

Pyroelektrische DLaTGS-Detektoren für FTIR-Spektrometer – Moderne Technologie oder alter Hut?

Martin Ebermann, Doris Mutschall, Eric Müller
InfraTec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik, Dresden

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag soll eine Übersicht zu IR-Detektoren gegeben werden, die auf dem pyroelektrischen Material DLaTGS basieren. Nach einer kurzen Einführung in die Funktionsweise werden die Anforderungen diskutiert, die sich aus ihrer Anwendung in FTIR-Spektrometern ergeben. Dabei wird ein Vergleich des Detektormaterials DLaTGS mit dem anderweitig etablierten Material Lithiumtantalat gezogen. Im Weiteren wird auf ausgewählte Designaspekte und Lösungsansätze eingegangen, die DLaTGS-Detektoren von InfraTec gegenüber dem bisherigen Stand der Technik auszeichnen.

Keywords: Infrarotsensoren, Fourier-Transform-Spektrometer, modifiziertes Triglycinsulfat, Lithiumtantalat.

Einleitung

Die Infrarot-Spektroskopie ist eine Standardmethode in der chemischen Analytik. Fourier-Transform-Infrarot-(FTIR)-Spektrometer gehören zur Grundausstattung eines jeden Analytiklabors. An den IR-Detektor für ein solches Gerät werden spezielle und widerstreitende Anforderungen gestellt: Die Analytik verlangt neben großer spektraler Breite eine hohe Empfindlichkeit, Auflösung und niedrige Nachweisgrenzen, wofür das höchstmögliche Signal-Rausch-Verhältnis benötigt wird. Das Funktionsprinzip des FTIR-Spektrometers bringt zusätzliche Forderungen mit sich: Die Belastbarkeit mit sehr hohen Strahlungsleistungen sowie einen großen Dynamikbereich bei gleichzeitig sehr guter Linearität. Seit mehreren Jahrzehnten gibt es hierfür eine Standardlösung: den pyroelektrischen Detektor auf Basis von einkristallinem Triglycinsulfat bzw. dessen Modifikationen durch Deuterierung und Dotierung (DLaTGS).

Aufbau und Funktionsweise pyroelektrischer Detektoren

Pyroelektrische Detektoren haben weite Verbreitung als Strahlungsempfänger in infrarot-optischen Messsystemen und Spektrometern. Sie gehören zur Klasse der thermischen Sensoren und besitzen damit eine breitbandige spektrale Empfindlichkeit. Sie sind außerdem robust, preiswert und können ohne Kühlung betrieben werden. Eine vollständige Darstellung der Funktionsweise pyroelektrischer Detektoren - über die im Folgenden angebotene stark verkürzte Zusammenfassung hinaus - ist in der Literatur nachzulesen [1].

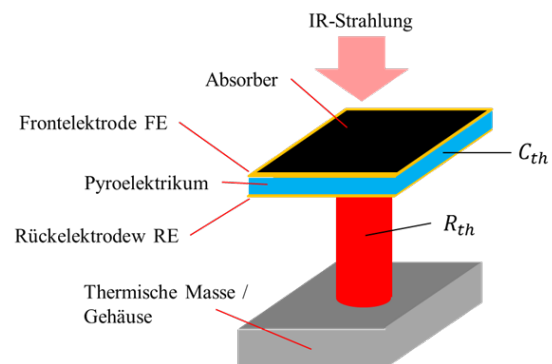


Abb. 1: Schema des Sensorelement und seiner thermischen Ankopplung in einem pyroelektrischen Detektor.

Das zweistufige Wandlungsprinzip lässt sich kurz wie folgt beschreiben: Die einfallende Strahlung wird auf einem flächigen und dünnen Sensorelement absorbiert und verursacht eine Temperaturerhöhung. Das Element besteht aus einem pyroelektrischen Material, welches auf Vorder- und Rückseite mit Elektroden beschichtet ist (Front- und Rückelektrode, FE und RE), so dass es einen elektrischen Plattenkondensator bildet (Abb. 1). Die Temperaturänderung führt aufgrund des pyroelektrischen Effekts zu einer Änderung der spontanen Polarisierung im Material. Dadurch werden die Elektroden aufgeladen bzw. wird ein Stromfluss erzeugt, welcher zur Weiterverarbeitung in ein Spannungssignal (Sensorsignal) gewandelt wird. Eine Besonderheit dieses Wandlungsprinzips besteht darin, dass nur Änderungen der Temperatur zu einem Signal führen.

Pyroelektrische Detektoren sind somit nur für modulierte Strahlung empfindlich nicht jedoch für Gleichlicht (Continuous Wave - CW) – im Unterscheid zu anderen thermische IR-Sensoren wie z.B. Thermopiles oder Bolometern. Das kann in vielen Anwendungen als Vorteil ausgenutzt werden.

