

Erste THz-Videos mit einer Silizium-basierten IR-Kamera

Erik Bründermann, Jens Ransch, Ruhr-Universität Bochum
Matthias Krauß, InfraTec GmbH, Dresden
Johannes Kunsch, Laser Components GmbH, Olching

Mit einer kommerziellen Mikrobolometer-Kamera, entwickelt für das mittlere Infrarot, demonstrieren wir die Detektion bis in den Terahertz-Frequenzbereich von 3,8-1,8 THz (79-171 μm). Wir zeigen erstmals die Abbildung von Terahertz-Laserprofilen bei mehr als der 17fachen Design-Wellenlänge mit einer Bildfrequenz von 50 Hz. Mikrobolometer-Kameras ermöglichen damit einen einfachen Zugang zur Bildgebung von Terahertz-Quellen sowie zum THz-Imaging. Sie sind daher interessante Kandidaten für den Einsatz in der berührungsfreien Qualitätskontrolle in industriellen Fertigungsprozessen.

Der Terahertz-Frequenzbereich von 1 bis 10 THz gewinnt zunehmend an Interesse in der Qualitätskontrolle, der medizinischen Bildgebung und der Sicherheitstechnik. Hier wird ausgenutzt, dass Materialien wie Papier, viele Kunststoffe (Polyethylen, Polypropylen, ...) sowie Baumwoll-Kleidung nahezu transparent sind. Chemische Stoffe wie Pharmazeutika, organische Pulver, Sprengstoffe und Drogen haben charakteristische Absorptionen im Terahertz-Frequenzbereich und können über ihren „spektralen Fingerabdruck“ innerhalb von Verpackungen oder Briefen identifiziert werden. Darüber hinaus kann Terahertz-Strahlung interessante Fragen der Grundlagenforschung unter anderem im Bereich der Biowissenschaften beantworten, wie bei der Analyse von strukturiertem Wasser z.B. durch die Einlagerung von Zucker [1].

1 Kameratechnik für den THz-Frequenzbereich

Die Terahertz-Bildgebung unterscheidet sich nicht prinzipiell von der Bildgebung im infraroten Spektralbereich (Thermografie von 7-14 μm). Die wesentlichen Unterschiede sind:

- eine geringere räumliche Auflösung wegen der um einen Faktor 10 größeren Wellenlänge,
- ein relativ hoher thermischer Hintergrund, da die Photonen-Energie 10fach kleiner ist,
- die eingeschränkte Verfügbarkeit bzw. die hohen Kosten für THz-Sensor-Arrays.

In der kommerziellen Thermografie dominieren Array-Systeme gegenüber scan-

nenden Einzeldetektoren. Für einen industriellen Einsatz der Terahertz-Technologie ist es daher sinnvoll, möglichst von Anfang an mit Arraysensoren zu arbeiten. In der astronomischen Forschung werden bereits seit Jahren hoch spezialisierte Terahertz-Bolometerarrays eingesetzt. Diese müssen allerdings mit flüssigem Helium auf -269°C gekühlt werden. Für den angestrebten Industrieinsatz der Terahertz-Technik sowie für mobile Anwendungen wird jedoch ein Betrieb bei Raumtemperatur bevorzugt. Wir konzentrieren uns daher auf eine mögliche Erweiterung der in der Thermografie etablierten Mikrobolometerarrays in den Terahertz-Bereich.

Kürzlich wurde von einer amerikanischen Forschergruppe am Massachusetts Institute of Technology (MIT) demonstriert, dass Mikrobolometer-Kameras für die Detekti-

on von Terahertz-Strahlung geeignet sind [2,3]. Es wurde eine für den militärischen und sicherheitstechnischen Bereich entwickelte Infrarot-Kamera mit 160×120 [2] bzw. 320×240 [3] Pixel verwendet. Der Pixel-Abstand (pitch) betrug $46,25 \mu\text{m}$. Das absorbierende Bolometer-Material war Vanadiumoxid (VOx), das eine typische Zeitkonstante von 15 ms hat.

