André Hälsig

Energetische Bilanzierung von Lichtbogenschweißverfahren

Wissenschaftliche Schriftenreihe
CHEMNITZER FÜGETECHNIK
Band 2

Prof. Dr. Peter Mayr (Hrsg.)

André Hälsig

Energetische Bilanzierung von Lichtbogenschweißverfahren



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Universitätsverlag Chemnitz
2014

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2014

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek
Universitätsverlag Chemnitz
09107 Chemnitz
http://www.bibliothek.tu-chemnitz.de/UniVerlag/

Herstellung und Auslieferung
Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG
Am Hawerkamp 31
48155 Münster
http://www.mv-verlag.de

ISSN 2198-6797 (Druck)
ISSN 2198-6789 (online)
ISBN 978-3-944640-10-5

http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-140249

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

Energetische Bilanzierung von Lichtbogenschweißverfahren

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

Genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. André Hälsig

geboren am 27. Mai 1983 in Frankenberg (Sachsen),
Deutschland

eingereicht am 30.Oktober 2013

Gutachter: Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. P. Mayr
Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Maik Berger

Bibliografische Beschreibung

Hälsig, André

Thema

Energetische Bilanzierung von Lichtbogenschweißverfahren

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Füge- und Montagetechnik, Chemnitz, 17. April 2014

150 Seiten
85 Abbildungen
30 Tabellen
107 Literaturquellen

Referat

In der vorliegenden Arbeit wurde die Energiebilanz von der Schweißenergiequelle bis zur Schmelzebildung im Bauteil eingehend analysiert. Hierfür wurden geeignete Messsysteme auf Basis der Kalorimetrie entwickelt und validiert. Neben dem Energieverbrauch der Anlage wird der Wärmeeintrag in das Bauteil kalorimetrisch analysiert. Zur umfassenden Analyse des Energieflusses werden zudem die Verlustgrößen, wie die Wärmeleitung, Wärmestrahlung und der Wärmedurchgang des Lichtbogens als auch der externe Brennerkühlkreislauf der Schweißenergiequelle untersucht. Neueste Untersuchungsmethoden ermöglichen zudem die Tropfentemperatur und die Lichtbogenleistung zu bestimmen. In Abhängigkeit definiert gewählter Prozessparameter wurde der Energiefluss für Schutzgasschweißverfahren mit abschmelzender und nicht abschmelzender Elektrode, sowie für das Unterpulverschweißen erstellt. Die einzelnen Wirkmechanismen der Prozesse wurden analysiert und bewertet sowie Zusammenhänge herausgestellt. Neben der Empfehlung für die Überarbeitung gültiger Normen, wie DIN EN 1011-1 kann mit der Kenntnis das Fügen temperatursensibler Werkstoffe verbessert werden. Gleichzeitig wird die Genauigkeit von Prozess- und Werkstoffsimulationen erhöht und Berechnung von Bauteildeformationen vereinfacht. Es wurden mittlere Tropfentemperaturen in einem Bereich zwischen T_{Tr} = 2.350…2.700°C ermittelt. Die Untersuchungen zeigen zudem, dass eine ausschließlich gezielte Änderung der Tropfentemperatur im Schweißprozess nicht möglich ist. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass der Lichtbogen und dessen Intensität den entscheidenden Einfluss auf die Entstehung des Einbandes in den Grundwerkstoff besitzt.

Schlagworte

Wirkungsgrad, effektiver Wirkungsgrad, Lichtbogenwirkungsgrad, Schmelzwirkungsgrad, Schutzgasschweißen, Metallschutzgasschweißen, wärmeminimiertes Schweißen, WIG-Schweißen, Plasmaschweißen, Unterpulverschweißen, Energiebilanz, Energiefluss, Kalorimetrie, Tropfentemperatur

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre gegenüber der Technischen Universität Chemnitz, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unzulässige Hilfe sowie ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommene Gedanken in der Arbeit als solche kenntlich gemacht sind.
Weiterhin versichere ich, dass die vorgelegte Arbeit weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zwecke einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt wurde.
Zudem bin ich einverstanden, dass eine elektronische Überprüfung meiner Dissertation auf etwaige Plagiate hin, durchgeführt werden kann.

Datum: 17. April 2014 André Hälsig

„Viele sind hartnäckig in Bezug auf den einmal eingeschlagenen Weg, wenige in Bezug auf das Ziel.“

Friedrich Nietzsche

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit an der Professur Schweißtechnik des Instituts für Füge- und Montagetechnik an der Technischen Universität Chemnitz. Mit der Fertigstellung meiner Dissertationsschrift ist es an der Zeit, denjenigen zu danken, die mich auf diesem Weg begleitet und unterstützt haben.
Ein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Mayr für die Betreuung der Dissertation. Auch Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel möchte ich recht herzlich für die bereitwillige und zeitnahe Übernahme des Zweitgutachtens danken. Weiterhin danke ich dem früheren kommissarischen Leiter der Professur Herrn PD apl. Prof. Dr.-Ing. Gunnar Bürkner und unserem Oberingenieur Herrn Dr.-Ing. Mario Kusch für die Schaffung der nötigen Freiräume und fachlichen Unterstützung. Vielfältige und interessante Forschungsaufgaben und das notwendige Vertrauen bei der Bearbeitung legten das Fundament zur Entstehung der vorliegenden Arbeit. Gleichzeitig brachte die fünfjährige Beschäftigung im Spitzentechnologiecluster „eniPROD“ die nötige Sicherheit und Konstanz, um sich im Forschungsgebiet eingehend vertiefen zu können.
Ein ganz besonderer Dank gebührt aber auch all meinen Kollegen an der Professur, insbesondere jedoch Herrn Dipl.-Ing. Stefan Brumm. Viele wissenschaftliche Diskussionen, technische Unterstützung und der häufige Meinungsaustausch haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Auch die technische Unterstützung durch die Hilfswissenschaftler und den Bearbeitern der Beleg- und Abschlussarbeiten haben wesentlich zum Gelingen der Dissertation beigetragen. Hier ist besonders Herr Dipl.-Ing. Kevin Höfer zu nennen.
Natürlich möchte ich es nicht versäumen meiner Familie und meiner Frau zu danken. Die Förderung meiner Ausbildung, das in mich gesetzte Vertrauen, die Unterstützung und die Schaffung von Freiräumen haben die Grundlagen für meinen Werdegang geschaffen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis vii
Tabellenverzeichnis x
Formelverzeichnis xi
Formelzeichenverzeichnis xiii
1 Einführung in die Thematik 1
2 Zielsetzung 5
3 Stand der Forschung und Technik- Literaturrecherche 7
3.1 Temperaturverteilung und Abkühlverhalten im Schweißgut 7
3.2 Wirkungsgrad 9
3.3 Kalorimetrie 14
3.3.1 Kalorimeterprinzipien für die Energiemessung in der Fügetechnik 15
3.3.2 Verwendete Kalorimeter in der Fügetechnik 20
3.4 Ergebnisse von Wirkungsgraduntersuchungen aus der Literatur 28
3.5 Energieflüsse auf Grund des Lichtbogens und des Tropfens 42
3.6 Analyse des Spannungsabfalls im Schweißprozess 50
4 Versuchsaufbau 53
4.1 Messprinzip zur energetischen Bilanzierung 53
4.2 Schweißstromquellen und Schweißbrenner 55
4.3 Messwerterfassung 55
4.4 Kalorimetrie 58
4.5 Fehlerbetrachtung der Kalorimeter 71
4.6 Berechnung der Energieeinträge bzw. Wirkungsgrade 73
4.7 Experimentelle Untersuchungen 75
4.8 Grund- und Zusatzwerkstoffe 77
5 Versuchsdurchführung und Auswertung 79
5.1 Schweißuntersuchungen mit nicht abschmelzender Elektrode 79
5.1.1 WIG-Schweißprozess 79
5.1.2 Plasmaschweißprozess 91
5.2 Schweißuntersuchungen mit abschmelzender Elektrode 94
5.2.1 Metallschutzgasschweißen 94
5.2.2 Vergleich beider Kalorimetertypen 112
5.2.3 Unterpulverschweißen 113
5.3 Analyse der Tropfentemperatur beim MSG-Prozess 116
5.4 Analyse des Spannungsabfalls beim MSG-Prozess 122
5.5 Messung der $t_{8/5}$- Abkühlzeiten 125
5.6 Diskussion Messprinzip Kalorimeter 126
6 Zusammenfassung 129
6.1 Schweißversuche mit nicht abschmelzender Elektrode 129

6.1.1 WIG-Schweißprozess 129
6.1.2 Plasmaschweißprozess 130
6.2 Schweißversuche mit abschmelzender Elektrode 132
6.2.1 Metallschutzgasschweißen 132
6.2.2 Wärmeminimiertes Metallschutzgasschweißen 132
6.2.3 Analyse der Tropfentemperatur beim MSG-Schweißen 133
6.2.4 Analyse des Spannungsabfalls beim MSG-Schweißen 134
6.2.5 Messung der $t_{8/5}$-Zeiten 135
6.2.6 Unterpulverschweißen 135
6.3 Vorschlag zur Anpassung der Wirkungsgrade innerhalb der Normung 135
7 Aussichten 137
Quellenverzeichnis 138
Anlage: Schweißverfahren 145

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Wärme- und Energiemengen am Lichtbogen 9
Abbildung 3-2: Nahtquerschnitt AN beim Schweißen mit abschmelzender Elektrode 12
Abbildung 3-3: Prinzipskizze eines Seebeck-Kalorimeters 15
Abbildung 3-4: Prinzipskizze eines Differenz-Temperatur-Kalorimeters 16
Abbildung 3-5: Prinzipskizze und Ablaufplan eines Differenz-Masse-Kalorimeters 17
Abbildung 3-6: Prinzipskizze eins Differenz-Druck-Kalorimeters 18
Abbildung 3-7: Prinzipskizze eines Flüssigkeitskalorimeters 19
Abbildung 3-8: Seebeck-Kalorimeter nach Geidt [Fue89] 20
Abbildung 3-9: Externes Schweißen der Schweißprobe und anschließendes Bestücken des Flüssigkeitskalorimeters [Pep08, Jos03, Are11] 21
Abbildung 3-10: Schematischer Aufbau des Wirkungsgradvergleichsverfahrens [Zha11] 22
Abbildung 3-11: Schweißkalorimetertypen zur Bilanzierung des E-Hand-Schweißens 23
Abbildung 3-12: Plattenkalorimeter Bestimmung der Wärmeeinbringung 24
Abbildung 3-13: Messaufbau Gesamtwärmebilanzierung WIG-Schweißen [Ghe79] 24
Abbildung 3-14: Anordnung der Thermoelemente zur Bestimmung der Abkühlzeit 26
Abbildung 3-15: Zusammensetzung des Lichtbogenwirkungsgrades beim Plasmaschweißen laut [Eva98] 32
Abbildung 3-16: Leistungsdichten verschiedener Schweißverfahren [Mat06, S. 40] 41
Abbildung 3-17: Schema der Energieaufteilung beim MAG-Schweißen [Wil06, S. 22] 42
Abbildung 3-18: Schema der Energieaufteilung beim MAG-Schweißen [Sch85, S. 57] 44
Abbildung 3-19: Versuchsstand zur Ermittlung des mittleren Wärmeinhaltes der Elektrodenmetalltropfen beim MSG-Schweißen [Pro82, S. 346] 46
Abbildung 3-20: Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Tropfentemperatur beim MSG-Schweißen [Wil06, S.61] 47
Abbildung 3-21: Versuchsstand zur Ermittlung der Tropfentemperatur beim MSG-Schweißen [Sod11] 48
Abbildung 3-22: U-I-Phasendiagramm beim Impuls MIG-Schweißen 50
Abbildung 4-1: Messprinzip zur energetischen Bilanzierung 53
Abbildung 4-2: Energiefluss während dem Schweißprozess am Bauteil 54
Abbildung 4-3: Prinzipskizze des entwickelten schrägen Kalorimeters 59
Abbildung 4-4: Prinzipskizze des entwickelten ebenen Kalorimeters 61
Abbildung 4-5: Bauteilaufnahme für das Kalorimeter beim pulverhaltigem Schweißen 62
Abbildung 4-6: Aufbau des Rohrkalorimeters zur Messung der Lichtbogenleistung und zur Trennung der schmelzflüssigen Tropfen vom Schweißlichtbogen [Kra12] 63
Abbildung 4-7: Vorgang der Lichtbogenzündung beim MSG-Schweißen [Kra12] 64
Abbildung 4-8: Geometrien und Bohrungsdurchmesser der Kupfereinsätze [Kra12] 64
Abbildung 4-9: schematischer Aufbau des Tropfenkalorimeters [Kra12] 65
Abbildung 4-10: System zur Messung der Tropfentemperatur und Lichtbogenleistung beim MSG-Schweißen [Kra12] 66
Abbildung 4-11: Tropfendurchgang durch das Rohrkalorimeter [Kra12] 67
Abbildung 4-12: Prinzipskizze zur Messung der Abstrahlungsenergie des Lichtbogens 68
Abbildung 4-13: Beispielhafter Verlauf von TVor und TRück beim MAG – Schweißen 68
Abbildung 4-14: Prinzipdarstellung der Integration von Thermoelementen zur Messung der Kühlleistung 69
Abbildung 4-15: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Lichtbogengeometrie 71
Abbildung 4-16: Verlauf des Korrekturwertes in Relation zur Umgebungstemperatur 74
Abbildung 5-1: Anlagenwirkungsgrad der WIG-Schweißstromquelle 79
Abbildung 5-2: Einfluss der Schweißstromstärke auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses 80
Abbildung 5-3: Einfluss der Schweißstromstärke auf die Abstrahlungsenergie und die Mantelfläche des WIG-Schweißlichtbogens 81

Abbildung 5-4: Einfluss der Schweißstromstärke auf die Lichtbogengeometrie des WIG-Schweißprozesses 81
Abbildung 5-5: Einfluss der Schweißstromstärke auf die Wärmeverluste an die Kühlung der Schweißstromquelle 82
Abbildung 5-6: Einfluss der Schweißstromstärke auf den Energiefluss beim WIG-Schweißprozess 82
Abbildung 5-7: Einfluss des Elektrodenabstandes auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses 83
Abbildung 5-8: Einfluss des Elektrodenabstandes auf die Abstrahlungsenergie des WIG-Schweißlichtbogens 84
Abbildung 5-9: Einfluss des Elektrodenabstandes auf den Energiefluss beim WIG-Schweißprozess 85
Abbildung 5-10: Einfluss der Lichtbogenbalance auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses 85
Abbildung 5-11: Einfluss der Lichtbogenbalance auf die abgegebene Wärmemenge des WIG-Schweißprozesses 86
Abbildung 5-12: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses 87
Abbildung 5-13: Einfluss der Schutzgasmenge auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses 88
Abbildung 5-14: Querschliff WIG-Schweißnaht verschiedener Elektrodendurchmesser 89
Abbildung 5-15: Anlagenwirkungsgrad der Plasmaschweißstromquelle 91
Abbildung 5-16: Einfluss der Gaszusammensetzung auf den Lichtbogenwirkungsgrad des Plasmaschweißprozesses 93
Abbildung 5-17: Anlagenwirkungsgrad der MSG-Schweißstromquelle 94
Abbildung 5-18: Einfluss der Lichtbogenart auf den effektiven Wirkungsgrad beim MSG-Schweißen 96
Abbildung 5-19: Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit auf die Abstrahlungsenergie des Lichtbogens beim MSG-Schweißen 97
Abbildung 5-20: Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit auf die Wärmeverluste an die Kühlung der Schweißenergiequelle beim MSG-Schweißen 98
Abbildung 5-21: Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit auf den Energiefluss und die Schweißnahtgeometrie beim MSG-Schweißen 99
Abbildung 5-22: Einfluss der Schweißspannung auf den effektiven Wirkungsgrad beim MSG-Schweißen 100
Abbildung 5-23: Einfluss des Kontaktrohrabstandes auf den effektiven Wirkungsgrad beim MSG-Schweißen 101
Abbildung 5-24: Querschliff MAG-Schweißnaht mit verändertem Kontaktrohrabstand 102
Abbildung 5-25: Einfluss der Gaszusammensetzung auf den effektiven Wirkungsgrad beim MAG-Schweißen 103
Abbildung 5-26: Einfluss der Gaszusammensetzung auf den effektiven Wirkungsgrad beim MIG-Schweißen 104
Abbildung 5-27: Querschliffe MIG-Schweißen 105
Abbildung 5-28: Querschliffe MAG-Schweißen mit steigender Schweißgeschwindigkeit 106
Abbildung 5-29: Einfluss des Grundwerkstoffs auf den Wirkungsgrad beim MAG-Schweißen 107
Abbildung 5-30: Einfluss des Drahtvorschubs auf den effektiven Wirkungsgrad beim MAG- und MIG-Schweißen 107
Abbildung 5-31: Einfluss des Werkstoffs auf die Abstrahlungsenergie und die Schweißleistung beim MAG- und MIG-Schweißen 108
Abbildung 5-32: Einfluss wärmeminimierter MSG-Verfahren auf den effektiven Wirkungsgrad bei CuSi3 Zusatzwerkstoff 109
Abbildung 5-33: Einfluss wärmeminimierter MSG-Verfahren auf den effektiven Wirkungsgrad bei AlMg5 Zusatzwerkstoff 111
Abbildung 5-34: Einfluss wärmeminimierter MSG-Verfahren auf den Energieeintrag in das Bauteil bei G3Si1 Zusatzwerkstoff 112

Abbildung 5-35: Einfluss des Schweißpulvertyps auf den Wirkungsgrad beim Unterpulverschweißen 113
Abbildung 5-36: Querschliffe von Unterpulverschweißnähten mit veränderter Schweißstromstärke 115
Abbildung 5-37: Querschliffe von Unterpulverschweißnähten mit veränderter Schweißspannung 116
Abbildung 5-38: Mittlere Tropfentemperatur und Schweißleistung in Abhängigkeit der Drahtvorschubgeschwindigkeit und des Drahtdurchmessers 117
Abbildung 5-39: Lichtbogenwirkungsgrad und Tropfenwirkungsgrad in Abhängigkeit der Drahtvorschubgeschwindigkeit 118
Abbildung 5-40: mittlere Tropfentemperatur und benötigte Schweißleistung in Abhängigkeit des Kontaktrohrabstandes 120
Abbildung 5-41: Lichtbogenwirkungsgrad und Tropfenwirkungsgrad in Abhängigkeit des Kontaktrohrabstandes 121
Abbildung 6-1: Darstellung der ermittelten Einflussgrößen auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses 129
Abbildung 6-2: Darstellung der ermittelten Einflussgrößen auf den Lichtbogenwirkungsgrad des Plasmaschweißprozesses 131
Abbildung 7-1: Einteilung der Schmelzschweißprozesse nach DIN 1910-100 145
Abbildung 7-2: WIG-Schweißen mit Zusatzwerkstoffzuführung [Mat06, S. 206] 146
Abbildung 7-3: Prinzipskizze des Plasmalichtbogenschweißens [Mig09] 147
Abbildung 7-4: Verfahrensprinzip des MSG-Schweißens [Tec09] 147
Abbildung 7-5: Auswahl häufig verwendeter MSG-Schweißlichtbogenarten 149
Abbildung 7-6: Verfahrensprinzip des Unterpulverschweißens [Mat06] 150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Bandbreite des thermischen Wirkungsgrades verschiedener Literaturquellen	10
Tabelle 3-2:	Vergleich effektiver und thermischer Wirkungsgrad	11
Tabelle 3-3:	Zusammenfassung der Lichtbogenwirkungsgrade des WIG- und Plasmaschweißens aus der Literatur	28
Tabelle 3-4:	Strahlungsverlustfaktoren beim WIG-Schweißen mit Argonlichtbogen in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand und der Schweißstromstärke	30
Tabelle 3-5:	Zusammenfassung der Lichtbogenwirkungsgrade des MSG- und Unterpulverschweißens aus der Literatur	35
Tabelle 3-6:	Einfluss des freien Drahtendes auf die Wärmeverteilung im Bauteil	36
Tabelle 3-7:	Aufteilung Schmelzwirkungsgrade verschiedener Schweißverfahren	41
Tabelle 3-8:	Tropfentemperaturen beim MSG-Schweißen [Sod11]	49
Tabelle 4-1:	Abweichung der Schweißleistung bei verschiedenen Bestimmungsmethoden	57
Tabelle 4-2:	Genauigkeitsklassen von Pt100 Thermoelementen [Ome12]	57
Tabelle 4-3:	Genauigkeitsklassen der verwendeten Waagentypen	58
Tabelle 4-4:	technische Daten des schrägen Kalorimeters	60
Tabelle 4-5:	Widerstandserwärmung im Strom-Wasser Kabel	70
Tabelle 4-6:	Basismesswerte der Kalorimetertypen zur Gesamtfehlerberechnung	72
Tabelle 4-7:	Untersuchte Schweiß- und Prozessparameter beim WIG-Schweißen:	75
Tabelle 4-8:	Untersuchte Schweiß- und Prozessparameter beim Plasmaschweißen	76
Tabelle 4-9:	Untersuchte Schweiß- und Prozessparameter beim MAG-Schweißen	76
Tabelle 4-10:	Untersuchte Schweiß- und Prozessparameter beim MIG-Schweißen	76
Tabelle 4-11:	Untersuchte Schweiß- und Prozessparameter beim Unterpulverschweißen	77
Tabelle 4-12:	Verwendete Zusatzwerkstoffe und deren Bezeichnungen nach Norm	78
Tabelle 5-1:	Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Nahtgeometrie beim MSG-Schweißen	105
Tabelle 5-2:	Vergleich wärmeminimierter MSG-Schweißprozesse	110
Tabelle 5-3:	Chemische Zusammensetzung der verwendeten Schweißpulver sowie der Anteil von Silizium und Mangan im Schweißgut	114
Tabelle 5-4:	Impulsfrequenz und Tropfenvolumen in Abhängigkeit der Drahtvorschubgeschwindigkeit und des Drahtdurchmessers	117
Tabelle 5-5:	Spannungsverteilung im MSG-Pulsprozess	122
Tabelle 5-6:	Vergleich berechneter und kalorimetrisch bestimmter Energieumsatz beim MSG-Pulsprozess	123
Tabelle 5-7:	Messung der Abkühlzeiten und Berechnung der Wirkungsgrade	125
Tabelle 5-8:	Einfluss der Bauteiltemperatur auf den Schmelzwirkungsgrad	127
Tabelle 6-1:	Anpassung der Wirkungsgrade in Relation zum UP-Schweißen	136
Tabelle 6-2:	Berechnung der Abkühlzeiten $t_{8/5}$ mit verschiedenen Wirkungsgraden	136

Formelverzeichnis

Formel 3.1 $t_{8/5} = \frac{Q^2}{4*\pi*\lambda*\rho_{Wst}*c*b^2} * \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right]$ 7

Formel 3.2 $t_{8/5} = (4300 - 4{,}3*T_0)*10^5 * \frac{Q^2}{b^2} * \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] * F_2$ 7

Formel 3.3 $t_{8/5} = \frac{Q}{2*\pi*\lambda} * \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right) - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right) \right]$ 7

Formel 3.4 $t_{8/5} = (6700 - 5*T_0)*Q * \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right) - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right) \right] * F_3$ 7

Formel 3.5 $Q = E_S * \eta * l_s$ 8

Formel 3.6 $E_S = \frac{P_S}{v_S}$ v_S in mm/s 8

Formel 3.7 $b_{\ddot{U}} = \sqrt{\frac{Q}{2*c*\rho} * \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right) + \left(\frac{1}{800 - T_0} \right) \right]}$ 8

Formel 3.8 $Q_{ges} = Q_{LB} + Q_{ZW} = Q_{ab} + Q_{Schm} + Q_{Wärmeleit}$ 9

Formel 3.9 $Q_{GW} = Q_{Schm} + Q_{Wärmeleit}$ 9

Formel 3.10 $\eta_{th} = \frac{Q_{ges}}{P_S * t_S} = \frac{Q_{ges}}{t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt}$ [Sch85].....10

Formel 3.11 $\eta_{eff} = \frac{Q_{GW} + Q_{ZW}}{P_S * t_S} = \frac{Q_{GW} + Q_{ZW}}{t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt}$ [Sch85] 10

Formel 3.12 $\eta_{LB} = \frac{Q_{GW}}{P_S * t_S} = \frac{Q_{GW}}{t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt}$ [Sch85] [DuP95] 11

Formel 3.13 $Q_{Schm} = V_{Schm} * \rho_{Wst} * (T_{Schm} - T_0) * \int_{T_0}^{T_{Schm}} C_{Wst_{(T)}} * dT + V_{Schm} * \rho_{Wst} * H_{Wst}$ 13

Formel 3.14 $\eta_{Schm} = \frac{Q_{Schm}}{Q_{GW}} = \frac{Q_{Schm}}{\eta_{LB} * t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt} = \frac{Q_{Schm}}{\eta_{eff} * t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt}$ 13

Formel 3.15 $\eta_{Prozess} = \frac{Q_{Schm}}{P_S * t_S} = \frac{Q_{Schm}}{t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt}$ 13

Formel 3.16 $\eta_{Anlage} = \frac{P_S}{P_{Netz}}$ 14

Formel 3.17 $Q_{GW} = c_{H_2O} * m_{H_2O} * \Delta T$ 15

Formel 3.18 $Q = \Delta m_{KM} * (c_{KM} * (T_{Siede_{KM}} - T_{Anfang_{KM}}) + h_{Verd_{KM}})$ 17

Formel 3.19 $m = \left(\frac{p_2}{T_2} - \frac{p_1}{T_1} \right) * \left(\frac{V}{R_m} \right)$ 18

Formel 3.20 $Q = m * c_V * \Delta T$ 18

Formel 3.21 $R_Y = \frac{P_{BT} * v_S}{\lambda^2 * \delta E_S}$ 31

Formel 3.22 $\eta_{\max} = \frac{Q_{Schm}}{P_S * t_S} = \frac{\rho_{Wst} * c * T_{Bad} * A_S * v_S}{t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt}$ 37

Formel 3.23 $Q_{BT} = (E_{Ion_{(Schutzgas / Metalldampf)}} - E_{aus_{(Metall)}}) * I_S * t_S$ *[IIM12]* 51

Formel 4.1 $P_S = U_S * I_S$ 56

Formel 4.2 $\bar{x}_{arithm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$ 56

Formel 4.3 $\bar{x}_{quadrat} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i^2}$ 56

Formel 4.4 $\Delta T_{Typ_X} = \frac{dT_{100°C} - dT_{0°C}}{100°C - 0°C} * (T_{Mess} - 0°C) + dT_{0°C}$ 57

Formel 4.5 $Q_{ab_Umg} = c_{H_2O} * m_{H_2O} * (T_{Rück} - T_{Vor})$ 69

Formel 4.6 $Q = I_S^2 * R_{Leitung} * t_S$ 70

Formel 4.7 $R_{Leitung} = \frac{\rho_{el} * l_{Leitung}}{A_{Leitung}}$ 70

Formel 4.8 $A_M = 0{,}5 * \pi * b * \sqrt{((0{,}5 * b)^2 + h^2)}$ 71

Formel 4.9 $\Delta \eta_{eff_X} = \left| \frac{\partial \eta_{eff}}{\partial m_{H_2O}} \right| * \Delta m_X + \left| \frac{\partial \eta_{eff}}{\partial \Delta T} \right| * \Delta T_X + \Delta P_X$ 72

Formel 4.10 $\Delta \eta_{eff_X} = \left| \frac{c_W * \Delta T}{P_S * t_S} \right| * \Delta m_X + \left| \frac{Q_{Zusatz_Typ_X} + c_W * m_{H_2O}}{P_S * t_S} \right| * \Delta T_X + \Delta P_X$ 72

Formel 4.11 $P_S = \frac{1}{t_E - t_S} * \int_{t_S}^{t_E} U_S * I_S * dt$ 73

Formel 4.12 $t_s = \frac{v_S}{l_S}$ 73

Formel 4.13 $Q_{GW+ZW} = \sum_1^n [m_n * c_n * (T_E - T_S + T_{Korr})]$ 74

Formel 4.14 $Q_{Kal} = \sum_1^n [m_n * c_n * \Delta T]$ 74

Formel 4.15 $Q_{Tr} = c_{Tr} * m_{Tr} * (T_{Tr} - T_E)$ 74

Formel 4.16 $T_{Tr} = \frac{\sum_1^n [m_n * c_n * \Delta T]}{c_{Tr} * m_{Tr}} + T_E$ 75

Formel 5.1 $I_{\max,Elektrode} = d_{Elektrode}[mm] * 100A - 80A$ 89

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
a	mm	Brennerabstand
b	mm	Wanddicke/Materialstärke
$b_Ü$	m	Übergangsblechdicke
c	kJ/(kg*K)	spezifische Wärmekapazität
c_V	kJ/(kg*K)	spezifische Wärmekapazität von Gasen bei konstantem Volumen
C	%	Kohlenstoffgehalt
d	mm	Durchmesser
E_S	J/mm	Streckenenergie
E_{aus}	eV	Elektronenaustrittsarbeit
E_{Diss}	eV	Dissoziationsenergie
E_{Ion}	eV	Ionisationsenergie
f_{Abtast}	Hz	Abtastfrequenz/-rate
F2		Nahtfaktor bei zweidimensionaler Wärmeableitung
F3		Nahtfaktor bei dreidimensionaler Wärmeableitung
H_{Schm}	J/g	Schmelzenthalpie
I_{Mess}	A	Messstromstärke
l_{Naht}	mm	Schweißnahtlänge
I_s	A	Schweißstromstärke
p	Pa	Druck
P_{el}	W	elektrische Leistung
P_{Netz}	W	entnommene Netzleistung
P_S	W	Schweißleistung
q_s	J/mm	Streckenenergie
Q	J	Wärme
Q_{ab}	J	abgestrahlte/abgegebene Wärmemenge
Q_{ges}	J	Gesamtwärmemenge
Q_{GW}	J	Wärmemenge im Grundwerkstoff
Q_{Schm}	J	Wärmemenge zum Schmelzen des Werkstoffs
Q_{ZW}	J	Wärmemenge im Zusatzwerkstoff
r	mm	Elektrodenrückstand
R	Ω	elektrischer Widerstand
R_m	J/(kg*K)	spezifische Gaskonstante
R_e	MPa	Streckgrenze
s	mm	Strecke/Abstand
t	mm	Wanddicke/Materialstärke
t_S	s	Schweißzeit
$t_{8/5}$	s	spezifische Abkühlzeit
T	K	Temperatur
T_0	K	Vorwärmtemperatur
U_s	V	Schweißspannung
U_{Mess}	V	Messspannung
v_D	m/min	Drahtvorschubgeschwindigkeit
v_s	m/min	Schweißgeschwindigkeit
V	l/min	Gasmenge
V_{Schm}	cm³	Schmelzbadvolumen
V_{PG}	l/min	Plasmagasmenge
V_{SG}	l/min	Schutzgasmenge

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
η_{eff}		effektiver Wirkungsgrad
η_{Ein}		Einkoppelgrad des Strahles in den Werkstoff
η_{LB}		Lichtbogenwirkungsgrad
$\eta_{Prozess}$		Prozesswirkungsgrad
η_{Schm}		Schmelzwirkungsgrad
η_{th}		thermischer Wirkungsgrad
η_{w}		Wärmeverlustbeiwert
λ	W/(m*K)	Wärmeleitfähigkeit
ρ_{el}	Ω*mm²/m	spezifischer elektrischer Widerstand
ρ_{Wst}	g/cm³	Werkstoffdichte

1 Einführung in die Thematik

Die Kenntnis des realen Energieflusses beim Lichtbogenschweißen hat einen gravierenden Einfluss auf die mechanisch- technologischen Gütewerte der Verbindung und die Fügbarkeit von Werkstoffen. Zur Reduzierung von Unstetigkeiten und aufwendigen Nacharbeiten können heutzutage der Wärmeeintrag und die resultierenden Verzüge und Spannungen simulativ nachgestellt werden. Basis genauer Prozess- und Werkstoffsimulationen ist dabei die Kenntnis der eingebrachten Wärmemenge in das Bauteil. Da dieser Energieeintrag jedoch prozess- und parameterabhängig ist, muss dieser im Vorhinein mit geeigneter Messtechnologie in realen Versuchen ermittelt werden. Exemplarisch werden im Folgenden weitere Anwendungsgebiete aufgeführt, welche direkt durch den Wärmeeintrag in das Bauteil beeinflusst werden:

- Gefügeveränderungen im Grundwerkstoff bei der Nutzung von Leichtbaupotentialen und dem Fügen von temperatursensiblen Werkstoffen, z.B. bei der Verwendung von hochfesten Feinkornbaustählen
- Eigenspannungen und Verformungen am und im Bauteil
- Gefahr der Heißrissbildung am Beispiel austenitischer Stähle

Um die Kenntnisse des realen Energieflusses von Schutzgasschweißverfahren anwendbar zu gestalten ist neben der Integration in die Prozess- und Werkstoffsimulation vorrangig die Überarbeitung gültiger Regelwerke (z.B. DIN EN 1011-1) notwendig.

