

ROBERT-WICHARD-POHL-PREIS

Jenseits unserer Wahrnehmung

Mit Wärmebildkameras im Infraroten sehen.

Michael Vollmer

Die visuelle menschliche Wahrnehmung in andere Spektralbereiche zu erweitern – dafür gibt es viele, technisch sogar recht einfache Möglichkeiten. Insbesondere die Infrarotkameras haben sich für Wellenlängen unter $15\ \mu\text{m}$ zu hervorragenden quantitativen Messinstrumenten entwickelt. Zum Einsatz kommen sie in der Grundlagen- und angewandten Forschung sowie zunehmend auch in der Lehre der Physik auf Hochschul- und Schulniveau.

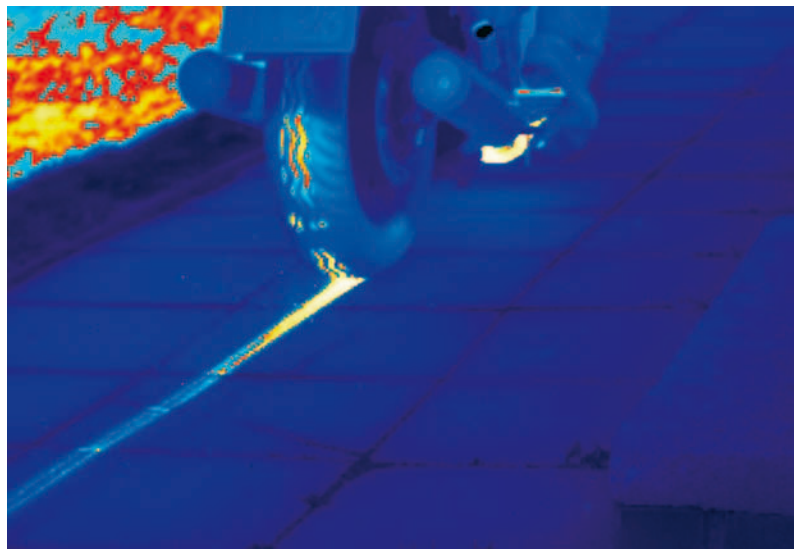
Unter Infrarotkameratechnik, auch Wärmebildtechnik oder Thermographie genannt, versteht man bildgebende Verfahren im infraroten Spektralbereich mit Wellenlängen von etwa $0,9\ \mu\text{m}$ bis $14\ \mu\text{m}$. Die ursprünglich vor allem militärische Nutzung hat sich in den letzten Jahrzehnten auf weitere Anwendungen in Forschung, Industrie und Technik ausgeweitet. Der Fortschritt in der Mikrosystemtechnik, Optoelektronik und IR-Technik führte einerseits zu immer größerer Produktvielfalt, andererseits zu deutlich preiswerteren und einfacheren Geräten.

Das große Potenzial von IR-Kameras für Lehrzwecke wurde früh erkannt. Dadurch gelang es, insbesondere auch schwer zu visualisierende thermische Vorgänge aus vielen Bereichen der Physik zu untersuchen sowie moderne Anwendungen in der Industrie beispielhaft zu diskutieren [1–5].

Wie funktionieren Infrarotkameras?

Wärmebildsysteme basieren auf der Tatsache, dass jedes Objekt mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt elektromagnetische Strahlung im infraroten Spektralbereich aussendet. Thermographie detektiert diese Wärmestrahlung und wandelt sie in entsprechende Temperaturprofile der Objekte um. Thermokameras erfassen dabei berührungslos die ausgesandte Eigenstrahlung der Objekte.

Grundlage aller Infrarotsensoren sind das auf Kirchhoff zurückgehende Gesetz zur Absorption und Emission von Strahlung durch Körper sowie die Gesetze der thermischen Strahlung, d. h. Schwarzkörperstrahlung. Demzufolge senden die zu vermessenden Körper thermische Strahlung aus, die lediglich von der Temperatur T und dem Emissionsgrad ε bestimmt wird [5–8]. Der Emissionsgrad hängt von der Oberflä-



Bremst ein Motorrad mit blockiertem Reifen, erwärmen sich durch die Reibung sowohl der Asphalt als auch der

Reifen. Dies zeigt eine Momentaufnahme mit einer IR-Kamera.

che und dem Material des Körpers ab. Man unterscheidet schwarze, graue und selektive Strahler.

