Andreas Richter*, Christian Rembe, Tobias Gehling, Kai Treutler und Volker Wesling

Echtzeittemperaturmessung bei additivem Lichtbogenschweißen

Real-time temperature measurement at wire arc additive welding

DOI 10.1515/teme-2019-0057

Zusammenfassung: Bei additivem Lichtbogenschweißen (Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM) hängt die Qualität des Materialauftrags von Prozessparametern wie der Schmelzbadtemperatur ab. Für eine Echtzeit-Prozessmessung muss die Temperatur des flüssigen Metalls durch den Lichtbogen gemessen werden. In diesem Beitrag stellen wir eine Methode vor, mit der die Temperatur berührungslos mit hoher räumlicher Auflösung gemessen werden kann. Dazu wird die Strahlung des Plasmas mittels schmalbandiger Filter unterdrückt und die Temperatur mit einem Pyrometer gemessen. Die Ausgabe erfolgt innerhalb einer für die Prozessregelung geforderten Latenz von 100 ms.

Schlüsselwörter: WAAM, Pyrometer, Lichtbogenschweißen, Temperaturmessung, In-line-Temperaturmessung.

Abstract: The quality of the material deposition produced by WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) depends on process parameters such as the melting bath temperature. For real-time process measurement, the temperature through the arc must be measured. In this paper, we present a method for non-contact temperature measurement with high spatial resolution. Narrow-band filters suppress the radiation of the plasma and the temperature is measured with a pyrometer. The output takes place within a latency of 100 ms required for process control.

Keywords: WAAM, pyrometer, arc welding, temperature measurement, In-line temperature measurement.

1 Einleitung

Für die Regelung eines Schweißprozesses müssen Prozessgrößen im laufenden Betrieb erfasst werden. Das in dieser Anwendung betrachtete additive Lichtbogenschweißen bildet die Grundlage für ein Forschungsverbundprojekt an der TU Clausthal. Bei klassischen Schweißverfahren, wie dem Zusammenfügen zweier Platten, ändert sich der Wärmefluss über einen großen Bereich nicht. Bei additiven Verfahren ändert sich die Geometrie um das Schmelzbad während der Fertigstellung und somit die Umgebungseigenschaften wie die Wärmeableitung. Beispielsweise führt eine schnellere Ableitung der Wärme durch das Werkstück zu einer schnelleren Abkühlung und somit zu einer Verkleinerung des Schmelzbads. Um ein Messsystem verschleißfest zu gestalten, ist eine berührungslose Messung für einen Temperaturbereich von 1000 K bis 3000 K notwendig [6, 10].

Um das Schmelzbad mit Kameras ortsaufgelöst zu erfassen, reicht es beim Laserschweißen aus, die Kameras mit dem Laserpuls zu synchronisieren [6]. Die Strahlung des Plasmas bei dem hier verwendeten Sprühlichtbogen wird hingegen dauerhaft emittiert und überstrahlt die thermische Strahlung des Schmelzbades im sichtbaren Spektrum, sodass der Ansatz aus dem Laserschweißen nicht auf das Lichtbogenschweißen übertragen werden kann.

Die Temperaturmessung unter einem Plasma mittels einfacher Pyrometer, die nur einen Wellenlängenbereich erfassen, wurde schon demonstriert [3]. Dabei besteht bei diesem Messverfahren eine grundlegende Abhängigkeit vom Emissionsgrad, da sich dieser mit dem Materialzustand ändert. Zudem wird die zu messende thermische Strahlung bei zu breiten oder falsch gewählten Wellenlängenbereichen vom Plasma überstrahlt.

Coniglio et al. haben gezeigt [5], dass die Temperatur des Schmelzbades eines Lichtbogenschweißprozesses auch durch die Ermittlung der Polarisationsseigenschaften der Strahlung bei einer Wellenlänge bestimmt werden kann. Der Messaufbau ist komplexer, da drei Stokeskomponenten

*Korrespondenzautor: Andreas Richter, Lehrstuhl für Messtechnik, IEI - TU Clausthal, Leibnizstraße 28, 38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: richter@iei.tu-clausthal.de

Christian Rembe, Lehrstuhl für Messtechnik, IEI - TU Clausthal, Leibnizstraße 28, 38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: rembe@iei.tu-clausthal.de

Tobias Gehling, Kai Treutler, Volker Wesling, Lehrstuhl für Schweißtechnik, ISAF - TU Clausthal, Agricolastraße 2, 38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: office@isaf.tu-clausthal.de

orts aufgelöst gemessen werden müssen. Im Gegensatz zur klassischen Pyrometrie weist dieses System keine Abhängigkeit vom Emissionsgrad der Oberfläche auf. Es müssen aber einige Annahmen durch das System erfüllt werden.

