

NEUES VERHÄLTNISPYROMETER FÜR DIE DIGITALE TEMPERATURMESSUNG

Gerd Nowack

Kurzfassung: Aus dem Verhältnis der Strahlungsleistungen benachbarter Spektralbereiche kann man unter Anwendung des Planck'schen Strahlungsgesetzes die Temperatur berechnen, unabhängig von der Oberflächen-Emissivität des Materials, unabhängig von zeitlichen und thermischen Driften gleichlaufender Photomultiplier und sogar unabhängig von Dämpfungen in Gasen oder durch verschmutzte Strahlungsfenster. In dieser Arbeit wird nur ein Interferenzfilter benutzt, dessen Ausgangs-Strahlungsleistung auf die ungefilterte Gesamtleistung bezogen wird. Es ergeben sich folgende Vorteile:

- (a) nahezu lineares Verhalten im Bereich von 500 bis 900°C
- (b) nahezu gleiche Aussteuerung beider Kanäle
- (c) nahezu keine Divisionsfehler (großer Divisor)

Maximal kann eine Temperatur von 1500°C gemessen werden, da oberhalb Mehrdeutigkeit auftritt. Die Kalibrierung der Empfindlichkeit der beiden Photomultiplier, der Meßwertaufnahme mittels eines 12-Bit-ADC's und die numerische Kalibrierung des Pyrometers mit Hilfe einer Spline-Interpolation übernimmt der Digitalteil.

Schlagworte: Temperaturmessung, photomultiplier, spline interpolation, microprocessor.

1. Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Grundlagen

Berührungslose Temperaturmessung ist in vielen Anwendungen wünschenswert: Prozeßüberwachung, Qualitätskontrolle, Fehlerortung, usw. und in einigen Anwendungen unerlässlich:

Dr.-ing Gerd Nowack ist am Lehrstuhl für Datenverarbeitung, Ruhr-Universität Bochum beschäftigt, Universitätsstrasse 150, 44780 Bochum, BRD.

Manuscript received January 25, 1994.

- (a) Die Temperatur ist so hoch, daß die Sensoren im direkten Kontakt zerstört würden: ca. 500°C für Absolutwertsensoren.
- (b) Die Sensoren verfälschen im direkten Kontakt die Temperatur schlecht wärmeleitender Medien: Auskühlung der Meßstelle, z.B. bei Kunststoffen oder (in der Medizin) der menschlichen Haut.

Im einfachsten Fall wird der Betrag der Infrarotstrahlung mit Hilfe einer IR-Optik, eines radiometrischen Sensors und einer mikroprozessorunterstützten Schaltungstechnik gemessen. Dazu gelten folgende Beziehungen:

Die Signalspannung am Sensor berechnet sich zu:

$$U_m = E \cdot A_R \cdot v_t \cdot R$$

mit:

E = Bestrahlungsstärke des Detektors (in W/cm^2)

A_R = Apertur (eff. Fläche) der Optik

v_t = Transmission der Optik (max.=1)

R = Empfindlichkeit des Sensors (Konversionsfaktor in V/W)

Die Bestrahlungsstärke E am Detektorkopf resultiert aus der Temperaturstrahlung eines (Ober-) Flächen- Strahlers:

$$E = \Omega \cdot SSL$$

mit:

Ω = Raumwinkel des Gesichtsfeldes des Detektors (= A_O/f^2 bei Verwendung einer Optik: A_O =Oberfläche der ersten Linse, f =Brennweite)

SSL = Spez. Strahlungsleistung der Meßfläche ($\text{Wcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)

Die spez. Strahlungsleistung (SSL) ergibt sich aus dem Integral der spektralen Leistungsdichte (L) über der Wellenlänge:

$$SSL = \int L \cdot d\lambda$$

mit:

L = Spektrale Leistungsdichte (in $\text{Wcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)

λ = Wellenlänge der Strahlung (in μm)

Die spektrale Leistungsdichte (L) ist für den idealen Schwarzen Körper durch das Planck'sche Grundgesetz der Strahlung gegeben:

$$L = \frac{hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}$$

mit:

$$L = f(\lambda, T) \text{ in: } \text{Wcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$$

$$h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^2, \text{ Planck'sche Konstante}$$

$$c = 2,997925 \cdot 10^{10} \text{ cm/s, Lichtgeschwindigkeit}$$

$$k = 1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ Js/K, Boltzmann-Konstante}$$