Im ersten Experiment [2] wurde ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 13 dB erreicht, mit einem Gaslaser bei 2,5 THz ($118 \mu\text{m}$) und 10 mW Laserleistung.

Das zweite Experiment [3] nutzte einen kürzlich entwickelten 4,3 THz ($70 \mu\text{m}$) Quantenkaskadenlaser mit einer hohen Spitzenleistung von 50 mW bei einem Tastverhältnis von 25% [3]. Durch eine Differenzbildmethode, die zwar die Bildfrequenz auf 20 Hz verringert, aber zu einer



Bild 1:
IR-Kamera
VarioCAM head
von Jenoptik,
Exklusivvertrieb
durch InfraTec

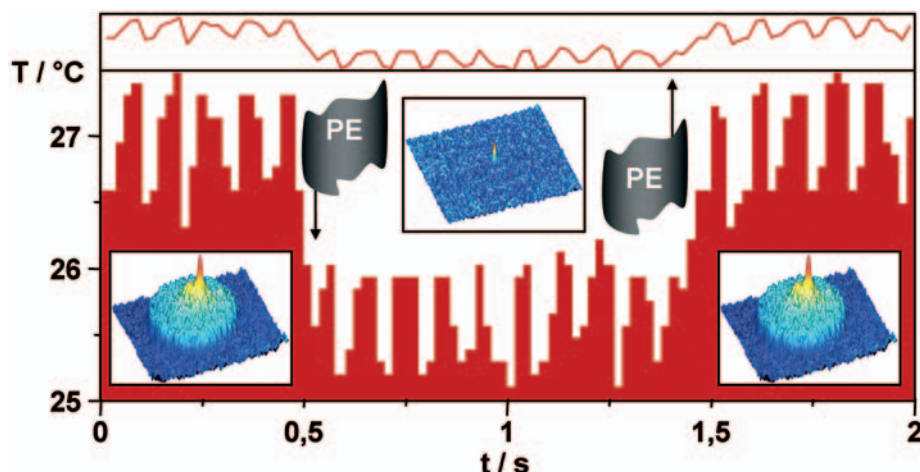


Bild 2: Aufnahme bei 1,76 THz mit Germanium-Objektiv: 1 K Signalhub durch den mit 10,3 Hz modulierten Terahertz-Laserstrahl (Zeitreihe von 100 Bildern bei einer Bildfrequenz von 50 Hz). Nach 0,5 Sekunden wurde für 1 Sekunde eine schwarze PE-Folie eingesetzt. Oben ist die Einhüllende als Linienzug dargestellt. Eingesetzt sind die Kamera-Bilder des jeweils maximalen Signals in 3D-Darstellung. Das wärmere Fenster ist mit überlagertem Terahertz-Signal erkennbar

Reduktion des Hintergrundsignals führt, konnte ein optisches Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 340:1 (25 dB) erzielt werden. Wenn die Signalleistung gleich der Rauschleistung ist, ergibt sich eine NEP (noise equivalent power) von $320 \text{ pW/Hz}^{1/2}$. Nachteilig bei Kameras mit VOx-Bolometer-array ist ihr hoher Preis.

Das Mikrobolometer-Array der von uns im THz-Frequenzbereich untersuchten Kamera (**Bild 1**) benutzt hingegen Mikrobrücken aus dotiertem amorphem Silizium (a-Si) von nur $0,1 \mu\text{m}$ Dicke [4]. Neben dem offensichtlichen Vorteil einer Silizium-Technologie mit geringeren Produktionskosten ergeben sich weitere Vorzüge: Die sehr dünnen Membranen erlauben (kurze) Stege zur thermischen Isolation von der darunter liegenden, auslesenden Elektronik. Das Array ist so nicht nur unempfindlich gegenüber mechanischen Schocks, zusammen mit der geringen thermischen Masse von Silizium ermöglicht dieser Aufbau auch eine sehr geringe thermische Zeitkonstante. Für ein Array mit $45 \mu\text{m}$ Pixel-Abstand ergibt sich eine Zeitkonstante von nur 4 ms und somit potenziell höhere Bildfrequenzen oberhalb von 50 Hz (20 ms).

