

Durchstimmbares CW-Laserlicht von Blau bis Rot: OPOs machen es jetzt möglich

Rosita Sowade, Jens Kießling, Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg
 Ingo Breunig, Lehrstuhl für Optische Systeme, Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK, Universität Freiburg

Optisch-parametrische Oszillatoren (OPOs) sind weit abstimmbar und dadurch variabel einsetzbare Lichtquellen. Diese sind für den sichtbaren Spektralbereich bislang allerdings nur im gepulsten Betrieb kommerziell erhältlich. In diesem Artikel stellen wir zwei Konzepte vor, mit deren Hilfe kontinuierlich emittierende OPO-Systeme das sichtbare Spektrum erobern.

1 Was sind optisch-parametrische Oszillatoren?

Bereits wenige Jahre nach der ersten Realisierung eines Lasers durch Theodore Maiman 1960 [1] wurde auch der erste optisch-parametrische Oszillator (OPO) demonstriert [2]. Heute sind OPOs vielseitige Lichtquellen, die beispielsweise in der Molekül-Spektroskopie, der Photochemie, der Quantenoptik und der Spurengasanalyse zahlreiche Anwendungen finden.

In einem OPO wird monochromatisches Licht über einen optisch-nichtlinearen Prozess in weit durchstimmbares Licht umgewandelt. Die Kohärenzeigenschaften des ursprünglichen Laserlichts bleiben dabei erhalten. Durch den OPO-Prozess wird eine eingestrahlte Pumpwelle der Frequenz ν_p in zwei Wellen mit anderen Frequenzen aufgespalten: eine Signalwelle der Frequenz ν_s und eine Idlerwelle der Frequenz ν_i . Hierbei hat das erzeugte Licht kleinere Frequenzen als das ursprünglich eingestrahlte. Es gilt die Frequenzbedingung

$$\nu_p = \nu_s + \nu_i \quad (\text{Gl.1})$$

sowie die Phasenanpassungsbedingung

$$\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i + \Delta\vec{k} \quad (\text{Gl.2})$$

für die Wellenvektoren mit den Absolutwerten k_p , k_s und k_i mit $k_x = 2\pi n_x/\lambda_x$, n_x ist der wellenlängenabhängige Brechungsindex. Diese beiden Gleichungen können im Photonenbild als Energie- und Impulserhaltung interpretiert werden. In diesem Bild kann man sich den parametrischen Prozess als Spaltung des Pumpphotons vorstellen. Die Frequenzen der erzeugten Signal- und

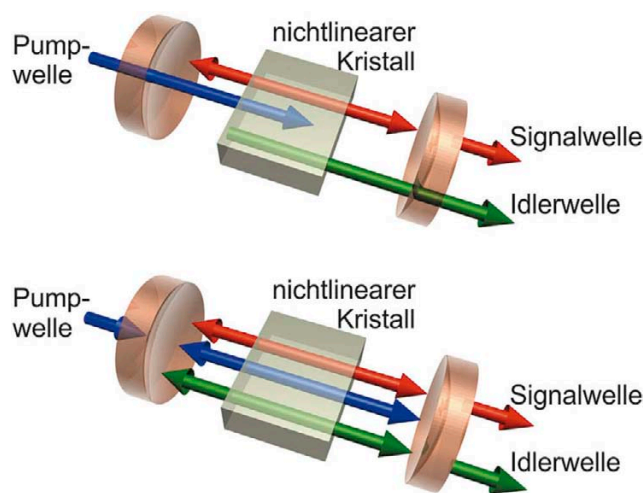


Bild 1: Schematischer Aufbau von optisch-parametrischen Oszillatoren. Die eingestrahlte Pumpwelle wird in einem nichtlinearen Kristall in Signal- und Idlerwelle umgewandelt. Durch Wahl der Spiegelbeschichtungen werden eine (oben) oder mehrere Wellen (unten) resonant überhöht

Idlerphotonen sind durch die beiden oben genannten Bedingungen festgelegt. Es gibt keine weitere Beschränkung für den Abstimmbereich, d.h. es können grundsätzlich Photonen jeder Frequenz erzeugt werden, solange diese kleiner als die des Pumplichts ist. OPOs sind also kontinuierlich über den gesamten Transparenzbereich des verwendeten Mediums durchstimmbar. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber Lasern, deren Emission durch konkrete Übergänge zwischen Energieniveaus festgelegt ist.

