

Fachseminar



Theorie und Praxis der berührungslosen Temperaturmessung



Themenübersicht

1. Vorteile der berührungslosen Temperaturmessung
2. Physikalische Grundlagen und Zusammenhänge
3. Definition und Einfluss des Emissionsgrades
4. Grundlagen der Optik
5. Kriterien zur Auswahl von Pyrometern
6. Neuheiten und Trends in der Pyrometrie



Vorteile

der berührungslosen Temperaturmessung

- **Schnell (in ms-Bereich), dadurch Zeitersparnis bzw. mehrere Messungen und mehr Informationsgewinn möglich**
- **Messungen an bewegten Objekten möglich (Bandprozesse)**
- **Messung an gefährlichen oder schwer zugänglichen Stellen**
- **Messtemperaturen über 1300°C möglich, hier haben Kontaktthermometer nur eine begrenzte Lebensdauer**
- **Rückwirkungsfreies Messen bei schlechten Wärmeleitern und kleinen Objekten, an empfindlichen Oberflächen oder sterilen Produkten**

Kapitel 2



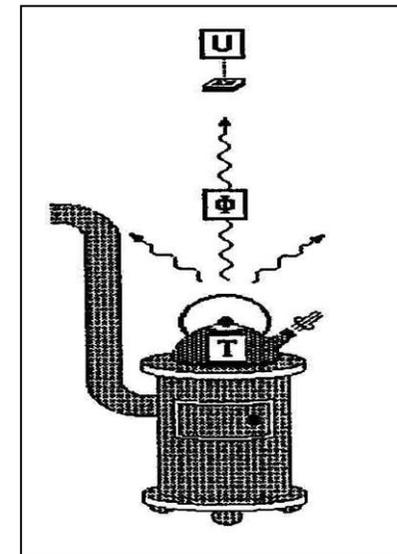
Physikalische Grundlagen und Zusammenhänge der berührungslosen Temperaturmessung

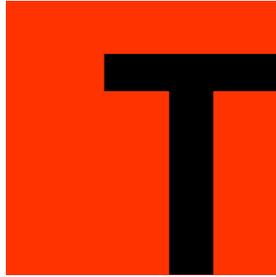
P

hysikalische Grundlagen

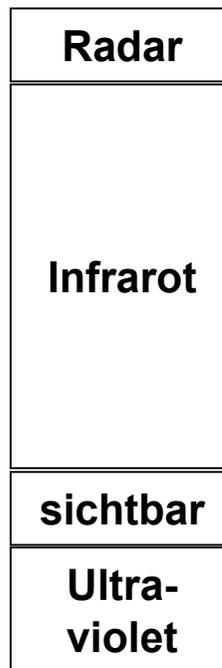
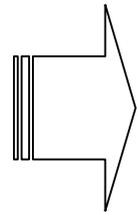
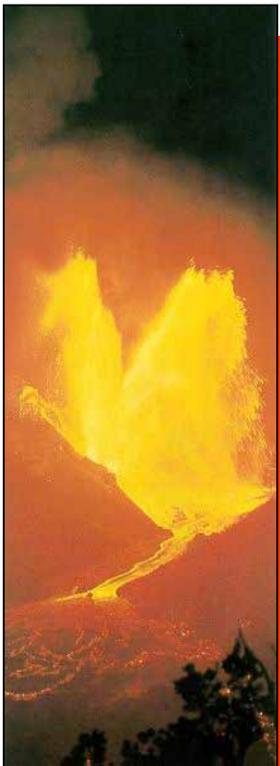
der berührungslosen Temperaturmessung

- Jeder Körper mit einer Temperatur (T) über dem absoluten Nullpunkt emittiert auf Grund der inneren mechanischen Molekularbewegung elektromagnetische Strahlung (Photonenteilchen).
- Diese Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit und gehorchen den bekannten optischen Gesetzmäßigkeiten. Sie lassen sich umlenken, mittels Linsen bündeln oder können von spiegelnden Flächen reflektiert werden.
- Messgeräte, die aus dieser Infrarotstrahlung die Temperatur ermitteln, werden als Infrarot-Thermometer, Strahlungspyrometer oder kurz Pyrometer bezeichnet.





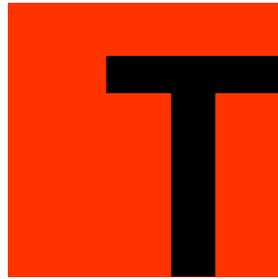
Temperaturstrahlung



Der Wellenlängenbereich, der für die Pyrometrie von Bedeutung ist, erstreckt sich von

0,5 μm bis ca. 20 μm .

In diesem Bereich bezeichnet man die Strahlung Ihrer Natur nach als Wärmestrahlung oder Infrarotstrahlung.



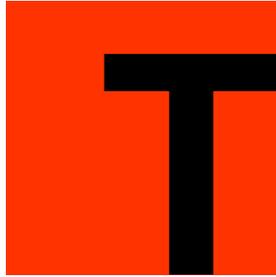
Temperaturstrahlung

- Die Wärmestrahlung, die ein Körper aussendet, ist von der Temperatur, der Wellenlänge und dem Emissionsgrad abhängig. Den Zusammenhang zwischen der spektralen spezifischen Ausstrahlung M , der Temperatur T und der Wellenlänge λ eines "Schwarzen Strahlers" beschreibt das Planck'sche Strahlungsgesetz.