Schwarze Strahler haben $\varepsilon = 1$ über den gesamten Spektralbereich, bei grauen ist $\varepsilon < 1$, unabhängig von der Wellenlänge, und bei selektiven Strahlern hängt ε von der Wellenlänge ab. Für praktische Fälle in der Thermographie lassen sich viele Substanzen als graue Strahler ansehen. Bis auf polierte Metalle liegen deren Emissionsgrade meist oberhalb von 0,8.

Eine IR-Kamera detektiert nicht nur die vom Objekt ausgesandte und durch die Atmosphäre geschwächte

KOMPAKT

- IR-Kameras detektieren die ausgesandte Eigenstrahlung der zu vermessenden Körper. Neben der Temperatur bestimmt der Emissionsgrad die Strahlung, die von der Oberfläche und dem Material des Körpers abhängt.
- Thermographie nutzt nur bestimmte Wellenlängenbereiche der infraroten Strahlung, die mit den Gesetzen der Wärmestrahlung und der Transmission der Atmosphäre vereinbar sind.
- IR-Kameras visualisieren Aufheiz- oder Abkühlkurven und die Erwärmung von Objekten, die durch Reibung oder inelastische Stöße hervorgerufen werden. Sie erfassen unterschiedliche optische Materialeigenschaften von Objekten in verschiedenen Spektralbereichen und detektieren Gase.

Prof. Dr. Michael Vollmer, Fachbereich Technik, Fachhochschule Brandenburg, Magdeburger Str. 50, 14770 Brandenburg an der Havel – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Robert-Wichard-Pohl-Preises 2013 auf der DPG-Frühjahrs-tagung in Dresden.

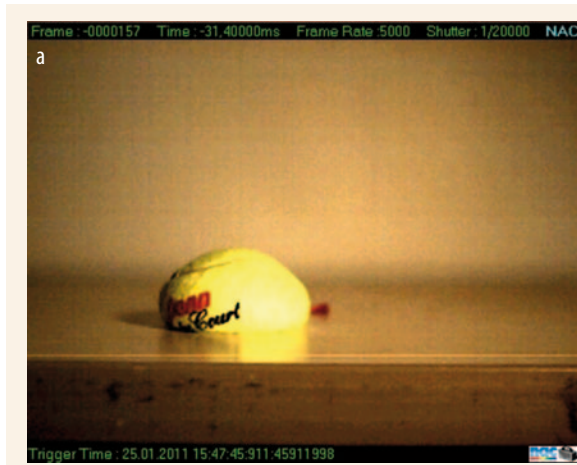
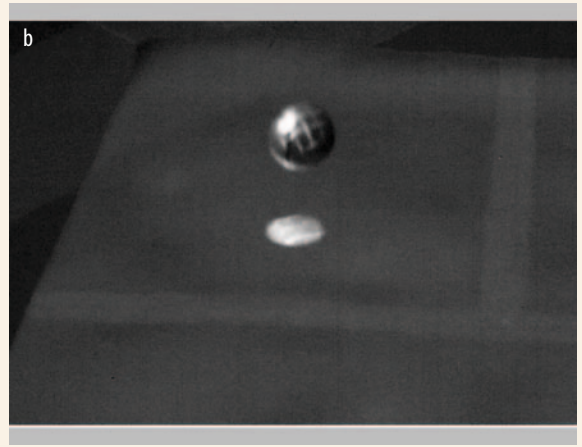


Abb. 1 Bei einem inelastischen Stoß eines Tennisballs (a) erwärmen sich die Unterlage und der Ball. Sogar das Gitter der



Schlägerbespannung ist in der IR-Aufnahme zu erkennen, da sich der Ball durch den Stoß mit dem Schläger erwärmt (b).