Phasenanpassung kann u.a. durch Verwendung der natürlichen Doppelbrechung eines nichtlinearen Mediums erreicht werden, z.B. in einem Lithiumniobatkristall – in diesem Fall ist $|\Delta\vec{k}| = 0$. Eine weitere Möglichkeit ist die sogenannte „Quasi-Phasenanpassung“. Hier wird das nichtlineare Medium so strukturiert, dass die Orientierung seiner inneren

Struktur mit der Periodenlänge Λ alterniert, und die obige Gleichung mit $|\Delta\vec{k}| = 2\pi/\Lambda$ erfüllt ist. Durch Variation der Temperatur und/oder der Periodenlänge kann man die Phasenanpassungsbedingung beeinflussen und damit die Frequenzen ν_s und ν_i gezielt auswählen. Auf diese Art lassen sich die Emissionswellenlängen des OPOs über einen weiten spektralen Bereich abstimmen.

Damit optisch-parametrische Prozesse stabil und effizient ablaufen können, wird das nichtlineare Medium in einem Resonator als Oszillator betrieben. Diese Kavitäten können entweder eine, zwei oder sogar alle drei interagierenden Wellen resonant verstärken.

Bild 1 zeigt einen solchen Aufbau exemplarisch für zwei Resonatortypen in der Standardkonfiguration mit Spiegeln.

OPOs können sowohl gepulstes als auch kontinuierliches Licht (Continuous-Wave, CW) emittieren. Der erste OPO war ein gepulstes System, doch drei Jahre später wurde auch das erste CW-System aufgebaut [3]. Um die Schwelle der nichtlinearen Oszillation zu überwinden, müssen die eingestrahlenen Leistungen ausreichend hoch sein. Dies ist in gepulsten Systemen dank der hohen Spitzenleistungen der Pulse leichter erreichbar und in CW-Systemen zuweilen eine Herausforderung.

2 Quellen für kontinuierliches sichtbares Licht

Kontinuierliches Laserlicht kann deutlich schmalbandiger sein als gepulstes, was manche Anwendung erst ermöglicht. Gepulste Systeme sind fundamental in ihrer Bandbreite nach unten durch die

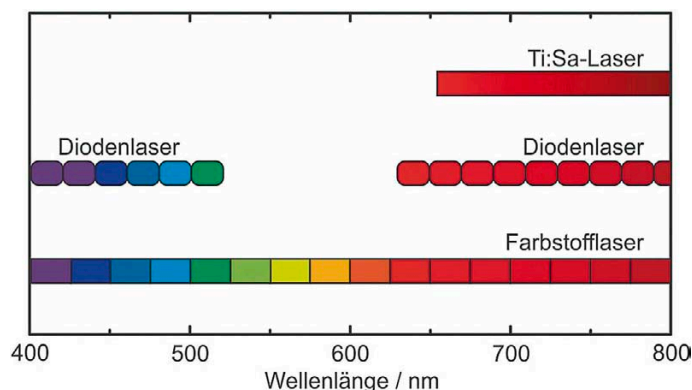


Bild 2: Aktuell erhältliche, durchstimmbare Quellen, die kontinuierliches Licht im sichtbaren Spektralbereich erzeugen. Keine Lichtquelle deckt den gesamten Bereich mit nur einem System ab. Auch bei Farbstofflasern liefert der einzelne Farbstoff typischerweise nur einen Durchstimmbereich von 20–50 nm

reziproke Pulsdauer begrenzt. Beispielsweise haben die Pulse mit 10 ns Pulsdauer mindestens 100 MHz Linienbreite. Für den sichtbaren Spektralbereich existieren nur wenige CW-Quellen, die zusätzlich auch noch durchstimmbar sind (Bild 2).

