

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 40 (1949)
Heft: 7

Artikel: Messgenauigkeit der technischen Teilstrahlungspyrometer
Autor: Jagersberger, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056356>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

regten Generator zugeschaltet wurde. Weil die Ausgangsspannung höher war als bei allen andern Versuchen und anderseits die negative Stosserregung auf einen festen Absolutwert eingestellt war, hat auch die Stosserregung viel rascher angesprochen. Die bei diesem Vorgang erreichte Abbaugeschwindigkeit der Erregerspannung beträgt 150 %/s. Trotz dieser hohen Reguliergeschwindigkeit erfolgt das Einschwingen in den neuen Erregerzustand dank der stabilen Arbeitsweise des Reglers einwandfrei.

Aus der graphischen Darstellung Fig. 13 geht die Belastbarkeit des Generators hervor. Man ent-

nimmt daraus, dass diese Maschine mit 30 000 kVA Generator-Nennleistung eine totale Regulierleistung von $30\ 000 \cdot 1,92 = 58\ 000$ kVA als Synchron-Kompensator abgeben kann, wenn sie mit der beschriebenen Spannungsregulierung ausgerüstet ist.

Abschliessend sei der Motor-Columbus A.-G., Baden, der Aare-Tessin A.-G. für Elektrizität, Olten, den Bernischen Kraftwerken A.-G., Bern und der Aluminium-Industrie-A.-G., Lausanne für die grosszügige Überlassung ihrer Anlagen und für die Mitwirkung bei den Versuchen bestens gedankt.

Adresse des Autors:

R. Keller, Oberingenieur der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden.

Messgenauigkeit der technischen Teilstrahlungspyrometer

Von A. Jagersberger, Steyr (Österreich)

536.521

In der vorliegenden Arbeit werden die Fehlergrenzen der zu technischen Temperaturmessungen geeigneten Teilstrahlungsverfahren eingehend analysiert, wobei gleichzeitig eine Aufteilung des insgesamt auftretenden Fehlers in einen absoluten und einen relativen Messfehler vorgenommen wird. Unter dem absoluten Messfehler wird die Abweichung verstanden, die zwischen der wahren Temperatur des Messobjektes und dem an der Skala des Pyrometers abgelesenen Temperaturwert besteht. Dieser absolute Fehler setzt sich zusammen aus dem Eichfehler des Messgerätes und dem relativen Messfehler, der durch die Genauigkeit des Leuchtdichtenabgleiches und die Genauigkeit des Messinstrumentes bedingt ist, dessen Zeiger sich bei gleich grossen Stromstärken nur innerhalb einer gewissen Toleranz auf ein und denselben Teilstrich einstellt.

Dans cet article, l'auteur analyse les limites d'erreurs des procédés de rayonnement partiel appliqués à la mesure technique des températures. L'erreur totale est elle-même subdivisée en erreur absolue et en erreur relative. La première est l'écart entre la vraie température de l'objet mesuré et la valeur relevée sur l'échelle du pyromètre. Cette erreur absolue comporte l'erreur d'étalonnage de l'appareil de mesure et l'erreur relative qui dépend du degré de précision de la comparaison des brillances et de la précision de l'appareil de mesure, dont l'aiguille ne se place qu'avec une certaine tolérance devant la même division de l'échelle pour indiquer des courants de même intensité.

1. Wirkungsweise der Teilstrahlungspyrometer

Die Teilstrahlungspyrometer beruhen wie alle optischen Temperaturmessgeräte auf der Voraussetzung, dass die Strahlungen der zu messenden Körper dem Planckschen Strahlungsgesetz entsprechen oder auch dessen vereinfachter Form, dem für alle Temperaturmessungen bis etwa 5000 °C ausreichend genauen Wienschen Strahlungsgesetz, das durch Formel (1) ausgedrückt wird.

$$W(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (1)$$

Die Energie W der Strahlung ist also nur abhängig von der absoluten Temperatur T und der Wellenlänge λ .

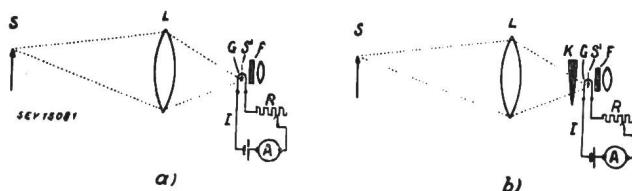


Fig. 1

Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise der Teilstrahlungspyrometer

- a) Teilstrahlungspyrometer nach dem Strommessverfahren
 - b) Teilstrahlungspyrometer nach dem Graukeilverfahren
- S Strahler (Messobjekt), L Linse, K Graukeil, G Glühfaden der Pyrometerlampe, S' Strahlerbild, F Filter, I Strom, R Regulierwiderstand, A Ampèremeter

In Fig. 1 ist die Wirkungsweise der Teilstrahlungspyrometer schematisch dargestellt. Man muss bei der Berechnung der Messgenauigkeit grundsätz-

lich zwischen den beiden Methoden a) und b) unterscheiden.

a) Das Stromverfahren

Beim Stromverfahren (Fig. 1a) wird die Leuchtdichte einer Vergleichslichtquelle, die hier immer als Glühfaden G angenommen wird, der Leuchtdichte des Strahlerbildes S' angeglichen, die mit der Leuchtdichte des Strahlers S übereinstimmt. Die Angleichung der Leuchtdichten erreicht man durch Verändern des Glühfadenstromes I mit Hilfe eines Regulierwiderstandes R . Jeder Stromstärke entspricht eine gewisse Leuchtdichte des Glühfadens und daher eine ganz bestimmte Leuchtdichte des Strahlers. Da die Strahlerleuchtdichte proportional $W(\lambda, T)$ ist, gehört somit zu jedem Glühfadenstrom I eindeutig eine Temperatur T des Strahlers. Die Aufgabe der Eichung ist es, diesen Zusammenhang $T = f(I)$ zu ermitteln.

b) Das Graukeilverfahren

Beim Graukeilverfahren (Fig. 1b) wird die Leuchtdichte des Strahlers S , bzw. dessen Bildes S' , der konstant bleibenden Leuchtdichte des Glühfadens angeglichen. Die Angleichung erfolgt durch Schwächung der Strahlung mit einem Graukeil K , an dessen Stelle auch gelegentlich andere Lichtschwächungsmittel verwendet werden. Der Glühfadenstrom I wird auf einen konstanten, durch die Eichung gegebenen Wert eingestellt, wonach jeder Lichtschwächung X nach Angleichung der Leuchtdichten eindeutig eine Temperatur T des Strahlers

zugeordnet ist. Bei der Eichung solcher Pyrometer ist die Funktion $T = g(x)$ zu bestimmen.

