

# Sprengstoffen auf der Spur

Mit laseroptischen Sensoren lassen sich Sprengstoffspuren hochempfindlich nachweisen

Wolfgang Schade, Christian Bohling und Christoph Bauer

Metalldetektor und Minensuchnadel sind trotz allen technischen Fortschritts noch immer die Mittel der Wahl, um Anti-Personenminen aufzuspüren – allerdings ein sehr gefährliches und zeitaufwändiges. Bei der Gepäck- und Personenkontrolle gehen Sprengstoffe in den meisten Fällen nach wie vor durch Stichprobenkontrollen bzw. dank speziell ausgebildeter Suchhunde ins Netz. Neuartige photonische Sensoren in Kombination mit miniaturisierten Lasern eröffnen hier völlig neue Möglichkeiten.

Moderne analytische Methoden erlauben es, Gaskonzentrationen berührungslos, zerstörungsfrei und in Echtzeit zu bestimmen. Beispiele aus Wissenschaft und Industrie sind der Nachweis von aromatischen Kohlenwasserstoffen in wässrigen Medien, von Stickoxiden in der Atemluft oder die Bestimmung der Zusammensetzung von Stahlschmelzen in der metallverarbeitenden Industrie [1]. Die Kombination von Laser- und Fasertechnologien ermöglicht für diese Anwendungen neuartige miniaturisierte Sensoren. Diese sind mechanisch robust, lassen sich einfach bedienen und unter extremen Bedingungen einsetzen. Darüber hinaus erlaubt die Einkopplung in Glasfasern auch Messungen in schwer zugänglichen Umgebungen. Allerdings scheitert die praktische Umsetzung häufig daran, dass keine geeigneten und erschwinglichen Laserquellen zur Verfügung stehen. Daher kommt die Laserdiagnose bei der Minenräumung und bei Sicherheitskontrollen nur sehr zögernd zum Einsatz.

Seit 1975 sind weltweit mehr als eine Million Menschen Landminen zum Opfer gefallen. Nach Schätzungen der UNO sind zurzeit sogar 60 bis 100 Millionen Landminen verlegt. Die Industriestaaten haben es sich zur Aufgabe gemacht, die Minen nach Ende der kriegerischen Auseinandersetzungen zu räumen, um die Landflächen wieder nutzen zu können. Die Kosten dafür belaufen sich, auch bei den niedrigen Löhnen in Entwicklungsländern, auf etwa 1000 Dollar pro Mine. Demgegenüber kostet eine Mine weniger als 10 Dollar.

Sehr aufwändig ist auch das Auffinden von Explosivstoffen bei routinemäßigen Personen- und Gepäckkontrollen. Da sich das Röntgenbild der meisten Sprengstoffe nicht von dem anderer organischer Substanzen unterscheidet, erfordert eine genaue Diagnose eine Probenahme und anschließend eine konventionelle



Eine Minensuchnadel mit integriertem laseroptischen Sensor erlaubt es im Feldversuch, Minengehäuse aus unterschiedlichen Metallen zu erkennen.

chemische Analyse. Eine enorme Herausforderung für jegliche Art von Messtechnik ist schließlich auch die berührungslose Erkundung von möglicherweise gefährlichen Objekten oder potenziellen Selbstmordattentätern über Entfernungen von 10 bis 100 Metern, z. B. bei der Überwachung öffentlicher Plätze und Straßen oder bei der Zugangskontrolle [2].

Für all diese Aufgaben versprechen Laser- und Fasertechnologien neuartige Sensorkonzepte. Bestrahlt man Gegenstände mit intensivem Laserlicht, so entsteht ein Plasma an ihrer Oberfläche und Atome sowie Ionen werden freigesetzt. Die Spektroskopie des Plasmas oder der spektroskopische Nachweis entstehender Photofragmente erlaubt es, Explosivstoffe präzise zu erkennen. Leistungsstarke Chiplaser mit Faserkopplung lassen sich in eine konventionelle

## KOMPAKT

- Spuren von Explosivstoffen lassen sich durch verschiedene spektroskopische Verfahren nachweisen. Die Herausforderung besteht darin, Sprengstoffe zuverlässig von harmlosen Kunststoffen oder anderen Stoffen zu unterscheiden.
- Potenzielle Anwendungen sind die Erkennung von Landminen, die Diagnose von Explosivstoffkontaminationen und die Ferndiagnose von Sprengstoffen.
- Diese Sensoren benötigen leistungsstarke, miniaturisierte und fasergekoppelte Laserstrahlquellen.

Prof. Dr. Wolfgang Schade, Dipl.-Phys. Christian Bohling und Dipl.-Phys. Christoph Bauer, Institut für Physik und Physikalische Technologien, Abt. Angewandte Photonik, Technische Universität Clausthal, Leibnizstraße 4, 38678 Clausthal-Zellerfeld

1) 1 ppt (parts per trillion) entspricht  $10^{-12}$ , 1 ppb (parts per billion)  $10^{-9}$ .

Minensuchnadel integrieren und ermöglichen es so, im Boden verborgene Gegenstände wie Minen vor Ort zu identifizieren bzw. klassifizieren [3, 4]. Mikrochip-laser und Infrarot-Quantenkaskadenlaser bieten neue Möglichkeiten, improvisierte Sprengmittel sowie Oberflächen, die mit Sprengstoffen kontaminiert sind, aus sicherer Entfernung zu erkunden [5]. Schließlich lassen sich TNT-Moleküle in Raumluft bis hin zu ppt-Konzentrationen<sup>1)</sup> spektroskopisch nachweisen, indem man Wellenleiter mit selektiv adsorbierenden Rezeptorfilmen beschichtet.