Derzeit ist es nicht möglich, den mit jedem Schweißverfahren prozessbedingt einhergehenden Wärmeeintrag in ein Realbauteil rechnerisch genau zu ermitteln. Die dafür notwendigen Berechnungsvorschriften sind zwar in hinreichendem Maße ausgearbeitet und bekannt, die für die Berechnung notwendigen Faktoren in den jeweiligen Formeln erweisen sich aber aus aktueller Sicht als stark revisionsbedürftig. Nahezu alle ermittelten Faktoren zur Berechnung der eingebrachten Wärmemengen in geschweißten Bauteilen, sowie zur Ermittlungen von Energiebilanzen, entsprechen nicht der Realität. Zudem ist der Einfluss verschiedener Schweißparameter auf den Energieeintrag in das Bauteil zu bestimmen.
Die in der aktuellen Literatur und in den Regelwerken (z.B. DIN EN 1011-1) verwendeten Angaben zum Wirkungsgrad beziehen sich alle auf den thermischen Wirkungsgrad der Schweißprozesse. Dieser beschreibt jedoch keine Absolutwerte der Prozesse, sondern Relativwerte im Verhältnis zum Unterpulverschweißen. Um die geforderten mechanisch technologischen Gütewerte temperatursensibler Werkstoffe bzw. komplexer Strukturen prozesssicher zu realisieren und deren Potential vollständig zu nutzen, sind exakte und verbindliche Berechnungsverfahren und -faktoren eine primäre Voraussetzung.
Dabei wurde dem Unterpulverschweißen ein thermischer Wirkungsgrad von 100 % zugeordnet. Eine vollständige Umwandlung elektrischer Energie in Form der Schweißleistung ausschließlich in thermische Energie zur Erwärmung des Bauteils ohne Energieverluste ist laut dem Energieerhaltungssatz technisch unmöglich. Gründe hierfür sind unter anderem die Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Wärmeströmung des Schweißprozesses an die Umgebung. Das heißt, der reale Energieeintrag in das Bauteil durch das Unterpulverschweißen wurde transformiert und ein relativer thermischer Wirkungsgrad des Verfahrens ist das Ergebnis. Alle anderen in den Normen (z.B. DIN EN 1011-1) und Regelwerken beschriebenen Fügeverfahren mit abschmelzender und nicht abschmelzender Elektrode wurden mit demselben Transformationsfaktor multipliziert. Dadurch stellen auch diese thermischen Wirkungsgrade nicht den absoluten, sondern relativen Wirkungsgrad bzw. Energieeintrag dar. Die Auswirkungen dieser unterschiedlichen Annahmen werden in Tabelle 6-2 beispielhaft dargestellt.

Die Temperaturzyklen beim Schweißen bewirken bei temperatursensiblen Werkstoffen Gefügeveränderungen, d.h. der Bereich der Schweißnaht und der nahtnahe Bereich der Fügestelle weisen im wieder abgekühlten Zustand andere Gefüge als vor dem

Schweißprozess auf. Die Folge sind Eigenschaftsänderungen des Grundwerkstoffes unter anderem bezüglich Zähigkeit, Härte oder Festigkeit [Sch04]. Besonders anfällig für die beschriebenen Eigenschaftsveränderungen sind moderne Hochleistungswerkstoffe, welche auf Grund ihrer Festigkeitseigenschaften ein enormes Leichtbaupotential besitzen. Branchenübergreifend werden beispielsweise hochfeste Feinkornbaustähle, Dualphasenstähle, TRIP (Transformation Induced Plasticity)-Stähle, pressgehärtete Stähle, aber auch Nickel-Basis-Legierungen industriell als Konstruktionswerkstoff eingesetzt. Deren Werkstoffeigenschaften werden bei der Herstellung durch spezielle Temperatur-Zeit-Regimes eingestellt, die sich bei der schweißtechnischen Verarbeitung von Halbzeugen nicht oder nur schwer nachbilden lassen. Ein Schweißvorgang stellt somit immer eine Veränderung des Ausgangs-Eigenschaftsprofils der modifizierten und temperaturempfindlichen Werkstoffe dar. Als Konsequenz lassen sich diese Werkstoffe schweißtechnisch nur in einem sehr engen Parameterfenster verarbeiten. Praktisch wird dies über die Einhaltung definierter Abkühlzeiten der Schmelze zwischen einem Temperaturbereich von T = 800...500 °C, des sogenannten $t_{8/5}$-Wertes realisiert. Innerhalb dieses Temperaturfensters finden entscheidende Umwandlungsvorgänge im Werkstoff statt. Als Rechengröße zur Ermittlung des Wärmeeintrags in das Bauteil wird dabei die Streckenenergie E_s und der Wirkungsgrad des Schweißprozesses η_{th} herangezogen.
Hochfeste Feinkornbaustähle sind zum Beispiel mit allen bekannten Schweißverfahren fügbar und weisen auf Grund Ihres feinkörnigen Gefüges vor allem im statischen Bereich enorme Festigkeiten auf. Die überwiegend verwendeten Schweißverfahren (Schutzgasschweißverfahren mit abschmelzender Elektrode) erzeugen im Vergleich zu Strahlverfahren (Laserstrahl- oder Elektronenstrahlschweißen) ausgedehnte Wärmeeinflusszonen, wodurch die mechanisch technologischen Gütewerte verändert werden. Der Schweißprozess stellt dabei eine unbeabsichtigte, aber nicht zu vermeidende Wärmehandlung in Form von Weichglühen bzw. Anlassen, aber auch Härten beim Abkühlen der Schmelze dar. Hierdurch kommt es zu einem Verlust der typischen, angestrebten Eigenschaften des Grundwerkstoffes (beispielsweise erhöhte Festigkeit und Kerbschlagzähigkeit, feines Korn, usw.). Das gezielt eingestellte Gefüge dieser Werkstoffe entsteht als Primärstruktur bei der Erstarrung und wird durch Wärmebehandlung oder Umformprozesse in ein Sekundärgefüge umgewandelt. Ist die Wärmebehandlung durch das Schweißen unkontrolliert und der Werkstoff kühlt zu langsam ab, entsteht ein grobkörniges Gefüge. Bei Feinkornbaustählen kann es bei zu langsamer Abkühlung zur Ausscheidung der weichen, aber versprödend wirkenden Ferritphase kommen, wodurch sich die Kerbschlagzähigkeit vermindert. Die vielfach in der Literatur [Sch04], [Mat06], [Dil05] genannte Lösung, die Schweißverbindung nicht an Positionen zu legen, an denen vergleichsweise hohe Beanspruchungen wirken, stellt zum Beispiel für das Schweißen von Wellen keine Lösung dar, da das als Last dominierende Torsionsmoment durch das gesamte wellenförmige Bauteil zwingend über die Schweißverbindungen geleitet werden muss.
Andererseits besteht die Gefahr, dass es infolge des Schweißvorganges zu großen Abkühlgeschwindigkeiten im Schweißgut und der wärmebeeinflussten Zone (WEZ) kommt. Hieraus resultiert die Bildung von Martensit oder Zwischenstufengefügen, welche zu einer erhöhten Anfälligkeit für Härterisse am geschweißten Bauteil und einer Reduzierung der Bruchdehnung führt. Hierdurch wird das Vermögen, lokal an Stellen höchster mechanischer Spannungen zu plastifizieren und damit Spannungsspitzen abzubauen, massiv eingeschränkt. Dieser Effekt zeigt sich in Form von verformungsarmen Brüchen (Gewaltbrüche) bei quasistatischer Beanspruchung oder Schwingbrüchen mit hoher Rissfortschrittsgeschwindigkeit bzw. geringen Lebensdauern oder Lastwechselzahlen [Sch03]. Auf Grund dieser Faktoren ist die genaue Kenntnis des Temperatur-Zeit-Verlaufes unbedingt notwendig. Die im Einzelfall geforderte Abkühlzeit $t_{8/5}$ richtet sich nach der Gesamtheit der Forderungen an die mechanischen Eigenschaften (z.B. Festigkeitskennwerte der Schweißverbindung). Wichtige Einflussgrößen auf das Werkstoffverhalten sind dabei die Wahl einer geeigneten Vorwärmtemperatur, die Bestimmung des Kohlenstoffäquivalents (meist in Form des CET-Wertes [DIN01]), um

den Anteil an Elementen, die zur Bildung von Martensit notwendig sind, zu bewerten. Zusätzlich hat die Wahl eines geeigneten Schweißprozesses und der Nahtparameter große Bedeutung. Eine möglichst geringe thermische Beeinflussung wird üblicherweise dadurch erreicht, dass die Streckenenergie gering gehalten und möglichst kleine Fugenvolumina bzw. kleine Nahtquerschnitte gewählt werden. An dieser Stelle wird deutlich, dass hierfür der exakte Wärmeeintrag in das Bauteil bekannt sein muss. Zusätzlich ist ein grundlegendes Prozessverständnis notwendig, um die parametrische Abhängigkeit des Energieeintrages in das Bauteil zu verstehen.

Neben den erwähnten Gefügeveränderungen führt die eingebrachte Energie auch zu Eigenspannungen und Änderungen in der Bauteilgeometrie (Verzug). Bauteileigenspannungen entstehen durch den typischen Temperatur-Zeit-Verlauf beim Schweißen und nicht durch äußere Kräfte oder Momente. Faktoren, die zu ungleichmäßig verteilten plastischen Verformungen führen sind unter anderem [Sch04, S. 247…250]:

- Temperaturdifferenzen im Bauteil
- Umwandlungsvorgänge im Gefüge
- Änderung der Bindungsmechanismen, z.B. durch Lösen von atomaren Bindungen auf Grund unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten beider Bauteile
- Werkstückdicke und Verformbarkeit des Werkstoffs – Steifigkeit der Konstruktion

In Schweißverbindungen ist die Temperaturverteilung nie homogen. Auf Grund des entstehenden Stoffschlusses ist die Nahtgeometrie fixiert, was beim Abkühlen Eigenspannungen und Verzug im Bauteil bewirkt. Werden beispielsweise Verzüge durch eine definierte Vorspannung oder dem Einsatz einer Spannvorrichtung behindert, führt dies zum vermehrten Eintrag von Eigenspannungen in das Werkstück. Eigenspannungen und Verzug können jedoch durch folgende Faktoren reduziert werden [Sch04, S. 247…250]:

- gezielte Wärmeführung - Schweißreihenfolge
- reduzierte Steifigkeit der Konstruktion
- duktiler Grund- und/oder Zusatzwerkstoff
- nachträgliche Wärmebehandlung – Spannungsarmglühen

Weiterhin wird empfohlen Schweißverfahren mit geringer Leistungsdichte zu verwenden, um die Eigenspannungen zu reduzieren. Andererseits ist die Schrumpfung geringer, wenn die Leistungsdichte höher ist. Folglich ermöglicht erst die genaue Kenntnis des realen Wärmeeintrages in das Bauteil unliebsame Folgen des Schweißprozesses wie Schweißspannungen und Verzug besser bzw. überhaupt hinreichend genau vorauszusagen bzw. gezielt zu reduzieren.

Während der Abkühlung der erstarrenden Schmelze können Schrumpfspannungen im Bereich der Restschmelze Heißrisse in der Schweißnahtmitte erzeugen. Die Bildung dieser Heißrisse benötigt beim Erstarren Spannungen bzw. Dehnungen sowie niedrigschmelzende Verbindungen an den Korngrenzen oder zwischen wachsenden Dendriten. Laut [Sch04, S. 299…303] ist es möglich die Heißrissneigung von Eisenwerkstoffen mit folgenden fertigungstechnischen Mitteln zu reduzieren:

- Schweißverfahren mit großer Wärmeeinbringung
- Reduzierung der Schweißgeschwindigkeit (Vorschubgeschwindigkeit in Nahtmitte geringer als Kristallisationsgeschwindigkeit)
- Einlagenschweißungen bis maximal t = 8 mm
- nicht parallele Nahtvorbereitungen
- Werkstoffe mit geringem Kohlenstoff-, Schwefel- und Phosphorgehalten

Die Heißrissempfindlichkeit und die Neigung zu Wiederaufschmelzrissen in der Wärmeeinflusszone steigt jedoch durch die Elemente Schwefel, Blei, Bor, Niob, Titan, Silizium und Phosphor im Werkstoff, welche im Deltaferrit wesentlich besser gelöst

werden, als im Austenit. Durch die Anreicherung dieser Elemente an den Austenitkorngrenzen wird die Schmelztemperatur im Korngrenzenbereich gesenkt und die Kohäsion zwischen den Kristalliten herabgesetzt. Bereits bei geringen prozentualen Gehalten im Stahl entstehen Seigerungen und diese Elemente bilden niedrigschmelzende Phasen. Das ist auch der Grund für die hohe Heißrissempfindlichkeit austenitischer Werkstoffe. Bei der Verarbeitung von austenitischem Schweißgut wird empfohlen eine geringe Wärmeeinbringung, eine geringe Vorwärmtemperatur und eine hinreichend große Schweißgeschwindigkeit zu realisieren [Sch04, S. 427…430]. Aus diesem Grund ist es für die konstruktions- und werkstoffgerechte Verarbeitung von Stahlwerkstoffen unumgänglich den realen Wärmeeintrag in das Bauteil zu kennen. Hierbei reicht es nicht aus, statische Werte aus den vorhandenen Regelwerken (z.B. DIN EN 1011-1) zu nutzen, sondern die parametrische Abhängigkeit verschiedener Schweißprozesse auf den Wärmeeintrag zu kennen. Darüber hinaus ist es notwendig absolute Wirkungsgrade anstatt relativer Wirkungsgrade zu verwenden.

Lange Zeit basierte die Auslegung von Schweißkonstruktionen auf Erfahrungswerten und empirisch ermittelten Formeln. Die moderne Rechentechnik macht es möglich Prozesse durch möglichst exakte Simulationssoftware nachzustellen. Auch aktuelle Entwicklungen in der verarbeitenden Industrie zielen darauf ab, durch das Ersetzen praktischer Versuche durch Simulationen, Kosten in den Unternehmen zu senken und andererseits Informationen zu gewinnen, die über Messungen nicht oder nur mit einem sehr hohen Aufwand zu erreichen wären. Dies soll mittels umfassenden Schweißsimulationen realisiert werden. Teilweise kann hierfür die Optimierung von Schweißprozessen und die Analyse der Eigenschaften geschweißter Bauteils durch numerische Lösungen erfolgen. Dabei erfolgt eine Einteilung der Schweißsimulation in drei Teilbereiche, welche sich in ihren Modellen und Zielgrößen unterscheiden:

- Struktursimulation,
- Prozesssimulation und die
- Werkstoffsimulation.

Zur Modellierung der Wärmeeinbringung wird oft eine parametrisierte Ersatzwärmequelle verwendet. Diese Simulationen basieren auf die möglichst genaue Kenntnis des Wärmeeintrages in das Bauteil. Die Ergebnisse und die Genauigkeit der Simulation werden somit in höchstem Maße von der Güte der Eingangsparameter bestimmt. Die Verwendung statischer, thermischer Wirkungsgrade, welche in Relation zum Unterpulverschweißen gesetzt sind, birgt dabei ein hohes Fehlerpotential, da beispielsweise die parametrischen Abhängigkeiten der Prozessparameter der Schweißprozesse unberücksichtigt bleiben. Für höhere Genauigkeitsanforderungen sollte deshalb als Grundlage die Kalibrierung der Eingangsparameter durch eine experimentelle Analyse mittels Temperaturmessungen erfolgen, wie es in der dargestellten Arbeit beschrieben wird. Das Fernziel der Simulationstechnologie ist es unter anderem Prozessparameter, wie den realen Wärmeeintrag in das Bauteil, durch Prozesssimulationen zu ermitteln. Hierfür muss eine Datenbasis und ein grundlegendes Prozessverständnis, basierend auf experimentelle Analysen, geschaffen werden.
Einen völlig anderen Verwendungszweck der Simulation beschreibt Rose [Ros11]. Die Forschergruppe benutzt diese zur Interpretation vorhandener Daten. Experimentelle Ergebnisse werden strukturiert und die Wechselwirkungen zwischen physikalischen Effekten werden in verschiedenen Modellansätzen nachgebildet. Dadurch können voneinander isolierte Parameter variiert und deren Einflüsse auf den Prozess genauer analysiert werden. Hierfür ist es notwendig den Prozess so realistisch, wie möglich nachzustellen. Dabei sind der Wärmeeintrag in das Bauteil, sowie der Energiefluss des Fügeprozesses Hauptkenngrößen.

2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist, den realen Wärmeeintrag in das Bauteil während dem Schweißprozess zu ermitteln. Hierfür werden verschiedene Schutzgasschweißverfahren analysiert und bewertet. Neben der Kenntnis des Energieflusses zum und in das Bauteil, werden auch energetische „Verlustquellen“ untersucht, um eine umfassende energetische Bilanzierung von Schutzgasschweißverfahren zu erhalten. So sollen neben kalorimetrischen Untersuchungen des Wärmeeintrags in das Bauteil auch die Abstrahlungsenergie des Lichtbogens und der Energiefluss der Kühlung vom Schweißbrenner zum externen Kühlkreislauf der Schweißenergiequelle untersucht werden. Letzteres kann wiederum in die Erwärmung des Schweißbrenners und in die Widerstandserwärmung des Strom-Wasser Kabels unterteilt werden. Eine Unterteilung des Energieflusses bei Schweißverfahren mit abschmelzender Elektrode kann in Lichtbogen- und Tropfenenergie erfolgen. Dadurch kann beispielsweise die Frage geklärt werden, wodurch der Einbrand in den Grundwerkstoff erzeugt wird. Zudem soll der Anlagenwirkungsgrad zur Erzeugung der Schweißleistung parameterabhängig betrachtet werden.
Für die Messung der verschiedenen Wärmemengen und Energieflüsse werden unterschiedliche Mess- und Analysemethoden entwickelt und validiert, welche in dieser Arbeit analysiert und die Ergebnisse diskutiert werden.

Diese Untersuchungen werden an den folgenden Schweißverfahren durchgeführt:

- nicht abschmelzende Elektrode	- Wolframinertgasschweißen (WIG)
	- Plasmaschweißen
- abschmelzende Elektrode	- Metallschutzgasschweißen (MSG)
	- Unterpulverschweißen (UP)

Hierfür wird folgende Strukturierung und Vorgehensweise verwendet:

1. Stand der Technik über Grundlagen und Definitionen zum realen Energiefluss und Energieeintrag beim Schutzgasschweißen
2. Analyse verschiedener Messmethoden zur Bestimmung des exakten Energieeintrages in das Bauteil sowie Methoden zur Ermittlung der energetischen „Verlustquellen“ und zur Unterteilung des Energieflusses von der Schweißenergiequelle zum Bauteil (z.B. Tropfenkalorimetrie).
3. Entwicklung und Validierung geeigneter Messsysteme zur Ermittlung des Energieflusses beim Fügen - Analyse der Messgenauigkeiten der Systeme sowie die Überprüfung der Anwendbarkeit für verschiedene Fügeverfahren
4. Untersuchung von parametrischen Einflussgrößen auf den Wirkungsgrad und den Wärme- und Energiefluss von Schutzgasschweißverfahren mit abschmelzender und nicht abschmelzender Elektrode
5. Auswertung und Interpretation der realen Energieflüsse beim Lichtbogenschweißen
6. Vorschläge zur sinnvollen Überarbeitung aktueller Regelwerke (z.B. DIN EN 1011-1) Dabei wird unter anderem die Frage geklärt, in wie weit die in der Arbeit ermittelten absoluten Wirkungsgrade in Verbindung mit den bekannten relativen Wirkungsgraden in Bezug auf das Unterpulverschweißen gesetzt werden können.

3 Stand der Forschung und Technik- Literaturrecherche

3.1 Temperaturverteilung und Abkühlverhalten im Schweißgut

Schweißverfahren schaffen eine stoffschlüssige Verbindung der jeweiligen Fügepartner. Diese entsteht durch eine örtlich und zeitlich begrenzte, konzentriert eingebrachte Wärme auf die Oberfläche der zu fügenden Bauteile. Durch den raschen Temperaturanstieg oberhalb der Schmelztemperatur der Fügepartner hinaus und die anschließend sehr schnelle Ableitung der Wärme von der Schweißstelle in den Grundwerkstoff sind diese Temperaturfelder, wie sie beim Schweißen auftreten, inhomogen und instationär. Gründe hierfür sind unter anderem die hohen Temperaturdifferenzen zwischen dem Schmelzbad und dem umgebenden Werkstoff. Hier treten unter anderem Differenzen zwischen Schmelze und Grundwerkstoff von bis zu ΔT = 2.500 K auf.
So bewirkt beispielsweise eine rasche Abkühlung kohlenstoffhaltiger Stähle eine Aufhärtung und eine Verminderung der Duktilität des Grundwerkstoffes im Nahtbereich (Martensitbildung). Das Werkstoffverhalten beim Schweißen von modernen Stählen mit Streckgrenzen über R_e = 600 MPa war Gegenstand der Untersuchungen von [Zhi12]. Die Resultate zeigten, dass die resultierenden Härten in der Schweißzone fast ausschließlich von der eingebrachten Wärme durch den Schweißprozess beeinflusst werden. Um diese Abkühlung beherrschen zu können, ist eine genaue Kenntnis der eingebrachten Wärmemenge und des Werkstoffverhaltens notwendig. Zur Beschreibung des Abkühlvorganges hat sich die für eine Abkühlung von T = 800°C auf T = 500°C benötigte Zeit als geeignet herausgestellt. Mit Formel 3.1 kann die Zeit zum Abkühlen bei zweidimensionaler Wärmeableitung bestimmt werden. Beim Verschweißen von un- und niedriglegierten Stählen gilt näherungsweise Formel 3.2 [DIN01].

Formel 3.1
$$t_{8/5} = \frac{Q^2}{4 * \pi * \lambda * \rho_{Wst} * c * b^2} * \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right]$$

Formel 3.2
$$t_{8/5} = (4300 - 4{,}3 * T_0) * 10^5 * \frac{Q^2}{b^2} * \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] * F_2$$

Beim Schweißen relativ dicker Bleche (Überschreitung der Übergangsblechdicke) ist die Abkühlzeit von der Blechdicke unabhängig. Es liegt eine dreidimensionale Wärmeableitung vor, wodurch der $t_{8/5}$-Wert nach Formel 3.3 berechnet werden muss. Für unlegierte und niedriglegierte Stähle gilt die Formel 3.3 (unter Verwendung des geeigneten Formfaktors- F_3). Die vereinfachte Form für das Schweißen von un- und niedriglegierten Stählen ist Formel 3.4 [DIN01] dargestellt.

Formel 3.3
$$t_{8/5} = \frac{Q}{2 * \pi * \lambda} * \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right) - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right) \right]$$

Formel 3.4
$$t_{8/5} = (6700 - 5 * T_0) * Q * \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right) - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right) \right] * F_3$$

Eine wichtige Kenngröße für ein Temperaturfeld ist die eingebrachte Wärmemenge Q. Für Lichtbogenschweißverfahren berechnet sich die eingebrachte Wärme bzw. die Schweißenergiemenge nach Formel 3.5, wobei die Streckenenergie mit Formel 3.6 berechnet wird.

Formel 3.5 $$Q = E_S * \eta * l_s$$

Formel 3.6 $$E_S = \frac{P_S}{v_S}$$ v_S in mm/s

Der Übergang von der zwei- zur dreidimensionalen Wärmeableitung geschieht bei der Übergangsblechdicke $b_Ü$ (Formel 3.7), die durch Gleichsetzen der Formel 3.1und Formel 3.3 ermittelt wird.

Formel 3.7 $$b_Ü = \sqrt{\frac{Q}{2 * c * \rho} * \left[\left(\frac{1}{500 - T_0}\right) + \left(\frac{1}{800 - T_0}\right)\right]}$$

Das Umwandlungsverhalten des abkühlenden Austenits im Temperaturbereich zwischen T = 800 °C und T = 500 °C beeinflusst die Stahleigenschaften stark. Innerhalb dieses Temperaturfensters finden entscheidende Umwandlungsvorgänge im Grundwerkstoff statt. Dieser Temperatur-Zeit-Verlauf an beliebigen Orten der Wärmeeinflusszone wird unter anderem von folgenden Schweißbedingungen beeinflusst [Sch04, S. 379…380]:

- Wärmeeinbringung
- chemische Zusammensetzung des Grund- und Zusatzwerkstoffes
- Schweißverfahren (resultierender effektiver oder thermischer Wirkungsgrad)
- Vorwärmtemperatur
- Werkstückdicke, d.h. die Art der Wärmeabfuhr (zwei- oder dreidimensionale Wärmeableitung)
- Lage der Schweißnaht im Bauteil
- Nahtform und
- Art des Lagenaufbaus.

Um die mechanisch technologischen Gütewerte der Verbindungen zwischen den temperatursensiblen Grundwerkstoffen zu erreichen, müssen die geforderten Angaben der $t_{8/5}$-Werte dem jeweiligen Werkstoffdatenblatt des Herstellers entnommen werden. Bei der Verarbeitung von Feinkornbaustählen mit beispielsweise dem MSG-Schweißprozess befinden sich die Abkühkzeiten der Verbindung zwischen T = 800 °C auf T = 500 °C in den zeitlichen Grenzen von $t_{8/5}$ = 5…15 s. Diese Werte sind nicht konsistent und weichen voneinander ab. So werden beispielsweise in den Schulungsunterlagen zum Schweißfachingenieur $t_{8/5}$ = 10…25 s vermittelt, so dass deutlich wird, dass diese Größe nicht allgemein erfassbar ist [Gsi09, S. 877].
Bei kleinen $t_{8/5}$-Werten ist die Übergangszeit und Sprödbruchsicherheit gering. Zudem erhöht die sehr hohe Härte (überwiegend Martensit) die Gefahr der Kaltrissbildung. Andererseits führen lange Abkühlzeiten zu geringeren Härten, wobei die Kerbschlagfestigkeit durch die Bildung weicherer Gefügebestandteile (Ferrit) verringert wird. Zugleich sinkt die Sprödbruchgefahr durch zu hohe Übergangstemperaturen [Sch04, S.379…380]. Zum Erzielen der geforderten mechanisch technologischen Gütewerte müssen, bei der schweißtechnischen Verarbeitung, die $t_{8/5}$-Werte innerhalb bestimmter Grenzen liegen. Da bei der Berechnung der eingebrachten Wärmemenge der Wirkungsgrad verwendet wird, muss der Wärmeeintrag in das Bauteil bekannt bzw. berechenbar sein.

3.2 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad gibt allgemein das Verhältnis der nutzbaren zur eingesetzten Energie an. Die dabei entstehende Differenz zwischen zugeführter und abgegebener Energie bezeichnet man als Verlustenergie. Ziel eines jeden Prozesses ist es einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen und somit die Verlustanteile kleinstmöglich zu halten.
Die Definition von Wirkungsgraden am Schweißlichtbogen erfolgt unterschiedlich, da je nach Bezugsgröße und Anwendungsgebiet andere Quotienten von Energiemengen benötigt werden (Abbildung 3-1).

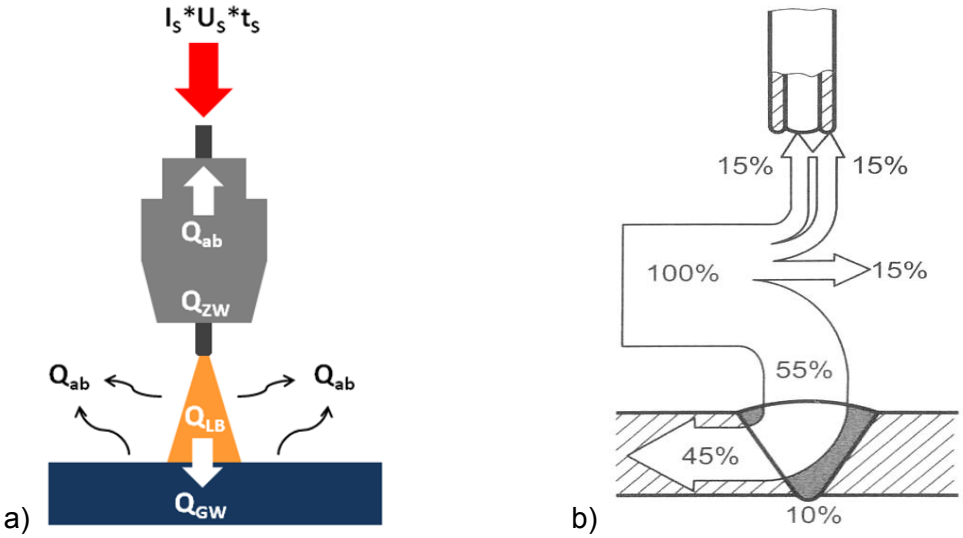


Abbildung 3-1: *Wärme- und Energiemengen am Lichtbogen*
a) *vereinfachte schematische Darstellung*
b) *Wärmebilanz des Lichtbogenhandschweißens [Mat06, S.44]*

Zur Differenzierung des Wärmeeintrages im Bauteil werden in der betrachteten Literatur folgende Wirkungsgrade und deren spezifischen Definitionen genutzt:

- Thermischer Wirkungsgrad
- Effektiver Wirkungsgrad
- Lichtbogenwirkungsgrad
- Tropfenwirkungsgrad
- Schmelzwirkungsgrad
- Prozesswirkungsgrad
- Anlagenwirkungsgrad

Bei der Wirkungsgradberechnung von Schweißprozessen werden unterschiedliche Wärmemengen bzw. Wärmebilanzen als Grundlage verwendet. Nach DuPont [DuP95] werden die Energie- bzw. Wärmemengen im Lichtbogen folgendermaßen unterteilt:

Formel 3.8 $$Q_{ges} = Q_{LB} + Q_{ZW} = Q_{ab} + Q_{Schm} + Q_{Wärmeleit}$$

Q_{LB}	- Wärmeeintrag in das Bauteil durch den Schweißlichtbogen
Q_{ZW}	- Wärmeeintrag in das Bauteil durch den abschmelzenden Zusatzwerkstoff
Q_{ab}	- Wärme- und Energieverluste an die Umgebung
Q_{Schm}	- Schmelzwärme in der Fügezone (bezogen auf das Schmelzbadvolumen)
$Q_{Wärmeleit}$	- Wärmeleitung von der Schweißnaht in den Grundwerkstoff (werkstoffspezifisch)
Q_{GW}	- gesamter Wärmeeintrag in den Grundwerkstoff

Formel 3.9 $$Q_{GW} = Q_{Schm} + Q_{Wärmeleit}$$

a) Thermischer Wirkungsgrad - efficiency of welding process

Der Thermische Wirkungsgrad beschreibt den Anteil der aus der zugeführten elektrischen Energie (entspricht der Schweißleistung) eingebrachten Wärmemenge im Bauteil (Formel 3.10). Dabei gehen auch Verlustwärmeanteile durch z.B. Metallverdampfung, Spritzerbildung, Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Wärmekonvektion aus der Lichtbogensäule in die Berechnung ein [Sch85, S. 65].

