Marek Sebastian Simon

On the Mechanism of Evaporation-Determined Arc-Cathode Coupling in GMA Welding

Aachener Berichte Fügetechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen

Band 1/2021 Shaker Verlag

“On the Mechanism of Evaporation-Determined Arc-Cathode Coupling in GMA Welding”

„Über den Wirkzusammenhang der Verdampfungsbestimmten Kopplung von Lichtbogen und Kathode beim MSG-Schweißen“

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Marek Sebastian Simon

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen
Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Dirk Uhrlandt

Tag der mündlichen Prüfung: 22.04.2021

Marek Sebastian Simon

On the Mechanism of Evaporation-Determined Arc-Cathode Coupling in GMA Welding

Aachener Berichte Fügetechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen

Band 1/2021 Shaker Verlag

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2021)

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8030-8
ISSN 0943-9358

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen mit finanzieller Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB1120 „Präzision aus Schmelze“.

Zunächst möchte ich Gott danken, da ich durch die Kirche die Werte der Hingabe und der Ordnung gelernt habe, ohne die ich diese Arbeit nicht bewältigen hätte können.

Als nächstes gilt mein besonderer Dank dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen, für seine Bereitschaft, mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben zu haben, für die Betreuung meiner Arbeit, für das Vertrauen, das er in mich gesetzt hat und für die Ermutigung, die ich durch ihn erfahren habe. Herrn Prof. Dr.rer.nat. Dirk Uhrlandt danke ich für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit, die Übernahme des Koreferates sowie seine ermutigende Beurteilung meiner Arbeit. Außerdem möchte ich auch Herrn Prof. Marek Behr (Ph.D.) für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission danken.

Als nächstes danke ich meinem Gruppenleiter Dr.-Ing. Oleg Mokrov sowie meinen beiden Oberingenieuren Dr.-Ing. Alexander Schiebahn und Herrn Rahul Sharma für ihr Vertrauen, sowie für ihre umsichtige Leitung meiner Arbeit und die vielen unschätzbar wertvollen Diskussionen, von denen ich maßgeblich profitiert habe.

Mein außerordentlicher Dank gilt Prof. Mikhail Benilov von der Universität von Madeira, für seinen Willen mich zu unterstützen und für seine Einladung zu einem Forschungsaufenthalt an die Universidade da Madeira.

Außerdem möchte ich mich bedanken bei meinen Kollegen vom SFB 1120 für die fruchtbare Arbeit in den Arbeitskreisen, sowie bei meinen Kollegen am ISF, insbesondere Dr.-Ing. Oleksii Lisnyi, Herrn Andre Schmidt, Herrn Philipp Lozano, Herrn Sobhan Emadmostoufi, Frau Gertrud Baumann sowie Dr.-Ing. Lars Stein, für ihre tatkräftige Unterstützung und Hilfsbereitschaft.

Zu guter Letzt gilt mein Dank meinen Freunden und meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, Beata und Stefan Simon, sowie meiner Freundin Nazira Ibrahim für die Unterstützung und Liebe, die ich immer von ihnen erfahren habe.

Aachen im April 2021

Acknowledgements

This thesis was written during my work as scientific assistant at the Welding and Joining Institute at RWTH Aachen University with financial support of the German Research Foundation within the framework of the SFB1120 "Precision melt engineering".

First of all, I would like to thank God, because through the church I have learned the values of devotion and order, without which I would not have been able to accomplish this work.

My special thanks go to the head of the institute, Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen, for his willingness to give me the opportunity to obtain a doctorate, and supervising of my work, for the trust he placed in me and his encouragement. I would like to thank Prof. Dr.rer.nat. Dirk Uhrlandt for the careful review of my work, for acting as assessor and for his encouraging evaluation. I would also like to thank Prof. Marek Behr (Ph.D.) for assuming the chairmanship of the doctoral committee.

Next, I would like to thank my group leader Dr.-Ing. Oleg Mokrov as well as my two head engineers Dr.-Ing. Alexander Schiebahn and Mr. Rahul Sharma for their trust, as well as for their prudent guidance of my work and many invaluable discussions from which I benefited significantly.