### Verräterischer Fingerabdruck von Minen

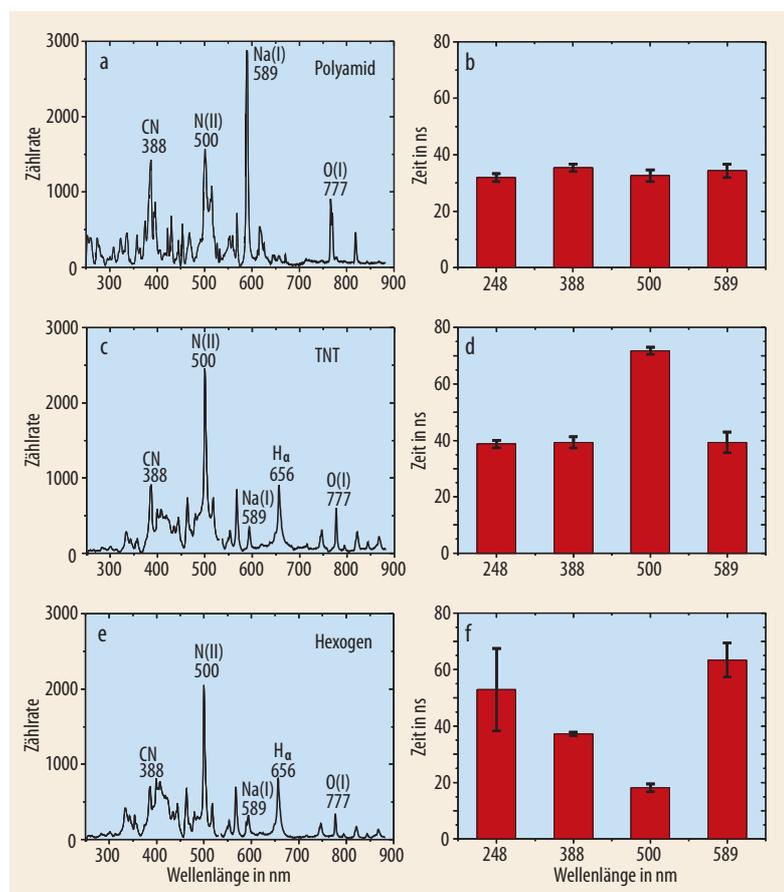
Metalldetektoren weisen Metalle im Erdreich über die elektromagnetische Induktion nach. Moderne Geräte sind zwar in der Lage, ein Gramm Metall in 20 cm Entfernung zu detektieren, die besonders gefährlichen Anti-Personenminen enthalten jedoch häufig deutlich weniger Metall oder haben Kunststoffgehäuse. Daher werden heutzutage Minenfelder immer noch sehr zeitaufwändig mit einer Kombination von Metalldetektor und Minensuchnadel abgesucht. Um ein im Boden verborgenen Gegenstand zu identifizieren, muss ein Spezialist die Fundstelle sehr vorsichtig mit einer Minensuchnadel – einem antimagnetischen Metallstab

– abtasten und das gefundene Objekt freilegen. Diese Art der Minenräumung nimmt zwischen 10 und 30 Minuten pro Fundstelle in Anspruch und ist äußerst gefährlich.

Daneben gibt es noch eine Vielzahl weiterer Methoden wie Nuklear-Quadrupolresonanz, biologische Nachweissysteme, Bodenradar, Infrarot- und Mikrowellensensoren oder akustisch-seismische Verfahren [6]. Die Nachteile sämtlicher bisher bekannter Methoden und auch ihrer Kombination sind die nach wie vor vergleichsweise hohen Fehlalarmraten, die Komplexität der Systeme und die damit verbundenen hohen Kosten insbesondere für humanitäre Anwendungen.

Explosivstoffe, Kunststoffe und Stoffe im Erdreich enthalten im Wesentlichen die Elemente Stickstoff (N), Sauerstoff (O), Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H). Zündet ein intensiver, kurzer infraroter Laserpuls auf einer Oberfläche ein Plasma, so zerlegt dieses die Oberflächenmoleküle in ihre atomaren Komponenten. Dabei entstehen angeregte Atome und Ionen sowohl der Elemente als auch der Molekülfragmente. Nach Abschalten des Laserpulses rekombinieren die Ionen mit Elektronen, wobei Licht emittiert wird. Wird dieses Emissionsspektrum nun spektral aufgelöst („Fingerprint 1. Ordnung“), lässt sich die zuvor angeregte Probe anhand ihrer atomaren Zusammensetzung klassifizieren. Eine eindeutige Zuordnung zu einer speziellen Substanz ist allerdings nur dann möglich, wenn sich die Zusammensetzung der zu analysierenden Stoffe ausreichend unterscheidet. Dies ist bei Explosivstoffen gegenüber Kunst- oder Bodeninhaltsstoffen nur bedingt der Fall.