Ein prominentes Beispiel ist der Titan-Saphir-Laser, dessen Emissionswellenlänge vom nahinfraroten bis ins rote Spektrum durchstimmbar ist. Allerdings bleiben hier die anderen sichtbaren Frequenzen unerreicht. Laserdioden können inzwischen sehr viele Wellenlängen erzeugen – jedoch nicht im gelben Spektralbereich. Und da jede Diode für sich genommen nur über einige Nanometer durchstimmbar ist, müssen viele Dioden zur Abdeckung eines großen Frequenzbereichs verwendet werden. Eine weitere Klasse durchstimmbarer Lichtquellen umfasst die Farbstofflaser. Aber auch sie haben Nachteile: Um das komplette sichtbare Spektrum zu erreichen, müssen Farbstoffe gewechselt werden. Das ist nicht nur kompliziert, sondern oft auch gefährlich, weil einige Farbstoffe giftig und schwer zu handhaben sind; zudem altern diese Chemikalien im Betrieb schnell.

Obwohl optisch-parametrische Oszillatoren ideal dazu geeignet sind, kontinuierliches Licht über weite Spektralbereiche

zu liefern, sind sie für den sichtbaren Bereich bislang nur mit gepulstem Licht kommerziell erhältlich. Dies soll sich nun ändern. Doch wo liegt die Herausforderung bei der Erzeugung von sichtbarem Licht mit OPOs? Da die Pumpfrequenz stets größer als die Frequenzen der erzeugten Wellen sein muss, wird im Grunde ein Pump-laser mit ultraviolettem Licht benötigt. Eine solche Pump-

quelle ist für kontinuierliches Licht nicht mit ausreichender Leistung verfügbar.

Um dennoch das OPO-Prinzip nutzen zu können, gibt es verschiedene Ansätze. Beispielsweise lässt sich weit durchstimmbares OPO-Licht mit Wellenlängen im infraroten Bereich nachträglich in sichtbares Licht umwandeln, und zwar mit einem weiteren nichtlinearen Prozess. So benötigt man keine ultraviolette Pumpquelle. Ein anderer Ansatz wäre, die Schwelle des Prozesses so zu reduzieren, dass Pump-laser mit ultraviolettem Licht aber nur geringen Leistungen eingesetzt werden können. Im Folgenden stellen wir diese beiden Konzepten näher vor.

2.1 Kombination mit Frequenzverdopplung

Bei Frequenzverdopplung (Second Harmonic Generation, SHG) wird eine Pumpwelle in einem nichtlinearen Medium so umgewandelt, dass eine Welle mit der doppelten Frequenz der ursprünglichen erzeugt wird. Während in optisch-parametrischen Oszillatoren nur kleinere Frequenzen als die der Pumpwelle generiert werden können, erreicht man in Kombination mit nachfolgender SHG höhere Frequenzen.

Eine geschickte Kaskadierung dieser beiden Prozesse, OPO und SHG, eignet sich

somit zur Erzeugung von kontinuierlichem, sichtbarem Licht. Der hier verwendete Ansatz ist ein zweistufiger Prozess, bei dem zunächst ein konventioneller Spiegelresonator-OPO mit grünem Laserlicht gepumpt wird. In diesem primären Prozess können durchstimmbare Wellen mit Frequenzen im nahinfraroten Spektralbereich erzeugt werden. Diese Wellen dienen nun als Pumpwellen für den SHG-Prozess. Ihre Frequenzen lassen sich so in den sichtbaren Bereich verschieben. Solch ein Prinzip wurde zum ersten Mal im Jahr 2002 mit zwei aufeinanderfolgenden Resonatoren demonstriert [4]. In unserem System ist der SHG-Kristall direkt in den OPO-Resonator integriert und kann sowohl die erzeugten Signal- als auch Idlerwellen frequenzverdoppeln. Das ermöglicht eine kontinuierliche Durchstimmbarkeit von blau bis rot.

Aktuell deckt das System bereits einen Bereich von 450–650 nm lückenlos ab (Bild 3), der derzeit lediglich durch die Spiegelbeschichtungen begrenzt ist. Die unterschiedlichen Ausgangswellenlängen werden über ein Verschieben des Kristalls und die Nutzung verschiedener Periodenlängen auf dem nichtlinearen Kristall sowie eine Änderung der Kristalltemperatur realisiert. Wird die gewünschte Wellenlänge als Zahl eingegeben, justiert sich das System mit einer Wellenlängengenauigkeit von derzeit 1 nm in weniger als einer Minute selbst. Die bei diesem Ansatz benötigten Pumpleistungen im Watt-Bereich können gleichzeitig hohe Ausgangsleistungen von ca. 100 mW ermöglichen.