Das Germanium-Objektiv der verwendeten Kamera enthält verschiedene THz-dämpfende Antireflexionsschichten für den Thermografie-Bereich im mittleren Infrarot. Nach der Entfernung des Objektivs ist der Mikrobolometer-Detektor-Chip der Firma ULIS [4] noch durch ein Germanium-Fenster mit verschiedenen Beschichtungen in einem Vakuumgehäuse hermetisch eingeschlossen. Die an diesem Fenster auftretenden Reflexionsverluste von mindestens 59% werden in Kauf genommen.

2 THz-Bildgebung mit Thermografie-Kameras

Zur ersten Analyse wurde ein Terahertz-Gaslaser verwendet, wie er in vielen Labors zur Verfügung steht – eine seit mehr als 30 Jahren etablierte Technologie. Sie liefern auch heute noch im Vergleich zu den neuen kompakten Terahertz-Quellen hohe mittlere Leistungen von typisch 10-100 mW. Das verwendete Lasersystem beinhaltet einen im Bereich von 9 bis $10 \mu\text{m}$ emittierenden CO_2 -Laser, der das Gas eines Terahertz-Lasers pumpt. Ein 3 mm dickes Quarz-Fenster dient als Auskoppelfenster. Es ist im Terahertz-Bereich transparent, aber undurchlässig für die CO_2 -Pumpstrahlung. Wahlweise kann eine Wellenlänge von $170,6 \mu\text{m}$ oder $118,8 \mu\text{m}$ eingestellt werden, entsprechend 1,76 THz oder 2,52 THz. Der Laserstrahl wird durch

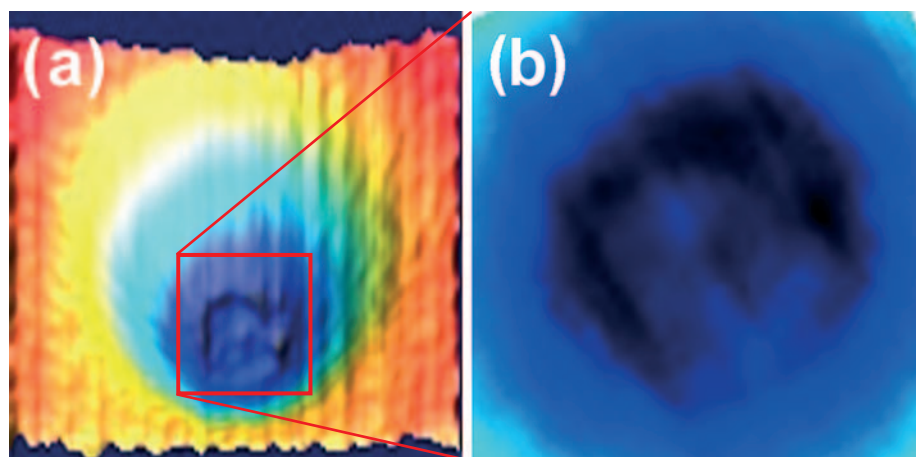


Bild 3: Modenprofil eines THz-Quantenkaskadenlasers, (a) IR-Kameraaufnahme in 3D-Darstellung, (b) Ausschnittvergrößerung in 2D-Darstellung

einen Lichtzerhacker (chopper) mit 10,3 Hz moduliert.

Zunächst wurde die Kamera mit dem Standard Germanium-Objektiv verwendet. Eine $0,1 \text{ mm}$ dicke schwarze Folie aus LD-PE (low-density Polyethylen) diente als IR-Filter. Sie wird typischerweise als lichtdichte Verpackung von Toner-Behältern für Laserdrucker verwendet. Die Folie hat eine Transmission von weniger als 15% im Thermografie-Bereich aber mehr als 85% im untersuchten Terahertz-Frequenzbereich. Zahlreiche so aufgenommene Terahertz-Gaslaser-Videos und weitere Abbildungen finden sich im Internet [5].

