

HVG - Mitteilung Nr. 408

"Bioptix", ein neues Farbpyrometer.

Bereits in unserer WBG-Mitteilung Nr. 350 hatten wir auf ein vom Kaiser Wilhelm-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf entwickeltes optisches Temperaturmessverfahren hingewiesen. Gleichzeitig teilten wir mit, dass das Pyrowerk Dr. Hase in Hannover unter dem Namen "Bioptix" ein nach dem entsprechenden Prinzip arbeitendes Gerät auf den Markt bringt.

Die seinerzeit in Aussicht gestellten Versuche von Temperaturmessungen an Glas sind inzwischen auf Anregung der HVG im Institut für Gesteinshüttenkunde der Technischen Hochschule in Aachen in enger Zusammenarbeit mit einer Mitgliedshütte durchgeführt worden. Bevor wir auf die Ergebnisse dieser in Form einer Diplomarbeit von H. Maetz vorliegenden Untersuchungen eingehen, seien kurz das am "Bioptix" verwendete Prinzip und seine physikalischen Grundlagen erläutert.

Bekanntlich messen die allgemein verwendeten Glühfaden-(Teilstrahlungs) pyrometer, z.B. das Pyropto, die Intensität einer bestimmten Wellenlänge durch Vergleich mit der Strahlung einer geeichten Normallampe, deren Helligkeit durch kontrollierbare Änderung der Stromstärke in beliebigen Grenzen variiert werden kann. Da die Intensität einer Wellenlänge durch das bekannte Wien-Plancksche Gesetz (Ann.Phys. 58, 1896, S.662, Ann.Phys. 1, 1900, S.69, 719) mit der Temperatur verknüpft ist, erlaubt die Intensitätsmessung einen unmittelbaren Schluss auf die Temperatur des strahlenden Körpers. Wesentliche Voraussetzung der Anwendbarkeit der genannten rechnerischen Beziehungen ist jedoch, dass der Körper wie ein absolut schwarzer Körper strahlt, d.h. dass sein Absorptionsvermögen gleich 1 ist. Ist das nicht der Fall, dann ist die vom zu messenden Körper ausstrahlende Energie geringer, so dass die bei der Messung festgestellte Temperatur niedriger als die wahre, wirklich vorhandene ist. Bei Kenntnis des Emissionsvermögens lassen sich die Korrekturwerte bestimmen, die auch bei nicht schwarzen Körpern aus der optisch gemessenen, scheinbaren Temperatur einen Rückschluss auf die wahre Temperatur gestatten.

Diese scheinbare Temperatur, die also der Temperatur entspricht, die ein schwarzer Körper bei gleicher ausgestrahlter Energiemenge aufweisen würde, wird als "schwarze Temperatur" des gemessenen Körpers bezeichnet. Die schwarze Temperatur liegt somit bei allen Körpern mit einem Emissionsvermögen unter 1 unterhalb der wahren Temperatur dieses Körpers. Die allgemeine Anwendung eines Korrekturverfahrens scheitert jedoch vielfach an der Unbestimmbarkeit der Absorptionskoeffizienten und deren starken Beeinflussung durch äussere Umstände. Deshalb weist z. B. auch Naeser ausdrücklich darauf hin, dass es kein allgemeines Strahlungsgesetz für frei strahlende (d.h. nicht in abgeschlossenem Raum mit ausgeglichener Temperatur befindliche) Körper gibt und geben kann, denn die ausgestrahlte Energie hängt von einer ganzen Reihe von Einflüssen ab, die, wie das Spiegelungsvermögen der Umgebung und die zufällige Form und Oberfläche des Strahlers, veränderlich sind und nicht näher gekennzeichnet werden können.

Die üblichen Teilstrahlungs-pyrometer benutzen meist eine im Rot liegende Wellenlänge von $0,65 \mu$, da diese die Verwendung der Pyrometer bis zu ziemlich niedrigen Temperaturen erlaubt.