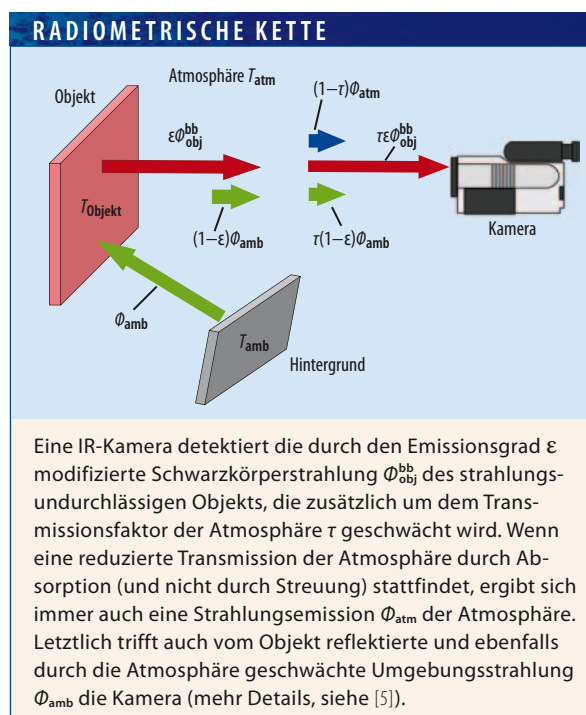
Strahlung, sondern zusätzlich auch die am Objekt reflektierte Umgebungsstrahlung sowie Emissionen der Atmosphäre (siehe **Infokasten**). Vom Gesamtbereich der infraroten Strahlung ($\lambda = 0,78 - 1000 \mu\text{m}$) nutzt Thermographie nur ausgewählte Wellenlängenbereiche, nämlich die Fenster von $0,9$ bis $1,7 \mu\text{m}$ (Kurzwele, SW), von 3 bis $5 \mu\text{m}$ (Mittelwele, MW) sowie von 7 bis $14 \mu\text{m}$ (Langwele, LW). Dies liegt zum einen an den Gesetzen der Wärmestrahlung, zum anderen an der Transmission der Atmosphäre aufgrund von Wasserdampf und CO_2 . Dabei ist zu berücksichtigen, welche Detektoren für die jeweiligen Wellenlängen verfügbar sind.

Die ersten Kamerasysteme nutzten Einzeldetektoren, z. B. aus dem Halbleiter Quecksilber-Cadmium-Tellurid $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, der günstige Eigenschaften als Detektormaterial aufweist. Das Bild entsteht durch optische Abrasterung des Bildfelds. Der Vorteil eines solchen Systems ist, dass sich jeder Bildpunkt mit

demselben Detektor vermessen lässt, was sich günstig auf das Bildrauschen auswirkt. Nachteilig ist jedoch die komplizierte optische Mechanik, welche die minimale Bildaufbauzeit begrenzt. Mithilfe moderner Mikrotechnologie gelang es, diese Einzeldetektorsysteme durch FPA-Detektoren (focal plane arrays) abzulösen. Ein Detektorarray besteht dabei aus vielen nahezu identischen Einzeldetektoren mit Pixelgrößen bis herunter zu 15 bis $20 \mu\text{m}$. Das Bild entsteht durch eine optische Abbildung mit speziellen Linsen, die im IR-Bereich transparent sind. Der heutige Standard beträgt mittlerweile 640×480 Bildpunkte. Kommerzielle High-End-Geräte verfügen über 1024×1024 oder 1344×768 Bildpunkte. Im preiswerteren Low-End-Bereich finden sich Produkte mit 160×120 oder nur 80×80 Bildpunkten. Typische Bildtiefen sind 14 Bit pro Pixel.

FPA-Detektoren haben gegenüber Einzeldetektoren den Vorteil, schnell und zeitgleich das Bild eines ausgedehnten Objektbereichs zu erzeugen. Nachteilig ist, dass jeder Detektor bei quantitativen Messungen seine eigene Kennlinie hat. Man kann zwar mit geeichten Emissionsgradstandards alle Einzeldetektoren durch eine „non uniformity correction“ (NUC) kalibrieren, allerdings bleibt die resultierende minimale Temperaturauflösung bei Array-Detektoren immer größer als bei einem Einzeldetektor.