Bild 2 zeigt eine Zeitreihe der maximalen Laser-Intensität bei 1,76 THz. Wir verwenden im Folgenden weiter die im Thermografie-Bereich kalibrierten Temperaturskalen in $^{\circ}\text{C}$ oder K und die Leistungsskala in Watt pro Quadratmeter (W/qm), um eine Vergleichbarkeit zu bekannten Daten zu ermöglichen. Es ist deutlich erkennbar, dass der temperaturäquivalente Signalhub durch das Terahertz-Signal ca. 1 K beträgt. Bei einer kleinen Verschiebung des Resonators im Terahertz-Laser ist kein Hub mehr nachweisbar. Somit ist die Ursache des Hubs eindeutig das Terahertz-Signal. Zusätzlich wurde mit der Kamera und einem Reflexionsgitter (Gitterkonstante $0,2 \text{ mm}$) die Emission des Lasers über die erste Gitter-Ordnung spektroskopisch untersucht. Ein Laserprofil konnte mit der Kamera nur unter dem korrekten Drehwinkel des Gitters entsprechend der Terahertz-Laserwellenlänge beobachtet werden.

In der Zeitreihe wurde kurzzeitig eine $0,1 \text{ mm}$ dicke schwarze LD-PE Folie zwischen Laser und Kamera positioniert. Die Folie dämpft die Infrarotstrahlung deutlich, die THz-Strahlung aber kaum. Die vom Quarz-Fenster absorbierte CO_2 -Strahlung führt zu einer Erwärmung und thermischen Eigenstrahlung. Solange die Folie die infra-

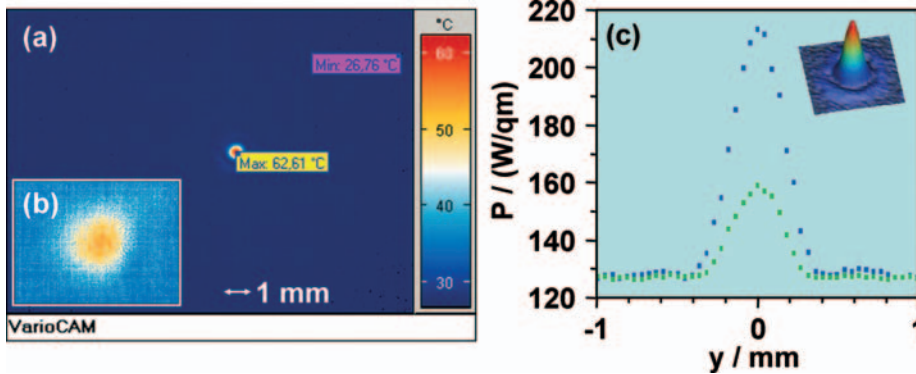


Bild 4: Aufnahmen eines 1,76 THz-Signals mit einer PE-Linse (Objektiv entfernt). (a) Temperatur-skalierte Aufnahme. (b) Signal aufgeweitet auf 5 mm Durchmesser (Bilder 320 x 240 Pixel). (c) Vertikaler Schnitt durch das Maximum des Signals bei 2,52 THz (grün), bei 1,76 THz (blau) und in 3D-Darstellung (44 x 44 Pixel bzw. 2 x 2 mm²)

rote Strahlung stärker dämpft als die Terahertz-Strahlung, ist die Wärmestrahlung des Quarz-Fensters (hellblau in Bild 2) nicht mehr sichtbar.

Es wurden inzwischen in weiteren Untersuchungen auch Aufnahmen bei deutlich niedrigeren Laserleistungen gemacht (**Bild 3**), insbes. am Strahlprofil eines Terahertz-Quantenkaskadenlasers [6], der eine mittlere Leistung zwischen 0,5 und 5 μW besitzt (Spitzenleistung 0,2 mW).

