

KONZEPTION EINES DOPPLER-LIDAR-TRANSFERNORMALS ZUR WINDGESCHWINDIGKEITSMESSUNG

CONCEPTION OF A DOPPLER-LIDAR TRANSFER NORMAL FOR WIND VELOCITY MEASUREMENTS

M. Eggert, H. Müller, H. Többen

Physikalisch Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

Schlagworte: Doppler-Lidar, Wind-Lidar, bistatisch, rückführbar

Key words: Doppler-Lidar, Wind-Lidar, bistatic, traceable

Abstract

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Windparks werden Windpotentialanalysen durchgeführt, die bislang auf Langzeitmessungen von Windgeschwindigkeitswerten mit Messmasten beruhen. Diese Messmasten sind in unterschiedlichen Höhen mit rückgeführten Anemometern bestückt, wobei derzeit lediglich Windmessungen mit von akkreditierten Kalibrierlaboratorien kalibrierten Schalenkreuzanemometern anerkannt werden.

Mit zunehmender Nabenhöhe neuer Windenergieanlagen wird der Aufwand hinsichtlich der Messmastenerstellung beträchtlich, so dass bereits wirtschaftlichere Alternativen mit Fernmessverfahren auf Basis von Doppler-Lidar-Systemen eingesetzt werden. Die bisher in der Windenergiebranche publizierten Untersuchungsergebnisse weisen auf die vielversprechenden Möglichkeiten und Einsatzpotentiale der Lidar-Technik hin. Was jedoch fehlt, sind Verfahren zur metrologischen Rückführung der Lidar-Systeme.

Allen bisher in der Windenergiebranche eingesetzten Wind-Lidar-Systemen ist gemeinsam, dass sie aus einer einzelnen Sende- und Empfangseinheit bestehen, so dass Sendestrahl und Empfangsrichtung übereinander liegen (monostatisch, monoaxial). Hierbei ergeben sich ausgedehnte Messvolumina von typisch etwa 20 m Länge, aus denen die Strömungsgeschwindigkeitskomponente lediglich in Strahlrichtung erfasst wird, so dass der Strahl zur vollständigen Erfassung des Geschwindigkeitsvektors in verschiedene Richtungen geschwenkt werden muss. Sowohl aufgrund der Ausdehnung der Messvolumina, als auch durch die notwendige Bedingung einer über den Schwenkbereich homogenen Strömung eignet sich dieses Verfahren insbesondere in komplexem Gelände nur für rückgeführte Messungen der Windgeschwindigkeit, wenn das System für die standortspezifischen Strömungsverhältnisse kalibriert wurde.

Durch den Einsatz eines bistatischen Doppler-Lidar-Systems mit räumlich getrennten Sende- und Empfangseinrichtungen können die Messvolumina auf die Größenordnung eines Kubikdezimeters reduziert und weiterhin mithilfe mehrerer Sender oder mehrerer Empfänger die Geschwindigkeit an einem einzelnen definierten Messort vektoriell erfasst werden. Da die unbekannte Strömungsgeometrie hier nicht in die gemessene Geschwindigkeit eingeht, kann ein solches System standortunabhängig rückgeführt werden.

Einleitung

Kohärente Doppler-Lidar-Systeme werden bereits vielfältig für Messungen von Windgeschwindigkeiten eingesetzt. Sie beruhen auf der Detektion der bei der Streuung von Laserlicht an von der Strömung mitgeführten Partikeln entstehenden Dopplerfrequenz durch Rückmischung mit dem Laser (siehe Abbildung 1). Der Großteil dieser Geräte arbeitet gepulst, so dass durch eine entsprechende Wahl des Auswerte-Zeitfensters die Messentfernung festgelegt werden kann. Mithilfe eines Akusto-Optischen Modulators (AOM) im Sendezweig wird hierbei nicht nur der Puls geformt, sondern auch einen Frequenzversatz zur Vorzeichenbestimmung der Strömungsgeschwindigkeit erzeugt. Gegeben durch die Vielzahl von Streupartikeln im Messvolumen entsteht am Empfänger ein Speckle-Muster, wobei das Empfangslicht nur innerhalb einzelner Speckles kohärent ist und somit die Rückmischung erlaubt. Da die Größe des Empfängers und seine Numerische Apertur folglich ohnehin begrenzt sind, kommen heutzutage überwiegend faseroptische Systeme zum Einsatz (Ando 2008, Abdellazim 2010).