Planck'sches
Strahlungsgesetz

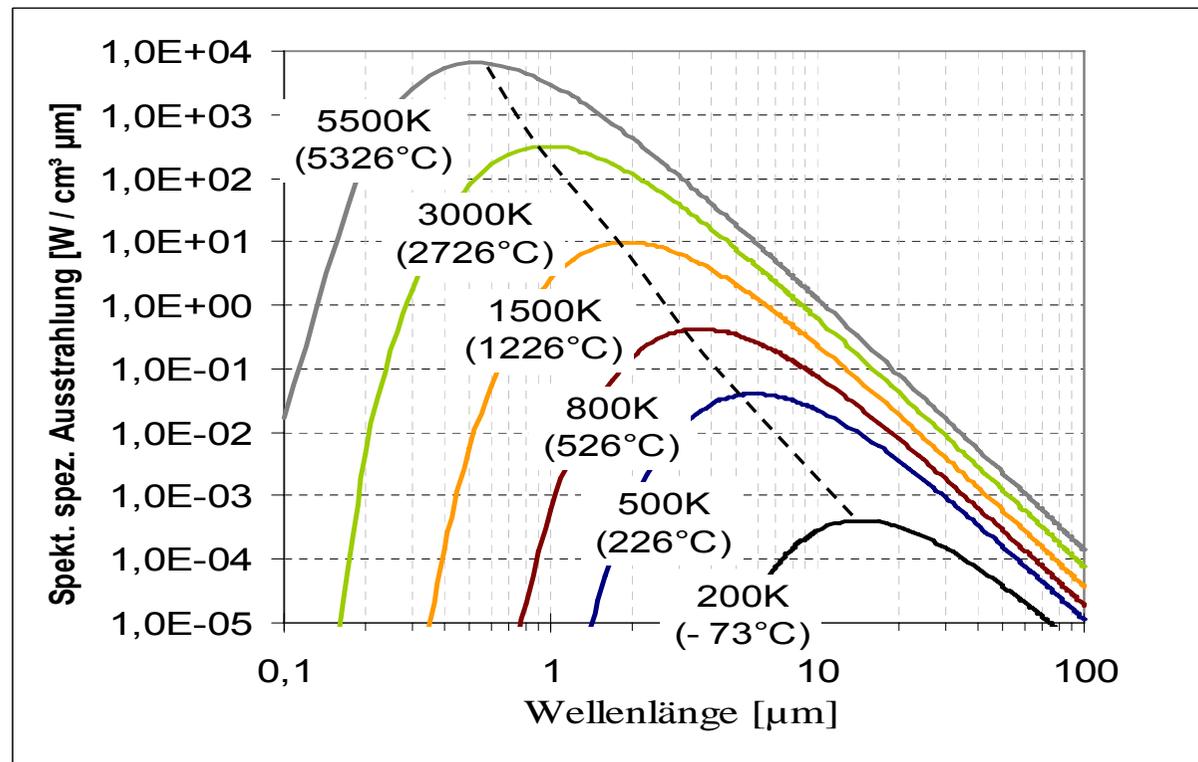
$$M_{\lambda_s}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]}$$

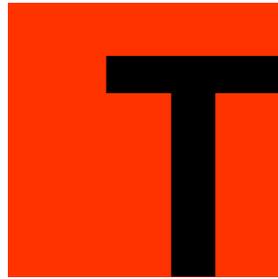
mit $C_1 = 2 \cdot \Pi \cdot C_0^2 \cdot h$ $C_2 = \frac{c_0 \cdot h}{k}$



Temperaturstrahlung

Planck'sches Strahlungsgesetz



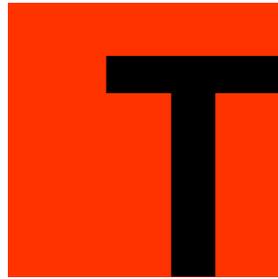


Temperaturstrahlung

- Die Strahlungsenergie im gesamten Wellenbereich (Integral über alle Wellenlängen) liefert die gesamte spezifische Ausstrahlung des schwarzen Körpers (Stefan Boltzmann Gesetz).

$$M_S(T) = \sigma * T^4 \quad \sigma = \text{Stefan Boltzmann Konstante}$$

- Die Strahlungsintensität steigt mit der 4. Potenz der Temperatur
- Höhere Temperaturen können energetisch einfacher erfasst werden. Daher lassen sich bei höheren Temperaturen kleinere Messflecke oder größere Entfernungen realisieren.

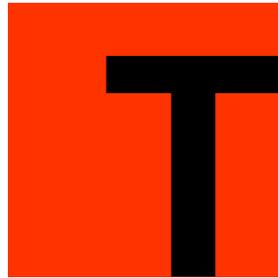


Temperaturstrahlung

- Das Strahlungsmaximum verschiebt sich mit steigender Objekttemperatur zu immer kürzeren Wellenlängen.
- Die Temperatur verhält sich umgekehrt proportional zum Wellenlängenmaximum

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T[\text{K}]} \quad b = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

- Niedrige Objekttemperaturen sind mit langwellig messenden Pyrometern zu messen, für hohe Objekttemperaturen sind kurzwellig messende Sensoren einzusetzen.



Temperaturstrahlung

- Die Wahl der Wellenlänge für ein Pyrometer ist primär von dem zu messenden Temperaturbereich abhängig.

Zusammenhang: Wellenlängenbereich und Messbereich

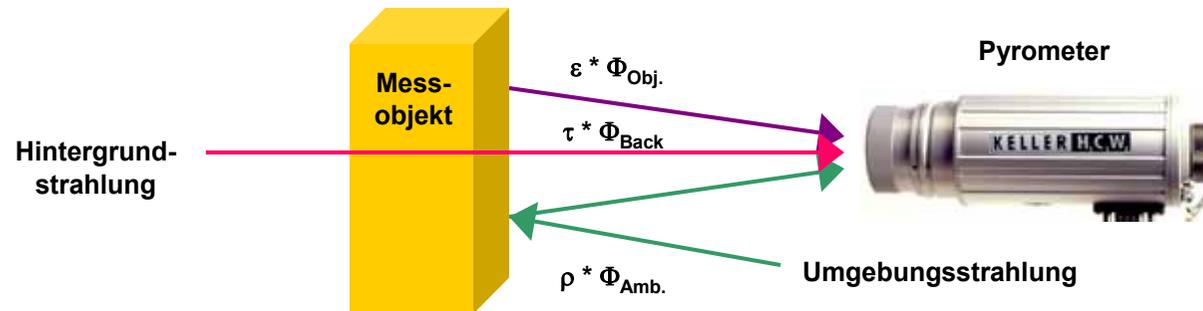
Wellenlänge	Sensor	Temperaturbereich
8 ... 14 μm	Thermopile	-30 ... 1000 °C
1,1 ... 1,7 μm	Fotodiode	180 ... 2500 °C
0,8 ... 1,1 μm	Fotodiode	500 ... 3000 °C
0,85 ... 0,91 μm	Fotodiode	600 ... 3000 °C
4,46 ... 4,82 μm	Thermopile (für Glas)	300 ... 2500 °C

- Je nach Aufbau, Sensor und Filter des Pyrometers wird lediglich die Strahlung eines kleinen Wellenlängenbereichs empfangen und in die temperaturproportionale Messgröße umgewandelt.