Mit steigender Temperatur ändert sich jedoch nicht nur die Intensität der Strahlung, sondern auch die Verteilung der Energie auf die verschiedenen Wellenlängen. Durch das Verschiebungsgesetz von Wien (Berl. Ber. 1893, S. 55)

$$T \cdot \lambda_m = \text{Konst.} = 2880$$

ist die mit grösster Energie aller Wellenlängen ausgestrahlte Wellenlänge mit der absoluten Temperatur verknüpft. Diese Wellenlänge wird also mit steigender Temperatur immer kürzer, in Übereinstimmung mit der bekannten Tatsache, dass heissere Körper ein mehr blaues Licht strahlen als kältere. Somit erlaubt nicht nur die Messung der Energie einer Wellenlänge einen Rückschluss auf die Temperatur des Strahlers, sondern dies kann ebenso gut durch die Beurteilung der Farbe des ausgestrahlten Lichtes geschehen. Niedrige Temperaturen bis etwa 1000° werden ja fast allgemein, wenn es auf grosse Genauigkeit nicht ankommt, mit bloßem Auge rein nach dem Farbeindruck geschätzt. Es lag daher nahe, die Farbe (durch exakte Messung der Intensitätsverhältnisse zweier oder

beliebig vieler Wellenlängen) statt der Intensität zur Grundlage eines Pyrometers zu machen.

Hierbei ergibt sich unter bestimmten Voraussetzungen als wesentlicher Vorteil gegenüber dem Glühfadenpyrometer eine weitgehende Unabhängigkeit vom Absorptionskoeffizienten des Strahlers bei der Temperaturbestimmung. Denn für alle nicht selektiv strahlenden Körper kann sich zwar, wenn sie aus dem geschlossenen Raum eines Ofeninnern, in dem die Temperaturverhältnisse ausgeglichen sind, und in dem daher die Gesetze der schwarzen Strahlung gelten, in einen offenen Raum versetzt werden, in dem sie frei strahlen können, die Gesamtintensität der ausgestrahlten Energie ändern, nicht jedoch die Farbe und damit das Intensitätsverhältnis einzelner Wellenlängen zueinander. Ein Pyrometer, das auf der Bestimmung eines derartigen Intensitätsverhältnisses aufbaut, wird also auch bei frei strahlenden Körpern die wahre Temperatur anzeigen. Zu beachten ist allerdings, dass das nicht mehr für Körper mit selektiver Absorption gilt, d.h. für solche Körper, deren Emissionsvermögen für verschiedene Wellenlängen nicht den für schwarze Strahler geltenden Gesetzen entspricht. Das folgende Beispiel soll dies deutlich machen: Verwendet man zur Bestimmung der Farbe eines ausgestrahlten Lichtes das Intensitätsverhältnis zweier Farben, etwa rot und grün, so wird für die technischen Temperaturen das Licht umsomehr Grün enthalten, je höher die Temperatur des Strahlers ist, da sich ja das Energiemaximum mit steigender Temperatur nach kürzeren Wellenlängen verschiebt. Wird nun in der Strahlung eines Materials eine bestimmte Wellenlänge bevorzugt (d.h. strahlt der Körper selektiv), z.B. grün, so ist der Grüngehalt höher als es der Strahlung des schwarzen Körpers entsprechen würde. Da einem höheren Grüngehalt (beim schwarzen Strahler!) eine höhere Temperatur zugeordnet ist, so wird durch eine solche selektive Grünstrahlung des freistrahrenden Körpers eine höhere Temperatur vorgetäuscht als es der Wirklichkeit entspricht.

Derartig liegen z. B. die Verhältnisse beim blanken, metallischen flüssigen Eisen, dessen Farbtemperatur über der wahren gemessen wird.