Zur Maximierung der Strahlungsabsorption ist das Element oftmals mit einer zusätzlichen dünnen absorbierenden Schicht (Absorber) versehen. Die Empfindlichkeit des Detektors wird weiterhin dadurch maximiert, dass das Element besonders dünn ausgeführt wird, wodurch es eine geringe Wärmekapazität besitzt. Das Element muss zudem im Detektoraufbau thermisch isoliert montiert bzw. elektrisch kontaktiert werden. Die Art der Montage bzw. das umgebende Gas (typischerweise Luft oder Stickstoff) leiten die absorbierte Wärme in das Gehäuse bzw. die Umgebung ab (Abb. 1). Dies lässt sich vereinfacht durch einen thermischen Übergangswiderstand R_{th} beschreiben. Zusammen mit der Wärmekapazität des Sensorelements C_{th} entsteht ein thermisches Tiefpassverhalten mit der Zeitkonstante

$$\tau_{th} = R_{th} \cdot C_{th}$$

bzw. der thermischen Eckfrequenz

$$f_{th} = 1/(2\pi \cdot \tau_{th}).$$

Im Falle von CW-Bestrahlung bzw. für niedrige Modulationsfrequenzen unterhalb der thermischen Eckfrequenz erfährt das Element die maximale Temperaturänderung, welche ausschließlich durch R_{th} bestimmt wird. Die Wärmekapazität des Sensorelements C_{th} ist maßgeblich dafür, wie schnell sich seine Temperatur ändert. Nach dem bereits erwähnten differenzierenden Verhalten ist der pyroelektrische Strom proportional zur Geschwindigkeit der Temperaturänderung. Demnach besitzt der Sensor eine hohe Empfindlichkeit, wenn die Modulationsfrequenz der Strahlung oberhalb der thermischen Eckfrequenz liegt. Für niedrigere Frequenzen fällt die Empfindlichkeit ab und verschwindet bei unmodulierter Strahlung (CW).

Diese Betrachtung gilt zunächst nur für die Generierung des pyroelektrischen Stroms, die sogenannte Stromempfindlichkeit R_i (Abb. 2), sie lässt die nachfolgende elektrische Signalwandlung außer Acht. Letztere kann unterschiedlich ausgeführt sein und prägt dem Sensor ein zusätzliches Frequenzverhalten auf. Viele Anwendungen von pyroelektrischen Detektoren, z.B. in der NDIR-Gasanalyse, nutzen thermische Strahler die entweder gepulst angesteuert oder gehoppert werden.

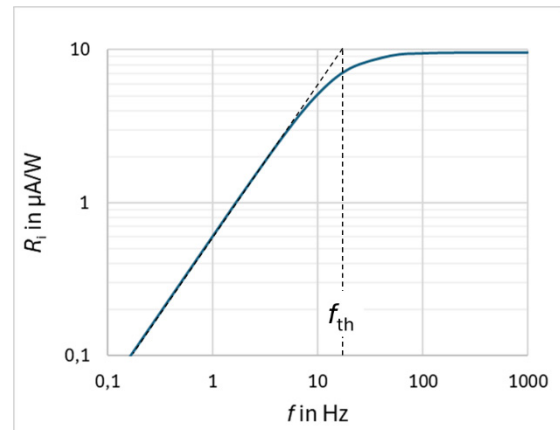


Abb. 2: Typische Frequenzabhängigkeit der Stromempfindlichkeit R_i , beispielhaft für einen DLaTGS-Detektor mit einer thermischen Eckfrequenz im Bereich von 10...20 Hz.

Die Modulationsfrequenzen liegen oft im Bereich von 1...10 Hz. In diesen Fällen ist eine besonders gute thermische Isolation des Sensorelements anzustreben, die thermischen Zeitkonstanten liegen typischerweise im Bereich von 100...200 ms. Dies wird durch eine Montage und Kontaktierung an nur wenigen kleinen Punkten mittels Klebstoffs erreicht, wobei das Element im Übrigen von einer dicken Gasschicht umgeben ist. Die Frontelektrode wird meist durch einen Bonddraht elektrisch kontaktiert. Einfache Ausführungsformen nutzen ein Loch in einem Substrat als Unterlage (z.B. Leiterplatte) andere Ausführungen nutzen mikrostrukturierte Chiphalter [2], oder Bonddrahtbrücken zur gleichzeitigen mechanischen und thermischen Entkopplung sowie zur elektrischen Kontaktierung [3].

Anwendung in FTIR-Spektrometern

Ein wichtiges Anwendungsgebiet pyroelektrischer Detektoren sind FTIR-Spektrometer. Die Randbedingungen unterscheiden sich hier in mehreren Aspekten sehr deutlich von den oben genannten Anwendungsfällen. Kernstück eines FTIR ist ein Zweistrahlinterferometer (z.B. Michelson-Interferometer), welches die Strahlung von einer breitbandigen thermischen IR-Quelle durch Interferenz der beiden Teilstrahlen im Interferometer in der Intensität moduliert, so dass die Wellenlängeninformation in den Frequenzbereich transformiert wird. Durch den Detektor wird schließlich ein Interferogramm aufgezeichnet, aus dem durch Fouriertransformation das Spektrum gewonnen wird [4]. Für ein Gerät typischer Bauart für den mittleren und langwelligen IR-Bereich (2 – 30 µm) liegt der Signalfrequenzbereich des Interferogramms im Bereich 100 Hz - 2 kHz.

Die Geräte sind normalerweise so ausgelegt, dass ein maximaler optischer Durchsatz

erreicht wird. Dies beinhaltet eine mehrstufige Abbildung bzw. Strahlformung, vom IR-Emitter durch das Interferometer und die zu messende Probe und schließlich auf den Detektor, im Idealfall exakt auf die Größe der Empfängerfläche angepasst.

Die Gesamtstrahlungsleistung der Quelle beträgt in der Regel $\gg 100$ mW. Davon wird letztlich zwar nur ein sehr kleiner Anteil in eine auswertbare Intensitätsmodulation im Interferogramm übersetzt, diese besitzt jedoch einen sehr großen Dynamikbereich (Abb. 3). Ein großer Anteil (einige zehn Milliwatt) gelangt als Gleichlicht (CW) auf das Sensorelement. Dieser Aspekt wird oft vernachlässigt, spielt jedoch eine sehr wichtige Rolle.