Wird nun zusätzlich der zeitliche Verlauf einzelner Spektrallinien zur Diagnose mit herangezogen („Fingerprint 2. Ordnung“), so lassen sich bei gleichen Anregungsbedingungen unterschiedliche Abklingzeiten beobachten. Dies liegt an den unterschiedlichen Absorptionsquerschnitten und somit Plasmatemperaturen je nach Material. Abhängig von der Laserleistung an der Probe werden Plasmatemperaturen von bis zu 12 000 K erreicht, dementsprechend variieren die Abklingzeiten der Plasmalichtemission einzelner Spektrallinien von 10 ns bis hin zu einigen  $\mu$ s. Diese Art der Spektroskopie heißt Laser-induzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS) und wird seit vielen Jahren bei der Klassifizierung von Materialien und deren Zusammensetzung eingesetzt [7, 8]. **Abb. 1** zeigt LIBS-Spektren für den Spektralbereich von 250 bis 900 nm und LIBS-Abklingzeiten für ausgewählte Emissionslinien bzw. -banden von drei verschiedenen Substanzen ähnlicher atomarer Zusammensetzung. Durch das ausschließliche Auswerten der Intensitätsspektren (links) lassen sich zwar in gewissem Rahmen die Spektren zu den verschiedenen Proben zuordnen. Allerdings setzt diese Art der Datenauswertung voraus, absolute Intensitäten zu erfassen, was gerade bei Messungen im Boden unter verschiedenen Umweltbedingungen sehr schwierig ist. Demgegenüber erlaubt die Kombination von Spektrum und Abklingzeiten (rechts) eine Probenerkennung mit signifikant verbesserter Treffergenauigkeit. Diese steigt



**Abb. 1** Während sich die LIBS-Spektren (links) von Kunststoff (a) bzw. Sprengstoffen (c, e) teilweise sehr ähneln, unter-

scheiden sich die Abklingzeiten von ausgewählten Emissionslinien und -banden (rechts) deutlich.

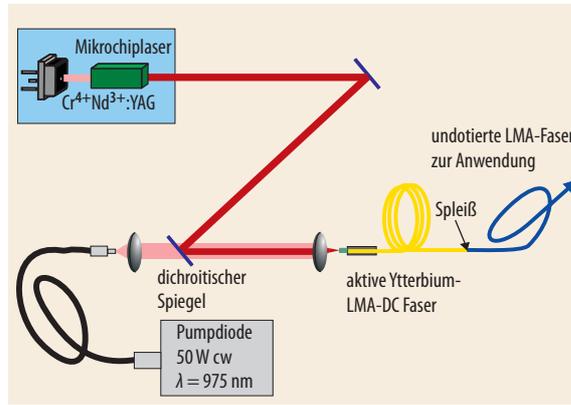
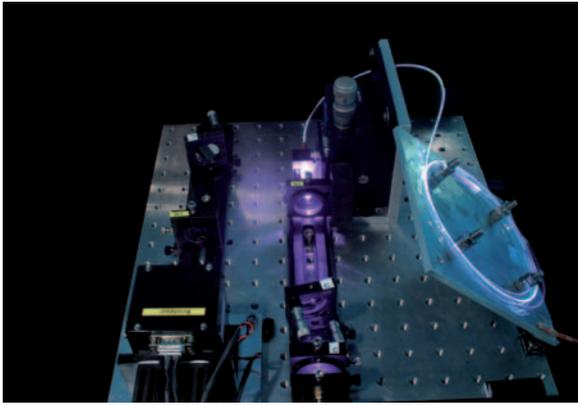


Abb. 2 Das Lasersystem für die Minensuche besteht aus einem Mikrochiplaser, dessen Pulse in einer dotierten Glasfaser verstärkt werden.

weiter, wenn neuronale Netze bei der Datenauswertung mit herangezogen werden [4].

Das Army Research Lab in den USA hat LIBS in der Vergangenheit sehr intensiv untersucht [9]. Allerdings nutzten die Wissenschaftler für die Identifizierung von Landminen, Explosivstoffen und biologisch aktiven Substanzen (z. B. Bakterien) lediglich das LIBS-Intensitätsspektrum, was teilweise zu Problemen bei der Zuordnung spektral ähnlicher Signale zu verschiedenen Materialien führte. In Kooperation mit Ocean Optics Inc. entstand ein portables System, welches unter bestimmten Bedingungen Oberflächenkontaminationen detektieren kann.

Der wesentliche Entwicklungsschritt für die Integration der Lasertechnik in eine konventionelle Minensuchnadel liegt in der Bereitstellung einer leistungsstarken, kompakten und möglichst fasergekoppelten Laserstrahlquelle (siehe Infokasten). Erst die Faseroptik erlaubt es, die Laserpulse zu den im Boden verborgenen Objekten zu leiten. Dies gelang kürzlich an der TU Clausthal durch die Kombination eines  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ -Kurzpuls-Mikrochiplasers [10] mit einem diodengepumpten Ytterbium-Faserverstärker [11] (Abb. 2).

Im Feldversuch ist es mit der Laser-Minensuchnadel gelungen, verschiedene metallumhüllte Minengehäuse zu unterscheiden, die im Erdreich verborgen waren

(Abb. auf S. 25). In mehr als 80 % der Fälle gelang es, die Materialien Stahl, Messing, Kupfer, Aluminium und sowie ein Metallminengehäuse mit Farbanstrich korrekt zu erkennen (Tabelle).<sup>2)</sup> Diese Versuche, deren Ziel lediglich eine sichere Klassifizierung in „Mine“ bzw. „Nicht-Mine“ war, umfassten für jede Probe ca. 20 Wiederholungsmessungen.