Da wir ein möglichst empfindliches Messsystem für die Prozessregelung benötigen, messen wir mit Stützstellen eines Quotientenpyrometers um den Bereich des Wendepunkts des Planck'schen Strahlungsgesetzes. So verändern kleine Temperaturänderungen das Messsignal am stärksten. Bei einem schwarzen Strahler mit 2000 K liegt der Wendepunkt der spektralen Verteilung der Wärmestrahlung ungefähr bei 8500 nm. Da die Wellenlängen in diesem System weit auseinander liegen, wird dieser Effekt noch unterstützt [8].

Im nahen Infrarotbereich ist die Strahlung des Plasmas geringer und daher konnten Tanaka et al. mit einem Quotientenpyrometer bei den Wellenlängen 950 nm und 980 nm die Temperatur des Schmelzbades bestimmen [11]. Dafür werden Kameras benötigt, die in diesem Wellenlängenbereich empfindlich sind [8]. Somit kann die Lage der betrachteten Stützstellen bei der Lösung von Tanaka et al. nicht optimal gewählt werden.

Daher führen wir in diesem Beitrag eine Lösung ein, bei der mit Hilfe zweier schmalbandiger optischer Filter nur Licht in zwei Wellenlängenbereichen gemessen wird, in denen das Plasma sehr wenig Leistung emittiert und die Strahlung bei Wellenlängen im Bereich des Wendepunkts der spektralen Verteilung der Wärmestrahlung, für 2000 K, detektiert werden kann. Diese leistungsarmen Wellenlängen des Plasmas konnten wir mit einer spektrometrischen Untersuchung messen. Das durch die Filter transmittierte Licht wird bei uns mit einem Quotientenpyrometer gemessen. Über die Wien'sche Näherung wird die Temperatur bestimmt. Die Temperaturmesswerte stehen in einer Matrix als einzelne Temperaturwerte für jede Pixelposition der Kameras zur Verfügung. Die gemessene zeit- und raum aufgelöste Temperaturverteilung kann neben der Prozessregelung auch genutzt werden, um über FEM-Modelle auf das Abkühl- und Erstarrungsverhalten des Werkstücks zu schließen [7].

2 Messsystem

2.1 Grundlagen des Messsystems

Die Grundlage für das Messsystem bildet ein Quotientenpyrometer. Die spezielle Modifikation liegt in der auf das Plasma des Lichtbogens angepassten Beschränkung der Kameras auf zwei definierte Wellenlängenbereiche, hier bei

680 nm und 860 nm. Diese Beschränkung erfolgt mittels zweier optischer schmalbandiger Bandpässe. Ein Quotientenpyrometer bietet im Vergleich zu einem einfachen Pyrometer mit nur einer Kamera den Vorteil, dass eine temperaturbedingte Änderung des Emissionsgrades keine Auswirkung auf die Messung hat. Dies gilt solange, wie das Verhältnis beider Emissionsgrade bei den Wellenlängen der Bandpässe gleich bleibt [12].

Das Schmelzbad wird in dieser Anwendung als grauer Strahler angenommen. Diese Annahme wird getroffen, da die Schmelze durch die eigene Oberflächenspannung eine weitgehend glatte Oberfläche bildet. Die Variation des Emissionsgrads wird vernachlässigt, da das Verhältnis des Emissionsgrads bei den hier verwendeten Wellenlängen λ_1 und λ_2 bei reinem Eisen und den gewählten Temperaturen nahezu gleich bleibt. Diese Annahme wird auf das Lichtbogenschweißen übertragen [13].