My sincere thanks go to Prof. Mikhail Benilov of the Universidade da Madeira for his willingness to support me in my research and his invitation to a research stay at the University of Madeira.

I would also like to thank my colleagues from SFB 1120 for the fruitful work in the working groups, as well as my colleagues at ISF, especially Dr.-Ing. Oleksii Lisnyi, Mr. Andre Schmidt, Mr. Philipp Lozano, Mr. Sobhan Emadmostoufi, Ms. Gertrud Baumann and Dr.-Ing. Lars Stein, for their active support and helpfulness.

Last but not least I would like to thank my friends and my family, especially my parents, Beata and Stefan Simon, as well as my girlfriend Nazira Ibrahim for the continuous support and overflowing love I have always received from them.

Aachen, April 2021

Excerpts from this work have already appeared in:

MOKROV, O., O. LYSNYI, M. SIMON, U. REISGEN, G. LASCHET, and M. APEL, 2017. Numerical investigation of droplet impact on the welding pool in gas metal arc welding [online]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, **48**(12), 1206-1212. Available from: doi:10.1002/mawe.201700147

MOKROV, O., M. SIMON, R. SHARMA, and U. REISGEN, 2019. Arc-cathode attachment in GMA welding [online]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **52**(36), 364003. Available from: doi:10.1088/1361-6463/ab2bd9

MOKROV, O., M. SIMON, A. SCHIEBAHN und U. REISGEN, 2020. Concept for the calculation of the distribution of heat input in the cathode area by GMA welding [online]. *Welding in the World*, **34**(3), R103. Available from: doi:10.1007/s40194-020-00929-9

MOKROV, O., M. SIMON, R. SHARMA und U. REISGEN, 2020. Effects of evaporation-determined model of arc-cathode coupling on weld pool formation in GMAW process simulation [online]. *Welding in the World*, **64**(5), 847-856. Available from: doi:10.1007/s40194-020-00878-3

MOKROV, O., M. SIMON, P. LOZANO, D. ARNTZ-SCHROEDER, R. SHARMA und U. REISGEN, 2020. Simulation des Lichtbogenansatzes beim MSG-Schweißen. *DVS-Berichte, Band 365 : DVS Congress. Große Schweißtechnische Tagung. DVS CAMPUS. Vorträge der Online-Veranstaltungen vom 14. bis 18. September 2020.* pp. 700 - 706

I Content

II List of figures

Abbildungsverzeichnis

III List of tables

Tabellenverzeichnis

IV List of abbreviations

Abkürzungsverzeichnis

1D	one dimensional *eindimensional*
2D	two dimensional *zweidimensional*
3D	three dimensional *dreidimensional*
AC-TIG	alternate current tungsten inertgas welding *Wechselstrom Wolfram-Inertgas-Schweißen*
Ansys CFX	commercial computational fluid dynamics software *kommerzielle Fluiddynamik Software*
Ar	argon *Argon*
Ar+++	triple ionized argon *dreifach ionisiertes Argon*
CFD	computational fluid dynamics *rechnergestütze Strömungsdynamik*
CMT	“cold metal transfer” - mode of welding operation *“cold metal transfer” – eine Schweißtechnik*
CO_2	carbon dioxide *Kohlenstoffdioxid*
Cr	chromium *Chrom*
Cu	copper *Kupfer*

ECTON	explosive centre electron emission mechanism *Elektronenemissionsmechanismus, der von Mikroexplosionen ausgeht*
EDACC	Evaporation Determined Arc-Cathode Coupling *Verdampfungsbestimmte Kopplung von Lichtbogen und Kathode*
Eq.	Equation *Gleichung*
ESAB	welding equipment manufacturer *Schweißzusatzwerkstoffhersteller*
EWM	welding equipment manufacturer *Schweißgerätehersteller*
Fe	iron *Eisen*
G3Si1	a welding wire quality *eine Schweißdrahtgüte*
GMAW/GMA	gas metal arc welding *Metallschutzgas Schweißen*
He	helium *Helium*
HTC	heat transfer coefficient *Wärmeübergangskoeffizient*
LTE	local thermodynamic equilibrium *lokales thermodynamisches Gleichgewicht*
MHD	magneto-hydrodynamic *Magnetohydrodynamik*
MSG	*Metall-Schutzgas* (=GMAW)

