

Faseroptische Temperaturmessung

von Dr. Hans Holbach

Die Glasfasertechnologie erlebte in den letzten Jahren einen gewaltigen Aufschwung. Erwähnt sei hier nur der Bereich der Datenübertragung und Kommunikationstechnologie, wo die Glasfaser aufgrund ihrer extrem hohen optischen Datenübertragungskapazität die elektrischen Kabel mehr und mehr ersetzen wird.

Darüber hinaus sind einige Glasfasereigenschaften Grundlage für die Erschließung neuer und messtechnisch äußerst interessanter Anwendungen. Dazu gehört, dass die Glasfaser aus elektrisch nicht leitendem Material besteht, dass die extrem widerstandsfähig ist hinsichtlich aggressiver chemischer Substanzen sowie ihr geringer Durchmesser und ihre Flexibilität.

Der entscheidende Durchbruch für eine messtechnische Anwendung liegt folglich in der Kombination der Glasfaser mit einer Sensortechnologie, die die oben genannten Vorteile der Glasfaser unverändert bestehen lässt.

Für den Bereich der Temperaturmessung seien die anwendungsbezogenen Vorteile einer faseroptischen Messung im Gegensatz zu elektrischen Messverfahren mit Thermoelementen, Thermistoren, Widerstandsthermometern etc. kurz zusammengefasst:

- keine Messwertverfälschung durch elektromagnetische Felder, Einsatzbereich im Mikrowellen- oder HF-Feld
- keine Überschläge bei Hochspannungsanlagen
- keine Temperaturänderung des Prüflings, da Wärmekapazität und Wärmeleitung der Glasfaser vernachlässigbar, wichtig z.B. in der Mikroelektronik
- keine Kurzschlussgefahr bei Messungen in elektronischen Schaltkreisen

- punktgenaue Messung, auch an unzugänglichen Stellen
- chemische Resistenz der Fasersonde
- Einsatzmöglichkeit in explosionsgefährdeten Bereichen

Auch die IR-Radiometrie – als reine Oberflächenmessmethode – liefert oft nicht die gewünschten Temperaturdaten, da hier das Emissionsvermögen des Prüflings genau bekannt und auch temperaturunabhängig sein muss, da stets Sichtkontakt zwischen IR-Kamera und Messobjekt vorliegen muss und da Reflexionen benachbarter Teile das Messergebnis verfälschen können. Darüber hinaus wird die IR-Radiometrie bei niederen Temperaturen weniger empfindlich.

Durch die genannten Gründe motiviert, gelang vor zwanzig Jahren der amerikanischen Firma Luxtron die Entwicklung eines kommerziell einsetzbaren faseroptischen Temperaturmesssystems. Patentierte Grundlage dieses Verfahrens ist das temperaturunabhängige Fluoreszenzverhalten optisch angeregter Phosphore.

Es wird hier also nicht die Glasfaser selbst als Sensor benutzt, was zur Zeit für die Messung auch von Druck, elektrischen und magnetischen Feldern auf der Basis interferometrisch nachgewiesener Brechungsindexänderungen oft diskutiert wird, sondern der eigentliche Sensor ist das an der Glasfaserspitze angebrachte Phosphormaterial. Die Glasfaser stellt bei dieser Methode lediglich das Übertragungsmedium für die optische Anregung sowie für das Fluoreszenzsignal dar. Letzteres ist Träger der Information über die Temperatur an der Glasfaserspitze.

Ursprünglich wurde von Luxtron in der ersten Gerätegeneration die Tatsache ausgenutzt, dass das Intensitätsverhältnis zweier Emissionslinien des angeregten Phosphors temperaturabhängig ist. Diese

auf einer Verhältnismessung beruhende Messmethode hatte in der Praxis einen entscheidenden Nachteil: Sie setzt nämlich voraus, dass beide Beobachtungskanäle – also Optik, Detektor, Verstärkungselektronik – nicht mit der Zeit gegeneinander driften. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, war somit eine regelmäßige Neukalibrierung notwendig, was natürlich mit dem Wunsch vieler Anwender, die Temperatursonden längerfristig irgendwo einzubauen, nicht in Einklang zu bringen war.