2. Relative Messgenauigkeit

Die relative Messgenauigkeit der Teilstrahlungspyrometer, die angibt, mit welchen Fehlern man eine Temperaturmessung relativ zur Skala ausführen kann, ist sehr gross. Messungen mit Toleranzen von nur wenigen Graden sind bis zu den höchsten praktisch in Frage kommenden Temperaturen möglich.

a) Fehler bei der Leuchtdichtenangleichung

Die relative Messgenauigkeit der Teilstrahlungypyrometer ist zu einem Teil durch die Leuchtdichtenangleichung des Glühfadens an den Strahler bedingt.

Der Erkennbarkeit von Leuchtdichtenunterschieden ist eine Grenze gesetzt. Man bezeichnet diese Grenze als Kontrastempfindlichkeit. Sie soll in den folgenden Rechnungen mit p gekennzeichnet und in Prozenten ausgedrückt werden. Ist also in einem gegebenen Fall mit einer Kontrastempfindlichkeit p zu rechnen, so bedeutet dies, dass die zu vergleichenden Leuchtdichten auch dann, wenn sie sich um $p\%$ unterscheiden, dem Auge gleich gross erscheinen. Ist die der Leuchtdichte B entsprechende Temperatur T , so liefert die Stromeinstellung des Glühfadens bzw. die Schwächungseinstellung des Graukeils Messwerte, die im Intervall $T \pm \delta$ liegen, wo δ die Temperatur-Fehleinstellung infolge der Kontrastschwelle p darstellt.

Da die Leuchtdichte der Strahlungsenergie proportional ist, kann man das Verhältnis zwischen der wahren Leuchtdichte des Strahlers und der fehlerhaft eingestellten Leuchtdichte des Glühfadens aus Formel (1) ohne weiteres berechnen:

$$\frac{B(\lambda, T)}{B(\lambda, T \pm \delta)} = e^{\frac{-c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T \pm \delta} \right)}$$

woraus sich ergibt:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T \pm \delta} = \frac{\lambda}{c_2} \ln \left(1 \pm \frac{p}{100} \right) \quad (2)$$

Den Logarithmus auf der rechten Seite der Gleichung kann man, da $\frac{p}{100}$ gegenüber 1 klein ist, entwickeln, und erhält bei Vernachlässigung der höheren Glieder

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T \pm \delta} = \pm \frac{\lambda}{c_2} \cdot \frac{p}{100} \quad (3)$$

Wegen der Kleinheit von $\frac{p}{100}$ ist auch δ gegenüber T sehr klein, so dass man schliesslich für den beim Leuchtdichtenabgleich entstehenden Temperaturfehler die Formel bekommt:

$$\delta = \pm T^2 \frac{\lambda}{c_2} \cdot \frac{p}{100} \quad (4)$$

Je nach der erwünschten Genauigkeit, mit welcher δ bestimmt werden muss, wird man eine der

drei Formeln (2), (3) oder (4) heranziehen. Für die hier angestellten Betrachtungen genügt der Ausdruck (4) vollkommen, da sich die aus ihm errechneten δ -Werte um höchstens 1% von den mit der exakten Formel (2) berechneten Fehlern unterscheiden. Da δ in der Größenordnung von einigen Graden liegt, ist die Berechnung nach Formel (4) auf hundertstel Grade genau, was für diese Zwecke ausreicht.

Der nach Formel (4) berechnete Fehler gilt formal in gleicher Weise für das Stromverfahren und das Graukeilverfahren. Numerisch sind die Fehler bei beiden Verfahren jedoch deshalb verschieden gross, weil die in Formel (4) erscheinende Grösse p eine Funktion der Leuchtdichte und damit der Glühfadentemperatur ist. Beim Stromverfahren ändert sich demnach p mit der jeweiligen Temperatur, während beim Graukeilverfahren zufolge der konstanten Temperatur T_0 des Glühfadens auch p_0 konstant bleibt.

Die Kontrastempfindlichkeit ändert in starkem Masse mit der Leuchtdichte¹⁾. In Fig. 2 sind auf

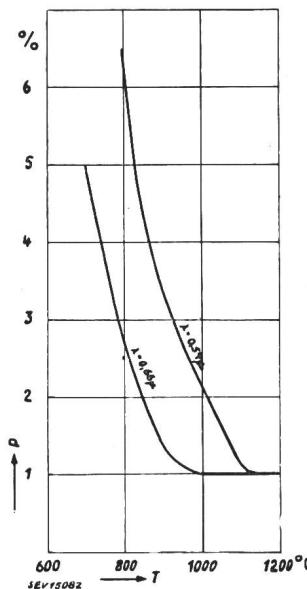


Fig. 2

Kontrastempfindlichkeit in Funktion der Leuchtdichte
p Kontrastempfindlichkeit
(Grenze der Erkennbarkeit von
Leuchtdichteunterschieden),
T Temperatur des Strahlers,
λ Wellenlänge des durch das
Filter ausgesiebten Lichtes

der Abszisse die den Leuchtdichten entsprechenden Temperaturen des schwarzen Strahlers aufgetragen. Die beiden Kurven gelten für rotes ($\lambda = 0,66 \mu\text{m}$) und grünes Licht ($\lambda = 0,54 \mu\text{m}$). Als günstigster Wert der Kontrastempfindlichkeit wurde hier der Wert $p = 1\%$ angenommen, der den Messungen mit technischen Teilstrahlungypyrometern am besten entsprechen dürfte.