Auf die Vorentwicklungen und Erforschungen der nichtlinearen Prozesse folgend, wird derzeit ein Prototyp gebaut, welcher mit einem industriellen Partner umgesetzt wird.

2.2 Flüstergalerieresonatoren

In sogenannten Flüstergalerieresonatoren (Whispering Gallery Resonator, WGR) kann die Schwelle für nichtlineare Prozesse reduziert werden. Hierbei handelt es sich um runde Scheiben mit Durchmesser im Millimeterbereich oder darunter.



Bild 3: Ausschnitt des optisch-parametrischen Oszillators, der über resonatorinterne Frequenzverdopplung kontinuierliches Licht erzeugen kann. Der sichtbare Wellenlängenbereich wird vom blauen bis in den roten Spektralbereich lückenlos abgedeckt

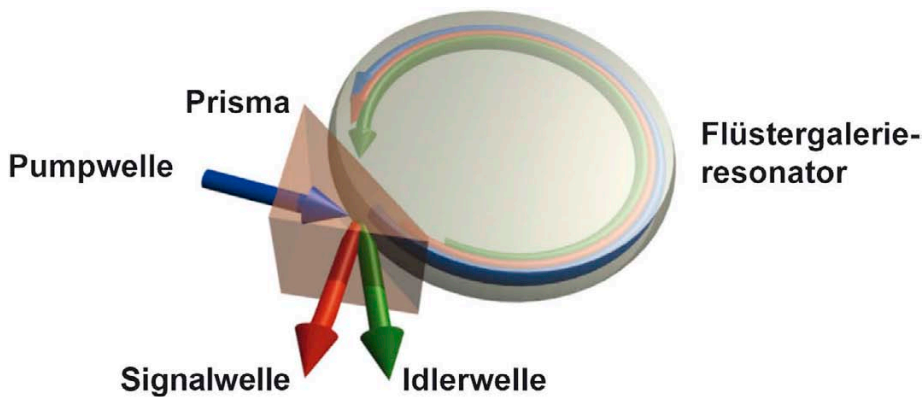


Bild 4: Eine Pumpwelle wird über ein Prisma in einen Flüstergalerieresonator eingekoppelt und erzeugt dort Signal- und Idlerwellen. Alle drei Wellen werden in der Scheibe resonant überhöht

In ihnen wird Licht mittels Totalreflexion an der Innenseite der Scheibenwand entlang geführt. Dabei treten über den gesamten Transparenzbereich nur minimale Reflexionsverluste auf.

Flüstergalerieresonatoren kombinieren ein kleines Modenvolumen mit ultrahoher Güte, d.h. das Licht durchläuft den Resonator bis zu mehreren Millionen Mal entlang des Umfangs [5]. Mit der Anzahl der Umläufe wächst auch die resonatorinterne Intensität, wodurch optisch-nichtlineare Prozesse bereits bei sehr kleinen eingestrahnten Lichtleistungen beobachtet werden können [6]. WGRs sind also ideale Resonatoren für optisch-parametrische Oszillatoren und bieten gegenüber herkömmlichen Spiegelanordnungen mehrere Vorteile: Sie sind klein, intrinsisch mechanisch stabil und müssen nicht justiert werden.

Ein WGR-OPO ist in **Bild 4** schematisch dargestellt. Hier wird die Pumpwelle in den Scheibenresonator über ein Prisma eingekoppelt. Letzteres dient ebenfalls dazu, Signal- und Idlerwellen aus dem Resonator zu extrahieren. Dieses System bietet resonante Verstärkung zeitgleich für Pump-, Signal- und Idlerwelle.

Will man solche WGR-OPOs bauen, sind zwei Dinge notwendig: die Fertigung eines verlustarmen monolithischen Resonators aus einem optisch-nichtlinearen Kristall und die Erfüllung der Phasenanpassungsbedingung. Flüstergalerieresonatoren aus kristallinen Materialien werden typischerweise in drei Schritten hergestellt: Zunächst wird aus dem Kristall ein zylinderförmiger Rohling gebohrt. Anschließend wird dessen Rand auf einer Drehbank geeignet abgerundet und zuletzt die Oberflächenrauigkeit durch Polieren auf wenige Nano-

meter verbessert. Zur Erfüllung der Phasenanpassungsbedingung werden beide aus der Standardkonfiguration bekannten Konzepte verwendet: Doppelbrechung [6] und Quasi-Phasenanpassung [7].

