

Lichtwellenleiter-Messung Ein neuer Ansatz zur Überwachung und Messung der Prozeßtemperatur

Die Kopplung von Lichtwellenleitern (LWL) mit Infrarot-Detektoren und Elektronik zur Signalverarbeitung ist ein relativ neues Gebiet der kontaktlosen Temperaturmessung und -regelung.

Lichtwellenleiter wurden erst vor kurzer Zeit das Objekt eines breiteren Interesses, hauptsächlich aufgrund ihrer Fähigkeit, optische Signale und Informationen über lange Entfernungen und um unvermeidbare Hindernisse herum zu übertragen.

Seit Jahren werden Infrarot-Detektoren mit konventionellen optischen Baugruppen wie Linsen, Spiegeln oder Prismen eingesetzt. Lichtwellenleiter wurden dabei nicht in Betracht gezogen, weil sie entweder aus Glas oder Kunststoff bestehen und diese Materialien über weite Bereiche des Infrarot-Spektrums undurchsichtig sind. Daher konnte eine Verbindung mit Infrarot-Detektoren nach den Grundlagen der Physik keine sinnvollen Resultate erbringen.

In monatelanger Entwicklungsarbeit konnte nachgewiesen werden, daß Infrarot-Strahlung tatsächlich in der Praxis durch Lichtwellenleiter übertragen werden kann. Damit wurde eine Verbindung von Lichtwellenleitern und IR-Detektoren möglich, die in der Folge zu einer ganzen Reihe neuer Instrumententypen und Regelsystemen führte, die alle überlegene Eigenschaften aufwiesen.

Da die Theorie der IR-Strahlung und die verschiedenen Methoden zur Messung von IR-Strahlung nicht als allgemein bekannt vorausgesetzt werden können, befaßt sich dieser Aufsatz hauptsächlich mit dem Einsatz von Lichtwellenleitern in Verbindung mit IR-Detektoren, d. h. mit deren Aufbau, Vorteilen, Nachteilen und natürlich mit deren Applikationen.

Ein typischer Lichtwellenleiter besteht normalerweise aus Silizium (Glas). LWL sind auch aus Kunststoff oder Quarz verfügbar; diese Materialien werden jedoch primär zur Datenübertragung eingesetzt. Heute besteht die überwiegende Anzahl der hergestellten LWL aus einem Licht-leitenden

Glaskern, der mit einer dünnen Hülle aus Glasgeflecht mit einem niedrigen Brechungsindex umgeben ist. Diese Hülle dient zum Schutz der Oberfläche des Glaskerns.

Alle in der IR-Instrumentierung eingesetzten Lichtwellenleiter sind aus einem Glas gefertigt, das speziell nach dessen Fähigkeit ausgewählt wurde, IR-Strahlung im gewählten Spektralbereich übertragen zu können.

Alle Strahlen, die an der Frontfläche des Leiters mit einem Winkel kleiner als der kritische Winkel auftreffen, werden im Kern des Leiters vollständig reflektiert und werden durch Reflexion im Kern weitergeleitet, bis sie entweder das andere Ende des Leiters erreicht haben oder vollständig absorbiert sind. Bei einem Leiter mit einem kritischen Winkel von X° bedeutet dies, daß alle an der Front in diesem oder einem kleineren Winkel auftreffenden Strahlen aufgrund der vollständigen Reflexion im Leiter "gefangen" sind.

Andererseits treten alle Strahlen, die in einem größeren Winkel auftreffen, nach dem ersten Kontakt mit der Innenfläche des Leiters wieder aus. Dieses Verhalten wird gerne als Spilling (Überlaufen oder Verschütten) bezeichnet (s. Abbildung 1).

Der Wert des kritischen Winkels, der als Öffnungs- oder Einkopplungswinkel bezeichnet wird, ist eine Funktion des Verhältnisses von Brechungsindex des Leiterkern-Materials und des den Kern umgebenden Mediums. Durch Variation dieses Verhältnisses ist es also möglich, den Öffnungswinkel zu beeinflussen und LWL mit besonderen Eigenschaften herzustellen.