Die jetzt seit einigen Jahren realisierte und in der Praxis bereits vielfältig bewährte Zerfallszeitmethode vermeidet o.g. Nachteile, ja sie ist in erster Näherung

sogar kalibrationsfrei.

Als Sensormaterial verwendet Luxtron ein effizientes Phosphormaterial, nämlich Magnesium-Fluorgermanat aktiviert mit vierwertigem Mangan. Dieses für einen Temperaturmessbereich von -200°C bis $+450^{\circ}\text{C}$ einsetzbare Material ist chemisch sehr reaktionsträge und vom biologischen Gesichtspunkt her ungiftig.

In Abb.1 wird das Anregungs- und das Emissionsspektrum dieses Sensormaterials gezeigt, wobei die beiden Bereiche durch entsprechende Filter noch voneinander separiert werden. Die Anregung selbst erfolgt mittels einer Xe-Blitzlampe.

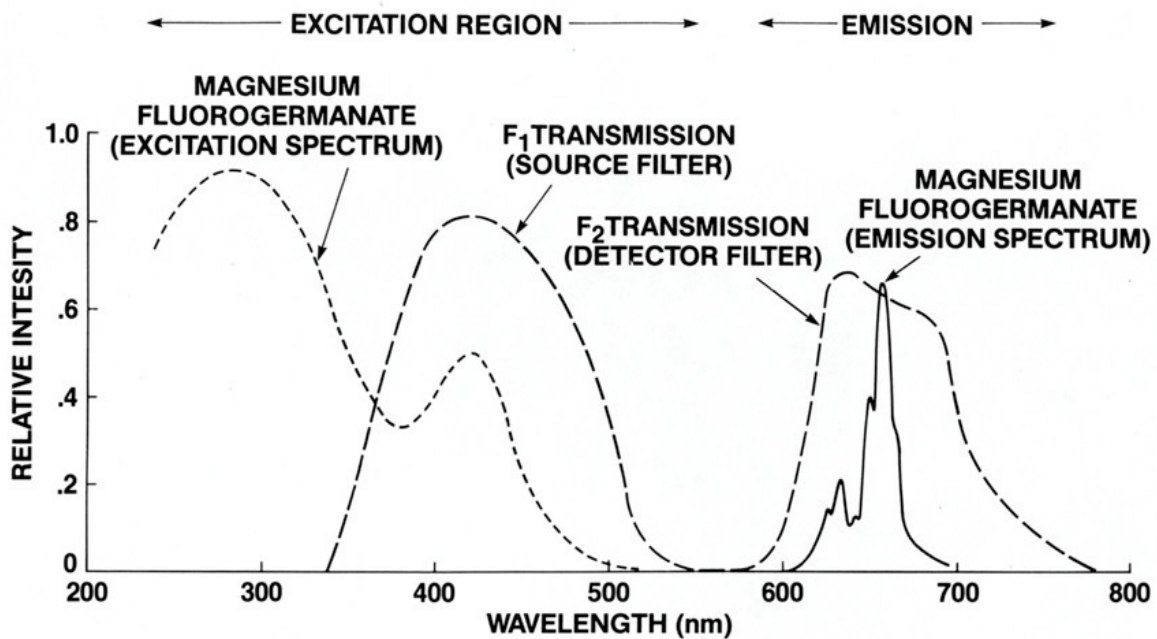


Abb. 1: Anregungs- und Emissionsspektrum des Mangan-aktivierten Magnesium-Fluormagnat-Sensors mit den Filter-Transmissionskurven zur Separierung der Anregungs- und Lumineszenzstrahlung

