

Spurensuche im Rauschen

Speckle-Reduktion für die abbildende Laser-Ferndetektion von Oberflächenkontaminationen

Jan Mathis Kaster

Viele Sprengstoffe zeigen im mittleren Infrarotbereich ausgeprägte Absorptionsstrukturen und lassen sich daher mit laserspektroskopischen Techniken abbildend detektieren. Durch die Rauigkeit der meisten Oberflächen tritt jedoch bei der Reflexion kohärenter Strahlung das Speckle-Phänomen auf. Dieses gilt es zu reduzieren, um eine ausreichende Nachweisgenauigkeit zu erzielen zu können.

Optische Verfahren eignen sich hervorragend, um Gefahrstoffe chemisch spezifisch zu detektieren. Sie sind berührunglos und liefern Informationen, ohne die zu untersuchenden Gegenstände erkennbar zu beeinflussen. Dies ist von entscheidendem Vorteil, wenn es sich um improvisierte Sprengsätze handelt, bei denen man natürlich keine Detonation riskieren möchte. Im BMBF-Verbundforschungsprojekt IRLDEX (Infrarotlaser-gestützte abbildende Detektion von Explosivstoffen), in dessen Kontext die Diplomarbeit [1] entstand, ist das Schwerpunktziel, Explosivstoffe in geringen Konzentrationen auf Oberflächen abbildend in Quasi-Echtzeit durch chemisch spezifische Absorption von Infrarotlaserstrahlung nachzuweisen [2].

Um die abbildende Detektion zu demonstrieren, diente ein abstimmbarer Quantenkaskadenlaser, der eine Probe aus dünnen TNT-Belegungen (Trinitrotoluol, $C_6H_2(CH_3)(NO_2)_3$) auf Aluminiumblech-Substraten bei verschiedenen Wellenzahlen im Bereich von 1340 cm^{-1} bis 1380 cm^{-1} bestrahlte, während eine Hochgeschwindigkeitsinfrarotkamera Bilder der betreffenden Fläche aufzeichnete [3]. Bei 1347 cm^{-1} liegt eine Absorptionsbande von TNT, hervorgerufen durch symmetrische Streckschwingungen der NO_2 -Anteile und Biegeschwingungen der CH_3 -Gruppe. Den Algorithmus, der Störsubstanzen an der Oberfläche von Alltagsproben detektiert, mit multivariater Analyse der Bilddaten zu erweitern, ist Gegenstand des IRLDEX-Projekts.

Der IR-Halbleiterlaser wird durch Kopplung an einen externen Resonator abstimmbaar, der aus einem rotierbaren Reflexionsbeugungsgitter und einer Anti-Reflexionsbeschichtung der resonatorseitigen Laserfacette besteht [4]. Die verwendete Wellenlänge ist so gewählt, dass zum einen darin eine chemisch spezifische Absorptionsbande des nachzuweisenden Stoffes liegt und zum anderen die atmosphärische Transmission zur Ferndetektion ausreichend ist. Im einfachsten Algorith-



mus sind drei Bildaufzeichnungen nötig: Eine, während die Probe vom Laser mit einer relativ zur Absorptionsbande schmalen Linienbreite bei einer Wellenzahl bestrahlt wird, die bei maximaler Absorption gelegen ist, und eine, bei der nur ein kleiner Teil des Laserlichts durch Absorption verloren geht (Abb. 1). Zudem wird ein Bild ohne Laserbestrahlung, „die thermische Szene“, aufgezeichnet. Von den ersten beiden Bildern wird das Dritte subtrahiert, um unerwünschte Anteile zu entfernen. Anschließend wird das korrigierte Absorptionbild durch das korrigierte Referenzbild (geringe Absorption) dividiert. Im Ausgabebild ist nun die TNT-Absorption durch eine Helligkeitsänderung örtlich aufgelöst erkennbar. Für eine spätere Anwendung wird das Absorptionbild mit dem Bild einer VIS-Kamera¹⁾ überlagert, sodass auf einem Monitor die Position der Absorption im Raum intuitiv zu erkennen ist.

Infrarotlaser ermöglichen es, Gefahrenstoffe aus sicherer Entfernung zu identifizieren.

1) „Normale“ Videokamera, die den von Menschen sichtbaren Spektralbereich aufzeichnet.

