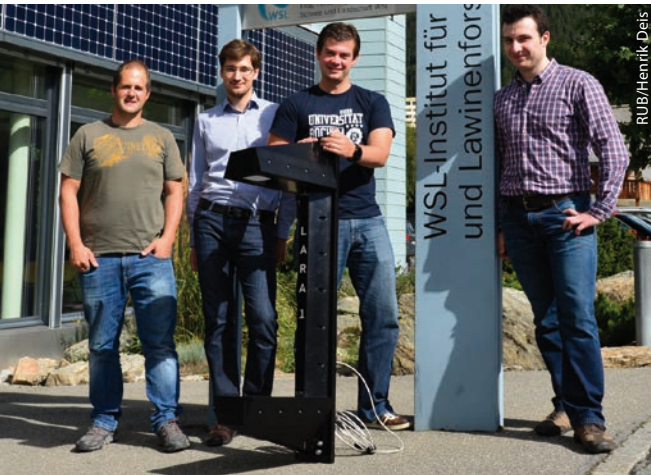


## Einblicke in Lawinen

### Ein Radarsensor bestimmt die Schneestaubdichte in Lawinen.

Trotz jahrzehntelanger Forschung sind Lawinen noch immer nicht vollständig verstanden, vor allem nicht genug für zuverlässige Prognosen. Während die unterste Schicht einer Lawine sich wie ein Festkörper verhält, liegen darüber



Die Projektbeteiligten mit ihrem Sensor: Hinter der weißen Fläche am oberen Gerätearm verbirgt sich das Radar.

weitere Schichten, die sich eher wie Flüssigkeiten oder staubhaltige Gase charakterisieren lassen. Strömungsmechanische Simulationen sind ein wichtiges Hilfsmittel zum besseren Verständnis, allerdings sind dazu reale Daten aus dem Innern von Lawinen nötig. Wissenschaftler der Ruhr-Universität Bochum (RUB) haben hierfür einen Sensor entwickelt, der die Eigenschaften der obersten Schicht – des so genannten Schneestaubs – bestimmt, konkret: den dortigen Volumenanteil des Schnees und damit dessen Dichte.

Der Sensor beruht auf einem Millimeterwellen-Radar, mit dem er entlang einer definierten Strecke misst: Ändert sich die Laufzeit der reflektierten Radarwellen, ist dies eine Folge der zunehmenden Schneedichte in der Messstrecke, weil sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen aufgrund der relativen Permittivität im Vergleich zur Ausbreitung in Luft verändert hat. Aus der Dichte lässt sich auf den Aufpralldruck einer Lawine schließen, der maßgeblich ihre Zerstörungskraft bestimmt.

Aufgrund des hohen Aufpralldrucks von Lawinen in der Größenordnung von mehreren Bar muss der Sensor hohen mechanischen Belastungen standhalten. Radarsystem und Messstrecke sind etwa einen Meter lang und wiegen rund 70 Kilogramm, das Gehäuse ist aus Flugzeugaluminium gefertigt. Da ein Lawinenabgang zu einer raschen Temperaturänderung von 20 bis 30 K führt, muss die Messung temperaturkompensiert erfolgen. Integrierte Temperatursensoren erfassen dazu die thermisch bedingte Messstreckenänderung kontinuierlich.

In diesem Winter befinden sich zwei der Sensoren auf einem mehr als 20 Meter hohen Mast im Wallis, wo das Schweizer Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) einen abgesperrten Hang für Tests an Lawinen nutzt. Gemeinsam mit dem SLF und dem Innsbrucker Institut für Naturgefahren denken die RUB-Wissenschaftler über Folgeprojekte nach.

## Breitbandig ausgebeutet

### Eine Siliziumphotodiode erreicht eine sehr hohe externe Quantenausbeute über einen weiten Spektralbereich.

Ideale Photodioden detektieren alle einfallenden Photonen, unabhängig von Wellenlänge, Einfallswinkel oder Intensität. Forschern der Aalto-Universität bei Helsinki ist es nun gelungen, diesem Ideal recht nahe zu kommen. Ihr Labormuster hat mehr als 96 Prozent externe Quantenausbeute über einen Spektralbereich von 250 bis 950 nm.<sup>1)</sup> Das erreichen Photodioden meist nur in einzelnen Wellenlängenschnitten. Die Photodiode beruht auf schwarzem Silizium (b-Si), einer Oberflächenmodifikation kristallinen Siliziums. Schwarzes Silizium hat dank seiner nanostrukturierten Oberfläche den Vorteil, Licht effektiver zu absorbieren und weniger zu reflektieren, auch unter sehr schrägen Einfallswinkeln.

Allerdings hat die größere Oberfläche des b-Si den Nachteil,

dass deutlich mehr Ladungsträger rekombinieren. Abhilfe schafft eine bestimmte Form der chemischen Gasphasenabscheidung von Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Ein weiteres Problem sind durch die Dotierung verursachte Kristallschäden oder Auger-Rekombinationen, die in stark dotierten Regionen auftreten. Das ist schon bei Photodioden mit konventionellem p-n-Übergang schwierig zu kontrollieren und verschärft sich durch b-Si noch weiter, weil eine gleichmäßige Dotierung in den Nanostrukturen schwierig wird.