Körper, die auch freistrahrend eine dem schwarzen Strahler entsprechende Energieverteilung in dem von ihnen ausgestrahlten Licht aufweisen, nennt man "graue Strahler", für sie ist auch ausserhalb eines geschlossenen Ofens die mit dem Farbpyrometer gemessene Temperatur gleich der wahren.

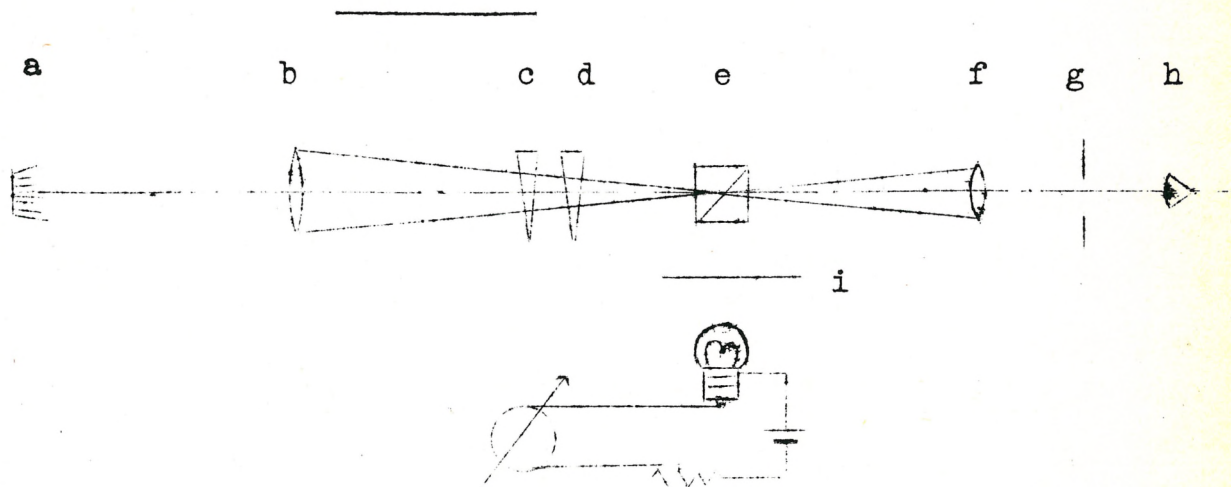
Beschreibung des Farbpyrometers "Bioptix".

Das Messverfahren für die Farbtemperatur ergibt sich aus der Kennzeichnung der Strahlungsfarbe durch das Verhältnis der Intensitäten in zwei nicht zu nahe benachbarten Wellenlängen im sichtbaren Teil des Spektrums. Es werden die Farben Rot und Grün für die Messung herangezogen. Das Vergleichslichtfeld soll in erster Linie verhindern, dass in die Messgleichung die relative Farbpfindlichkeit eingeht. Um dies zu erreichen, müssen Vergleichsfeld und Messfeld nach erfolgter Einstellung auf gleiche Farbe und Helligkeit dieselbe spektrale Energieverteilung besitzen. Die Einstellung auf gleiche Helligkeit neben gleicher Farbe ist ausserdem deshalb notwendig, weil erfahrungsgemäss das Auge nicht in der Lage ist, zwei Gesichtsfelder, die verschieden hell sind, auf gleiche Farbe einzustellen. Die Vorrichtung zur Abgleichung der Helligkeit dient zur Ermittlung der schwarzen Temperatur in der Summe der beiden Farben. Daraus ergibt sich folgender schematischer Aufbau des Farbpyrometers :