Im betrachteten Temperaturbereich von ca. 1000 K und Wellenlängen bis max. 10 μm kann das Planck'sche Gesetz durch die Wien'sche Näherung ersetzt werden: In der eckigen Klammer kann dann auf den Abzug der 1 verzichtet werden:

$$L_\lambda = \frac{hc^2}{\lambda^5 \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)}. \quad (1)$$

Reale Oberflächen sind nun allerdings keine idealen Schwarzen Strahler. Da nach dem Kirchhoff'schen Gesetz von 1858 der Grad der Emission gleich dem Grad der Absorption ist, ist die Abstrahlung einer realen Oberfläche gerade um den gleichen Faktor geringer als die Absorption einer realen Oberfläche kleiner ist als die Absorption eines Schwarzen Strahlers. Ist der Absorptions- bzw. Emissionsgrad unabhängig von der Wellenlänge, so spricht man von einem Grauen Strahler. Da der Absorptionsgrad leichter gemessen werden kann als der Emissionsgrad, ist das Kirchhoff'sche Gesetz von großer Wichtigkeit bei normalen Pyrometern. Bei den Verhältnispyrometern, die den Quotient zweier verschiedener Spektralleistungsbereiche bilden, spielt der Emissionsgrad der Oberfläche keine Rolle mehr, da er sich herauskürzt - insoweit es sich um einen Grauen Strahler handelt.

Für nicht durchsichtige Oberflächen gilt nach dem Energieerhaltungssatz, daß der Anteil nicht absorbierter Strahlung reflektiert wird, d.h. eine ideal reflektierende Oberfläche absorbiert keine Strahlungsleistung und sendet (nach Kirchhoff) keine aus. Ein ideal verspiegelter Körper kann im Vakuum also keinen Temperatureausgleich mit seiner Umgebung herstellen, da er keine Strahlung absorbiert bzw. emittiert. In diesem Falle ist ein Pyrometer zur Temperaturmessung also ungeeignet.

1.2 Stand der Technik

Konventionelle Verhältnispyrometer (auch 2-Farben-Pyrometer) arbeiten mit zwei Interferenzfiltern benachbarter Spektralbereiche, in denen die Emissivität der Oberfläche möglichst gleich groß ist. Aus dem Verhältnis der Strahlungsleistungen kann man unter Anwendung des Planck'schen Strahlungsgesetzes die Temperatur berechnen, unabhängig von der Oberflächen-

Emissivität und sogar unabhängig von der zeitlichen und thermischen Driften gleichlaufender Photomultiplier. Der Abstand zwischen Gerät und Meßfläche geht, wie bei allen Verhältnispyrometern, nicht in die Messung ein, solange in einem Kanal nicht die Grenzempfindlichkeit unterschritten wird.

Nachteil dieser Anordnung aber ist die starke Nichtlinearität der Temperatur als Funktion des Strahlungsleistungs-Verhältnisses v , die unter Anwendung der obigen Gleichung (1) aus dem Verhältnis $v = L_{\lambda_1}/L_{\lambda_2}$ bestimmt werden kann:

$$v = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \exp \left[\frac{hc}{kT} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right]$$

Der Einfachheit halber wird diese Gleichung zunächst nach $1/T$ aufgelöst:

$$\frac{1}{T} = \frac{k}{hc} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \ln \left[v \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \right]$$

mit: $1/T = f(v)$ und k, h, c , als Konstanten, sowie λ_1 und λ_2 als Mittenfrequenz der IR-Filter.

Durch Zusammenfassung konstanter Größen kann die Temperatur T aus folgender Funktion bestimmt werden:

$$\frac{T}{K} = \frac{k_1}{\ln \left(\frac{v}{k_2} \right)}, \quad (2)$$

mit:

$$\frac{1}{k_1} = \frac{k}{hc} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad \text{und}$$

$$\frac{1}{k_2} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5.$$

Diese Gleichung für die absolute Temperatur soll für ein Zwei-Farben-Pyrometer, das bei den Wellenlängen $\lambda_1 = 500$ nm und $\lambda_2 = 1000$ nm arbeitet, ausgewertet werden: Mit $k_1 = -14200$ und $k_2 = 32$ sind folgende Tabellenwerte berechnet worden:

v	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
T/K	2463	1760	1369	1121	948	822

Da der hier interessierende Temperaturbereich zwischen 750 und 1200 K liegt, treten Signalspannungen im Verhältnis $v_u = 5 \cdot 10^{-4}$ und darunter auf. Wegen der logarithmischen Funktion variiert der Verhältniswert v_u über ca. 75 dB.