Die Kombination von LIBS und miniaturisierter Laser- und Fasertechnologie mit einer konventionellen Minensuchnadel gestattet es demnach, im Boden verborgene Gegenstände unter Echtzeitbedingungen mit hoher Treffergenauigkeit zu identifizieren. Damit scheint es möglich, die Sicherheit und die Geschwindigkeit des Minenräumprozesses signifikant zu verbessern und diesen auch durch Adaption der Laser-Minensuchnadel an einen Roboter zu automatisieren.

### Erkennung aus der Ferne

Die berührungslose Ferndiagnostik von Explosivstoffen sowie von kontaminierten Oberflächen ist ein weiteres interessantes Anwendungsfeld für Lasertechnologie und photonische Sensoren [12]. Eine Arbeitsgruppe am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT) in Aachen hat hierzu ein Ansatz entwickelt, der zwei synchronisierte Laser-Anregungspulse zur LIBS-

### FASERGEKOPPELTE STRAHLSQUELLEN

Oft ist es nötig, Explosivstoffe an schwer zugänglichen Orten (etwa im Inneren eines Koffers) nachzuweisen. Hierfür bietet sich ein Sensorsystem an, das über eine Faserkopplung die Laserstrahlquelle mit dem eigentlichen Sensor verbindet. Aufgrund der Zerstörschwelle heute verfügbarer Fasermaterialien lassen sich hochenergetische, kurze Laserpulse jedoch nur in Fasern mit großem Kerndurchmesser (Multimodefasern) einkoppeln. Da die Strahlqualität am Ausgang einer Faser durch das Produkt von Durchmesser und Numerischer Apertur bestimmt ist, lassen sich mit konventionellen Laserkonzepten und anschließender externer Fasereinkopplung nicht zugleich gute Strahlqualität und hohe Leistung erreichen.

Das Konzept des „Master Oscillator Fiber Amplifier“ (MOFA) umgeht dieses Problem: Ein Mikrochiplaser, der aus einem mit  $\text{Cr}^{4+}$ - und  $\text{Nd}^{3+}$ -Ionen dotierten YAG-Kristall besteht und mit einem Diodenlaser gepumpt wird, dient dabei als „Saatlichtquelle“. Die  $\text{Cr}^{4+}$ -Ionen wirken als passiver Güteschalter und die dielektrisch beschichteten Kristallendflächen als Resonatorspiegel. Der Mikrochiplaser emittiert Laserpulse mit einer Pulsfrequenz  $f_{\text{rep}}$  von bis zu 20 kHz bei einer Wellenlänge  $\lambda$  von 1064 nm. Die Pulsenergie  $E_p$  beträgt typischerweise 25  $\mu\text{J}$  und die Pulsdauer  $\tau_p = 1$  ns. In einer Ytterbium-Faser werden die Mikrochiplaserpulse um ungefähr einen Faktor 40 auf bis zu 1 mJ verstärkt. Da dies innerhalb der Fa-

ser geschieht, entfällt die problematische Einkopplung hochenergetischer Laserpulse, indem an das Ende der Verstärkungsfasern eine passive Faser mit den gleichen optischen Parametern (Durchmesser und Numerische Apertur) mittels eines Lichtbogenverfahrens gespleißt wird. Die passive Faser leitet dann die verstärkten Laserpulse zu dem eigentlichen Sensor.

Mit diesem Konzept gelingt es, eine kompakte, robuste und vollständig fasergekoppelte Laserstrahlquelle bereitzustellen, die eine Pulsenergie  $E_p = 1$  mJ bei Wiederholraten im kHz-Bereich erzeugt und eine für LIBS-Anwendungen hinreichende Strahlqualität besitzt.

<sup>2)</sup> Tatsächlich ist die Erkennungsrate sogar besser als 95 %, da die nicht erkannten Objekte entweder freigelegt oder neu gemessen werden. Kritisch sind nur die als falsch erkannten Fälle.

**Tabelle** Im Feldversuch hat die neue Laser-Minensuchnadel die meisten Metallproben im Boden korrekt erkannt. Problematisch sind die wenigen Fälle, in denen ein falsches Material angezeigt wurde.

Laser-Minensuchnadel im Feldversuch			
Material	Anzahl der Ergebnisse		
	korrekt erkannt	nicht erkannt	falsch erkannt
Messing	21	0	1
Stahl	19	8	1
Kupfer	22	0	0
Aluminium	25	0	0
mit Farb-anstrich	22	2	0

Signalerzeugung verwendet. Damit gelingt es, störende Einflüsse der umgebenden Luftatmosphäre auf das LIBS-Signal nahezu zu eliminieren sowie die Intensität der Signale deutlich zu erhöhen. Als Strahlquelle dient ein Doppelpuls-Nd:YAG-Laser mit einer Wiederholrate von 10 bis 20 Hz. Mit einem Spektrometer wurde der Spektralbereich von 180 bis 520 nm mit einer Auflösung von ca. 25 pm beobachtet. Das auf dieser Grundlage entwickelte transportable System „TeleLis“ ermöglicht es, LIBS-Messungen auf Distanz durchzuführen. In ersten Experimenten ist es damit gelungen, Magnesiumkontaminationen im Prozentbereich in einer Aluminiumprobe in einer Entfernung von bis zu fünf Metern nachzuweisen [13].