In kommerziellen Thermographiesystemen sind heute gekühlte Quantendetektoren, zum Beispiel aus Indium-Antimonid (InSb) oder „Quantum Well Infrared Photodetectors“ (QWIPs) im Einsatz, die den inneren photoelektrischen Effekt zum Nachweis nutzen. Zudem detektieren im LW-Bereich auch Mikrobolometer direkt die absorbierte Wärmeenergie durch die damit verbundene Temperaturerhöhung, z. B. als Widerstandsänderung. Neben den detektorspezifischen Größen und der Transmission der verwendeten Optik hängt die Signalgröße von der Temperatur und dem Emissionsgrad des emittierenden Körpers ab. Bei einer Änderung der Temperatur des Körpers ändert sich die Strahlungsemission gemäß dem Planck-Gesetz und damit auch das empfangene Signal. Diese Signal-



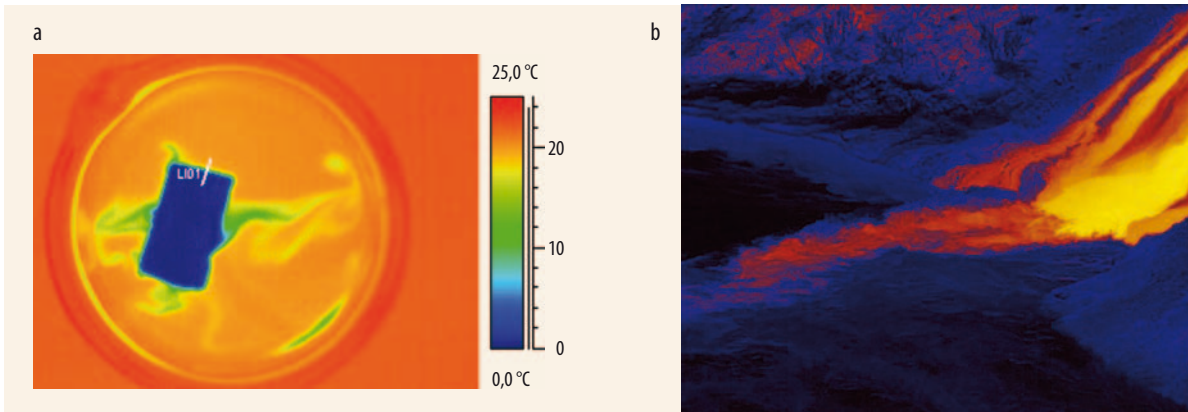


Abb. 2 Löst sich ein Eiswürfel in Wasser, ist die konvektive Durchmischung im IR-Bereich sichtbar (a). Mit Thermographie ist auch erkennbar, wie das sehr heiße Wasser des Geysirs

Excelsior in den kalten Firehole River im Yellowstone-Nationalpark strömt (b).

abhängigkeit von der Temperatur lässt sich quantitativ auswerten, sofern der Emissionsgrad bekannt ist. Dazu werden die Kameras mit Schwarzkörperstrahlern vorgegebener Temperatur kalibriert.

Mit IR-Kamerasystemen lassen sich auch bewegte Vorgänge erfassen. Die einfachen Systeme arbeiten mit maximal 50 Bildern pro Sekunde, moderne Forschungsgeräte erreichen mehr als 30 kHz, allerdings bei stark reduzierter Pixelzahl. Für aktive Messungen beleuchtet man ein Objekt gepulst oder moduliert (Puls- bzw. Lock-in-Thermographie), was eine Detektion von Strukturen unterhalb der Oberfläche von Objekten gestattet [9]. Die Ansteuerung der Integrationszeiten der Einzeldetektoren erlaubt ein so genanntes Super-Framing. Dabei zeichnen die Detektoren, bei entsprechend reduzierter Bildwiederholrate, gleichzeitig mehrere Aufnahmen der Objekte mit verschiedenen Integrationszeiten auf, um die jeweils geeignetsten (nicht gesättigten) Pixel danach in einem Bild zu überlagern. So reicht ein einziges Bild aus, um Informationen über sehr stark ausgedehnte Temperaturbereiche darzustellen. Dies ist von Vorteil, wenn ein besonders heißes Objektteil die Strahlungsemission dominiert.