Das Licht des Körpers a, dessen Temperatur ermittelt werden soll, fällt durch ein Fernrohr (Abb.1) mit der Objektivlinse b, dem Okular f und der Blende g in das Auge des Beobachters h. In den Strahlengang ist ein bichromatischer Farbkeil c eingeschaltet. Er lässt nur das rote und grüne Licht durch und gestattet ausserdem durch das Verschieben das Intensitätsverhältnis dieser beiden Farben zu ändern, da er die beiden Farben mit zunehmender Dicke verschieden stark verschluckt. d ist ein Neutralgraukeil, der eine Änderung der Helligkeit von Rot + Grün ermöglicht. e, ein teilweise in der Diagonale versilberter und verkitteter Glaswürfel bringt in bekannter Weise das Licht der Vergleichslampe i in optischen Kontakt mit dem Hauptstrahl. Der Strom der Lampe wird vor der Messung auf einen bestimmten, festgelegten Betrag geregelt. Vor der Lampe befindet sich ein bichromatisches Planfilter, das die gleichen Farben rot und grün durchlässt. Das Verhältnis der beiden

Farben ist so gewählt, dass sie sich als Gegenfarben gerade zu weiss ergänzen.

Abb. 1



Die Handhabung ergibt sich aus folgender Messvorschrift: Nach der üblichen Vorbereitung (Einstellung des Lampenstromes auf die Eichzahl, Einstellung von Lupe und Fernrohr) werden c und d soweit eingeschoben, dass sowohl Farbe als auch Helligkeit des Messfeldes mit dem Vergleichsfeld übereinstimmen und somit die Trennungslinie verschwindet. Die Farbtemperatur wird am Farbkeil c, die schwarze Temperatur in Rot + Grün am Graukeil abgelesen.

Da das Pyrometer zunächst im wesentlichen für die Zwecke der Eisenindustrie gedacht war, wie ja schon aus seiner Entstehungsgeschichte hervorgeht, wurde als besonders störend die selektive Absorption der blanken Metalle und die dadurch bedingte über der wahren Temperatur liegende Farbtemperaturanzeige empfunden. Die dabei auftretenden Differenzen haben bei einer wahren Temperatur von 1500° etwa folgende Grössenordnung:

	schwarze Strahlung	graue Strahlung	Metallstrahlung
Farbtemperatur	1500°	1500°	1530°
schwarze Temperatur	1500°	1450°	1350°

Beim schwarzen Strahler stimmen also schwarze und Farbtemperatur überein, sie entsprechen gleichzeitig der wahren Temperatur; beim grauen Strahler ist die Farbtemperatur gleich der wahren, die schwarze Temperatur liegt selbstverständlich darunter. Bei Metallen liegt die Farbtemperatur zu hoch, die schwarze Temperatur, infolge des gleichzeitig sehr kleinen Absorptionskoeffizienten beträchtlich zu niedrig. Um den Bedürfnissen der Eisenindustrie entgegenzukommen, wurde durch Anfärbung des Graukeils die Farbtemperatur "gedrückt"; dadurch entsprechen bei Messungen der Temperatur von Graustrahlern auch die Farbtemperaturen nicht mehr den wahren, sondern sie liegen (wenn auch meist innerhalb der Fehlergrenze) darunter, etwa nach folgendem Schema:

	schwarze Strahlung	graue Strahlung	Metallstrahlung
Farbtemperatur	1500°	1490°	1510°
schwarze Temperatur	1500°	1450°	1350°