Für die meisten IR-Überwachungsaufgaben werden die Lichtwellenleiter in einem Strang mit mehreren Hundert Einzelfasern zusammengefaßt, die jeweils mit einer eigenen Ummantelung aus metallischem oder nicht-metallischem Material umgeben sind. Die Enden sind mit einem temperaturfesten Epoxy-Kleber verklebt und poliert, um einen klar definierten Öffnungswinkel zu erhalten und Reflexionsverluste

aufgrund von Unebenheiten der Oberfläche zu verhindern. Durch die Kombination einer großen Anzahl schmaler Fasern zu einem Bündel ist es möglich, mehr Strahlung einzufangen und an den Detektor zu übertragen, ohne auf mechanische Flexibilität zu verzichten. Der Außendurchmesser einer Einzelfaser liegt im Bereich von 25 μm .

Etwas verallgemeinernd kann man sagen, daß in den meisten Applikationen Lichtwellenleiter mit einer Länge von 1 bis 2 Metern eingesetzt werden, um die IR-Strahlung an den Detektor heranzuführen, gelegentlich können aber auch Längen von bis zu 10 Metern vorkommen. Die entscheidenden Faktoren bei der Verwendung von Multimode-Fasern zur Übertragung von IR-Strahlung sind die untere Meßbereichsgrenze, die Entfernung des Meßobjekts und die Größe des Meßflecks. Je höher die Temperatur ist, umso länger kann die LWL-Strecke sein. Umgekehrt verkürzt sich bei niedrigen Temperaturen aufgrund der Dämpfung die realisierbare Länge der LWL.

Nicht-fokussierte Fasern, also Fasern ohne Linse, haben ein Sichtfeld oder Öffnungswinkel von 60° . Dies gibt die Fläche des Meßobjekts an, die der Detektor wahrnimmt. Sie ist etwas größer als der Abstand zwischen Meßobjekt und der Front des Lichtwellenleiters. Dies kann leicht verifiziert werden, indem das Meßobjekt mit sichtbarem Licht angestrahlt wird. Nicht-fokussierte LWL werden für Meßobjekte mit einer größeren Fläche eingesetzt, wenn die mittlere Temperatur gemessen werden soll.

Fokussierte Fasern, also Fasern, die mit einer Linse oder Optik versehen sind, werden zur Messung kleinerer Objekte eingesetzt. Dabei lassen sich Meßfleck-Größen von 0,1 mm auf Entfernungen von 4,5 m oder mehr realisieren. Der entscheidende Faktor ist wie bei der Länge des Lichtwellenleiters die Energiemenge, die aufgenommen werden muß. Durch Beleuchten des Meßobjekts kann sichergestellt werden, daß die Optik richtig fokussiert und ausgerichtet ist. In einigen Applikationen, in denen Schwingungen oder andere Einflüsse zu einer Fehlpositionierung des Aufnehmers führen können, kann eine gegabelte Faser verwendet werden. Der eine Strang wirft einen starken Lichtstrahl, der durch einen Taster aktiviert wird, auf das Meßobjekt. Der zweite Strang führt zum IR-Detektor, der die durch den Lichtpunkt angezeichnete Stelle mißt.

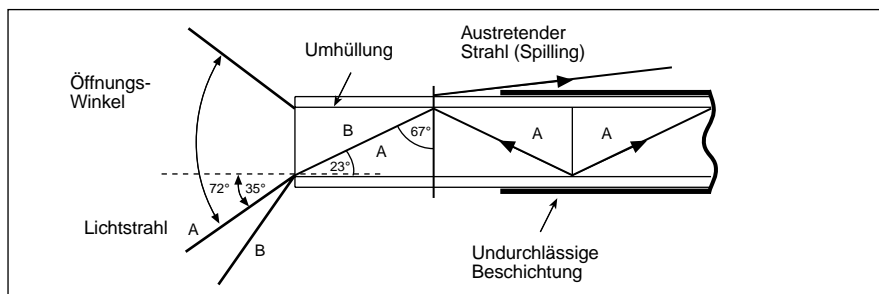


Abbildung 1. Aufbau und optische Eigenschaften von Lichtwellenleitern

LWL-Arten und Bauformen

LWL- und Linsen-Konfigurationen sind in so großer Auswahl verfügbar, daß für nahezu beliebige Anwendungen eine geeignete Konfiguration gefunden werden kann. Die folgende Übersicht zeigt eine Auswahl der Komponenten, aus denen ein LWL-Meßsystem bestehen kann.