ND	neutral density filters *Neutraldichtefilter*
NEC	net emission coefficient *Nettoemissionskoeffizient*
O2	molecular oxygen *molekularer Sauerstoff*
OpenFOAM	an open source CFD software package *ein quelloffenes Softwarepaket für Strömungsdynamik*
PhD	academic degree of Doctor of Philosophy *akademischer Doktorgrad*
pLTE	partial thermodynamic equilibrium *teilweises thermodynamisches Gleichgewicht*
Ti	titanium *Titan*
TIG	tungsten inert gas *Wolfram Inertgas Schweißen*
UV	ultra violet *ultraviolett*
V	Volt *Volt*
W	tungsten *Wolfram*
WTWD	work piece to wire distance *Abstand zwischen Elektrodenspitze und Werkstück*
Zr	zirconium *Zirkonium*

V List of symbols

Formelzeichen

$\vec{A}$	$\left[\frac{N}{A}\right]$	Magnetic vector potential from [MOK17]
ΔA	$[eV]$	Lowering of the work function
A	$[eV]$	Work function ($4.5[eV]$ for iron)
A_{eff}	$[eV]$	Effective work function (work function with Schottky correction)
$\vec{B}$	$\left[\frac{N \cdot s}{C \cdot m}\right]$	Magnetic field vector from [MOK17]
β_A	$[K^{-1}]$	Thermal expansivity coefficient from [MOK17]
c_{ion}	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Ion speed of sound
d	$[m]$	Thickness of the welded plate in the CFD simulations
d	$[m]$	Ionization length in [BEN15]
d_{wire}	$[m]$	Diameter of the wire
e	$[C]$	Elementary charge
ε_0	$\left[\frac{A \cdot s}{V \cdot m}\right]$	Vacuum permittivity
E_f	$\left[\frac{V}{m}\right]$	Electric field at the cathode surface
E_{ion}	$[eV]$	Ionization energy
E_{ion}	$[eV]$	First ionization energy
$\vec{g}$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Gravitational acceleration from [MOK17]
γ	$[-]$	Ratio of specific heats
Γ_{vap}	$[\frac{1}{m^2 s}]$	Rate of vaporization as used in [COU97]

h	$[J \cdot s]$	Planck constant
h	$[J]$	Enthalpy from [MOK17]
H	$[\frac{J}{mol}]$	Heat of vaporization
H_{vap}	$\left[\frac{J}{mol}\right]$	Condensation enthalpy
I	$[A]$	Total current
j	$[\frac{A}{m^2}]$	Current density
$\vec{j}$	$[\frac{A}{m^2}]$	Current density vector in [MOK17]
$j_{diffuse}$	$\left[\frac{A}{m^2}\right]$	Estimated current density for diffuse arc attachment
j_e	$[\frac{A}{m^2}]$	Current density due to back-diffused electrons in [BEN95]
j_{em}	$[\frac{A}{m^2}]$	Current density of field-enhanced thermionic or thermo-field emission
j_{em}	$[\frac{A}{m^2}]$	Current density due to field-enhanced thermionically emitted Electrons in [BEN95]
j_{em}	$[\frac{A}{m^2}]$	Current density due to thermo-field emission in [COU97]
$j_i^{(d)}$	$[\frac{A}{m^2}]$	Ion current density in diffusion approach in [BEN15]
$j_i^{(f)}$	$[\frac{A}{m^2}]$	Ion current density in multi-fluid approach in [BEN15]
j_i	$[\frac{A}{m^2}]$	Current density due to ion flux in [BEN95]
j_{ion}	$[\frac{A}{m^2}]$	Current density due to ions in [COU97]

