



CH 685 405 A5



SCHWEIZERISCHE EidGENOSSENSCHAFT  
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

① CH 685 405 A5

⑤ Int. Cl.°: G 01 J 5/60

**Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein**  
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ **PATENT SCHRIFT** A5

⑳ Gesuchsnummer: 3115/92

⑦ Inhaber:  
Alusuisse-Lonza Services AG 8034 Zürich  
Zustelladresse: Neuhausen am Rheinflall

㉑ Anmeldungsdatum: 06.10.1992

㉒ Patent erteilt: 30.06.1995

⑧ Erfinder:  
Buchheit, Karlheinz, Blieskastel (DE)  
Henrichen, Markus, Bondorf (DE)  
Pandit, Madhukar, Kaiserslautern (DE)

④ Patentschrift  
veröffentlicht: 30.06.1995

⑤ **Temperaturmessung mit Zweiwellenlängenpyrometern.**

⑥ Vorliegendes Verfahren beschreibt die präzise Temperaturmessung mit Zweiwellenlängenpyrometern an Körpern, bei denen die Umgebungsstrahlung gegenüber der Infrarotstrahlung des Messgutes vernachlässigbar ist. Das Verfahren ist besonders geeignet für die pyrometrische Temperaturmessung an Materialien mit veränderlichen Oberflächencharakteristiken und mit sehr tiefem und insbesondere wellenlängenabhängigem Emissionsgrad. Dabei wird die Oberflächentemperatur des Messgutes mit einem Zweiwellenlängenpyrometer erfasst und durch eine Korrelationsanalyse der Funktionszusammenhang zwischen den beiden Emissionsgraden ermittelt, wobei die Parameter des Funktionszusammenhangs durch Referenz-Temperaturmessungen bestimmt werden. Die Temperaturbestimmung des Messgutes erfolgt dann durch die Lösung eines nichtlinearen Gleichungssystems, enthaltend den Funktionszusammenhang zwischen den beiden Emissionsgraden und die für beide Messwellenlängen gültigen Planck'schen Gleichungen für reale Strahler.



CH 685 405 A5

## Beschreibung

Vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren für die Temperaturmessung mit Zweiwellenlängenpyrometern von Messgütern mit kleinem, insbesondere wellenlängenabhängigem Emissionsgrad,  $\epsilon < 0,1$ , und veränderlichen Oberflächencharakteristiken sowie eine Störgrössenkorrektur der Temperaturmessung.

Die pyrometrische Temperaturmessung geschieht unter Ausnutzung der Planck'schen Strahlungsgesetze, die jedoch nur für ideale schwarze Körper gelten. Kennt man die Gesamtenergie der ausgesandten Strahlung, so kann aus der Messung der Energie eines gewissen Spektralbereichs unter Zuhilfenahme der Planck'schen Strahlungsgesetze die Temperatur berechnet werden, die der Körper hätte, wenn er ein schwarzer Körper wäre. Da die meisten Körper nicht ideal schwarz sind, ist die wahre Temperatur höher als die auf diese Weise errechnete.

Um die Temperatur eines realen Körpers zu bestimmen, muss die Emissivität, d.h. das Strahlungsvermögen des betrachteten Körpers, bekannt sein. Die Emissivität eines opaken Körpers wird durch den Quotienten der emittierten Strahlung des Körpers und der Strahlung eines schwarzen Körpers mit derselben Temperatur definiert. Die Emissivität kann physikalisch durch einen auf die Planck'schen Strahlungsgesetze multiplikativ wirkenden Emissionsgrad  $\epsilon$  beschrieben werden. Ein idealer schwarzer Strahler hat den Emissionsgrad  $\epsilon$  gleich 1. Die gemessene spektrale Strahldichte, d.h. die vom Körper abgestrahlte Energiedichte, bezogen auf die Breite  $d\lambda$  des betrachteten Wellenlängenintervalls, geschrieben als Energie pro Flächen-, Wellenlängen-, Raumwinkel- und Zeiteinheit, kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$(1) L_{\lambda M} = \epsilon * L_{\lambda K} + (1-\epsilon) * L_{\lambda U}$$

wobei  $L_{\lambda K}$  die Körperstrahlung und  $L_{\lambda U}$  die Umgebungsstrahlung bezeichnen. Die spektrale Strahldichte ist somit stark vom Emissionsgrad  $\epsilon$  abhängig.