Ein Quotientenpyrometer vergleicht Strahldichten bei mehreren Wellenlängen, um auf die Temperatur zu schließen. Dabei kann bei dem hier verwendeten Temperaturbereich von 1000 K bis 3000 K die Wien'schen Näherung, statt des Planck'schen Strahlungsgesetzes, genutzt werden. Die Strahlungsdichte L_λ nach der Wien'schen Näherung, in Abhängigkeit der Wellenlänge λ und der Temperatur T , wird in Gleichung 1 dargestellt [12],

$$L(\lambda) = \frac{c_1}{\pi \Omega_0} \cdot \frac{1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda} T}, \quad (1)$$

wobei $\Omega_0 = 1$ sr, $c_1 = 2\pi h c^2$ und $c_2 = hc/k$ sind. Die Konstanten c_1 und c_2 sind durch Lichtgeschwindigkeit c , Boltzmann-Konstante k und Planck'sches Wirkungsquantum h definiert. Wenn zwei Strahldichten aus Gleichung 1 bei unterschiedlichen Wellenlängen ins Verhältnis gesetzt werden, kann die Temperatur

$$T_{L(\lambda_1), L(\lambda_2)} = \frac{\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) c_2}{\ln \left(\frac{L(\lambda_1)}{L(\lambda_2)} \right) + 5 \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \quad (2)$$

aus den Strahldichten berechnet werden [12].

Der Zusammenhang aus Gleichung 2 wird auf die eigentliche Eingangsgröße umgeformt. Die verwendeten monochromen Kameras (acA1920-155um von Basler) geben pro Pixel jeweils einen Grauwert (G_{λ_1} , G_{λ_2}) aus. Das Verhältnis der beiden Strahldichten kann mit den Grauwerten der Kameras und den Quanteneffizienzen (η_{λ_1} , η_{λ_2}) in den Zusammenhang

$$\frac{L(\lambda_1)}{L(\lambda_2)} = \frac{G_{\lambda_1} \eta_{\lambda_2} \lambda_2}{G_{\lambda_2} \eta_{\lambda_1} \lambda_1} \quad (3)$$

gebracht werden [14]. Diese Vereinfachung kann getroffen werden, da zwei baugleiche Kameras mit gleicher Konfiguration und interner Verstärkung verwendet werden. Außerdem stellt die Verwendung einer achromatischer Optik gleiche Abbildungspfade sicher.

Die Kombination von Gleichung 2 und Gleichung 3 ergibt nun

$$T_{G_{\lambda_1}, G_{\lambda_2}} = \frac{\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) c_2}{\ln\left(\frac{G_{\lambda_1} \eta_{\lambda_2} \lambda_2}{G_{\lambda_2} \eta_{\lambda_1} \lambda_1}\right) + 5 \ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)} \quad (4)$$

als den zur Messung der Temperatur genutzten Zusammenhang. Mit den gewählten schmalbandigen Bandpässen, bei $\lambda_1 = 860 \text{ nm}$ und $\lambda_2 = 680 \text{ nm}$, sowie der aus den Datenblatt der Kameras [2] entnommenen Quanteneffizienzen der Kameras, $\eta_{\lambda_1} = 0,25$ und $\eta_{\lambda_2} = 0,75$, kann mit Gleichung 4 die Temperatur aus den Grauwerten berechnet werden.

2.2 Auswahl der Filter

Eine spektroskopische Untersuchung der Plasmastrahlung stellt die Datengrundlage für die Auswahl der optischen Filter dar. Dazu wurden Messungen mit einem Spektrometer (AVS-DESKTOP-USB2 von Avantes) aufgenommen. Das Spektrum der Plasmastrahlung (Abb. 1) lässt darauf schließen, dass bei der vorliegenden Kombination von Grundwerkstoff (S960QL), Schutzgas (20 % CO₂, 80 % Ar) und Kupferschweißdraht das Spektrum des Plasmas durch Bandpässe ausgeblendet werden kann. Dies stützt sich auf die Annahme, dass bei gleichbleibender Stoffkonzentration das Spektrum des Plasmas ebenfalls gleich bleibt.