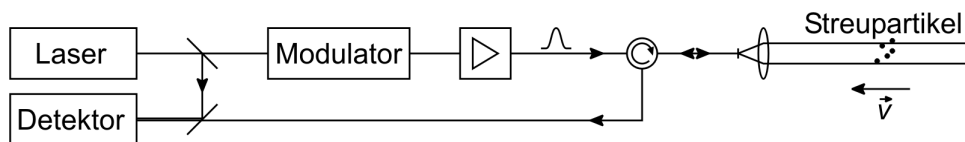


Abb. 1: Aufbau kohärenter Doppler-Lidar-Systeme

Bei monostatischen Aufbauten (eine gemeinsamen Sende- und Empfangseinheit) kommerziell erhältlicher Systeme und deren monoaxialer Strahlführung beträgt die Entfernungsaufösung bedingt durch die zur Frequenzauswertung nötige Dauer von Sendepuls und Empfangszeitfenster typischerweise etwa 20 m. Ähnliche Auflösungen ergeben sich auch für Systeme, welche eine Fokussierung ungepulster Strahlen zur Festlegung der Messentfernung nutzen (Harris 2001). In beiden Fällen ergibt sich somit eine Mittelung über einen großen Entfernungsbereich, welche zusätzlich von der Verteilung der Partikelkonzentration beeinflusst wird.

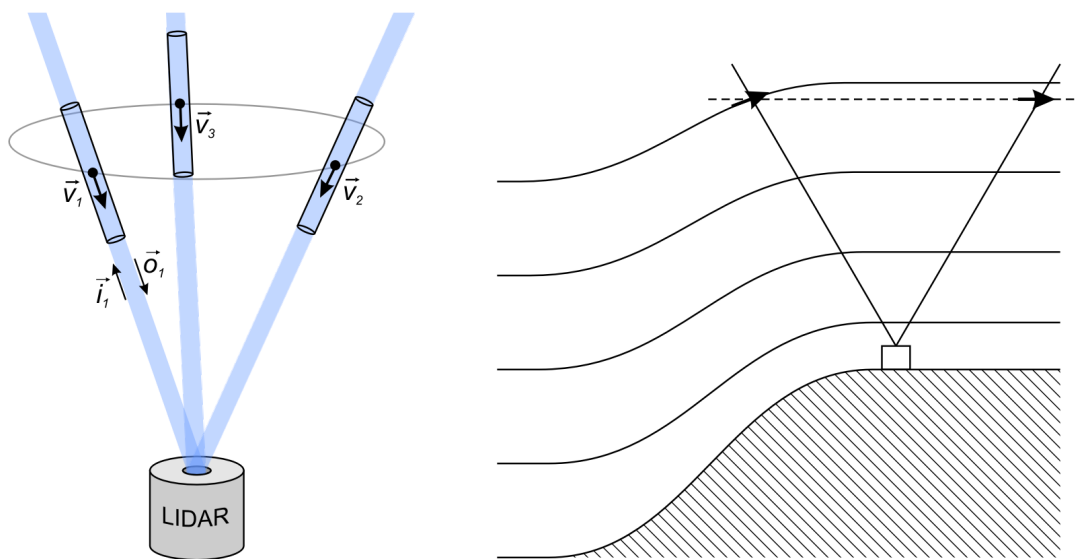


Abb. 2: Mehrkomponentige Strömungsgeschwindigkeitsmessung mit konventionellen Lidar-Systemen (links), Verfälschung der Messergebnisse durch komplexes Gelände (rechts)

Kommerziell erhältliche, monostatische und monoaxiale Systeme messen ausschließlich die Strömungsgeschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung. Zur Erfassung aller drei Geschwindigkeitskomponenten – bzw. zur Erfassung der horizontalen Komponenten vom Boden aus – schwenken diese Systeme ihren Strahl in verschiedene Richtungen. Dies erfolgt üblicherweise mithilfe einer rotierenden Keilplatte, so dass der Strahl innerhalb eines Messzyklus einen Konus beschreibt (Ando 2008). Da bei diesen Verfahren Geschwindigkeiten an unterschiedlichen Orten gemessen werden, setzt die genaue Bestimmung eines resultierenden Geschwindigkeitsvektors eine homogene Strömung voraus, was in komplexem Gelände in der Regel nicht gegeben ist (Abbildung 2). Hier können Messabweichungen bis über 10 % entstehen (Foussekis 2011).