An den meisten Spektral- oder Einwellenlängenpyrometern ist die Emissivität einstellbar, um die Temperaturmessung mittels üblicher Temperaturmessgeräte wie beispielsweise Thermometern, Thermoelementen oder Halbleiterdioden derart zu eichen, dass unter der Annahme eines konstanten, material-spezifischen Emissionsgrades und unter Vernachlässigung der während dem Messvorgang möglicherweise eintretenden Veränderungen, wie beispielsweise der Oberflächenbeschaffenheit, Legierungszusammensetzung, Wellenlängenverschiebung des Strahlungsmaximums oder schlicht der Temperaturabhängigkeit des Emissionsgrades, eine Temperaturmessung ermöglicht wird.

Die oben beschriebenen Einschränkungen bezüglich der Empfindlichkeit gegenüber der Oberflächenbeschaffenheit des Messgutes können durch das Messen der Strahlungsintensität bei zwei verschiedenen Wellenlängen und anschliessender Quotientenbildung der Messwerte vermindert werden. Die zu solchen Messverfahren verwendeten Geräte werden gemäss ihres Funktionsprinzips als Zweiwellenlängen-, Zweifarben- oder Quotientenpyrometer bezeichnet.

Verschiedene Materialien, wie Metalle und dabei beispielsweise Aluminium, Kupfer oder Gold besitzen neben einem sehr kleinen Emissionsgrad  $\epsilon$ , der die Empfindlichkeit gegenüber Oberflächenkontaminationen entsprechend erhöht, die für eine berührunglose Temperaturmessung weiter erschwerende Eigenschaft der Abhängigkeit des Emissionsgrades von der Wellenlänge.

Um den Einfluss dieser weiteren Erschwernis für eine pyrometrische Temperaturmessung zu mindern, wird in der US-Patentschrift 4 659 234 ein Zweiwellenlängenpyrometer beschrieben, das die Messwerte eines Einfarben- oder Einwellenlängenpyrometers und diejenigen eines Quotientenpyrometers geeignet verknüpft.

Die in der US-Patentschrift 4 561 786 beschriebene Messeinrichtung benützt zusätzlich zum Quotientenpyrometer noch einen Referenzstrahler.

Die in den beiden oben erwähnten US-Patentschriften beschriebenen Messsysteme sind jedoch immer noch wellenlängenabhängig, und der Einfluss der Oberflächencharakteristik bleibt teilweise weiterhin bestehen, so dass die Genauigkeit der Temperaturmessung noch nicht den hohen Anforderungen genügt wie sie beispielsweise bei der Verarbeitung von Aluminium oder Buntmetallen gefordert werden.

In der US-Patentschrift 4 465 382 wird eine Messeinrichtung sowie ein Verfahren zur Messung der Infrarotstrahlung und zur Bestimmung der Oberflächentemperatur und Emissivität von Körpern, deren Temperatur nahe der Umgebungstemperatur liegt, beschrieben. Die dieser Erfindung zugrunde liegende Aufgabe entspricht beispielsweise der pyrometrischen Temperaturbestimmung eines Messobjektes in einem Ofen, bei der die Wärmestrahlung des zu messenden Körpers etwa der Wärmestrahlung der Umgebung entspricht.

Vorliegende Erfindung beschreibt ein Verfahren für die pyrometrische Temperaturmessung von Körpern, bei denen die Umgebungsstrahlung keinen wesentlichen Einfluss auf die Temperaturbestimmung ausübt.