Zusammensetzung

der vom Pyrometer erfassten Strahlung



Die Strahlung setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

$$\Phi_{\Sigma} = (\varepsilon * \Phi_{Obj.}) + (\rho * \Phi_{Amb.}) + (\tau * \Phi_{Back})$$

- ε Emissionsgrad des Messobjektes
- ρ Reflektionsgrad des Messobjektes
- τ Transmissionsgrad des Messobjektes



Zusammensetzung

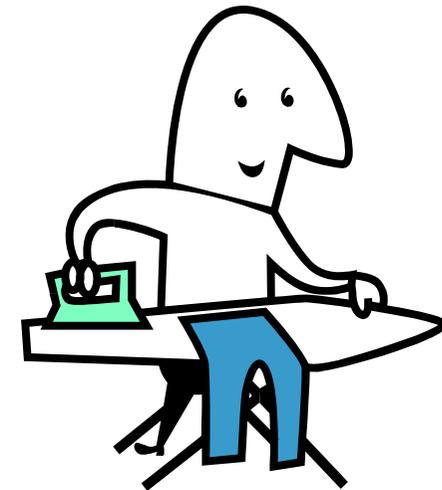
der vom Pyrometer erfassten Strahlung

- Aus dem Energieerhaltungssatz folgt, dass die Summe der Koeffizienten von emittierter (ε), reflektierter (ρ) und durchstrahlender (τ) Energie gleich 1 sein muss.

$$1 = \varepsilon + \rho + \tau$$

- Für nicht transparente Messobjekte vereinfacht sich die Formel zu:

$$1 = \varepsilon + \rho$$

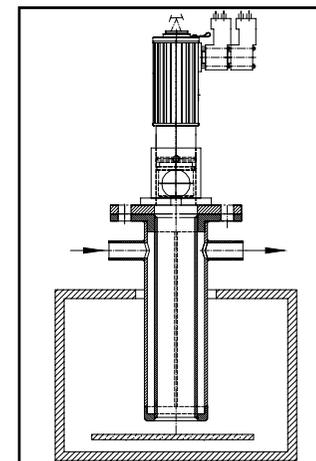
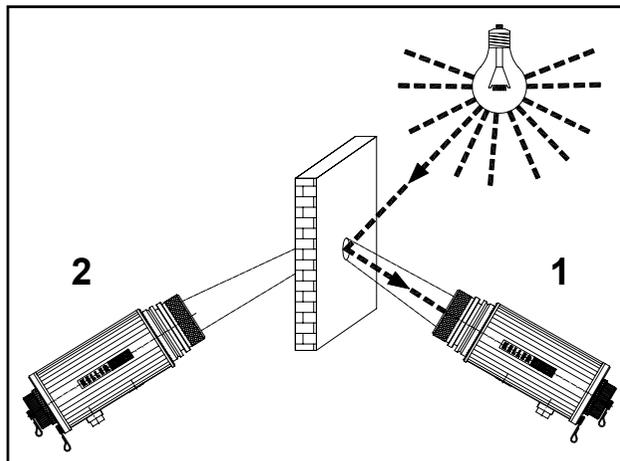


S

törstrahlung

Einfluss und Eliminierung

- **Pyrometer 1** empfängt einen Teil der reflektierten Störstrahlung von der stark strahlenden Lampe. **Pyrometer 2** ist durch das Objekt abgeschirmt.
- Durch den Einsatz eines wassergekühlten Visierrohres wird die Störstrahlung der Ofenwandung abgeschattet.

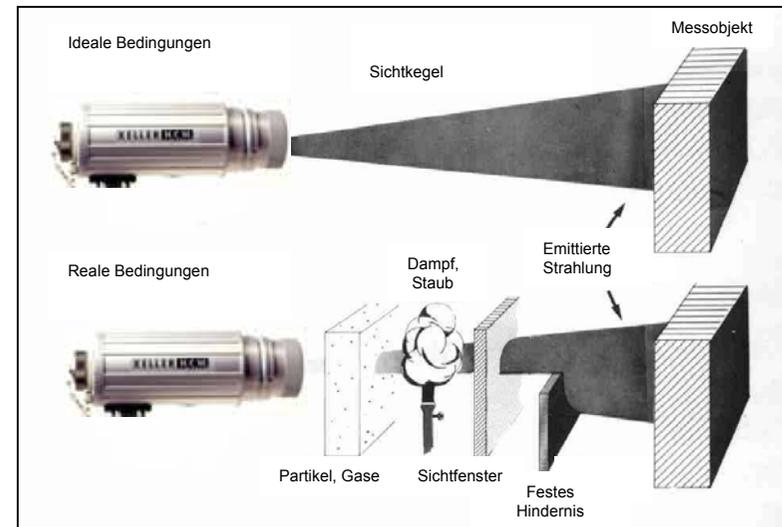




Messfehler

durch Transmissionsverluste

- Unter realen Messbedingungen empfängt das Pyrometer häufig nicht die komplette Strahlung des Messobjektes.
- Objekte, wie Dampf, Staub, Schaugläser oder z.B. Anlagenteile im Strahlengang des Pyrometers bewirken eine Verminderung der vom Pyrometer erfassten Strahlung.





Messfehler

durch Transmissionsverluste

- Je kurzwelliger ein Pyrometer misst, desto unempfindlicher reagiert es auf Emissionsgradschwankungen oder Transmissionsverluste durch die Atmosphäre im Strahlengang.
- Bei der Festlegung des Messbereiches ist zu entscheiden, ob eher ein kurzwellig messendes Pyrometer mit einer höheren Anfangstemperatur besser geeignet ist, um Störeinflüsse durch die Atmosphäre oder Änderungen des Emissionsgrades gering zu halten.
- Um den Störeinfluss von Zwischenmedien im Strahlengang des Pyrometers zu umgehen, werden häufig Quotientenpyrometer eingesetzt.

Kapitel 3

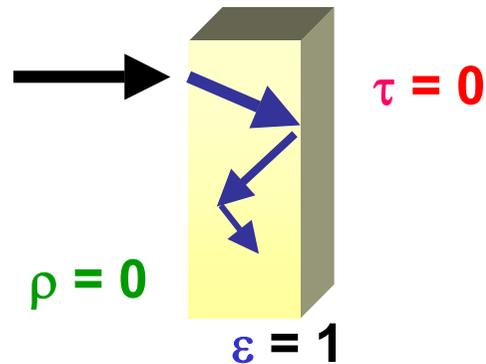


Definition und Einflussfaktoren des Emissionsgrades

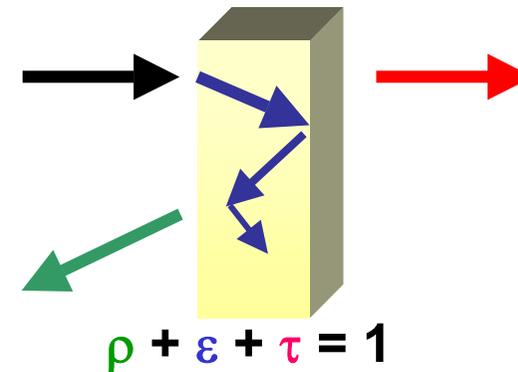
Emissionsgrad

Definition

„Schwarzer Strahler“



„Realer Körper“



Emittierte Strahlung = **Absorbierte Strahlung**

Def.: Emissionsgrad (ϵ) =
$$\frac{\text{Emittierte Strahlung realer Körper } (\Phi_R)}{\text{Emittierte Strahlung schwarzer Körper } (\Phi_S)}$$