Man sieht aus diesen Kurven, dass mit Rotfilter der günstigste Wert von p erst bei etwa 950°C erreicht wird. Bei Grün ist der maximale Wert der Kontrastempfindlichkeit sogar erst bei etwa 1100°C vorhanden.

Die aus Formel (4) mit diesen p -Werten berechneten Temperaturmessfehler δ sind in Fig. 3 für das Stromverfahren und das Graukeilverfahren eingetragen. Betrachtet man zuerst die beim Strom-

¹⁾ Sewig, Rudolf: Helligkeitsmessung. Arch. techn. Messen, V 421—1, Mai 1936.

verfahren auftretenden Temperaturmessfehler, so fällt auf, dass die Messgenauigkeit bei tiefen Temperaturen stark sinkt, im Gegensatz zu bisherigen Veröffentlichungen, in denen die veränderliche Grösse von p vernachlässigt wurde, und daher aus Formel (4) ein Anstieg der Messgenauigkeit bei kleineren Temperaturwerten geschlossen wird. Weiterhin erkennt man, dass die Temperaturmessung

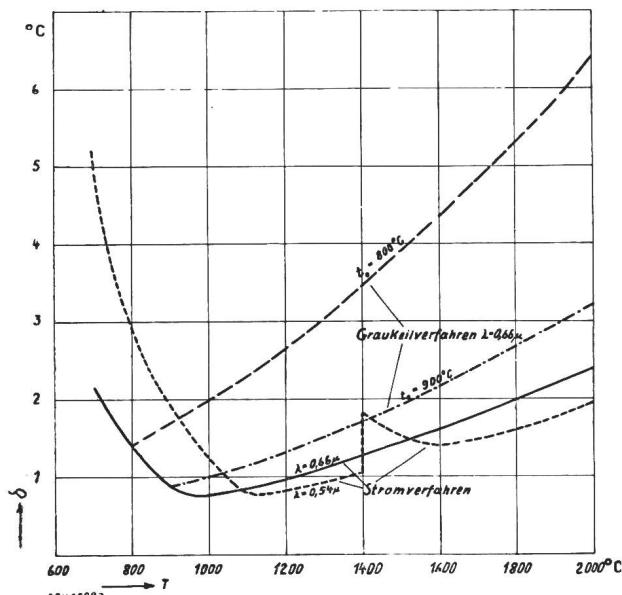


Fig. 3

Fig. 3
Temperaturmessfehler, verursacht durch die Kontrastempfindlichkeit, in Funktion der zu messenden Temperaturen für verschiedene Wellenlängen und verschiedene Messverfahren

δ Temperaturmessfehler, T Temperatur des Messobjektes,
 t_0 Temperatur des Glühfadens der Pyrometerlampe,
λ Wellenlänge des durch den Filter ausgesiebten Lichtes

mit Grünfilter praktisch keine Erfolge bringt. Bei Temperaturen über 1100 °C ist ein um durchschnittlich 0,25 °C kleinerer Fehler vorhanden, wogegen die Messgenauigkeit unter 1100 °C bedeutungsgünstiger wird als bei Rot. Dies ist auch die Begründung dafür, warum man die Teilstrahlungs-pyrometer nur in den seltensten Fällen mit Grün-filter ausstattet.

Durch die Leuchtdichtenabgleichung entstehen beim Graukeilverfahren, wie aus den Kurven Fig. 3 ersichtlich ist, Temperaturmessfehler, die durchwegs grösser sind als beim Stromverfahren.

b) Einstellungsfehler des Messinstrumentes

Die Leuchtdichtenabgleichfehler stellen nur den einen Teil der relativen Messfehler dar. Ein weiterer Fehler entsteht durch die beschränkte Einstellgenauigkeit der Messinstrumente. Man kann annehmen, dass die in Prozenten des Endausschlages angegebene Genauigkeit der Ampèremeter zum grössten Teil durch den Reibungsfehler bedingt ist. Auf keinen Fall ist mit dieser Annahme der Temperaturmessfehler zu gross berechnet, da ausser dem Reibungsfehler ein Parallaxenfehler bei der Ablesung auftritt, der zusammen mit diesem einen sicherlich nicht kleineren Fehler ergibt, als er

durch die Anzeigegenauigkeit des Instrumentes ausgedrückt wird.

Eichwerte einer Pyrometerlampe

Tabelle II

<i>T</i> °C	<i>I</i> mA	<i>I/T</i> mA/°C
800	104,5	0,06
1000	122,5	0,12
1200	153,5	0,19
1400	200	0,25
1400	127,5	0,08
1600	147	0,11
1800	171	0,13
2000	200	0,15

Um die durch die Anzeigegenauigkeit des Messinstrumentes verursachten Temperaturmessfehler berechnen zu können, muss eine Annahme über den Verlauf der Eichkurve der Pyrometerlampe gemacht werden. Die Ergebnisse der Berechnung verlieren aber dadurch nicht den Charakter einer allgemeinen Gültigkeit, da die Eichkurven der verschiedenen Pyrometerlampen in ihrem Verlauf weitgehend übereinstimmen. In Tabelle I sind die Eichdaten einer für Teilstrahlungspyrometer üblichen Pyrometerlampe und in der dritten Spalte die Stromänderung angegeben, die einer Temperaturänderung von 1°C entspricht. Es wurden zwei Messbereiche $700\ldots 1400$ und $1400\ldots 2000^{\circ}\text{C}$ berücksichtigt, die sich als zweckmäßig erwiesen haben und bei den meisten Typen handelsüblicher Teilstrahlungspyrometer angetroffen werden.

In Verbindung mit Tabelle I erhält man die in Tabelle II eingetragenen, durch die Fehler des Instrumentes verursachten Temperaturanzeigefehler.