Formel 3.10 $$\eta_{th} = \frac{Q_{ges}}{P_S * t_S} = \frac{Q_{ges}}{t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt}$$ [Sch85]

Tabelle 3-1: Bandbreite des thermischen Wirkungsgrades verschiedener Literaturquellen

Prozess	thermischer Wirkungsgrad η_{th}					
	DIN EN 1011-1	DIN EN 1011-2	[Sch92]	[Mat06]	[Fah09]	[Dil05]
Unterpulverschweißen	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Lichtbogenhandschweißen	0,80	0,85		0,8...0,9	0,8…0,9	0,90
MIG-Schweißen	0,80		0,75	0,7...0,8	0,75	0,70
MAG-Schweißen	0,80	0,85	0,85	0,8...0,9	0,85	0,85
MSG- Schweißen mit Fülldrahtelektrode	0,80		0,90			
MAG-Schweißen mit Fülldrahtelektrode	0,80					
MIG-Schweißen mit Fülldrahtelektrode	0,80					
WIG-Schweißen	0,60		0,65	0,6…0,7	0,65	0,65
Plasmaschweißen	0,60					

Anhand Tabelle *3-1* wird deutlich, dass die Literaturangaben zu verfahrensspezifischen Wirkungsgraden eine Streubreite aufweisen, wobei deren Ursprung meist auf ältere Literaturangaben zurückzuführen ist. Deutlich wird zudem, dass selbst innerhalb relevanter Normen, wie in DIN EN 1011, Abweichungen auftreten.
Schon in den Lehrunterlagen zum Schweißfachingenieur werden dem späteren Anwender ungenaue Wirkungsgradangaben vermittelt. Diese beziehen sich auf die SEW 088, wonach der relative thermische Wirkungsgrad (Begriff erstmalig in [Gsi09] geprägt) für MAG-Schweißen $\eta_{th} = 0{,}85$ betragen soll, während die Norm DIN EN 1011-1 [DIN09] einen Wert von $\eta_{th} = 0{,}80$ (MAG und MIG-Schweißen) beschreibt. Andererseits wird dem MIG-Schweißprozess in den Lehrunterlagen zum Schweißfachingenieur [Gsi09, S. 881] ein Wert von $\eta_{th} = 0{,}75$ zugeordnet.
Eine Differenzierung nach regelbaren Schweißparametern, wie z.B. nach Lichtbogen-, Schutzgas- oder Zusatzwerkstoffart findet nicht statt. Die Messmethoden und Randbedingungen der jeweiligen Wirkungsgradermittlung sind zumeist nicht hinreichend dokumentiert. Somit stellt sich die Frage der Vergleichbarkeit untereinander.

b) Effektiver Wirkungsgrad – effective efficiency

Aussagefähiger für praktische Anwender ist der effektive Wirkungsgrad. Hier werden nur noch die zur Bildung der Schweißnaht erforderlichen Energieanteile, also die real im Grund- und Zusatzwerkstoff umgesetzten Energien, berücksichtigt (Formel 3.11).

Formel 3.11 $$\eta_{eff} = \frac{Q_{GW} + Q_{ZW}}{P_S * t_S} = \frac{Q_{GW} + Q_{ZW}}{t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt}$$ [Sch85]

Während neuere Literaturquellen auf den thermischen Wirkungsgrad Bezug nehmen, nutzt Schellhase [Sch85, S. 64…69] den Begriff des effektiven Wirkungsgrades zur Bilanzierung des Schweißprozesses.

Die von Schellhase beschriebenen Wirkungsgrade weisen eine gewisse Bandbreite auf und sind erstmalig nicht als statische Werte festgeschrieben (Tabelle 3-2).
Nach Aussage von Schellhase [Sch85] weisen Schweißverfahren mit abschmelzender Elektrode einen effektiven Wirkungsgrad von η_{eff} = 0,80…0,90 auf, welcher selbst bei ungünstigen Bedingungen (z.B. große Lichtbogenlänge) noch oberhalb η_{eff} = 0,60 liegt. Somit kommt er zu der Erkenntnis: „Der Schweißlichtbogen gehört zu den besten Wärmequellen, die für das Schmelzen von Metallen auf kleinstem Raum eingesetzt werden können“ [Sch85, S. 67].
Zusammenfassen wird festgestellt, dass der Effektive Wirkungsgrad eine gute Vergleichsmöglichkeit der Schweißverfahren darstellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dieser Wert die Verluste durch Wärmeableitung in das Bauteil und durch Oberflächenkonvektion beinhaltet. Die Ausblendung dieser Anteile erfolgt durch die Verwendung von Prozess- oder Schmelzwirkungsgraden.

Tabelle 3-2: Vergleich effektiver und thermischer Wirkungsgrad

Prozess	thermischer Wirkungsgrad η_{th}	effektiver Wirkungsgrad η_{eff}	
	DIN EN 1011-1	[Sch85]	Parameter
Unterpulverschweißen-Wechselstrom	1,00	0,8…0,9	550…900 A
Unterpulverschweißen-Gleichstrom	1,00	0,9…0,99	550…1200 A
MIG-Schweißen	0,80	0,65..0,85	550…1100 A
MAG-Schweißen	0,80	0,8…0,84	350…400 A; 24…28 V
MAG-Schweißen mit Fülldrahtelektrode	0,80	0,83…0,86	370…450 A; 25…28 V
WIG-Schweißen	0,60	0,45…0,75	40…200 A

c) Lichtbogenwirkungsgrad – arc efficiency

Ebenfalls üblich ist der Begriff des Lichtbogenwirkungsgrades, welcher eine Vereinfachung des effektiven Wirkungsgrades nach Schellhase [Sch85]darstellt. Dieser findet Anwendung bei Prozessen mit nicht abschmelzender Elektrode, bei denen kein Zusatzwerkstoff zugeführt wird (Formel 3.12). Durch den Einsatz einer geeigneten Messapparatur (z.B. Rohrkathode) ist es möglich auch für Prozesse mit abschmelzender Elektrode den Lichtbogenwirkungsgrad zu ermitteln. Hierfür muss der abgeschmolzene Zusatzwerkstoff (Tropfen) vom Lichtbogen selektiert werden. Beim Lichtbogenwirkungsgrad wird nur die vom Werkstück aufgenommene Wärmeenergie berücksichtigt, welche ausschließlich durch den Energieeintrag des Lichtbogens verursacht wird.

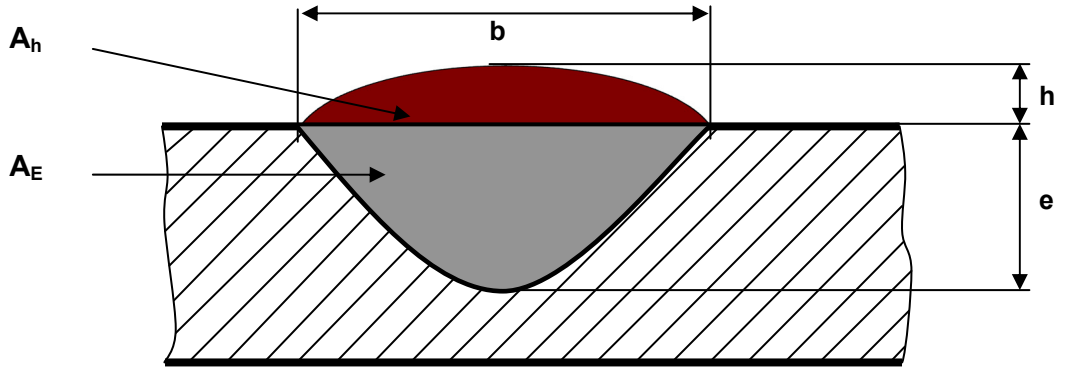
Formel 3.12
$$\eta_{LB} = \frac{Q_{GW}}{P_S * t_S} = \frac{Q_{GW}}{t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt}$$
[Sch85] [DuP95]

d) Tropfenwirkungsgrade – droplet efficiency/heat content

Der Tropfenwirkungsgrad kann nur bei Schweißverfahren mit abschmelzender Elektrode ermittelt werden. Hierfür ist es notwendig, dass der geschmolzene Zusatzwerkstoff durch eine geeignete Apparatur (z.B. Rohrkathode, wie in Abschnitt 4.4 Absatz c) beschrieben) vom Lichtbogen selektiert wird. Die Tropfen fallen im Anschluss in ein darauf angepasstes Messsystem (z.B. Tropfenkalorimeter), in welchem deren Energieinhalt ermittelt werden kann. Die Berechnung wird in Abschnitt 4.6 Absatz b) näher erläutert.
Dabei beschreibt der Tropfenwirkungsgrad das Verhältnis zwischen der eingebrachten Energie der Tropfen in das Kalorimetermedium zur entnommenen Schweißenergiemenge aus der Schweißenergiequelle (Formel 3.5).

e) Schmelzwirkungsgrad – melting efficiency

Ist die in einer sehr dünnen Schicht der festen Bauteiloberfläche absorbierte Schweißleistung größer, als die pro Zeiteinheit durch Wärmeleitung abgeführte Energie, so findet an dieser Stelle ein Phasenübergang bzw. eine Aggregatzustandsänderung statt. Je schneller und intensiver dieser Wärmeeintrag erfolgt, desto mehr Werkstoff kann geschmolzen werden. Dabei liefert der Schmelzwirkungsgrad eine Aussage über den Energiefluss und die Energiemenge im Bauteil.
Eine Vielzahl verschiedener Parameter beeinflussen die Qualität des Schweißgutes, die metallurgischen Eigenschaften und die Nahtform. In Abbildung 3-2 sind die wichtigsten geometrischen Größen des Querschnittes einer Schweißnaht dargestellt. Diese Nahtgeometrie kann entscheidend durch das Variieren der Schweißparameter beeinflusst werden [Mat06, S. 83] und ist für die Größe der Wärmeeinflusszone sowie für die zu erwartenden Spannungen und Verformungen im Werkstück ausschlaggebend. Das Verhältnis zwischen aufgeschmolzenem Grund- und Zusatzwerkstoff wird durch die Aufmischung γ beschrieben.



A_N in mm²:	Nahtquerschnitt	h in mm:	Höhe
A_E in mm²:	Einschweißquerschnitt	e in mm:	Einschmelztiefe
A_h in mm²:	Querschnitt der Nahtüberhöhung	b in mm:	Schweißnahtbreite

$\gamma = A_E/A_N*100$ Aufmischung in %

Abbildung 3-2: Nahtquerschnitt A_N beim Schweißen mit abschmelzender Elektrode

Als Grundlage zur Berechnung des Schmelzwirkungsgrades wird zunächst, mit Hilfe eines Querschliffes durch die Fügezone, die Schmelzbadfläche bestimmt. Multipliziert mit der Nahtlänge kann im Anschluss das Schmelzbadvolumen V_{Schm} berechnet werden. Wird die theoretisch notwendige Energie zum Aufschmelzen des Schmelzbadvolumens V_{Schm} (Formel 3.13) im Verhältnis zur real eingebrachten Schweißenergiemenge im Bauteil gesetzt, kann der Schmelzwirkungsgrad berechnet werden [Uno04], [She12]. Der Schmelzwirkungsgrad (Formel 3.14) beschreibt das Verhältnis der theoretisch notwendigen Energie bzw. Wärme zum Aufschmelzen des Grund- und Zusatzwerkstoffs Q_{Schm} (Formel 3.13) zur umgesetzten Energie bzw. Wärme im Bauteil Q_{GW} [DuP95], [Evan]. Auf Grund der Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität des Grundwerkstoffes $c_{Wst(T)}$ von der Temperatur wurde in dieser Arbeit der Verlauf der spezifischen Wärmekapazität anhand der Legierungsbestandteile des Werkstoffs simuliert. Das Temperaturintervall ist dabei begrenzt von der Ausgangstemperatur des Bauteils und der Temperatur des geschmolzenen Grundwerkstoffes in der Schmelze. Laut Messungen von Probst [Pro82] betragen die Temperaturen in der Stahlschmelze maximal T_{Schm} = 1.800 °C.
Das arithmetische Mittel der Simulation mit dem Programm JMatPro®, für einen Standard Baustahl (S 235; Werkstoffnummer 1.0038), der spezifischen Wärmekapazität im Temperaturbereich zwischen T = 20 °C und T = 1.600 °C ergibt ein Wert von $c_{Wst(T)}$ = 0,685 J/(g*K). Diese spezifische Wärmekapazität wird in dieser Arbeit für die Kalkulation des Schmelz- und Tropfenwirkungsgrades verwendet.

Formel 3.13 $$Q_{Schm} = V_{Schm} * \rho_{Wst} * (T_{Schm} - T_0) * \int_{T_0}^{T_{Schm}} C_{Wst_{(T)}} * dT + V_{Schm} * \rho_{Wst} * H_{Wst}$$

Formel 3.14 $$\eta_{Schm} = \frac{Q_{Schm}}{Q_{GW}} = \frac{Q_{Schm}}{\eta_{LB} * t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt} = \frac{Q_{Schm}}{\eta_{eff} * t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt}$$

In [Chi00] wird der Schmelzwirkungsgrad fälschlicherweise als thermischer Wirkungsgrad definiert, welcher den Anteil der eingekoppelten Laserenergie zur Bildung des Schmelzbades im Verhältnis zur ausgegebenen Energiemenge des Lasers beschreibt. Nach Rykalin [Ryk57] beträgt der Schmelzwirkungsgrad für eine halbkreisförmige Nahtfläche (z.B. beim Laser- Wärmeleitungsschweißen) maximal $\eta_{Schm} = 0{,}368$ und bei einer bewegten Linienquelle mit schmaler und tiefer Naht (z.B. beim Lasertiefschweißen) maximal $\eta_{Schm} = 0{,}484$. Da die Leistungsdichte beim WIG- und Plasmaschweißen geringer, als die des Laserstrahlschweißens ist, werden theoretisch geringere Schmelzwirkungsgrade für diese Prozesse erwartet. In [Chi00] wurde festgestellt, dass die Blechdicke keinen Einfluss auf den Schmelzwirkungsgrad hat.
Auch Marder [Mar96] stellte fest, dass sich der Schmelzwirkungsgrad asymptotisch einem Maximum von $\eta_{Schm} = 0{,}484$ annähert. Mit steigender Leistungsdichte der Schweißverfahren bzw. höherer Streckenenergie steigt der Schmelzwirkungsgrad an. Allgemein erzielen die Verfahren mit abschmelzender Elektrode, nach Aussagen von Marder [Mar96], die höchsten Werte.

Dabei ist die Schmelzwärme Q_{Schm} werkstoff-, bauteil- und prozessspezifisch abhängig von:

- Schmelzenthalpie,
- Wärmeleitungskoeffizient,
- Materialstärke,
- Schweißgeschwindigkeit und
- Schweißleistung [Eva98].

f) Prozesswirkungsgrad – process efficiency

Die Berechnung des Schmelzwirkungsgrades ist in der Literatur nicht genau definiert. So wird dieser laut dem chinesischen Schweißinstitut in Harbin [Zha11] aus dem Produkt aus der Schmelzwärme und der zugeführten elektrischen Schweißenergiemenge (Formel 3.5) bestimmt. Diese Berechnungsmethode beschreibt somit einen um den Faktor des effektiven Wirkungsgrades η_{eff} geringeren Schmelzwirkungsgrad, wie durch Formel 3.15 beschrieben wird. Um Klarheiten in der Berechnungsgrundlage und Begriffsdefinition zu schaffen, wurde hierfür der Begriff des Prozesswirkungsgrades eingeführt [Chi00].

Formel 3.15 $$\eta_{Prozess} = \frac{Q_{Schm}}{P_S * t_S} = \frac{Q_{Schm}}{t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt}$$

Der Prozesswirkungsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen der theoretisch notwendigen Energie zur Erzeugung des Schmelzbadvolumens und der real von der Schweißenergiequelle abgegebenen Schweißenergiemenge. Werden für die Analyse des Wärmeeintrages bzw. des Schmelzeanteils strahltechnische Fügeverfahren herangezogen, so definiert sich der effektive Wirkungsgrad η_{eff} in diesem Fall als Einkoppelgrad η_{Ein} der eingesetzten Strahlleistung in den Werkstoff. Da der effektive Wirkungsgrad η_{eff} bzw. Einkoppelgrad η_{Ein} laut Energieerhaltungssatz immer kleiner als Eins ist, ist der erzielbare Prozesswirkungsgrad stets geringer, als der Schmelzwirkungsgrad.

Angesichts der physikalischen Eigenschaften, möglichen Prozess- und Fügeparametern und unterschiedlichen Werkstoffe ergeben sich auch hier spezifische Unterschiede der Prozesswirkungsgrade.

g) Anlagenwirkungsgrad – system efficiency

Der Anlagenwirkungsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen der aus dem Versorgungsnetz entnommenen elektrischen Leistung und der ausgegeben bzw. bereitgestellten Schweißleistung der Schweißenergiequelle (Bestimmung mit Formel 4.1). Die Berechnung des Wirkungsgrades erfolgt nach Formel 3.16. Der verwendete Messaufbau zur Bestimmung der Verbrauchsgrößen wird in Abbildung 4-1 dargestellt.

Formel 3.16
$$\eta_{Anlage} = \frac{P_S}{P_{Netz}}$$

h) Problematik relativer und absoluter Wirkungsgrad

Wie in den Unterlagen zum Schweißfachingenieur [Gsi09] beschrieben, existiert eine Differenzierung zwischen absoluten und relativen thermischen Wirkungsgrad. In allen betrachteten Regelwerken (siehe auch Tabelle 3-1) wird dem Unterpulverschweißen ein relativer thermischer Wirkungsgrad von $\eta_{th} = 1{,}00$ zugeordnet. Andere Literaturquellen [DuP95] $\eta_{th} = 0{,}84$, [Pro82] $\eta_{th} = 0{,}65$, [Tre90] $\eta_{th} = 0{,}48…0{,}58$, [Mül83] $\eta_{th} = 0{,}70…0{,}85$ und [Tus99] $\eta_{th} = 0{,}92$ gehen davon aus, dass der absolute thermische Wirkungsgrad des Unterpulverschweißens unter $\eta_{th} = 1{,}00$ liegen muss. Darüber hinaus sind technisch keine Prozesse bekannt, wo 100 % der Energie in Wärme umgewandelt werden kann. Folglich benutzen alle bekannten Regelwerke den relativen thermischen Wirkungsgrad im Verhältnis zum Unterpulverschweißen. Um den realen Wärmeeintrag als Berechnungsgrundlage zu nutzen, sollten folglich die Regelwerke dahin angepasst werden, absolute Wirkungsgrade zu verwenden. Diese Arbeit hat unter anderem das Ziel die Grundlage für die geforderte Anpassung der Regelwerke zu liefern.

3.3 Kalorimetrie

Kalorimeter sind Apparaturen, die Wärmemengen messen, welche durch physikalische, chemische und bzw. oder biologische Vorgänge hervorgerufen werden. Wärme beschreibt den Transport thermischer Energie, die an einen Energieaustausch gekoppelt ist und nur dann auftritt. Dieser Energieaustausch wird Wärmestrom genannt. Wärme ist somit ein definierter Austausch von Energie zwischen zwei Systemen innerhalb einer bestimmten Zeit, wobei der Austausch stets vom wärmeren zum kühleren System stattfindet – 2. Hauptsatz der Thermodynamik [Pla08, S. 76]. Bezogen auf den Schweißprozess bedeutet dies, dass der Energie- bzw. Wärmefluss in den Grundwerkstoff durch den elektrisch leitenden Lichtbogen, dem Schutzgas sowie durch den abschmelzenden Zusatzwerkstoff erfolgen muss.
Definiert wird ein Kalorimeter als eine Apparatur, mit welcher Wärmemengen gemessen werden können. Anwendungen sind zum Beispiel die Bestimmung der spezifischen Wärme verschiedener Stoffe, die Bestimmung von Umwandlungswärmen bei Phasenübergängen oder die Messung der Reaktionswärme von chemischen Prozessen [Hem80, S. 1].
Die Kalorimetrie wird innerhalb dieser Arbeit benutzt, um die Energieflüsse (z.B. Wärmeeintrag in das Bauteil) von Schutzgasschweißverfahren zu messen, mit dem Ziel den spezifischen Wirkungsgrad der Prozesse ermitteln zu können.

3.3.1 Kalorimeterprinzipien für die Energiemessung in der Fügetechnik

a) Seebeck-Kalorimeter

Das Seebeck-Kalorimeter misst Wärmemengen mit Hilfe von Thermoelementen, welche in der isolierten Außenwand des Kalorimeters eingelassen sind. Die Funktionsweise der Thermoelemente beruht auf der Nutzung des Seebeck-Effekts. Dieser beschreibt die Abhängigkeit der thermischen Spannung von der Temperatur. Die Thermospannung ist umso größer, desto höher die Temperatur ist. Thermoelemente eigenen sich durch ihre Temperaturbeständigkeit von bis zu $T = 2.300\,°C$ besonders für die Erfassung von Temperaturen bei Schweißprozessen.
Das Seebeck-Kalorimeter (Abbildung 3-3) ist von einer isolierenden Außenwand, in der die Thermoelemente eingebettet sind, umgeben. Im Inneren befindet sich der Probekörper, welcher auf Grund seiner guten thermischen Leitfähigkeit meist auf einer Kupferplatte positioniert wird. Das stellt einen optimalen Wärmeübergang zwischen dem Probekörper und den Thermoelementen sicher. Um eine Erwärmung des Kalorimeters durch äußere Einflüsse (z. B. Sonneneinstrahlung) zu verhindern, wird dieses durch eine externe Kühlung temperiert. Somit werden die Untersuchungen bei konstanten Umgebungsbedingungen durchgeführt, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherstellt. Der temporäre Verlauf der entstehenden Thermospannung wird mit geeigneter Messtechnik aufgezeichnet und kann später durch Integration des Temperaturverlaufes über die Zeit ausgewertet werden. Nach vorheriger Kalibrierung des Messsystems wird der jeweiligen Thermospannung eine definierte Temperatur zugeordnet. Im Anschluss kann mit Formel 3.17 die eingebrachte Wärmemenge ermittelt werden.

Formel 3.17
$$Q_{GW} = c_{H_2O} * m_{H_2O} * \Delta T$$

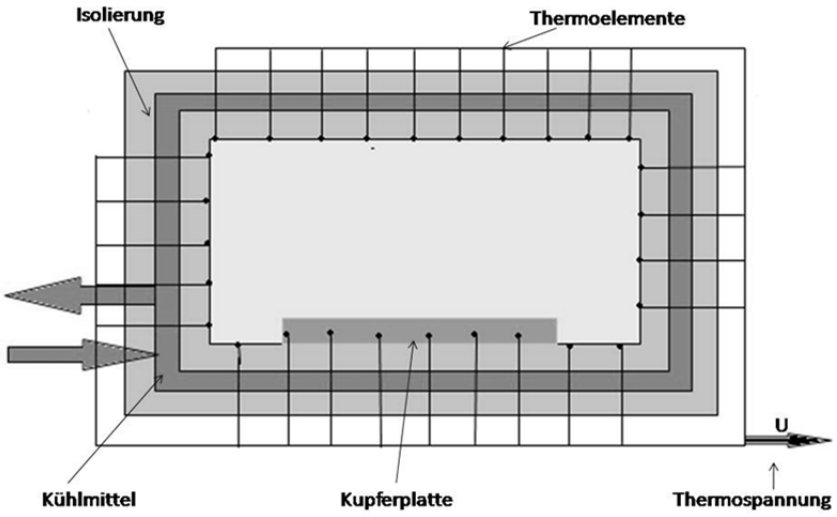


Abbildung 3-3: Prinzipskizze eines Seebeck-Kalorimeters

Dieser Kalorimetertyp ist nach der Kalibrierung einfach handhabbar, besitzt jedoch einige Nachteile. Die Abmessungen des Kalorimeters sind beschränkt und somit für Schweißversuche relativ ungeeignet. Zudem wird nicht im Innenraum geschweißt, da das Kalorimeter erst nach dem Schweißvorgang bestückt und verschlossen wird. Weiterhin ist die Messung sehr zeitaufwändig, d. h. es dauert etwa fünf Stunden bis ein vollständiger Temperaturausgleich erfolgt und die Thermospannung Null ist. Der größte Nachteil ist die in der Literatur [Ege11] beschriebene hohe Ungenauigkeit von 7…9 %, welche durch die Verkettung von Messfehlern, wie etwa den Wärmeverlusten bis zum und beim Bestücken des Kalorimeters, den Spannungsverlusten in den Leitungen oder die Unsicherheit beim Umrechnen der Spannung in eine Temperatur entsteht.

Laut DuPont [DuP95] beträgt jedoch die Messungenauigkeit des Seebeck-Kalorimeters nach dem Bestücken und Schließen nur 1 % der ins Bauteil eingebrachten Energie.
Die größte Ungenauigkeit bei Schweißprozessuntersuchungen verursacht die Messung instationärer Anteile. Verwertbar für die Schweißprozessanalyse ist nur der quasistationäre Bereich in der Mitte des Fügeprozesses. Als instationäre Anteile werden Abschnitte eines Schweißprozesses bezeichnet, wo eine rasche Temperaturänderung bei nicht konstantem Schweißstrom oder Schweißspannung auftritt (genauer: Schweißnahtanfang und -ende). Da auf Grund der kleinen Probekörpergeometrie die instationären Bereiche bei der Zündung und beim Abbruch des Lichtbogens einen zu großen Anteil (bis zu 15 %) einnehmen, hat dies einen sehr großen Einfluss auf den Gesamtfehler. Gleichzeitig wird der Einfluss auf die zu untersuchenden Fügeparameter stark verfälscht.

b) Differenz-Temperatur-Kalorimeter

In einem Differenz-Temperatur-Kalorimeter wird die Temperaturdifferenz zwischen dem Probekörper und einem Referenzmaterial aufgezeichnet. Am Anfang der Messung besitzen der Probekörper und das Vergleichsstück die gleiche Temperatur. Während der Probekörper erwärmt wird, verbleibt das Vergleichsstück in einer definierten Umgebung, wobei die Temperaturverläufe beider Objekte aufgezeichnet werden (Prinzip bei Difference Scanning Calorimetry -DSC-Analyse). Durch Integration des zeitlichen Verlaufes der gemessenen Temperaturdifferenz zwischen Probekörper und dem Vergleichsstück kann, mit Hilfe der Kenntnis beider Massen, die eingebrachte Wärmemenge sowie notwendige Energien für beispielsweise Gefügeumwandlungen oder Aggregatzustandsänderungen gemessen und berechnet werden. [Hem89, S. 100]
Weiterhin ist es möglich die Wärmemenge eines Probekörpers zu ermitteln, in dem man diesen mit einem bekannten Medium umströmt. Dabei wird die Temperaturdifferenz und die Masse bzw. das Volumen des umströmenden Mediums (z.B. Wasser) bis zum Gleichgewichtszustand gemessen (Eingangstemperatur gleich Ausgangstemperatur). Die so ermittelte Energiedifferenz bzw. Wärmemenge kann mit Hilfe von Formel 3.17 berechnet werden. Den exemplarischen Aufbau des Kalorimeters zeigt Abbildung 3-4.

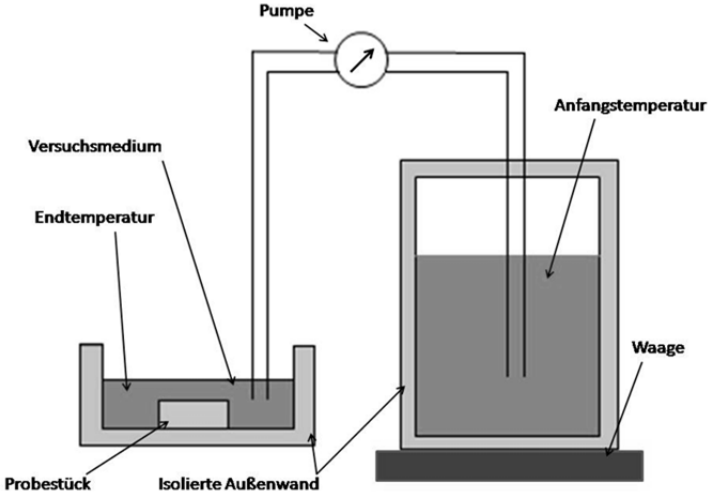


Abbildung 3-4: Prinzipskizze eines Differenz-Temperatur-Kalorimeters

Grundsätzlich führt das externe Schweißen und nachträgliche Bestücken des Kalorimeters zu ähnlichen Fehlerquellen, wie beim Seebeck-Kalorimeter. Eine geometrische Beschränkung des Probekörpers besteht bei diesem Kalorimetertyp jedoch nicht. Nachteilig ist jedoch, dass der Fügevorgang bei einigen Versuchsaufbauten extern erfolgt, was zu Wärmeverlusten bis zum Bestücken des Kalorimeters und somit zu einem erhöhten Messfehler führt.

c) Differenz-Masse Kalorimeter

Das Differenz-Masse Kalorimeter besteht im Wesentlichen aus einem isolierten, nach oben geöffneten Gefäß, welches sich auf einer hochpräzisen Waage befindet (Abbildung 3-5). Das Gefäß wird mit einem Versuchsmedium gefüllt und die Masse des Gefäßes mit dem eingebrachten Versuchsmedium bestimmt. Der Probekörper wird in das gefüllte Kalorimetergefäß getaucht und nach erfolgtem Temperaturausgleich zwischen Probekörper und dem Versuchsmedium wird die Masse an verdunstetem Versuchsmedium bestimmt. Für die Untersuchung des Schweißprozesses muss der Probekörper am Start der Messung Raumtemperatur haben. Nach dem Schweißvorgang wird der gefügte Probekörper in das Versuchsmedium getaucht und die Verdunstungsmenge bestimmt. Die Massedifferenz zwischen der Verdunstung des ungefügten und des gefügten Probekörpers widerspiegelt die eingebrachte Fügewärme bzw. Schweißenergie. Hierfür ist es zwingend erforderlich, dass die Wärmemenge ausreicht, um eine Aggregatzustandsänderung des Versuchsmediums zu erreichen. Beispielsweise kann dafür flüssiger Stickstoff verwendet werden, da dessen Verdunstungstemperatur (T_V = -196 °C) weit unterhalb der normalen Raumtemperatur liegt. Das stellt sicher, dass die gesamte eingebrachte Energie des Probekörpers ermittelt wird. Diese Wärmemenge wird mit Formel 3.18 berechnet.

Formel 3.18 $$Q = \Delta m_{KM} * (c_{KM} * (T_{Siede_{KM}} - T_{Anfang_{KM}}) + h_{Verd_{KM}})$$

Vorteilhaft ist das präzise und einfache Messen der eingebrachten Wärmemenge. Auf Grund des notwendigen zweimaligen Eintauchens des Probekörpers in das Versuchsmedium und das wiederholte Erwärmen des Probekörpers auf Ausgangstemperatur, ist der Zeitaufwand pro Messung nicht unerheblich.