2. Die Idee des neuen Pyrometers

Das konventionelle 2-Farben-Pyrometer hat folgende wesentliche Nachteile:

- (a) stark nichtlineare Konversionsfunktion (s.o.: (2))
- (b) erschwerte numerische Korrektur bei der Kalibrierung
- (c) großer Dynamikbereich der beiden Meßgrößen
- (d) starke Rauschprobleme im Low-Level-Kanal

In dieser Arbeit wird nur ein Interferenzfilter benutzt, dessen Strahlungsleistung im Durchlaßbereich auf die Gesamtleistung, gemessen in einem ungefilterten Kanal, bezogen wird. Hierbei ergeben sich folgende Vorteile:

- (a) nahezu lineares Verhalten im Bereich von 500 bis 900° C
- (b) nahezu gleiche Aussteuerung beider Kanäle
- (c) nahezu keine Divisionsfehler (großer Divisor)

Im ungefilterten Kanal bestimmt dann letztlich die spektrale Empfindlichkeit des Sensors selbst, welche Strahlungsanteile zum Meßsignal beitragen. Innerhalb dieses Spektralbereichs sollte der Emissionsgrad der Meßoberfläche konstant sein, was für dunkel farbige Nichtmetalle im besonderen Maße gilt.

In dieser Arbeit werden zwei Photomultiplier (PMT) der Firma Hamamatsu vom Typ R1387 verwendet. PMT's sind leider sehr unempfindlich im Infrarotbereich, da die Energie der Photonen nicht mehr ausreicht, um die Austrittsarbeit der Photoelektronen zu leisten. Im UV-Bereich begrenzt dann das Glasmaterial durch Absorption die Empfindlichkeit, so daß der typische Spektralbereich bei PMT's mit Bialkali-Kathode bei 300-850 nm mit einem Maximum bei 420 nm liegt. Als ein weiterer Nachteil ist die Störung des Meßsystems durch Hintergrundlicht anzuführen, was im Falle eines Schwarzen Strahlers natürlich nicht stört, da sein Reflexionsfaktor Null beträgt. PMT's besitzen allerdings auch einen großen Vorteil, da sie eine innere Verstärkung durch Vervielfachung der Photoelektronen von ca. 10^5 bis 10^6 haben. Diese überragende Empfindlichkeit ist der Grund, diese Sensoren auszuwählen. Die Grenzfrequenz und das Signal/Rausch-Verhältnis sind ebenfalls außergewöhnlich hoch.

Die folgende Abbildung (Abb. 1) zeigt die Spektralempfindlichkeit der Sensoren (PMT-Kathode):

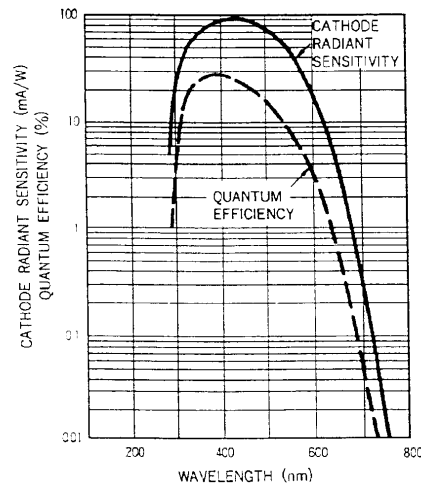


Abb. 1: Spektrale Empfindlichkeit der Bi-alkali-Photokathode

Die spektrale Empfindlichkeit (Cathode Radiant Sensitivity) ist definiert als das Verhältnis aus dem Photostrom der Kathode zur Strahlungsleistung bei einer bestimmten Wellenlänge.

Der Quantenwirkungsgrad (Quantum Efficiency) gibt den Prozentwert der erzeugten Photoelektronen zur Anzahl der auftreffenden Lichtquanten an. Mit zunehmender Wellenlänge geht die Energie des Lichtquanten zurück und damit die Austrittswahrscheinlichkeit der Photoelektronen. Im Bereich niedriger Wellenlängen bestimmt das Absorptionsverhalten des Fenstermaterials die Empfindlichkeit. Zwischen der Empfindlichkeit (S) und dem Quantenwirkungsgrad (QE) besteht ein eindeutiger, formaler Zusammenhang:

$$QE = \frac{1240S}{A \lambda} 100\% \\ \frac{W}{nm}$$

Die Stromverstärkung des Photomultipliers beträgt:

$$v_i = SER^n$$

mit: SER=Sekundäremissionsrate und n =Anzahl der Dynoden.