Temperaturfehler beim Strommessverfahren, verursacht durch die Anzeigefehler des Instruments

Tabelle II

Temperatur T (in °C)	Temperaturfehler (in °C) bei folgenden Anzeigegenauigkeiten des Ampèremeters		
	0,2 %	0,5 %	1 %
800	6,7	16,7	33,4
1000	3,3	8,3	16,6
1200	2,1	5,2	10,5
1400	1,6	4,0	8,0
1400	5,0	12,5	25,0
1600	3,6	9,1	18,2
1800	3,1	7,7	15,4
2000	2,6	6,6	13,3

Aus dieser Tabelle erkennt man den grossen Einfluss der Anzeigegenauigkeit des Instruments. Man wird deshalb beim Bau von Teilstrahlungs-pyrometern bestrebt sein, möglichst hochwertige Geräte zu benützen. Ein Vergleich mit Fig. 3 zeigt auch, dass die Strommessung von wesentlich grösserem Einfluss auf die Messgenauigkeit ist als die Leuchtdichtenabgleichung.

c) Die relative Messgenauigkeit beim Strommessverfahren

Die beiden beschriebenen Fehlereinflüsse ergeben zusammen die relative Messgenauigkeit. Da es sich um die Messergebnisse voneinander unabhängiger Größen handelt (Leuchtdichte, Stromstärke),

deren Fehler ausserdem als klein bezeichnet werden können, ist die Anwendung des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes gestattet. Man erhält demnach den mittleren relativen Temperaturmessfehler aus der Wurzel der Quadratsumme des Leuchtdichten- und Strommessfehlers (Tab. III). Man sieht, dass die mittlere relative Messgenauigkeit der nach dem Strommessverfahren arbeitenden Teilstrahlungspyrometer sehr gross ist.

Mittlere relative Messfehler beim Strommessverfahren
Tabelle III

Temperatur <i>T</i> (in °C)	Mittlere relative Temperaturfehler (in °C) bei folgenden Anzeigegenauigkeiten des Ampèremeters		
	0,2 %	0,5 %	1 %
800	6,9	16,8	33,4
1000	3,4	8,3	16,6
1200	2,3	5,3	10,5
1400	2,1	4,2	8,1
1400	5,2	12,6	25,0
1600	3,9	9,3	18,3
1800	3,7	7,9	15,5
2000	3,5	7,0	13,5

d) Die relative Messgenauigkeit beim Graukeilverfahren

Für das Graukeilverfahren wird man das Ampermeter so eichen, dass die konstante Stromstärke in der Nähe des maximalen Instrumentausschlages liegt, um möglichst kleine Fehler bei der Einstellung der konstanten Glühfaden temperatur zu erreichen.

Die Fehleinstellungen der Glühfadenleuchtdichten verursachen dann bei höheren Messtemperaturen *T* Temperaturmessfehler δ , die in Tab. IV eingetragen sind. Wie man aus diesen Zahlen erkennt, steigen die durch die Stromeinstellung her-

Temperaturfehler beim Graukeilverfahren, verursacht durch die Anzeigefehler des Instrumentes bei der Einstellung auf konstante Glühfaden temperatur

Tabelle IV

Temperatur <i>T</i> (in °C)	Temperaturfehler (in °C) bei Glühfaden temperatur 800 °C und bei folgenden Anzeigegenauigkeiten des Instrumentes			Temperaturfehler (in °C) bei Glühfaden temperatur 900 °C und bei folgenden Anzeigegenauigkeiten des Instrumentes		
	0,2 %	0,5 %	1 %	0,2 %	0,5 %	1 %
800	3,7	9,2	18,4	—	—	—
900	—	—	—	2,6	6,4	12,8
1000	5,2	13,0	26,0	3,1	7,5	13,9
1200	7,0	17,3	34,6	4,2	10,2	20,5
1400	9,0	22,5	45,0	5,2	12,9	25,9
1600	11,2	27,6	55,2	6,6	16,3	32,6
1800	13,8	34,2	68,4	8,2	20,1	40,3
2000	16,7	41,4	82,8	9,8	25,1	48,4

vorgerufenen Temperaturmessfehler mit wachsender Messtemperatur beträchtlich an, im Gegensatz zu den entsprechenden Fehlern beim Stromverfahren, die um so kleiner werden, je höher die Messtemperatur liegt (Tabelle II). Ausserdem erkennt man, dass die Höhe der konstanten Glühfaden temperatur von sehr grossem Einfluss auf die Messgenauigkeit ist. Tabelle V gibt die nach Einsetzen der entsprechenden Einzelfehler aus Fig. 3 und Tabelle IV erhaltenen mittleren relativen Messfehler

des Graukeilverfahrens. Wieder spielt die Anzeigegenauigkeit des Instrumentes eine grosse Rolle.

Mittlere relative Messfehler beim Graukeilverfahren
Tabelle V

Temperatur <i>T</i> (in °C)	Mittlere relative Temperaturfehler (in °C) bei Glühfaden temperatur 800 °C und bei folgenden Anzeigegenauigkeiten des Instrumentes			Mittlere relative Temperaturfehler (in °C) bei Glühfaden temperatur 900 °C und bei folgenden Anzeigegenauigkeiten des Instrumentes		
	0,2 %	0,5 %	1 %	0,2 %	0,5 %	1 %
800	4,0	9,3	18,4	—	—	—
900	—	—	—	2,7	6,5	12,8
1000	5,6	13,2	26,0	3,3	7,6	13,9
1200	7,5	17,5	34,7	4,4	10,3	20,4
1400	9,6	22,8	45,1	5,5	13,0	26,0
1600	12,0	27,9	55,4	7,0	16,4	32,7
1800	14,8	34,6	68,6	8,6	20,3	40,4
2000	17,9	41,9	83,1	10,3	25,3	48,5

Die relative Messgenauigkeit ist besonders bei höheren Temperaturen kleiner als beim Stromverfahren.