Die US-Patentschrift 4 408 903 beschreibt eine Methode zur pyrometrischen Temperaturmessung von hochreflektierenden, bewegten Körpern wie beispielsweise von Pressgut vor dem eigentlichen Strang- oder Fließpressen. Dabei wird das vorgewärmte Pressgut partiell mit einer Russschicht eingeschwärzt und die vom Pressgut an den eingerussten Flächen emittierte Infrarotstrahlung gemessen.

Dieses Verfahren bedingt das relativ aufwendige Einfärben des Messobjektes mit Russ und dessen

komplette Entfernung nach der Messung und vor der Weiterverarbeitung des Messobjektes. Die Methode beruht somit auf der Temperaturmessung eines schwarzen Strahlers und bildet nicht Gegenstand der vorliegenden erfinderischen Tätigkeit.

5 Aufgabe vorliegender Erfindung ist es, ein Verfahren zu schaffen, das eine hochpräzise pyrometrische Temperaturbestimmung an Körpern erlaubt, deren Infrarotstrahlungs-Intensität viel höher als die der Umgebung ist, und das insbesondere geeignet ist, Messungen an Materialien mit sehr tiefem Emissionsgrad (beispielsweise  $\epsilon < 0,1$ ) und/oder einem wellenlängenabhängigen Emissionsgrad durchzuführen, und das eine Verminderung des Einflusses der veränderlichen Emissionsgrade bei der pyrometrischen Temperaturmessung mit Zweiwellenlängenpyrometern ermöglicht.

10 Erfindungsgemäss wird dies dadurch erreicht, dass die Temperatur des Körpers  $T_K$  durch die spektrale Strahlendichte bei den Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  mittels eines Zweiwellenlängenpyrometers erfasst wird und durch eine Korrelationsanalyse der Funktionszusammenhang

$$\epsilon_1 = f(\epsilon_2) \text{ bzw. } \epsilon_2 = f(\epsilon_1) \quad (2)$$

15 ermittelt wird, und die Temperatur des Körpers  $T_K$  durch die Lösung des folgenden nichtlinearen Gleichungssystems, bestehend aus drei Gleichungen und drei Unbekannten, enthaltend den Funktionszusammenhang zwischen den Emissionsgraden  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  und die für beide Messwellenlängen gültigen Planck'schen Gleichungen für reale Strahlen, bestimmt wird,

20

$$L_{\lambda_1} = \frac{\epsilon_1 * C_1}{\pi * \lambda_1^5 * \left[ e^{\frac{C_2}{\lambda_1 * T_K}} - 1 \right]} \quad (3)$$

25

30

35

$$L_{\lambda_2} = \frac{\epsilon_2 * C_1}{\pi * \lambda_2^5 * \left[ e^{\frac{C_2}{\lambda_2 * T_K}} - 1 \right]} \quad (4)$$

40

45

50

$$\epsilon_1 = f(\epsilon_2) \quad (5)$$

55

wobei im Gleichungssystem die spektralen Strahlendichten  $L_{\lambda_1}$  bzw.  $L_{\lambda_2}$  die gemessenen physikalischen Grössen,  $\lambda_1$  bzw.  $\lambda_2$  die bekannten Messwellenlängen und  $\epsilon_1$  bzw.  $\epsilon_2$  die unbekanntenen Emissionsgrade sind, und die Konstanten  $C_1$ ,  $C_2$  und  $\pi$  bekannte physikalische Grössen darstellen.

60

Für kleine Wellenlängen, d.h. für  $C_2/(\lambda * T_K) \gg 1$ , wird der Exponent der e-Funktion in den Gleichungen (3) und (4) gross. Dann gilt für die Ausdrücke (3) und (4) in guter Näherung:

65

$$L_{\lambda_1} = \frac{\varepsilon_1 * C_1}{\frac{C_2}{\lambda_1 * T_K} \pi * \lambda_1^5 * e} \quad (6)$$

$$L_{\lambda_2} = \frac{\varepsilon_2 * C_1}{\frac{C_2}{\lambda_2 * T_K} \pi * \lambda_2^5 * e} \quad (7)$$

Werden die Wellenlängen der Infrarotstrahlung, die sich typischerweise im Bereich von 1 bis 100  $\mu\text{m}$  bewegen, als klein betrachtet, so können die Gleichungen (3) und (4) durch die Approximationen (6) und (7) ersetzt werden, was die Auflösung des nichtlinearen Gleichungssystems stark vereinfacht.