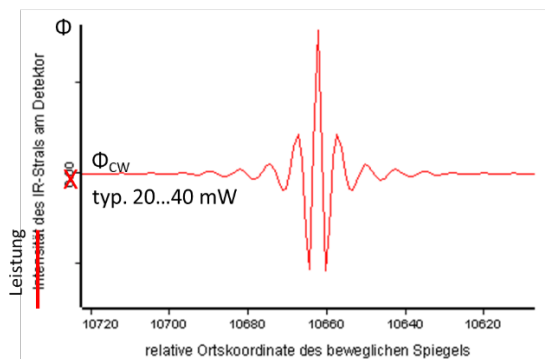


Abb. 3: Typischer Verlauf des Interferogramms in einem FTIR-Spektrometer, modif. Darstellung nach <https://de.wikipedia.org/wiki/FTIR-Spektrometer> (letzter Aufruf am 29.05.2026).

Pyroelektrische Detektoren sind unter anderem deshalb die bevorzugten Empfänger für FTIR-Spektrometer, weil sie nur auf die modulierten Strahlungsanteile ansprechen. Der CW-Anteil erzeugt dagegen kein Signal. Gleichwohl muss er im thermischen Verhalten der Detektoren berücksichtigt werden. Die Wärme muss vom Element sicher und definiert abgeführt werden. In der oben beschriebenen klassischen Bauform pyroelektrischer Detektoren mit großer Zeitkonstante würde die Erwärmung einige 10 K betragen. Bei einem DLaTGS-Detektor hätte dies entweder den vollständigen Verlust der Empfindlichkeit durch Entpolung, im schlimmsten Fall eine Zerstörung des Elements, mindestens aber ein stark nichtlineares Sensorverhalten zur Folge [6]. Die Gründe werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

Detektormaterial DLaTGS

Für einen fundierten Vergleich verschiedener pyroelektrischer Materialien, deren Materialparameter und Leistungskenngrößen (Figure-of-Merits) sei nochmals auf die Literatur verwiesen [1]. Im Folgenden wird nur auf spezielle Aspekte eingegangen.

Die Spannungsempfindlichkeit des Detektors ist im Wesentlichen proportional zum pyroelektrischen Koeffizienten und umgekehrt proportional zur Permittivität und damit sowohl materials- als auch temperaturabhängig

$$R_v \sim p(T)/\varepsilon_r(T).$$

Die relative Lage der Curie-Temperatur T_C zum Betriebstemperaturbereich des Detektors bestimmt die Höhe des Temperaturkoeffizienten der Materialparameter. Bei der Curietemperatur findet ein Phasenübergang von der ferroelektrischen in die paraelektrische Phase statt, in der die pyroelektrischen Eigenschaften verschwinden. Weiter entfernt besitzen p und ε_r geringe bzw. leicht positive Temperaturkoeffizienten. Steigt die Temperatur in die Nähe von T_C dann steigen p und ε_r überproportional stark und erreichen in unmittelbarer Umgebung von T_C ein Maximum (Abb. 4).

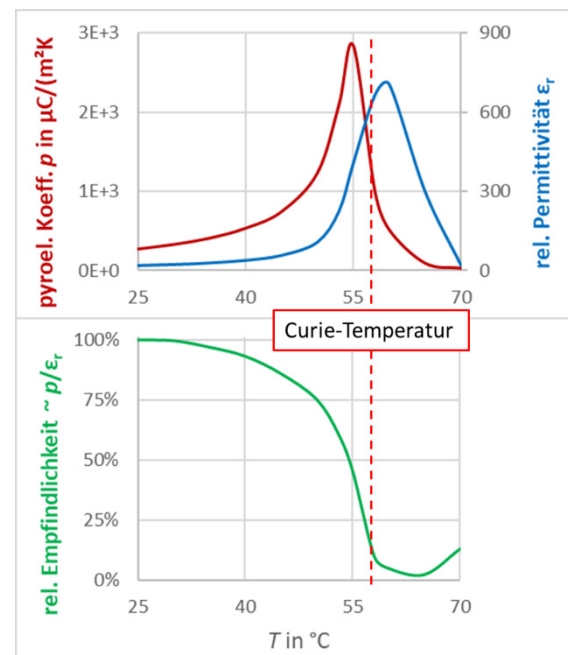


Abb. 4: Typische Temperaturabhängigkeiten eines pyroelektrischen DLaTGS-Detektors: pyroelektrischer Koeffizient p und Permittivität ε_r von einkristallinem DLaTGS (oben), sowie relative Empfindlichkeit des Sensors (unten).

Die Curietemperatur pyroelektrischer Materialien unterscheidet sich mitunter sehr stark. Bei Lithiumtantalat (LiTaO_3) - als eines der am häufigsten verwendeten Pyroelektrika - liegt sie bei > 600 °C. Damit ist die Temperaturabhängigkeit im Bereich normaler Betriebsbedingungen sehr gering und kann in der Regel vernachlässigt werden. DLaTGS besitzt dagegen eine sehr niedrige Curietemperatur im Bereich von $55 \dots 62$ °C. Wenn sich die Temperatur eines DLaTGS-Sensorelements

nur um einige Kelvin ändert - infolge der Bestrahlung oder durch die Umgebung - ändert sich die Empfindlichkeit des Detektors merklich, was letztlich zu Messabweichungen oder Nicht-linearitäten führt.

Für FTIR-Detektoren ist DLaTGS besonders bevorzugt, weil es von allen bekannten Pyroelektrika das beste SNR bietet, insbesondere im Frequenzbereich > 100 Hz. Seine große Temperaturempfindlichkeit und seine niedrige Curietemperatur werden dabei zugunsten des hohen SNR in Kauf genommen.