Sowohl aufgrund der ausgedehnten Messvolumina, als auch aufgrund der Messabweichungen in komplexen Geländestrukturen, sind die bislang mit kommerziell erhältlichen Lidar-Systemen durchgeführten Windmessungen im Rahmen der geforderten Messunsicherheiten nur bedingt mit Messungen von Anemometern an Messmasten vergleichbar und hinsichtlich einer Rückführbarkeit kritisch zu bewerten. Im Rahmen einer Lidar-Neuentwicklung auf Basis eines bistatischen Lidar-Systems sollen diese Nachteile ausgeschlossen werden.

Prinzip des bistatischen Doppler-Lidar-Verfahrens

Ein bistatisches Lidar-System mit räumlich deutlich vom Sender getrennten Empfängern (Abbildung 3) besitzt ein klar abgegrenztes Messvolumen im Kubikdezimeterbereich, gegeben durch den Überlappungsbereich des Sendestrahls mit den Empfangskegeln der Empfänger („Empfangsstrahlen“). Die Messhöhe wird hierbei folglich nicht durch ein Empfangszeitfenster festgelegt, sondern durch die Justage der Empfangsstrahlen. Laufzeitmessungen erlauben hierbei die Bestimmung der Messhöhe und dienen der Sicherstellung, dass alle drei Empfangsstrahlen den Sendestrahl in der gleichen Höhe schneiden, so dass drei Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit, jeweils in Richtung der Winkelhalbierenden zwischen Sende- und Empfangsstrahl, an einem Ort gemessen werden können. Die gemessene Geschwindigkeit ist dabei direkt auf die kalibrierbaren Größen der Laserwellenlänge, der Zeitbasis zur Frequenz- und Laufzeitbestimmung sowie der Empfängergeometrie rückführbar.

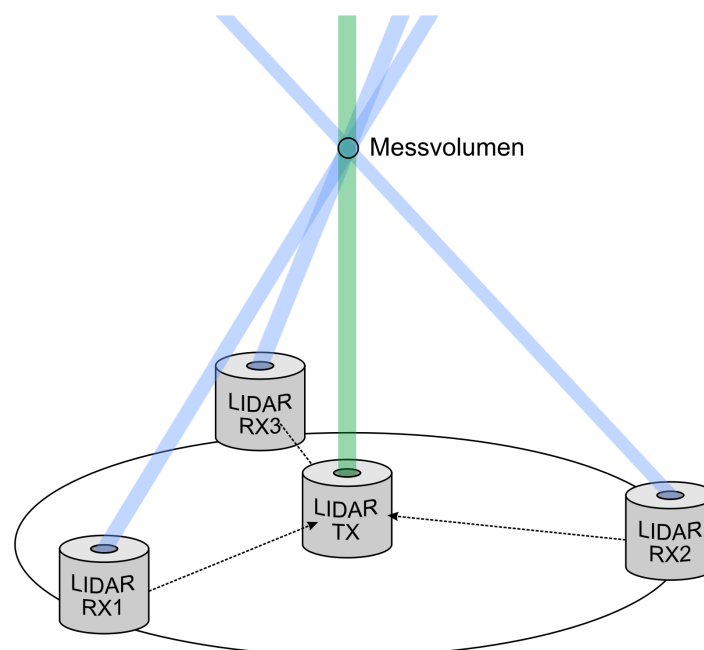


Abb. 3: Bistatisches Doppler-Lidar-System aus einem Sender und drei Empfängern

Die Herausforderung bei einem bistatischen Lidar-System besteht in der geringeren Empfangsleistung der rückgestreuten Strahlung. Zum einen durchqueren wenig Streupartikel das relativ kleine Messvolumen, zum anderen muss Strahlung aus einer schwach ausgeprägten Nebenkeule der Streustrahlung detektiert werden. Der Nachteil der geringeren Anzahl von Partikeln wird jedoch teilweise dadurch kompensiert, dass sich diese in dem kleinen Messvolumen weitaus gleichförmiger bewegen als innerhalb des über einen großen Höhenbereich ausgedehnten Messvolumens eines konventionellen Wind-Lidar-Systems, so dass sich das empfangene Frequenzspektrum auf eine deutlich schmalere Bandbreite konzentriert.

