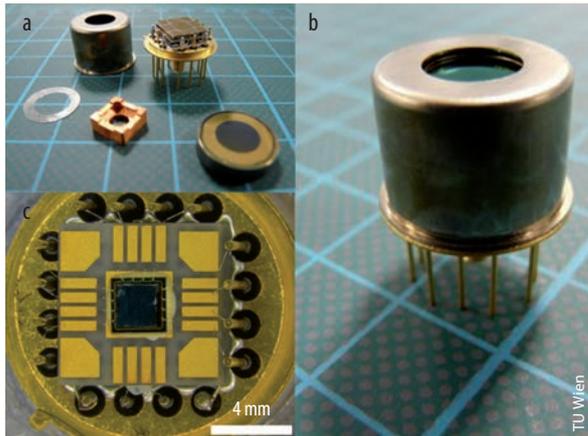


■ Alternativer Infrarotsensor

Ein Quantenkaskadendetektor umgeht die Nachteile anderer Wärmesensoren.

Detektoren für das mittlere Infrarot spielen eine wichtige Rolle bei der Wärmebildung, in der Fernerkundung, in der Astronomie und im militärischen Bereich. Um Infrarotstrahlung nachzuweisen, kommen verschiedene Detektionsprinzipien zur Anwendung.



Demonstrator des Quantenkaskadendetektors: die Komponenten (a), alles verpackt im Gehäuse (b) und das Array mit Beschaltung (c).

Etabliert sind etwa thermische Detektoren wie Bolometer, deren elektronische Bauteile aufgrund der Erwärmung durch die Strahlung ihren elektrischen Widerstand ändern. Das geht nicht besonders schnell oder präzise, reicht aber für Wärmebildkameras völlig aus. Zudem gibt es photonische Detektoren, deren Nachweisprinzip darauf beruht, dass sie die Infrarotphotonen absorbieren und dadurch Elektronen auf ein höheres Energieniveau heben. Dieser Effekt lässt sich messen. Ihr Problem ist häufig der Dunkelstrom: Weil für ihren Betrieb eine elektrische Spannung anliegen muss, gelangen einzelne Elektronen bereits ohne einfallendes Infrarotlicht in einen höheren Energiezustand. Das macht eine Kühlung erforderlich.

So genannte Quantenkaskadendetektoren (QCDs) kommen ohne Spannung aus und sprechen relativ schnell an. Sie beruhen auf einem ähnlichen Prinzip wie Quantenkaskadenlaser: Die angeregten Elektronen werden nicht vom Valenz- ins Leitungsband gehoben, sondern wandern durch Intersubband-Übergänge innerhalb des Leitungs-

bands. Möglich machen das fein aufeinander abgestimmte Quantentröge, die als dünne Schichten ausgeführt sind. Forscher der TU Wien, der Universität Neuchâtel, der Österreichischen Akademie der Wissenschaften sowie des Fraunhofer-Instituts für Zuverlässigkeit und Mikrointegration haben nun gemeinsam einen solchen QCD entworfen, charakterisiert und als Demonstrator aufgebaut.¹⁾

Er ist auf eine Wellenlänge von $4,3 \mu\text{m}$ ausgelegt und besteht aus einer Matrix mit 8×8 Pixeln. Die Herstellung erfolgte mit gängigen Verfahren der Mikrobearbeitung; eine spätere Skalierung der Pixelzahl ist möglich. Da solche QCDs nur für Strahlung empfindlich sind, deren elektrische Feldkomponente in Wachstumsrichtung zeigt, haben die Wissenschaftler ein Beugungsgitter aus Gold auf die lichtempfindlichen Bereiche der Pixel aufgebracht. Als Materialsystem dient InGaAs/InAlAs, das die Forscher auf einem InP-Substrat aufwachsen ließen. Die Pixel messen $109 \mu\text{m}$ mal $109 \mu\text{m}$. Ihre Empfindlichkeit erreicht 16 mA/W bei Raumtemperatur, was sie für zahlreiche Anwendungen geeignet macht.

■ Kühle Kleidung

Stoffe aus modifiziertem Polyethylen führen wirkungsvoll Wärme ab.

Kleidung sorgt idealerweise für zwei Dinge: Wärme und Würde. Während man sich im Winter über die wärmende Wirkung der Kleidung freut, kann sie im Hochsommer rasch unangenehm werden. Funktionskleidung, die für sportliche Aktivitäten gedacht ist, schafft als Alltagskleidung keine Abhilfe, weil sie ihre Wirkung erst entfaltet, wenn man bereits zu schwitzen beginnt. Der menschliche Körper emittiert Strahlung im mittleren Infrarot zwischen 7 und $14 \mu\text{m}$, deren Maximum bei $9,5 \mu\text{m}$ liegt. Leider haben viele Textilmaterialien, die im sichtbaren Licht opak sind, molekulare Bindungen, die im mittleren Infrarot ebenfalls absorbieren. Auch Baumwolle gehört dazu.