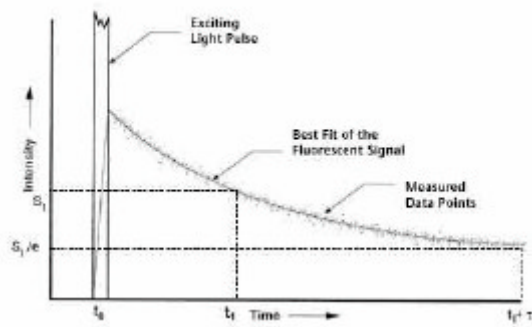


Abb. 2: Faseroptische Temperaturmessung auf der Basis der Lumineszenzabklingzeit: Die Zeit zwischen der zunächst detektierten Signalthöhe S_1 und der auf S_1/e abgefallenen Signalthöhe ist die Zerfallszeit

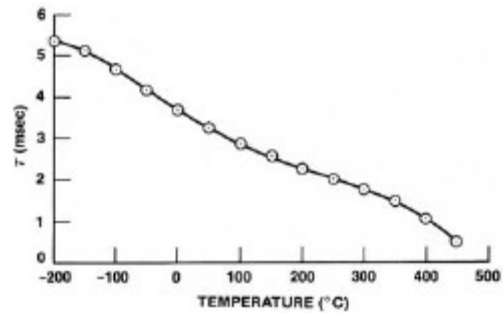


Abb. 3: Die grundlegende Kalibrierkurve, bei der die Zerfallszeit gegen die Temperatur aufgetragen ist. Diese ist im Messgerät tabellarisch abgespeichert.

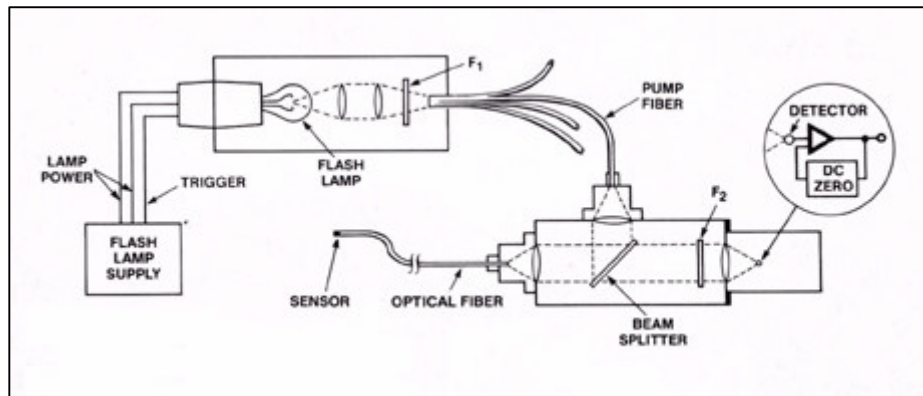


Abb. 4: Prinzipschaltbild des Modells 755 von Luxtron

Das Messprinzip selbst wird durch Abb. 2 und 3 verdeutlicht. Nach der pulsformigen Anregung des Phosphors klingt das Lumineszenzsignal exponentiell ab. Zu einem bestimmten Zeitpunkt t_1 wird die Signalthöhe S_1 gemessen und danach mit hoher zeitlicher Auflösung der Zeitpunkt $t_1 + \tau$ bestimmt, an dem die Signalthöhe auf S_1/e abgefallen ist. Jeder so gemessenen Zerfallszeit τ ist eindeutig eine bestimmte Temperatur zuzuordnen. Diese für den verwendeten Magnesium-Fluorogermanat-Phosphor gültige Kalibrationskurve ist in Abb. 3 dargestellt und zeigt, dass zwischen -200°C und $+400^\circ\text{C}$ die Zerfallszeit zwischen 5.5 ms

und 0.5 ms variiert. Die gemessene Zerfallszeit ist natürlich von der Anregungsintensität oder der übrigen optischen Konfiguration völlig unabhängig, was letztlich Glasfaserlängen bis zu 300 m oder auch eine "berührungslose" Messung ermöglicht, bei der Phosphormaterial zwar auf den Prüfling aufgetragen, aber von der Glasfaser getrennt ist. Um bei diesen vielfältigen Möglichkeiten vernünftig handhabbare Signale zu erhalten, besitzt das System eine "Automatic Gain Control", die die anregende Xe-Blitzlampe entsprechend in ihrer Intensität regelt.