Die Sekundäremissionsrate selbst hängt vom Beschichtungsmaterial und der Geometrie der Dynoden, sowie der Beschleunigungsspannung zwischen den Dynoden ab. Die Hochspannungsversorgung muß deshalb bezüglich Stabilität, Welligkeit, Zeit- und Temperaturdrift nahezu ideale Eigenschaften besitzen.

Eine wesentliche Störgröße bei der Messung kleiner Strahlungsleistungen ist der Dunkelstrom der PMT's, der sich aus einem Anteil durch thermische Emission und einem durch Feldemission zusammensetzt. Durch den Betrieb der PMT's an 900 V (statt 1250 V, max.) konnte die Feldemission unterdrückt werden, so daß sich ein Dunkelstrom kleiner als 1 nA ergibt.

Die Driftprobleme der PMT's wurden durch die Autokalibrierung mit Referenzlicht ausgeschaltet.

Das hier beschriebene, neuartige Verhältnispyrometer wertet das Verhältnis der Strahlungsleistung hinter einem schmalbandigen Interferenzfilter (Mitte: $\lambda=656$ nm; Bandbreite: 10 nm) zur Gesamtstrahlungsleistung, entsprechend der spektralen Empfindlichkeit des PMT's (s. Abb. 1), aus.

Das Ergebnis der numerischen Berechnung liefert die Umkehrfunktion, mit deren Hilfe die Temperatur (T/C) aus dem Strahlungsverhältnis ($v = L_1/L_2$) bestimmt werden kann. Die folgende Abbildung (Abb.2) zeigt zwischen 200 und 1000°C einen nahezu linearen Zusammenhang der Temperatur und dem Leistungsverhältnis.

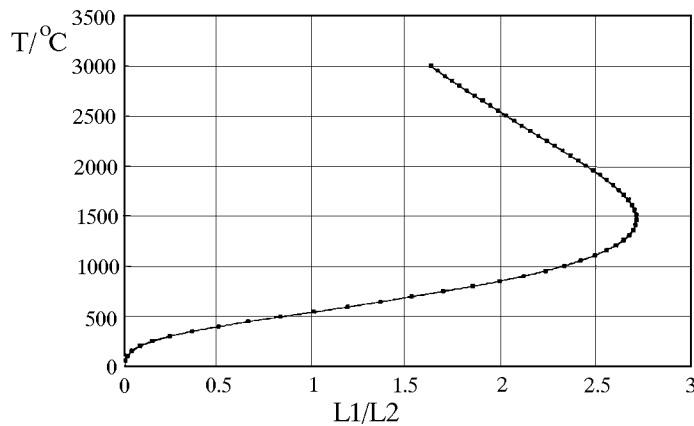


Abb. 2: Konversionsfunktion zur Temperaturberechnung

Die geringe Abweichung von einem streng linearen Verhalten bietet die beste Voraussetzung für eine effektive Fehlerkorrektur nach der Kalibrierung

des Meßsystems. Der Aperturwinkel der beiden Meßkanäle wurde so gewählt, daß das Leistungsverhältnis bei der mittleren Temperatur ca. Eins beträgt. Beide PMT's arbeiten jetzt bei fast gleicher Bestrahlungsstärke. Dadurch wird erreicht, daß das Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) in beiden Kanälen etwa gleich groß ist, daß die Division keine zusätzlichen Fehler verursacht und daß eine konstante Genauigkeit über den ganzen Meßbereich erzielt werden kann.

Die folgende Abbildung (Abb. 3) zeigt die schon bekannte starke Nichtlinearität der Umkehrfunktion im Falle eines konventionellen Verhältnispyrometers, berechnet für zwei Wellenlängen: $\lambda_1=656$ nm und $\lambda_2=546,1$ nm mit einer Filterbandbreite von 10 nm.

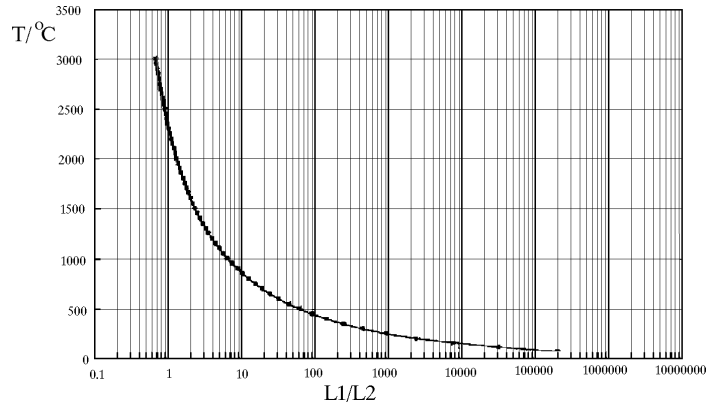


Abb. 3: Nichtlinearität des konventionellen Verhältnispyrometers

Die endgültige Temperaturmessung ist kalibriert, indem das gemessene Strahlungsverhältnis v der tatsächlichen Temperatur (berührende Thermoelementmessung) gegenübergestellt wird und die Werte zwischen den Stützwerten mit Hilfe der Spline-Interpolation bestimmt werden.