KOMPAKT

- Quantenkaskadenlaser ermöglichen neue Ansätze der Sensorik im mittleren Infrarot.
- Praktisch alle Explosivstoffe, chemische Kampfstoffe und giftige Industrieabgase weisen in diesem Spektralbereich ausgeprägte chemisch-spezifische Absorptionsstrukturen auf und lassen sich daher mit laserspektroskopischen Techniken detektieren.
- Reflexionen kohärenter Strahlung von rauen Oberflächen führen zu einem wellenlängenabhängigen Rauschen, dem Speckle-Effekt.
- Das Verringern der zeitlichen und räumlichen Kohärenz der Laserstrahlung unterbindet das Speckle-Rauschen weitgehend.

Dipl.-Phys. Jan Mathis Kaster, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Labor für Attosekundenphysik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Georg-Simon-Ohm-Preises 2010 auf der Frühjahrstagung der DPG in Hannover.

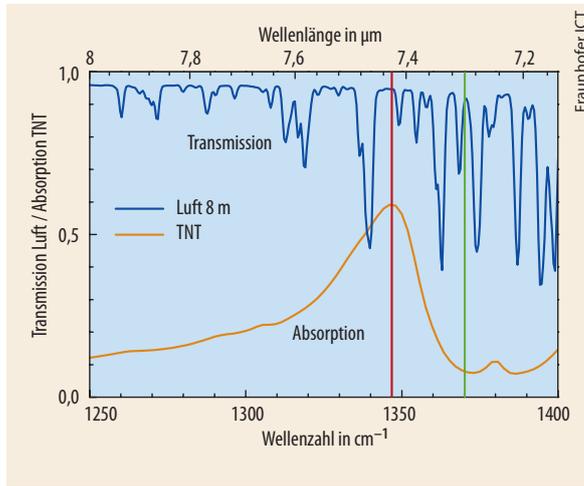


Abb. 1 Um die Absorption von TNT im mittleren Infrarot (orange) zu detektieren, bietet sich ein Vergleich zweier Aufnahmen bei 1347 cm^{-1} (rote Normale) und 1370 cm^{-1} (grün) an. Bei beiden Wellenzahlen ist die atmosphärische Transmission verhältnismäßig hoch und erlaubt einen größeren Abstand zur Probe.

Da kohärente Strahlung, die an optisch rauen Oberflächen reflektiert und mit einem abbildenden System beobachtet wird, aufgrund der stochastischen Verteilung der Oberflächenrautiefe eine lateral stochastische Phasenverteilung der Wellenfront aufweist, bildet sich eine entsprechende Interferenz auf dem bildgebenden Detektor aus – es entsteht ein „Rauschen“ in der aufgezeichneten Strahlungsleistungsverteilung, das „Speckle-Muster“ (speckle: engl. für Tupfen) [5]. Als optisch rau gilt eine Oberfläche, wenn die Rautiefe größer als die halbe Wellenlänge und kleiner als die Kohärenzlänge der Strahlung ist. Daher tritt das Phänomen normalerweise nicht mit inkohärenten Quellen, wie beispielsweise einer Glühbirne, auf.

Im Wesentlichen limitiert der Speckle-Effekt die Empfindlichkeit der oben skizzierten lasergestützten Messtechnik. Dieser Effekt wird aufgrund der Wellenzahlabhängigkeit im Gegensatz zu den unkorrelierten Rauschteilen durch die notwendige Division der Bilder erheblich verstärkt (Abb. 2). Ziel der Diplomarbeit war es, eine Speckle-Reduktionsmethode zu ermitteln, die im experimentell vorgegebenen Kontext realisier-

bar war, das Umsetzen sowie Charakterisieren der gewählten Methode.

Aktuelle Forschungsschwerpunkte der Speckle-Reduktion liegen darin, Laserprojektionssysteme zu entwickeln und Synthetic Aperture Radar (SAR) oder optische Kohärenztomografie (OCT) anzuwenden.

Um die durch Speckles verursachten Rauschteile zu unterdrücken gibt es verschiedene Möglichkeiten. Verringern von zeitlicher und räumlicher Kohärenz der Strahlung vermindert deren Interferenzfähigkeit. Durch Variieren des Speckle-Musters während einer Bildaufzeichnung führen Mittelungen unkorrelierter Rauschteile zu einer weiteren Speckle-Kontrastreduktion; die für die Kamera erkennbare zeitliche Kohärenz wird reduziert. Letztere Möglichkeit lässt sich leicht verstehen, denn Speckle-Intensitätsverteilungen lassen sich statistisch durch Gammaverteilungen beschreiben und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis ändert sich daher proportional zur Quadratwurzel der Anzahl gemittelter für die Kamera unkorrelierter Rauschmuster.