Infrarotstrahlung

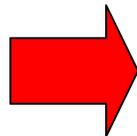
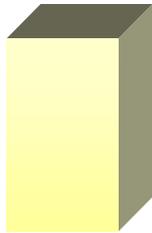
Einflussfaktoren

- Die Intensität der Infrarotstrahlung ist von der Temperatur, dem Material und der Oberflächenbeschaffenheit des Messobjektes abhängig.
- Jedes Material hat eine bestimmte Fähigkeit, Infrarotstrahlung zu emittieren. Diese Strahlungsfähigkeit wird durch eine Materialkonstante, dem „Emissionsgrad“ beschrieben und auf einen idealen Strahler (Schwarzer Strahler) bezogen.

Emissionsgrad

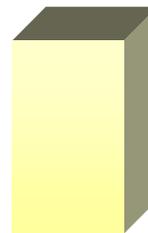
Der Emissionsgrad ist eine materialabhängige und oberflächen-spezifische Größe.

Emission > 80% = Reflexion < 20%



- Ziegel, Beton
- Kupfer, oxidiert
- Graphit
- Holz, Gummi, organische Materialien, Kunststoff

Emission < 20% = Reflexion > 80%

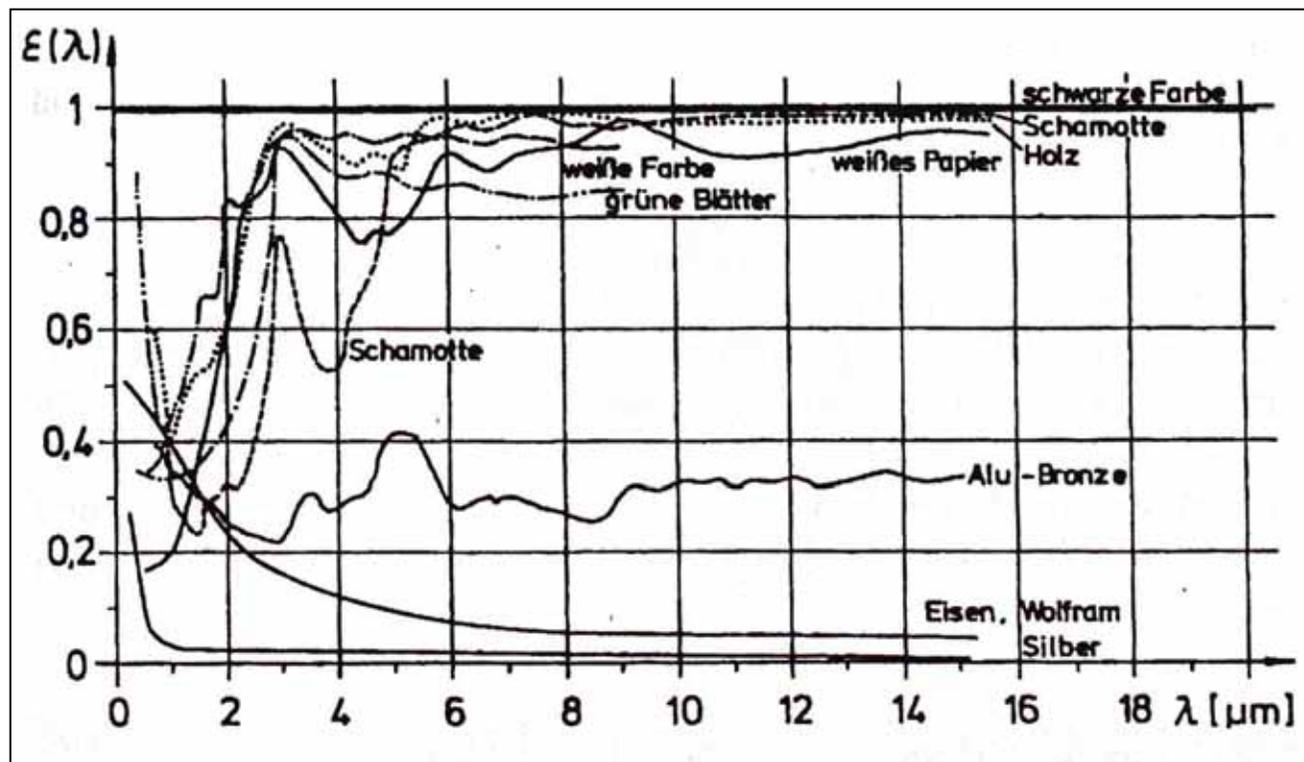


- Gold, Silber
- Bronze geschliffen
- Stahl blank

E

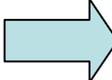
missionsgrad

in Abhängigkeit des Materials und der Wellenlänge



missionsgrad

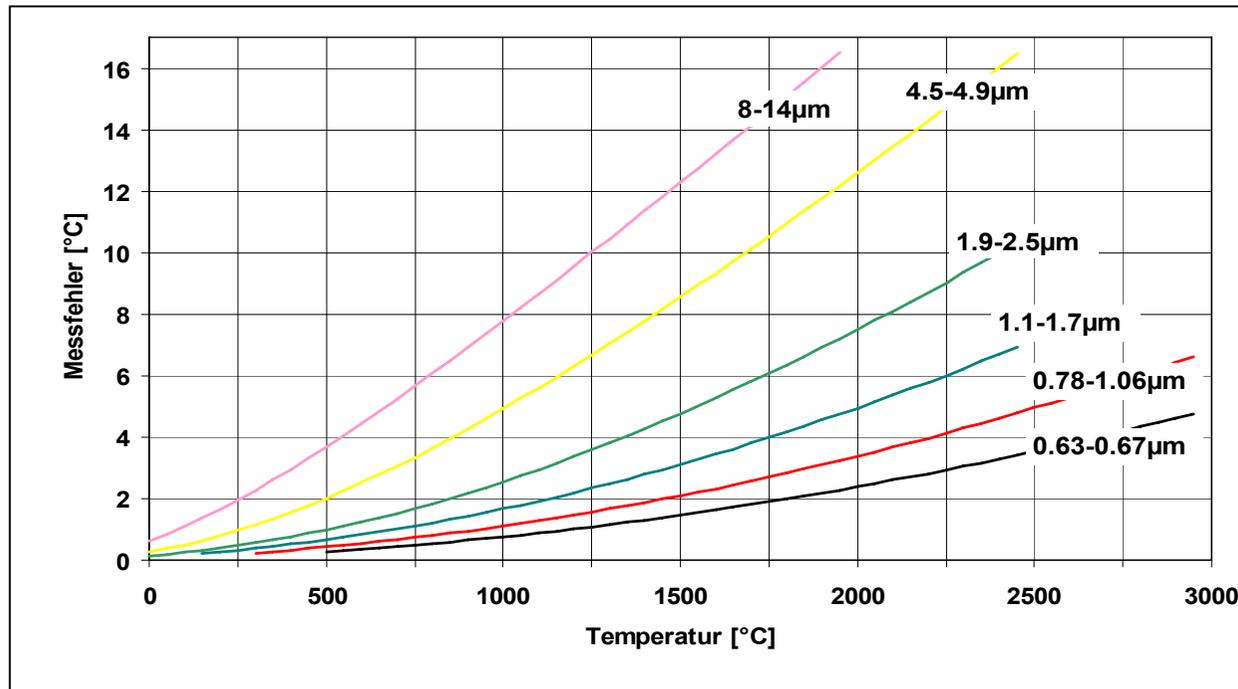
- Die Minderstrahlung eines realen Körpers wird vom Pyrometer durch Einstellung des Emissionsgrades kompensiert.
- Je kleiner der eingestellte Emissionsgrad desto höher die Temperatur.