3 THz-Bildgebung mit PE-Linsen

Standard-Ge-Objektive für den Thermografie-Bereich von 7 bis 14 μm weisen mehrere Beschichtungen auf, die im Terahertz-Frequenzbereich absorbieren können. Zudem verlieren die Schichten aufgrund der größeren Wellenlänge ihre Antireflex-Eigenschaften. Das Objektiv wurde daher entfernt und durch eine feststehende weiße

Polyethylen-Linse mit einer Brennweite von 50 mm ersetzt. Zusätzlich wurde vor der Kamerakopf-Öffnung eine schwarze LD-PE Folie von 0,1 mm Dicke als Filter befestigt.

Bild 4a zeigt eine Aufnahme bei 1,76 THz mit Minimum- und Maximum-Indikatoren. Da jedes Pixel eine Kantenlänge von 45 μm hat, kann dem Array mit 320 x 240 Pixeln eine Dimension von 14,4 x 10,8 mm² zugeordnet werden. Der Strahl wurde hier auf <1 mm Durchmesser fokussiert. Der Hub aufgrund des Terahertz-Signals entspricht 36 K. Eine einzelne PE-Linse führt somit zu einer 36fach besseren Empfindlichkeit im Terahertz-Bereich. Eine Ursache sind geringere Reflexionsverluste wegen des niedrigeren Brechungsindex des Linsenmaterials PE ($n = 1,5$) im Gegensatz zum Standard-Objektiv ($n_{\text{Ge}} = 4,0$).

Bild 4b zeigt flächige Terahertz-Bildgebung mit dem gleichen Feld von 320 x 240 Pixel bei einem Strahl, der durch Fokusverschie-

bung auf ca. 5 mm Durchmesser aufgeweitet wurde. Im vertikalen Schnitt durch das Maximum des Terahertz-Signals (Bild 4c) entspricht ein Wert von ca. 215 W/qm einer Temperatur von 62,6°C bzw. 125 W/qm einem Wert von 26,8°C. Der Signalhub von 32 W/qm bei 2,52 THz ist kleiner als bei 1,76 THz (86 W/qm). Mit einem einzelnen Pyrodetektor wurde die Leistung direkt am Laserauskoppelfenster überprüft. Bei 2,52 THz beträgt die Leistung nur 30% der Leistung bei 1,76 THz. Im Vergleich der Messwerte kann eine um 25% höhere Empfindlichkeit bei 2,52 THz abgeleitet werden, relativ zu 1,76 THz. Dies korreliert mit der graduellen Reduktion der Empfindlichkeit des Sensors: das Optimum liegt bei 10 μm (30 THz).

Die Wechselwirkung der Ausleseroutine mit dem Lasersignalverlauf zeigt sich in einer Analyse der Zeitreihe des maximalen 1,76 THz-Signals (**Bild 5**). Die Ausleseelektronik des Detektors integriert das Signal für 8 ms. Bei 20 ms pro Einzelbild verbleiben 12 ms zur Datenverarbeitung und Auslesung. Das Lasersignal wird mit 10,3 Hz moduliert und ist damit asynchron zur 50 Hz Bildfrequenz bzw. zum 20ms-Zeitraster. Als Konsequenz erscheint die niedrigste Differenzfrequenz als Schwebung. Während der halben Signalperiode von 97 ms ist das Terahertz-Signal präsent. Jeweils 2 bis 3 Zeitkanäle zeigen daher Signalintensitäten unterbrochen von 3 bis 2 Kanälen ohne Signal. Wenn nötig können Kamera und Quelle durch Trigger synchronisiert werden.

4 Kalibrierung der Thermografie-Kamera mit einem Golay-Detektor

Mit Hilfe eines transmittierenden Metallgitters wurde der Laser bei 2,52 THz so weit abgeschwächt, dass die Leistung mit einem pneumatischen Golay-Detektor [6] kalibriert werden konnte, dessen Zerstörschwelle unter Dauerbestrahlung bei etwa 10 μW liegt. Der Golay-Detektor hat ein NEP von 320 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$ bei 10 Hz. **Bild 6** zeigt den mit der Kamera gemessenen Hub von 12,4 W/qm (12,4 $\mu\text{W}/\text{mm}^2$). Dieses Signal entspricht einer mit dem Golay-Detektor kalibrierten Gesamtleistung von 11 μW bei 2,52 THz. Ohne einfallende Laserstrahlung liegt das Rauschen bei einem Pegel von 125,2 W/qm mit einer Standardabweichung von 0,3 W/qm. Mit der Abschwächung erhalten wir somit ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 40:1. Ohne Abschwächung ergibt sich ein Verhältnis von mindestens 280:1 bei 1,76 THz und 100:1 bei 2,52 THz.