Im Rahmen der erfinderischen Tätigkeit wurde insbesondere gefunden, dass die Emissionsfaktoren  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  der Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  nicht unabhängig voneinander veränderlich sind.

In beispielhafter Weise wird dieser Zusammenhang durch Fig. 1 verdeutlicht. Die beispielhaft dargestellte Grafik zeigt die gemessenen Emissionsgrade  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  einer Stichprobe von Vergleichsmessungen an Profilen der Legierung AlMgSi1 beim Strangpressen. Die Abszisse der Fig. 1 beschreibt die Werte der Emissionsgrade von  $\varepsilon_1$ , während die Werte von  $\varepsilon_2$  auf der Ordinate aufgetragen sind. Wie aus der Grafik ersichtlich ist, bewegen sich die Werte der gemessenen Emissionsgrade im Bereich zwischen 0,04 und 0,16 und verdeutlichen demgemäss die sehr kleine Emissivität der AlMgSi1-Legierung.

Der Funktionszusammenhang gemäss Gleichung (2) wird bevorzugt durch eine Korrelationsanalyse ermittelt, wobei beispielsweise folgende Ansätze zur Anwendung kommen:

$$(8) \varepsilon_1 = a * \varepsilon_2$$

$$(9) \varepsilon_1 = a * \varepsilon_2 + b$$

$$(10) \varepsilon_1 = a * \varepsilon_2^2 + b * \varepsilon_2 + c$$

$$(11) \ln(\varepsilon_1) = a * \ln(\varepsilon_2) + b$$

$$(12) \varepsilon_2 = a * \varepsilon_1$$

$$(13) \varepsilon_2 = a * \varepsilon_1 + b$$

$$(14) \varepsilon_2 = a * \varepsilon_1^2 + b * \varepsilon_1 + c$$

$$(15) \ln(\varepsilon_2) = a * \ln(\varepsilon_1) + b$$

Die Gleichungen (8) und (9) bzw. (12) und (13) stellen lineare Funktionsansätze für  $\varepsilon_1$  bzw.  $\varepsilon_2$  dar, während in den Gleichungen (10) bzw. (14) quadratische Ausdrücke für  $\varepsilon_1$  bzw.  $\varepsilon_2$  aufgeführt sind. Die weiteren Ansätze (11) bzw. (15) beschreiben einen logarithmischen Zusammenhang der Emissionsgrade  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$ .

Die Parameter des Funktionszusammenhangs zwischen den Emissionsgraden  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  werden zweckmässig durch ein Fehlerminimierungsverfahren von Referenz-Temperaturmessungen ermittelt, wo-

bei die Temperaturmessung mit einem geeichten Messgerät, wie beispielsweise durch Kontaktmessung mit einem Thermometer, Thermoelement oder einer Halbleiterdiode, durchgeführt wird.

Als Fehlerminimierungsverfahren eignen sich z.B. besonders die bekannten Methoden, wie Least-Square (Methode der kleinsten Quadrate) oder Maximum-Likelihood.

5 Aufgrund des bekannten Funktionszusammenhangs (2) kann nach vorliegender Erfindung die wahre Temperatur unter Zuhilfenahme der Planck'schen Gesetze für reale Körper, beschrieben durch die Gleichungen (3) und (4) oder deren Approximatimen (6) und (7), berechnet werden.

Um die Anpassung der Funktion (2) an den jeweiligen Anwendungsfall bestmöglich zu gewähren, können regelmässige Referenzmessungen vorgenommen werden, die eine Aktualisierung der Funktionsparameter mittels einem rekursiven Fehlerminimierungsverfahren erlauben.