Emissionsgradsteller ↘  Temperaturanzeige ↗



Messfehler

bei 1% Änderung des Emissionsgrades in
Abhängigkeit der Temperatur und Wellenlänge



Emissionsgradermittlung

bei niedrigen Objekttemperaturen

Bestimmung der Temperatur einer Materialprobe durch

- Kontaktthermometer (z. B. Thermoelement)
- Aufbringen eines Epsidot-Aufklebers mit definiertem Emissionsgrad (bis 250 °C) und Messung mittels Pyrometer
- Beschichtung der Objekt Oberfläche mit einer matt schwarzen Farbe. Der Emissionsgrad liegt hier bei Werten um 0,94.

Anschließend wird die Oberflächentemperatur mit einem Pyrometer gemessen und der Emissionsgrad so eingestellt, dass die zuvor ermittelte Temperatur angezeigt wird.

Emissionsgradermittlung

bei hohen Objekttemperaturen ($> 700\text{ °C}$)

Bestimmung der Temperatur einer Materialprobe mit einem sehr kurzweilig messenden Pyrometer (z.B. Intensitätsvergleichspyrometer), da damit die geringste Messunsicherheit erzielt werden.

Emissionsgrad des einzustellenden Pyrometers so eingestellt, dass die zuvor ermittelte Temperatur angezeigt wird.



Kapitel 3

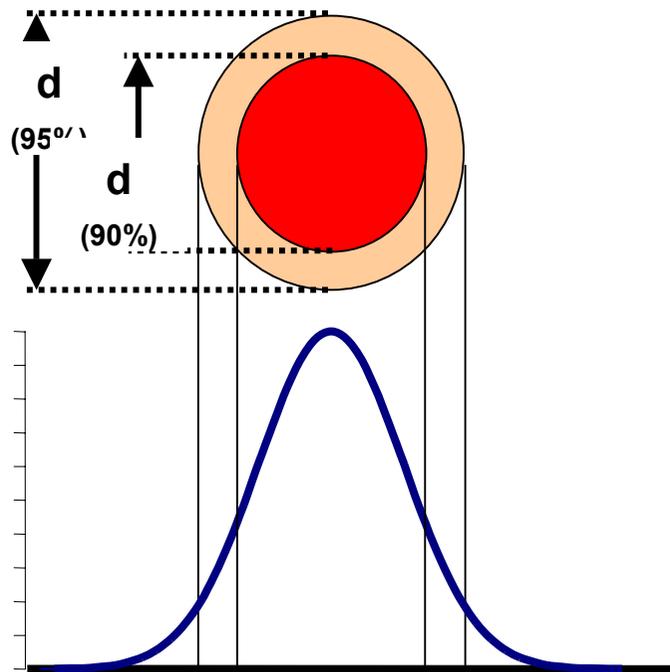


Grundlagen der Optik



Messfleckdurchmesser

bezogen auf die empfangene Strahlungsenergie

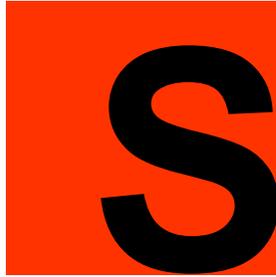


Die technischen Daten des Herstellers beschreiben den Durchmesser des Messflecks in Abhängigkeit der Entfernung mittels:

- Distanzverhältnis (D); z.B. 50:1
- Messfleckverlauf

Diese Angaben beziehen sich auf einen prozentualen Anteil der Strahlungsenergie.

$$d_{(95\%)} \leq 3 \times d_{(90\%)}$$



pezifikation von Pyrometeroptiken

- Die Messfleckgröße bei Pyrometern wird bezogen auf einen festgelegten Prozentsatz der maximal in einem Halbraum empfangbaren Energie, d.h. 100% entspricht einem unendlich großen Objekt.
- Die Messfleckgröße wird typisch auf 90 oder 95% der maximal empfangbaren Energie bezogen. Messfleckgrößen sind deshalb nur vergleichbar, wenn sie auf den selben Prozentsatz bezogen sind.
- Eine Vergrößerung des Messobjektes führt bei Strahldichtepyrometern immer zu einer (geringen) Erhöhung des Messwertes. Dieser Effekt wird Size of Source Effekt genannt und ist die größte Fehlerquelle bei modernen Pyrometern.

Messfleckdurchmesser

- Der Messfleckdurchmesser darf höchstens so groß sein, wie das zu messende Objekt. Unter Berücksichtigung von Ausrichttoleranzen sollte der Messfleckdurchmesser des Pyrometers stets kleiner als das Objekt gewählt werden.
- Teilweise wird der Sichtkegel des Pyrometers auch durch den Durchmesser von Schaugläsern oder Sichtöffnungen begrenzt. Dies ist bei der Berechnung des Strahlenganges und des idealen Fokusabstandes zu berücksichtigen.
- Aus der Objektgröße und dem Distanzverhältnis lässt sich der maximal zulässige Messabstand errechnen.