3. Der Aufbau des Gerätes

Die Abb. 4 zeigt das Blockschaltbild des Temperatur-Strahlungs-Meßgerätes. Die zwei auf den Meßfleck ausgerichteten Sensorköpfe werden mit Hochspannung versorgt. Das schaltbare Referenzlicht (aus LED's) dient der Autokalibrierung. Die jeweiligen PMT-Meßsignale und Kalibriersignale für das Referenzlicht werden gefiltert, verstärkt und digitalisiert dem Rechner zugeführt. Die Filter sind SC-Filter fünften Grades mit einer Eckfrequenz von 10 Hz. Der A/D-Wandler hat eine Auflösung von 12 Bit (Typ

MAX182 der Fa. Maxim) und eine Konversionszeit von $60 \mu s$. Da es sich um ein autonomes Meßgerät handelt, sind Ausgabe- und Eingabemöglichkeiten vorhanden, sowie eine Schnittstelle zu einem PC.

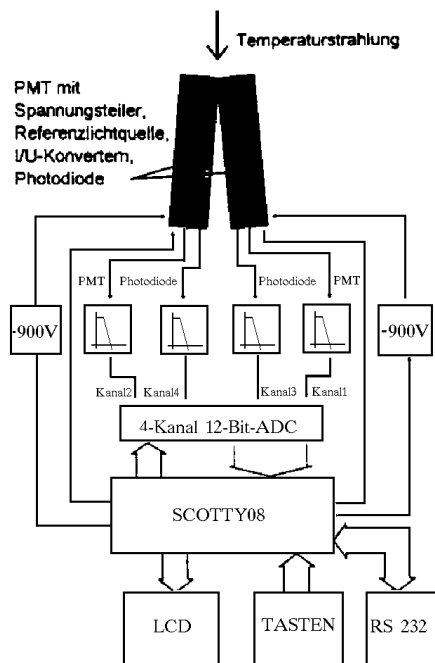


Abb. 4: Blockschaltbild des Pyrometers

Die folgende Abbildung (Abb. 5) zeigt den Aufbau des Sensorkopfes.

Aus der Geometrie der Lochblenden ist der unterschiedliche Aperturwinkel der Meßkanäle bestimmbar: der ungefilterte Kanal hat eine wesentlich kleinere Apertur. Zu sehen sind Referenzlicht-LED, Photodiode und PMT. Im Analogteil (Nr.7 der Stückliste) befinden sich zwei I/U-Konverter. Der für den Photostrom ist umschaltbar: 10^5 , 10^6 und $10^7 \Omega$ und der für die Photodiode ist fest auf $10^7 \Omega$ eingestellt.

3.1 Hardware

3.1.1 Analogteil

Der Analogteil beginnt mit den beiden PMT's: Head-on Typ R1387-01 der Fa. Hamamatsu mit Borsilikatfenster (aktiver Durchmesser: 34 mm),

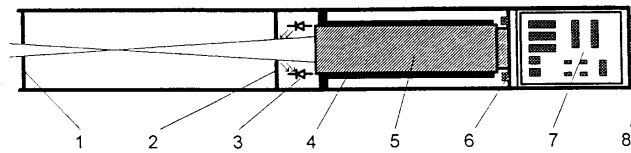


Abb. 5: Innerer Aufbau der beiden Sensorköpfe
 1 Lochblende (Sensor-1 $\phi 3\text{mm}$, Sensor-2 $\phi 1\text{mm}$)
 2 Interferenzfilter Sensor-1 $\phi 21\text{mm}$, Lochblende Sensor-2 $\phi 9\text{mm}$
 3 Referenzleuchtdiode und Photodiode
 4 PMT-Halterung
 5 PMT
 6 Sockel mit Spannungsteiler
 7 Analogplatine
 8 Anschlußkabel

Multialkalikathode und 10-stufigem Elektronenvervielfacher. Zur Versorgung ist ein Hochspannungsnetzteil mit Widerstandsteiler notwendig. Der Längsstrom beträgt $250\mu\text{A}$. Der Anodenstrom variiert zwischen dem Dunkelstrom von 1nA und maximal $12.5\mu\text{A}$ ($1/20$ des Längsstromes), so daß Linearität gesichert ist. Ein geregeltes, stabiles, ripple-freies Hochspannungsnetzteil wurde aufgebaut.