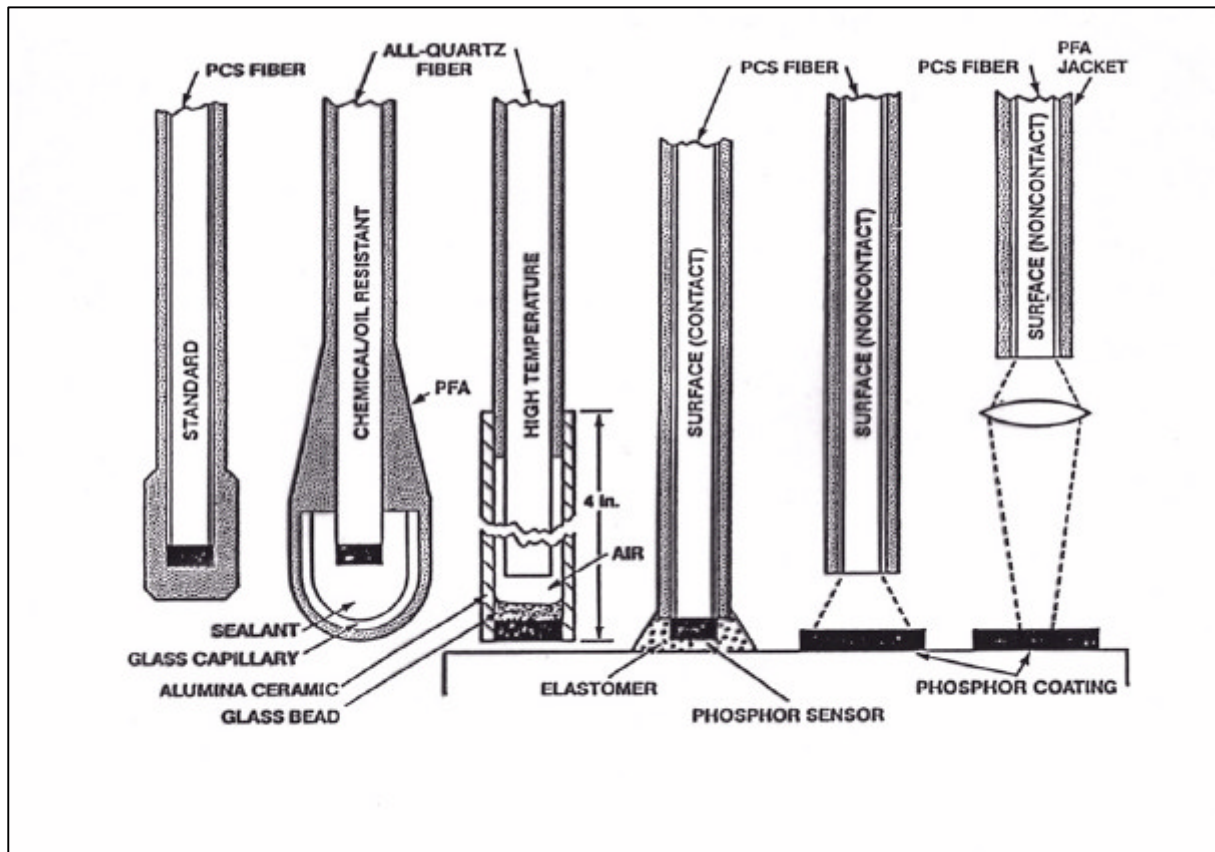


Abb. 5: Querschnitte einiger Temperatursonden

Der schematische Messsystemaufbau ist in Abb. 4 gezeigt. Dabei sei noch darauf hingewiesen, dass das Anregungslicht auf mehrere Glasfasern aufgespalten wird und somit an mehreren Stellen die Temperatur gleichzeitig gemessen werden kann. 4-, 8- und 12kanalige Geräteversionen werden von Luxtron angeboten. Nachstehend sind einige der wesentlichen Spezifikationen der fiberoptischen Temperaturmesssysteme von Luxtron aufgelistet:

Temperaturmessbereich:
-200°C bis +450°C

Absolute Genauigkeit:
± 2 K ohne Kalibrierung über den gesamten Messbereich
± 0.1 K beim Kalibrierpunkt
± 0.5 K im Bereich ± 50 K um Kalibrierpunkt

Auflösung:
0,1 K (Display)
0.01 K (RS-232C, IEEE-488, Analogausgang)

Reproduzierbarkeit:

± 0.5 K/√ N
N=Anzahl der Einzelmessungen (1-999)

Repetitionsrate:
max: 10 Hz, 30 Hz bei Spezialversion
variabel bis zu 1 Messung/1000 h

Interner Datenspeicher:
6000 Messwerte

Für verschiedene Anwendungsbereiche sind unterschiedliche Typen von Temperatursonden entwickelt worden, z.B. chemisch und Öl-resistente Sonden, bei denen das Phosphormaterial zusätzlich mit einer Glaskapillare umgeben ist, Sonden mit Keramikspitze für Temperaturen bis 450°C, Sonden mit elastisch ausgebildeter Sondenspitze für optimalen Oberflächenkontakt, oder Sonden mit einem Durchmesser der Sondenspitze von 25 µm für lokal sehr präzise Messungen sowie Sonden mit offenem Ende für "berührungslose" Temperaturmessung. Die Sondenquerschnitte sind in Abb. 5 dargestellt.

Als äußerst hilfreich hat sich die faseroptische Temperaturmessung im

Bereich der Mikrowellen erwiesen. Zwei Anwendungsbereiche seien herausgegriffen: Die Hyperthermie, eine Krebsbehandlungsmethode, bei der der Patient lokal bis an die Grenze des Möglichen "aufgeheizt" wird. Man nutzt bei dieser Behandlungsmethode aus, dass Krebszellen bei erhöhter Temperatur etwas eher als gesunde Zellen absterben. Die Überwachung erfolgt dabei mittels der faseroptischen Temperaturmessung. Als weiteres Beispiel sei die Optimierung der Verpackung und Essenzusammenstellung bei Mikrowellen-Fertiggerichten erwähnt. Die Probleme liegen hier im ungleichmäßigen Erhitzen der einzelnen Essensbestandteile oder

dem Zerkochen im Randbereich und unzureichender Erwärmung im Innern. Der Einsatz von Thermistoren oder Thermoelementen erwies z.B. als nicht erfolgreich, da hier Selbstaufheizeffekte und induziertes Rauschen das Messergebnis stark verfälschen. Auch die IR-Radiometrie liefert unzureichende Ergebnisse, da sie lediglich Aussagen über die Oberflächentemperatur machen kann.

Nur mit der faseroptischen Temperaturmessung gelingt es, die Aufheizvorgänge im Mikrowellenfeld zeitabhängig aufzuzeichnen. Abb. 6 zeigt ein mit Luxtron-Sensoren aufgenommenes Messprotokoll.