Die Bandpässe, die aufgrund der Messdaten des Spektrums (Abb. 1) gewählt wurden, liegen mit den Halbwertsbreiten von 10 nm je bei 680 nm und 860 nm. Damit werden Lücken im Plasmaspektrum für das Quotientenpyrometer genutzt. Andere Wellenlängen werden unterdrückt und somit wird eine weitgehende Ausblendung des Plasmas erreicht.

2.3 Unsicherheitsanalyse

Die Unsicherheitsanalyse erfolgt nach dem GUM [4].

Die gemessene Temperatur lässt sich durch das Modell in Gleichung 4 darstellen. Der Zusammenhang kann in Abhängigkeit der mit Unsicherheiten behafteten Größen

$$T_{G_{\lambda_1}, G_{\lambda_2}} = f(G_{\lambda_1}, G_{\lambda_2}, \eta_{\lambda_1}, \eta_{\lambda_2}, \lambda_1, \lambda_2) \quad (5)$$

Abb. 1: Teilspektrum von 600 nm bis 900 nm des Lichtbogenplasmas, wobei die gewählten Bandpässe eingezeichnet sind.

dargestellt werden, wobei die Grauwerte der Kameras ($G_{\lambda_1}, G_{\lambda_2}$) die Eingangsgrößen und die Quanteneffizienzen ($\eta_{\lambda_1}, \eta_{\lambda_2}$) sowie die Wellenlängen der Bandpässe (λ_1, λ_2) die dem System eingeprägten Größen darstellen.

2.3.1 Unsicherheit der Wellenlängen

Die Schwerpunktwellenlängen der Bandpässe λ_i sind mit Unsicherheiten behaftet. Da die Strahldichte über die Filterbandbreite wellenlängenabhängig ist, müssen die Schwerpunktwellenlängen statt der nominellen Filterwellenlängen verwendet werden [8, 9].

Die Schwerpunktwellenlängen werden mit

$$\lambda_i(T) = \frac{\int \lambda L(\lambda, T) \tau_i(\lambda) d\lambda}{\int L(\lambda, T) \tau_i(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

berechnet, wobei λ die Wellenlänge, $L(\lambda, T)$ die temperaturabhängige Strahldichte der Wärmestrahlung und $\tau_i(\lambda)$ die gemessene Transmission des Bandpasses ist. Die hier ermittelten Schwerpunktwellenlängen

$$\lambda_1 = 860,89 \text{ nm} \quad (7)$$

$$u_{\lambda_1} = \frac{0,19 \text{ nm}}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

$$\lambda_2 = 680,57 \text{ nm} \quad (9)$$

$$u_{\lambda_2} = \frac{0,12 \text{ nm}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

werden als gleichverteilt über den Temperaturbereich angenommen.

2.3.2 Unsicherheit der Quanteneffizienz

Die Quanteneffizienz kann laut Datenblatt [2] über die Bandbreite der Filter als konstant angesehen werden. Diese Quanteneffizienzen werden aus dem Datenblatt [2] der Kamera entnommen und unterliegen einer Unsicherheit, da die Werte nicht als Zahlenwerte angegeben sind, sondern aus einem Graphen abgelesen werden müssen. Diese Unsicherheit wird als gleichverteilt angenommen, mit einer maximalen Abweichung von 0,03. Somit ergeben sich

$$u_{\eta_{\lambda_1}} = \frac{0,03}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

$$u_{\eta_{\lambda_2}} = \frac{0,03}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

für diese Unsicherheiten. Dieser Unsicherheitsbeitrag leistet den größten Teil der hier betrachteten Unsicherheit.

2.3.3 Unsicherheit durch diskrete Grauwerte

Die Grauwerte der Kameras können als diskrete Werte der Strahlungsintensität dargestellt werden. Durch diese Diskretisierung ergibt sich ein weiterer Unsicherheitsbeitrag. Dieser ist bei dem hier verwendeten Verstärkungsfaktor von 1 und einem Gammaexponenten von 1 direkt aus einem Graphen zur Standardverteilung der Grauwerte aus dem Datenblatt [2] zu entnehmen. Der Graph kann in einen mathematischen Zusammenhang

$$u_{G_{\lambda_i}} = 0,5 + \left(G_{\lambda_i} \frac{5}{1000} \right) \quad (13)$$

zwischen Unsicherheit des Grauwertes $u_{G_{\lambda_i}}$ und dem Grauwert G_{λ_i} überführt werden. Die Verteilung dieser Unsicherheit ist nach Datenblatt normalverteilt.