Die 4 Signalströme werden über I/U-Konverter in Spannungen gewandelt. Der verwendete Operationsverstärker ist ein Chopper-Verstärker: Typ MAX430 der Fa. Maxim, der sich durch geringe Offset-, Bias- und Driftwerte auszeichnet. Die Umschaltung des Konversionsfaktors auf den Signalwegen erfolgt mit Reed-Relais, die idealen Schaltern sehr nahe kommen. Vor der Wandlung werden Tiefpaßfilter: Typ MAX280 eingesetzt. Das sind intern getaktete Switched-capacitor-Filter 5. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 10 Hz. Der nachfolgende 4-Kanalmultiplexer ist im A/D-Wandler: Typ MAX182 der Firma Maxim integriert.

3.1.2 Digitalteil

Im Mittelpunkt steht ein 1-Platinen-Computer SCOTTY08 Version 1.01 der Fa. MCT Paul und Scherer, Kärntener Str.8, Berlin, dessen μ -Processor von Motorola: Typ MC68008 (8MHz, 1 MByte direkte Adressierung) ist. Weitere Baugruppen sind: Adreßdekodeur mittels eines GAL's, RAM, ROM, RTC, MFP, parallele und serielle Schnittstelle. Zur Einstellung der Speicher-aufteilung stehen 12 verschiedenen Möglichkeiten zur Verfügung. (JEDEC-Files des entsprechenden GAL's sind im Lieferumfang.) Das folgende Bild (Abb. 6) zeigt die Geometrie-Anordnung der Platine.

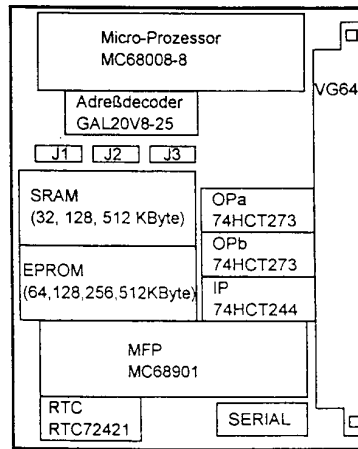


Abb. 6: Aufbau der SCOTTY08-Platine

Die Aufteilung des Adreßraums zeigt die folgende Tabelle:

Von	Bis	Größe	Funktion
\$00000	\$07FFF	32KByte	RAM bei 32KB Version
\$00000	\$1FFFF	128KByte	RAM bei 128KB Version
\$00000	\$7FFFF	512KByte	RAM bei 512KB Version
\$80000	\$8FFFF	64KByte	ROM bei 64KB Version
\$80000	\$9FFFF	128KByte	ROM bei 128KB Version
\$80000	\$BFFFF	256KByte	ROM bei 256KB Version
\$80000	\$F7FFF	496KByte	ROM bei 512KB Version 16KB für Peripherie
\$FC000	\$FC000	1Byte	OPa (TTL Output A) Konversionsfaktor & LED
\$FC100	\$FC100	1Byte	IP (TTL Input) Tasten und ADC-Busy
\$FC200	\$FC200	1Byte	OPb (TTL Output B) LCD-Anzeige
\$FC300	\$FC301	2Byte	Kanal 1 vom ADC belegt mit PMT1
\$FC302	\$FC303	2Byte	Kanal 2 vom ADC belegt mit PMT2
\$FC304	\$FC305	2Byte	Kanal 3 vom ADC belegt mit Photodiode1
\$FC306	\$FC307	2Byte	Kanal 4 vom ADC belegt mit Photodiode2
\$FC308	\$FC31F	24Byte	Frei
\$FC400	\$FC41F	32KByte	TLX++CS1 in dieser Arbeit nicht genutzt
\$FC500	\$FC51F	32KByte	TLX++CS2 in dieser Arbeit nicht genutzt
\$FC700	\$FC71F	32KByte	RTC (Real-Time-Clock)
\$FD600	\$FD63F	48KByte	MFP (Multi-Function-Peripheral)
\$FFFF0	\$FFFFF	16Byte	IACK Vector ID vom MFP

Der Multi-Funktions-Peripheriebaustein: MFP enthält 4 Timer (2 mit externem Eingang) und 8 programmierbare I/O-Kanäle mit Interruptverar-

beitung.