Untersuchungen an der TU Clausthal deuten darauf hin, dass die zu untersuchenden Oberflächen Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) freisetzen, wenn sie mit intensiven Infrarot-Laserpulsen bestrahlt werden. Interessanterweise hängt das Verhältnis von emittiertem Stickstoffmonoxid (NO) zu -dioxid ( $\text{NO}_2$ ) dabei deutlich davon ab, ob die untersuchten Materialien einen hohen „Energieinhalt“ haben (also z. B. Sprengstoffe) oder nicht (z. B. Kunststoffe) (Abb. 3). Dazu werden Infrarot-Laserpulse eines MOFA-Systems (siehe Infokasten) auf die zu analysierende Oberfläche gelenkt (Entfernung Target-Laser < 10 m) (Abb. 4, [5]). Die freigesetzten  $\text{NO}_x$ -Moleküle weist ein zweiter, synchronisierter Laserpuls eines Quantenkaskadenlasers (QCL) im mittleren Infrarot (MIR) selektiv nach. Das Target wirkt dabei als Reflektor, sodass sich mit einem Teleskop das rückgestreute bzw. rückreflektierte MIR-Laserlicht detektieren lässt.

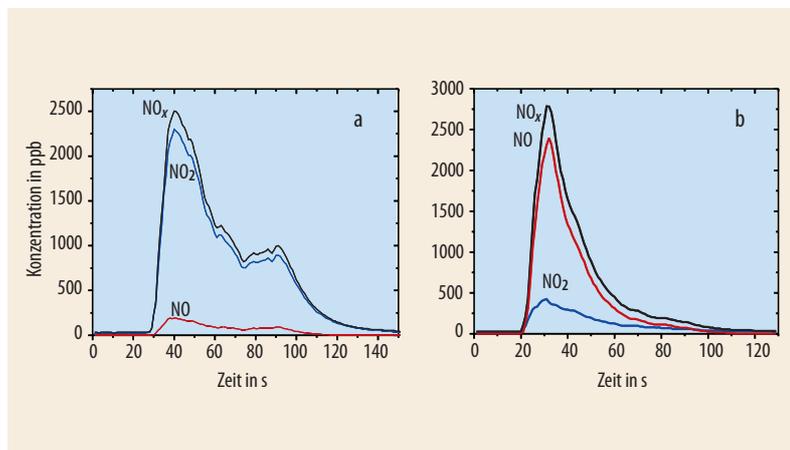
Zukünftig soll anstelle der bisher verwendeten Nd:YAG-Laserwellenlänge 1064 nm für die PLF die Anregungswellenlänge 1535 nm verwendet werden. Wesentlicher Vorteil ist, dass die Laserstrahlung dann mit der zu untersuchenden Oberfläche optimal wechselwirkt. Mit Mikrochiplasern und nachgeschalteten Faserverstärkern in Verbindung mit einem QCL lassen sich zukünftig sehr kompakte Systemlösungen für Entfernungen unter 25 Meter entwickeln.

### Der Spurennachweis von Explosivstoffen

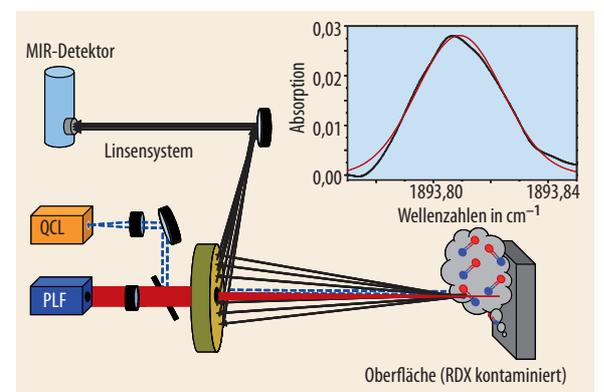
Um einen versteckten Sprengsatz, z. B. bei Zugangskontrollen auf Flughäfen, direkt und sicher zu identifizieren, gilt es, geringste Spurenkonzentrationen in der Umgebungsluft hochempfindlich und selektiv zu detektieren. Der direkte laserspektroskopische Nachweis von Explosivstoffen in der Gasphase ist in den meisten Fällen deswegen problematisch, weil der Dampfdruck von nitroaromatischen Explosivstoffen (z.B. TNT, RDX oder PETN) meist zwischen  $10^{-6}$  und  $10^{-9}$  mbar liegt. Dies entspricht unter Normalbedingungen Konzentrationen im ppb- bzw. ppt-Bereich. Die Moleküle müssen daher zunächst auf der Sensoroberfläche geeignet angereichert werden, um sie anschließend hochempfindlich laserspektroskopisch nachweisen zu können.

Eine Ausnahme bilden die aus Peroxiden bestehenden Sprengstoffe wie TATP, die aufgrund ihrer hohen Sprengwirkung und der relativ einfachen Herstellung bevorzugt von Terroristen eingesetzt werden. Der Dampfdruck von TATP beträgt unter Normalbedingungen  $10^{-2}$  mbar, sodass in der Nähe einer „TATP-Quelle“ Konzentrationen von einigen hundert ppm erreicht werden, die sich dann mittels MIR-Absorptionsspektroskopie direkt nachweisen lassen.