Erschwerend kommt hinzu, dass DLaTGS wasserlöslich ist und die Detektoren somit sehr feuchteempfindlich sind. In Spezialfällen wird auch LiTaO_3 als Detektormaterial für FTIR-Spektrometer verwendet, insbesondere dann, wenn es auf höchste photometrisch Genauigkeit ankommt, was eine hohe Linearität des Detektors erfordert, oder wenn eine hohe Robustheit gegen Feuchte und Temperatur verlangt wird.

Tab. 1: Vergleich von LiTaO_3 - und DLaTGS-Detektoren anhand FTIR-spezifischer Anforderungen.

Aus Analytik	Anforderung an Detektor	LiTaO_3	DLaTGS
Empfindlichkeit, Auflösung und Nachweisgrenzen	Höchstmögliches Signal-Rausch-Verhältnis		!
Universell, flexibel	Breiter Wellenlängenbereich		
Aus Messverfahren			
Große Spitzenwerte, Information ist noch in kleinsten Intensitätsmodulationen enthalten	Großer Dynamikbereich, Signalfrequenzbereich 100 Hz ... 10 kHz		
Hohe CW-Bestrahlung ohne Informationsgehalt	Hohe Zerstörschwelle, gute Wärmeabfuhr, CW-Unterdrückung		
Weitere Anforderungen			
Kostengünstig			
Robust, langlebig, stabil			

DLaTGS-Detektoren sind seit Jahrzehnten am Markt etabliert und im Wesentlichen bewährt. Weiterentwicklungen und Optimierungen fanden jedoch kaum noch statt, der technologische Stand war Jahrzehnte alt und Wettbewerb kaum vorhanden. Mit der Vorstellung einer eigenen, von Grund auf neu entwickelten Produktreihe von DLaTGS-Detektoren bietet die Firma InfraTec eine modernisierte Technologie bei gleichzeitig hoher und reproduzierbarer Leistung und Qualität an. Es werden hierbei insbesondere die Aspekte adressiert, bei denen DLaTGS-Detektoren bisher sehr deutlich im Nachteil waren (siehe Tab.1). InfraTec bietet zudem weiterhin auch FTIR-Detektoren auf Basis von LiTaO_3 an.

Kristallzüchtung und Herstellung der Sensorelemente

Die Herstellung des Grundmaterials beginnt mit der Synthese von Triglycinsulfat (TGS) aus hochreinen Ausgangsstoffen. Anschließend wird das Material mehrfach in schwerem Wasser (D_2O) umkristallisiert und somit deuteriertes Material (DTGS) gewonnen. Damit wird eine übersättigte Züchtungslösung in D_2O hergestellt, in die ein Keimkristall eingesetzt wird. Durch sehr langsame und präzise geregelte Absenkung der Temperatur lagert sich das Material aus der Lösung am Keim an und der Kristall beginnt zu wachsen. Durch Zugabe von L- α -Alanin in die Lösung wird eine zusätzliche Dotierung erreicht, die die Materialeigenschaften entscheidend verbessert [5][6]. Auf diese Weise werden DLaTGS Kristalle bei InfraTec herstellt (Abb. 5).



Abb. 5: Foto eines DLaTGS-Kristalls nach der Entnahme aus der Züchtungslösung.

Der Kristall wird nun auf einer Drahtsäge in Scheiben (Wafer) geschnitten. Anschließend werden die Wafer durch Läpp- und Polierprozesse auf die Zieldicke im Bereich von $< 20 \mu\text{m}$ abgedünnt. Sie werden vorder- und rückseitig über Schattenmasken mit Elektroden beschichtet und zu Sensorelementen vereinzelt. All diese Prozesse müssen wasserfrei, mit sehr geringer Temperaturbelastung und innerhalb sehr enger Prozessfenster ausgeführt werden, damit eine gleichbleibende Materialqualität und Ausbeute erreicht wird.

Detektoraufbau und Montage der Sensorelemente

Der Grundaufbau von Detektoren bzw. die Montage der Sensorelemente für geringe Strahlungsleistung und niedrige Modulationsfrequenzen (große thermische Zeitkonstante) wurde bereits oben beschrieben. Für hohe CW-Strahlungsleistungen in FTIR-Spektrometern müssen die Elemente anders montiert werden, so dass die absorbierte Strahlungswärme schneller und gleichmäßiger abgeführt und deren Temperatur begrenzt wird. Front- und Rückelektroden des Elements sind üblicher-

weise so strukturiert, dass sich eine auf die Optik der Geräte angepasste empfindliche Fläche ergibt. Typische Größen sind im Bereich $\varnothing 1,3 \dots 2,0$ mm.

In [8] ist ausführlich dargestellt und analysiert, wie das nach dem bisherigen Stand der Technik bei DLaTGS-Detektoren realisiert wird und welche Vor- und Nachteile sich daraus ergeben. In einer typischen Ausführungsform ist eine dünne Luftschicht unter dem Element ausgebildet, über den die Wärme in ein darunter liegendes Trägersubstrat abgeführt wird. Das Element ist hierbei mit einem einzigen mittigen und punktförmigen Indium-Bondkontakt mechanisch fixiert und elektrisch kontaktiert [9]. In einer anderen Ausführungsform wird das Element umlaufend an seinen Außenkanten verklebt. Die Wärmeabfuhr erfolgt hier im Wesentlichen durch die laterale Wärmeleitung innerhalb des Elements, von der bestrahlten Fläche im Zentrum zu den Kanten. Die elektrische Kontaktierung der Rückelektrode erfolgt durch einen angeklebten Bonddraht innerhalb der empfindlichen Fläche [8]. In beiden Varianten wird der elektrische Kontakt zur Frontelektrode durch einen leitfähig geklebten Bonddraht hergestellt, wobei die Kontaktstelle inner- oder außerhalb der empfindlichen Fläche liegen kann.