Ummantelung

- Optische Systeme mit einfachen, zwei- oder dreifach gesplitteten LWL
- Flexible Edelstahluummantelung (Standard)
- Ummantelung aus Edelstahlgeflecht für besondere Beanspruchung
- Imperial Eastman Ummantelung für besondere Beanspruchung
- PTFE (für starke elektromagnetische Felder)
- Schutzrohre

Linsen

- 1,27 cm, 1,90 cm, 2,54 x 8,59 cm, bis 27,7 cm maximal.
- Schwarz eloxiertes Aluminium
- Winkellinsen-Konfigurationen

Austauschbare Meßspitzen

- Glas oder Quartz, 7,62, 15,24 und 22,86 cm lang
- Mantel aus Keramik oder Edelstahl

Optikstäbe

- Glas oder Quartz, 7,62, 15,24 und 22,86 cm lang
- Mantel aus Keramik oder Edelstahl

Sonderzubehör

- Umlenkprismen und Hochgeschwindigkeits-Scanner

Applikationen

Da praktisch jedes beliebige Produkt – vom Auto bis zur Sicherheitsnadel – in irgendeiner Form einer Wärmebehandlung unterzogen wird, sind die Einsatzmöglichkeiten der kontaktlosen Temperaturmessung praktisch unbegrenzt.

Induktionsöfen

Durch das starke elektromagnetische Feld, das zur Aufheizung von Metallteilen eingesetzt wird, sind konventionelle Meßsysteme von begrenztem Wert, da auch sie induktiv erhitzt würden.

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen typische Applikationen für LWL-Temperaturmeßsysteme zur Überwachung und Regelung der Induktionsheizung von ruhenden und bewegten Metallteilen.

Eine präzise Regelung der Temperatur zur Vergütung des Stahls ist zwingend erforderlich, um die Kristallstrukturen zu erzeugen, die notwendig sind, um die geforderten mechanischen

Spezifikationen zu erreichen. Diese Regelung erfolgt entweder durch eine Zweipunkt-Regelung oder eine schnelle PID-Regelung, die in das LWL-Temperaturüberwachungssystem integriert ist.

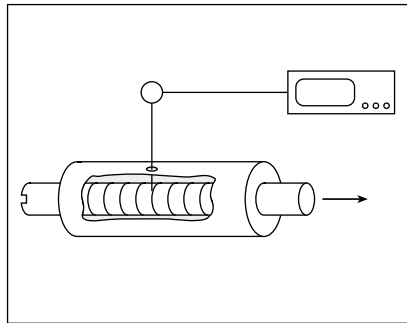


Abbildung 2. Überwachung einer kontinuierlichen Induktionsvergütung von Stahlstäben

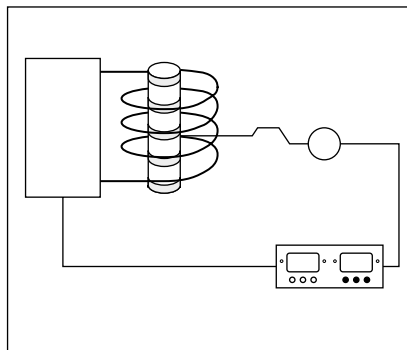


Abbildung 3. Regelung der Induktionsvergütung von Kurbelwellen

Im Vergleich zu konventionellen, auf einer geraden Sichtlinie basierenden IR-Meßsystemen ermöglichen es Lichtwellenleiter-Systeme, die Eintrittsfläche des Lichtwellenleiters in unmittelbarer Nähe des Meßobjekts zu positionieren. In vielen Fällen kann die Meßspitze sogar zwischen den Induktionswicklungen angebracht werden. Um ungünstige Einflüsse des elektromagnetischen Felds zu vermeiden, wird eine austauschbare Meßspitze aus Keramik verwendet. In Anwendungen, in denen kein ausreichender Platz zur Installation der LWL vorhanden ist, kann ein Linsensystem eingesetzt werden, mit dem die Meßobjekte aus der Entfernung gemessen werden.