j_{ion}	$\left[\frac{A}{m^2}\right]$	Current density due to ions
j_{spot}	$[\frac{A}{m^2}]$	Current density in the cathode spot
$j_{tot}(p_{max})$	$[\frac{A}{m^2}]$	Total current density at maximal vaporization pressure in [COU97]
j_{total}	$[\frac{A}{m^2}]$	Total current density
J_{em}	$[\frac{1}{m^2}]$	Particle flux of thermionically emitted electrons in [BEN95]
J_i	$[\frac{1}{m^2}]$	Ion particle flux in [BEN95]
J_{vap}	$[\frac{1}{m^2 s}]$	Flux of evaporated atoms in [BEN93]
J_{vap}	$\left[\frac{kg}{m^2 s}\right]$	Evaporated mass flux
k_B	$\left[\frac{J}{K}\right]$	Boltzmann constant
$k_{ionization}$	$\left[\frac{m^6}{s}\right]$	Ionization rate as used in [BEN95]
$k_{recombination}$	$\left[\frac{m^6}{s}\right]$	Recombination rate as used in [BEN95]
l_{Debye}	$[m]$	Debye length
l_{ion}	$[m]$	Length scale of ionization collisions
l_{therm}	$[m]$	Length scale of electron energy relaxation
λ	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	Thermal conductivity from [MOK17]
λ_D	$[m]$	Debye-length in [BEN15]
λ_{ia}	$[m]$	Mean free path for collisions between ions an neutrals in [BEN15]
λ_u	$[m]$	Length of electron energy relaxation

λ_{vap}	$[m]$	Length of thermal influence of the metal vapor
μ_0	$\left[\frac{kg \cdot m}{s^2 \cdot A^2}\right]$	Magnetic vacuum permeability, also in [MOK17]
M_{Fe}	$\left[\frac{kg}{mol}\right]$	Molar mass of iron
$\dot{m}$	$\left[\frac{kg}{s}\right]$	Mass rate
m_{Fe}	$[kg]$	Atomic mass of iron
m_e	$[kg]$	Electron mass
m_{ion}	$[kg]$	Ion mass
n_0	$[\frac{1}{m^3}]$	Metal vapor particle density in the plasma bulk
n_{Ar}	$[\frac{1}{m^3}]$	Argon particle density
n_{Fe}	$[\frac{1}{m^3}]$	Iron vapor particle density
n_e	$[\frac{1}{m^3}]$	Electron particle density
n_i	$[\frac{1}{m^3}]$	Particle density of ions in [BEN15]
n_{ion}	$\left[\frac{1}{m^3}\right]$	Ion particle density
n_{ions}	$[\frac{1}{m^3}]$	Ion particle density
$n_{plasma,bulk}$	$\left[\frac{1}{m^3}\right]$	Particle density in the plasma bulk
n_{vap}	$\left[\frac{1}{m^3}\right]$	Density due to the saturated vapor pressure
N_A	$\left[\frac{1}{mol}\right]$	Avogadro constant

N_L	$[\frac{1}{m^3}]$	Loschmidt number
ν	$[Pa\ s]$	Viscosity
ω	$[-]$	Ionization degree in [BEN95]
p	$[Pa]$	Pressure, also in [MOK17]
p_{amb}	$[Pa]$	Ambient pressure
p_{atm}	$[Pa]$	Atmospheric pressure
p_{vap}	$[Pa]$	Saturated vapor pressure
P	$[W]$	Heat power
φ	$[V]$	Potential in [BEN15]
q	$[\frac{W}{m^2}]$	Heat flux
q_{cond}	$[\frac{W}{m^2}]$	Heat flux carried into the cathode
$q_{diffuse}$	$[\frac{W}{m^2}]$	Estimated heat flux for diffuse arc attachment
q_{em}	$[\frac{W}{m^2}]$	Heat flux due to electron emission
q_{evap}	$[\frac{W}{m^2}]$	Heat flux due to evaporation
q_{ion}	$[\frac{W}{m^2}]$	Heat flux due to ions
q_{max}	$[\frac{W}{m^2}]$	Maximum heat flux
q_{rad}	$[\frac{W}{m^2}]$	Heat flux due to radiation
q_{total}	$[\frac{W}{m^2}]$	Net heat flux
r_*	$[m]$	Radius of the cathode spot in [BEN95]
r_{HS}	$[mm]$	Radius of the heat source
r_{ch}	$[-]$	Ratio of cooling/heating in [BEN95]