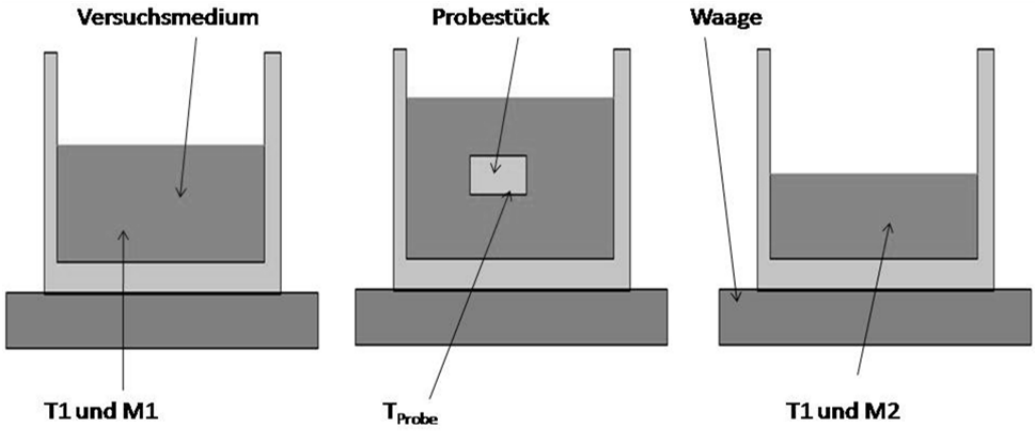


Abbildung 3-5: Prinzipskizze und Ablaufplan eines Differenz-Masse-Kalorimeters (Bedingungen: T_{Probe} > T1; Masse M1 > Masse M2)

Die Nachteile des Differenz-Masse Kalorimeters sind ähnlich denen des Seebeck-und Differenz-Temperatur-Kalorimeters. Der Wärmeverlust während und bis zum Bestücken, die Messunsicherheit der Waage und die Abstrahlung des Probekörpers während des Erwärmens, wie etwa beim Schweißen, werden nicht berücksichtigt und führen zu Messfehlern. Gleichzeitig sind die Gefahren und Sicherheitsbestimmungen beim Arbeiten mit flüssigem Stickstoff nicht zu verachten. Auf Grund fortschreitender Energieverluste an die Umgebung muss die Probengeometrie kurz gehalten werden bzw. mit einer hohen Schweißgeschwindigkeit gearbeitet werden. Dadurch sinkt die Sensibilität des Messsystems und der Anteil des stationären Schweißzustandes ist reduziert.

d) Differenz-Druck Kalorimeter

Der Aufbau des Differenz-Druck Kalorimeters ähnelt dem des Differenz-Masse Kalorimeters mit dem Unterschied, dass das Gefäß hermetisch dicht verschlossen ist und somit eine Druckerhöhung im Inneren nach der Energieeinbringung entsteht (Abbildung 3-6). Voraussetzung für die Drucksteigerung ist, dass der Probekörper genügend Energie aufgenommen hat, um eine Reaktion im Versuchsmedium (Ausdehnung bzw. Verdampfung) zu bewirken. Nachdem der Ausgangsdruck und die Ausgangstemperatur im Kalorimeter bestimmt wurden, erfolgt die Bestückung mit dem erwärmten Probekörper. Das Kalorimetergefäß wird verschlossen und der Temperatur- bzw. Energieausgleich zwischen Versuchsmedium und dem Probestück erfolgt. Dabei expandiert das Medium und der Druck im Inneren des Kalorimeters steigt an.
Aufgrund der Druck- und Temperaturdifferenz im Kalorimetergefäß kann mit Hilfe von Formel 3.19 (Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases) die Masse des expandierten Versuchsmediums ermittelt und daraus die eingebrachte Wärmemenge mit Formel 3.20 bestimmt werden.

Formel 3.19

$$m = \left(\frac{p_2}{T_2} - \frac{p_1}{T_1} \right) * \left(\frac{V}{R_m} \right)$$

Formel 3.20

$$Q = m * c_V * \Delta T$$

Da extern geschweißt wird und die Probekörpergeometrie durch das Kalorimeter beschränkt ist, sind nicht unerhebliche Energieverluste bis zum Bestücken zu verzeichnen. Auch die Verluste bis zum vollständigen Verschließen des Kalorimeters, nach der Bestückung mit dem Probekörper, sind nicht definierbar. Auf Grund des notwendigen Schutzgases und des entstehenden Schweißrauches kann die Schweißung nicht im geschlossenen Zustand erfolgen.

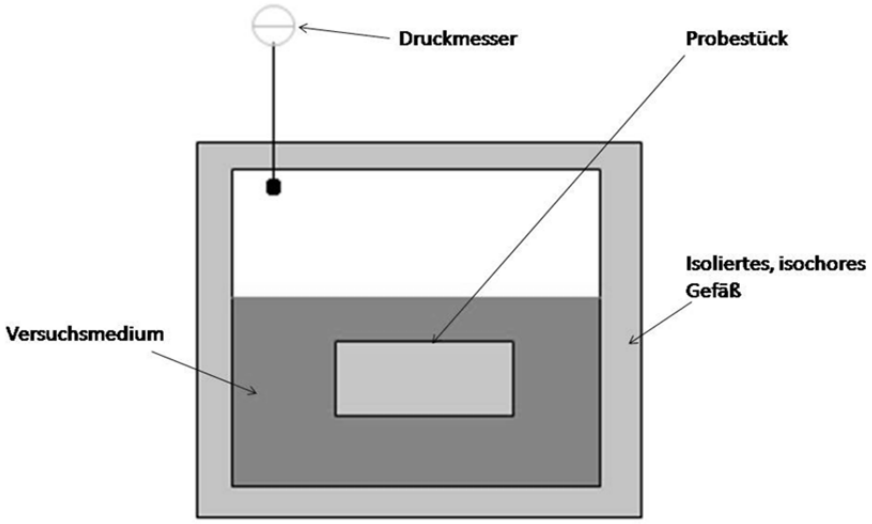


Abbildung 3-6: Prinzipskizze eins Differenz-Druck-Kalorimeters

e) Flüssigkeitskalorimeter

Flüssigkeitskalorimeter sind gegen ihre Umwelt wärmeisoliert. Hierbei findet der Wärmeaustausch über ein flüssiges Versuchsmedium, in den meisten Fällen Wasser, statt. Durch ihre hohe Genauigkeit von bis zu 99 % wird dieser Typ häufig eingesetzt.
Der Aufbau eines Flüssigkeitskalorimetergefäßes ähnelt dem eines Seebeck-Kalorimeters. Das Gefäß besteht aus einem doppelwandigen Kupferbehälter, wobei der Zwischenraum mit Wasser gefüllt ist, um eine temperaturkonstante Umgebung im Inneren des Kalorimetergefäßes zu schaffen (Abbildung 3-7). Zur Messung wird das Kalorimeter auf eine wärmeisolierte Unterlage platziert und mit dem erwärmten Probekörper bestückt. Während des gesamten Messablaufes wird die Kalorimeterflüssigkeit bewegt, was zu einem besseren Wärmeaustausch führt. Die entstehenden Temperaturänderungen werden mit Hilfe von Thermoelementen erfasst. Die Ermittlung der eingebrachten Wärmemenge erfolgt nach Formel 3.18.
Die Kombination eines Differenz-Temperatur- mit einem Flüssigkeitskalorimeter ist das Plattenkalorimeter. Hierbei wird temperierte Flüssigkeit, mit einem konstanten Volumenstrom, durch einen Metallkörper geleitet. Die Energieeinbringung durch den Fügeprozess erfolgt auf der Oberfläche des Probekörpers. Durch Wärmeleitungsvorgänge im Werkstück wird die Flüssigkeit erwärmt. Bei konstant eingebrachter Fügeleistung stellt sich nach kurzer Zeit ein stationärer Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf ein. Durch die Kenntnis des exakten Volumenstroms je Zeiteinheit kann mit Hilfe von Formel 3.17 der Wärmeeintrag in die Platte bzw. das Bauteil berechnet werden.
Mit diesem System können jedoch vorrangig Schutzgasschweißverfahren mit nicht abschmelzender Elektrode analysiert werden. Da überwiegend Kupfer als Plattenwerkstoff gewählt wird, entstehen auch verfälschte Schweißbedingungen, da einerseits die Elektronenaustrittsarbeit geringer ist und keine Aufschmelzung bzw. Aufmischung des Grundwerkstoffs erfolgt.

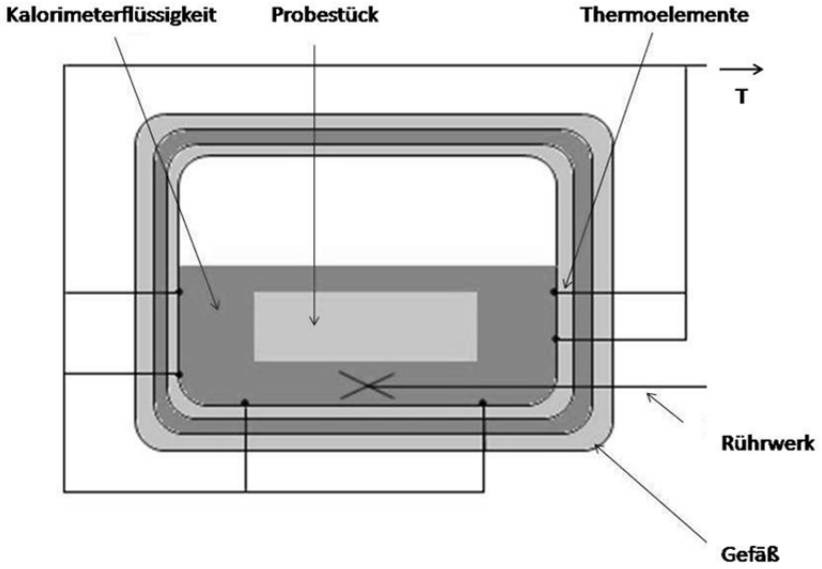


Abbildung 3-7: Prinzipskizze eines Flüssigkeitskalorimeters

Nachteile ähneln denen der beschriebenen Kalorimetertypen. Mögliche Fehlerquellen sind:

- Wärmeverluste vor und beim Bestücken des Kalorimeters
- Fehler bei der Umrechnung des Messsignals
- Verluste durch evtl. Verdunsten von Kalorimeterflüssigkeit beim Eintauchen des Probekörpers bzw. bei der Einbringung der Wärme
- Wärmeeinbringung bzw. Schweißen (je nach Versuchsaufbau) erfolgt außerhalb des Kalorimeters und dadurch verbundene Energieverluste

3.3.2 Verwendete Kalorimeter in der Fügetechnik

Grundsätzlich werden zur Quantifizierung der Effizienz von Fügeprozessen verschiedene Kalorimetertypen und Bauweisen zur Messung von eingebrachten Energiemengen im Bauteil verwendet. Eine Unterteilung der unterschiedlichen Ansätze der Messmethoden in der Schweißtechnik kann beispielsweise in folgende Kategorien erfolgen:

- vollständiger Fügeprozess außerhalb des Kalorimeters
- vollständiger Fügeprozess innerhalb des Kalorimeters

Ziel aller Verfahren ist es, die Verluste während und bis zur Messung der eingebrachten Wärmemengen kleinstmöglich zu halten, um eine genaue und reproduzierbare Methode zu garantieren.

a) Funktionsweise „vollständiger Fügeprozess außerhalb des Kalorimeters“

In [Fue89] wird die zu fügende Probe auf die massive Grundplatte eines Seebeck-Kalorimeters positioniert, welche sich auf eine in x- und y-Richtung verfahrbaren Tisch befindet. Auf diesem Konstrukt (Abbildung 3-8) erfolgt der Schweißprozess, wobei die Dimension der Schweißprobe von der Kalorimetergeometrie 150 x 150 x 75 mm (Länge x Breite x Höhe) beschränkt wird. Sofort nach Beendigung des Fügevorgangs wird das Kalorimeter vollständig geschlossen. Der hierfür verwendete doppelwandige Deckel ist mit konstant temperiertem Wasser durchflossen, so dass ein Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Messung ausgeschlossen wird. Auf Grund der unterschiedlichen Temperaturen zwischen Innenwand des Kalorimeters und der definiert gekühlten Außenwand ist eine Thermospannung messbar. Die Kalibrierung des Messsystems erfolgt durch Einbringung einer definierten Energiemenge durch einen ohmschen Widerstand ($\eta = 0{,}99$). Durch die gemessene Temperaturdifferenz ist das Verhältnis ΔT zu ΔU bekannt. Der zeitliche Verlauf der Temperatur im Kalorimeter wird aufgezeichnet. Die Berechnung der eingebrachten Wärmemenge erfolgt durch Integration der Temperatur über die Messzeit.

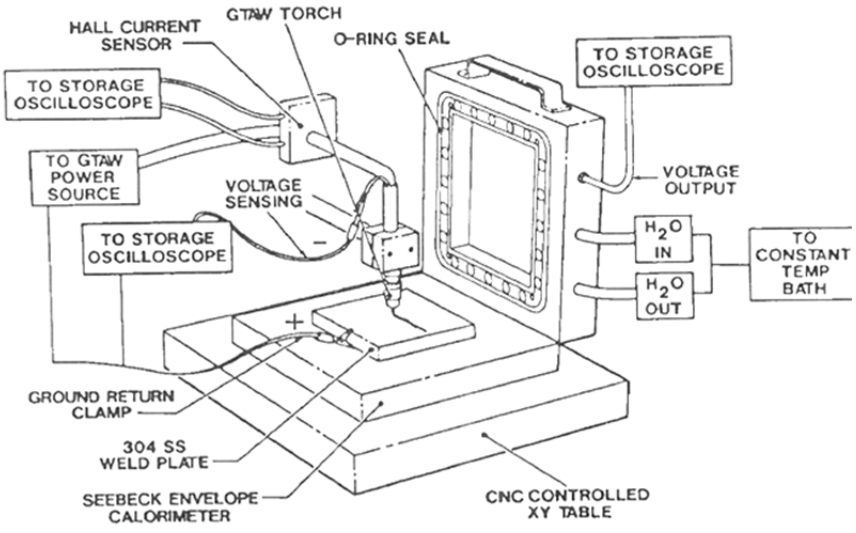


Abbildung 3-8: Seebeck Kalorimeter nach Geidt [Fue89]

Nachteilig ist die beschränkte Probengeometrie, wodurch der Einfluss instationärer Schweißbereiche relativ groß ist. Zu dem beträgt die Messzeit bis zum vollständigen Temperaturausgleich sechs Stunden, weshalb die Messgenauigkeit unter anderem durch eine zu geringe Abtastrate beeinträchtigt werden kann. Zusätzlich kann neue Wärme durch die Bauteilunterlage aufgenommen werden.

Gleichzeitig wurde ein nicht unerheblicher Wärmefluss über die Unterlage (Messung der Temperaturdifferenzen nur über den Kalorimeterdeckel) und ein Wärmeverlust bis zum Schließen des Kalorimeters verzeichnet. Nach Angaben von Geidt [Fue89] sollen diese Verluste etwa 1 % der eingebrachten Wärme betragen. Laut [Ege11] ist dieser Wert von 1 % Genauigkeit erst ab dem Punkt zu sehen, wenn das Seebeck-Kalorimeter geschlossen ist. Somit sind die zu erwartenden Ungenauigkeiten weitaus höher. Nach den Analysen von [Mal06] weisen die verwendeten Seebeck Kalorimeter eine Messungenauigkeit von circa 9 % auf. Diese ist vor allem auf die lange Messzeit und die kurze Schweißnaht zurückzuführen.
In [DuP95] wird ein Seebeck-Kalorimeter (Seebeck arc welding calorimeter) verwendet, welches in Anlehnung an [Fue89] nachgestellt wurde. Die verwendete Probenlänge ist allerdings um Δl = 25 mm auf l = 100 mm vergrößert.

Eine weitere Variante zur Bestimmung der eingebrachten Wärmemenge durch den Schweißprozess wird in [Eva98] beschrieben. Das System funktioniert nach den Prinzipien eines Differenz-Temperatur-Kalorimeters. Die Probe ist schnell lösbar auf einer thermisch isolierten Konstruktion fixiert und wird darauf geschweißt. Unmittelbar nach der Energieeinbringung wird die Probe gelöst und in ein mit Wasser gefülltes Gefäß getaucht. Dabei gibt diese die gespeicherte Energie vollständig an das Kalorimetermedium ab. Die erhitzte Probe wird allerdings in einem Zug in das Wasser getaucht. Dabei entstehen schwer kontrollierbare Verdampfungsverluste, welche in die Berechnung nur ungenau integriert werden können. Nach etwa zwei Minuten ist die Wärme gleichmäßig im Kalorimeter verteilt und die Temperaturdifferenz im Verhältnis zur Ausgangstemperatur kann ermittelt werden. Grundvoraussetzung für diese Messmethode ist, dass die Schweißprobe und Kalorimetermedium gleiches Anfangstemperaturniveau besitzen. Das Wasservolumen ist bekannt und wird als konstant betrachtet, somit kann mit Formel 3.17 die eingebrachte Wärmemenge berechnet werden. Die durchschnittlich Erwärmung des Wassers betrug ΔT = 26 K, bei einer Probenabmessung von 180 x 100 x 6,35 mm.

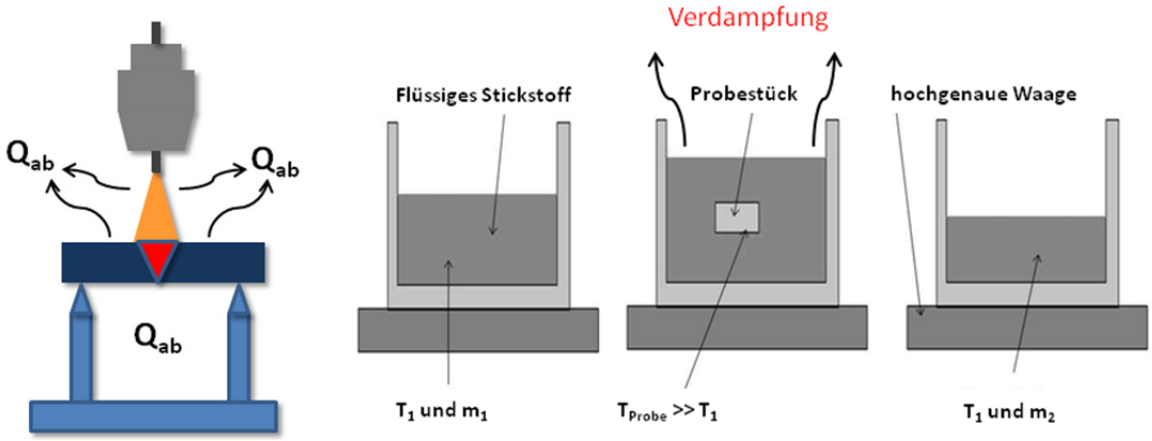


Abbildung 3-9: Externes Schweißen der Schweißprobe und anschließendes Bestücken des Flüssigkeitskalorimeters [Pep08], [Jos03], [Are11]

In [Pep08] wird der Einfluss verschiedener Schweißparameter modifizierter Lichtbogen auf den effektiven Wirkungsgrad dargestellt. Als Untersuchungsgrundlage wird ein Flüssigstickstoffkalorimeter verwendet (Abbildung 3-9), welches nach den Prinzipien eines Differenz-Masse-Kalorimeters funktioniert [Are11].
Hierfür wird ein auf drei bis vier Spitzen gelagertes Bauteil bzw. Blech mit den gewünschten Parametern geschweißt. Das Werkstück nimmt Energie auf und erwärmt sich. Im Anschluss wird die Probe unverzüglich (t_{max} = 5 s → Abstrahlungsverluste laut [Pep08] maximal 2 %) in ein isoliertes Gefäß, gefüllt mit flüssigem Stickstoff, getaucht.

Da die Verdampfungstemperatur des Stickstoffs T_V = -196 °C beträgt, wird durch die eingebrachte Probe Stickstoff verdampft und das Bauteil bis unterhalb der Verdampfungstemperatur des Kalorimetermediums abgekühlt. Der Behälter ist auf einer hochgenauen Waage positioniert, um die Massendifferenz vor und nach dem Eintauchen der Probe bestimmen zu können. Mit Hilfe von Formel 3.18 kann die eingebrachte Wärmemenge $Q_{Schweiß}$ berechnet werden. Nach der Entnahme des Bauteils bzw. Blechs erwärmt sich dieses wieder auf Raumtemperatur. Durch nochmaliges Eintauchen in den flüssigen Stickstoff kann die Wärmemenge bestimmt werden $Q_{Ausgang}$, welche die Probe im Ausgangszustand vor dem Schweißen besaß. Die Differenz zwischen $Q_{Schweiß}$ und $Q_{Ausgang}$ ist die tatsächlich eingebrachte Wärmemenge in Folge des Fügeprozesses.
Diese Bestimmungsmethode weist, nach Angaben der Autoren [Pep08], [Are11] einen systematischen Messfehler von 10 % auf. Begründet ist dies durch die Energieverluste beim Schweißen und den Wärmeverlusten bis zum bzw. während dem Bestücken.
In [Jos03] wurde mit einem Flüssigstickstoffkalorimeter zur Bestimmung des Wirkungsgrades des gepulsten und Standard MAG-Schweißens gearbeitet. Dazu wurden 63,5 x 152 x 12,7 mm Stahlproben auf vier Spitzen (Abstand 25 mm) mit unterschiedlicher Drahtvorschub- und Schweißgeschwindigkeit geschweißt. Diese wurden umgehend nach dem Fügen in ein V = 18 l fassendes, isoliertes, mit flüssigem Stickstoff gefülltes Gefäß getaucht und die gespeicherte Wärmemenge der Probe berechnet. Die Probenverweilzeit im Kalorimeter betrug t = 10 min.

Ein vergleichendes Verfahren zur Ermittlung des Schmelzwirkungsgrades wurde vom chinesischen Schweißinstitut in Harbin [Zha11] beschrieben. Hierfür wird eine Schweißprobe senkrecht zur Unterlage für das Herstellen einer steigenden oder fallenden Naht bewegt. Die Bewegung erfolgt automatisiert und mit frei regelbarer Schweißgeschwindigkeit. Dabei sind die Fügesysteme fest fixiert, beidseitig zur Schweißprobe angeordnet. Parallel wird deren Lichtbogengeometrie mit einer Hochgeschwindigkeitskamera dokumentiert (Abbildung 3-10). Gleichzeitig wird der zeitliche Verlauf der Schweißparameter aufgezeichnet. Nach Erzeugung der Schweißnaht wird die Schweißprobe mit Hilfe eines Querschliffes untersucht und die entstandene Schweißnahtfläche ermittelt. Mit Formel 3.14 kann der Schmelzwirkungsgrad durch Kenntnis der Schmelzwärme Q_{Schm} (Formel 3.13) und der eingebrachten Schweißenergiemenge (Formel 3.5) berechnet werden.
In den Untersuchungen [Zha11] wurden einerseits das beidseitige Schweißen mit dem WIG-Prozess sowie das einseitige Fügen mit dem Laserprozess und rückseitigen WIG-Prozess verglichen. Durch die Kenntnis des Energieeintrages eines bekannten Prozesses kann der Energieeintrag eines anderen Verfahrens in Relation gesetzt werden. Mit dieser Methode kann aber nur der Gesamtenergieeintrag und kein partieller Energieanteil ermittelt werden.

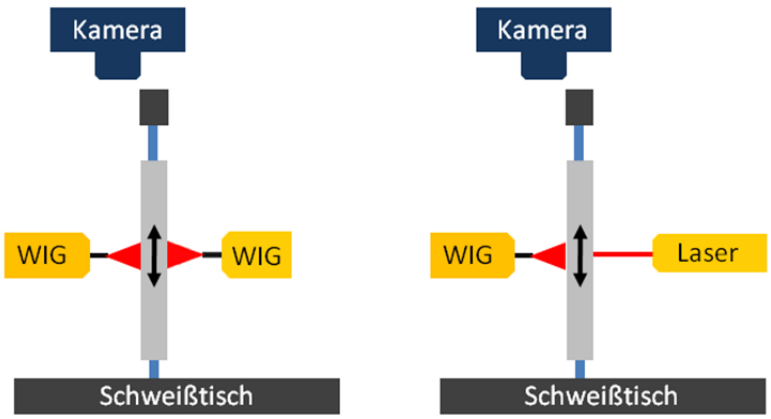


Abbildung 3-10: Schematischer Aufbau des Vergleichsverfahrens [Zha11]

b) Funktionsweise „vollständiger Fügeprozess innerhalb des Kalorimeters“

Die Messgenauigkeit der Systeme kann erheblich gesteigert werden, wenn der Fügevorgang im Kalorimeter erfolgt. Hierfür wurden im globalen Forschungs- und Entwicklungsbereich verschiedene Systeme verwendet.

Bereits 1956 wurden in [Bec56] vier Kalorimetertypen zur Messung und Aufteilung verschiedener Energieflüsse beim E-Hand-Schweißen beschrieben. In der ersten Apparatur kann die Gesamtwärmebilanz des Schweißprozesses ermittelt werden. Hierfür wird in einem geschlossenen Behältnis geschweißt (Abbildung 3-11 links). Die eingebrachte Wärmemenge im Bauteil und die Energie des Schweißrauches werden durch das umgebende Kalorimetermedium gespeichert. Anhand des bekannten Volumens und der gemessenen Temperaturdifferenz kann die Gesamtwärmemenge berechnet werden. Da die verwendeten Stabelektroden exotherm reagierten ist die Gesamtwärmebilanz größer eins.
Mit Hilfe der zweiten Apparatur wird die eingebrachte Wärmemenge im Bauteil bestimmt (Abbildung 3-11 Mitte). Beim Schweißen wird die Oberkante des Probebleches knapp über der umgebenden Kalorimeterflüssigkeit fixiert. Nach dem Schweißvorgang wird die gesamte Probe eingetaucht und die eingebrachte Wärmemenge vollständig durch das Kalorimetermedium aufgenommen. Die dabei umgesetzte Wärme beträgt etwa 75…80 % der benötigten Schweißenergiemenge, was den thermischen Wirkungsgrad des E-Hand Schweißprozesses entsprechen soll.
In der dritten Apparatur wird auf ein Rohr geschweißt, welches sich oberhalb des Kalorimetermediums befindet (Abbildung 3-11 rechts). Spritzer und Schlacke fallen in das Kalorimetermedium und deren Wärme kann bestimmt werden. Je nach Elektrodentyp beträgt dieser Anteil etwa 4…7 % der Gesamtwärmemenge. Wird dieser Anteil vom thermischen Wirkungsgrad (zweite beschriebene Messapparatur Abbildung 3-11 Mitte) subtrahiert, ist das Ergebnis der effektive Wirkungsgrad des E-Hand Schweißens.
Als letzte Messgröße wird die verbleibende Wärme im Elektrodenstummel bestimmt. Hierfür wird der Stummel unmittelbar nach dem Schweißen in ein mit Wasser gefülltes Behältnis platziert und somit die in ihm gespeicherte Wärme ermittelt. Maximal 1 % der Gesamtwärmenge verbleibt laut Becker [Bec56] im Stummel.
Werden alle Messsysteme miteinander ins Verhältnis gesetzt, ist das Resultat die energetische Bilanzierung des Schweißprozesses.

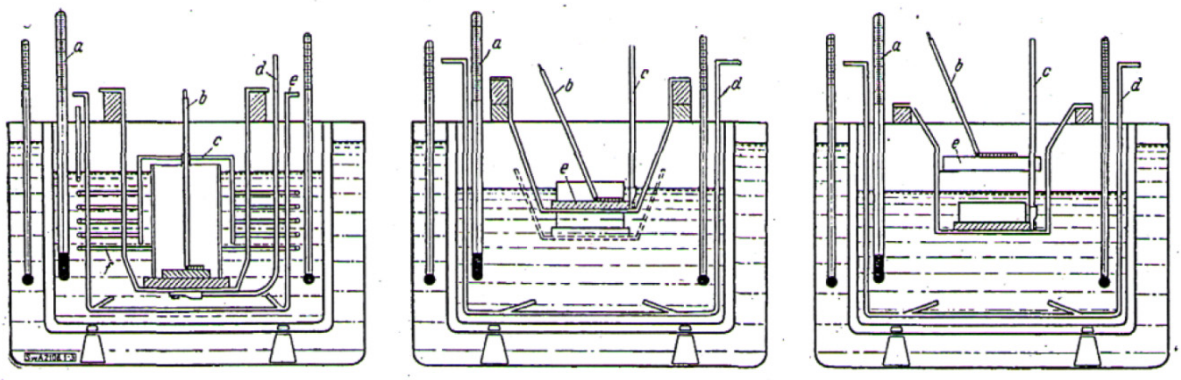


Abbildung 3-11: Schweißkalorimetertypen zur Bilanzierung des E-Hand-Schweißens
Schweißkalorimeter Gesamtwärmebilanz — Schweißkalorimeter integrierte Wärme — Schweißkalorimeter Wärme Schlacke und Spritzer

a) Beckmann-Thermometer b) Elektrode c) Schweißglocke d) Rührer e) Bauteil [Bec56]

Eine weitere Möglichkeit ist das Schweißen auf einer gekühlten bzw. Medium durchflossenen Bauteiloberfläche, ähnlich einem Rohr- oder Plattenkalorimeter (Abbildung 3-12). Die Literaturquellen [Zij89, Kat90] beschreiben ein System, bei dem der Schweißvorgang auf ein mit Wasser durchflossenem hohlen Bauteil durchgeführt wird. Dazu wird neben der Eingangs- und Ausgangstemperatur des Mediums, die Durchflussmenge während der Messzeit aufgenommen. Im Anschluss wird die durch den Schweißprozess eingebrachte Wärmemenge im Bauteil berechnet (Formel 3.17). Nachteilig ist, dass die Messmethode des Schweißens auf einer gekühlten Platte nur für Schweißprozesse mit nicht abschmelzender Elektrode geeignet ist.

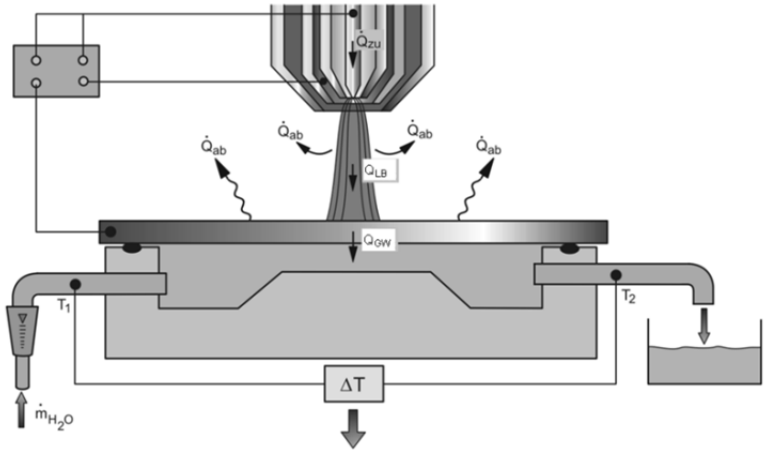
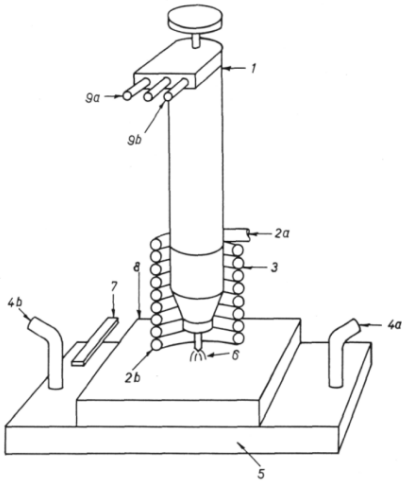


Abbildung 3-12: Plattenkalorimeter Bestimmung der Wärmeeinbringung

Eine weitere umfassende Analyse eines Schweißprozesses wurde 1979 für das WIG-Schweißen in [Ghe79] beschrieben. Hierfür wurden die Brennerkühlung, die Abstrahlungsverluste und die eingebrachte Wärmemenge im Bauteil beim WIG-Schweißen analysiert. Der schematische Messaufbau ist in Abbildung 3-13 dargestellt, wobei zur Reduzierung der thermischen Verluste an die Umgebung eine Begrenzung durch eine umliegende thermische Isolation erreicht wurde.



1 WIG-Brenner
2 Kühlkreislauf Messung Abstrahlungsverluste
3 Kupferwicklungen zur Messung der Abstrahlungsverluste
4 Kühlkreislauf Kupferblock
5 Kupferblock zur Messung des Wärmeeintrags im Bauteil
6 Lichtbogen
7 Erdungsanschluss Stromführung
8 Schweißprobe (Stahl)
9 Kühlkreislauf Messung Brennerkühlung

Abbildung 3-13: Messaufbau Gesamtwärmebilanzierung WIG-Schweißen [Ghe79]

Ein ähnlicher Aufbau wurde in [Zij89] verwendet, um den Energiefluss beim WIG-Schweißen zu untersuchen. Hierzu wird die Werkstückunterseite direkt mit Wasser gekühlt und die Durchflussmenge sowie die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf gemessen und gespeichert. Parallel wurde die Kühlleistung des WIG-Brenners mit der gleichen Messstrategie ermittelt. Dabei wird der Schweißprozess so lange auf der gekühlten Werkstückoberfläche gehalten, bis sich ein konstantes Temperaturniveau einstellt. Die Messabweichungen des Systems betragen laut Autor mindestens 4 %.