2.3.4 Gesamtunsicherheit

Die einzelnen Größen des Modells werden hier als unkorreliert angenommen und die Unsicherheiten können daher mit

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\sigma_{T_{G_{\lambda_1}, G_{\lambda_2}}}}{\sigma_{x_i}} u_{x_i} \right)^2 \quad (14)$$

berechnet werden. Die Variable x_i stellt hier die einzelnen Eingangsgrößen ($G_{\lambda_1}, G_{\lambda_2}, \eta_{\lambda_1}, \eta_{\lambda_2}, \lambda_1, \lambda_2$) von $T_{G_{\lambda_1}, G_{\lambda_2}}$ aus Gleichung 5 dar. Bei dieser Kombination beträgt die Standardabweichung für die Temperatur maximal 9,3 %.

Eine weitere Unsicherheit kann durch eine unpräzise Ausrichtung der Kameras auftreten. Bei einem solchen Fall

Abb. 2: Berechnete Temperaturverteilung im Schweißprozess.

würden die Vergleiche zwischen G_{λ_1} und G_{λ_2} mit nicht zueinander zugehörigen Pixeln durchgeführt werden. Diese Unsicherheit wurde durch sorgfältiges Justieren verringert und wird hier vernachlässigt.

2.4 Ergebnisse

Das hier vorgestellte System hat in diesem Temperaturbereich eine ausreichende Empfindlichkeit. Die Look-Up-Tabellen werden mithilfe der in diesem Beitrag gezeigten mathematischen Zusammenhängen definiert. Um Einflüsse durch Dunkelrauschen und Sättigungseffekte der Kameras zu vermeiden, wird ein Gültigkeitsbereich für die möglichen Grauwerte definiert. Bei den hier verwendeten 8-Bit-Kameras wird der Grauwertbereich zwischen 5 und 250 als gültig betrachtet. Zudem müssen sich die Temperaturwerte in den Temperaturgrenzen von 1000 K bis 3000 K befinden. Die gültigen Werte werden in einer Look-Up-Tabelle eingetragen, um eine Echtzeitauswertung mit geringer Latenz für den In-line-Betrieb zu ermöglichen.

Auf Basis dieser Bilddaten der Kameras und der Look-Up-Tabelle wird die Temperatur ermittelt. Diese werden dann als Matrizen für die Temperatur (Abb. 2) ausgegeben.

Eine Ausgabe der Wärmeverteilung ist mit dem verwendeten Messaufbau mit einer Latenz von 16,7 ms möglich. Damit wurde die geforderte Latenzzeit von 100 ms deutlich unterschritten. Die gemessenen Temperaturen entsprechen weitgehend den erwarteten Temperaturen aus Literaturangaben [1, 6].

Reflexionen sind in dieser Messung links in der Abbildungen 2 zu sehen. An dieser Stelle sitzt die Düse des Schweißgerätes. Die dort gemessene Temperatur ist wahrscheinlich durch eine Reflexion der thermischen Strahlung

des Schmelzbades entstanden. Zum Teil entstehen Reflexionen der Wärmestrahlung des Schmelzbades am umgebenen Metall des Grundwerkstoffes. Durch diese Effekte erscheinen kühlere Flächen außerhalb des Schmelzbades als heiß.

Der in der Mitte der Abbildung 2 erkennbare schwarze Ring ist ein bei der Phasenumwandlung von flüssig zu fest entstandener Fremdkeim [1]. Der Bereich des Fremdkeims wird schwarz dargestellt, da sich die Grauwerte an dieser Stelle außerhalb des Gültigkeitsbereichs befinden. Die sich in der Nähe dieses schwarzen Ringes befindende Temperaturerhöhung ist ebenfalls auf solche Fremdkeime zurückzuführen.

3 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Möglichkeit der Messung der Wärmeverteilung des Schmelzbades während des Lichtbogenschweißens demonstriert. Das Ausblenden des Lichtbogens mittels auf das Plasma angepasster Bandpässe hat sich als erfolgreich erwiesen. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine andere Materialkombination eine geänderte Bandpasskombination erfordert. Die Bandpässe wurden so gewählt, dass trotz der Einschränkungen durch das Plasma des Lichtbogens die Empfindlichkeit des Systems gegeben ist.