Aufbau des bistatischen Systems

Das geplante bistatische System (Abbildung 4) besitzt ebenso wie konventionelle Systeme einen schmalbandigen Masterlaser, dessen Licht zugunsten des Signal-Rausch-Verhältnisses gepulst und verstärkt wird. Zusätzlich wird hier jedoch noch eine schnelle Pseudorandachfolge (pseudo random noise, PRN) mittels eines Mach-Zehnder-Modulators (MZM) als Intensitätsmodulation aufgeprägt, um die Laufzeit und damit die jeweilige Messhöhe hochaufgelöst messen zu können. Durch die Verwendung rauscharmer optischer Vorverstärker (Rauschzahl 1 dB bei Polarisationsfilterung) lässt sich die Empfangsempfindlichkeit im Rahmen der Kompensation von Verlusten vor der Mischung erhöhen.

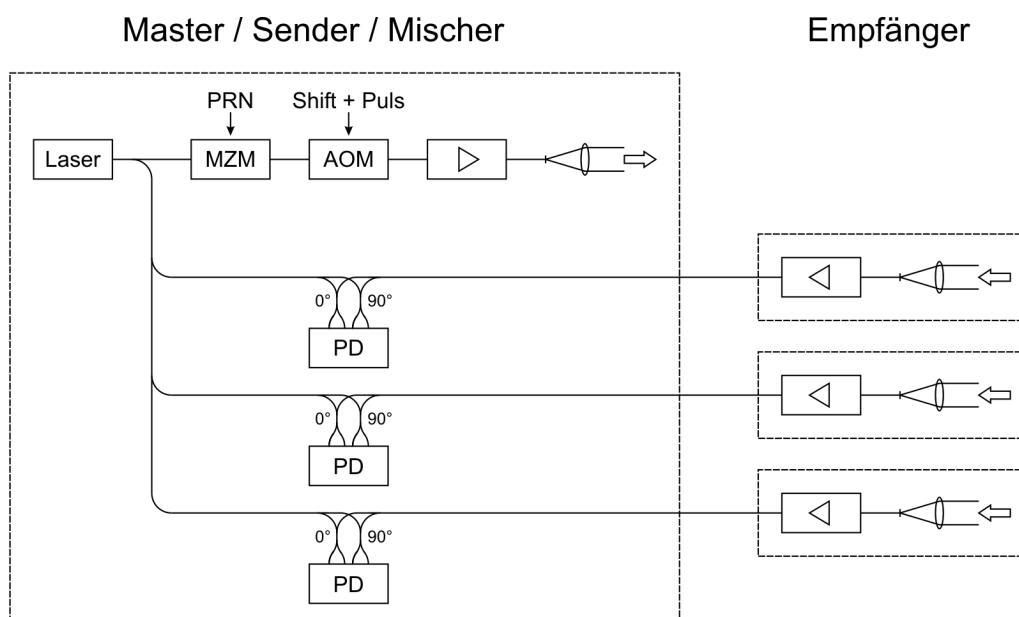


Abb. 4: Schematischer Aufbau des bistatischen Systems

Zur Auswertung wird das Empfangssignal, welches um die Dopplerfrequenz bis zu 10 MHz relativ zur AOM-Frequenz von 75 MHz verschoben ist, mittels Analog-Digital-Wandlern (ADC) möglichst hochfrequent abgetastet (Abbildung 5). Die aus den Quadratursignalen berechnete momentane Empfangsleistung kann nachfolgend durch Anwendung der Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) mit der gesendeten Pseudorandachfolge verglichen und damit die Laufzeit des Signals bestimmt werden. Zur Bestimmung der Dopplerfrequenz ist keine solche hohe Abtastrate notwendig, so dass die Datenrate mittels einer Unterabtastung nach digitaler Filterung signifikant reduziert werden kann.