Eine erweiterte Apparatur zur umfassenden Betrachtung des WIG-Schweißprozesses wurde in [Kat90] verwendet. Hierbei wird der Schweißprozess von einer massiven Kammer umschlossen, um den Einfluss höherer Umgebungsdrücke auf den Fügeprozess zu analysieren. Das Werkstück ist eine gekühlte Kupferplatte, ähnlich Abbildung 3-12, womit die eingebrachte Wärme durch den Lichtbogen bestimmt wird. Die Messungenauigkeit bei der Ermittlung der Bauteilerwärmung ist mit ± 12,2 % angegeben. Um den Lichtbogen wurde eine wasserdurchflossene form- und funktionsoptimierte Messglocke angeordnet, wodurch die Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie des Lichtbogens ermittelt werden kann (Messungenauigkeit ± 2,1 %). Der Elektrodenverlustfaktor bzw. die Kühlungsenergie des externen Kühlkreislaufes der Stromquelle wird durch die Bestimmung der Durchflussmenge und der Temperaturdifferenz zwischen Brennervor- und –rücklauf bestimmt (Messungenauigkeit ± 1,4 %). Bis zum Erreichen des statischen Zustandes, wurde eine Messdauer von etwa t = 3.600 s benötigt. Neben dem hohen Zeitaufwand bewirkt die lange Versuchszeit eine schlechte Reproduzierbarkeit und hohen Verschleiß der Wolframelektrode. Somit konnten Untersuchungen mit kleinen Spitzenwinkeln bzw. hohem Heliumanteil oder hohen positiven Polungsanteil der Elektrode ab mittlerem Umgebungsdruck nicht durchgeführt werden.

Eine Erweiterung zum beschriebenen Plattenkalorimeter wird in [Ege11] verwendet. Dabei wird das Probeblech auf einen massiven Kupferblock aufgelegt. Der Block ist in einem isolierten, nach oben offenem Behältnis definiert positioniert. Das notwendige Gegenpotential ist mit einer Erdungsklemme seitlich nach außen gesetzt. Zur Messung der integrierten Wärme sind hochgenaue Thermoelemente in den Kupferblock integriert. Aufgrund der sehr guten thermischen Leitfähigkeit von Kupfer, wurde dieser Werkstoff gewählt. Die beim Schweißen erzeugte Prozesswärme wird umgehend über den Grundwerkstoff an den Kupferblock abgegeben. Da die Masse und die Werkstoffkenndaten des Blockes bekannt sind, kann mit Hilfe der ermittelten Temperaturdifferenz und der aus der Literatur entnommen spezifischen Wärmekapazität von Kupfer, die in das Bauteil eingebrachte Wärmemenge berechnet werden (Formel 4.14). Abstrahlungsverluste werden durch eine umgehende Abdeckung der Schweißoberfläche mit dem isolierenden Kalorimeterdeckel reduziert. Auf Grund dessen soll eine Standardabweichung von 1,5 % möglich sein. Laut Autor [Ege11] sind die ungenauen Materialkennwerte (chemische Zusammensetzung, spezifische Wärmekapazität, usw.) die größte Fehlerquelle.

Ein technisch ähnliches Kalorimeter wird in [Can05] beschrieben. Hierfür werden die Schweißversuche entweder direkt auf ein 120 x 120 x 110 mm Aluminiumblock ausgeführt oder auf einer auf diesen Aluminiumblock aufgelegten Platte. Dieser Block ist in einem vollständig mit Schamottestein isolierten Gefäß auf einer thermisch isolierenden Keramikplatte positioniert. Die Messung der eingebrachten Wärme erfolgt über acht Thermoelemente des Typs K. Mit Hilfe der spezifischen Werkstoffkennwerte kann die Wärmemenge berechnet werden (Formel 4.14). Die ermittelten Temperaturdifferenzen sind zwischen $\Delta T = 15…60$ K. Die entstehenden Messunsicherheiten wurden detailliert aufgeschlüsselt [Can05]:

- 1 % bei der Strom- und Spannungsmessung (Hall-Effekt)
- $\Delta U = 0{,}5$ V durch Spannungsverluste am Brenner und durch den Kontaktwiderstand beim Spannungsabgriff
- Schwankungen des Elektrodenabstandes von durchschnittlich $\Delta s = 0{,}2$ mm
  → $\Delta U = 0{,}1$ V bei Argon und $\Delta U = 0{,}4$ V bei Helium
  → circa 5 % Messunsicherheiten durch Spannungsschwankungen
- 3 % durch Messungenauigkeiten bei der Temperaturermittlung

In [Col79] wird eine Abwandlung des Plattenkalorimeters dargestellt. Unter dem Werkstück wird kein Kalorimetermedium mit kontinuierlichem Durchfluss geführt, sondern ein definiertes Volumen gespeichert. Die während des Schweißprozesses eingebrachte Wärme in das Bauteil wird über Thermoelemente gemessen und gespeichert. In einem zweiten Versuch wird dem Kalorimetermedium mittels Heizspiralen die gleiche Wärmemenge zugeführt, um die gleiche Temperaturdifferenz zu erreichen. Mit Hilfe der hierfür notwendigen, gemessen Zeit und elektrischen Leistung, kann mit der Annahme eines elektrischen Wirkungsgrades von annähernd 100 %, die relative eingebrachte Wärme durch den Schweißprozess ermittelt werden. Wird die Energiemenge beim Schweißen im Verhältnis zur benötigten Energiemenge zum Erwärmen mittels Heizspiralen gesetzt, ist das Ergebnis der effektive Wirkungsgrad. Es ist somit ein vergleichendes Verfahren basierend auf der Verwendung gleicher Wärmemengen.

Eine weitere Variante ist die direkte Bestimmung der kritischen Abkühlzeit $t_{8/5}$ für Stähle im Bereich zwischen T = 800…500 °C mittels Thermoelementen, wie es auch in [Kot01] beschrieben ist. Hierfür werden im Bereich der Schweißnaht unterschiedlich weit entfernt, definiert verteilte Thermoelemente angebracht (Abbildung 3-14) [Moo88], [Met94], [DIN96]. Durch Messung und Auswertung des zeitlichen Verlaufes der Temperatur kann die Abkühlzeit $t_{8/5}$ bzw. die eingebrachten Energiemenge in das Bauteil bestimmt werden. Der thermische Wirkungsgrad wird durch Einsetzen von Formel 3.5 in Formel 3.3 und anschließendem Umstellen berechnet.

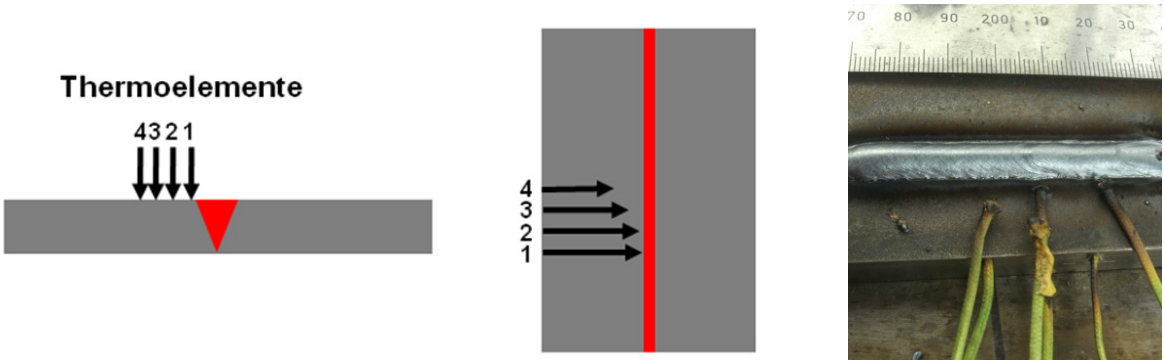


Abbildung 3-14: Anordnung der Thermoelemente zur Bestimmung der Abkühlzeit

Der Abstand der Thermoelemente von der Schmelzlinie muss so nah, wie möglich, aber trotzdem so weit weg sein, dass es nicht zu deren Zerstörung oder Überschreitung des Messbereichs kommt. Durch die definierte Platzierung verschiedener Thermoelemente in unterschiedlichen horizontalen Ebenen und axialen Abständen zur Schweißnaht wird ein relativ exaktes räumliches Abbild der umgesetzten Wärmeanteile im Werkstück erstellt. Die oft verwendeten Thermoelemente Typ K haben beispielsweise eine kurzzeitige Temperaturbeständigkeit von T_{max} = 1.300 °C.
Zur Bestimmung der in das Bauteil eingebrachten Energie wurden die Thermoelemente in [Kot01] durch Punktschweißen angebracht und deren Abstände von der Schweißnahtmitte nach dem Schweißen ausgemessen. Aus den gemessenen Temperaturverläufen konnte mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) die eingebrachte Fügeleistung berechnet werden. Hierfür mussten jedoch theoretische Festlegung bezüglich der Werkstoffkennwerte und Wirkungsgrade getroffen werden.
Jedoch ist die Bestimmung der tatsächlich eingebrachten Wärmemenge mit Hilfe der Kalorimetrie genauer, da die Abkühlzeit $t_{8/5}$ von zu vielen werkstofflichen Rand- und Schweißbedingungen abhängt. Mit dieser Methode kann somit nur eine grobe Abschätzung bzw. ein Vergleich vorgenommen werden. Laut Kotowski [Kot01] können die extrem schnellen Temperaturänderungen beim Schmelzschweißen trotz der Verwendung von Thermoelementen mit kleinem Durchmesser nur hinreichend genau gemessen werden.

c) Nachweis der eingebrachten Energie anhand von Simulationen

Neben der Messung der eingebrachten Wärmemengen beim Fügen existieren auch Ansätze, wo mit Hilfe moderner Simulationssoftware, der Kenntnis der Schweißnahtgeometrie und des Werkstoffverhaltens Rückschlüsse auf den Energieeintrag getroffen werden.
Dieser Ansatz zur Ermittlung des Wirkungsgrades wird beispielsweise in [Cve09] und [Hua10] beschreiben. Diese Ergebnisse basieren vollständig auf die Schweißnaht- und Gefügesimulation existierender Software.

Dutta [Dut94] analysiert die Geometrie von Schweißnähten und deren Schmelzzone anhand von Querschliffen. Das Resultat der Berechnung der Energie zum Aufschmelzen des Werkstoffs und die Addition der über die Nahtfläche übertragenen Wärmeleitung in den Grundwerkstoff ist, die theoretisch eingebrachte Energie durch den Schweißprozess. In Relation zur Schweißleistung gesetzt, ist das Ergebnis der Wirkungsgrad. Die berechneten Wirkungsgrade von Dutta [Dut94] zum WIG-Schweißen entsprechen denen der Literaturrecherche.

In [Cve09] werden die entstehenden Gefüge beim Schweißen von nichtrostenden, austenitischen Stählen simuliert. Dabei werden Randbedingungen wie Maximaltemperatur der Schmelze, Schmelzbadvolumen und Abkühlzeiten $t_{8/5}$-Werte definiert verändert, um verschiedene Mikrostrukturen zu erhalten. Diese werden mit Analysen von Querschliffen realer WIG-Schweißnähte verglichen und verifiziert. Cvetkovski [Cve09] geht in den Simulationen davon aus, dass der Wärmeeintrag in das Bauteil beim WIG-Schweißen konstant ist. Basierend auf der Kenntnis der entstehenden Mikrostruktur im Bauteil beim WIG-Schweißen, werden vergleichende Schweißversuche mit einem CO_2-Laser durchgeführt. Ziel von Cvetkovski [Cve09] ist es den genauen Energieeintrag des Laserprozesses zu ermitteln.
Allgemein ist der Vergleich zwischen Laser- und Schutzgasschweißen problematisch. Die Energieeinkopplung ist vollständig verschieden, während beim Laserschweißen eine energieintensive elektromagnetische Welle (fokussiertes Licht) die Erwärmung hervorruft, ist beim Schutzgasschweißen ein elektrisches Feld und das entstehende Plasma verantwortlich für die Bauteilerwärmung.

Huang [Hua10] verfolgt die Theorie, den Schmelzwirkungsgrad bzw. die Schweißnahtgeometrie durch eine Schweißsimulation nachzustellen. Hierfür werden Querschliffe verschiedener WIG-Schweißnähte auf Aluminiumgrundwerkstoff mit definiert veränderten Parametern analysiert. Die realen Ergebnisse werden mit Simulationsergebnissen von Schweißnahtgeometrien verglichen. Durch Variation des Parameters Wirkungsgrad bzw. Anteil integrierte Energie in das Bauteil wird das Simulationsergebnis an dem realen Versuch angepasst. Arul [Aru11] nutzte dabei die gleichen Ansätze jedoch mit Stahlgrundwerkstoff.

Allgemein ist die Kenntnis der spezifischen Werkstoffkennwerte in Abhängigkeit der Temperatur eine kritische Größe bei der Berechnung bzw. Simulation des Energieeintrages in das Bauteil. Die Ergebnisse in [Dut94], [Cve09], [Hua10] und [Aru11] basieren auf Vereinfachungen und einer möglichen Verkettung von einzelnen Messfehlern. Der beschriebene Vorteil, dass der Wärmeeintrag ohne Kalorimeter einzig durch Querschliffe bestimmt werden kann, ist kritisch zu betrachten. Die Art der Wärmeableitung und vor allem die exakten temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte müssen bekannt sein. Schon allein die Änderung verschiedener Legierungsbestandteile hat einen gravierenden Einfluss. Zudem können die komplexen Vorgänge in den Randschichten auch nur hinreichend nachgestellt werden.

3.4 Ergebnisse von Wirkungsgraduntersuchungen aus der Literatur

Die Analyse verschiedener Wirkungsgraduntersuchungen ergab eine Fülle von Ergebnissen und Einflussfaktoren auf die eingebrachte Wärmemenge beim Schweißen. Die Strukturierung der Ergebnisse von Wirkungsgraden verschiedener Schweißprozesse erfolgt anhand der Gruppen nicht abschmelzende- und abschmelzende Elektrode im Schweißprozess. Nach einem tabellarischen Überblick der Messwerte sind die Veröffentlichungen chronologisch bzw. nach dem Erkenntnisstand von Autorengruppen gegliedert.

a) Schweißprozesse mit nicht abschmelzender Elektrode

Die Zusammenfassung der Lichtbogenwirkungsgrade des WIG- und Plasmaschweißens der analysierten Literaturquellen wird in Tabelle 3-3 dargestellt. Die Mittelwerte der betrachteten Literaturquellen des WIG-Schweißens betragen $\eta_{LB} = 0{,}72$ und des Plasmaschweißens $\eta_{LB} = 0{,}55$.

Tabelle 3-3: Zusammenfassung der Lichtbogenwirkungsgrade des WIG- und Plasmaschweißens aus der Literatur

WIG-Schweißen

Literatur-	Lichtbogenwirkungsgrad	
quelle	Bereich	Mittelwert
[Col79]	0,80…0,90	0,85
[Ghe79]	0,55…0,80	0,68
[Sch85]	0,80…0,90	0,85
[Fue89]	0,80	0,80
[Zij89]	0,74…0,78	0,76
[Kat90]	0,60…0,78	0,69
[Fue91]	0,80	0,80
[Sch92]	0,65	0,65
[Dut94]	0,62…0,85	0,72
[DuP95]	0,67	0,67
[Lap03]	0,57…0,63	0,60
[Orl03]	0,66…0,77	0,72
[Can05]	0,76…0,89	0,80
[Mis05]	0,72	0,72
[Dil05]	0,65	0,65
[Mat06]	0,60…0,70	0,65
[Fah09]	0,65	0,65
[DIN09]	0,60	0,60
[Aru11]	0,74	0,74
[Zha11]	0,68…0,85	0,76
[Ber12]	0,75	0,75

Plasmaschweißen

Literatur-	Lichtbogenwirkungsgrad	
quelle	Bereich	Mittelwert
[Fue91]	0,50…0,75	0,65
[DuP95]	0,47	0,47
[Eva98]	0,48…0,66	0,57
[Shi01]	0,45	0,45
[DIN09]	0,60	0,60

[Col79] beschreibt den Einfluss der Schweißleistung, der Schweißgeschwindigkeit, des Schutzgases und des Elektrodenabstandes auf den Wirkungsgrad beim WIG-Schweißen. Die eingebrachte Wärmemenge im Bauteil steigt proportional mit der Schweißleistung. Während der effektive Wirkungsgrad bei s = 1 mm Elektrodenabstand etwa $\eta_{eff} = 0{,}90$ (I_S = 50…350 A) beträgt, sinkt dieser auf etwa $\eta_{eff} = 0{,}80$ bei s = 10 mm Abstand (Vergleich zu [DuP95] $\eta_{LB} = 0{,}67 \pm 0{,}05$). Eine Abhängigkeit des effektiven Wirkungsgrades von der Schweißgeschwindigkeit konnte nicht festgestellt werden und auch der Einfluss des Spitzenwinkels ist gering.

Auch mit einem Elektrodenabstand von s = 2 mm konnte beim Argonlichtbogen kein Schmelzwirkungsgrad oberhalb von $\eta_{Schm} = 0{,}30$ erzielt werden [Col79]. Erst durch die Zugabe von 10 % Wasserstoff in das Schutzgas konnten Werte von bis zu $\eta_{Schm} = 0{,}46$ erzielt werden. Dabei stieg der Schmelzwirkungsgrad mit der Stromstärke an. Dieser sinkt jedoch mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit. Eine starke Reduzierung des Schmelzwirkungsgrades wurde zudem bei steigendem Elektrodenabstand deutlich.

In [Ghe79] wurde der Einfluss des Elektrodenabstandes und der Schweißleistung auf den Gesamtwirkungsgrad des WIG-Schweißens ermittelt. Grundsätzlich wurden vier Wege des Energietransports beim WIG-Schweißen beschrieben:

- Wärmeleitung der Elektrode, welche durch die Widerstandserwärmung und die aufgenommene Wärme des Lichtbogens begründet ist
- Wärmestrahlung des Lichtbogens, der Elektrode sowie der Metalloberfläche an die Umgebung
- Energieabsorption durch das Schutzgas und anschließende Konvektion an die Umgebung und das Bauteil
- werkstoffspezifische Wärmeleitung im Bauteil

Es wurde bewiesen, dass die Abstrahlungsverluste der Bauteiloberfläche mit zunehmender Schweißleistung steigen und deshalb der Lichtbogenwirkungsgrad sinkt. Während der Untersuchungen wurden Lichtbogenwirkungsgrade in einem Bereich von $\eta_{LB} = 0{,}55…0{,}80$ ermittelt.
Auch die Erhöhung des Elektrodenabstandes bewirkt eine Reduzierung des Lichtbogenwirkungsgrades, wie es u. a. auch in [Col79] beschrieben ist. Dabei bleibt die Erwärmung des externen Kühlkreislaufes der Schweißstromquelle konstant. Durch die Verdopplung des Abstandes stieg die eingebrachte Wärmemenge im Bauteil um etwa 20 % an. Gleichzeitig bewirkte die Verdopplung des Elektrodenabstandes 50 % höhere Abstrahlungsverluste. Allgemein stellte Ghent [Ghe79] fest, dass bei konstanter Schweißstromstärke 70 % der zusätzlichen Energie bzw. Schweißleistung bei Vergrößerung des Elektrodenabstandes durch Abstrahlung verloren geht.
Die verdoppelte Schweißstromstärke bewirkte durchschnittlich 95 % mehr Wärme im Bauteil und 420 % höhere Abstrahlungsverluste. Zusammenfassend stellt Ghent fest, dass die Abstrahlungsverluste viel stärker vom Elektrodenabstand, als von der Schweißstromstärke beeinflusst werden.

In [Sch85] wird beschrieben, dass der effektive Wirkungsgrad von den einstellbaren Schweißparametern und dem Wärmespeicherverhalten des Bauteils bestimmt wird. In Folge dessen steigt die Wärmebilanz um wenige Prozent mit zunehmender Blechdicke, da die Abstrahlungsverluste an die Umgebung sinken. Zur weiteren Reduzierung der Abstrahlungsverluste ist eine kurze Lichtbogenlänge zu wählen (analog zu [Col79], [Ghe79]).
Beim WIG-Schweißen sinkt laut [Sch85] der effektive Wirkungsgrad mit zunehmender Schweißleistung, da die Wärmeleitung und Konvektion aus dem Lichtbogenraum stark zunimmt. Zu dem steigt die Elektrodenverlustwärme an der Wolframelektrode, wenn beispielsweise eine positive Elektrodenpolung verwendet wird. Dies führt zum Überhitzen und teilweise Abschmelzen der Elektrode. Dabei sinkt der effektive thermische Wirkungsgrad von $\eta_{eff} = 0{,}80…0{,}90$ (negative Elektrodenpolung) auf $\eta_{eff} = 0{,}55…0{,}60$ (positive Elektrodenpolung) [Sch85, S. 86].

In [Zij89] wird der Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf den Wärmeübergang beim WIG-Schweißen betrachtet. Die Untersuchungen zeigen, dass der Wärmeübergang zum Werkstück zwischen 50…75 % Heliumanteil im Argonschutzgas am Höchsten ist, während in diesem Gebiet der Wärmeübergang zur Elektrode am Kleinsten ist. Im Bereich bis zu 75 % Helium steigen die Schweißleistung, die umgesetzte Wärmemenge im Bauteil und die thermische Belastung der Elektrode gleichmäßig leicht an.

Ab 75 % Heliumanteil im Schutzgas steigen die beschriebenen Parameter hingegen stark an. Grund hierfür ist, dass die notwendige Ionisationsenergie des Lichtbogens ab 75 % Helium exponentiell zunimmt. Davor war der Lichtbogen Argon dominiert und die Hauptenergie wurde von den Argonelektronen und -ionen übertragen. Der Lichtbogenwirkungsgrad nimmt dabei bei bis 75 % Helium von $\eta_{Libo} = 0{,}74$ (100 % Argon) auf $\eta_{Libo} = 0{,}78$ zu und sinkt um gut 6 %, wenn 100 % Helium als Schutzgas verwendet werden. Die Kühlungsverlustanteile am Brenner verändern sich kaum und betragen etwa 4 % der Gesamtenergie.

[Kat90] hat den Lichtbogenwirkungsgrad und deren Einflussfaktoren beim WIG-Schweißen für Umgebungsdrücke bis p = 6 MPa untersucht. Der Lichtbogendurchmesser steigt mit der Schweißleistung an. Dieser sinkt jedoch, wenn der Umgebungsdruck erhöht wird. Es kommt zur Einschnürung des Lichtbogens, wodurch die Intensität zunimmt. Gleichzeitig erhöht sich die Dichte der Plasmasäule. Diese Einschnürung der Lichtbogensäule bewirkt zudem eine Reduzierung der Elektrodenstandzeit.
Der Elektrodenwerkstoff hat einen großen Einfluss auf das Schweißverhalten und die Schweißleistung [Kat90]. Durch das Dotieren von Oxiden in die Wolframelektrode wird die Elektronenaustrittsarbeit reduziert und die Elektrodentemperatur gesenkt. Die thermische Beständigkeit der dotierten Elemente ist allerdings geringer, weshalb bei Überlastung der Elektrode (z.B. zu hohe Schweißstromstärke oder positive Elektrodenpolung) diese Elemente selbst Metalldampf erzeugen. Die Elektronenaustrittsarbeit des erzeugten Metalldampfes ist jedoch höher, weshalb der Lichtbogen an der Elektrodenspitze wandert, um der „lokalen“ Verarmung an dotierten Elementen entgegenzuwirken, um unverbrauchte dotierte Elemente mit geringer Elektronenaustrittsarbeit zu suchen. Der Lichtbogen steigt nach oben, die Schweißspannung und somit der Elektrodenverschleiß steigen weiter an.
Neben den unterschiedlichen Ionisationsenergien und dem veränderten Energietransport bei verschiedenen Schutzgasen, hat auch die Schutzgasmenge einen großen Einfluss. Eine Erhöhung der Schutzgasmenge verstärkt die Konvektion im Lichtbogen. Die Lichtbogensäule wird eingeschnürt und die Kerntemperatur steigt. Dadurch wird die thermische Strahlung verändert [Kat90].
Der Anoden- bzw. Grundwerkstoff, sowie die Schweißgeschwindigkeit haben hingegen eine untergeordnete Bedeutung.
Der Lichtbogenwirkungsgrad mit Argonschutzgas wurde in einem Bereich zwischen $\eta_{LB} = 0{,}78$ (Is = 50 A; s = 2 mm) und $\eta_{LB} = 0{,}60$ (Is = 300 A; s = 10 mm) ermittelt. Die Hauptverlustgröße ist die Lichtbogenstrahlung, welche vom Einfluss des Elektrodenabstandes dominiert ist (Tabelle 3-4). Durch den externen Brennerkühlkreislauf der Schweißstromquelle wurden konstant etwa 8 % der Gesamtleistung abgeführt.

Tabelle 3-4: Strahlungsverlustfaktoren beim WIG-Schweißen mit Argonlichtbogen in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand und der Schweißstromstärke [Kat90]

Elektrodenabstand	Schweißleistung	
in mm	50 A	300 A
2	8%	11%
10	18%	37%

Fuerschbach [Fue89] hat in seinen Untersuchungen den Wirkungsgrad für das WIG-Schweißen auf austenitischem Grundwerkstoff untersucht. Dabei wurde ausschließlich der Parameter Schweißstromstärke variiert. Der ermittelte Lichtbogenwirkungsgrad ist trotz Variation der Schweißstromstärke $I_S = 50…200$ A annähernd konstant $\eta_{LB} = 0{,}80 \pm 0{,}02$ (Vergleich zu DuPont [DuP95] $\eta_{LB} = 0{,}67 \pm 0{,}05$), während der Schmelzwirkungsgrad mit steigender Schweißstromstärke zunimmt $\eta_{Schm} = 0{,}06…0{,}19$ (Vergleich zu [DuP95] $\eta_{Schm} = 0{,}36$), da das Schmelzbadvolumen stark steigt.

In seiner Zusammenfassung stellte Fuerschbach fest, dass Berechnungen des Wirkungsgrades anhand von Messung der $t_{8/5}$-Werte oder die Analyse der Einbrandfläche geringere Werte ergeben. Um die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit seiner Ergebnisse zu klären, analysierte Fuerschbach [Fue91] zudem den Energiefluss beim Plasmaschweißen.
Da beim Plasmaschweißen (η_{LB} = 0,50…0,75) zusätzliche Kühlungsverluste durch die Plasmagasdüse entstehen, ist nach seiner Ansicht [Fue91] der Lichtbogenwirkungsgrad geringer und unstetiger, als beim WIG Prozess (η_{LB} = 0,80). Hingegen wird beim Plasmaschweißen ein höherer Schmelzwirkungsgrad von η_{Schm} = 0,48 erreicht. Der maximale Schmelzwirkungsgrad des WIG-Schweißens beträgt η_{Schm} = 0,41. Begründet ist dies mit der höheren Energiedichte und der folglich größeren Einschweißtiefe beim Plasmaschweißen.
1998 hat Fuerschbach [Fue98] zudem die eingebrachte Wärmemenge beim Plasmaschweißen mit variabler Polarität untersucht. Das Optimum der kathodischen Reinigung von Aluminiumgrundwerkstoff wurde bei 20…50 % negativem Polaritätsanteil ermittelt. Die Lichtbogenwirkungsgrade betragen dabei η_{LB} = 0,41…0,62. Die wechselnde Polarität führt zu einer konsequenten Änderung der Wärmeeinbringung in das Bauteil.
Ferner stellte Fuerschbach [Fue98] fest, dass der Rykalin-Parameter direkt mit dem Schmelzwirkungsgrad korreliert. Das bedeutet, dass nach Formel 3.21 der Schmelzwirkungsgrad einer Schweißverbindung nur durch die Erhöhung der eingebrachten Wärme oder einer Steigerung der Schweißgeschwindigkeit erreicht wird. Die Wärmeleitfähigkeit und die Schmelzenthalpie werden als unveränderbare spezifische Werkstoffkennwerte betrachtet.

Formel 3.21

$$R_Y = \frac{P_{BT} * v_S}{\lambda^2 * \delta E_S}$$

P_{BT}	integrierte Leistung im Bauteil
v_S	Schweißgeschwindigkeit
λ	Wärmeleitfähigkeit Grundwerkstoff
δE_S	Schmelzenthalpie Grundwerkstoff

Der Schmelzwirkungsgrad von Aluminium ist mit η_{Schm} = 0,05…0,34, auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit geringer, als das theoretische Maximum η_{Schm} = 0,48, welches laut [Fue91], [Chi00] bei Stahlgrundwerkstoff erreicht werden kann.
Zusammenfassend stellte Fuerschbach in seinen Untersuchungen [Fue91], [Fue98] mit verschiedenen Grundwerkstoffen fest, dass der Lichtbogenwirkungsgrad weitgehend unabhängig vom Werkstoff ist. Hingegen ist der Schmelzwirkungsgrad stark vom Werkstoff abhängig. Eine höhere Wärmeleitfähigkeit des Grundwerkstoffs bewirkt dabei einen geringeren Schmelzwirkungsgrad.

Laut Dutta [Dut94] sinkt mit steigender Schweißleistung und zunehmender Schweißgeschwindigkeit der Wirkungsgrad beim WIG-Schweißen ab. Ein Einfluss der Nahtgeometrie auf die Lichtbogenwirkungsgrad wurde nicht verzeichnet. Der berechnete Lichtbogenwirkungsgrad beschreibt einen Bereich von η_{LB} = 0,62…0,85, wobei der Mittelwert η_{LB} = 0,72 beträgt.

Evans [Eva98] betrachtet den Energietransport vom Lichtbogen zum Werkstück. Als Verfahren wurde der Plasmaprozess gewählt. Hierfür wurde das Herstellen einer Blindnaht auf Aluminiumwerkstoff kalorimetrisch untersucht. Dabei wurden Lichtbogenwirkungsgrade in einem Bereich von η_{LB} = 0,48…0,66 ermittelt. Dieser stieg mit zunehmender Schweißspannung an und fiel mit zunehmender Schweißstromstärke ab.
Den Energie- bzw. Wärmetransport zum Werkstück teilt Evans in drei Kategorien auf:

- thermische Energie in Form von Strahlung
- Wärmeübertragung bzw. Konvektion über Plasma- und Schutzgas
- Anodeneffekt bzw. Anodenbilanz im Werkstück

Die thermische Energie wird in Form von Wärmeleitung und Wärmestrahlung übertragen. Innerhalb der Untersuchungen wurde festgestellt, dass etwa 25 % der eingesetzten Energie in Strahlung umgesetzt werden [Eva98]. Jedoch wird nur ein kleiner Teil der abgestrahlten Energie zur Erwärmung des Bauteils verwendet, da die Abstrahlung allseitig ist und somit viel Energie über den Umfang des Lichtbogens für den eigentlichen Erwärmungs- bzw. Schweißprozess verloren geht. Laut seiner Analyse [Eva98] werden 4,2 % der Gesamtenergie zur Erwärmung des Bauteils durch den Lichtbogen verwendet.
Die Konvektion im Lichtbogen wird laut Evans in zwei Arten des Wärmetransportes unterteilt- einerseits in Konvektion durch das Plasmagas und andererseits in Konvektion des Lichtbogens durch das Schutzgas. Dabei ist die Konvektion des Plasmagases spannungsunabhängig, d.h. unabhängig von der Lichtbogenlänge. Die Wärmeübertragung des Schutzgases hingegen ist spannungsabhängig, was bedeutet: Je länger der Lichtbogen ist, desto mehr Energie bzw. Wärme kann vom Plasmagas auf das umschließende Schutzgas übertragen werden. Dabei werden etwa 16 % der Wärme durch das Plasmagas und 11 % über das Schutzgas übertragen. Wird die Schweißstromstärke erhöht, steigt die Temperatur im Lichtbogen und mehr Energie kann über das Plasmagas an das Schutzgas und das Werkstück übertragen werden. Gleichzeitig wird die Lichtbogenmantelfläche größer und die Verlustanteile über die Wärmeleitung, Wärmestrahlung und dem Wärmedurchgang des Lichtbogens steigen [Eva98].
Der Anodeneffekt beschreibt den Elektroneneintritt aus dem Lichtbogen in das Werkstück. Dieser wird vorwiegend durch die kinetische Energie der Elektronen, den Anodenfall, der Spannung am Übergang vom Lichtbogen in das Werkstück und von der Kondensationsenergie bzw. Kondensationsenthalpie der Elektronen (werkstoffabhängig) verursacht. Hierdurch wird etwa 20 % der eingesetzten Energie im Werkstück umgesetzt.
Werden alle eingebrachten Energien bzw. Wärmengen summiert, beträgt der ermittelte Lichtbogenwirkungsgrad des Plasmaschweißens η_{LB} = 0,51 (Abbildung 3-15).