Im Gegensatz dazu eignet sich die Laser-Ionen-Mobilitätsspektrometrie (LIMS), um Spuren nitroaromatischer Explosivstoffe zu identifizieren. Das Corporate Research Centre der EADS in München setzte diese Technologie bereits erfolgreich ein. Das LIMS-Verfahren beruht darauf, zunächst die Gase, die che-



**Abb. 3** Das nach Bestrahlung mit einem IR-Laserpuls gemessene Verhältnis  $\text{NO}/\text{NO}_2$  hängt stark davon ab, ob die Oberfläche mit einem Kunststoff (a, Polyamid) oder einem Sprengstoff (b) kontaminiert ist.



**Abb. 4** Die von einem IR-Puls freigesetzten  $\text{NO}_x$ -Moleküle einer kontaminierten Oberfläche (hier: RDX) lassen sich mit einem zweiten Laser nachweisen, indem man die Absorption misst. Das Signal (Inset, schwarz: gemessen, rot: Anpassung eines Voigt-Profiles) entspricht einer NO-Konzentration von 75 ppm.

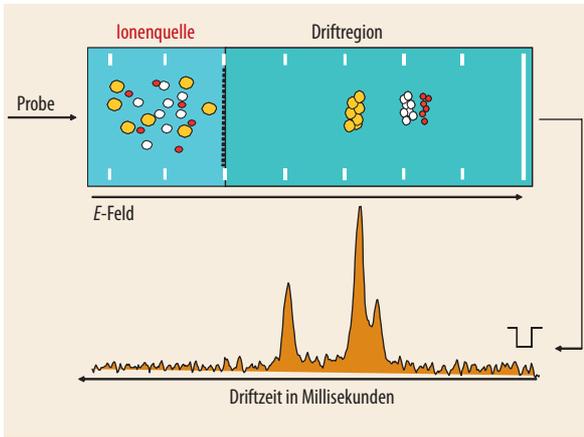


Abb. 5 Die Driftkammer des IMS-Systems besteht im Wesentlichen aus elektrischen Spulen, getrennt von Isolatoren. Die benötigte Driftzeit (unten) erlaubt Rückschlüsse auf die Molekülarart und dessen Struktur [14].

mische Substanzen wie Sprengstoffe oder auch Drogen stets abgeben, in eine Messkammer abzusaugen. Dort werden sie durch die Wechselwirkung mit intensiven Laserpulsen ionisiert. Das Gerät ordnet die Teilchen in einem elektrischen Feld nach ihrer Beweglichkeit und identifiziert so die Substanz. Die Ionisation ermöglicht bereits eine gewisse Vorauswahl irrelevanter Substanzen (z. B. Parfum bei Personenkontrollen). Durch den Einsatz miniaturisierter Bauteile lässt sich diese Technologie in mobile Geräte implementieren und kann somit als integraler Bestandteil von Mess- und Überwachungseinheiten dienen (Abb. 5). Allerdings eignet sich diese Technologie nur eingeschränkt für die Diagnose von peroxidhaltigen Explosivstoffen (z. B. TATP).

Ein alternatives Konzept wurde an der TU Clausthal in Zusammenarbeit mit dem Kekulé-Institut der Universität in Bonn entwickelt. Dabei gestatten es fasergekoppelte photonische Sensoren, in Echtzeit beispielsweise TATP mit Konzentrationen im ppm- bzw. TNT im sub-ppb-Bereich selektiv nachzuweisen. Das leichtflüchtige TATP wird in einem „open-path“-Sensor mit einer typischen Absorptionsstrecke von 10 cm nachgewiesen, indem bei  $\lambda = 8,05 \mu\text{m}$  die Absorption gemessen wird (Abb. 6). Eine fasergekoppelte Diodenlaser-Differenzfrequenzzeugung oder alternativ ein QCL dient als MIR-Laserstrahlquelle. Typische Nachweisgrenzen liegen unter 100 ppm.

Für den hochempfindlichen laseroptischen Nachweis des schwerverdampfbaren TNT eignen sich speziell entwickelte Rezeptorfilme auf der Basis von Triphenylenketal-Derivaten, mit denen sich die TNT-Moleküle zunächst selektiv auf Oberflächen anreichern lassen. Die spezifische Wechselwirkung zwischen Analyt und Rezeptorfilm führt zu einer charakteristischen Farbänderung, die bei hohen TNT-Konzentrationen direkt sichtbar ist. Da die Farbänderung beim Spurennachweis jedoch nur sehr schwach ausfällt, wurde die entmantelte Glasfaser im Sensorbereich mit dem Farbstoff beschichtet. Der Analyt, hier das TNT, reichert sich in der Farbbeschichtung an und führt zu der beschriebenen Farbänderung. Diese ändert jedoch nicht nur den Absorptionskoeffizienten, sondern auch den

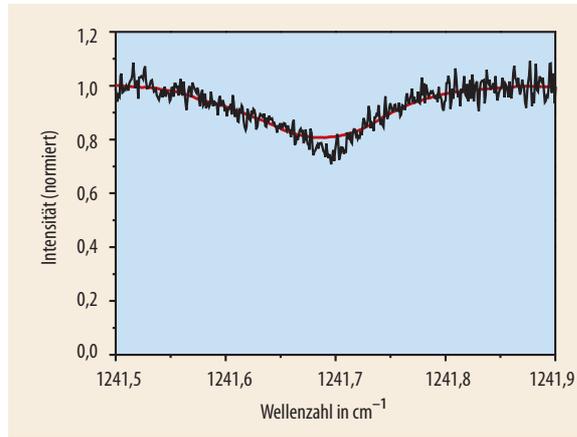


Abb. 6 Mit einem fasergekoppelten „open-path“-Sensor (rechts) lässt sich TATP im mittleren Infrarot nachweisen. Das beobachtete Absorptionssignal (oben) entspricht einer Konzentration von 100 ppm TATP in Raumluft.