Lichtwellenleiter und Elektronik werden normalerweise durch die Induktionsfelder nicht beeinflusst. In Umgebungen, in denen eine extreme hohe Belastung mit elektrischen Störsignalen vorliegt, kann ein synchrones Demodulations-System eingesetzt werden. Dieses System setzt ein 400 Hz-AC-Signal des Meßkopfs in eine Gleichspannung um und unterscheidet sich von anderen AC/DC-Umsetzern dahingehend, daß nur der 400 Hz-Signalanteil umgesetzt wird. Auf diese Weise werden Störsignale effektiv unterdrückt.

Gießwalzen

In dieser Applikation werden Lichtwellenleiter mit bis zu 10 m Länge eingesetzt. Sie sind zwischen den Walzen mit einem Abstand von wenigen Zentimetern zum Walzgut installiert und werden an einen Multiplexer geführt, der eine sukzessive Messung der einzelnen Meßstellen vornimmt. Auf diese Weise lassen sich nennenswerte Kosten- und Platzeinsparungen realisieren. Da der Lichtwellenleiter eine von der Umgebung abgeschirmte, konstante Übertragungstrecke für die IR-Strahlung bietet und ein Siliziumdetektor für kurze Wellenlängen von 0,8 bis 1 µm eingesetzt wird, ist das System in der Lage, das Meßobjekt durch Rauch, Dampf und andere Verunreinigungen hindurch zu überwachen.

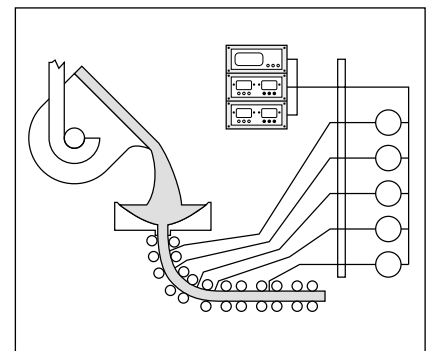


Abbildung 4. 5-Kanaliges System mit Multiplexer und Anzeige

Üblicherweise sind die Lichtwellenleiter in derartigen Applikationen sehr hohen Temperaturen und anderen mechanischen Belastungen ausgesetzt, so daß eine Luftspülung und eine Ummantelung für hohe Beanspruchung vorzusehen ist. Der Luftspülanschluß ist so ausgelegt, daß der Luftstrom am Ende der Lichtwellenleiter im rechten Winkel zu diesen austritt und so den Aufbau von Verunreinigungen verhindert.

Schmieden, Stanzen und Formen

Zum Schmieden von Metallen zählt in diesem Zusammenhang sowohl die grobe Formgebung als auch die Präzisionsbearbeitung des Werkstücks, bei der weniger Material abgetragen wird. Auch das Biegen und Formen von Röhren fällt in diesen Kontext, da bei allen diesen Applikationen das Werkstück auf verschiedene Weise (Ofen, Flamme, Induktion usw.) auf die zur Weiterverarbeitung optimale Temperatur gebracht wird. Wird diese Temperatur nicht erreicht, bilden sich Risse und Spannung im Material. Wird die optimale Temperatur überschritten, leidet die Festigkeit des Materials. Durch eine präzise Temperaturregelung mit einem LWL-Infrarotsystem lassen sich also folgende Verbesserungen erreichen:

- Geringerer Ausschuß, da Materialfehler wie Risse oder Ermüdung vermieden werden.