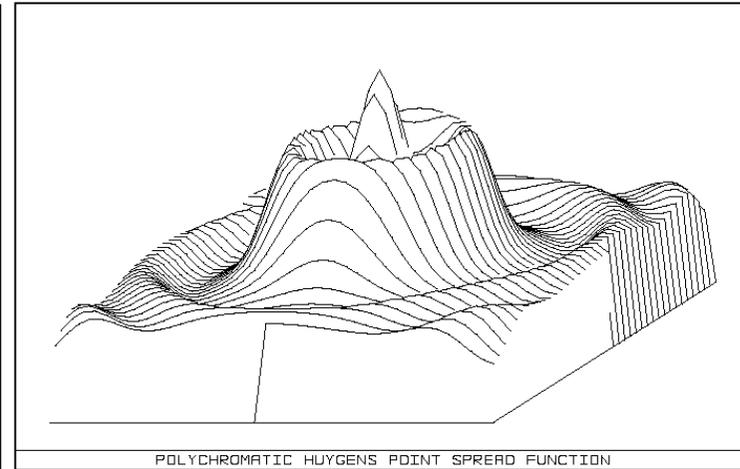
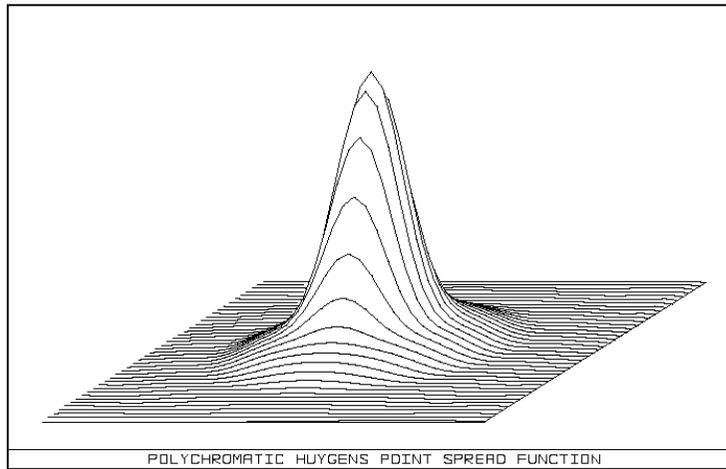


Intensitätsverteilung

eines Bildpunktes bei:

optimaler Fokussierung

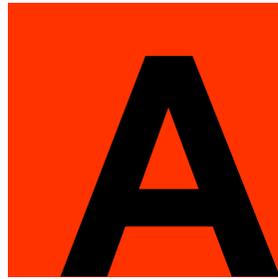
Defokussierung um 0,5 mm



Kapitel 5



Kriterien zur Auswahl von Pyrometern



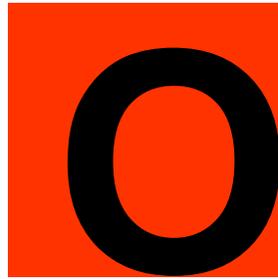
Auswahlkriterien

- **Messbereich - Wellenlänge**
- **Optik mit Fixfokus oder fokussierbar**
- **Messfleckdurchmesser**
- **Messverfahren (Spektral- oder Quotientenmessung)**
- **Bauform**
- **Signalausgang / Schnittstelle**

Messbereich - Wellenlänge

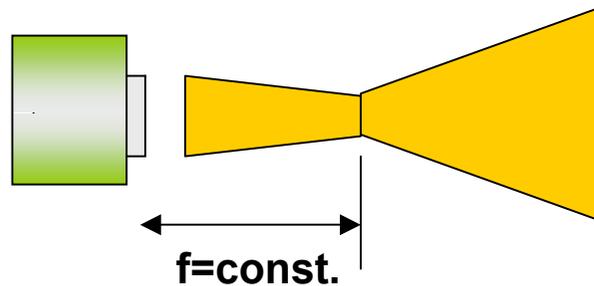
Messbereich	Wellenlänge
-30 ... 1000 °C	8 ... 14 µm
180 ... 2500 °C	1,1 ... 1,7 µm
500 ... 3000 °C	0,8 ... 1,1 µm
600 ... 3000 °C	0,85 ... 0,91 µm
300 ... 2500 °C	4,46 ... 4,82 µm

- Je kurzwelliger ein Pyrometer misst, desto unempfindlicher reagiert es auf Emissionsgradschwankungen oder Transmissionsverluste durch die Atmosphäre im Strahlengang.
- Bei der Festlegung des Messbereiches ist zu entscheiden, ob eher ein kurzwellig messendes Pyrometer mit einer höheren Anfangstemperatur besser geeignet ist, um Störeinflüsse durch die Atmosphäre oder Änderungen des Emissionsgrades gering zu halten.