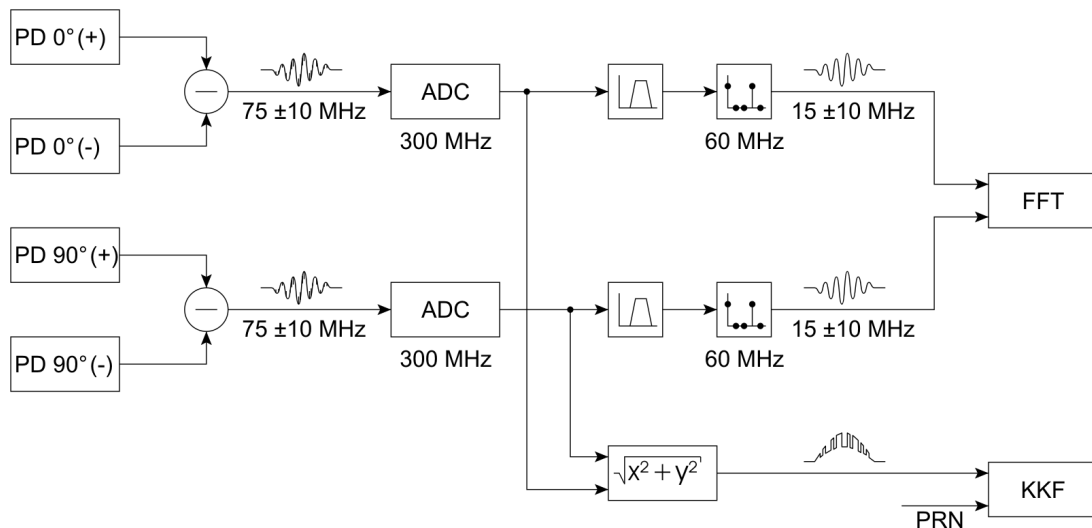


Abb. 5: Schema der Signalauswertung

Da die Signale der einzelnen Pulse voraussichtlich stark verrauscht sind, empfiehlt sich angesichts der Datenrate eine Vorverarbeitung in einer speziellen Hardware wie beispielsweise in einer programmierbaren Logik (FPGAs). Hierbei kommen eine Mittelung der Signale vieler Pulse im Frequenzbereich mittels schneller Fourier-Transformation (FFT) oder eine Korrelation aufeinanderfolgender Pulse in Betracht.

Erste Messergebnisse

Für erste Tests wurde das in Abbildung 6 gezeigte System – hier noch ohne optische Verstärkung – aufgebaut und in Betrieb genommen. Es besteht aus einem schmalbandigen Faserlaser mit einer Wellenlänge von 1550 nm und einer Ausgangsleistung von 40 mW, welche von einem faseroptischen Splitter (oben rechts) zu gleichen Teilen auf vier Ausgänge auf-