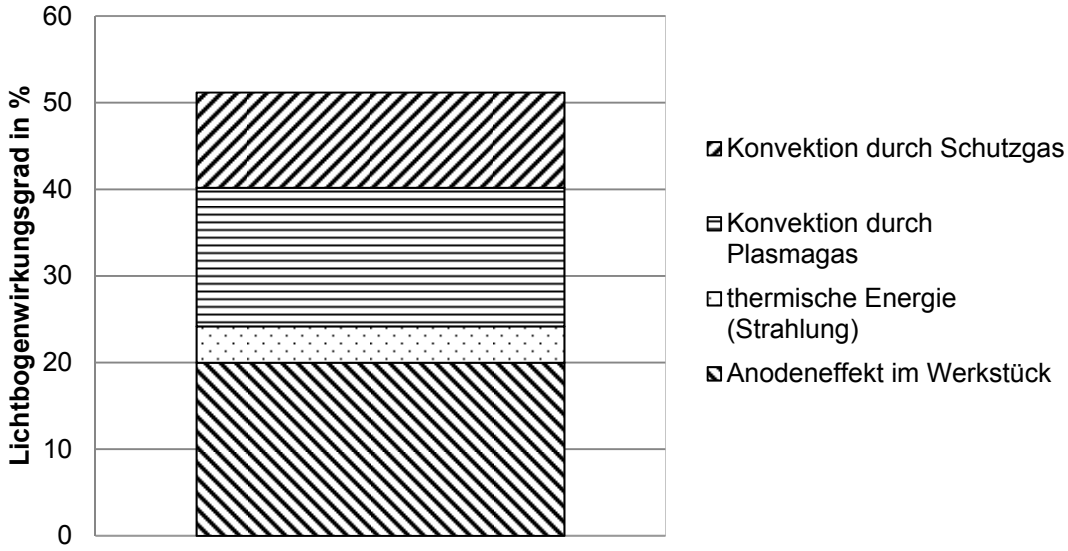


Abbildung 3-15: Zusammensetzung des Lichtbogenwirkungsgrades beim Plasmaschweißen laut [Eva98]

In [Shi01] wurde der Wirkungsgrad des Plasmaauftragschweißens von Stellitpulvern untersucht. „Der thermische Wirkungsgrad des direkten Plasmalichtbogens betrug etwa 45 %. Die beste Abscheidung wurde bei kurzen Lichtbogenlängen und geringen Abscheidungsgeschwindigkeiten des Zusatzwerkstoffs erreicht.“

Die thermische Wechselwirkung des Wechselstromschweißens mit rechteckiger Pulsform von Aluminiumgrundwerkstoff mit dem WIG-Schweißverfahren wird in [Lap03] analysiert. Der thermische Wirkungsgrad sinkt mit steigender Schweißleistung. Im betrachteten Fall von $\eta_{th} = 0{,}63$ ($I_S = 180$ A) auf $\eta_{th} = 0{,}57$ ($I_S = 250$ A). Mit steigendem Anteil positiver Elektrodenpolung sinkt der thermische Wirkungsgrad zusätzlich ab. Dabei ist die Reduzierung bei rechteckiger Pulsform ($\eta_{th} = 0{,}48$ bei 50 % positiver Polung) geringer, als bei sinusförmiger Pulsform ($\eta_{th} = 0{,}45$ bei 50% positiver Elektrodenpolung).
Der Schmelzwirkungsgrad steigt mit zunehmender Schweißstromstärke an, wie bereits in [Fue91], [Fue98] beschrieben. Innerhalb dessen Versuchsmatrix wurde eine Erhöhung von $\eta_{Schm} = 0{,}04$ ($I_S = 180$ A) auf $\eta_{Schm} = 0{,}26$ ($I_S = 250$ A) verzeichnet. Unterhalb 20 % positiver Elektrodenpolung war die kathodische Reinigung der Aluminiumoberfläche unbefriedigend. Ab 35 % positiver Elektrodenpolung stieg der Elektrodenverschleiß stark an [Lap03].

Orlowicz [Orl03] untersuchte strukturelle und Wärmebehandlungsaspekte der Erstarrung von Oberflächenschichten von Gusseisen mit Kugelgraphit. Dazu wurde die Erwärmung mit dem WIG-Schweißprozess realisiert und der Einfluss auf die Gefügeausbildung analysiert. Die ermittelten Wirkungsgrade sind abhängig von der Schweißgeschwindigkeit, der Schweißleistung und dem Elektrodenabstand. Der Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißens beschreibt einem Bereich zwischen $\eta_{LB} = 0{,}66\ldots0{,}77$.

Mishra [Mis05] nutzte ein Simulationstool, um den Wärme- und Schmelzefluss im Werkstück während des WIG-Schweißens zu simulieren. Ergebnis ist, dass die Stoff- und Energieflüsse hauptsächlich von folgenden Parametern beeinflusst werden:

- Lichtbogenwirkungsgrad
- Lichtbogenradius
- Leistungsübertragungsfaktor an den Grenzschichten
- spezifische thermische Leitfähigkeit des verflüssigten Grundwerkstoffs
- Viskosität der Schmelze

Die Berechnung ergab einen maximalen Lichtbogenwirkungsgrad beim WIG-Schweißen mit negativ gepolter Elektrode von $\eta_{LB} = 0{,}72$.

Laut [Can05] hat die Veränderung der Elektrodenpolarität den größten Einfluss auf den Wirkungsgrad und die die eingebrachte Wärmemenge im Bauteil. Bei negativer Polarität wurde ein Lichtbogenwirkungsgradbereich von $\eta_{LB} = 0{,}76\ldots0{,}89$ ermittelt. Der Hauptenergietransport erfolgt dabei durch die Elektronen. Der konzentrierte Elektronenaustritt aus der Elektrodenspitze erhöht die Temperatur. Bei höheren Stromdichten führt dies zur Glühemission von Elektronen, was den Elektronenaustritt erleichtert. Dadurch sind laut [Can05] auch ein erleichterter Energietransport und ein höherer Wirkungsgrad begründet. Die positive Elektrodenpolarität bewirkt hingegen einen geringeren Lichtbogenwirkungsgrad von $\eta_{LB} = 0{,}52\ldots0{,}63$. Dabei ist eine höhere Schweißleistung notwendig. Die Elektronen werden vom Werkstück emittiert, da dieses jedoch viel kälter ist und zudem eine Oxidschicht besitzt, kommt es nicht zur Glühemission. Die Elektronen rekombinieren an der Wolframelektrode, was zu einer erhöhten thermischen Belastung führt. Diese Ergebnisse bestätigen auch die Untersuchungen von [Sch85], [Fue98] und [Lap03].
Den zweitgrößten Einfluss auf den Wirkungsgrad und die eingebrachte Wärmemenge in den Grundwerkstoff hat laut [Can05] das Schutzgas. Helium $\eta_{LB_He} = 0{,}87$ bewirkt einen höheren thermischen Wirkungsgrad, als bei der Verwendung von Argon $\eta_{LB_Ar} = 0{,}79$ als Schutzgaskomponente. Diese Aussage kann nur bis zu einem Heliumanteil von 75 % im Argonschutzgas von Zijp [Zij89] betätigt werden. Die überwiegenden Verluste beim Argonlichtbogen sind durch die Abstrahlungsverluste (Emission) an die Umgebung begründet. Helium bewirkt eine bessere Wärmeleitung (Konduktion) im Schutzgas und einen besseren Energiefluss (Konvektion) im Lichtbogen.

Das heißt die vorherrschenden Temperaturdifferenzen werden vermehrt im Lichtbogen ausgeglichen und an das Werkstück übertragen. Gleichzeitig ist die Ionisationsenergie von Helium $E_{Ion_He} = 24{,}58$ eV höher, als die von Argon $E_{Ion_Ar} = 15{,}76$ eV, was einen heißeren Lichtbogen und eine höhere transportierte Energiemenge im Lichtbogen bewirkt.

Bei Erhöhung des Elektrodenabstands wird durchschnittlich $\Delta U = 0{,}7$ V/mm (Vergleich zu [Zij89] $\Delta U = 0{,}9$ V/mm) bei Argon und $\Delta U = 2{,}0$ V/mm (Vergleich zu [Zij89] $\Delta U = 2{,}7$ V/mm) mehr Schweißspannung benötigt. In Folge dessen steigt die Schweißleistung an. Gleichzeitig sinkt der Lichtbogenwirkungsgrad, da die Abstrahlungsverluste an die Umgebung steigen.

Das Verhältnis zwischen Wärmeeintrag in das Bauteil und der Schweißleistung beschreibt den Lichtbogenwirkungsgrad. Für die Bestimmung beider Faktoren werden die gleichen Schweißstromstärken verwendet, weshalb laut [Aru11] der Lichtbogenwirkungsgrad unabhängig von der Schweißstromstärke und der Schweißgeschwindigkeit ist. Dessen durchschnittlicher Lichtbogenwirkungsgrad beträgt $\eta_{LB} = 0{,}74$. Dieses Ergebnis der Simulation stimmt mit den Untersuchungen verschiedener Literaturstellen [Fue91], [Dut94], [DuP95], [Orl03] zum Lichtbogenwirkungsgrad überein, jedoch nicht die Unabhängigkeit von der Schweißstromstärke. Die zu Grunde gelegten temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte sind nicht definiert, als auch die Bestimmung und Berechnung der Schweißleistung (siehe Abschnitt 4.3 a)), was beides ein hohes Fehlerpotential darstellt.

Berthier [Ber12] untersuchte den Einfluss von Flussmittel bzw. den Zusatz von minimalen Aktivgasanteilen beim WIG-Schweißen. Ziel war es den Marangoni-Effekt durch den Einsatz von Flussmitteln umzukehren, um einen tieferen Einbrand zu erzeugen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Veränderung der Schmelzbadbewegung keinen Einfluss auf den Einbrand hat. Hingegen konnte durch die Zumischung von geringen Mengen Aktivgasanteilen der Einbrand gesteigert werden. Dabei wurde der Lichtbogen eingeschnürt, was zur Folge hat, dass die Kerntemperatur im Lichtbogen steigt [Ber12] und die Stromdichte zunimmt. Im konkreten Fall reduzierte sich die Lichtbogengröße um etwa 40 % im Vergleich zum inerten WIG-Schweißprozess (bei ansonsten gleichen Parametern). Dadurch steigt der Einbrand in den Grundwerkstoff. Auch die Zugabe von Flussmitteln bewirkte eine Einschnürung des Lichtbogens. Der angenommene mittlere Wirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses beträgt $\eta_{LB} = 0{,}75$.

b) Schweißprozesse mit abschmelzender Elektrode

Eine Zusammenfassung der Lichtbogenwirkungsgrade des MSG- und Unterpulverschweißens der analysierten Literaturquellen wird in Tabelle 3-3 dargestellt. Die Mittelwerte des MSG-Schweißens betragen $\eta_{LB} = 0{,}80$ und des Unterpulverschweißens $\eta_{LB} = 0{,}84$.

Tabelle 3-5: Zusammenfassung der Lichtbogenwirkungsgrade des MSG- und Unterpulverschweißens aus der Literatur

MSG-Schweißen

Literatur-quelle	Lichtbogenwirkungsgrad Bereich	Lichtbogenwirkungsgrad Mittelwert	Bemerkung
[Ryk57]	0,70…0,85	0,73	allgemein
[Pro82]	0,80…0,85	0,83	allgemein
[Sch92]	0,75…0,90	0,83	allgemein
[DuP95]	0,84	0,84	allgemein
[Ken98]	0,73	0,73	Impulslichtbogen
[Atk02]	0,70…0,85	0,78	allgemein
[Lat02]	0,86	0,86	Sprühlichtbogen
	0,75	0,75	Impulslichtbogen
[Jos03]	0,68…0,73	0,70	allgemein
[Dil05]	0,85	0,85	allgemein
[Mat06]	0,70…0,90	0,80	allgemein
[Pep08]	0,75…0,85	0,80	allgemein
[DIN09]	0,80	0,80	allgemein
[Fah09]	0,85	0,85	allgemein
[Ege11]	0,80…0,90	0,85	Kurzlichtbogen

UP-Schweißen

Literatur-quelle	Lichtbogenwirkungsgrad Bereich	Lichtbogenwirkungsgrad Mittelwert
[Ryk57]	0,80…0,95	0,88
[Bec66]	0,77…0,85	0,81
[And68]	0,75…0,85	0,80
[Mül83]	0,70…0,85	0,78
[Tre90]	0,48…0,58	0,53
[Shi01]	0,45	0,45
[Atk02]	0,90…0,95	0,93
[Dil05]	1,00	1,00
[Mat06]	1,00	1,00
[DIN09]	1,00	1,00
[Fah09]	1,00	1,00
[She12]	0,95	0,95

In [Ryk57] wurde die eingebrachte Wärmemenge verschiedener Schweißverfahren mit Hilfe eines Wasserkalorimeters untersucht. Es wurde deutlich, dass nicht die gesamte Schweißenergie zur Erwärmung des Bauteils führt. Ein Teil der Energie wird zur Erwärmung des Zusatzwerkstoffs bzw. der Elektrode verwendet. Weitere Anteile gehen durch Konvektion und Strahlung in die Umgebung verloren. Die ermittelten effektiven Wirkungsgrade beschreiben einem Wertebereich von:

- E-Hand-Schweißen $\eta_{eff} = 0{,}50…0{,}70$
- MSG-Schweißen $\eta_{eff} = 0{,}70…0{,}85$
- UP-Schweißen $\eta_{eff} = 0{,}80…0{,}95$

Dabei sinkt der effektive Wirkungsgrad mit zunehmender Lichtbogenlänge. Den größten Einfluss hat die Stromdichte, wobei der effektive Wirkungsgrad mit steigender Stromdichte abnimmt.
Zudem wurde eine erste Energiebilanz zum MSG-Schweißen im unteren und mittleren Leistungsbereich erstellt. Demnach werden 20 % der Schweißleistung an die Umgebung in Form von Abstrahlungswärme und Kühlungsverluste abgegeben [Ryk57]. Von den 70...85 % der Schweißleistung, welche zur Erwärmung des Bauteils führen, wird die Hälfte zur Schmelzebildung und die andere Hälfte als Wärmeleitung im Bauteil verwendet. Dabei werden durch den abgeschmolzenen Zusatzwerkstoff 25 % der Bauteilerwärmung verursacht [Ryk57].

Zur energetischen Bilanzierung hat Probst [Pro76], [Pro82] die Tropfentemperatur und die Erwärmung des Grundwerkstoffs in speziellen Wasserkalorimetern ermittelt. Die Probenplatzierung im Kalorimeter wurde auf der Schmalseite realisiert, wodurch Einflussgrößen wie Strahlung, Konvektion und Spritzer in vermindertem Maße auf die Probe und somit auf die Messung einwirken.

Die Messunsicherheiten bei der Temperaturbestimmung betragen 0,5 % [Pro76]. Zur Aufteilung des Energieflusses zum Grundwerkstoff wurde die theoretisch notwendige Energie zur Erzeugung des Schmelzbadvolumens im Verhältnis zur eingebrachten Wärmemenge gesetzt und somit der Schmelzwirkungsgrad errechnet.
Die Aufteilung der Energieflüsse ergab:

- 42 bis 54 % fließt in den Zusatzwerkstoff,
- 18 bis 35 % gelangt in den Grundwerkstoff,
- 7 bis 28 % Strahlungsverluste an Umgebung,
- 10 bis 14 % Kühlungsverluste an Brenner.

Durch den Einsatz eines stabilen Lichtbogens (gleichmäßiger Prozessverlauf, wenig bzw. keine Spritzer…) kann die Energieausnutzung des Schweißprozesses um bis zu 15 % gesteigert werden [Pro82].
Es ergaben sich effektive Wirkungsgrade beim MAG-Schweißen von $\eta_{eff} = 0{,}80…0{,}85$, dieser kann bis auf $\eta_{eff} = 0{,}95$ gesteigert werden, wenn Engspaltschweißungen durchgeführt werden, da dabei die Strahlungswärme von den Nahtflanken aufgenommen wird. Im Vergleich zwischen den Nahtvorbereitungen Blindnaht und V-Naht mit 90 ° Öffnungswinkel konnte bei der V-Naht ein 8 % höherer effektiver Wirkungsgrad ermittelt werden [Pro76]. Der effektive Wirkungsgrad beim UP-Schweißen beträgt hingegen $\eta_{eff} = 0{,}60…0{,}65$ [Pro82]. Dabei ist ungeklärt, in wie weit der Wärmeeintrag durch das Schweißpulver berücksichtigt wurde.
Auch eine Steigerung des effektiven Wirkungsgrades beim MAG-Schweißen um etwa 10 %, durch die Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit auf bis zu $v_S = 120$ cm/min, wurde ermittelt. Als Begründung nannte [Pro76] die verminderte Spritzerneigung und einen größeren Einbrand, da die Dämpfung des Lichtbogens durch das Schmelzbad reduziert wird. Ab $v_S = 120$ cm/min dreht sich dieser Trend um und der effektive Wirkungsgrad sinkt zunehmend. Die Einbrandtiefe sinkt dabei. Der Lichtbogen brennt zunehmend auf dem kalten Grundwerkstoff, weshalb die Kathodentemperatur sinkt. In Folge dessen wird die Elektronenemission erschwert. Gleichzeitig sinkt die Prozessstabilität [Pro76], was auch Matthes [Mat06] bestätigt.
Mit zunehmendem freien Drahtende beim MSG-Schweißen steigt der effektive Wirkungsgrad an. Der Energieeintrag des „Stick Outs“ verschiebt sich zunehmend von der Erwärmung durch den Lichtbogen in Richtung der verlustärmeren Widerstandserwärmung im Draht (Tabelle 3-6) [Pro96]. Ab einer freien Drahtlänge von l = 45 mm treten vermehrt Prozessstörungen auf, weshalb der effektive Wirkungsgrad wieder sinkt [Pro76].

Tabelle 3-6: Einfluss des freien Drahtendes auf die Wärmeverteilung im Bauteil (MAG Schweißen: $I_S = 300$ A, $U_S = 30$ V, $d_{ZW} = 1{,}6$ mm, $v_S = 60$ cm/min) [Pro96]

Länge freies Drahtende "Stick Out" in mm	**Wärmeenergieanteil**		**Gesamtenergie** η_{eff}
	Grundwerkstoff in %	**Zusatzwerkstoff** in %	
20	35	23	58
30	31	29	60
40	27	35	62
50	25	39	64

Die Erhöhung der freien Drahtlänge und die Reduzierung des Drahtquerschnittes lässt sich auf Grund des Jouleschen Gesetzes zur Steigerung der Abschmelzleistung durch Erhöhung des Ohmschen Widerstandes im Zusatzwerkstoff nutzen [Mül83, S. 11].

Eine weitere Einflussgröße ist der Elektrodendurchmesser, welcher eine teilweise erhebliche Reduzierung des effektiven Wirkungsgrades bei zunehmendem Drahtdurchmesser bewirkt [Mül83]. Der Lichtbogensäulendurchmesser nimmt zu, ein vermehrtes „Wandern“ des Lichtbogens an der Elektrode ist zu beobachten, was die Stabilität des Lichtbogens senkt. Eine proportionale Erhöhung der Schweißstromstärke wirkt diesem Verhalten entgegen.

In [Cha90] wurden Schweißparameter untersucht, welche den Schmelzwirkungsgrad des Grund- und Zusatzwerkstoffs beim UP- und MSG-Schweißen beeinflussen. Der Schmelzwirkungsgrad des Grundwerkstoffs steigt, wenn die Schweißstromstärke, die Schweißspannung und bzw. oder der Elektrodendurchmesser erhöht wird. Die allgemeine Schmelzebildung wird auch durch eine positive Elektrodenpolung forciert. Hingegen ist der Anteil des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffs geringer, wenn die Länge des freien Drahtendes erhöht wird.
Positiven Einfluss auf die Schmelzebildung des Zusatzwerkstoffs hat eine hohe Schweißstromstärke, ein langes freies Drahtende und bzw. oder eine negative Elektrodenpolung. Beim MSG-Schweißen bewirkt zudem ein hoher CO_2-Anteil im Schutzgas ein verbessertes Abschmelzen des Zusatzwerkstoffs [Cha90]. Der Anteil des aufgeschmolzenen Zusatzwerkstoffs am gesamten Schmelzbadvolumen sinkt mit steigender Schweißspannung oder größerem Elektrodendurchmesser.

Im Ausschließungspatent zur Bestimmung der Arbeitswerte für abschmelzende Lichtbogenschweißverfahren [Tre90] wurden Parameter analysiert, welche für reproduzierbare Produktionsschweißungen relevant sind. So wurden Probeschweißungen durchgeführt und die integrale Schweißbadtemperatur T_{Bad}, Schweißspannung U_S, Schweißstromstärke I_S, Schweißgeschwindigkeit v_S, Querschnittsfläche A_S und der $t_{8/5}$-Wert bestimmt. Die Bestimmung der Temperaturen in der Schmelze erfolgte mit in der Probe definiert verteilten Thermoelementen.

Formel 3.22

$$\eta_{\max} = \frac{Q_{Schm}}{P_S * t_S} = \frac{\rho_{Wst} * c * T_{Bad} * A_S * v_S}{t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt}$$

Mit Hilfe von Formel 3.22 kann der „maximale“ Wirkungsgrad des Verfahrens errechnet werden. Diese Berechnung erfolgt in Anlehnung an der Bestimmung des Prozesswirkungsgrades Formel 3.15, mit der Ausnahme, dass die Schmelzenthalpie nicht berücksichtigt wird. Nach den theoretischen Berechnungen von [Tre90] hat jedoch die Schmelzenthalpie einen Anteil von 25 % an der notwendigen zuzuführenden Energie zum Schmelzen von Stahlwerkstoff. Dieser Anteil erhöht sich auf etwa 40 %, wenn Aluminiumwerkstoff aufgeschmolzen werden soll. Somit wird deutlich, dass in dieser Betrachtung ein nicht unerheblicher Energieanteil unberücksichtigt bleibt.
Auch wenn die Schmelzenthalpie eine reversible Größe darstellt, ist diese trotzdem zum Erreichen des schmelzflüssigen Zustandes notwendig und muss in die Berechnung einbezogen werden. Die Rückführung der Energie in Form der Kristallisationsenthalpie erfolgt nach dem Schweißvorgang und steht somit dem eigentlichen Schmelzschweißprozess nicht zur Verfügung. Zudem teilt sich diese Energie in Erstarrungsenthalpie und Mischungsenthalpie auf [Heu59], [Hem80], so dass nicht die gesamte Energie der Schmelzenthalpie wieder frei wird, da es Gefügeumwandlungen und Vermischungen im Bereich der Schweißnaht gibt. Zusätzlich verbleibt ein Anteil eingebrachter Energie in Form von inneren Energien bzw. Eigenspannungen im Bauteil.
In Stichversuchen konnten „maximale“ Wirkungsgrade für das UP-Schweißen von η_{max} = 0,48…0,58 ermittelt werden [Tre90]. [Mül83, S. 9] beschreibt hingegen, dass der Wirkungsgrad des UP-Prozesses zwischen 70…85 % beträgt. Die Auswertungen der Wärmebilanzen des UP-Schweißens zeigen, dass 44 % der eingebrachten Energie zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffs und 24 % zum Aufschmelzen des Zusatzwerkstoffs

benötigt werden [Mat06, S. 44]. Somit ergibt sich ein Prozesswirkungsgrad bzw. Schmelzwirkungsgrad von $\eta_{Prozess} = \eta_{Schm} = 0{,}68$. Weitere Größen zum Erreichen des angegebenen thermischen Wirkungsgrades von $\eta_{th} = 1{,}00$ sind die Integration der Wärmeableitung mit 8 % und die Energie zum Aufschmelzen des Pulvers von 24 % [Mat06, S. 44]. Dabei wird die eingebrachte Wärme in das Schweißpulver überwiegend in Form von Wärmeleitung nach dem Schweißvorgang in das Bauteil übertragen.
Da [Tre90] ohne die Schmelzenthalpie rechnet, ist der ermittelte Prozesswirkungsgrad auch etwa 20 bis 30 % unter dem in [Mül83, Mat06] angegebenen Wert.

„Auch eine Änderung der Elektrodenpolung verändert die Temperatur im Lichtbogen. Deshalb ist bei den Impulsschweißverfahren neben dem verbesserten Tropfenübergang vor allem die Reduzierung der eingebrachten Wärmemenge (bis zu 30 %) zu nennen.“ [Sch92, S. 181]
Dieser in der Literaturquelle angegebene Wert einer 30 % geringeren Wärmeeinbringung wird in den eigenen Untersuchungen näher betrachtet. Vorweg nehmend ist zu erwähnen, dass die Tendenz bestätigt werden konnte, jedoch die Dimension mit etwa 5 % weitaus geringer ist.

[Ken98] untersuchte den Einfluss von Pulsparametern auf den Energieeintrag in das Bauteil beim MSG-Impulsschweißen. Je länger der Lichtbogen ist bzw. je höher die Schweißspannung ist, desto geringer ist die eingebrachte Wärmemenge in das Bauteil. Eine Abhängigkeit von der Schweißstromstärke und –spannung wurde deutlich. Im Mittel beträgt der effektive Wirkungsgrad beim Impulsschweißen $\eta_{eff} = 0{,}73$.
Der thermische Wirkungsgrad beim MAG-Schweißen beschreibt laut [Jos03] eine Spanne von $\eta_{LB} = 0{,}68…0{,}73$, wobei der ungepulste Schweißprozess im oberen Bereich liegt und mit steigender Drahtvorschubgeschwindigkeit leicht zunimmt.
Dieses Verhalten ist konträr zu anderen untersuchten Literaturquellen, z.B. [Pep08], [Ege11]. Der Autor begründet es nach Murray und Scott, dass der Wärmetransport in die Schmelze über den abschmelzenden Zusatzwerkstoff und den stetig brennenden Lichtbogen besser ist (Sprühlichtbogenbereich), als über Kurzschlüsse zwischen Grund- und Zusatzwerkstoff in der Kurzschlussphase.
Der gepulste Prozess wäre, abgesehen von der Pulsgestaltung, relativ unabhängig von der Drahtvorschubgeschwindigkeit und im unteren Bereich des angegebenen Wirkungsgradbereiches vorzufinden.

Ziel der Untersuchungen von Atkins [Atk02] war es, die Bauteilvorwärmung beim Fügen von höherfesten Stählen ($R_e \geq 480$ MPa), durch die genaue Kenntnis der eingebrachten Wärmemenge verschiedener Schweißprozesse, zu reduzieren. Während beim Unterpulverschweißen die Vorwärmtemperatur auf $T_V = 50$ °C gesenkt werden konnte, musste beim E-Hand- und MSG-Schweißen mindestens $T_V = 100$ °C gewählt werden. Gründe hierfür sind neben der unterschiedlichen Erstarrung des Gefüges, die andere Ausbildung der Schweißbadgeometrie und der geringere Wärmeeintrag durch den Schweißprozess. Die resultierenden effektiven Wirkungsgrade der Verfahren sind:

- E-Hand-Schweißen $\eta_{eff} = 0{,}65…0{,}70$
- MSG-Schweißen $\eta_{eff} = 0{,}70…0{,}85$
- UP-Schweißen $\eta_{eff} = 0{,}90…0{,}95$

Beim MSG-Schweißen mit dem Standardlichtbogen sinkt der Wirkungsgrad mit steigender Schweißleistung. Durch die Messung der Abkühlzeit $t_{8/5}$ und der Ermittlung der Streckenenergie kann durch Umstellen von Formel 3.1 und Formel 3.5 der thermische Wirkungsgrad berechnet werden. Dieser sinkt von $\eta_{th} = 1{,}00$ auf $\eta_{th} = 0{,}86$, wenn vom Kurz- zum Sprühlichtbogenbereich gewechselt wird [Lat02].

Hingegen steigt der Wirkungsgrad mit zunehmender Schweißleistung an, wenn mit dem Impulslichtbogen gearbeitet wird. Im konkreten Fall von $\eta_{th} = 0{,}70$ ($I_S = 140$ A) auf $\eta_{th} = 0{,}80$ ($I_S = 250$ A) [Lat02].
Die Ermittlung der Daten beinhaltet jedoch mehrere Fehlerquellen. Einerseits wird die Abkühlzeit $t_{8/5}$ berührungslos gemessen, wobei die temperaturabhängige Emissionsrate des Grundwerkstoffs nicht beachtet wurde. Die Konsequenz ist eine ungenaue Temperaturbestimmung. Zudem kann die Messposition im Verhältnis zur Schweißnaht nicht reproduzierbar definiert werden. Andererseits ist die Berechnung der Streckenenergie mit den fehlerhaften Methoden des arithmetischen bzw. effektiven (quadratischen) Mittelwertes erfolgt.

In [Pep08] wurden verschiedene, auf dem Markt befindliche, MAG und wärmeminimierte MSG-Schweißverfahren betrachtet. Die Wirkungsgrade wurden dabei mit einem Flüssigstickstoffkalorimeter bestimmt und anhand DIN EN 1011-1 [DIN09] evaluiert. Das bedeutet, dass das System mit dem relativen und nicht mit dem absoluten thermischen Wirkungsgrad bewertet wurde.
Innerhalb der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die thermischen Wirkungsgrade im Bereich zwischen $\eta_{th} = 0{,}75\ldots0{,}85$ liegen, weitgehend unabhängig vom Schweißverfahren und den Parametern. Laut Literaturrecherchen von Pepe [Pep08] schwankt der thermische Wirkungsgrad beim MAG-Schweißen in einem Bereich von $\eta_{th} = 0{,}62\ldots0{,}85$. Dieser ist abhängig von der Schweißstromstärke, Schweißspannung, Schweißgeschwindigkeit, Lichtbogenlänge, Werkstoff, Schutzgasart und Schutzgasmenge.
Resultat der Untersuchungen von Pepe [Pep08] ist, dass die betrachteten MSG-Schweißverfahren CMT (Fronius), STT (Lincoln Surface Tension Transfer) und Kemppi Fast Root einen thermischen Wirkungsgrad im Bereich von $\eta_{eff} = 0{,}75\ldots0{,}85$ (konstante Versuchsparameter: $v_S = 50$ cm/min, $v_D = 7{,}8$ m/min, Brennerabstand $s = 13$ mm) aufweisen. Diese Werte befinden sich innerhalb der Mess- bzw. Standardabweichungen des Systems, weshalb der Autor keine Unterschiede der einzelnen Verfahren herausstellen kann. Jedoch steigt der thermische Wirkungsgrad bei sehr kurzem oder sehr langem Brennerabstand leicht an. Durch die Erhöhung der Drahtvorschubgeschwindigkeit fällt dieser leicht ab. Die Schweißgeschwindigkeit und die Lichtbogenlänge haben nach seinen Erkenntnissen keinen Einfluss auf den Wirkungsgrad [Pep08].