Alle genannten Montagevarianten haben den Nachteil, dass sich durch die Platzierung der Montage- bzw. Kontaktstellen innerhalb der empfindlichen Sensorfläche eine inhomogene Temperatur- bzw. Empfindlichkeitsverteilung ergibt. Bei der zentralen Chipmontage ist es zudem sehr schwierig den Abstand bzw. die Luftschicht präzise und reproduzierbar im Montageprozess herzustellen. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass das Element verkippt montiert wird, im Extremfall kann es sogar zur Berührung der Ecken oder Kanten mit dem darunter liegenden Substrat kommen. Problematisch ist auch hier wieder eine ungleichmäßige Temperatur- und Empfindlichkeitsverteilung. Schlechte Reproduzierbarkeit und große Fertigungsstreuungen der Detektoreigenschaften sind die Folge. Schon ein kleiner Versatz des Strahlfokus auf dem Sensorelement, etwa durch eine Rückwirkung der Probe auf den Strahlengang im Gerät, kann zu Messfehlern führen.

Bei genauer Analyse wird klar: Die funktionsbestimmenden Aspekte des Aufbaus – die mechanische Fixierung des Elements, die thermische Isolierung und die elektrische Kontaktierung – sind derart miteinander verkoppelt, dass sie sich nicht unabhängig voneinander optimieren lassen. Der hier vorgestellte Lösungsansatz besteht im Kern darin, dass die genannten Funktionen voneinander entkoppelt werden, und somit unabhängig voneinander

optimierbar sind. Abb. 6 zeigt das Grundprinzip in einer stark vereinfachten Weise: Schlüsselement ist ein mit Si-MEMS-Technologie hergestellter mikrostrukturierter Chiphalter. Er besitzt ein durch Ätzprozesse definiertes abgestuftes Höhenprofil: In den Randbereichen befinden sich Podeste, auf denen das Element flächig aufliegt, sowie tief geätzte Gebiete mit metallischen Kontaktflächen (Pads) für Fixierung und Kontaktierung des Elements. Auf dem Element sind entsprechende Pads an den Elektroden nach außen geführt. Im zentralen Bereich der empfindlichen Fläche befindet sich eine flach geätzte Kavität. Durch sie wird unter dem Element eine sehr homogene einige Mikrometer dicke Luftschicht ausgebildet.

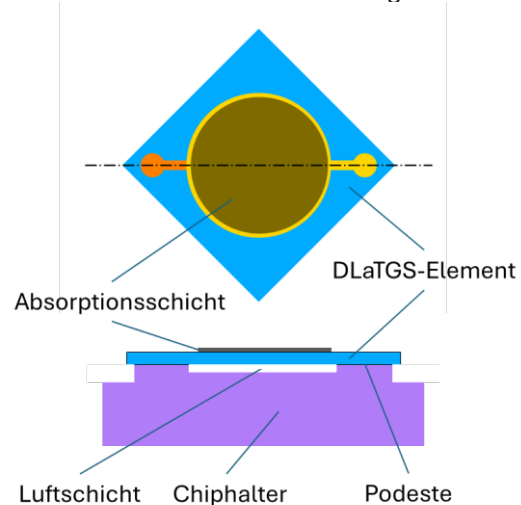


Abb. 6: Montage des Sensorelements mit Si-MEMS-Chiphalter, Klebe, Kontakt- und Bondstellen zur Vereinfachung weggelassen

Der Entwurf wurde durch FEM-Simulationen (COMSOL®) unterstützt. Hierbei wurde nicht nur die Temperaturentwicklung im Zeit- und Frequenzbereich analysiert und optimiert, sondern auch thermo-mechanische Spannungen und Verwölbungen betrachtet. Je nach Anwendungsfall erfolgt die Optimierung der Anordnung und der Luftschichtdicke für ein bestimmtes Leistungsniveau der Bestrahlung. Im Endergebnis ergeben sich Zeitkonstanten τ_{th} , die im Bereich von 10 ... 50 ms liegen.

Das Simulationsergebnis in Abb. 7 zeigt, was ein Betrieb über der im Entwurf angenommenen maximalen Strahlungsleistung zur Folge haben kann: Bei 50 mW beginnt sich das Element bis zu 30 μm nach oben zu verwölben und es entwickelt sich eine Temperaturüberhöhung von bis zu 40 K. Das würde mit Sicherheit eine Entpolung des Elements verursachen. Bei moderater Strahlungsbelastung von 10 mW verhält sich das System gutmütig und linear.

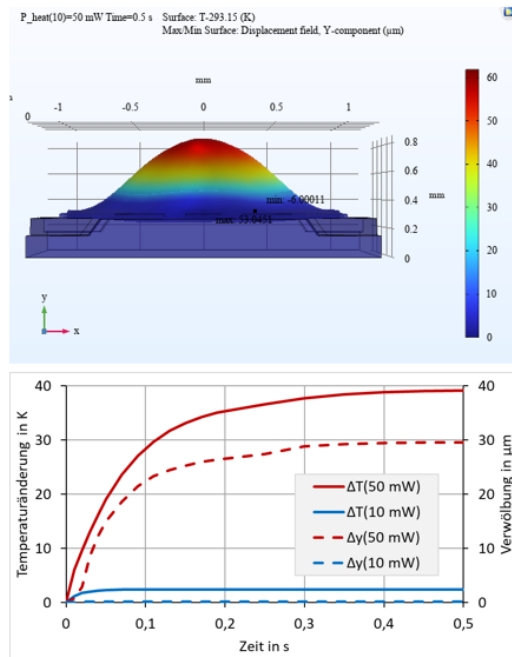


Abb. 7: Thermo-mechanische FEM-Analyse der Elementmontage nach Abb.6 mit sprungförmiger Anregung mit 10 mW und mit 50 mW konzentriert auf die empfindliche Fläche mit Ø1,3 mm: räumliche (überhöhte) Darstellung der Verwölbung (oben, Farbskala in µm, 50 mW), zeitlicher Verlauf der mittleren Elementtemperatur und Verwölbung (unten).