Die Einstellung der konstanten Leuchtdichte kann ausser durch eine direkte Strommessung auch mit einer Kreuzfadenlampe erfolgen²⁾. Diese Lampe hat zwei senkrecht zueinander stehende, hintereinander angeordnete Glühdrähte mit verschiedener Strom-Leuchtdichten-Charakteristik, die von derselben regulierbaren Spannungsquelle gespeist werden und nur bei einer ganz bestimmten Spannung an der Kreuzungsstelle gleich hell erscheinen. Statt einer Strommessung wird also bei diesem Verfahren die konstante Leuchtdichte durch die Abgleichung der Leuchtdichten zweier Glühdrähte eingestellt.

Beim Graukeilverfahren mit Kreuzfadenlampe erhält man die Genauigkeit, mit der die konstante Temperatur der Lampe eingestellt werden kann aus der Ueberlegung, dass die Abgleichung der beiden gekreuzten Glühfäden auf gleiche Leuchtdichte nur mit der ihrer Leuchtdichte entsprechenden Kontrastempfindlichkeit möglich ist. Die dadurch bei höheren Messtemperaturen entstehenden Messfehler sind daher dieselben, wie sie bei der Leuchtdichtenabgleichung zwischen Strahler und Pyrometerlampe auftreten und können unmittelbar aus Fig. 3 (Kurven für Graukeilverfahren) entnommen werden. Zur Berechnung des mittleren relativen Messfehlers für dieses Verfahren hat man also die aus Fig. 3

Mittlere relative Messfehler beim Graukeilverfahren mit Kreuzfadenlampe

Tabelle VI

Temperatur <i>T</i> (in °C)	Mittlere relative Temperaturmessfehler (in °C) bei Glühfaden temperatur von	
	800 °C	900 °C
800	2,0	—
900	—	1,2
1000	2,8	1,4
1200	3,8	1,9
1400	4,9	2,4
1600	6,2	3,1
1800	7,5	3,8
2000	9,1	4,5

²⁾ Grüss, H., und G. Haase: Das Kreuzfadenpyrometer, ein neues Teilstrahlungspyrometer. Siemens Z. Bd. 11(1931), Nr. 6, S. 297...301.

entnommenen Temperaturmessfehler einfach mit $\sqrt{2}$ zu multiplizieren, wie es in Tabelle VI gemacht wurde. Die relative Messgenauigkeit der Kreuzfadenpyrometer ist demnach sehr gross und übertrifft das Graukeilverfahren mit Strommessung beträchtlich. Bei 900 °C Glühfadentemperatur ist die relative Messgenauigkeit des Kreuzfadenpyrometers grösser als diejenige beim Strommessverfahren mit Präzisionsinstrumenten von 0,2 % Anzeigegenauigkeit.

e) Vergleich der verschiedenen Messverfahren

In Tabelle VII sind, um einen besseren Überblick über die relative Messgenauigkeit bei verschiedenen Teilstahlungspyrometern zu geben, die Mittelwerte der mittleren relativen Messfehler für die Bereiche 900...1400 °C und 1400...2000 °C zusammengestellt, wobei die Fehlerwerte auf 0,5 ° abgerundet wurden.

Mittlere relative Messfehler der Teilstahlungspyrometer
Tabelle VII

Temperaturbereich (in °C)	Strommessverfahren bei Instrumentengenauigkeit			Graukeilverfahren m. Strommessung bei Glühfadentemperatur 800 °C und Instrumentengenauigkeit			Graukeilverfahren mit Kreuzfadenlampe bei Glühfadentemperatur 900 °C und Instrumentengenauigkeit		
	0,2 %	0,5 %	1 %	0,2 %	0,5 %	1 %	0,2 %	0,5 %	1 %
900...1400	3	7	12	7	16,5	33	4	10	19
1400...2000	4	9	18	13,5	32	63	8	18,5	37

Nach Tabelle VII ist das Graukeilverfahren mit Kreuzfadenlampe, sofern man sich auf die Messung von Temperaturen über 900 °C beschränkt, in bezug auf die relativen Messfehler das genaueste technische Teilstahlungsverfahren. Nach ihm kommt das Stromverfahren mit Präzisionsinstrument von 0,2 % Anzeigegenauigkeit.

f) Farbdifferenzfehler beim Graukeilverfahren

Bei den Graukeilverfahren ist in den vorangegangenen Berechnungen ein Fehlereinfluss vernachlässigt worden, der sich rechnerisch schwer erfassen lässt. Dieser entsteht dadurch, dass infolge des nicht unendlich schmalen Durchlässigkeitsbereiches der verwendeten Farbfilter bei Messung hoher Temperaturen (wegen der in diesem Fall sehr verschiedenen Farbtemperaturen) Farbdifferenzen zwischen Glühfaden und dem Bild des Strahlers auftreten, die sich bei der Messung durch nicht vollkommenes Verschwinden des Glühfadens bemerkbar machen. Mit steigender Temperatur wird daher der in den Formeln auftretende Faktor p grösser als in Fig. 2 angegeben. Sofern die Grösse des relativen Messfehlers im überwiegenden Masse durch die Genauigkeit der Strommessung bedingt ist, wird die Vernachlässigung des Farbdifferenzfehlers keinen merklichen Einfluss auf die Grösse des Fehlerwertes haben.

3. Eichgenauigkeit

a) Eichung beim Strommessverfahren

Man geht bei der serienmässigen Herstellung dieser Pyrometer gewöhnlich so vor, dass die Pyro-

meterlampen an einem Normalstrahler geeicht werden, worauf die Skalen der zugehörigen Ampèremeter an Hand der Eichdaten beschriftet und Pyrometerlampen und Ampèremeter in die Pyrometergehäuse eingebaut werden. Als Normalstrahler verwendet man meistens Wolframbandlampen. Solche Normalstrahler werden mit Eichkurven geliefert, die den Zusammenhang zwischen der Stromstärke und der schwarzen Temperatur abzulesen gestatten. Die Genauigkeit dieser Eichkurven ist beträchtlich, sie kann mit $\pm 2^\circ$ bis 1400 °C und mit $\pm 4^\circ$ zwischen 1400 und 2000 °C angesetzt werden. In einem späteren Abschnitt werden diese Genauigkeiten näher begründet.