In [Ege11] wurden die Energieeinträge verschiedene MSG-Verfahren mit zwei Kalorimetertypen (Stickstoffkalorimeter und Plattenkalorimeter) gemessen und verglichen. Ein Ergebnis ist, dass der effektive Wirkungsgrad nur leicht sinkt, wenn die Schweißleistung erhöht wird. Ein Vergleich verschiedener wärmereduzierter Verfahren (z.B. STT, CMT und FastROOT) zeigte einen durchschnittlichen effektiven Wirkungsgrad von $\eta_{eff} = 0{,}85$. Der Hochgeschwindigkeitsschweißprozess (RapidArc) erbrachte einen Wert von $\eta_{eff} = 0{,}78$. Innerhalb der Literaturrecherche in [Ege11] beschrieb Hsu und Soltis den Kurzlichtbogen mit durchschnittlich $\eta_{eff} = 0{,}85$ und den Sprühlichtbogen mit $\eta_{eff} = 0{,}73$. Eine Begründung ist die höhere Widerstandserwärmung des Zusatzwerkstoffes im Kurzlichtbogen. Die elektronische Blockierung der Widerstandserwärmung in den Kurzschlussphasen bei wärmereduzierten Verfahren ermöglicht die Reduzierung der Schweißleistung bei unveränderten Wirkungsgraden. Die ermittelten effektiven Wirkungsgrade von wärmereduzierten MSG-Schweißverfahren befinden sich in einem Bereich von $\eta_{eff} = 0{,}80\ldots0{,}90$, was die Ergebnisse von Pepe [Pep08] bestätigt. Dabei wurden mit dem Stickstoffkalorimeter durchschnittlich 7 % höhere Wirkungsgrade ermittelt, als mit dem modifizierten Plattenkalorimeter (Bauart und funktionsbedingt größere Abweichungen).

c) Vergleich von Schweißprozessen mit abschmelzender und nicht abschmelzender Elektrode

Laut [DuP95] wurde der thermische Wirkungsgrad von WIG-, Plasma-, MSG- und UP-Schweißverfahren mittels eines Seebeck-Kalorimeters bestimmt. „Den höchsten Lichtbogenwirkungsgrad erreichten die Schweißverfahren mit abschmelzender Elektrode, den niedrigsten das Plasmaschweißen." Folgende Wirkungsgrade wurden ermittelt:

- Plasmaschweißen $\eta_{LB} = 0{,}47 \pm 0{,}03$
- WIG-Schweißen $\eta_{LB} = 0{,}67 \pm 0{,}05$
- MSG- und UP-Schweißen $\eta_{eff} = 0{,}84 \pm 0{,}04$

Dabei stellt DuPont [DuP95] fest, dass ein hoher Wirkungsgrad einen hohen Energieumsatz in Form von Wärme im Bauteil bedeutet, was gleichzeitig bewirkt, dass der Schmelzwirkungsgrad und die erzielbare Schweißgeschwindigkeit hoch sind.
Die Differenz der Wirkungsgrade zwischen WIG- und MSG-Schweißen wird durch die fehlende Einwirkung der Widerstandserwärmung der abschmelzenden Elektrode begründet. Laut seinen theoretischen und praktischen Untersuchungen setzt sich der Wärmeeintrag in das Bauteil aus der Erwärmung durch den Lichtbogen und der Widerstandserwärmung der Elektrode zusammen. Beim WIG-Schweißen wird die Widerstandserwärmung der Wolframelektrode über die Brennerkühlung dem Schweißprozess entzogen. Dieser Wärmeanteil beträgt etwa 14…18 % der Gesamtwärmemenge. Wird dieser Anteil vom effektiven Wirkungsgrad des MSG-Schweißens $\eta_{eff} = 0{,}84$ subtrahiert, erhält DuPont [DuP95] den ermittelten Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißens $\eta_{LB} = 0{,}67$. Der Wärmeabtransport über die Drahtelektrode an den Schweißbrenner ist durch den ständig nachgeführten Zusatzwerkstoff beim MSG-Schweißen als minimal zu betrachten. Gleichzeitig konnte beim Vergleich zwischen austenitischem und niedriglegierten Stahlwerkstoff kein Einfluss des Grundwerkstoffes auf den effektiven Wirkungsgrad ermittelt werden.
Maximal erreichbare Schmelzwirkungsgrade für die untersuchten Schweißverfahren sind [DuP95]:

- Plasmaschweißen $\eta_{Schm} = 0{,}23$
- WIG-Schweißen $\eta_{Schm} = 0{,}36$
- MSG- und UP-Schweißen $\eta_{Schm} = 0{,}48$

Hierfür ist zu erwähnen, dass laut [Fue91], [Chi00] der theoretisch maximale Schmelzwirkungsgrad für hochenergetische Fügeverfahren (Laser- oder Elektronenstrahl) $\eta_{Schm} = 0{,}48$ beträgt und somit DuPont [DuP95] seine Ergebnisse bestätigt sieht. Der Laserstrahl weist einen hohen Schmelzwirkungsgrund auf, da dieser auf Grund seiner hohen Energiedichte, auf einen örtlich kleinen Bereich, viel Energie in die Schmelze einbringt und bedingt durch die hohe Verfahrgeschwindigkeit schnell erstarrt. Die Verluste in Form von Wärmeableitung in das Bauteil bleiben somit gering [DuP95].
Im Vergleich der erzielbaren Leistungsdichten verschiedener Fügeverfahren, erscheint die Theorie von [DuP95] strittig. Laut Abbildung 3-16 ist die Leistungsdichte des MAG-Schweißens 20 fach geringer als die des Laserstrahlschweißens. Dadurch nehmen der Nahtquerschnitt und die Größe der Wärmeeinflusszone zu, was die Wärmeableitung in das Bauteil verstärkt und den Schmelzanteil im Verhältnis zur gesamten Bauteilerwärmung senkt.

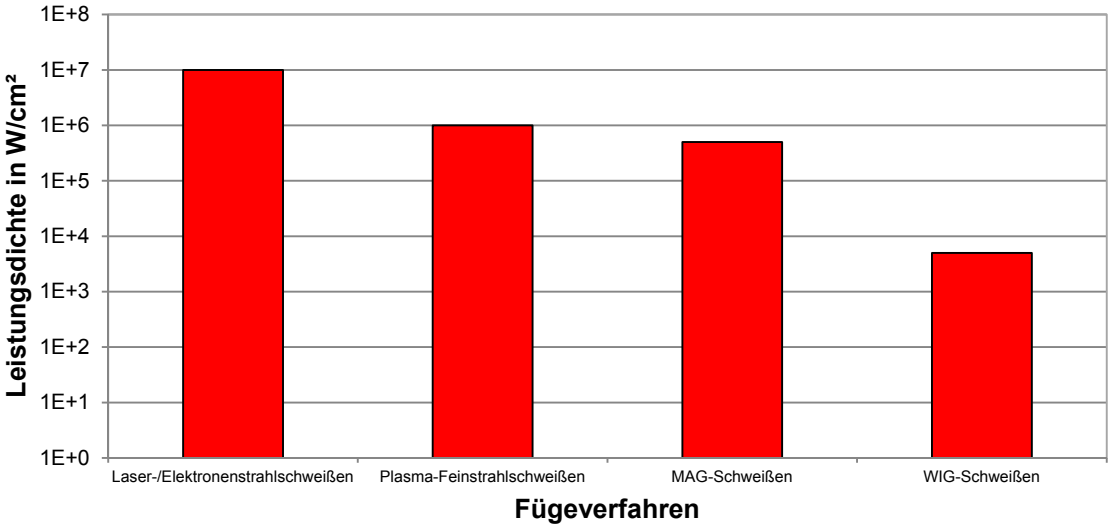


Abbildung 3-16: Leistungsdichten verschiedener Schweißverfahren [Mat06, S. 40]

Tusek [Tus99] stellte fest, dass die Haupteinflussfaktoren auf die Abschmelzleistung die Schweißstromstärke, das freie Drahtende, die Polarität, das Schutzgas sowie der Durchmesser des Zusatzwerkstoffs sind.
Hierzu wurden in [Tus99] die Schmelzwirkungsgrade verschiedener Schweißverfahren durch Auswertung von Querschliffen der Schweißnaht, mit vergleichbaren Schweißrandbedingungen (Schweißleistung, identische Grund- und Zusatzwerkstoffe) untersucht. Die Differenz zwischen dem MSG- und dem UP-Schweißen, bezogen auf den Schmelzwirkungsgrad, ist gering. Wird allerdings beim UP-Schweißen Metallpulver verwendet, wird 65 % der Gesamtenergie zur Bildung der Schmelze verwendet (Tabelle 3-7).
Allgemein kann die Erhöhung des Schmelzwirkungsgrades durch die Verlängerung des freien Drahtendes, dem Mehrdrahtschweißen, der Verwendung von Schutzgasen mit hohen Ionisationsenergien oder durch eine verbesserte Kühlung der Elektrode erreicht werden [Tus99].

Tabelle 3-7: Aufteilung Schmelzwirkungsgrade verschiedener Schweißverfahren [Tus99]

Schweißverfahren	**Schmelzwirkungsgrad in %**		
	Zusatzwerkstoff	Grundwerkstoff	Gesamt
MAG (Ar-CO_2)	30	13	43
MIG (Ar-He)	33	14	47
UP	36	12	48
UP mit Metallpulver	54	11	65
WIG	-	23	23

d) Zusammenfassung der Literaturrecherche zur Wirkungsgradbestimmung

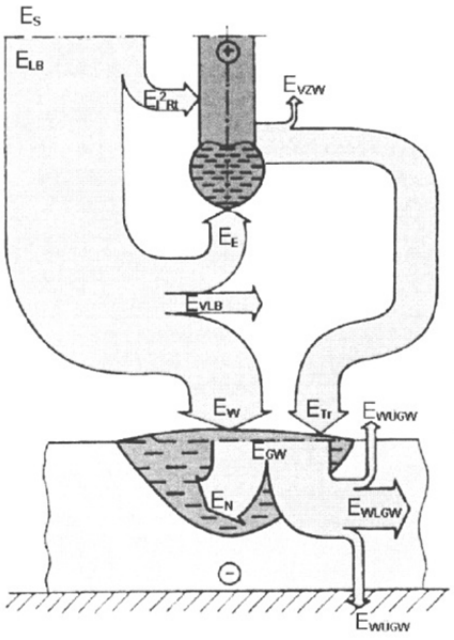
Anhand der Zusammenstellung verschiedener Literaturquellen wird deutlich, dass die Tendenzen zur parametrischen Beeinflussung des Energieeintrags in das Bauteil innerhalb der verschiedenen Untersuchungen grundlegend übereinstimmen, jedoch eine systematische Aufarbeitung und Strukturierung, auch unter dem Gesichtspunkt der Reproduzierbarkeit, zwingend notwendig ist.

Zudem zeigt die umfassende Analyse zum Stand der Technik, dass zum Thema Wirkungsgrade von Schutzgasschweißverfahren aktuell wenig konsistente Untersuchungen existieren. Die Angaben in verschiedenen Literaturquellen weichen um

mehr als 15 % voneinander ab und in vielen Fällen wird einfach Bezug auf die statischen Werte in DIN EN 1011-1 [DIN09] genommen. Die Umstände der Wertermittlung sind meist nicht hinreichend dokumentiert. Somit stellt sich die Frage der Vergleichbarkeit untereinander. Erschwerend kommt hinzu, dass die in den Regelwerken niedergeschriebenen Größen Relativwerte zum UP-Schweißen sind. Dabei wird dem Unterpulverschweißen der thermische Wirkungsgrad $\eta_{th} = 1{,}00$ zugewiesen, obwohl anhand der Literaturrecherchen [Mül83], [Mat06], [DuP95], [Tre90] deutlich wird, dass der Wirkungsgrad nicht dem Wert 1,00 entspricht. Das heißt der thermische Wirkungsgrad des Unterpulverschweißens wurde künstlich um einen Faktor multipliziert, um den Wert 1,00 zu erzielen. Die anderen Schweißverfahren wurden folglich von deren Realwerten auf einen relativen Wert transformiert.
In vielen Fällen wird zudem pro Schweißverfahren ein globaler Wirkungsgrad angegeben, z. B. $\eta_{th} = 0{,}80$ für das MAG-Schweißen. Meist wird dabei nicht zwischen verschiedenen Prozesszuständen, Leistungsbereichen oder Randbedingungen unterschieden. Diese Herangehensweise wird auch durch die Entwicklung neuer Prozessvarianten des Schutzgasschweißens, wie z. B. MSG-Hochleistungs-, wärmeminimierte- oder Hybridschweißprozessen, zunehmend in Frage gestellt.

3.5 Energieflüsse auf Grund des Lichtbogens und des Tropfens

Grundsätzlich wird der Energiefluss beim MAG-Schweißen [Pro82], [Wil06] in Energie zum Abschmelzen des Zusatzwerkstoffs, zum Aufschmelzen des Zusatzwerkstoffs und zum Überhitzen der Schmelze (Tropfen und Schmelzbad) aufgeteilt. Energieverluste entstehen durch Strahlung und Konvektion sowie Metallverdampfungen und Spritzer.



E_S	*Energie des Schweißprozesses*
E_{LB}	*Lichtbogenenergie*
E_{I^2Rt}	*Ohmsche Wärmeenergie*
E_E	*An der Elektrode durch den Lichtbogen umgesetzte Energie*
E_{VLB}	*Energieverlust des Lichtbogens*
E_W	*Direkt durch den Lichtbogen auf das Werkstück übertragene Wärmeenergie*
E_{VZW}	*Energieverlust des Tropfens*
E_{Tr}	*Wärmeenergie im Tropfen*
E_{GW}	*Wärmeenergie im Grundwerkstoff*
E_N	*Schmelzwirksame Energie*
E_{WLGW}	*Nicht schmelzwirksame Energie infolge Wärmeleitung im Grundwerkstoff*
$E_{WÜGW}$	*Nicht schmelzwirksame Energie infolge Wärmeübergang vom Grundwerkstoff an die Umgebung*

Abbildung 3-17: Schema der Energieaufteilung beim MAG-Schweißen [Wil06, S. 22]

Wilhelm [Wil06, S.22] beschreibt den Energiefluss beim MSG-Schweißen folgendermaßen. Die zugeführte elektrische Schweißenergie von der Schweißenergiequelle wird zunächst auf das freie Drahtelektrodenende übertragen. In Folge des elektrischen Widerstandes der Elektrode wird bereits ein Teil der zugeführten Energie in ohmsche Wärme umgewandelt. Ein Großteil der zugeführten elektrischen Energie wird anschließend im Lichtbogen in Wärmeenergie, elektrische Energie des Plasmas sowie elektromagnetische Energie umgewandelt.

Ein Anteil der Lichtbogenenergie wird jedoch durch Strahlung, Wärmeleitung und Konvektion an die Umgebung abgegeben. Die nutzbare Wärmeenergie des Lichtbogens teilt sich in die auf das Werkstück und die in die Drahtelektrode übergehende Wärmemenge auf.
Die Wärmeübertragung auf das Werkstück resultiert aus dem direkt auf die Oberfläche gerichteten Wärmestrom, dem elektrischen Stromfluss, verbunden mit einer Widerstandserwärmung sowie der an den Stofftransport gebundenen Wärmeenergie des Schweißtropfens. Im Grundwerkstoff selbst wird ein Teil der Energie zum Aufschmelzen verwendet. Ein weiterer Teil wird in den angrenzenden, noch nicht aufgeschmolzenen Grundwerkstoff abgeleitet (Wärmeleitung) bzw. durch Wärmeübergang an die Umgebung abgegeben [Wil06, S.22]. Die prozentuale Aufteilung der einzelnen Energieanteile ist von verschieden Parametern abhängig (Abbildung 3-17).

a) Energieflüsse im Lichtbogen

Die Energieflüsse im und vom Lichtbogen werden hauptsächlich durch drei Mechanismen zur Übertragung der thermischen Energie hervorgerufen. Diese Energieflüsse bedingen sich gegenseitig und sind voneinander abhängig.

Wärmeleitung: Energieübergang bzw. Wärmefluss innerhalb eines Stoffes von einem Zustand hoher Entropie zum Zustand niederer Entropie.

Wärmestrahlung: Energieübertragung in Form von elektromagnetischen Wellen, welche von einem Körper ausgesendet werden (im Temperaturbereich bis T = 1.000 C vornehmlich im Infrarotbereich oberhalb λ = 780 nm).

Konvektion: Beschreibt den Energieübergang von einem Stoff zu einem anderen Stoff. Dazu ist der Transport von Teilchen notwendig, welcher durch z.B. Temperatur-/ Druck- oder Dichteunterschiede hervorgerufen wird. Die Transportvorgänge werden vornehmlich von der Strömung und den Grenzschichten zum angrenzenden Medium beeinflusst. Dabei werden das Volumen und die Stoffmenge durch Größen wie Energiedifferenzen, Entropie, Impuls und elektrische Ladung transportiert. Eine Unterteilung erfolgt unter anderem in folgende Gruppen:

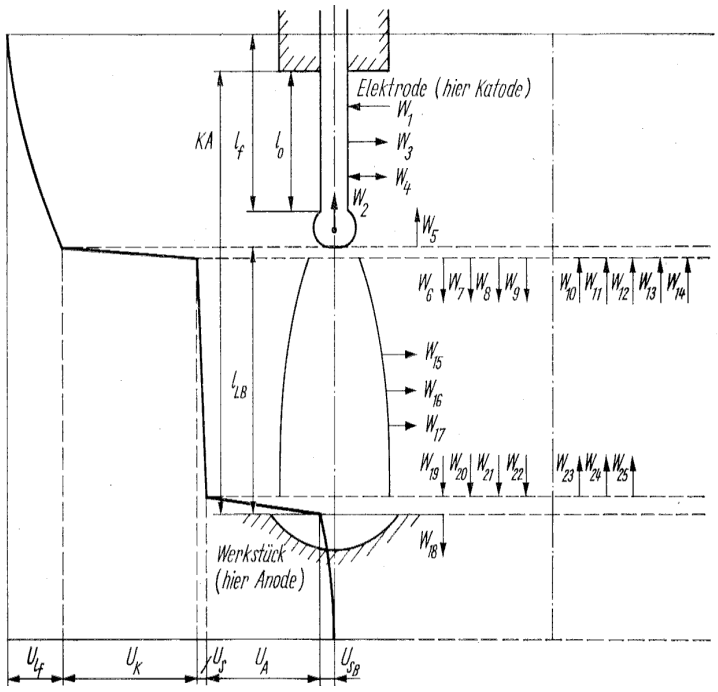
- *erzwungene Konvektion*, Teilchentransport durch äußere Einwirkung und
- *freie* bzw. *natürliche Konvektion*, Teilchentransport durch Temperaturgradienten

Wärmeleitung, Konvektion und Wärmeübergang sind nicht die einzigen Wege die Prozessenergie in Form von Wärme auf das Werkstück und dem Zusatzwerkstoff zu übertragen. Da der Lichtbogen elektrisch leitfähig ist und ein hoher elektrischer Strom fließt, kommen folgende Faktoren hinzu [Bos92]:

- spezifischer Wärmeinhalt der Elektronen (Ionisationsenergie-schutzgasabhängig)
- Energiemengen, welche durch die Elektronen im Lichtbogen aufgenommen bzw. abgestrahlt (Emission) werden
- Vorgänge im Anoden- und Kathodenfallgebiet

Laut Schellhase [Sch85] lassen sich für die Energieanteile beim Lichtbogenschweißen im fünf Bereiche aufteilen, in denen der Energieumsatz beim Schweißen erfolgt. Energiequellengebiete sind der Lichtbogenebereich, die Schmelzzone im Grundwerkstoff und die Elektrode. Hingegen stellen die abfließenden Wärmemengen in die Elektrode und die Umgebung Energiesenkengebiete dar. Eine Zusammenstellung wirkender Energieanteile bei der Lichtbogenschweißung sind in Abbildung 3-18 dargestellt.

Des Weiteren wird exemplarisch der Spannungsabfall innerhalb der Energiequellengebiete dargestellt. Dies sind der Bereich der freien Drahtlänge U_{Lf}, der Kathodenfall U_K, der Säulenspannungsabfall U_S und der Anodenfall U_A.
Der Anoden- und Kathodenfall ist durch einen starken Potenzialsprung gekennzeichnet. Die emittierten Elektronen der Kathode werden in Richtung der Anode beschleunigt und treffen auf neutrale Atome. Durch den Aufprall wird ein Elektron aus dem Atom herausgebrochen und ein Ion entsteht. Dieses Ion ist bestrebt zur Kathode zurückzukehren, um an dieser zu rekombinieren, d.h. ein Elektron herauszulösen, um wieder den neutralen Zustand zu erreichen. Die Ansammlung der Ionen in einer Ionenwolke vor der Katode verursacht einen Potentialunterschied und wird als Kathodenfall bezeichnet [Sch85]. Der Anodenfall wird ebenfalls durch eine Potentialdifferenz zwischen der Anode und einer Elektronenwolke verursacht. Der Spannungsabfall über das freie Drahtende ist durch dessen ohmschen Widerstand verursacht und ist abhängig von der Temperatur und dem Werkstoff. Schellhase [Sch85] stellte fest, dass je länger das freie Drahtende ist, umso größer ist der Spannungsabfall. Daraus folgt, dass der Leistungsumsatz des freien Drahtendes proportional mit der Stromstärke bzw. mit dessen Länge ansteigt. Dessen Anteil am Gesamtenergieumsatz beträgt 5…10 % bei üblichen freien Drahtlängen von l = 6…15 mm und einem Drahtdurchmesser von d = 1,2 mm. Diese Aussage bestätigt auch Tusek [Tus96], das mit steigendem freien Drahtende die Schweißspannung steigt und die Schweißstromstärke sinkt, wenn die Drahtvorschubgeschwindigkeit konstant bleibt. In Folge dessen ist eine um bis zu 25 % reduzierte eingebrachte Wärmemenge in das Bauteil möglich.



W1 Widerstandserwärmung Draht
W2 Wärmeableitung aus Tropfen
W3 Wärmeabstrahlung Draht
W4 Wärme aus Thomson-Effekt
W5 Wärmeleitung aus Kathodenfallschicht
W6 Austrittsarbeit Elektronen
W7 Ionisationsarbeit Elektronen
W8 Metalldampfabströmung
W9 Kaltgaszuströmung
W10 werkstückseitige Gasströmung
W11 werkstückseitige Metalldampfströmung
W12 Ionenrückfall
W13 Rekombination von Ionen
W14 Strahlung der Bogensäule
W15 Wärmeableitung
W16 Gasabströmung durch Konvektion
W17 Energieabstrahlung
W18 Wärmeleitung zur Schmelze
W19 elektrodenseitige Gasströmung
W20 werkstückseitige Metalldampfströmung
W21 Elektroneneinfall
W22 Strahlung der Bogensäule
W23 Austrittsarbeit Sekundärionen
W24 Metalldampfströmung
W25 Kaltgaszuströmung

Abbildung 3-18: Schema der Energieaufteilung beim MAG-Schweißen [Sch85, S. 57]

Laut Aussage von Kruscha [IIM12] ist der Energieeintrag bzw. die eingebrachte Wärmemenge in das Bauteil kathodendominiert und somit die Hauptursache für die Bauteilerwärmung. In Abbildung 3-18 ist entgegen der üblichen Darstellung des MSG-Schweißprozesses die Elektrodenpolung des Prozesses verändert, so dass die abschmelzende Elektrode negativ gepolt ist. In diesem Fall wäre der Anodenfall für die Erwärmung des Bauteils verantwortlich.

Sowohl Uhrlandt [Uhr11], als auch Hertel [Her11] bestätigen, dass ein Großteil des Energieumsatzes in den beiden Fallgebieten umgesetzt wird. Auf Grund des Wärmetransportes aus dem Lichtbogenplasma und den Wechselwirkungen mit den Ladungsträgern, kommt es zum Energieeintrag in die Elektrode. Die Veröffentlichung von Liskevich [Lis12] geht ebenfalls davon aus, dass mehr als 80 % der Spannung im Anoden- und Kathodenfall umgesetzt werden und somit den größten Anteil am Gesamtenergieumsatz des Schweißlichtbogens besitzen. Die eingebrachte Wärmemenge im Bauteil wird durch Einsetzen der Messwerte in Formel 3.6 und Formel 3.5 berechnet.
Da die Schweißstromstärke über den gesamten Lichtbogen konstant ist, bewirkt ein hoher Spannungsumsatz in den Fallgebieten eine starke Erwärmung des Grund- und Zusatzwerkstoffs.
Zusammenfassend wird festgestellt, dass der Kathodenfall den größten Energieumsatz hat und hauptsächlich für die Wärmeeinbringung in den Grundwerkstoff verantwortlich ist (bis zu 80 %). Weiterhin wird dem Schmelzbad Energie durch die bis zu T = 3.000 °C [Sch85] heißen Schweißtropfen zugeführt. Liskevich [Lis12] geht davon aus, dass ein Großteil der restlichen Energie von 20 % in Form des heißen Schweißtropfens in das Werkstück eingebracht wird. Soderstrom [Sod11] bestätigt dies und gibt an, dass 20…30 % der eingebrachten Wärme durch den flüssigen Zusatzwerkstoff übertragen werden. Das Abschmelzen des Zusatzwerkstoffes erfolgt mit Hilfe der Energie aus der Anodenfallschicht und in Folge der Widerstandserwärmung des freien Drahtendes. Weitere Quellen für die Wärmeeinbringung in den Tropfen sind unter anderem die Strahlung der Lichtbogensäule, die Metalldampfströmung, die Rekombinationsenergie der Ionen und die Aufprallenergie der Elektroden, was im nächsten Abschnitt näher dargestellt wird.

b) Ermittlung der Energieflüsse durch den abgeschmolzenen Zusatzwerkstoff

Die exakte Ermittlung der mittleren Tropfentemperatur beim Schweißen mit abschmelzender Elektrode schafft nützliche Erkenntnisse, welche vor allem für eine gezielte Optimierung der Schweißprozesse von entscheidender Bedeutung sein können. Dabei ermöglicht die Kenntnis der mittleren Tropfentemperatur in erster Linie präzisere Aussagen hinsichtlich der Energiebilanz des MSG-Schweißverfahrens zu treffen, was zu einem besseren Prozessverständnis beiträgt. Aufgrund der charakteristischen Prozesseigenschaften der MSG-Schweißverfahren, zu denen zum Beispiel eine hohe Tropfenfrequenz sowie eine hohe Plasmatemperatur und Lichtbogenstrahlung zählen, wird die experimentelle Untersuchung der mittleren Tropfentemperatur während des Schweißprozesses jedoch deutlich erschwert. Am geeignetsten erwiesen sich kalorimetrische Messmethoden.
Dabei ist es bei allen bekannten Messverfahren zunächst notwendig, die Tropfen während des Prozesses vom Lichtbogen zu selektieren, um diese daraufhin in eine kalorimetrische Flüssigkeit oder einen kalorimetrischen Behälter einzubringen bzw. anderweitig untersuchen zu können.

Van den Heuvel [Van78, S. 165ff.] beschreibt eine Messmethode, bei der ohne ein Kalorimeter gearbeitet wird. Ähnlich, wie bei den bereits vorangegangen Messaufbauten, wird eine wassergekühlte Kupferkathode zur Selektion der Schweißtropfen (vom Lichtbogen) verwendet. Jedoch fallen die Tropfen nicht in ein Kalorimeter, sondern direkt auf ein Thermoelement. Die Drähte des Thermoelements wurden dazu vorher in einem Winkel von $\alpha = 120\,^{\circ}$ zueinander angeordnet. Beim Auftreffen der Tropfen auf die Thermodrähte bildet sich eine Verbindungsstelle aus. Dadurch kann eine Thermospannung (Seebeck Effekt) gemessen werden. Durch eine geeignete Methode zur Eichung dieses Versuchsaufbaus wird hierdurch die mittlere Temperatur der Schweißtropfen ermittelt.

Messungen mit integrierten Thermoelementen in die Schmelze ergaben Temperaturen des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffs von T_{Schm} = 1.840 °C, was eine Überhitzung von 8 % im Verhältnis zur Schmelztemperatur des Grundwerkstoffs entspricht [Pro82].
Die Tropfentemperatur im Standardlichtbogenbereich beträgt T_{Tr} = 2.400…2.600 °C, was etwa 65 % Überhitzung bedeutet. Durch die forcierte Tropfenablösung beim Impulslichtbogen konnte die Tropfentemperatur auf circa T_{Tr} = 2.000 °C gesenkt werden [Pro82]. Trotzdem wird vermutet, dass der abgeschmolzene Zusatzwerkstoff weniger dazu beiträgt den Grundwerkstoff aufzuschmelzen, als der übertragene Anteil des direkten Wärmestroms vom Lichtbogen.
Bei dem in Abbildung 3-19 dargestellten Versuchstand [Pro82] wird der abgeschmolzene Zusatzwerkstoff mit Hilfe einer rotierenden Kupferscheibe vom Lichtbogen selektiert. Der Lichtbogen brennt dabei zwischen dem Drahtelektrodenende und der rotierenden Kupferscheibe. Die Rotationsbewegung verhindert das Anhaften der Schweißtropfen. Die so vom Lichtbogen selektierten, schmelzflüssigen Metalltropfen werden daraufhin mit Hilfe eines sich im Kalorimeter befindlichen Kupferblocks gespeichert. Dabei wird die eingebrachte Wärme auf den Kupferblock übertragen. Mit der Kenntnis der Wärmekapazität, der Masse und der sich im Kupferblock einstellenden Temperaturdifferenz, welche mit integrierten Thermoelementen gemessen wird, kann die eingebrachte Wärmemenge berechnet werden. Die Bestimmung der Masse des eingebrachten Zusatzwerkstoffs und der Tropfenanzahl ermöglicht die Kalkulation der Tropfentemperatur [Sco11, S. 5].

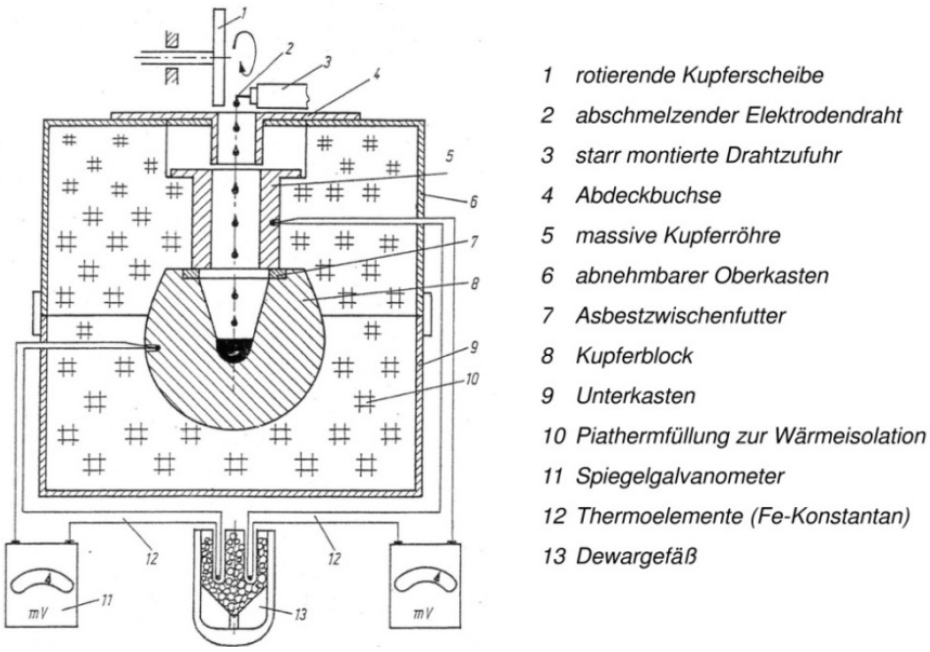


Abbildung 3-19: Versuchsstand zur Ermittlung des mittleren Wärmeinhaltes der Elektrodenmetalltropfen beim MSG-Schweißen [Pro82, S. 346]

Weitere Varianten zur Ermittlung der mittleren Tropfentemperatur beim MSG-Schweißen nutzt Lu [LuM89] für seine Untersuchungen. Die Metalltropfen werden in einem Behälter aus Kupfer aufgefangen, welcher von Wasser umgeben ist, sodass nicht die Temperaturdifferenz im Behälter selbst, sondern die Temperaturdifferenz des ihn umgebenden Wassers, gemessen wird. Für die Selektion des schmelzflüssigen Tropfens vom Lichtbogen kommen zwei unterschiedliche Methoden zum Einsatz. Bei der Methode 1 brennt der Lichtbogen zwischen dem Drahtelektrodenende des MSG-Prozesses und der Wolframelektrode eines WIG-Prozesses, welcher in diesem Fall die Kathode bildete. Durch die definierte Anordnung dieser beiden Prozesse wird das abschmelzen der Drahtelektrode erreicht und gleichzeitig erfolgt die Selektion der Tropfen vom Lichtbogen in Folge der wirkenden Schwerkraft.