Abbildung 6. IR-Meßsystem

Behandeln von verschiedenen Metallen eingesetzt. Die konventionelle Methode zur Messung der Laserleistung besteht darin, in regelmäßigen Abständen den Laserstrahl selbst zu messen, um dessen Leistung auf dem gewünschten Pegel zu halten. Bei diesem Ansatz wird jedoch nicht der Emissionsfaktor der Metalloberfläche berücksichtigt, die die vom Werkstück aufgenommene Energiemenge und folglich dessen Temperatur beeinflusst. Die Temperatur wiederum ist von entscheidender Bedeutung für einen optimalen Betriebsablauf.

Diese Schwierigkeit kann durch den Einsatz eines von Emissionsfaktor unabhängigen Infrarot-LWL-Systems umgangen werden, daß auf den Auftreffpunkt des Laserstrahls gerichtet ist. Das Infrarot-System ist gegenüber der Wellenlänge des Lasers unempfindlich und kann so die Temperatur präzise messen. Somit ist auch eine Regelung der Laser-Ausgangsleistung möglich, um sicherzustellen, daß die Bearbeitung bei der optimalen Betriebstemperatur erfolgt.

Dieses Meßverfahren mittels Infrarot-Thermometer und Lichtwellenleiter bietet eine Reihe von Vorzügen:

- Einsparung von Energie, da keine Energie darauf verschwendet wird, das Werkstück über die optimale Temperatur hinaus zu erhitzen.
- Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit durch schnelleres Aufheizen der Werkstücke ohne die Gefahr des Überspringens.
- Effizientere Produktion durch schnellere Gießzyklen, da eine temperaturabhängige Regelung erfolgt.
- Verbesserung der Qualität und Vereinfachung des Produktionsablaufs, insbesondere in der Anfahrphase und nach Unterbrechungen.
- Direkte Anzeige der Werkzeug- und der Schmelztemperatur lassen einen Rückschluß auf Fehler zu, bevor sich diese im Produkt auswirken.
- Kontaktlose Messung der Temperatur in Echtzeit
- Lichtwellenleiter ermöglichen dank ihrer kleinen Abmessungen einen einfachen Zugang zum Arbeitsbereich des Lasers
- Das Meßsystem kompensiert Änderungen des Emissionsfaktors beim Erhitzen des Werkstücks automatisch
- Ansprechverhalten des Meßsystems kann dem des Lasers angepaßt werden.

Druckguß

Beim Druckguß von Metallen ist die Formtemperatur die kritische Größe. Dabei konnte mit Hilfe der Temperaturmessung mit LWL anstelle einer rein zeitabhängigen Steuerung eine Temperaturregelung nach der Formtemperatur implementiert werden. Abbildung 5 zeigt schematisch, wie die Meßspitze durch den Werkzeugrahmen geführt ist und direkt mit dem Kanal in Kontakt steht, durch den das Aluminium fließt.

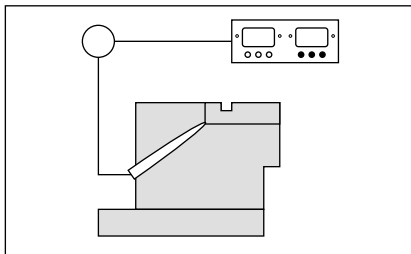


Abbildung 5. Messung der Werkzeug-Temperatur

Die wesentlichen Vorteile dieser Lösung sind:

- Deutliche Energieeinsparungen, da eine Überhitzung entfällt. Damit reduziert sich auch die Ausschuß-Menge.