Bild 5 zeigt den Aufbau eines WGR-OPOs, der mit blauem Licht gepumpt wird, aus dem er unter anderem rotes Licht erzeugt [8]. Der Resonator misst lediglich 2 mm im Durchmesser. Hier konnten die Wellenlängen der erzeugten Lichtfelder von 707–865 nm sowie von 1120–1575 nm durch einfache Temperaturveränderung variiert werden.

Wie klein die notwendigen Eingangsleistungen eines solchen OPOs sein können, verdeutlicht **Bild 6**. Schon bei nur wenigen Mikrowatt startet die optisch-parametrische Oszillation und bei 20 μW Pumpleistung wird die maximale Konversionseffizienz von 13% erreicht. Das entspricht einer Quanteneffizienz von 17%. Optisch-parametrische Oszillationen bei so geringen Pumpleistungen sind für quantenoptische Experimente von hohem Interesse. Laser mit niedrigen Ausgangsleistungen sind besonders rauscharm und können deshalb als Pumpquelle für WGR-OPOs ideal eingesetzt werden.

Im nächsten Schritt soll die effiziente Erzeugung von CW-Licht über den gesamten sichtbaren Spektralbereich in diesen Flüstergalerieresonatoren nachgewiesen werden, um kompakte und kontinuierlich durchstimmbare Quellen zu realisieren. Zurzeit ist die maximale Ausgangsleistung von WGR-OPOs noch auf wenige Milliwatt beschränkt, da wegen der starken Intensitätsüberhöhung im Resonator störende Instabilitäten auftreten.

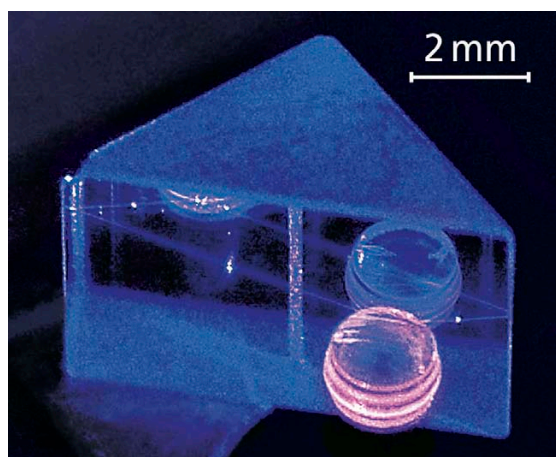


Bild 5: In einem Flüstergalerieresonator wird blaues Pumplicht eingestrahlt, welches über einen nichtlinearen Prozess durchstimmbares Licht im roten Spektralbereich erzeugt. Neben dem Einkoppel-Prisma ist deutlich der rötlich schimmernden Ring der umlaufenden Signalwelle zu erkennen

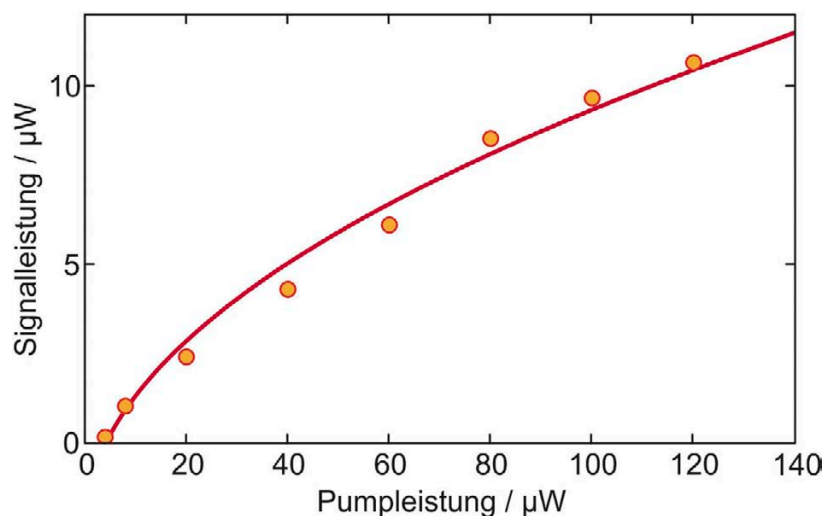


Bild 6: Signalleistung eines Flüstergalerieresonators bei der Wellenlänge 590 nm, aufgetragen über der Pumpleistung, die für den optisch-parametrischen Prozess zur Verfügung steht. Bereits bei einer Pumpleistung von nur 4 μW setzt die Konversion durch den nichtlinearen Prozess ein