Alternativ zu dem hier angewandten analytischen Ansatz für die Bestimmung der Unsicherheit können Vergleichsmessungen mithilfe von Temperaturnormalen genutzt werden. Die Nutzung von Normalen würde auch die Unsicherheit von Systemgrößen reduzieren. Dies ist von Vorteil, da somit die Gesamtunsicherheit verringert wird.

Besondere Aufmerksamkeit muss der Justage des Systems gewidmet werden. Falls die Justage der beiden Kameras nicht korrekt durchgeführt wird, überlagern sich die beiden Kameras nicht genau. Kleine Abweichungen können zwar durch die Software korrigiert werden, dies benötigt allerdings aufwandsbedingt Rechenzeit. Somit würde die Latenz ungewollt erhöht werden.

Reflexionen an Objekten, die an gleichbleibenden Stellen im Bild während des Prozesses auftreten, können mit einer einfachen Maske verdeckt werden. Dies trifft beispielsweise auf die Umhüllung der Drahtelektrode zu.

Literatur

- [1] *Die Metallurgie des Schweißens*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2004. ISBN 3-540-20649-3. 10.1007/3-540-35051-9.
- [2] Basler. *acA1920-155um Camera Specification*, 3. Auflage, 2019. BD000852.
- [3] P. Bertrand, I. Smurov und D. Grevey. Application of near infrared pyrometry for continuous Nd:YAG laser welding of stainless steel. *Applied Surface Science*, 168:182–185, 12 2000. 10.1016/S0169-4332(00)00586-9.
- [4] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP und OIML. *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 2008.
- [5] N. Coniglio, A. Mathieu, O. Aubreton und C. Stolz. Weld pool surface temperature measurement from polarization state of thermal emission. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 13(1):83–93, 2016. 10.13140/2.1.2549.3121.
- [6] U. Dilthey. *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: Schweiß- und Schneidtechnologien*. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 3. bearbeitete Auflage, 2006. ISBN 9783540216735. 10.1007/3-540-33154-9. URL <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-33154-9>.
- [7] M. R. Nezamdost, M. R. N. Esfahani, S. H. Hashemi und S. A. Mirbozorgi. Investigation of temperature and residual stresses field of submerged arc welding by finite element method and experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1):615–624, 2016. ISSN 0268-3768. 10.1007/s00170-016-8509-4. URL <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8509-4>.
- [8] W. Rapp. *Quotientenpyrometer für Temperaturen ab 500° C*. Number KfK 3371 in KfK. Kernforschungszentrum, Karlsruhe, als ms. vervielfältigt Auflage.
- [9] J. Rupprechter. Entwicklung und Kalibration eines Submikrosekunden-Pyrometers. Diplomarbeit, Technischen Universität Graz, 12 2000.
- [10] V. Schuler und J. Twrdek. *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 6. vollständig überarbeitete Auflage, 2019. ISBN 9783658242657. 10.1007/978-3-658-24266-4. URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-24266-4>.
- [11] M. Tanaka, K. Waki, S. Tashiro, K. Nakata, E. Yamaoto, K. Yamazaki und K. Suzuki. Visualizations of 2D Temperature Distribution of Molten Metal in Arc Welding Process. *Trans. JWRI*, 38, 2009.
- [12] VDI/VDE Richtlinie 3511 Blatt 4. Technische Temperaturmessung: Strahlungsthermometrie, 2011.
- [13] H. Watanabe, M. Susa, H. Fukuyama und K. Nagata. Phase (Liquid/Solid) Dependence of the Normal Spectral Emissivity for Iron, Cobalt, and Nickel at Melting Points. *International Journal of Thermophysics*, 24(2):473–488, 2003. ISSN 0195928X. 10.1023/A:1022924105951. URL <https://doi.org/10.1023/A:1022924105951>.
- [14] Z. Xie und H. Bai. Development of three-wavelength CCD image pyrometer used for the temperature field measurements of continuous casting billets. *The Review of scientific instruments*, 85(2):024903, 2014. 10.1063/1.4866679.