Die folgenden Beispiele verdeutlichen die Potenziale der Thermographie (für weitere Beispiele und Details

zur zugrundeliegenden Physik siehe [5]). Die Aufnahmen wurden mit verschiedenen IR-Kameras (LW, MW und extended MW mit Pixelzahlen von 320×240 bzw. 640×512) erstellt. Es ist üblich, für das ganze Bild einen festen Emissionsgrad festzulegen. Daher stellen Thermographiebilder im Allgemeinen eine Mischung von Temperatur und Emissionsgradkontrast dar. Über Analysesoftware lassen sich diese beiden Einflussgrößen voneinander trennen.

Mit Wärmebildern sehen

In Experimentalvorlesungen bieten sich IR-Kameras immer dann an, wenn Energieumwandlungen dazu führen, dass sich die beteiligten Objekte erwärmen. Dies betrifft beispielsweise Reibungsvorgänge oder inelastische Stoßprozesse. Ein Beispiel ist die Momentaufnahme des Bremsvorgangs eines Motorrads mit teilweise blockiertem Reifen (**Abb. auf S. 47**). Durch die Reibung erwärmen sich sowohl die Unterlage als auch der Reifen.

Bei Ballspielen treten praktisch immer inelastische Stöße auf. Mit einer normalen Hochgeschwindigkeitskamera lässt sich der Aufprall eines Tennisballs auf eine Unterlage aufnehmen (**Abb. 1a**). Dabei verformt

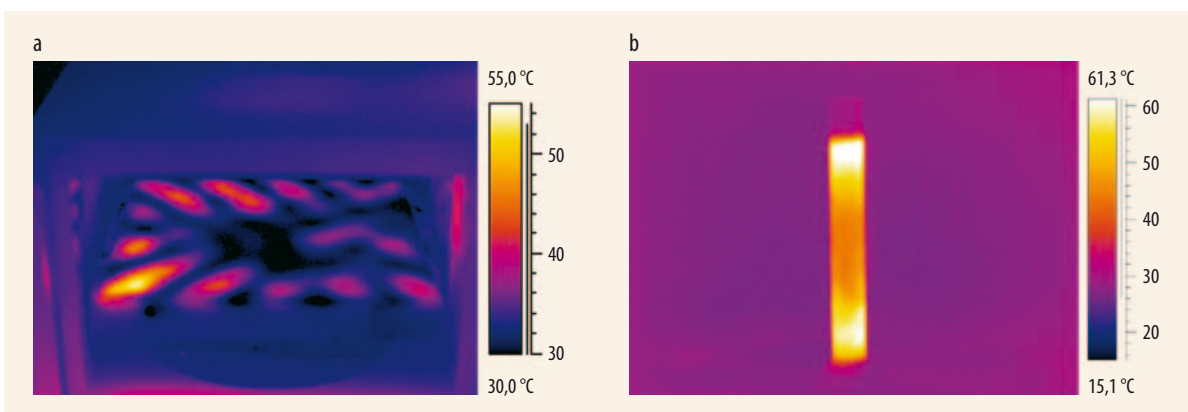


Abb. 3 Thermographie visualisiert die horizontale und vertikale Modenstruktur von Haushaltsmikrowellen: Bringt man eine angefeuchtete Glasplatte in eine Mikrowelle, so ist nach kurzem

Betrieb und Öffnen der Tür die horizontale Modenstruktur erkennbar (a). Ein wassergefüllter Zylinder zeigt in Abhängigkeit von der Höhe Temperaturunterschiede von mehreren 10°C (b).

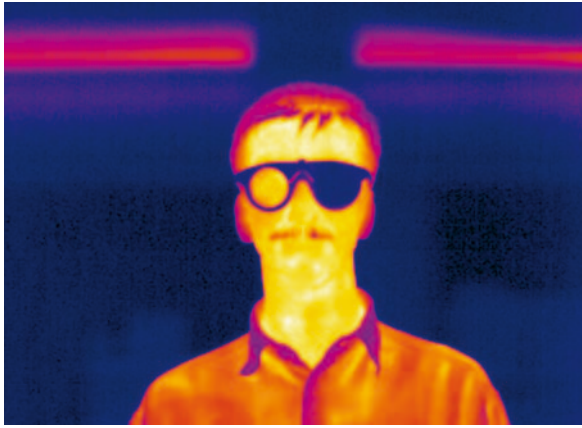


Abb. 4 Eine Brille mit „Gläsern“ aus Glas (rechts) und NaCl (links) offenbart die unterschiedlichen optischen Eigenschaften: Während das verwendete Glas für LW-Wärmestrahlung nicht durchdringbar ist, zeigt NaCl eine hohe Transmission.