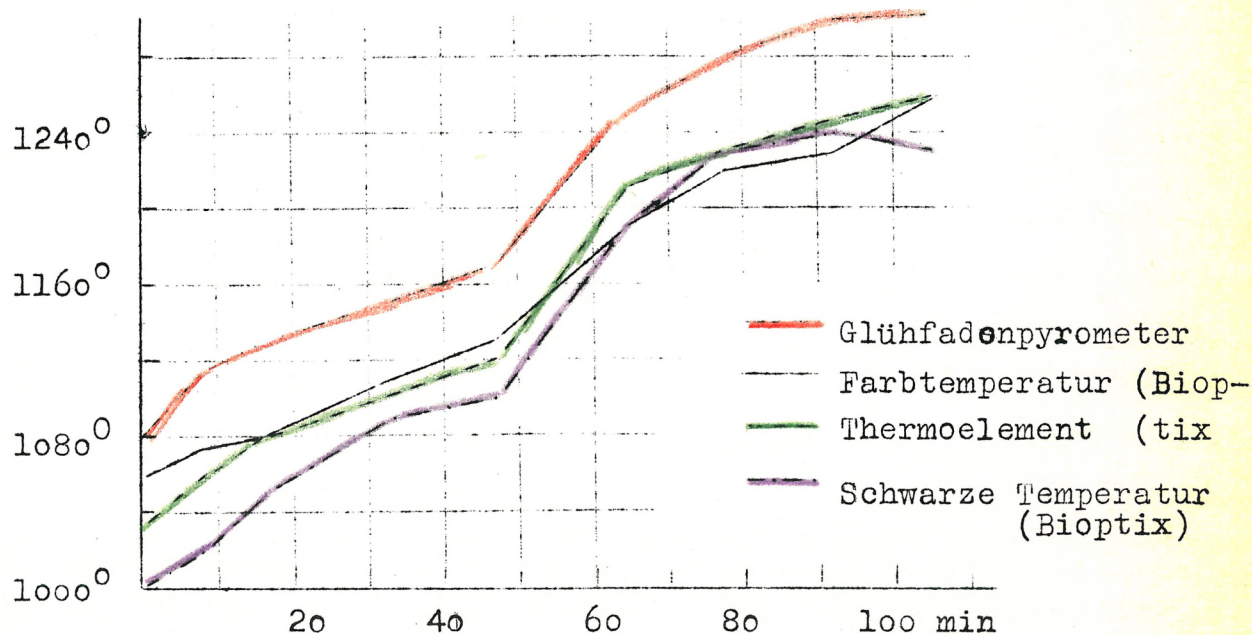
Temperaturmessungen an Glas mit dem Bioptix.

Die Untersuchungen wurden in zwei Teilen angestellt, die wir etwa folgendermassen gliedern möchten :

1. Messungen im geschlossenen Raum, sei es im Tiegel des Laboratoriums oder innerhalb des Ofens im Betrieb.
2. Messungen ausserhalb des Ofens am freistrahenden Glas im Betrieb.

Bei den Laboratoriumsmessungen im Tiegel ergab sich zunächst als Schwierigkeit, dass die für die Eichung des Bioptix gegenüber dem Thermoelement nötige Temperaturkonstanz über einen längeren Zeitraum nicht zu erreichen war; es konnten also Messungen nur bei steigender (in der Gasatmosphäre!) oder bei rasch fallender Temperatur gemacht werden. Dies und die verhältnismässig kleinen Glasmengen, die nur eine langsame Wärmelieferung an das armierte Thermoelement erlaubten, bewirkten ein Nachhinken der Temperaturanzeige des letzteren, so dass ein Element mit blanker Lötstelle in einigen Parallelversuchen eine um 15 bis 20° höhere Temperatur der Schmelze anzeigte.

Abbildung 2 gibt die im wesentlichen als Eichkurve aufzufassende Temperatureaufnahme eines unten geschlossenen Sillimanitrohres, das also als schwarzer Strahler anzusehen ist.