$r_{droplet}$	$[m]$	Radius of the droplet
r_{ei}	$[-]$	Ratio of the energies delivered by the plasma electrons and by the ions in [BEN95]
R	$\left[\frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot mol \cdot K}\right]$	Ideal gas constant
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Mass density from [MOK17]
ρ_{iron}	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Mass density of iron
ρ_k	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Mass density at the edge of the Knudsen layer
ρ_{wire}	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Mass density of the wire
$\overrightarrow{S_{droplet,u}}$	$\left[\frac{kg}{m^2 s^2}\right]$	Momentum source by droplets from [MOK17]
$S_{droplet,h}$	$[W]$	Enthalpy source by droplets from [MOK17]
σ	$\left[\frac{S}{m}\right]$	Electrical conductivity from [MOK17]
T	$[K]$	Temperature from [MOK17]
T_h	$[K]$	Heavy particle temperature
T_{amb}	$[K]$	Ambient temperature
$T_{boiling,copper}$	$[K]$	Boiling temperature of copper
$T_{boiling,iron}$	$[K]$	Boiling temperature of iron
$T_{droplet}$	$[K]$	Temperature of the droplet
T_e	$[K]$	Electron temperature
T_{e*}	$[K]$	Characteristic electron temperature in the near-cathode layer in [BEN95]
T_i	$[K]$	Ion temperature
T_{ion}	$[K]$	Ion temperature in [COU97]

T_k	$[K]$	Temperature at the edge of the Knudsen layer
T_{max}	$[K]$	Maximum temperature
T_{min}	$[K]$	Minimum temperature
$T_{plasma,bulk}$	$[K]$	Temperature of the plasma bulk
$T_{plasma,local}$	$[K]$	Local plasma temperature of the near-cathode plasma
T_{plasma}	$[K]$	Plasma temperature
T_{ref}, p_{ref}	$[K], [Pa]$	Temperature and pressure in reference state for CFD simulation
$T_{s,max}(q > 0)$	$[K]$	The maximum cathode surface temperature where the heat flux is still positive
T_s	$[K]$	Cathode surface temperature
$T_s(q_{max})$	$[K]$	The cathode surface temperature where the heat flux is at maximum
T_{vap}	$[K]$	Temperature of the vapor
$T_{w,max}(q > 0)$	$[K]$	The maximum cathode surface temperature where the heat flux is still positive
T_w	$[K]$	Cathode surface temperature as used in [BEN95] and [BEN15] and [ALM13]
$T_w(q_{max})$	$[K]$	The cathode surface temperature where the heat flux is at maximum
t	$[s]$	Time from [MOK17]
$t_{8/5}$	$[s]$	Measure for cooling time from 800°C to 500°C, as used in welding to determine formation of microstructure
v_{Bohm}	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Bohm velocity
v_e	$[\frac{m}{s}]$	Electron velocity

v_{ion}	$[\frac{m}{s}]$	Ion velocity
v_{weld}	$[\frac{m}{min}]$	Welding velocity
v_{wire}	$[\frac{m}{min}]$	Wire feed velocity
x, y, z	$[m], [m], [m]$	Coordinates in the simulation domain
x_0	$[m]$	X-coordinate of center of the arc
y_0	$[m]$	Y-coordinate of center of the arc
$\vec{u}$	$[\frac{m}{s}]$	Flow velocity from [MOK17]
u_k	$[\frac{m}{s}]$	Bulk flow velocity at the edge of the Knudsen layer
U	$[V]$	Cathode layer voltage drop in [BEN95]
U_D	$[V]$	Cathode voltage drop
U_a	$[V]$	Anode voltage drop
V_c	$[V]$	Cathode voltage drop in [COU97]
Z_{Fe}	$[-]$	Partition function of iron atoms
Z_{Fe+}	$[-]$	Partition function of singly ionized iron ions
Z	$[-]$	Charge number of ions