10 Das oben beschriebene erfindungsgemässe Verfahren erlaubt eine wesentliche Verminderung des Einflusses der veränderlichen Emissionsgrade durch eine Störgrössenkorrektur für die pyrometrische Temperaturmessung mit Zweiwellenlängenpyrometern.

Vorliegendes Verfahren ist beispielsweise geeignet zur Messung von Oberflächentemperaturen an nicht schwarzen Körpern, bei denen die Umgebungsstrahlung gegenüber der Infrarotstrahlung des Messgutes vernachlässigbar ist.

Bevorzugt wird das Verfahren zur Messung von Oberflächentemperaturen an hochreflektierenden, metallischen Oberflächen und insbesondere an Aluminiumoberflächen verwendet.

20 Das erfindungsgemässe Verfahren für die Temperaturmessung mit Zweiwellenlängenpyrometern von Messgütern mit kleinem, insbesondere wellenlängenabhängigem Emissionsgrad, ist eine für die berührungslose Erfassung der Oberflächentemperaturen von Aluminium und Buntmetallen entwickelte Methode.

25 Wegen des ungewöhnlichen Verhaltens der Emissivität dieser Werkstoffe treten bei der berührungslosen Infrarot-Temperaturmessung normalerweise grosse Fehler auf, welche durch das erfindungsgemässe Verfahren weitgehend aufgefangen werden.

Das erfindungsgemässe Verfahren zur hochpräzisen berührungslosen Temperaturmessung ermöglicht ganz neue Dimensionen der Prozesskontrolle und findet Verwendung in der gesamten Buntmetallindustrie und zwar überall dort, wo die Verarbeitungs- oder Betriebstemperatur des Messgutes kritisch ist.

30 In der Aluminiumindustrie wird das erfindungsgemässe Verfahren zur Temperaturkontrolle der Schmelze beim Giessen, des Rohmaterials beim Fliesspressen sowie der Produkttemperatur beim Strangpressen und Walzen eingesetzt. Die Referenz-Temperaturmessungen können, beispielsweise beim Walzen oder Strangpressen, nach jedem Wechsel des Rohmaterials erfolgen.

35 Eine Gegenüberstellung von Messkurven verschiedener Temperaturmessverfahren an AlMgSil ist beispielhaft in Fig. 2 dargestellt. Die Grafik erlaubt den Vergleich der Messkurve einer kontinuierlichen Temperaturerfassung an stranggepresstem AlMgSil mit verschiedenen Temperaturmessverfahren, wobei der durch das erfindungsgemässe Auswertverfahren ermittelte Temperaturverlauf, jeweils optimiert für eine Stichprobe von Vergleichsmessungen, der Temperaturmessung mit bekannten Verfahren, wie der Temperaturbestimmung mittels Strahllichtepytrometer, Quotienten- oder Verhältnispyrometer oder Thermoelement, gegenübergestellt ist.

40 In Fig. 2 ist die Temperatur in °C ( $T/^{\circ}\text{C}$ ) gegen die Zeit in Sekunden ( $t/s$ ) aufgetragen.

Da Thermoelemente typischerweise eine Messgenauigkeit von etwa 1% aufweisen und zudem eine für diesen Anwendungszweck vernachlässigbare Verzögerung der Temperaturerfassung zeigen, kann die entsprechende Messkurve als wahrer Temperaturverlauf angesehen werden.

45 Die Grafik in Fig. 2 zeigt somit auf überraschende Weise die durch das erfindungsgemässe Verfahren erreichte Verbesserung der berührungslosen Erfassung von Oberflächentemperaturen an Körpern mit kleinem Emissionsgrad.