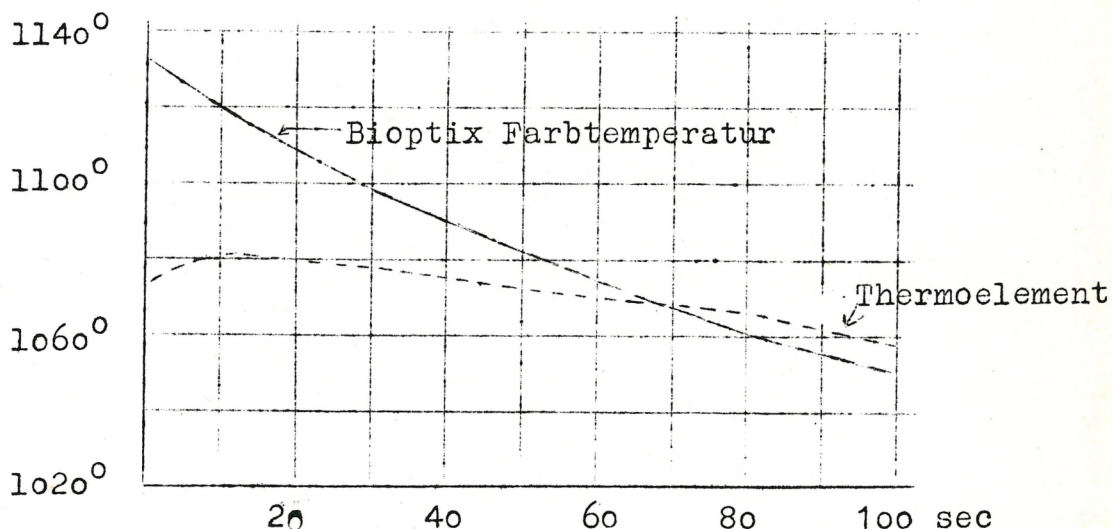
- Abb. 2 -

Diese Kurven erlauben einen Vergleich der Angaben eines geeichten Thermoelements, das mit der oben angegebenen Beschränkung die wahre Temperatur anzeigt, mit der Farbtemperatur des Biop-tix, der schwarzen Temperatur des Biotix und der schwarzen Temperatur des Glühfadenpyrometers. Das letztere (Instrument nach Holborn-Kurlbaum) zeigt etwa 50° zu hoch, wohl infolge eines Eichfehlers oder irgend welcher anderen Mängel am Instrument, so dass es für die Vergleichsmessungen ausscheidet. Die Farbtemperatur des Biop-tix kommt im wesentlichen recht nahe an die vom Thermoelement angezeigte wahre Temperatur heran; die mittlere Abweichung bei 9 Messungen beträgt 12° . Die schwarze Temperatur des Biop-tix ist in den unteren Temperaturbereichen zu niedrig, in den oberen nähert sie sich, wie es die Theorie für die Messung schwarzer Strahler verlangt, der wahren Temperatur. Der Theorie nach müssten für das vorliegende Beispiel des schwarzen Strahlers sämtliche Anzeigen zusammenfallen. Es bleibt zunächst unklar, ob es sich bei den vorhandenen Differenzen um Eichfehler, Ungenauigkeit im Instrument oder mangelnde Übung des Messenden handelt.

Aus allen im geschlossenen Ofen angestellten Messungen ergibt sich als Gesamtergebnis, dass die Farbtemperatur des Bioptix sowohl bei farbigen als auch bei farblosen Gläsern der wahren Temperatur sehr nahe kommt. Von Bedeutung erscheint dabei die Feststellung, dass die Farbe des Glases (bei Messung im geschlossenen Ofen!) keinen Einfluss auf das Messungsergebnis hat.

Von allergrösster Wichtigkeit für die Verwendbarkeit des Bioptix im Glashüttenbetrieb ist die Frage, wie es sich bei Messungen ausserhalb des Ofens befindlicher, also freistrahrender Glasmengen bewährt. Die Notwendigkeit derartiger Temperaturbestimmungen, z.B. im Gußglasbetrieb ist immer wieder betont worden; sie scheiterten bisher jedoch meist an technischen Schwierigkeiten. Die Messung mit dem Thermoelement verbietet sich wegen der Kürze der beim betrieblichen Vorgang zur Verfügung stehenden Zeit; die mit dem Glühfadenpyrometer war meistens wertlos wegen der Unkenntnis der Korrektionsfaktoren. Hier scheint das Farbpyrometer tatsächlich eine Lücke auszufüllen, wie die Temperaturmessungen von Maetz andeuten.