Optik - Varianten

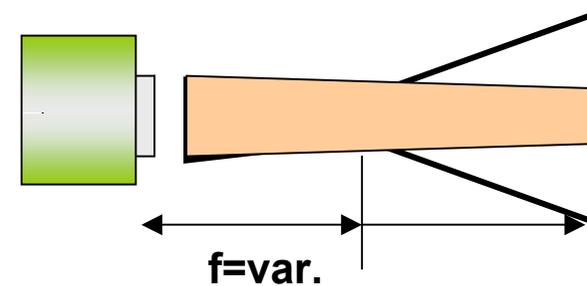
Optik mit Fixfokus



Anwendung

- konstante Objektgröße und Entfernung
- Objekt deutlich größer als Messfleck

fokussierbare Optik

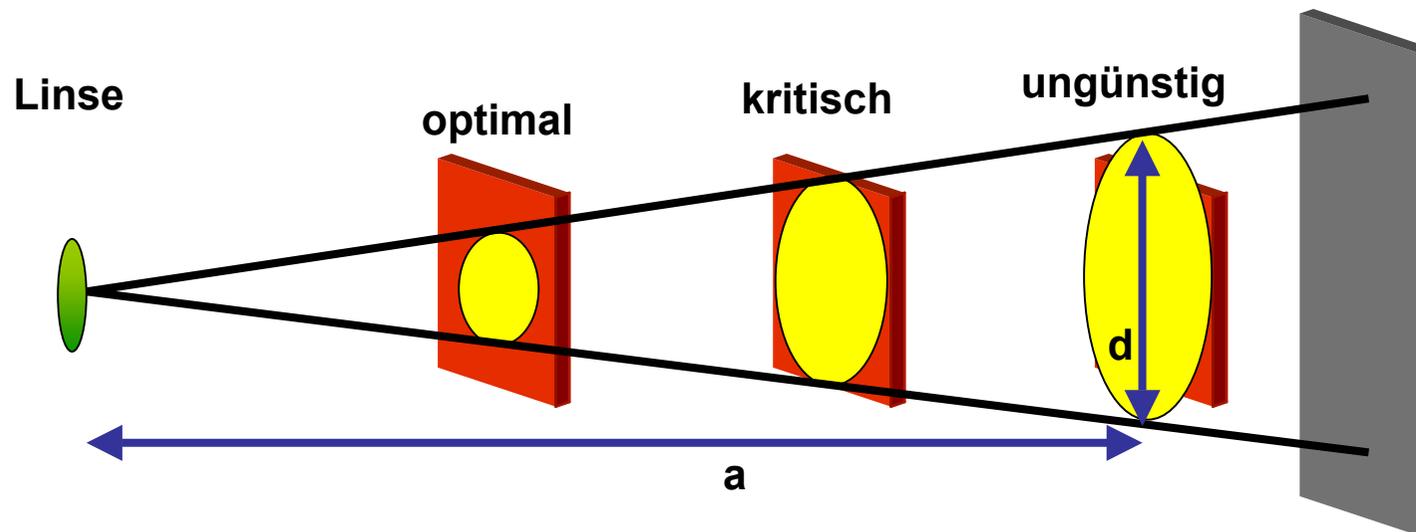


Anwendung

- variable Objektgröße und Entfernung
- kleine Objekt oder große Entfernungen

Messfleckdurchmesser

Messfleck und Objektgröße in Abhängigkeit der Entfernung



Definition: Distanzverhältnis (D) = $\frac{\text{Entfernung (a)}}{\text{Messfleckdurchmesser (d)}}$



pektral- oder Quotientenpyrometer

Quotientenpyrometer bringen unter folgenden Bedingungen Vorteile gegenüber Spektralpyrometern:

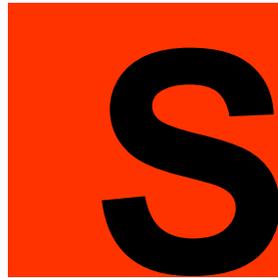
- Das Messfeld ist nicht vollständig ausgefüllt.
- Die Messstrecke zwischen Pyrometer und Objekt hat Einengungen oder absorbierende Medien wie z.B. Rauch, Dampf, oder Staub im Strahlengang.
- Der Emissionsgrad ist nicht genau bekannt oder schwankt, sollte aber nicht wellenlängenabhängig im Spektralbereich des Pyrometers (grauer Strahler) sein.
- Schutzgläser haben keinen Einfluss auf das Messergebnis, wenn die Transmission im Spektralbereich des Pyrometers nicht von der Wellenlänge abhängig ist.

Bauform

Kompaktpyrometer – Lichtwellenleiter Pyrometer

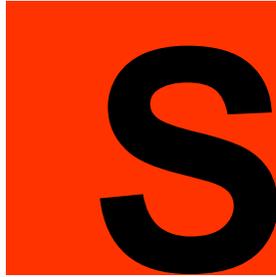
- Lichtwellenleiter Pyrometern besitzen einen getrennten optischen Messkopf, die bei Umgebungstemperaturen von bis zu 250°C ohne Kühlung, bei starken elektrischen Feldern oder bei beengten Platzverhältnissen eingesetzt werden.
- Der Anfangstemperatur liegt aufgrund des Lichtwellenleiters bei $\geq 350^{\circ}\text{C}$.