### Patentansprüche

50 1. Verfahren für die Temperaturmessung mit Zweiwellenlängenpyrometern von Messgütern mit kleinem Emissionsgrad,  $\varepsilon < 0,1$ , und veränderlichen Oberflächencharakteristiken und eine Störgrössenkorrektur der Temperaturmessung, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur des Körpers  $T_K$  durch die spektrale Strahllichte bei den Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  mittels eines Zweiwellenlängenpyrometers erfasst wird und durch eine Korrelationsanalyse der Funktionszusammenhang

55 
$$\varepsilon_1 = f(\varepsilon_2) \text{ bzw. } \varepsilon_2 = f(\varepsilon_1) \quad (2)$$

ermittelt wird und die Temperatur des Körpers  $T_K$  durch die Lösung des folgenden nichtlinearen Gleichungssystems, bestehend aus drei Gleichungen und drei Unbekannten, enthaltend den Funktionszusammenhang zwischen den Emissionsgraden  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  und die für beide Messwellenlängen gültigen Planck'schen Gleichungen für reale Strahler, bestimmt wird,

65

$$L_{\lambda_1} = \frac{\varepsilon_1 * C_1}{\pi * \lambda_1^5 * \left[ e^{\frac{C_2}{\lambda_1 * T_K}} - 1 \right]} \quad (3)$$

$$L_{\lambda_2} = \frac{\varepsilon_2 * C_1}{\pi * \lambda_2^5 * \left[ e^{\frac{C_2}{\lambda_2 * T_K}} - 1 \right]} \quad (4)$$

$$\varepsilon_1 = f(\varepsilon_2) \quad (5)$$

wobei im Gleichungssystem die spektralen Strahldichten  $L_{\lambda_1}$  bzw.  $L_{\lambda_2}$  die gemessenen physikalischen Grössen,  $\lambda_1$  bzw.  $\lambda_2$  die bekannten Messwellenlängen und  $\varepsilon_1$  bzw.  $\varepsilon_2$  die unbekanntenen Emissionsgrade sind, und die Konstanten  $C_1$ ,  $C_2$  und  $\pi$  bekannte physikalische Grössen darstellen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Gleichungen (3) und (4), durch deren Approximationen für kleine Wellenlängen

$$L_{\lambda_1} = \frac{\varepsilon_1 * C_1}{\pi * \lambda_1^5 * e^{\frac{C_2}{\lambda_1 * T_K}}} \quad (6)$$

$$L_{\lambda_2} = \frac{\varepsilon_2 * C_1}{\pi * \lambda_2^5 * e^{\frac{C_2}{\lambda_2 * T_K}}} \quad (7)$$

ersetzt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass für den Funktionszusammenhang zwischen den Emissionsgraden  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  lineare Ansätze angewendet werden.

4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass für den Funktionszusammenhang zwischen den Emissionsgraden  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  quadratische Ansätze angewendet werden.

5 5. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass für den Funktionszusammenhang zwischen den Emissionsgraden  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  logarithmische Ansätze angewendet werden.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Parameter des Funktionszusammenhangs zwischen den Emissionsgraden  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  durch Referenz-Temperaturmessungen ermittelt werden.

10 7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Referenzmessungen einem Fehlerminimierungsverfahren, wie z.B. Least Square oder Maximum-Likelihood unterzogen werden.

8. Anwendung des Verfahrens nach Anspruch 1 zur Messung von Oberflächentemperaturen an nicht schwarzen Körpern, bei denen die Umgebungsstrahlung gegenüber der Infrarotstrahlung des Messgutes vernachlässigbar ist.

15 9. Anwendung des Verfahrens nach Anspruch 1 zur Messung von Oberflächentemperaturen an metallischen Oberflächen und insbesondere an Aluminiumoberflächen.