Abbildung 3 gibt die Messkurve des Glasinhaltes eines bis zu 25 cm Höhe gefüllten Hafens wieder. Der Hafen ist fast entleert worden und kühlt ausserhalb des Ofens ab. Das bei Beginn der Messung



- Abb. 3 -

in das Glas getauchte nicht armierte Thermoelment zeigt nach etwa 60 Sekunden die wahre Temperatur an, von diesem Zeitpunkt an fallen beide Anzeigen gleichmässig mit einem Abstand von etwa 8 bis 10° , d.h. die Farbtemperatur liegt um etwa 8 bis 10° unterhalb der wahren Temperatur.

Einschränkend ist allerdings zu bemerken, dass bei diesem Versuch das Glas nicht wirklich frei strahlte, sondern dass die vom Biop-tix aufgenommene Strahlung auch die am Glas gespiegelte des Hafens enthielt. Für eindeutige Messungen müssen selbstverständlich volle Häfen verwendet werden.

Immerhin ist die erreichte Genauigkeit bei den Messungen mit dem Biop-tix beachtlich und spricht unbedingt für seine Anwendbarkeit. Die Annäherung an die wahre Temperatur bei Messungen an freistrah-lendem Glas beträgt demnach tatsächlich 10° .

Wir möchten jedoch hier auf einen Einwand eingehen. In vielen Betrieben wird lieber auf die wahre Temperatur verzichtet, wenn man die Messung mit möglichst grosser Genauigkeit ($\pm 5^{\circ}$) repro-duzieren kann, als dass man mit dem Farbpyrometer der wahren Tem-peratur zwar näher kommt, aber dabei mit einer Einstellungsgenau-igkeit von 10 bis 15° rechnen muss. Demnach wäre mindestens eine grössere Annäherung der Messungen an die wahre Temperatur er-wünscht. Aus Ausführungen von Naeser geht hervor, dass bei den gelieferten Instrumenten, wie bereits oben auseinandergesetzt ist, für die Messung von blanken Metallen durch eine Färbung des Graukeils die Farbtemperaturanzeige "gedrückt" ist. Dies zieht auch eine Beeinflussung der Messung bei grauer Strahlung nach sich wo dann nach Naeser "die Abweichung von der wahren Temperatur höchstens 10° beträgt". Aus der geringen Abweichung der Farbtem-peratur des freistrahlenenden Glases von der wahren (Abb.3) ist zu schliessen, dass die Glasschmelze einem grauen Strahler entspricht oder ihm mindestens sehr nahe kommt. Dann lässt sich aber bei In-strumenten für Glas auf die Anfärbung des Keiles verzichten. Als Folge davon wäre vielleicht eine noch bessere Annäherung der Messung an die wahre Temperatur zu erreichen.

Wir sind nicht der Überzeugung, dass die unternommenen Versuche eine endgültige Klärung im Problem der Temperaturmessung des

Glasses gebracht haben. Immerhin scheinen sie uns durch die Verwendung des neuen Farbpyrometers Andeutungen darüber zu geben, in welcher Richtung sich weitere Bemühungen zu erstrecken. **haben.**

Literatur:

- S c h m i d t : Mitteilung der Wärmestelle Düsseldorf
Nr. 77, 1925
- N a e s e r : Mitt. Kaiser-Wilhelm-Institut f. Eisenfor-
schung 11, 1929, S.373-85; 12, 1930, S.299-316,
u. 365-372
- N a e s e r : Stahl u. Eisen 54, 1934, S.1158-60
- B l a u r o c k : Arch.Eisenhüttenwesen 8, 1934/35, S.517-32
- N a e s e r : Mitt. Kaiser-Wilhelm-Institut f. Eisenfor-
schung 18, 1936, S.21
(Mitt. Wärmestelle Düsseldorf Nr.227)
- G u t h m a n n : Stahl u. Eisen 56, 1936, S.481-89
- M a e t z : Diplomarbeit Aachen 1937