sich der Ball enorm und verliert im gezeigten Beispiel etwa drei Viertel seiner ursprünglichen kinetischen Energie. Deren Umwandlung führt dazu, dass sich sowohl der Ball als auch die Unterlage erwärmen. In der Momentaufnahme aus einer IR-Bildsequenz mit 400 Hz (Abb. 1b) erkennt man nach dem Aufprall die Erwärmung der Unterlage, die in der Detailanalyse auch Unterschiede zwischen Gummierung und Ballbehaarung zeigt. Ohne weiteres sind Temperaturänderungen von 5 bis 10 K für Zeiträume bis hin zu einer Minute zu beobachten. Zudem sieht man die Erwärmung des oberen Ballteils am Gitter der Schlägerbespannung. Im weiteren zeitlichen Verlauf lässt sich auch der zuvor im Bodenkontakt befindliche erwärmte Ballteil beobachten.

Neben Experimenten aus der Mechanik eignet sich Thermographie naturgemäß dazu, rein thermische Vorgänge wie beispielsweise Aufheiz- oder Abkühlkurven verschiedener Objekte zu visualisieren [10]. Weitere Beispiele der Wärmelehre zeigen Momentaufnahmen der Oberfläche von Wasser bei konvektiven Durchmischungen von Eis in Wasser (Abb. 2a) und den heißen Einfluss aus einem Geysirbecken in einen kalten Fluss (Abb. 2b) [11].

Ferner gelingt es, horizontale und vertikale Moden von Mikrowellengeräten mit IR-Kameras nachzuweisen [5, 12]. Dazu wurde eine passgenaue Glasplatte leicht angefeuchtet in eine Haushaltsmikrowelle ohne Drehteller gelegt. Nach kurzem Betrieb ist die erwartete horizontale Modenstruktur aufgrund der stehenden Wellen im Mikrowellenresonator erkennbar (Abb. 3a). Ebenso zeigt ein dünner wassergefüllter Messzylinder im Zentrum der Mikrowelle deutlich unterschiedliche Temperaturen als Funktion der Höhe (Abb. 3b).

In der Optik eignet sich Thermographie sehr gut, um unterschiedliche Materialeigenschaften in verschiedenen Spektralbereichen zu erfassen. Mikroskopisch raue Oberflächen können im LWIR-Bereich spiegelnde Reflexionen aufweisen, selbst wenn diese im sichtbaren nur diffus sind [5]. Mit IR-Kameras kann man auch ohne weiteres durch nicht zu stark dotierte Silizium-Wafer hindurch IR-Strahlung detektieren, während diese im Sichtbaren undurchsichtig sind. Umgekehrt sind einige im sichtbaren Bereich transparente Materialien wie bestimmte Gläser im IR undurchsichtig, während andere wie NaCl in beiden Spektralbereichen eine hohe Transmission zeigen (Abb. 4).

Auch in vielen Bereichen der Forschung kommen IR-Kameras zum Einsatz. Dabei stehen drei Eigenschaften der Kameratechnik im Vordergrund, nämlich die Möglichkeit schneller zeitaufgelöster Messungen mit Zeitkonstanten für die Bildaufnahme im μ s-Bereich, die Nutzung von Mikroskopobjektiven mit Ortsauflösungen bis hinunter zu $5\ \mu\text{m}$ sowie der Einsatz von schmalbandigen Spektralfiltern, die spektroskopische Messungen gestatten.