Klebeverbindungen und rückseitige Kontaktierung des Elements sind durch eine Kombination von festen und flexiblen Klebstoffen ausgeführt. Als Absorber wird eine bewährte Metallschwarzschrift genutzt, welche eine sehr hohe und spektral flache Absorption besitzt. Im Gehäuse ist eine rauscharme Vorverstärkerschaltung mit diskreten Bauelementen hybrid integriert und zusätzlich vergossen. Der gesamte Aufbau wird in weitgehend automatisierten Prozessen mit Chip- und Drahtbondautomaten realisiert.

Abb.8 zeigt den offenen Innenaufbau des Detektors mit strukturiert abgeschiedenem Absorber, sowie den verschlossenen Detektor mit aufgeschweißter Fensterkappe.



Abb. 8: Gesamtaufbau ohne (links) und mit KBr-Fensterkappe im TO39-Gehäuse (rechts).

Tab. 2: Vergleich der wichtigsten Kenngrößen von pyroelektrischen Detektoren mit LiTaO_3 (Typ LIE-332f) und DLaTGS (Typ DSV-7311), (Elementgröße Ø 1,3 mm).

Parameter	f	LIE-332f	DSV-7311	Einheit
R	100 Hz	140	650	V/W
D^*	100 Hz	3,0E8	5,2E8	Jones
R	1 kHz	13	65	V/W
D^*	1 kHz	1,3E8	3,3E8	Jones
τ_{th}		20	12	ms

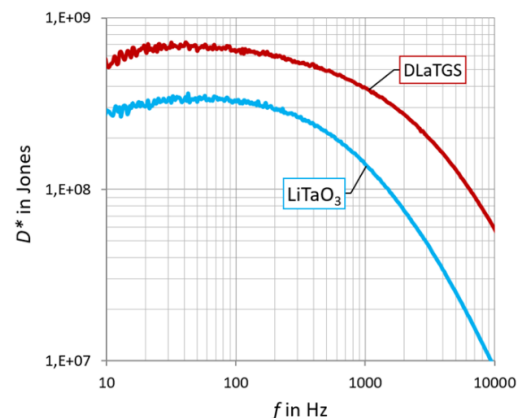


Abb. 9: Vergleich der frequenzabhängigen spezifischen Detektivität D^* .

Charakterisierung der Detektoren

Die Detektoren werden vor Auslieferung zu 100% geprüft bzw. charakterisiert. Typische Kenndaten der beiden Detektortypen LIE-332f (LiTaO_3) und DSV-7311 (DLaTGS) sind in Tab. 2 angegeben, Abb. 9 vergleicht die frequenzabhängige spezifische Detektivität D^* als Maß für das SNR. Im relevanten Frequenzbereich von 100 Hz - 2 kHz bietet DLaTGS um ca. Faktor 2 - 3 bessere Leistungswerte.

Die Messung der Empfindlichkeit (Responsivity R) erfolgt mit einem Blackbody-Strahler bei 500 K. Für die Messung des Rauschdichtespektrums und die anschließende Berechnung des D^* wird wie üblich auf eine Rauschbandbreite von 1 Hz normiert. Alle Messungen wurden nahe bei RT durchgeführt (25 ... 30°C).

Messung von Stabilität und Linearität

Die besonderen Einsatzbedingungen in FTIR-Spektrometern, wie beispielsweise starke und schnell wechselnde Bestrahlungsleistungen, müssen für eine aussagekräftige Charakterisierung der Detektoren möglichst gut nachgestellt werden. Dazu wurde ein spezieller Messstand entwickelt, der durch den optischen Grundaufbau von FTIR-Spektrometern bzw. ähnlichen Aufbauten in der Literatur inspiriert wurde [6], [10]. Mit ihm ist es möglich die Detektoren über einen weit einstellbaren Bereich mit bis zu

100 mW CW-Strahlungsleistung zu beaufschlagen, diese Leistung präzise auf einen definierten Messfokus variabler Größe ($\varnothing$ 0.5 ... 3 mm) – angepasst auf verschiedene Elementgrößen – abzubilden und dabei die Gehäusetemperatur des Detektors über einen weiten Bereich (10 ... 80°C) zu variieren. Das System ermöglicht die Untersuchung von Detektoren hinsichtlich ihrer Linearität und Stabilität sowie die Bewertung ihres Temperaturverhaltens und ihrer Langzeitstabilität unter Dauerbelastung.