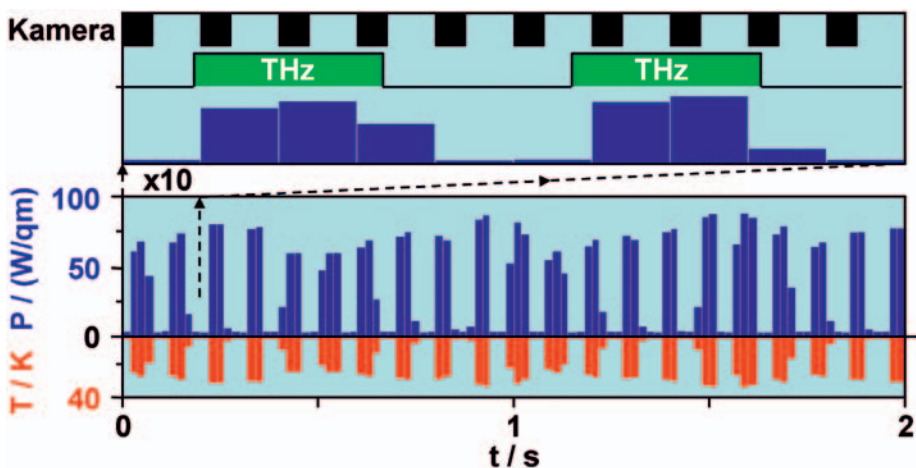


Bild 5: Zeitreihenanalyse des maximalen Signalhubs, dargestellt in Leistung (blau) und Temperatur (rot) bei 1,76 THz über 2 Sekunden (unten) sowie 10fache Ausschnittsvergrößerung über 0,2 Sekunden (oben). Der Messzyklus der Kamera unterteilt sich in die Integrationszeit von 8 ms (schwarz) und die Auslesezeit von 12 ms. Der Laser wird mit 10,3 Hz moduliert (grün)

5 Fazit und Ausblick

Die hier eingesetzte Thermografie-Kamera konnte bei mehr als der 17fachen Designwellenlänge (10 μm) verwendet werden, d.h. im Terahertz-Frequenzbereich. Werden solche Kameras für den Terahertz-Bereich optimiert, z.B. durch eine Polyethylen-Optik, so ist eine Terahertz-Bildgebung mit einem sehr guten Signal-zu-Rausch-Verhältnis möglich. Integrationszeiten von 4 ms für a-Si-Mikrobolometer erlauben heute schon potenziell höhere Bildfrequenzen von bis zu 250 Hz. Auch Reflexionsverluste am Germanium-Fenster im Detektor-Gehäuse könnten durch hochreines Silizium mit besseren Transmissionseigenschaften im Terahertz-Bereich reduziert werden. Dies ließe sich ohne größeren Aufwand in die Mikrobolometer-Produktion integrieren. Der Hersteller der untersuchten Mikrobolometerarrays (ULIS [4]) stellte auch Arrays mit 640 x 480 Pixeln vor [7]. Damit könnte prinzipiell ein hochauflösendes Kamera-System für den gesamten Wellenlängenbereich von 2 μm über zwei Größenordnungen bis in den Terahertz-Bereich entwickelt werden. Die Möglichkeit einer multispektralen Analyse vom nahen über das mittlere und ferne Infrarot bis in den THz-Bereich birgt ein großes Potential für zukünftige Terahertz-Anwendungen in der industriellen Prozess- und Qualitätskontrolle.