So lassen sich Spektralfilter dazu nutzen, Gas-moleküle zu detektieren. Viele Moleküle sind in der Lage, thermische IR-Strahlung zu absorbieren und zu emittieren, falls sie im entsprechenden Wellenlängenbereich erlaubte Schwingungs-Rotationsbanden aufweisen. Insbesondere muss sich das elektrische Dipolmoment bei der Anregung ändern. Dies ist im Allgemeinen bei mehratomigen heteronuklearen Molekülen wie HCl, CO, CO₂ oder H₂O der Fall. Da in der

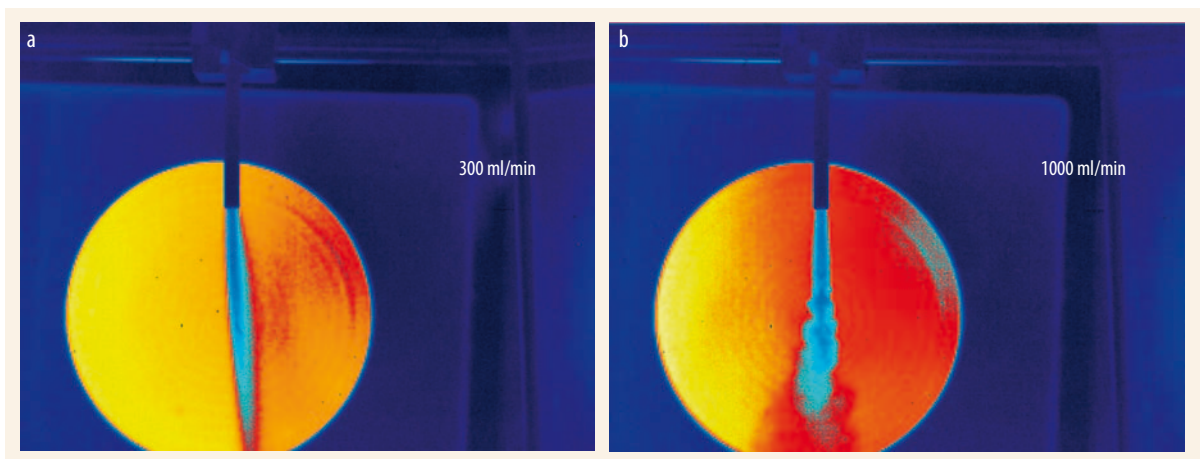


Abb. 5 Definierte Volumengasströme von CO₂ sind bei Raumtemperatur vor einem Schwarzkörperstrahler (runde Fläche) mit einer Temperatur von 50 °C erkennbar. Erhöht man den

Gasfluss von 300 (a) auf 1000 ml/min (b) aus einem Schlauch mit sechs Millimeter Innendurchmesser, geht die laminare Strömung in eine turbulente über.

Atmosphäre immer Wasserdampf und etwa 390 ppm CO₂ vorliegen, zeigt Luft charakteristische Absorptionsbanden, zwischen denen die Wellenlängenbereiche SW, MW und LW von Thermokameras definiert werden.

Da aber auch viele andere industriell genutzte Gase Absorptionsbanden im Infrarot haben, ist es möglich, die Absorption bestimmter Gase gezielt auszunutzen, um diese qualitativ oder quantitativ zu bestimmen. So detektieren seit Kurzem spezielle Kamerasysteme Kohlenwasserstoffe in der petrochemischen Industrie und SF₆ in der chemischen Industrie. Dabei steigt die Empfindlichkeit der Systeme, wenn man entweder gekühlte Schmalbandfilter oder schmalbandige Detektoren bei den jeweiligen Absorptionsbanden nutzt.

Da viele andere industriell genutzte Gase Absorptionsbanden gerade in den MW und LW Bereichen haben, ist es aber auch möglich, CO₂ zu detektieren. So ließen sich wenige Volumenprozent CO₂ beim Ausatmen anschaulich nachweisen und definierte Gasströme im Bereich von 1 ml/min bis hin zu etwa 1000 ml/min vor definierten Hintergrundstrahlern untersuchen [5]. Zudem ist der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung bei Erhöhung des Gasflusses aus einem Schlauch erkennbar (Abb. 5). Temperaturunterschiede von wenigen Kelvin zwischen Gas und Hintergrund reichen dabei aus, um Volumenströme bis hinab zu 1 ml/min zu detektieren.