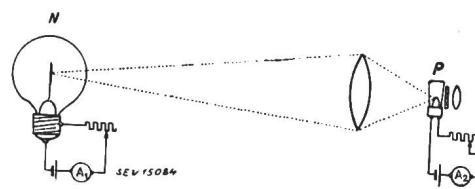


Fig. 4

Anordnung für die Eichung von Pyrometerlampen
P Pyrometerlampe, N Normalstrahler, A₁, A₂ Ampèremeter

Die Eichung der Pyrometerlampe P (Fig. 4) am Normalstrahler N erfordert als erstes die Einstellung der Temperatur, was mit einem Präzisionsinstrument der Klasse 0,2 % an Hand der Eichkurve geschieht. Die durch die Strommessung bedingten Fehler der Temperatureinstellung der Normallampe stimmen mit den in Tabelle II angegebenen Messfehlern des 0,2 %-Instrumentes überein, wenn man annimmt, dass die Temperatur-Stromfunktion der Normallampe mit der zur Berechnung der Tabelle II vorausgesetzten Funktion dem Verlauf nach übereinstimmt. Diese Messfehler lassen sich aber noch durch Unterteilung des Messbereiches des Ampèremeters A₁ verringern. So ist, wie aus Tabelle VIII hervorgeht, schon bei einer Unterteilung der Temperaturbereiche 700...1400 und 1300...2000 °C in je zwei Strommessbereiche eine bedeutend günstigere Temperatureinstellgenauigkeit zu erreichen.

Einstellfehler der Normallampe mit 0,2 %-Ampèremeter und bei Unterteilung des Messbereiches

Tabelle VIII

Temperatur (in °C)	Temperaturfehler (in °C)	Temperatur (in °C)	Temperaturfehler (in °C)
800	4,3	1400	3,8
1000	2,2	1600	2,7
1200	2,1	1800	3,1
1400	1,6	2000	2,6

Nach dieser Temperatureinstellung wird die Leuchtdichte der zu eichenden Pyrometerlampe der Leuchtdichte des Normalstrahlers angeglichen. Die hierbei entstehenden Fehler sind aus Fig. 3 zu entnehmen.

Nach erfolgter Leuchtdichtenabgleichung wird der Glühfadenstrom am Präzisionsinstrument A₂ (Fig. 4) abgelesen. Setzt man auch für diese Strommessung ein für jeden der beiden Temperaturbe-

reiche in zwei Messbereiche unterteiltes Ampèremeter voraus, so treten Fehler auf, die wieder durch Tabelle VIII gegeben sind.

Mittlere Pyrometerlampen-Eichfehler und mittlere Eichgenauigkeit des Strommessverfahrens

Tabelle IX

Temperatur (in °C)	Eichfehler (in °C)	Temperatur (in °C)	Eichfehler (in °C)
800	6,6	1400	5,9
1000	3,8	1600	5,8
1200	3,7	1800	6,3
1400	3,3	2000	5,9

Insgesamt ergibt sich der Eichfehler aus der Summe der angeführten Einzelfehler, nämlich der Fehler des Leuchtdichtenvergleiches, der Fehler der Stromeinstellungen und der Eichfehler der Normallampe. Der auftretende mittlere Eichfehler ist aus Tabelle IX zu entnehmen. Man sieht daraus, dass solche Pyrometer mit beträchtlicher Genauigkeit serienmäßig geeicht werden können. Aus diesen Zahlen wird jetzt die früher angeführte Behauptung verständlich, dass Normallampen bis 1400 °C mit $\pm 2^\circ$ und von 1400...2000 °C mit $\pm 4^\circ$ Genauigkeit geeicht werden können, wenn man bedenkt, dass bei solchen Eichungen jeder einzelne Temperaturwert mehrmals gemessen wird, also selbst schon einen Mittelwert darstellt, und dass ferner die sich ergebende Eichkurve noch ausgeglichen wird.

b) Eichung beim Graukeilverfahren

Zur serienmässigen Eichung der nach dem Graukeilverfahren mit Strommessung arbeitenden Teilstrahlungspyrometer geht man gewöhnlich so vor, dass zunächst die Eichwerte für die Pyrometerlampen festgelegt werden. Die Eichgenauigkeit der Pyrometerlampen ist in diesem Fall aber grösser als Tabelle IX angibt, da man den Messbereich des Instrumentes jeweils so legen wird, dass der Zeigerausschlag in die Nähe des Endausschlages kommt. Durch mehrmalige Ausführung der Messung und Mittelwerthbildung gelingt es auch bei serienmässiger Eichung, die Eichwerte der Pyrometerlampe bei 800 °C mit $\pm 4^\circ$ und bei 900 °C mit $\pm 3^\circ$ festzulegen. Durch diese Pyrometerlampen-Eichfehler entstehen bei höheren Strahlertemperaturen Messfehler, die in Tabelle X verzeichnet sind.

Zum Eichfehler der Pyrometerlampe kommt noch derjenige des Graukeils hinzu. Für die Eichung des

Messfehler, verursacht durch den Eichfehler der Pyrometerlampe

Tabelle X

Temperatur (in °C)	Messfehler (in °C) bei Glühfadentemperaturen von 800 °C	Messfehler (in °C) bei Glühfadentemperaturen von 900 °C
800	4,0	—
900	—	3,0
1000	5,6	3,6
1200	7,6	4,9
1400	9,7	6,0
1600	12,1	7,6
1800	14,9	9,5
2000	18,0	11,4

Graukeiles stellt man vorerst die konstante Temperatur der Pyrometerlampe P (Fig. 4) so ein, dass man die Temperatur des Normalstrahlers mit Hilfe des Ampèremeters A_1 auf den erforderlichen Wert bringt und den Glühfaden der Pyrometerlampe durch Leuchtdichtenvergleich auf diese Leuchtdichte einreguliert. Der Gesamtfehler der Pyrometerlampeneinstellung setzt sich daher zusammen aus der Einstellgenauigkeit der Normallampe (Tabelle VIII), aus der Eichgenauigkeit der Normallampe und dem Fehler beim Leuchtdichtenabgleich (Fig. 3), woraus man einen mittleren Fehler von $\pm 4,9^\circ$ bei 800 °C und $\pm 3,7^\circ$ bei 900 °C erhält. Bei höheren Messtemperaturen ergeben sich dann die in der Tabelle XI eingetragenen Fehler.