Meist wird die Ausprägung der Interferenzen durch den „Speckle-Kontrast“ beschrieben, dem reziproken Signal-zu-Rausch-Verhältnis und damit dem Variationskoeffizienten der deskriptiven Statistik. Ein Kontrast von 1,0 beschreibt Speckles mit vollständig entwickelten Interferenzen, ein Wert < 1 beschreibt Speckles mit nur teilweise entwickelten Interferenzen.

Serge Lowenthal und Denis Joyeux schlugen bereits 1971 einen Ansatz zur Speckle-Kontrastreduktion für den visuellen Spektralbereich vor [6], der sich wie folgt für das Infrarot adaptieren lässt: Zwei polykristalline CVD-Diamant-Wafer modulieren die durchtretende Strahlung, ein Wafer ist dabei stationär, der andere rotiert. Die Wahl fiel auf dieses Material, weil die Wachsungsseite die benötigten Eigenschaften der wählbaren optischen Rauigkeit und eine ausreichende optische Transmission im fraglichen Spektralbereich aufweist [7]. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis wurde durch diese Diffusoranordnung um einen Faktor 14 verbessert – ohne Speckle-Reduktionsverfahren sind die Absorptionsinformationen kaum vom Speckle-Rauschen zu unterscheiden (Abb. 2).

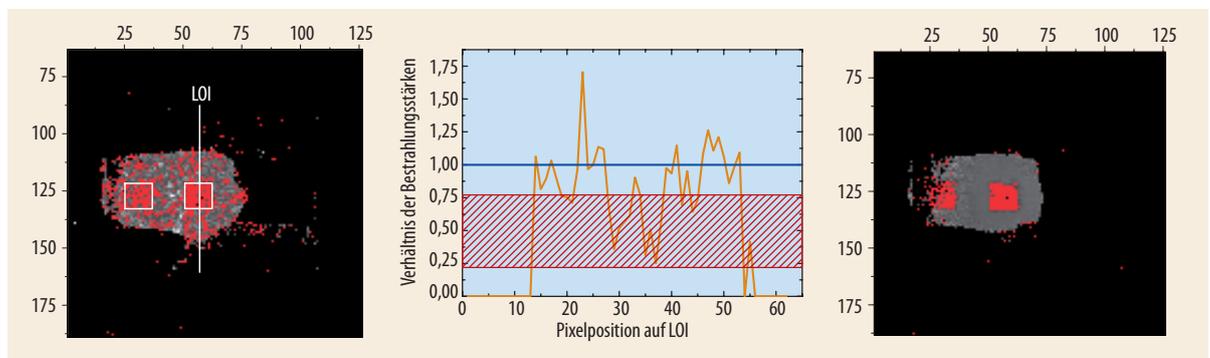


Abb. 2 Liegt der Bildkontrast der Probenaufnahmen zwischen 0,2 und 0,8, könnte dies auf das Vorhandensein von TNT hindeuten. Pixel mit Werten in diesem Bereich wurden rot eingefärbt

(links). Die Kästen markieren die tatsächlich kontaminierte Fläche. Das Kontrastprofil entlang der „Line of Interest“ (LOI) zeigt eine große Streuung (Mitte). Ohne Absorption liefert die Division im inko-

härenten Fall ein Verhältnis von 1 (blaue Waagerechte). Durch die Speckle-Kontrastreduktion tauchen quasi keinerlei „false positives“ mehr auf (rechts) – die TNT-Kontamination zeigt sich deutlich.

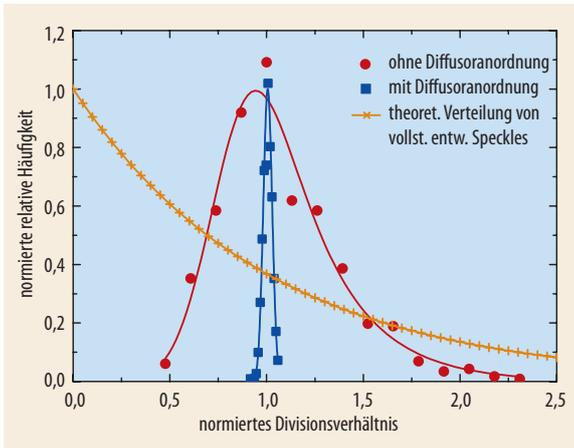


Abb. 3 Jeweils auf eins normierte Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Intensitäten auf den Detektorpixeln: Auch ohne die Diffusoranordnung kommt es im Versuchsaufbau bereits zu Abweichungen vom theoretisch zu erwartenden Verhalten.