Regelung von Lasern in der Metallverarbeitung

Laser, zumeist energiereiche CO₂-Laser, werden zum Schweißen, Schneiden und

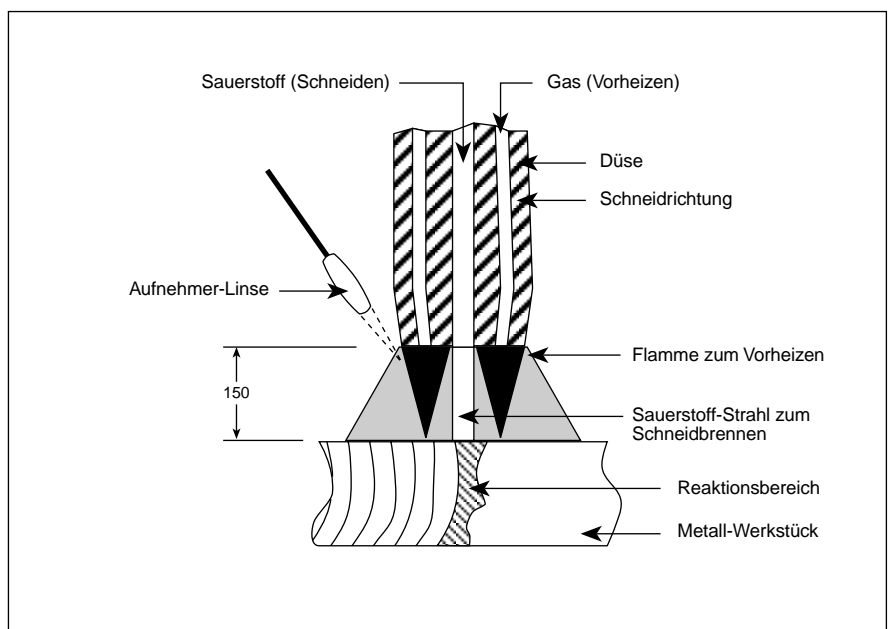


Abbildung 7. Temperaturmessung beim Schneidbrennen

Schneidbrennen

Schneidbrennen wird als automatisierter Prozeß zum Schneiden von Stahlplatten in verschiedene Formen eingesetzt (s. Abbildung 7).

Während der Aufheizphase erhitzt eine Erdgas- oder Propangasflamme den Bereich um die Schnittfläche, bis das Metall geschmolzen ist, erkennbar an der Bildung von Metalltropfen. Nachdem sich diese Tropfen gebildet haben, wird der Sauerstoff eingeleitet und bläst das flüssige Metall durch den entstehenden Schnitt. Wenn mehrere Düsen verwendet werden, kann die Zeit zum Schmelzen des Metalls von Düse zu Düse unterschiedlich sein.

Wenn der Sauerstoff zu früh eingeblasen wird, entsteht kein perfekter Schnitt, sondern es entsteht eine rauhe, löcherige Vertiefung in der Platte.

Indem ein Glasfaserstrang mit Linse so positioniert wird, daß das Instrument durch die Flamme hindurch auf die Oberfläche des Werkstücks sehen kann, ist eine Überwachung und Regelung der Temperatur möglich. In Verbindung mit Multiplexern und einer Reihe hintereinandergeschalteter Relais wird der Sauerstoff erst freigegeben, wenn alle Sollwerte erreicht und die dazugehörigen Relais geschlossen sind.

Brennhärten von Stahlrädern

Das Härten der Lauffläche von Stahlrädern schwerer Baumaschinen wie Bulldozer oder Kräne sowie anderer schienenengebundener Maschinen erfolgt zur Zeit durch Brennhärten.

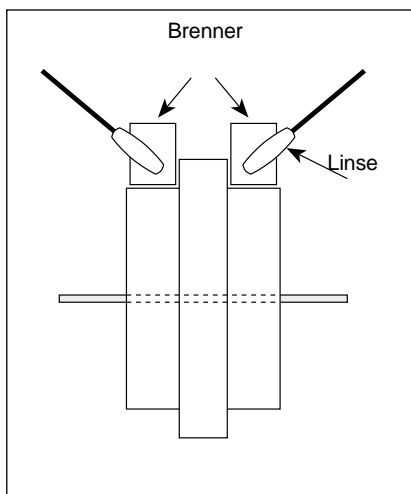


Abbildung 8. Position der Brenner

Dabei wird zu jeder Seite des Rades ein Brenner positioniert (s. Abbildung 8). Während sich das Rad dreht, trifft die Flamme auf die Oberfläche auf und heizt diese auf ca. 980°C auf. In unmittelbarer Nähe des Brenners wird die Oberfläche durch Kühlwasser abgeschreckt (s. Abbildung 9).