Messfehler, verursacht durch die Einstellung der Pyrometerlampen bei der Graukeileichung

Tabelle XI

Temperatur (in °C)	Messfehler (in °C) bei Glühfadentemperaturen von 800 °C	Messfehler (in °C) bei Glühfadentemperaturen von 900 °C
800	4,9	—
900	—	3,7
1000	6,9	4,4
1200	9,3	6,0
1400	11,9	7,4
1600	14,8	9,4
1800	18,3	11,6
2000	22,1	13,9

Der Graukeil wird geeicht, indem man ihn zwischen die Pyrometerlampe und den Normalstrahler setzt und bei jeder mit dem Normalstrahler verifizierten Temperatur die Leuchtdichte des Strahlers auf jene des Glühfadens durch Verändern der Graukeildurchlässigkeit herabmindert. Es treten dabei folgende Einzelfehler auf: Stromeinstellfehler der Normallampe, Eichfehler der Normallampe und Fehler des Leuchtdichtenabgleiches. Diese Fehler ergeben zusammen mit dem Pyrometerlampen-Einstellfehler (Tabelle XI) den Graukeil-Eichfehler. Dieser mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnete mittlere Graukeil-Eichfehler ist der Tabelle XII zu entnehmen.

Mittlerer Fehler der Graukeileichung

Tabelle XII

Temperatur (in °C)	Mittlerer Fehler (in °C) bei Glühfadentemperaturen von 800 °C	Mittlerer Fehler (in °C) bei Glühfadentemperaturen von 900 °C
800	7,0	—
900	—	5,2
1000	7,6	5,4
1200	9,8	6,7
1400	12,2	7,9
1600	15,7	10,7
1800	19,1	12,8
2000	22,7	14,9

Den Eichfehler der nach dem Graukeilverfahren arbeitenden Teilstrahlungspyrometer, erhält man durch Summierung der durch die Eichfehler der Pyrometerlampe und des Graukeiles verursachten Temperaturfehler (Tabelle XIII).

Die bei der Eichung von Kreuzfadenpyrometern auftretenden Fehler sind dieselben, da die Eichung in vollkommen gleicher Weise vorgenommen wird.

Eichfehler beim Graukeilverfahren
Tabelle XIII

Temperatur (in °C)	Eichfehler (in °C) bei Glühfadenperaturen von	
	800 °C	900 °C
800	8,1	—
900	—	6,0
1000	9,4	6,5
1200	12,4	8,3
1400	15,6	10,0
1600	19,8	13,2
1800	24,2	16,0
2000	29,0	18,8

Die Eichgenauigkeit des Graukeilverfahrens kann dadurch verbessert werden, dass jeweils die Pyrometerlampe, der Graukeil und das Instrument zusammen geeicht werden. Wenn man für diesen Fall den Eichvorgang verfolgt, so bleiben alle früher berechneten Einzelfehler gleich bis auf die Eichfehler der Pyrometerlampe (Tabelle X), die hier wegfallen. Der Eichfehler stimmt dann mit demjenigen des Graukeiles (Tabelle XII) überein. Die Eichgenauigkeit des Graukeilverfahrens bleibt aber selbst bei dieser, die serienmässige Herstellung erschwerenden Eichung, kleiner als diejenige des Stromverfahrens.

Mittlere Eichfehler der Teilstrahlungspyrometer
Tabelle XIV

Temperaturbereich (in °C)	Mittlere Eichfehler (in °C) für		
	Strommess- verfahren	Graukeilverfahren bei Glühfadenperaturen	
	800 °C	900 °C	
900...1400	4	12	8
1400...2000	6	22	14,5

Tabelle XIV erlaubt einen Vergleich zwischen der mittleren Eichgenauigkeit beim Strommessverfahren und derjenigen beim Graukeilverfahren. Die Eichfehler sind wieder auf 0,5 °C abgerundet.

4. Absolute Messgenauigkeit

Die absolute Messgenauigkeit der Teilstrahlungspyrometer erhält man durch Summierung der relativen Messfehler und der Eichfehler.

In Tabelle XV sind die mittleren absoluten Messfehler für das *Strommessverfahren* angegeben. Man erkennt, dass beim Strommessverfahren die Genauigkeit der Messungen innerhalb der Teilebereiche mit steigender Temperatur zunimmt. Die absolute Genauigkeit, mit der eine Temperaturmessung ausgeführt werden kann, ist sehr gross.

Mittlere absolute Messfehler beim Strommessverfahren
Tabelle XV

Temperatur (in °C)	Mittlere absolute Messfehler (in °C) bei einer Instrumentengenauigkeit von		
	0,2 %	0,5 %	1 %
800	9,6	18,0	34,1
1000	5,1	9,2	17,0
1200	4,4	6,5	11,2
1400	3,9	5,4	8,8
1400	7,9	13,9	25,7
1600	7,0	11,0	19,2
1800	7,3	10,1	16,7
2000	6,9	9,2	14,7

Die mittleren absoluten Fehler des *Graukeilverfahrens* sind aus der Tabelle XVI ersichtlich.