Eine statistische Analyse der Intensitätsverteilungen innerhalb des relevanten Bildbereichs ermöglicht Rückschlüsse auf den Einfluss einzelner Komponenten des Versuchsaufbaus auf den Speckle-Kontrast und führt damit zu einem vertieften Verständnis des Gesamtsystems und Optimierungsmöglichkeiten. Es wird beispielsweise ersichtlich, dass bereits ohne Diffusoranordnung eine Speckle-Reduktion stattfindet (**Abb. 3**). Die Ursachen hierfür liegen unter anderem in der Ortsfrequenz-Tiefpasswirkung der Kameraoptik und der Bildfeldmatrixauflösung (örtlich, zeitlich, sowie der Signalquantisierungsschrittgröße) [1].

Unter den experimentellen Vorgaben ließ sich der Speckle-Kontrast durch die oben beschriebene Diffusoranordnung auf etwa ein bis zwei Prozent des verfügbaren Signalniveaus reduzieren. So gelang es nach unserem Wissen erstmals, TNT-Konzentrationen von nur $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ in einem Abstand von fünf Metern abbildend nachzuweisen. Dies entspricht der Kontamination einer Oberfläche durch einen leicht mit TNT verunreinigten Fingerabdruck.

Um die Empfindlichkeit dieser Messtechnik weiter zu steigern, fehlt noch ein Weg, die Speckle-Muster während der Bildaufzeichnung schneller zu modulie-

ren. Der Rotationsgeschwindigkeit der Wafer sind natürliche Grenzen gesetzt. Ansätze bieten mehrere überlagerte partiell kohärente, zueinander unkorrelierte Laserstrahlquellen, die räumliche Phasenmodulierung mit deformierbaren Spiegeln oder refraktive Mikrolinsenfelder und Hohlleiter-Strahlhomogenisierer.

*

Ich danke Frank Fuchs herzlichst für die aufmerksame Betreuung meiner Arbeit sowie Arnold Förster und Franz-Matthias Rateike für die vielen hervorragenden, motivierenden Vorlesungen an der Fachhochschule Aachen. Nicht zuletzt danke ich der DPG für die freundliche Auszeichnung meiner Arbeit.

Literatur:

- [1] *J. M. Kaster*, Untersuchungen zur Specklereduktion bei der Infrarot-Laser gestützten Ferndetektion von TNT-Oberflächenkontaminationen, Diplomarbeit, FH Aachen, <http://opus.bibliothek.fh-aachen.de/opus/volltexte/2009/305/>
- [2] *F. Fuchs et al.*, Proc. SPIE **6739** (2007)
- [3] *J. Faist et al.*, Science **264**, 553 (1994)
- [4] *G. P. Luo et al.*, Appl. Phys. Lett. **78**, 2834 (2001)
- [5] *J. W. Goodman*, Speckle phenomena in Optics, Roberts and Company Publishers, Greenwood Village (CO) (2007)
- [6] *S. Lowenthal und D. Joyeux*, J. Opt. Soc. Am. **61**, 847 (1971)
- [7] *B. Dischler und C. Wild*, Low-Pressure Synthetic Diamond, Springer, Berlin (1998)

DER AUTOR

Jan Mathis Kaster (rechts, mit DPG-Präsident Gerd Litfin) studierte Physikalische Technik an der Fachhochschule Aachen und verfasste seine Diplomarbeit am Freiburger Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik. Mit seiner Frau Katja lebt er derzeit in München. Im Oktober letzten Jahres begann er dort am Lehrstuhl für Experimentalphysik – Laserphysik der Ludwig-Maximilians-Universität und in der Abteilung Attosekundenphysik des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching, mit dem Schwerpunkt passiver Überhöhungsresonatoren für seine Doktorarbeit zu forschen. Neben der Laserphysik interessiert er sich für Musik, Philosophie, Botanik und Videospiele.



Pressestelle | Leibniz Univ. Hannover