Danksagung

Wir danken Jean-Luc Tissot (Fa. ULIS, www.ulis-ir.com) sowie Stefan Hoffmann (Fa. PhotonIQ GbR, www.photoniq.de) für hilfreiche Kommentare.

Literaturhinweise:

- [1] www.pm.rub.de/pm2006/msg00267.htm „Das Geheimnis des Zuckerrwassers; Mit Terahertzstrahlung uraltes Rätsel gelöst - Wasser ist aktiv: RUB-Chemiker beenden Spekulationen“. Presseinfo Ruhr-Universität Bochum (8/2006)
- [2] A.W.M. Lee, Q. Hu, *Real-time, continuous-wave terahertz imaging using a microbolometer focal-plane array*, Opt. Lett. 30(19), 2563–2565, Oct. 2005
- [3] A.W.M. Lee, B.S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, J.L. Reno, *Real-Time Imaging using a 4.3-THz Quantum Cascade Laser and a 320 x 240 Microbolometer Focal-Plane Array*, IEEE Photonics Technology Lett. 18(13), 1415-1417, Jul. 2006
- [4] J.L. Tissot, C. Trouilleau, B. Fieque, A. Crastes, O. Legras, *Uncooled microbolometer detector: recent developments at ULIS*, Proc. SPIE 5957, 59570M-1 – 59570M-12 (2005)
- [5] homepage.rub.de/Erik.Bruendermann/thz-Vario-CAM.html (Videos von original Beispielmessungen, s. auch Webcode 6007)
- [6] J. Kunsch, E. Bründermann, *Erster mobiler stickstoffgekühlter Terahertz-Quantenkaskadenlaser*, Photonik 3, 88-90 (2006)
- [7] J.L. Tissot, B. Fieque, C. Trouilleau, P. Robert, A. Crastes, C. Minassian, O. Legras, *First demonstration of 640 x 480 uncooled amorphous silicon IRFPA with 25 μm pixel pitch*, Proc. SPIE 6206, (2006)

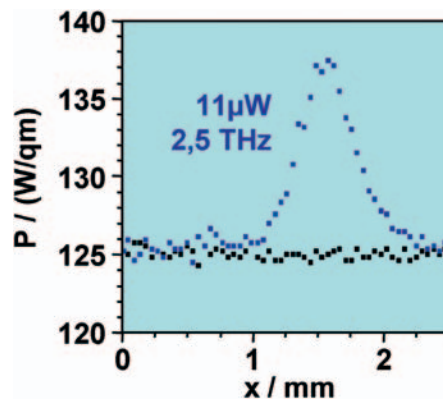


Bild 6: Abgeschwächtes Signal (blau) entspr. 11 μW Gesamtleistung bei 2,52 THz, sowie Rauschen (schwarz) ohne Laserstrahlung

Ansprechpartner:

Dr. Erik Bründermann
Ruhr-Universität Bochum
Physikalische Chemie II,
NC 7/68
D-44780 Bochum
Tel. 0234/32-24239
Fax 0234/32-14183
eMail: erik.bruendermann@rub.de
www.rub.de/pc2/thz_de.html
homepage.rub.de/erik.bruendermann



Dipl.-Phys. Jens Ransch
Ruhr-Universität Bochum
Experimentalphysik II
D-44780 Bochum
Tel. 0234/32-23678
Fax 0234/32-14741
eMail: jens.raensch@rub.de
Internet: www.ep2.rub.de



Dr. Matthias Krauß
InfraTec GmbH
Infrarotsensorik und
Messtechnik
Gostritzer Str. 61-63
D-01217 Dresden
Tel. 0351/871-8620
Fax 0351/871-8727
m.krausz@InfraTec.de
www.InfraTec.net



Dipl.-Phys.
Johannes Kunsch
Gruppenleiter IR-Detektoren und Diodenlaser
Laser Components GmbH
Werner-von-Siemens-Str. 15
D-82140 Olching
Tel. 08142/2864-28
Fax 08142/2864-11
eMail: j.kunsch@lasercomponents.com
Internet: www.lasercomponents.com