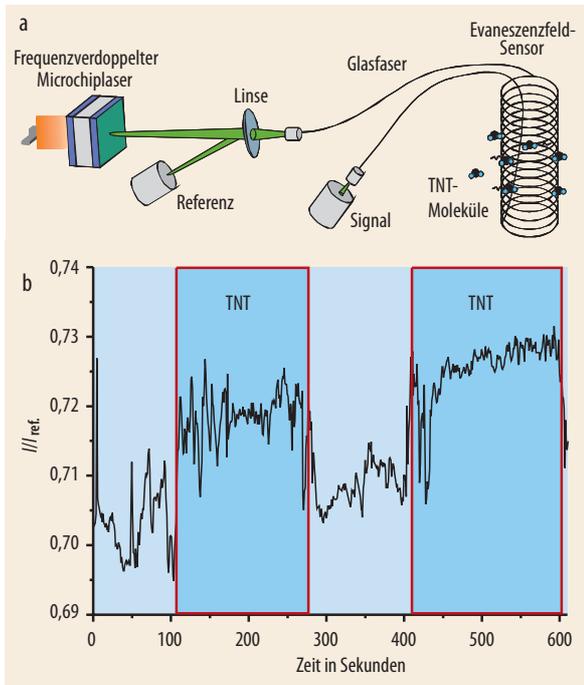


Brechungsindex der Faser. Dadurch kommt zu einer stärkeren Wellenführung innerhalb des Faserkerns und damit zu einer erhöhten Ausgangsintensität (Abb. 7). Die genauen chemischen und opto-chemischen Mechanismen werden derzeit in einem gemeinsamen Forschungsprojekt mit der Arbeitsgruppe in Bonn näher untersucht [15, 16]. Vorteil der beschriebenen Methode ist der extrem schnelle Signalaufbau und dass sich der beschichtete Sensor unmittelbar regeneriert, wenn er beispielsweise mit nichtkontaminierter Raumluft umspült wird. Diese ersten Ergebnisse zeigen das Potenzial von Lasertechniken und photonischen Sensoren für die Echtzeit-Analyse von Explosivstoffen.

Ein weiterer Vorteil der beschriebenen photonischen Sensorkonzepte liegt in der Möglichkeit, die fasergekoppelten Sensoren direkt in Routinekontroll-einheiten zu integrieren, z. B. eine Personenschleuse, die bei Zugangskontrollen sensibler Bereiche verwendet wird. Besteht die Möglichkeit, die zu untersuchende Raumluft abzupumpen, dann lässt sich neben der LIMS-Technik auch die „cavity-ring-down“-Spektroskopie (CRDS) als hochempfindliche Diagnosemethode einsetzen. In der Literatur findet man für den Nachweis von nitroaromatischer Explosivstoffen Nachweisgrenzen im sub-ppb-Bereich [17]. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Entwicklung faserbasierter CRDS-Sensoren, so dass in Zukunft weitere hochempfindliche Sensorelemente z. B. für die TATP-Analyse verfügbar sein sollten. Voraussetzungen für diese Entwicklungen sind MIR-Fasermaterialien mit geringer Dämpfung und hochreflektierende MIR-Beschichtungen, die nach Stand der Technik derzeit noch nicht uneingeschränkt verfügbar sind.

## Zusammenfassung

Der Einsatz von Lasertechnik und photonischen Sensoren in der Sicherheitstechnik bietet eine Reihe neuer Möglichkeiten der Echtzeitanalyse von Explosivstoffen. Gerade bei der Gepäck- und Personenkontrolle beispielsweise auf Flughäfen eröffnen miniaturisierte



**Abb. 8** Zentraler Teil eines Lasersensors zum Spurennachweis von TNT ist eine mit einem Rezeptorfilm beschichtete Glasfaser (a). Wenn sich TNT-Moleküle auf der Faser anreichern, steigt das Signal an; beim Spülen mit nicht-kontaminierter Raumluft fällt es wieder (b).

und fasergekoppelte photonische Sensoren völlig neue Ansätze einer berührungslosen Identifikation und Klassifizierung von Explosivstoffen. So lassen sich diese Sensoren problemlos in Personenschleusen integrieren und ermöglichen damit eine Echtzeit-Analyse von Explosivstoffen bei Zugangskontrollen. Aber auch im Bereich der humanitären Minensuche lassen sich durch Integration von Lasertechnik in eine konventionelle Minensuchnadel sowohl die Sicherheit des Bedienungspersonals als auch die Aufspürtrate beim Suchprozess optimieren. Die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche anwendungsorientierte Umsetzung der Lasertechnik und -diagnose in den genannten Bereichen liegt aber nach wie vor in der Bereitstellung kostengünstiger, leistungsstarker und möglichst fasergekoppelter Laserstrahlquellen. Gegenüber konventionellen Festkörperlasern bieten Systeme, die Mikrochip-Laser und Faserverstärker verwenden, hier vielfältige Vorteile hinsichtlich Wiederholrate, Miniaturisierung und Systemstabilität bei vergleichbarer Pulsenergie.