Zur Ausgabe der Meßwerte dient ein 2-zeiliges, beleuchtetes LCD-Display mit je 16 Ziffern. Es wird über Port B und die MFP-Einheit angesteuert. Vier rautenförmig angeordnete Tasten ermöglichen Eingaben durch den Benutzer. Die Menüführung mit der oberen und unteren Taste bedeutet ein Listen-Scrolling. Die rechte Taste wird zur Unterverzweigung benutzt und die linke als Eingabequittierung.

3.2 Software

Die Software wird in einer speziellen 'C'-Variante: ECO-C auf einem PC mit 80386-Prozessor geschrieben. Mit Hilfe eines Crosscompilers wird ein 68000-Code erzeugt, der via serieller Schnittstelle auf das RAM des SCOTTY08 kopiert wird. Testweise wird das Programm dann vom PC aus über ein Monitorprogramm (in EPROM des SCOTTY08) gestartet. Am Ende der Entwicklung steht die Software im EPROM (mit AUTOSTART), so daß das Gerät vom PC unabhängig ist.

Die Steuerungssoftware ist in 6 Blöcke unterteilt:

- (1) Initialisierung: Ein fester Anfangszustand wird definiert, der auch die konstanten Parameter der Spline-Funktionen betrifft.
- (2) Schaltfunktionen: PMT-Hochspannungen werden angelegt, Referenzlicht-LED's eingeschaltet und I/U-Konverter eingestellt.
- (3) Anzeige: enthält Prozeduren der LCD-Anzeigensteuerung
- (4) Meßwernerfassung und Referenzabgleich: Hauptprozeduren des Gerätes, u.a. 'Abgleich', 'Quotient', 'Spline', 'Temperatur'. Optional sind noch Prozeduren vorhanden, mit deren Hilfe die Intervallgröße für den gleitenden Mittelwert geändert oder ein unbekanntes Material einkalibriert oder der zeitliche Temperaturverlauf gespeichert werden kann.
- (5) Kommunikation: Prozeduren, die das eingebaute Tastenfeld betreffen und die die Kommunikation mit dem Host-Rechner über das dort installierte Terminalprogramm ermöglichen.
- (6) Menü: Prozeduren zur Steuerung des Menüs (auf dem LCD) mit Hilfe der Eingabetasten.

Auf Struktogramme und Quelltexte soll hier verzichtet werden.

4. Kalibrierung und Betrieb

Da es weder ideale Schwarze, noch Graue Temperaturstrahler gibt, wird das Gerät für spezielle Materialien kalibriert. Das folgende Bild (Abb. 7)

zeigt die Kalibrieranordnung für einen Stahlquader ($100 \times 100 \times 60$ mm), der zu Beginn der Kalibrierung auf ca. 900°C aufgeheizt wurde (Abstand zum Pyrometer-Meßkopf ca. 20cm). Unter der Laufnummer 3 befindet sich das berührende NiCr-Ni-Thermoelement (max. 1150°C).

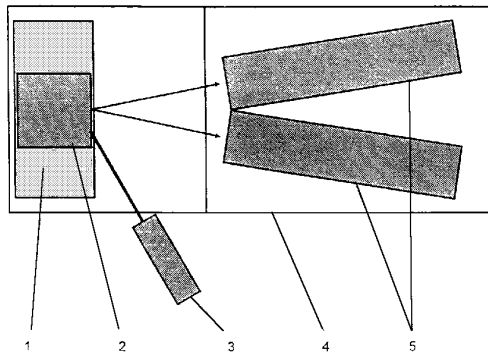


Abb. 7: Kalibrier-Anordnung im Prüffeld

- 1 Feuerfeste Unterlage
- 2 Meßobjekt
- 3 Tauchfühler mit Griff (NiCr-Ni-Thermoelement)
- 4 Sensortisch
- 5 Sensorgehäuse

In der Abkühlphase werden jetzt alle 10 s Wertepaare: Strahlungsverhältnis (v): Temperatur (T) aufgenommen. Abb. 8 zeigt das Ergebnis der Messung.

Dieser schon nahezu lineare Zusammenhang wird zwischen den Meßwerten mit kubischen Splines interpoliert, so daß sich eine stetige Konversionsfunktion ergibt.