Mittlere absolute Fehler beim Graukeilverfahren
Tabelle XVI

Temperatur (in °C)	Mittlere absolute Messfehler (in °C) bei Glühfaden-temperaturen von						
	800 °C			900 °C			
	mit Kreuz- faden- lampe	mit Ampèremeter vom Genauigkeitsgrad	mit Kreuz- faden- lampe	mit Ampèremeter vom Genauigkeitsgrad	0,2 %	0,5 %	1 %
800	8,4	9,0	12,3	20,1	—	—	—
900	—	—	—	—	6,1	6,6	8,9
1000	9,8	10,9	16,2	27,7	6,7	7,3	10,0
1200	13,0	14,5	21,4	36,8	8,5	9,4	13,2
1400	16,4	18,3	27,6	47,7	10,3	11,4	16,4
1600	20,7	23,2	34,2	58,8	13,6	14,9	21,1
1800	25,3	28,4	42,2	72,7	16,4	18,2	25,9
2000	30,4	34,1	51,0	86,0	19,3	21,4	31,5

In Tabelle XVII ist die Genauigkeit des Kreuzfadenpyrometers (nach Abrundung auf 0,5 °C) im Vergleich mit der mittleren absoluten Genauigkeit beim Strommessverfahren dargestellt. Das Kreuzfadenpyrometer hat demnach bei 900 ° Glühfaden-temperatur eine mittlere absolute Messgenauigkeit, die dem Strommessverfahren mit einem 0,5 %-Instrument entspricht, was in Anbetracht des geringeren Aufwandes bei diesen Instrumenten sehr beachtlich ist.

Mittlere absolute Messfehler der Teilstrahlungspyrometer
Tabelle XVII

Temperatur- bereich (in °C)	Mittlere absolute Messfehler beim			
	Strommessverfahren mit Ampèremeter vom Genauigkeitsgrad	Kreuzfadenverfahren bei Glühfadentemperaturen		
	0,2 %	0,5 %	1 %	
900...1400	5	8	14	12,5
1400...2000	7,5	11	19	23
				8
				15

Es erscheinen also nach wie vor die Teilstrahlungypyrometer, die nach dem Strommessverfahren arbeiten und die Kreuzfadenpyrometer als günstigste Temperaturmessverfahren, in bezug auf die Messgenauigkeit als auch hinsichtlich des technischen Aufwandes.

Interessant ist es, in diesem Zusammenhang einen Vergleich mit der mittleren absoluten Messgenauigkeit der technischen *thermoelektrischen Pyrometer* anzustellen. Die Genauigkeit dieser Pyrometer ist gegeben durch die zulässige Abweichung der thermoelektrischen Kraft von der genormten Eichreihe und andererseits durch die Genauigkeit des verwendeten Instrumentes. Unter Benutzung der Normen nach DIN 43 710/1943 erhält man für die am meisten verwendeten Nickel-Nickelchrom-

Mittlere absolute Messfehler thermoelektrischer Pyrometer
Tabelle XVIII

Thermoelement	Temperatur- messbereich (in °C)	Fehler (in °C) mit Instrumenten vom Genauigkeitsgrad		
		0,2 %	0,5 %	1 %
Nickel-Nickelchrom	900...1200	13,5	14,5	17,5
Platin-Platinrhodium	900...1400	5	7	12

und Platin-Platinrhodiumthermoelemente die mittleren absoluten Fehler der Tabelle XVIII.

Ein Vergleich mit der mittleren absoluten Messgenauigkeit der Teilstrahlungspyrometer (Tabelle XVII) zeigt, dass das Strommessverfahren praktisch dieselbe Genauigkeit aufweist, wie die Platin-Platinrhodiumthermoelemente, während die Genauigkeit der Nickel-Nickelchromthermoelemente wesentlich geringer ist. Wenn man noch berücksichtigt, dass bei den thermoelektrischen Pyrometern zusätzliche Fehler durch die Schwankungen der Kaltlötstellentemperatur auftreten, die selbst bei

Kompensationsanordnungen noch eine gewisse Grösse haben, so kann man sagen, dass mit serienmäßig hergestellten technischen Teilstrahlungspyrometern genauere Temperaturmessungen möglich sind als mit thermoelektrischen Pyrometern, sofern Instrumente mit gleichem Genauigkeitsgrad verwendet werden.

Adresse des Autors:

Dr. phil. Adolf Jagersberger, Stadtplatz 20/22, Steyr (Oberösterreich).

Accumulation de l'Hongrin avec usine hydroélectrique à Veytaux

Par Ch. Paschoud, Lausanne

621.311.21 (494.451.4)

La Compagnie Vaudoise des Forces Motrices des Lacs de Joux et de l'Orbe s'est substituée, en 1946, à la Compagnie d'Entreprises et de Travaux Publics S. A. à Lausanne, qui avait présenté à l'Etat de Vaud, en septembre 1944, une demande de concession pour la mise en valeur des forces motrices de l'Hongrin.

L'aménagement projeté, représenté schématiquement à la fig. 1, prévoit l'accumulation des eaux des cours supérieurs de l'Hongrin, de la Torneresse et de l'Eau Froide dans un bassin situé à l'amont du «Tabouset» et leur utilisation, côté Léman, dans une centrale à créer près de Veytaux.

Les eaux étant détournées de leur bassin naturel, la réalisation de ce projet s'est heurtée à des difficultés provenant de problèmes juridiques à régler avec le canton de Fribourg; mais l'on peut espérer que ces problèmes seront prochainement résolus dans l'intérêt commun des deux cantons intéressés.

Caractéristiques techniques principales

Les cours d'eau utilisés sont le Grand et le Petit Hongrin jusqu'à leur confluent, la Torneresse et l'Eau Froide, respectivement jusque vers les cotes 1274 et 1268; les bassins versants correspondants atteignent 68 km².

Sur la base des débits de la Sarine observés à Broc par le Service fédéral des eaux pendant la période 1923...1942 et des débits enregistrés au Tabouset dès 1945, et compte tenu de pertes diverses, les quantités d'eau utilisables ressortent en moyenne à environ 55 000 000 m³ pour les 6 mois d'été, et 27 000 000 m³ pour les 6 mois d'hiver soit au total annuel de 82 000 000 m³.

Le bassin d'accumulation projeté a une capacité utile de 38 000 000 m³ environ pour un plan d'eau maximum à la cote 1245 et une tranche utile de 65 mètres; il en résulte que, en moyenne, 65 000 000 m³ pourront être utilisés pendant les 6 mois d'hiver et 17 000 000 m³ pendant les 6 mois d'été.



Fig. 1
Plan général du projet Hongrin-Veytaux