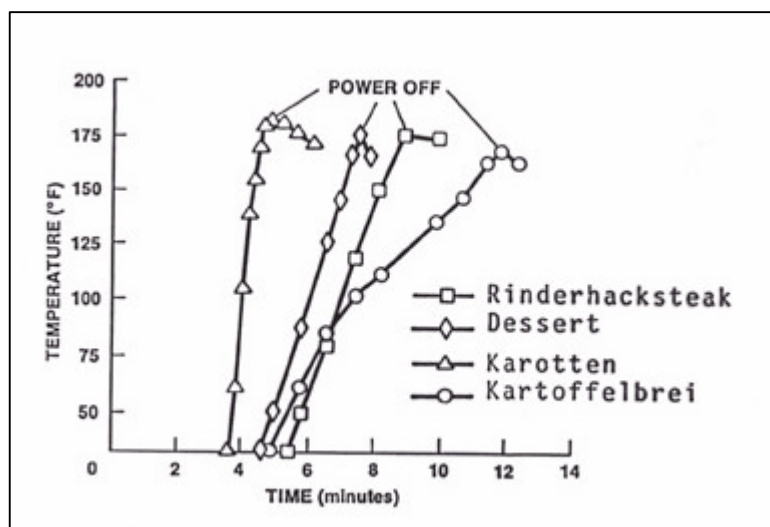


Abb. 6: Aufwärmverhalten der Komponenten eines Fertigmüs in üblicher Einzelverpackung.

Weitere Anwendungsbeispiele seien nur stichwortartig erwähnt: Mit dieser Methode gelang die "On-line-Messung" der Wicklungstemperaturen von Gross-Transformatoren und damit deren Optimierung. Bisher hatte man sich aufgrund der Starkstrom- und Hochspannungsprobleme mit Modellrechnungen begnügt. – Bei der Nitroglyzerin-Lagerung wird die faseroptische Temperaturmessung eingesetzt, weil man dort ungern mit elektrischen Leitern arbeitet und sich darüber hinaus die geringe Wärmeableitung und damit relativ schnelle Ansprechzeit der Glasfasersensoren zunutze machen möchte. –

Ohne Kurzschlussgefahr lassen sich elektronische Bauteile bei der Qualitätskontrolle überprüfen, und bei sehr kleinen Komponenten findet die Sonde mit einer nur 25 µm dicken Spitze besondere Beachtung. – Bei der Kontrolle der Wafer-Temperatur in Plasma-Ätz- oder Ionen-Implantationsanlagen sowie der Substrat in RF-Sputteranlagen machte bisher nur das elektro-magnetische Umfeld Probleme, sondern im vorhandenen Vakuum auch der thermische Kontakt zwischen Prüfling und Sensor.

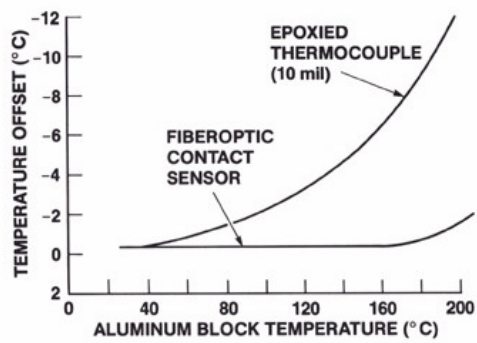


Abb. 7a: Vergleich des Temperaturmessfehlers eines aufgeklebten Thermoelements mit einer Glasfaser-Oberflächenmesssonde mit elastischer Prüfspitze.

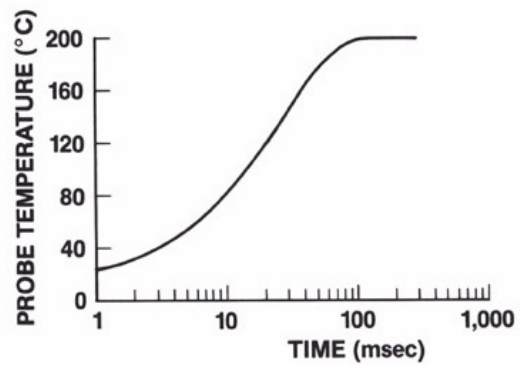


Abb. 7b: Zeitliches Ansprechverhalten der Oberflächenmesssonde mit elastischer Prüfspitze bei Berührung einer 200°C warmen Oberfläche.