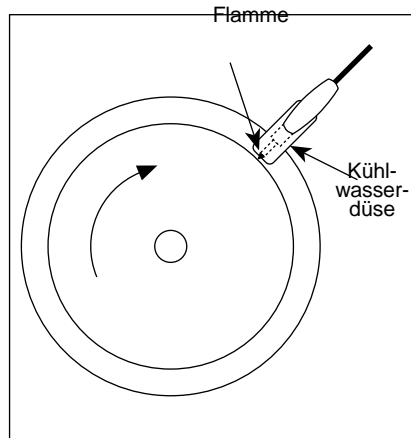


Abbildung 9.

Da die Räder nie perfekt gerundet und plan sind, können die Brenner nicht fest positioniert werden, da der Härtingsprozeß in diesem Fall nicht gleichmäßig erfolgen würde.

Durch eine Messung des optimalen Punkts am Rad, durch die "reine" Erdgasflamme hindurch, können Temperaturunterschiede erkannt werden. Dieses Signal wird einem pneumatischen oder mechanischen Servo-Mechanismus zugeführt, der die Brennerposition entsprechend korrigiert. Dieses Verfahren erlaubt den Verzicht auf eine zerstörende Materialprüfung, woraus erheblich Kosteneinsparungen resultieren.

IR-Temperaturmessung in der Koksherstellung

Mit einer Überwachung von Füllstand und Temperatur sind IR-Thermometer in der Lage, den optimalen Wirkungsgrad bei der Koksherstellung sicherzustellen. Durch Multiplexen mehrerer übereinander angeordneter IR-Thermometer kann sowohl die Füllhöhe als auch die Temperatur im Koksofen gemessen werden.

Wenn die gewünschten Parameter erreicht sind, aktiviert ein Signal des Reglers einen Schieber, der den Koks in einen wartenden Transferwagen füllt. Auf diese Weise ist eine konsistente Produktqualität bei gleichzeitiger Einsparung von Energie sichergestellt.

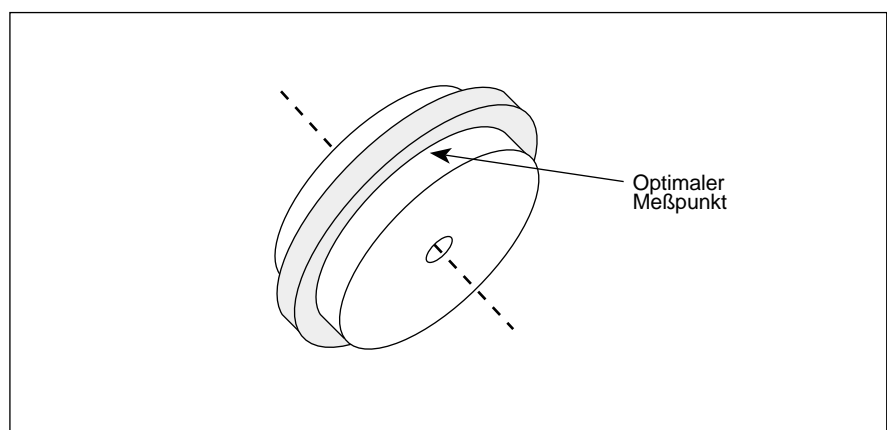


Abbildung 10.

Die in diesem Aufsatz aufgeführten Beispiele zeigen einige der vielfältigen und ganz unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten von Lichtwellenleitern zur Messung von Temperaturen. Denkbare Einsatzbereiche sind ausschließlich durch die Phantasie der Applikationsingenieure begrenzt.

Wie viele moderne Technologien auch entwickelt und verbreitet sich die IR-Temperaturmessung mit exponentieller Geschwindigkeit. Wie IC's, RAMs, ROMs und EEPROMs sind auch Lichtwellenleiter nicht mehr aus modernen Industrieprozessen wegzudenken.

Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Vanzetti Instruments