Von den beschriebenen Sensorsystemen ist die Laser-Minensuchnadel für den Feldeinsatz am weitesten fortgeschritten. Das Gesamtkonzept wird derzeit von der Berliner Firma Secopta GmbH hinsichtlich praktischer Einsatzfähigkeit überarbeitet, sodass Ende 2007 voraussichtlich erste Prototypen zur Erprobung bei der Minensuche zur Verfügung stehen werden. Weiter ist es geplant, diese Technologie zukünftig auf robotergestützten Systemen bei der vollautomatisierten Minenerkennung mit einzusetzen.

Auch die LIMS-Technologie benötigt noch einige Schritte der Miniaturisierung und Härtung von Systemkomponenten, bis ein praxistaugliches System potentiellen Anwendern zur Verfügung stehen wird. Für die beschriebenen Sensorsysteme zum Spurennachweis von Explosivstoffen und für die „stand-off“-Systeme wurde von den Entwicklern die prinzipielle Machbarkeit der Konzepte in Laborversuchen demonstriert, al-

lerdings befinden sich die vorgestellten Arbeiten noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase, sodass mit einer praxisbezogenen Umsetzung dieser methodischen Ansätze sicherlich erst in einigen Jahren zu rechnen ist. Insbesondere Nachweisgenauigkeiten und Querempfindlichkeiten müssen hier noch detailliert weiter untersucht werden.

Die an der TU Clausthal durchgeführten Arbeiten werden vom Bundesministerium der Verteidigung und dem BMWi-Förderprogramm INNONET gefördert.

**Literatur**

- [1] P. Hering, J. P. Lay und S. Sty (Hrsg.), *Laser in Environmental and Life Sciences*, Springer Verlag, Berlin (2004)
- [2] D. S. Moore, *Rev. of Scient. Instr.* **75**, 2499 (2004)
- [3] R. S. Harmon et al., *Anal. Bioanal. Chem.* **385**, 1140 (2006)
- [4] C. Bohling et al., *Appl. Opt.* **45**, 3817 (2006)
- [5] C. Bauer et al., *Appl. Phys.* **B 85**, 251 (2006)
- [6] J. Altmann, *Physik in unserer Zeit* **32**(1), 26 (2001)
- [7] A. W. Miziolek, V. Palleschi und I. Schlechter, *Laser Induced Breakdown Spectroscopy-Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, West Nyack (2006)
- [8] D. A. Cremers und L. J. Radziemski, *Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*, Wiley, Chichester (2006)
- [9] F. C. De Lucia Jr. et al., *Appl. Opt.* **42**, 6148 (2003)
- [10] J. J. Zayhowski und C. Dill III, *Opt. Lett.* **19**, 1427 (1994)
- [11] J. Limpert et al., *Appl. Phys.* **B 75**, 477 (2002)
- [12] C. Lopey-Moreno et al., *JAAS* **21**, 55, (2006)
- [13] R. Noll und C. Frigge-Begemann in: H. Schubert und R. Rimski-Korsakov (Hrsg.), *Detection of Explosives and Landmines Methods and Field Experiences*, Springer, Berlin (2006), S. 93
- [14] J. Goebel, J. Spannhake und M. Kessler, *EADS Corporate Research Centre* (2006)
- [15] C. Siering, B. Beermann und S. R. Waldvogel, *Supermolecular Chemistry* **18**, 23 (2006)
- [16] U. Willer et al., *Opt. Laser Eng.* **44**, 699 (2006)
- [17] M. W. Todd et al., *Appl. Phys.* **B 75**, 367 (2002)

**DIE AUTOREN**

**Wolfgang Schade** hat an der Universität Kiel Physik studiert und 1987 promoviert. Nach einer Assistentenzeit folgten ein PostDoc-Aufenthalt am JILA, Boulder (USA), sowie eine Gastprofessur an der University of Colorado in Boulder (USA). 1998 folgte er einem Ruf auf eine C4-Professur für Physikalische Technologien an die TU Clausthal, wo er seitdem die Abteilung Angewandte Photonik leitet und seit 2004 das LaserAnwendungsCentrum (LAC) maßgeblich mit aufbaut und leitet.

**Christian Bohling** studierte Physik und Physikalische Technologien an der TU Clausthal. Seit seinem Diplom 2003 ist er Doktorand bei Wolfgang Schade. Für besonders praxisorientierte Forschungsarbeiten erhielt er, gemeinsam mit Ulrike Willer und Wolfgang Schade, den MAZ level one award 2004.

**Christoph Bauer** studierte zunächst Nachrichtentechnik an der FH Gelsenkirchen und arbeitete anschließend als Entwicklungsingenieur am Fraunhofer IPA, Stuttgart. Nach dem Ergänzungsstudiengang zum Diplom-Physiker fertigt er seine Dissertation am Clausthaler LAC über Sensoren in der Sicherheitstechnik an.