Wissenschaftler der Stanford University haben daher mit Polyethylen (PE) experimentiert, das nur schmale Absorptionsmaxima im Infrarot aufweist.²⁾ Allerdings ist PE im sichtbaren Licht transparent. Ein nanostrukturiertes PE, das als Separator in Lithium-Ionen-Akkus verwendet wird (NanoPE), weist Poren auf, die Durchmesser zwischen 50 und 1000 nm haben und als wirkungsvolle Streuzentren für sichtbares Licht agieren. Physikalisch gesehen kann NanoPE Wärme und Würde in Einklang bringen.

Die Forscher haben die kühlende Wirkung des Materials auch experimentell nachgewiesen: NanoPE erhöhte die simulierte Hauttemperatur von $34 \text{ }^\circ\text{C}$ nur um $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$, Baumwolle dagegen um $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$ und ein Textilstoff auf PE-Basis um $2,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Doch für den Tragekomfort eines Materials bedarf es natürlich noch mehr: Luftdurchlässigkeit, Flüssigkeitstransport und Robustheit. Die Wissenschaftler haben NanoPE daher gezielt mit $100\text{-}\mu\text{m}$ -Löchern perforiert, mit einem hydrophilen Stoff beschichtet und zwischen jeweils zwei so veredelte Materialschichten ein Baumwollnetz laminiert. Im Vergleich zu reiner Baumwolle und dem käuflichen Textilstoff auf PE-Basis konnte das veredelte NanoPE in allen Belangen mithalten.

Das Ganze war nicht nur ein intellektueller Zeitvertreib. Weniger wärmende Kleidung könnte dafür sorgen, dass Klimaanlage bei höheren Temperaturen arbeiten können. Damit ließe sich Energie



Modifiziertes NanoPE-Material hat eine relativ unscheinbare Farbe.

1) A. Harber et al., Opt. Express 24, 17041 (2016)

2) P.-C. Hsu et al., Science 353, 1019 (2016)

einsparen. So würde zum Beispiel eine um ein bis vier Grad höher eingestellte Klimaanlage den Kühlbedarf in Gebäuden um bis zu 45 Prozent senken.

■ Alternativ gekühlt

Eine Wärmepumpe nutzt den elastokalorischen Effekt aus.

Für das Kühlen, egal ob beim Kühlschrank oder bei der Klimaanlage, hat sich das technische Konzept in mehr als hundert Jahren nicht wesentlich verändert: Ein Kältemittel wird in einem geschlossenen Kreislauf immer wieder komprimiert und entlastet, um ein bestimmtes Volumen abzukühlen. Diese Form des Kühlens ist sehr energieintensiv, sodass bereits seit längerem an Alternativen geforscht wird, die eine höhere Energieeffizienz aufweisen. Wissenschaftler der TU Dänemark in Roskilde und der slowenischen Universität Ljubljana ha-

ben nun gemeinsam demonstriert, wie der elastokalorische Effekt dazu dienen kann, eine recht effektive Wärmepumpe aufzubauen.³⁾

Der elastokalorische Effekt äußert sich in bestimmten Materialien: Bei der Änderung eines elektrischen Feldes im Material kühlt sich dieses ab oder erwärmt sich. Die Forscher haben für ihre Wärmepumpe ein Gedächtnismetall verwendet, das auf einer Nickel-Titan-Legierung beruht. Mehrere dünne Streifen der Legierung spannten sie in eine Halterung, mit der sich die Streifen mehrmals pro Minute um mehrere Prozent zyklisch dehnen und entlasten lassen. Die Ni-Ti-Legierung wechselt dabei zwischen einer kubischen Austenit- und einer metastabilen Martensit-Phase. Beim Übergang in die Martensit-Phase erwärmt sich die Legierung, umgekehrt kühlt sie sich ab. Zwischen den Enden der Streifen ist eine Temperaturdifferenz von maximal 15 K messbar. Die Forscher brach-

ten die beiden Enden mit einem Kühlkreislauf in Kontakt, sodass die in ihm zirkulierende Flüssigkeit sich durch die zyklische mechanische Dehnung und Entlastung der Ni-Ti-Streifen regelmäßig erwärmt und abkühlte.

Der Laboraufbau dieser Wärmepumpe erzielte eine Leistung von maximal 800 Watt pro Kilogramm Gedächtnismetall, was 20 Prozent unter dem theoretisch abgeschätzten Wert liegt. Um von diesem Machbarkeitsnachweis dazu zu kommen, den für Kühlschränke relevanten Temperaturbereich abzudecken, sind andere Gedächtnismaterialien gefragt. Über eine verbesserte Leistung hinaus müssen die Legierungen so haltbar sein, dass sie auch Millionen von Be- und Entlastungen unbeschadet überstehen. Nicht zuletzt erfordert die technische Umsetzung weitere konstruktive Maßnahmen, um zum Beispiel unerwünschte Wärmesenken zu vermeiden.

Michael Vogel

3) J. Tušek et al., Nature Energy, DOI: 10.1038/nenergy.2016.134