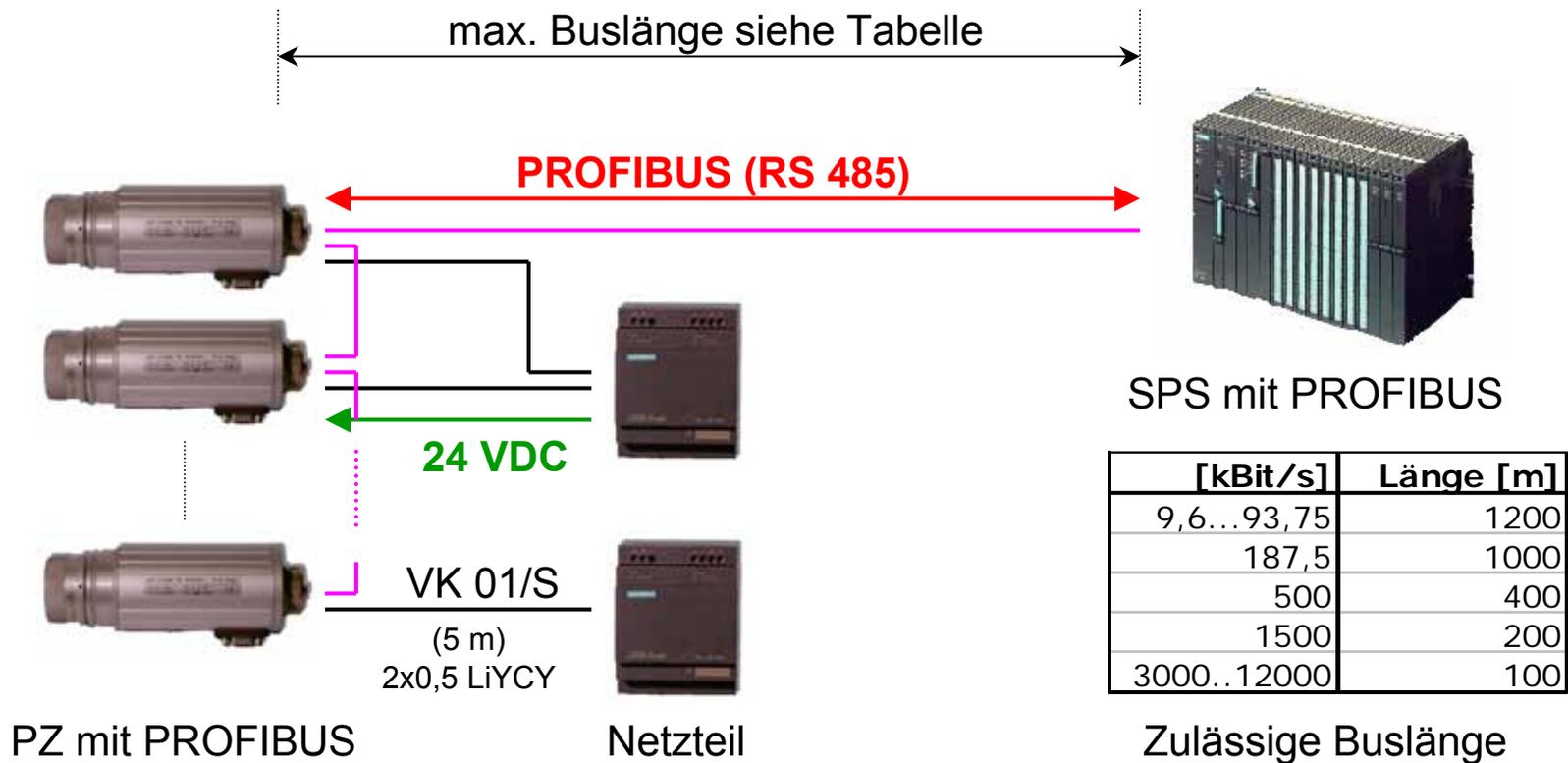


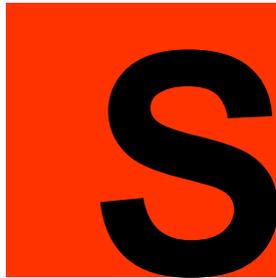
Schnittstellen am PZ

Schnittstellenzuordnung CellaTemp PZ		
Ausführung	Schnittstellen	Bemerkungen
AF xx	RS 232, 0/4..20 mA, Mode, Ready	Standard PC-Schnittstelle
AF1xx		Normiertes Bussystem mit bis zu 32 Geräten pro Strang
AF2xx	RS 422, 0/4..20 mA, Mode, Ready	Serielle Übertragung bis zu 1200 Meter
AF3xx		Industrielles Feldbussystem zur Anlagenintegration



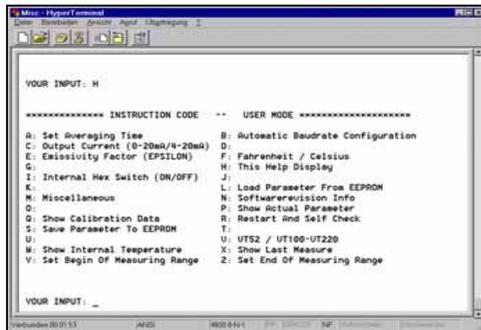
Schnittstelle PROFIBUS





oftware

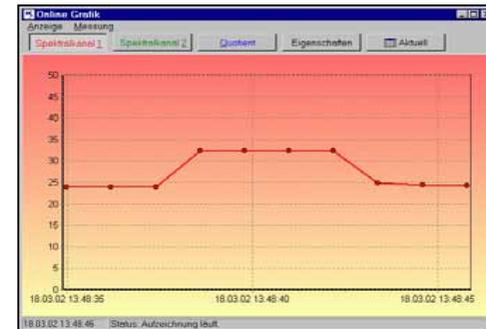
zur Messwertübertragung, Analyse und Dokumentation



**Windows
Hyperterminal**



**PZ 10D95
PZ-Logger**

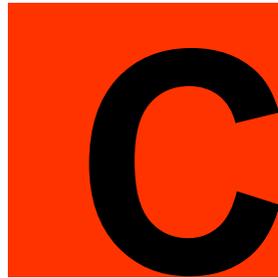


**PZ 10N AF10
CellaMevis**

Kapitel 6



Neuheiten und Trends der berührungslosen Temperaturmessung

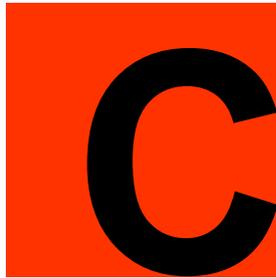


ellaTemp PZ 25

Spektralpyrometer

- Messbereich 180 - 1200°C (150°C für $\epsilon > 0,5$)
- Gleichlicht-Sensorik
- Langzeitstabile Photodiode
- Fokussierbare Durchblickoptik mit Messfleckmarkierung
- Spektralbereich 1,1 - 1,7 μm
- Distanzverhältnis 80:1
- Fokusbereich 0,3 m - ∞
- Anwendungen:
Messung an Metalloberflächen ab 180°C
(Umgebungslicht muss ggf. abgeschattet werden)





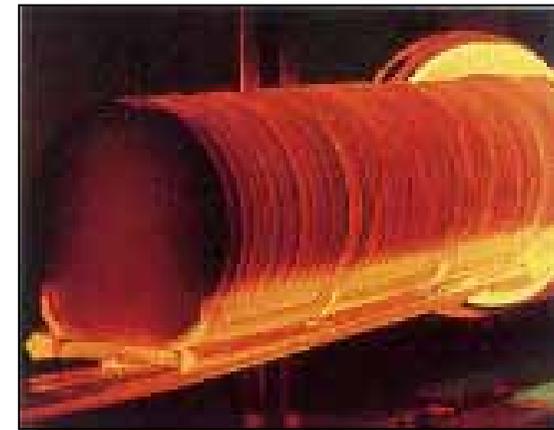
ellaTemp PZ 35

Spektralpyrometer

- Messbereich 600 - 2500°C
- Photodiode
- Fokussierbare Durchblickoptik mit Messfleckmarkierung
- Spektralbereich $0,88 \pm 0,03 \mu\text{m}$

AF1 / AF301	0,4 m - ∞	175 : 1
AF2 / AF302	0,2 - 0,4 m	140 : 1
AF3 / AF303	1,2 m - ∞	240 : 1
AF4 / AF304	0,2 m - ∞	35 : 1

- Anwendungen: Messung an Metalloberflächen; z.B. Wolfram oder Halbleitern wie Silizium
- Einsetzbar als Referenzpyrometer, da extrem schmalbandig und geringer Temperaturkoeffizient (0,04%/K)

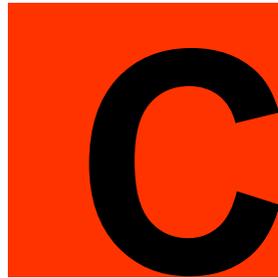


CellaCap

Videokamera-Aufsatz

- Messfleckmarkierung am Bild sichtbar
- Standard Videosignal
- Autarkes Kameramodul für PZ-Serie rückseitig auf dem Pyrometer aufschraubbar
- Hohe Lichtempfindlichkeit
- Automatische Anpassung an die Umgebung (AGC und Blende)
- Übertragung bis zu 100 m ohne Verstärkung





ellaTemp PS 27/28

Spektralpyrometer für die Wärmebehandlung

- Messbereich 300 - 1300°C
- Photodiode
- sehr gute Abbildungseigenschaft durch breitband-entspiegelte Präzisionslinse (Messfleck 2,5 mm bei 200 mm)
- exakte Abbildung der Messposition und der Messfleckgröße
- Spektralbereich PS 27: 1,7 - 2,2 μm
PS 28: 1,1 - 1,7 μm
- Anwendungen PS 27:
Messung an Laserhärteanlage Dioden- oder Nd-YAG-Laser (1,064 μm)