Kommerzielle Anwendung

Nicht zuletzt lassen sich IR-Kamerasysteme in großem Maß industriell nutzen. Die Hauptanwendung liegt in der Qualitätssicherung, bei vorbeugender Instandhaltung sowie bei Produktentwicklung und -design. Spezielle Beispiele reichen von elektronischen Platinen über die Analyse von Anlagentechnik – auch in der Automobiltechnik – bis hin zur berührungslosen Untersuchung von Hochspannungsleitungen. In der Öffentlichkeit ist IR-Kameratechnik vor allem durch leider häufig nur unkritisch wiedergegebene und oft unzureichend diskutierte Bilder der Gebäudethermographie bekannt [5, 13]. Bei deren Interpretation gilt es in besonderem Maß, Vorsicht walten zu lassen. Wegen des Preisverfalls im Niedrigpreissegment der Kamerasysteme ist leider mit einer Zunahme thermographischer Bilder in der Werbung und auch in den Medien mit teils krassen Fehlinterpretationen zu rechnen. Ein Fachmann muss immer in der Lage sein, eine Vielzahl möglicher Einflüsse zu bewerten, so z. B. Wandaufbau, normale Geometrieeffekte, Sichtfaktoren für Strahlungsaustausch zu Nachbarobjekten und Himmel,

Emissionsgrade verschiedener Materialien, Wind und Niederschlag (Taupunkttemperaturen in Ecken), aber auch normale Aufheizung am Tag (Sonne/Schattenwürfe) und Abkühlung in der Nacht (Strahlungskühlung) wegen teils sehr großer thermischer Zeitkonstanten von Gebäuden. Bunte Falschfarbenbilder mit IR Kameras kann jeder machen, sie aber sinnvoll zu interpretieren, will gelernt sein.

Danksagung

Ich bedanke mich insbesondere bei meinem Kollegen Klaus-Peter Möllmann für unsere jahrelange sehr gute Zusammenarbeit im Bereich Infrarottechnik. Weiterer Dank gebührt Frank Pinno und Detlef Karstädt (Brandenburg) sowie Joe Shaw und Paul Nugent (Bozeman/USA).

Literatur

- [1] D. Karstädt et al., Praxis der Naturwissenschaften Physik **48**, 24 (1999)
- [2] K.-P. Möllmann und M. Vollmer, Physikalische Blätter **56**, 65 (2000)
- [3] D. Karstädt et al., The Physics Teacher **39**, 371 (2001)
- [4] K.-P. Möllmann und M. Vollmer, Eur. J. Phys. **28**, 37 (2007)
- [5] M. Vollmer und K.-P. Möllmann, Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, Wiley (2010)
- [6] W.L. Wolfe und G.J. Zissis (Hrsg.), The Infrared Handbook, The Infrared Information Analysis Center, Environmental Research Institute of Michigan, USA, 4. Auflage (1993)
- [7] G.C. Holst, Common Sense Approach to Thermal Imaging; SPIE Optical Engineering Press, Washington (2000)
- [8] N. Schuster und V. G. Kolobrodov, Infrarotthermographie, Wiley-VCH, Berlin (2000)
- [9] P.O. Moore (Hrsg.), Nondestructive testing handbook Vol. 3: Infrared and thermal testing, 3. Auflage, Am. Soc. for nondestructive testing, Inc., Columbus / Ohio (2001)
- [10] M. Vollmer, Eur. J. Phys. **30**, 1063 (2009)
- [11] Messungen von J. Shaw, P. Nugent und M. Vollmer
- [12] M. Vollmer, Physics Education **39**, 74 (2004)
- [13] M. Vollmer, K.-P. Möllmann und F. Pinno, Physik in unserer Zeit **42**, 176 (2011)

DER AUTOR

Michael Vollmer (FV Didaktik der Physik) studierte Physik in Heidelberg. Zwischen dortiger Promotion und Habilitation verbrachte er ein Postdoc-Jahr in Berkeley, USA. Seine damaligen Forschungsinteressen lagen im Bereich hochauflösender Laserspektroskopie sowie der Cluster- und Oberflächenphysik. Nach einer Zwischenstation in Kassel kam er 1994 an die Fachhochschule in Brandenburg, wo er seitdem wissenschaftliche Themen im Bereich atmosphärischer Optik, Grundlagen und Anwendungen der Infrarottechnik sowie der Didaktik der Physik bearbeitet. Dabei vermittelt er auch der Öffentlichkeit moderne wissenschaftliche Inhalte und organisiert Fortbildungen für Physiklehrer.