Diese Konversionsfunktion ist gültig für alle Materialien, deren Emissionsgrad sich nur durch einen konstanten Faktor unterscheidet. Insbesondere sind der Abstand der Messung, Trübungen der Atmosphäre durch Rauchgase oder Verschmutzungen auf der Oberfläche der Eintrittsfenster ohne Einfluß auf den Meßwert bzw. die Meßgenauigkeit (innerhalb des Dynamikbereiches der PMT's).

Die angegebene Messung wurde wiederholt, um die Wiederholgenauigkeit zu bestimmen: sie beträgt besser: $\pm 0,7\%$: die Abweichungen sind auf die Bildung einer Korrosionsschicht zurückführbar. Zusätzlich wurde die Temperatur von VA-Stahl mit dem auf ST37 kalibrierten Gerät gemessen. Die maximalen Abweichungen der Pyrometermessung gegenüber der wahren

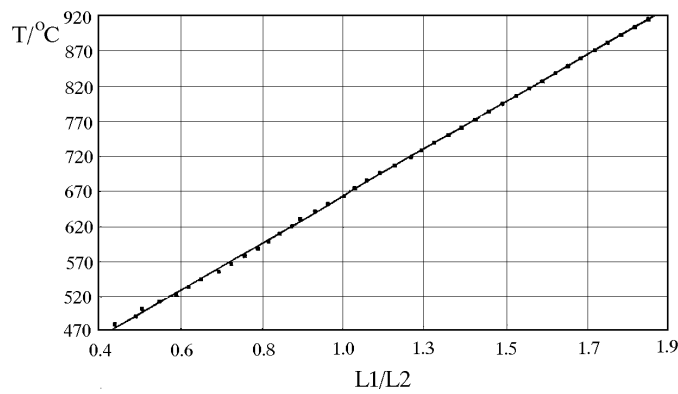


Abb. 8: Kalibrierung des Pyrometers für ST37 - Stahl

Temperatur betrug jetzt: $\pm 1,5\%$, d.h. für eine genauere Temperaturmessung wäre eine neue Kalibrierung erforderlich.

6. Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt eine wesentliche Verbesserung von Verhältnispyrometern für die Temperaturmessung. Die erreichbare Genauigkeit konventioneller Pyrometer ist beschränkt aufgrund der stark nichtlinearen Konversionsfunktion, mit deren Hilfe aus dem Strahlungsleistungsverhältnis die Oberflächentemperatur des Meßgutes bestimmt wird. Weiter treten stark unterschiedliche Meßgrößen auf, so daß Dynamik- und Rauschprobleme die Folge sind. Außerdem ist die numerische Ungenauigkeit eines Quotienten aufgrund des Fehler-Fortpflanzungsgesetzes von der Fehlersumme abhängig, so daß das Signal/Rausch-Verhältnis der beiden Signalspannungen etwa gleich sein sollte.

Mit dem neuartigen Pyrometer wird eine sehr hohe Genauigkeit erreicht, da Fehlereinflüsse extrem klein gehalten werden. Das ist dadurch möglich, daß der Quotient aus dem eng begrenzten Spektralbereich bei 656 nm (Breite: 10 nm) und dem ungefilterten (dem PMT-Sensor entsprechenden Spektralbereich) gebildet wird. Durch unterschiedliche Aperturen der beiden Meßkanälen wird erreicht, daß der Quotient für den Mittenwert des Meßbereichs gleich Eins wird.

Das nahezu lineare Konversionsverhalten wurde im Prüffeld kalibriert und die Meßwerte durch Spline-Funktionen interpoliert. Für ausgewählte und kalibrierte Oberflächen (nicht oxidierende) wird eine Genauigkeit im

0,1 % -Bereich erzielt. Konstante Strahlungsabschwächungen durch den geometrischen Abstand oder Lufttrübungen beeinflussen die Genauigkeit nicht.

Temperatur- und Alterungsdriften der eingesetzten Photomultiplier werden durch Aufschaltung von Referenzlicht (Autokalibrierung) unterdrückt.

Danksagung

Die Durchführung dieser Arbeit wäre unmöglich gewesen ohne die Mithilfe von Herrn Holmer Geert Grundmann, der sich in seiner Diplomarbeit mit diesem Thema beschäftigt hat. Der Leiter des Lehrstuhls, Professor Dr.-Ing. Wolfgang Weber, hat diese Arbeit wohlwollend unterstützt.

REFERENCES

1. ROBERT SIEGER, JOHN R. HOWELL: *Thermal Radiation Heat Transfer*. McGraw-Hill Book Company: 07-057318-2