Anstatt eines konventionellen p-n-Übergangs bringen die Forscher daher negativ geladenes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  auf n-leitendes Silizium auf. Dabei bilden sich negative Ladungen an der Grenzfläche zwischen den beiden Materialien, die freie Löcher aus dem Silizium anziehen. Ist der Anteil der angezogenen Löcher größer als die Zahl der n-dotierten Atome, wird dieser Bereich faktisch zu einer p-leitenden Region (Umkehrschicht). Es resultiert ein p-n-Übergang. Zudem konnten die Wissenschaftler den Sammelwirkungsgrad weiter steigern, indem sie die Oberfläche der Photodiode nanostrukturierten, was zu einer größeren effektiven Ladungsdichte und einer erhöhten Ladungsträgerkonzentration in der Umkehrschicht führt.

## Funkstrecke für Licht

### Optische Freiraumübertragungen sind mit hoher Bitrate augensicher über weite Distanzen möglich.

Richtfunkstrecken ermöglichen seit Jahrzehnten den drahtlosen Datenaustausch. Doch in dem Maße, in dem die faserbasierte optische Datenübertragung gerade für das Internet extrem an Bedeutung gewonnen hat, gibt es Überlegungen, wie sich das leitungsungebundene Pendant, die Freistrahübertragung, ausnutzen lassen könnte. Hierbei werden die Lichtwellen von einem geeigneten optischen Terminal unter sehr kleinen Divergenzwinkeln ausgesandt und mit einem zweiten Terminal detektiert. Vor allem die

1) M. A. Juntunen et al., Nature Photonics 10, 777 (2016)

Kommunikation zwischen Bodenstation und Satellit oder zwischen zwei Satelliten wäre eine geeignete Anwendung, weil sich optisch sehr hohe Datenraten erzielen lassen. Es sind weitere Anwendungen denkbar, die für künftige Technologien interessant wären, zum Beispiel für die Quantenkommunikation.

Wissenschaftler des Fraunhofer Heinrich-Hertz-Instituts HHI in Berlin und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen haben nun zwei Rekorde erreicht. Bisherige Rekorde gelangen entweder über deutlich kürzere Entfernungen oder mit geringerer Datenrate.

Bei einer bidirektionalen Freistrahübertragung über eine Distanz von 380 Meter erzielte das HHI 1,72 Tbit/s in jede Richtung. Die Signale bestanden jeweils aus 40 Wellenlängenkanälen à 43 Gbit/s Datenrate. Dabei lag die erforderliche Sendeleistung des Terminals unter 10 mW bei 1550 nm, war also augensicher. Die gemessene Bitfehlerquote fiel kleiner als  $10^{-8}$  aus und lässt sich mit gängigen Fehlerkorrekturverfahren weiter verbessern. Hierzu muss das Tracking auf Mikroradian beziehungsweise Bogen Sekunden genau erfolgen, damit die Einkopplung der optischen Wellen in die nur wenige Mikrometer weiten Einmoden-Fasern möglichst verlustfrei erfolgt.



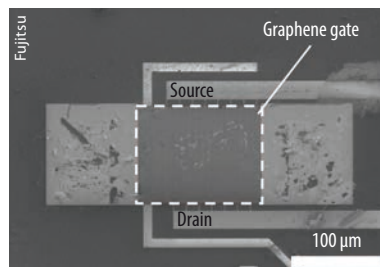
Das DLR hat das bei der Freiraumübertragung über zehn Kilometer eingesetzte Sendeterminal entwickelt.

In einem zweiten Experiment übertrugen die Projektbeteiligten mit anderen Terminals 1,72 Tbit/s unidirektional im Freiraum über 10,45 Kilometer. Die Störungen der Atmosphäre über eine solche Distanz sind bereits mit denen bei der optischen Kommunikation zwischen Bodenstation und Satellit vergleichbar.

## ■ Empfindlicher mit Graphen

**Ein neues Detektorprinzip ermöglicht den Nachweis bestimmter Gase im ppb-Bereich.**

Gassensoren werden zunehmend wichtig, um Messungen möglichst in Echtzeit durchzuführen. Es gibt bereits Gassensoren auf Halbleiter-



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Gassensors: markiert sind Source, Gate und Drain.

basis, die das leisten, allerdings liegt ihre Empfindlichkeit noch nicht im gewünschten Bereich. Die Idee, die Empfindlichkeit dieser Gassensoren durch Graphen zu erhöhen, ist nicht neu. Dabei nutzt man die hohe Leitfähigkeit von Graphen aus, um resistiv zu messen: Lagert sich ein Gas an den Sensor an, verändert sich dessen elektrischer Widerstand. Forscher von Fujitsu haben Graphen genutzt, um einen völlig neuen Gassensor aufzubauen.

Der Sensor der Japaner besitzt einen konventionellen Siliziumtransistor, dessen Gate als Graphenschicht mit einer Atomlage ausgeführt ist. Bleibt ein Gasmolekül am Graphen haften, verändert sich die Austrittsarbeit des Graphens, wodurch der Transistor ein stark verändertes Schaltverhalten zeigt. Trennt sich das Gasmolekül wieder vom Graphen, kehrt der Transistor zu seinem alten Schaltverhalten zurück. Der neue Sensor wies noch einige 10 ppb (parts per billion,  $10^{-9}$ ) Ammoniak und weniger als 1 ppb Stickstoffdioxid in einer Stickstoffumgebung nach. Er ist damit um eine Größenordnung empfindlicher als widerstandsbasierte Graphensensoren. Die Forscher sehen für ihre Sensortechnologie Einsatzmöglichkeiten in der Umweltüberwachung und der Medizin.

**Michael Vogel**