Abb. 10 zeigt den schematischen Messaufbau: Als Quelle dient ein keramischer CW-Strahler identischer Bauart wie in FTIR-Spektrometern verwendet. Über Off-Axis-Parabolspiegel wird eine zweistufige Abbildung von der Quelle zum Detektor realisiert. Eine austauschbare präzise Lochblende (Pinhole) steuert dabei die Größe des Fokus in der Detektorebene. Über eine motorisierte Irisblende kann die Strahlöffnung und damit die Gesamtstrahlungsleistung gesteuert werden. Mit Hilfe eines Choppers kann der CW-Strahl für die Justage moduliert werden. Ein Shutter erlaubt es eine starke Wechselbeanspruchung zu simulieren. Die optische Kleinsignalanregung, welche im FTIR durch das Interferometer zustande kommt, wird im Testaufbau durch eine zweite unabhängige Quelle realisiert. Hierfür wurde eine analog modulierbare NIR-SLED (DenseLight Semiconductors, $\lambda = 1,6 \mu\text{m}$) ausgewählt. Ihre Strahlung wird über einen Faserkollimator und durch ein Loch im zweiten Spiegel eingekoppelt und auf den Detektor gerichtet. Der Detektor ist in einer (mit Peltierelementen) temperaturgeregelten Messfassung gehalten und kann präzise über einen XY-Kreuztisch einjustiert werden. Die rauscharme Signalverstärkung erlaubt es Signal- und Rauschmessungen simultan auszuführen. Mit der zugehörigen Software können nahezu beliebige Messabläufe innerhalb der genannten Grenzen programmiert und automatisch abgefahren werden.

Abb.11 zeigt ein beispielhaftes Messergebnis. Hier wurde die Simulation aus Abb.7 im Experiment nachstellt, wobei die Ergebnisse im Wesentlichen bestätigt wurden. Zum Start des Versuchs ($t = 0 \text{ min}$) befindet sich der Prüfling auf Raumtemperatur (dunkelrote Kurve, $T = 23^\circ\text{C}$), die CW-Strahlung ist vollständig geblockt (grüne Kurve, $P = 0 \text{ mW}$). Auf den initialen Wert der Signalstärke (relative Empfindlichkeit, blaue Punkte) wird für den weiteren Verlauf normiert.

Im ersten Schritt des Experiments wird die Strahlungsleistung auf ein sehr niedriges

Grundniveau eingestellt und die Temperatur wird auf 30°C erhöht. Die Empfindlichkeit erhöht sich hier zunächst um einige Prozentpunkte. Im weiteren Verlauf wird nun die Bestrahlung schrittweise jeweils um einige Milliwatt erhöht. Die Empfindlichkeit verläuft im Wesentlichen flach mit einem sehr geringen Anstieg bis im Bereich von 30...40 mW ein Maximum erreicht wird.

Für den weiteren Verlauf des Experiments wurde die Bestrahlungsleistung bewusst deutlich über die übliche Anwendungsbedingungen erhöht, um das Verhalten des Detektors in diesem eigentlich unzulässigen Bereich zu analysieren und die Simulationsergebnisse zu verifizieren: Bei weiterer Erhöhung der Bestrahlung nimmt die Empfindlichkeit stark ab und bricht schließlich oberhalb von 55 mW komplett ein.

Wenn die Bestrahlung anschließend wieder zurückgesetzt wird, kann nach einiger Zeit eine Erholung beobachtet werden: Das Element kühlt wieder unter die Curietemperatur ab und das intrinsische Feld (Biasfeld) im DLaTGS-Material sorgt dafür, dass sich das Element wieder selbst polt. Dieser Prozess dauert einige Zeit und ist im gezeigten Experiment noch nicht vollständig abgeschlossen. Dieses Verhalten ist materialbedingt und lässt sich grundsätzlich nicht vollständig vermeiden. Vielmehr ist stets auf die richtige thermische Auslegung des Detektors und des Gesamtsystems zu achten, um die Entpolung des Sensorelements durch Überhitzung von vornherein auszuschließen.

Fazit

Moderne Technologien konsequent angewendet erlauben es, vermeintlich ausentwickelte Produkte (alte Hüte) auf ein neues, bisher nicht erreichtes Qualitätsniveau zu heben. FEM-Simulationen verkürzen den Entwicklungsprozess und erlauben sehr präzise Vorhersagen, welche sich mit entsprechender Messtechnik im Experiment bestätigen lassen. Moderne Methoden und Ausrüstungen für Prozessoptimierung und Überwachung lassen reproduzierbarere Ergebnisse und höhere Ausbeuten erzielen. Der vorliegende Beitrag lieferte ein paar punktuelle und ausgewählte Einblicke zur Untermauerung dieser Thesen und belegt dabei, dass der pyroelektrische DLaTGS-Detektor weiterhin eine wichtige Rolle in der IR-Messtechnik spielt.

