fax:
+49 6201-606550**