20

25

30

35

40

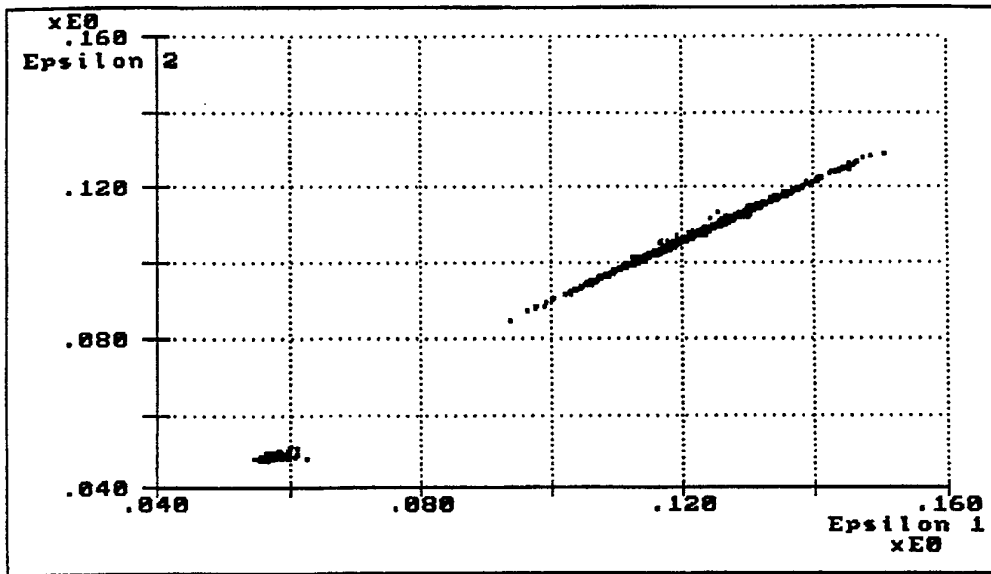
45

50

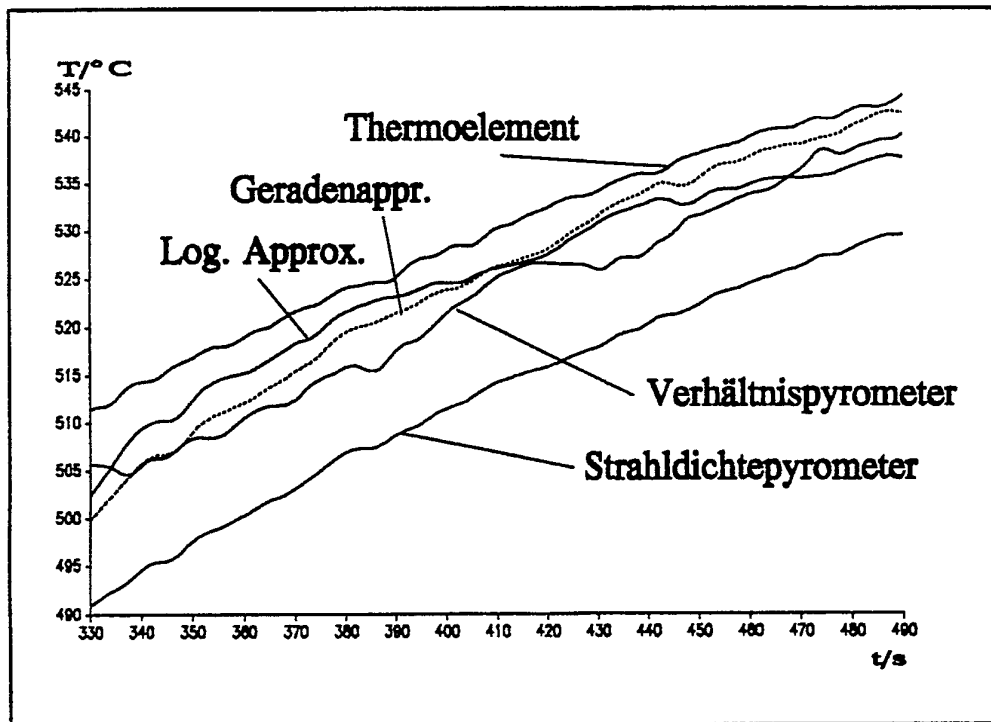
55

60

65



Figur 1: Gemessene Emissionsgrade an AlMgSi1 (strangepresst)



Figur 2: Vergleich verschiedener Temperaturmessverfahren an strangepresstem AlMgSi1