VI Abstract

In gas metal arc welding (GMAW) process simulation, it is desired to predict the energy transferred to the process as well as the weld pool geometry. For this reason, the coupling of the arc to the welded material is of high interest, both at the cathode and anode. Although there exists a substantial body of work on the coupling of the arc to the cathode, the present models cannot be applied in the conditions of GMAW welding, as they give unphysical results. In particular, the current models usually result in very high cathode surface temperatures, i.e. above boiling temperature of the metals. After relevant experiments are presented and discussed, it is concluded that the current state of the art does not reflect the observations and that therefore a new approach needs to be developed. Furthermore, a dialectic argument is developed, namely that the coupling of the arc to the cathode in diffuse attachment of GMAW must be strongly determined by evaporation. The argument concludes that the current transfer is mainly carried by metal ions that are evaporated from the cathode surface and ionized in the near cathode plasma, and that this current transfer must be limited to below boiling temperature. The core hypothesis is that this limit results from a decrease of the ionization degree, due to cooling of the near cathode plasma by the cold metal vapor. Based on this argument, a mathematical model for the Evaporation-Determined Arc-Cathode Coupling (EDACC), is introduced in detail. The properties of the model are then analyzed by applying it to a simplified computational fluid dynamics (CFD) weld pool simulation and it shows that the model is in line with the observed cathode surface temperatures below boiling. Finally, also an outlook is given on possible applications of this new understanding of the arc-cathode coupling, as well as a discussion of open questions and current limitations of the model.

Kurzfassung

Bei der Prozesssimulation des Metall-Schutzgasschweißens ist es das Ziel, die auf den Prozess übertragene Energie sowie die Schweißbadgeometrie vorherzusagen. Aus diesem Grund ist die Kopplung des Lichtbogens an den geschweißten Werkstoff sowohl an der Kathode als auch an der Anode von herausragendem Interesse. Obwohl es einen umfangreichen Bestand an Arbeiten zur Kopplung des Lichtbogens an die Kathode gibt, können die vorliegenden Modelle unter den Bedingungen des MSG-Schweißens nicht angewendet werden, da sie unphysikalische Ergebnisse liefern. Insbesondere führen die aktuellen Modelle in der Regel zu sehr hohen Kathodenoberflächentemperaturen, d.h. oberhalb der Siedetemperatur der Metalle. Nachdem einschlägige Experimente vorgestellt und diskutiert wurden wird deutlich, dass der derzeitige Stand der Technik mit den Beobachtungen nicht in Einklang zu bringen ist und daher ein neuer Ansatz entwickelt werden muss. Weiterhin wird ein dialektisches Argument entwickelt, nämlich, dass die Kopplung des Lichtbogens an die Kathode unter den Bedingungen von diffuser Anbindung beim Metallschutzgasschweißen, als stark verdampfungsabhängig aufgefasst werden muss. Das Ergebnis dieser Argumentation ist die Schlussfolgerung, dass die Stromübertragung hauptsächlich von Metallionen getragen wird, die von der Kathodenoberfläche verdampft und im kathodennahen Plasma ionisiert werden, und dass diese Stromübertragung unterhalb des Siedepunkts begrenzt sein muss. Als Kernhypothese wird dann vorgeschlagen, dass diese Begrenzung durch eine Abnahme des Ionisationsgrades infolge der Abkühlung des kathodennahen Plasmas durch den kalten Metalldampf erfolgt. Auf dieser Argumentation aufbauend wird ein mathematisches Modell für die verdampfungsbestimmte Kopplung von Lichtbogen und Kathode (EDACC) eingehend vorgestellt. Die Eigenschaften des Modells werden dann in der Anwendung auf eine vereinfachte CFD-Schweißbadsimulation analysiert, und es zeigt sich, dass das Modell die beobachteten Kathodenoberflächentemperaturen unterhalb des Siedepunkts reproduziert. Schließlich werden noch ein Ausblick auf mögliche Anwendungen dieses neu gewonnenen Verständnisses über die Lichtbogen-Kathoden-Kopplung gegeben, sowie offene Fragen und gegenwärtige Begrenzungen des Modells diskutiert.

"Truth is much too complicated to allow anything but approximations"

- John von Neumann, 1947