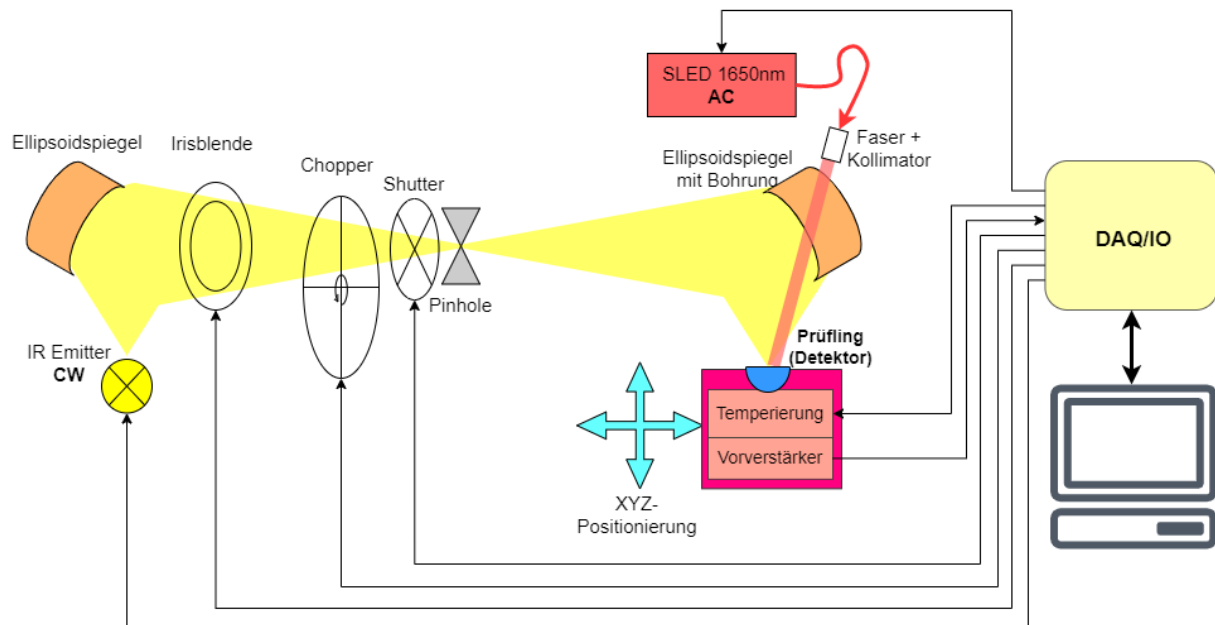


Abb. 10: Schema des Messstandes für Linearitäts-, Stabilitäts- und Lebensdauerprüfung an DLaTGS-Detektoren, Eigenentwicklung von InfraTec.

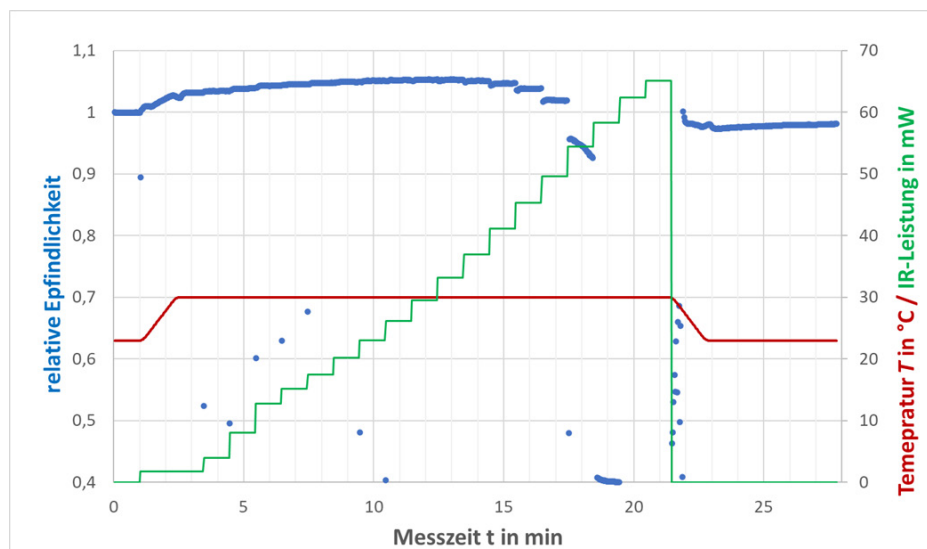


Abb. 11: Messdaten aus einem beispielhaften Experiment zur Untersuchung der Linearität und Stabilität eines DLaTGS-Detektors bei steigender CW-Bestrahlungsleistung mit dem in Abb. 10 gezeigten Messaufbau, vgl. Simulation aus Abb. 7.

Literaturnachweis

- [1] Whatmore, R. et al., *J. Appl. Phys.* 133, 080902 (2023); [doi: 10.1063/5.0141044](https://doi.org/10.1063/5.0141044)
- [2] Günther, A. et al., *Proceedings IRS² 2017*, S. 804–808 (2017), [doi: 10.5162/irs2017/i4.5](https://doi.org/10.5162/irs2017/i4.5)
- [3] Oettel, F. (1978): Pyroelectric detector having improved suspension means, [US4218620A](https://doi.org/10.1117/3.523499). G01J 1/00.
- [4] Saptari, V. (2003): *Fourier-Transform Spectroscopy Instrumentation Engineering*. Bellingham, Wash: SPIE Press (61). [doi: 10.1117/3.523499](https://doi.org/10.1117/3.523499), ISBN: 9780819451644
- [5] Neumann, N.: *Ferroelectrics* 142 (1), S. 83–92. (1993); [doi: 10.1080/00150199308237885](https://doi.org/10.1080/00150199308237885).
- [6] Kaplan, S.G. et al., *Appl Opt.* 1997 Dec 1;36(34):8896–908 (1997), [doi:10.1364/ao.36.008896](https://doi.org/10.1364/ao.36.008896)
- [7] Novotny, J. et al., *Cryst. Res. Technol.* 39, No. 12, 1089 – 1098 (2004); [doi: 10.1002/crat.200410294](https://doi.org/10.1002/crat.200410294)
- [8] Neuzner, A. et al., Pyroelectric detector for EE9 FORUM: design and characterization. In: *Proc. SPIE 12777* (2022). 134. [doi: 10.1117/12.2690559](https://doi.org/10.1117/12.2690559)
- [9] Owton, D. et al., Current infra-red developments within Leonardo. In: *Proc. SPIE 1268706* (2023) [doi: 10.1117/12.2677446](https://doi.org/10.1117/12.2677446)
- [10] Theocharous, E., *Applied optics* 47 (21), S. 3731–3736. (2008). [doi: 10.1364/AO.47.003731](https://doi.org/10.1364/AO.47.003731)