3 Zusammenfassung

Um durchstimmbares, sichtbares Laserlicht mit hohen Ausgangsleistungen zu erzeugen, ist für die etablierten Spiegelresonatoren die Kombination aus optisch-parametrischem Oszillator und anschließender Frequenzverdopplung sehr gut geeignet. Flüstergalerieresonatoren hingegen lassen sich ideal als kompakte Variante einsetzen. Bei diesen reichen dank der großen Feldüberhöhung im Resonator bereits geringe Pumpleistungen, um nichtlineare Prozesse zu starten und so auch in den sichtbaren Spektralbereich zu gelangen. Die maximale Ausgangsleistung beschränkt sich derzeit noch auf wenige Milliwatt. Beide Konzepte zeigen bereits heute, dass optisch-parametrische Oszillatoren das sichtbare Spektrum auch mit kontinuierlichem Licht erobern.

Literaturhinweise:

- [1] T.H. Maiman, *Stimulated Optical Radiation in Ruby*, Nature 187, 493-494 (1960)
- [2] J.A. Giordmaine, R.C. Mills, *Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO_3 at optical frequencies*, Phys. Rev. Lett. 14, 973-976 (1965)
- [3] R.C. Smith, J.E. Ceusic, H.J. Levinstein, J.J. Rubin, S. Singh, L.C. van Viter, *Continuous Optical Parametric Oscillation in $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$* , Appl. Phys. Lett. 12, 308-310 (1968)
- [4] U. Ströbner, J.-P. Meyn, R. Wallenstein, P. Urenski, A. Arie, G. Rosenman, J. Mlynek, S. Schiller, A. Peters, *Single-frequency continuous-wave optical parametric oscillator system with an ultrawide tuning range of 550 to 2830 nm*, J. Opt. Soc. Am. B 19, 1419-1424 (2002)
- [5] K.J. Vahala, *Review Article Optical Microcavities*, Nature 424, 839-846 (2003)
- [6] J.U. Fürst, D.V. Strelakov, D. Elser, A. Aiello, U.L. Andersen, Ch. Marquardt, G. Leuchs, *Low-Threshold Optical Parametric Oscillations in a Whispering Gallery Mode Resonator*, Phys. Rev. Lett. 105, 263904 (2010)
- [7] T. Beckmann, H. Linnenbank, H. Steigerwald, B. Sturman, D. Haertle, K. Buse, I. Breunig, *Highly Tunable Low-Threshold Optical Parametric Oscillation in Radially Poled Whispering Gallery Resonators*, Phys. Rev. Lett. 106, 143903 (2011)
- [8] C.S. Werner, T. Beckmann, K. Buse, I. Breunig, *Blue-pumped whispering gallery optical parametric oscillator*, Opt. Lett. 37, 4224-4226 (2012)

Ansprechpartner:

Dr. Rosita Sowade
Referentin der Institutsleitung,
Neue Technologien und Patente
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM
Heidenhofstr. 8
D-79110 Freiburg
Tel. 0761/8857-222
Fax 0761/8857-224
eMail: rosita.sowade@ipm.fraunhofer.de
Internet: www.ipm.fraunhofer.de



Jens Kießling
Gruppe Technologie
Optischer Materialien
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM
Heidenhofstr. 8
D-79110 Freiburg
Tel. 0761/8857-457
Fax 0761/8857-224
eMail: jens.kiessling@ipm.fraunhofer.de
Internet: www.ipm.fraunhofer.de



Dr. Ingo Breunig
Gruppenleiter am Lehrstuhl für Optische Systeme
Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK,
Universität Freiburg
Georges-Köhler-Allee 102
D-79110 Freiburg
Tel. 0761/203-7455
Fax 0761/203-7442
eMail: ingo.breunig@imtek.de
Internet: www.imtek.de/50



www.photonik.de ▶ Webcode 2002