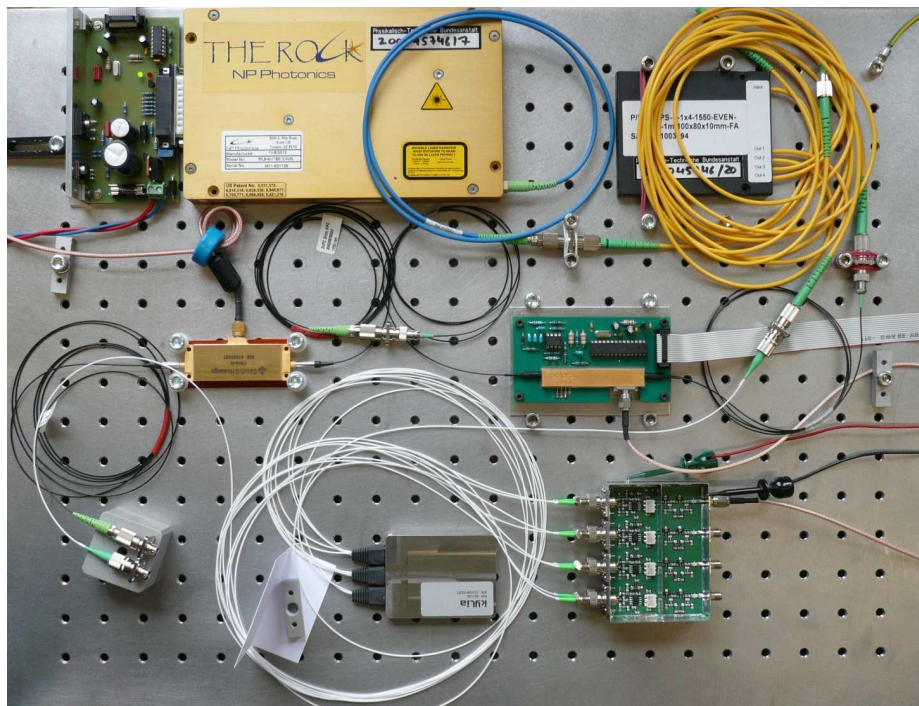


Abb. 6: Testsystem

geteilt wird. Einer dieser Ausgänge speist den Sendezweig, in dem die beiden Modulatoren folgen (in Bildmitte). Das modulierte, hier nicht gepulste Licht mit einer Leistung von etwa 1 mW wird aus der Faser ausgekoppelt und ohne Kollimator divergent auf eine Mattscheibe gestrahlt (unten links). Der Teil des dabei gestreuten Lichts, der ebenfalls ohne Kollimator in die Empfangsfaser einkoppelt, wird mithilfe des Quadraturdemodulators (unten Mitte) mit dem Licht des Lasers gemischt und auf die Photodetektoren (unten rechts) geführt. Das in Abbildung 7 dargestellte Spektrum des dabei entstehenden Schwebungssignals zeigt ein deutliches Maximum mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis bei der Modulatorfrequenz. Um auch das Streulicht von Partikeln sichtbar zu machen, sind neben der signifikanten Erhöhung der Sendeleistung mithilfe eines Faserverstärkers auch der Aufbau geeigneter Sende- und Empfangsoptiken und eine angepasste Auswertung einschließlich einer Mittelung im Sekundenbereich geplant.

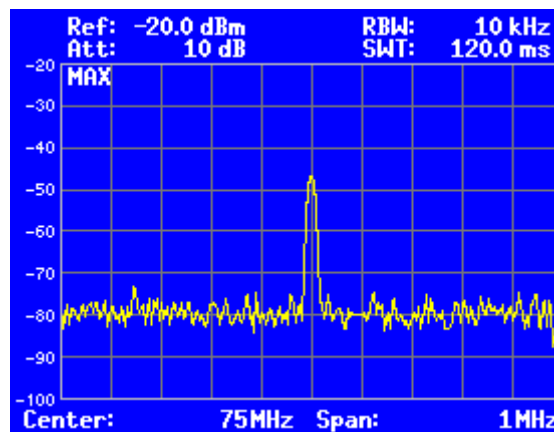


Abb. 7: Spektrum des Schwebungssignals

Zusammenfassung

Ein Konzept für ein rückgeführtes bistatisches Doppler-Lidar-System zur präzisen vektoriel- len Windgeschwindigkeitsbestimmung in kleinen Messvolumina wurde entworfen und ein erster Testaufbau umgesetzt. Nach Fertigstellung kann dieses System einerseits zur genau- eren Untersuchung der Geländeabhängigkeit konventioneller monostatischer Lidar-Systeme eingesetzt werden, andererseits aber auch der standortabhängigen Kalibrierung konventio- neller Lidar-Systeme dienen oder direkt für rückgeführte Windpotentialanalysen und Leis- tungskurvenbestimmungen genutzt werden.

Literatur

Abdelazim, S., Santoro, D., Arend, M., Moshary, F., Ahmed, S., 2010: „Development of All-fiber cohe- rent Doppler LIDAR system for wind sensing“, 15th Symposium on Meteorological Observation and Instrumentation, 90th Annual AMS Meeting, Atlanta

Ando, T., Kameyama, S., Hirano, Y., 2008: „All-fiber Coherent Doppler LIDAR technologies at Mitsubi- shi Electric Corporation“, 14th International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Re- mote Sensing, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1, No. 012011

Foussekis, D., 2011: „Measurements & inter-comparisons in Complex Terrain“, Upwind Deliverable D6.6.1-B

Harris, M., Constant, G., Ward, C., 2001: „Continuous-wave bistatic laser Doppler wind sensor“, Appl. Opt., No. 40, 1501–1506