Bei der zweiten Methode bildet eine wassergekühlte Kupferplatte die Kathode. Die abgeschmolzenen Metalltropfen des MSG-Prozesses fallen durch eine Durchgangsbohrung in der Kupferkathode [Sco11, S. 9].

Die Art des Schmelzens und der Energieübergang des Zusatzwerkstoffs haben einen großen Einfluss auf die Tropfentemperatur und den Wirkungsgrad des Schweißens [Bol95]. Hierzu wurde eine mathematische und optische Analyse der Abschmelzrate und der Tropfeneigenschaften im Sprühlichtbogenbereich durchgeführt. Hauptaussage ist, dass die Abschmelzrate durch eine höhere Tropfenfrequenz oder größeren Tropfendurchmesser steigerbar ist. Dies wäre neben der Erhöhung der Schweißleistung auch durch die Anwendung des Impulslichtbogens oder die zunehmende Verwendung von CO_2-haltigem Schutzgas möglich.
Mit steigender Drahtvorschubgeschwindigkeit steigt der Einbrand in den Grundwerkstoff und der Anteil des abgeschmolzenen Zusatzwerkstoffs an der Gesamtnahtfläche sinkt.

In [Jen06] wurde festgestellt, dass die Elektrodentemperatur einen großen Einfluss auf die Schweißrauchzusammensetzung hat. Die Bestimmung der Tropfentemperatur ist mit kalorimetrischen Methoden schwierig, da nur die Durchschnittstemperatur und nicht die reale Oberflächentemperatur des Tropfens ermittelt werden kann.
Temperaturmessungen des abgeschmolzenen Zusatzwerkstoffs ergaben Maximalwerte unterhalb von $T_{Tr} = 2.700$ K [Jen06]. Es zeigte sich dabei, dass Parameter, die die kleinsten Tropfen und die geringsten Oberflächentemperaturen verursachen am wenigsten Schweißrauch erzeugen. Durch die Überhitzung der Tropfenoberfläche verdampft das Elektrodenmaterial partiell und legt die chemische Zusammensetzung des Rauches fest.

Laut Wilhelm [Wil06] ist die Trennung des abschmelzenden Zusatzwerkstoffs vom MSG-Lichtbogen mit Hilfe eines Loches in der Kupferkathode begrenzt auf mittlere Leistungsbereiche. Bei höheren Schweißleistungen reicht die Kühlung des Kupferrohres nicht aus und der Lochdurchmesser steigt unkontrolliert. Dem kann entgegnet werden, wenn ein definierter Spalt zwischen zwei parallel angeordnete Kupferrohre die Trennung des abschmelzenden Zusatzwerkstoffes vom Lichtbogen realisiert (Abbildung 3-20). Nach der Zündung des MSG-Schweißprozesses brennt der Lichtbogen auf den zwei wasserdurchströmten Kupferröhren. Die sich während des Schweißprozesses ablösenden Metalltropfen fallen daraufhin in ein sich unter den Kupferrohren befindendes Kalorimeter. Die Tropfen werden in einem Kupferblock aufgefangen, welcher von einer definierten Menge Wasser umgeben ist. Nach Beendigung des Schweißvorganges wird, mittels Thermoelementen, die sich im Wasser einstellende Temperaturdifferenz ermittelt. Dadurch kann die Temperatur der Schweißtropfen berechnet werden [Wil06, S. 61ff.].

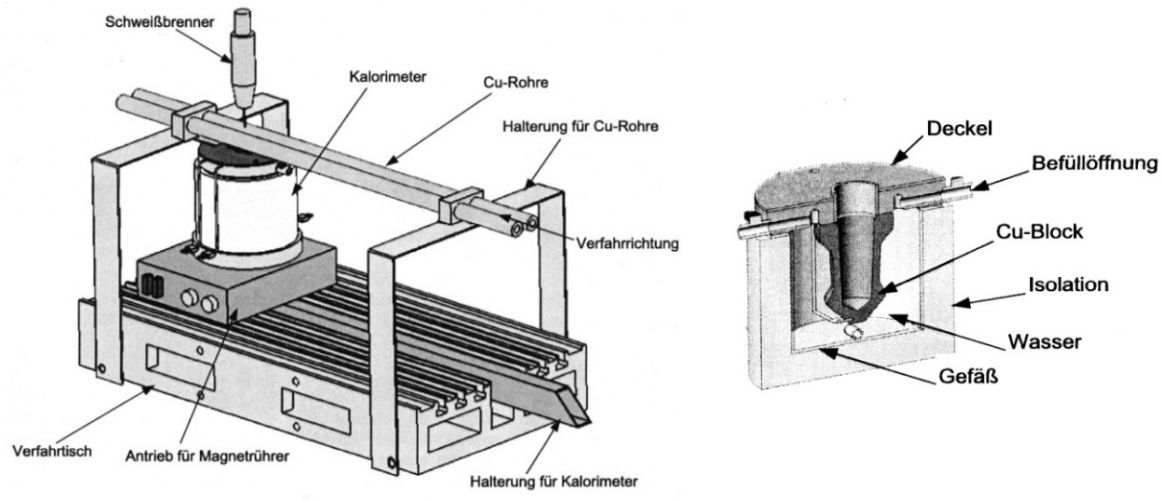


Abbildung 3-20: Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Tropfentemperatur beim MSG-Schweißen [Wil06, S.61]

In [Sod08] wird der Tropfenübergang beim MSG-Schweißen dünner Elektroden mit Argon-CO_2-Gemischen betrachtet. Der Tropfendurchmesser verkleinerte sich nicht in gleichem Verhältnis, wie der Elektrodendurchmesser. Unterhalb des Durchmessers d = 0,7 mm war der Tropfendurchmesser auch im Sprühlichtbogen größer als der Elektrodendurchmesser. Grundsätzlich existieren drei Kräfte, welche die Tropfenablösung bewirken, die Pinchkraft, die Schwerkraft und das angelegte elektrische Feld. Dabei kann die Pinchkraft nur wirken, wenn der Lichtbogen die Elektrode ausreichend umschließt. Dies wird beispielsweise durch die Erhöhung der Schweißstromstärke oder des Argonanteils im Schutzgas erreicht.
Das ist auch der Grund, warum sich mit steigender Schweißleistung die Lichtbogenart und der Tropfenübergang ändern. Die Zumischung von CO_2 in den Argonlichtbogen erhöht die Stromdichte und eine kleinere Fläche der Elektrode wird vom Lichtbogen umschlossen. Die Tropfengröße steigt und die Tropfenablösefrequenz sinkt. Die hohe Stromdichte führt zu einem konzentrierteren Plasmalichtbogenbereich zwischen Elektrode und Werkstück. Ab einem CO_2-Gehalt von 20 bis 30 % ist dieser so stark, dass der abgelöste Tropfen beim Ablösen und dem freien Fall durch den Lichtbogen derart behindert wird, dass dieser exzentrisch auf die Werkstückoberfläche auftrifft [Sod08].

In [Sod11] wurden die Tropfentemperatur und die Lichtbogenleistung beim Metallschutzgasschweißen kalorimetrisch ermittelt. Messtechnisch bedingt konnte kein Kurzlichtbogen untersucht werden, da die Tropfen durch ein definiertes Loch in einer gekühlten Kupferplatte fallen müssen, siehe Abbildung 3-21. Der Lichtbogen brennt während der Versuche auf der Kupferscheibe, wodurch die sich ablösenden Tropfen durch die Bohrung hindurch aus dem Lichtbogen ins Kalorimeter fallen können. Das Messsystem ähnelt dabei der oben beschriebenen zweiten Methode [LuM89], [Sco11]. Während der Lichtbogen auf der Kupferplatte brennt und dessen Energieeintrag durch Thermoelemente gemessen wird, fallen die Tropfen in einen darunter liegenden Kupferbehälter, welcher sich in einem Wasserbad befindet. Durch die Messung der Erwärmung des Wasserbades wird mit Formel 3.17 die eingebrachte Wärmemenge durch die Tropfen ermittelt. Mit der Kenntnis der Tropfenanzahl und Tropfenmasse kann die Temperatur und die Energiemenge des Tropfens berechnet werden.

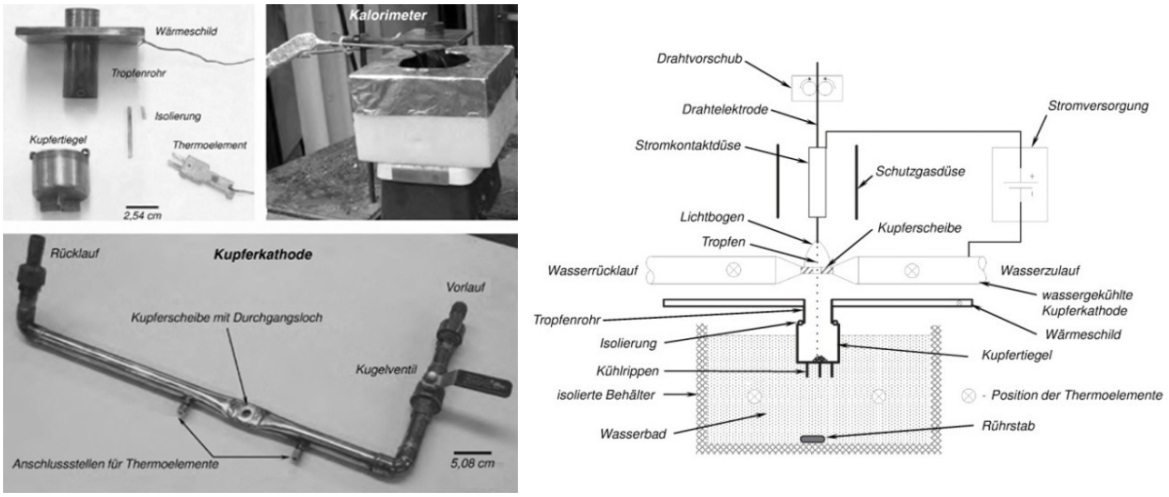


Abbildung 3-21: Versuchsstand zur Ermittlung der Tropfentemperatur beim MSG-Schweißen [Sod11]

Ein wichtiges Ergebnis von [Sod11] ist, dass die Tropfentemperatur nicht gleichmäßig mit der Schweißstromstärke ansteigt (Tabelle 3-8). Dabei befindet sich die Temperatur des gesamten Tropfens des Stahlzusatzwerkstoffs unterhalb der Siedetemperatur, hingegen beim Aluminiumzusatzwerkstoff im Sprühlichtbogenbereich oberhalb der Siedetemperatur. Kalorimetrisch ist es bei dieser Messmethode jedoch nicht möglich die Temperaturen des einzelnen Tropfens zu differenzieren.

Es ist jedoch bekannt, dass die Oberflächentemperaturen weit oberhalb der ermittelten Durchschnittstemperaturen liegen und teilweise die Verdampfungstemperatur überschreiten. Auf Grund der mindestens zweifach höheren Wärmekapazität des Aluminiums ist der durchschnittliche Wärmeinhalt der Aluminiumtropfen circa 80 % höher, als der des Stahlwerkstoffs, was in Tabelle 3-8 bei der Darstellung der Tropfenwärme deutlich wird.

Tabelle 3-8: Tropfentemperaturen beim MSG-Schweißen [Sod11]

	Stahl		**CrNi-Stahl**		**Aluminium**	
Leistungsbereich	**Tropfentemp.** in K	**Tropfenwärme** in J/g	**Tropfentemp.** in K	**Tropfenwärme** in J/g	**Tropfentemp.** in K	**Tropfenwärme** in J/g
unterer	2.700	1.950	2.350	1.630	2.350	2.930
mittlerer	2.200	1.550	2.100	1.430	1.900	2.210
oberer	2.850	2.050	2.400	1.680	2.800	3.320
Siedetemperatur	3.143		3.143		2.740	

Eine weitere Methode zur kalorimetrischen Bestimmung der Tropfentemperatur beim MSG-Schweißen beschreibt Siewert [Sie11, S. 533]. Dabei wird die Selektion der schmelzflüssigen Tropfen vom Lichtbogen, ähnlich wie in [Sod11], mittels einer ringförmigen Kupferkathode realisiert. Die Tropfen fallen nicht in einen Kupferbehälter, sondern direkt in eine kalorimetrische Flüssigkeit. Die Energie der Tropfen wird unmittelbar auf die Flüssigkeit übertragen. Vorteilhaft ist, dass die Tropfengeometrie nach dem Abkühlen erhalten bleibt. Dies ist von großer Bedeutung, wenn die Größe, das Gewicht oder die Geometrie der Schweißtropfen untersucht werden sollen. Um den Einfluss des Lichtbogens auf ein Minimum zu reduzieren, ist ein Schutzgasanschluss am Kalorimeter installiert. Dadurch wird im Kalorimeter ein leichter Überdruck erzeugt, um das Einströmen des heißen Plasmagases in den Innenraum des Kalorimeters zu verringern. Jedoch kommt es dadurch zu einer undefinierten Abkühlung der Schweißtropfen [Sie11, S. 533].
Mit seinen untersuchten Messmethoden wurden durchschnittliche Tropfentemperaturen von T_{Tr} = 2.500 K ermittelt. Die Schmelzbadtemperatur von circa T_{Schm} = 2.100 K wurde mit Hilfe eines Quotientenpyrometers gemessen.

Auf Grundlage der Untersuchungen zum Energiefluss des abgeschmolzenen Zusatzwerkstoffs ist es nicht möglich, verallgemeinerte Aussagen zu treffen, inwiefern die Änderung der unterschiedlichen Schweißparameter beim MSG-Schweißen eine definierte Veränderung der Tropfentemperatur ermöglicht. Da bereits die Veränderung eines einzigen Parameters beim MSG-Schweißen verschiedene Auswirkungen auf den Schweißprozess besitzt. Die Temperatur der Schweißtropfen hängt von zahlreichen Faktoren und deren Wechselwirkungen ab. Allerdings kann darauf geschlossen werden, dass Schweißparameter, wie der Schweißstrom, die Schweißspannung, die Elektrodenzusammensetzung, der Elektrodendurchmesser, die Elektrodengeometrie, die Schutzgaszusammensetzung, der Kontaktrohrabstand, die Lichtbogenart und die damit verbundenen Werkstoffübergangsformen sowie der Einsatz unterschiedlicher MSG-Verfahrensvarianten eine Veränderung der mittleren Tropfentemperatur und somit eine Verschiebung der Energieanteile im Schweißlichtbogen bewirken [Sch85, S.51].

Um Einflussfaktoren auf die Tropfentemperatur zu ermitteln müssen auch die Tropfengeometrie formenden Kräfte beim Schweißen mit abschmelzender Elektrode betrachtet werden. Laut [Yel13] sind die treibenden Kräfte der Pincheffekt, welcher eine Einschnürung des stromdurchflossenen Leiters (Zusatzwerkstoff) verursacht und die Viskosität bzw. die Oberflächenspannung der entstehenden Schmelze. Bei positiver Elektrodenpolung steigt die Pinchkraft mit zunehmender Schweißstromstärke.

[Yel13] stellte fest, dass die Tropfengröße und Tropfenablösefrequenz bis zum Erreichen einer Temperaturschwelle des Tropfens von 90 % der Siedetemperatur relativ unverändert blieb. Erst oberhalb dieser Temperatur sank die Tropfengröße und stieg die Tropfenablösefrequenz. Laut Killing [Kil96] kann dies auf die Reduzierung der Oberflächenspannung bzw. der Viskosität zurückgeführt werden. Zusätzlich wird eine axiale Kraft bezogen auf die Stromübergangsfläche bzw. Stromdichte beschrieben. Diese Kraft wirkt immer in Richtung der großen Querschnittfläche.
Da die elektrische Leitfähigkeit von höher CO_2 haltigen Schutzgasen steigt, nimmt die Kontaktfläche des Lichtbogens ab [Dze99], [Sod08]. Im Verhältnis zum Elektrodendurchmesser (Zusatzwerkstoff) ist der Lichtbogenansatz klein und die axiale Kraft wirkt in Richtung Stromkontaktdüse und erschwert die Tropfenablösung. Hingegen verstärkt diese Kraft die Tropfenablösung bei hoch argonhaltigen Schutzgasen.

3.6 Analyse des Spannungsabfalls im Schweißprozess

Die Aufteilung der Energieflusses beim Schweißen kann im Spannungs-Stromstärke-Phasenraum dargestellt werden (Abbildung 3-22). Dabei kann der Spannungsabfall in die Bereiche am Stickout bzw. freien Drahtende, in den Plasmarandschichten und der Plasmasäule differenziert werden [IIM12].

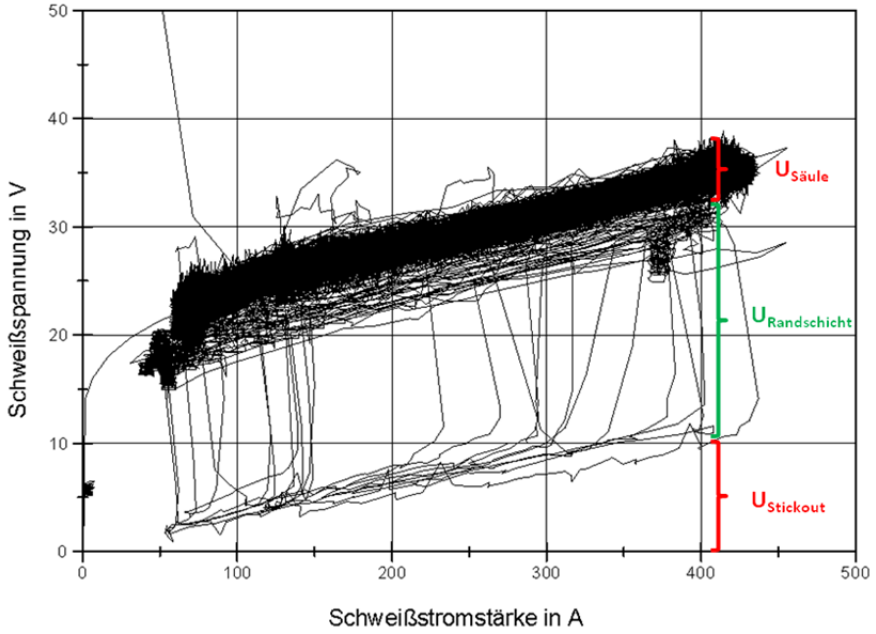


Abbildung 3-22: *U-I-Phasendiagramm beim Impuls MIG-Schweißen (Parameter: s = 18 mm, V_{SG} = 15 l/min 100 % Ar, ZW: G3Si1 d = 1,0 mm, GW: S235, v_D = 6 m/min Impuls, v_S = 60 cm/min)*

Mit steigender Stromstärke steigen der Widerstand und die Temperatur im freien Drahtende (Stickout), weshalb der Spannungsabfall zunimmt. Dieser Zustand ist in dem Moment messbar, wenn die Zusatzwerkstoffelektrode den Grundwerkstoff berührt. Der entstehende Kurzschluss lässt den Schweißstrom ansteigen, dabei brennt kein Lichtbogen. Im oft betrachteten Impulslichtbogenbereich von Kruscha [IIM12] erfolgt dies nur beim Zünden des Lichtbogens oder bei unstetigen Schweißverläufen.
Während des konstant laufenden MSG-Impulsprozesses wechseln sich Grund- und Impulsstromphasen ab. Es entsteht ein U-I-Phasenraum, wo die Schweißspannung mit steigender Schweißstromstärke zunimmt. Die Breite des Phasenraums ist annähernd konstant und stellt den Spannungsabfall in der Plasmasäule dar. Die dabei entstehende Schweißleistung wird vorrangig in Form von Dissipationsprozessen (Wärme- und Strahlungsenergie des Lichtbogens) an die Umgebung frei [IIM12].

Diese Energie steht weder dem Bauteil, noch der Elektrode zur Verfügung und kann als Verlust für den Prozess angesehen werden.
Der Bereich zwischen dem Spannungsabfall im freien Drahtende und in der Plasmasäule spiegelt den Spannungsabfall in den Randschichten (Anoden- und Kathodenfall) wieder. Deren Dimension ist durch die Ionisationsenergie des Schutzgases und der Elektronenaustrittsarbeit des Grund- und Zusatzwerkstoffs gekennzeichnet. Beide Parameter werden durch die Temperatur maßgeblich beeinflusst.
Je heißer das Werkstück wird, desto weniger Energie ist notwendig, um Elektronen aus dem Bauteil zu emittieren. Im Fall der Glühemission entsteht zudem Metalldampf. Dessen notwendige Ionisationsenergie beträgt nur die Hälfte derer von Argon (Metall: E_{Ion} = 7,8 eV). Die Folge ist ein metalldampfdominierter, konzentrierter Lichtbogen mit geringerem Spannungsabfall aber größeren Strahlungsverlusten [IIM12].
Die Erwärmung des Bauteils ist laut Kruscha [IIM12] überwiegend kathodendominiert, weshalb der Lichtbogen von untergeordneter Bedeutung ist. Nach Aussagen des Autors nimmt der Lichtbogen nur die Energiemenge auf, welche über deren Fläche nach außen abgegeben wird. Folglich wäre die Erwärmung des Bauteils nach Formel 3.23 zu bestimmen.

Formel 3.23 $$Q_{BT} = (E_{Ion_{(Schutzgas\,/\,Metalldampf)}} - E_{aus_{(Metall)}}) * I_S * t_S$$ *[IIM12]*

Hertel [Her11] beschreibt, dass die Erwärmung der Anode durch die Rekombination der auftretenden Elektronen verursacht wird. Die Kathode wird durch die übertragene Ionisationsenergie der Ionen erhitzt, vermindert durch die Austrittsarbeit der Elektronen, wie es in Formel 3.23 beschreiben ist.
Die Energiefreisetzung durch die im Lichtbogen übertragende Ionisationsenergie ist weitaus größer, als die Elektronenaustrittsarbeit aus dem Grund- oder Zusatzwerkstoff. Aus diesem Grund begründet Kruscha [IIM12] die stärkere Erwärmung des Lichtbogens in Folge der steigenden Schweißstromstärke, durch den zusätzlichen Energieeintrag in den Lichtbogen von der extrem heißen Kathodenrandschicht. Da die Randschicht sehr dünn ist, kann die Energie nur durch Wärmestrahlung übertragen werden. Die Metallschmelze an sich hat einen hohen Reflektionsanteil, weshalb ein großer Teil der Energie in den Lichtbogen abfließt [IIM12]. Bei der Erhöhung der Schweißstromstärke von I_S = 5 A auf I_S = 280 A stieg den Untersuchungen in [IIM12] nach die Lichtbogentemperatur von T_{Libo} = 5.300 K auf T_{Libo} = 6.100 K. Diese Temperaturerhöhung wird durch die Verwendung eines kurzen Lichtbogens verstärkt. Die spektroskopischen Messungen der Lichtbogenkerntemperaturen in [Wel11], [Ros11], [Uhr11] und [Lic10] ergaben jedoch Werte von T_{Libo_Kern} = 8.000…10.000 K.

4 Versuchsaufbau

4.1 Messprinzip zur energetischen Bilanzierung

Um den Energiefluss beim Lichtbogenschweißen hinreichend genau analysieren zu können, muss an verschiedenen Messstellen der Energieverbrauch bzw. Energieumsatz ermittelt werden. Die äußere Grenze bildet dabei das Stromversorgungsnetz einer Schweißanlage. Hierfür werden folgende Messpunkte erfasst:

- entnommene Energie aus dem Versorgungsnetz
- Schweißleistung bzw. Schweißenergie
- Energieeintrag in das Bauteil (kalorimetrisch)
  → unterteilt in Tropfen- und Lichtbogenenergie
- Abstrahlungsenergie des Schweißlichtbogens
- Kühlungsenergie an die Schweißstromquelle

a) Anlagen- und effektiver Wirkungsgrad

Zur Messung der elektrischen Größen wurden verschiedene auf dem Markt befindliche Systeme und deren Einsetzbarkeit analysiert. Da Schweißstromquellen Drei-Phasen Wechselstrom verwenden, müssen die Spannung und Stromstärke jeweils dreifach erfasst werden. Hinzu kommt die Erfassung der Schweißstromstärke und Schweißspannung, weshalb acht Messkanäle synchron abgetastet und gespeichert werden müssen. Als Komplettlösung konnten keine auf dem Markt existierenden Messsysteme verwendet werden, weshalb eine angepasste Messtechnologie entwickelt wurde. Mit diesem System können energiebezogene Vergleiche zwischen einzelnen Parametern, Prozessen oder Verfahren durchgeführt werden. Das Prinzip der umfassenden energetischen Bilanzierung eines Systems wird in Abbildung 4-1 näher verdeutlicht.

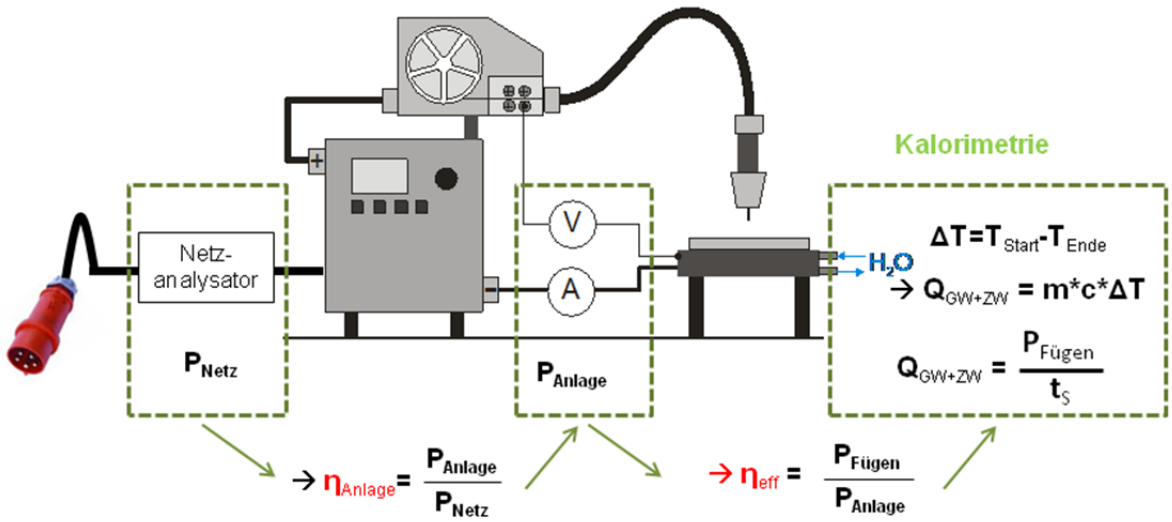


Abbildung 4-1: Messprinzip zur energetischen Bilanzierung

Dabei wird synchron an drei Messpunkten (gestrichelt eingerahmte Bereiche) die Leistung gemessen:

- Die erste Messstelle befindet sich am Versorgungsnetz des Verbrauchers. Hier wird mit Hilfe eines Dreiphasen-Netzanalysators die Leistung ermittelt, welche zum Betrieb der Anlage erforderlich ist (P_{Netz}).
- Die zweite Messstelle befindet sich am energetischen Ausgang des Verbrauchers. Dabei wird die Leistung der Schweißenergiequelle zum Schweißen des Bauteils (P_{Anlage}) gemessen. Der Anlagenwirkungsgrad η_{Anlage} ist das Verhältnis zwischen aus dem Versorgungsnetz entnommener und ausgegebener Leistung der Schweißstromquelle.
- Die dritte Messung ermöglicht die Bestimmung der tatsächlich verrichteten Leistung ($P_{Fügen}$), welche einerseits kalorimetrisch, andererseits auch theoretisch bestimmt werden kann. Das Verhältnis zwischen im Prozess umgesetzter Leistung und ausgegebener Leistung der Schweißenergiequelle wird durch den effektiven Wirkungsgrad des Prozesses η_{eff} ausgedrückt.

b) Energiefluss am Bauteil

Die Literaturrecherchen zum Wirkungsgrad von Schutzgasschweißverfahren zeigen (Abschnitt 3.4), dass etwa 70 % der Schweißenergie im Bauteil umgesetzt wird. Folglich ist ca. 30 % der Energie für den Schweißprozess, genauer gesagt zur Erwärmung des Bauteils, nicht nutzbar. Einerseits entstehen elektromagnetischen Wellen (Abstrahlungsenergie des Schweißlichtbogens), welche an die Umgebung und den Schweißbrenner übertragen werden. Ein weiterer Anteil bewirkt die Erwärmung des Schweißbrenners, sowie die Widerstandserwärmung der stromführenden Bauteile im Brenner und des Strom-Wasser Kabels. Der Schweißstrom wird von der Schweißstromquelle über das Schlauchpaket zum Schweißbrenner geleitet. Auf Grund der hohen notwendigen Stromstärken beim Schweißen erwärmt sich auch das stromführende Kupferkabel relativ stark, weshalb es vom externen Kühlwasservorlauf der Schweißstromquelle umflossen und gekühlt wird. Diese Energie wird an den externen Kühlkreislauf der Schweißenergiequelle übertragen. Eine schematische Darstellung des Energieflusses beim Schutzgasschweißen zeigt Abbildung 4-2.

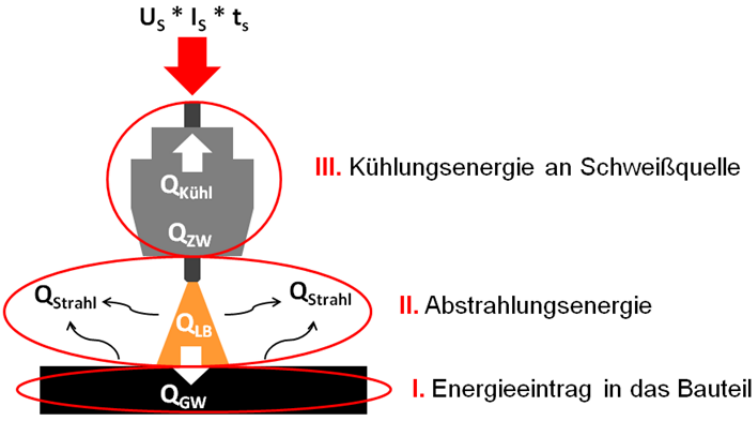


Abbildung 4-2: Energiefluss während dem Schweißprozess am Bauteil

4.2 Schweißstromquellen und Schweißbrenner

Zur energetischen Bilanzierung von Schutzgasschweißverfahren wurden Verfahren mit abschmelzender- und nicht abschmelzender Elektrode untersucht. Hierfür wurden zwei Typen von elektronischen Schweißenergiequellen als Energiewandler zum Lichtbogenschweißen verwendet - einerseits eine Transistor-Schweißstromquelle und andererseits eine Inverter-Schweißstromquelle. Innerhalb der Untersuchungen wurden hierfür die Anlagenwirkungsgrade verschiedener Schweißquellenbauarten analysiert.
Die WIG-Schweißversuche wurden mit einer Schweißenergiequelle des Herstellers Merkle „TIG-Insquare W600 AC/DC“ durchgeführt (Transistortechnologie). Hierzu wurde ein Roboterschweißbrenner mit einer Länge von $l = 190$ mm, variablen Elektrodendurchmessern von $d = 2{,}4$ mm bis $d = 4{,}0$ mm und adaptiven Keramik-Schutzgasdüsen verwendet.
Plasmaschweißversuche wurden mit einer Schweißenergiequelle des Herstellers Plasmastar des Typs „20/250“, einer Wolframelektrode des Durchmessers $d = 4{,}0$ mm, einem Elektrodenrückstand von $r = 3$ mm, Minuspolung und einem Spitzenwinkel $\alpha = 20°$ durchgeführt. Dabei wurde ein wassergekühlter Handschweißbrenner mit optionaler Pulverzuführung verwendet.
Für die Erzeugung von MSG-Schweißnähten wurde einerseits mit einer Schweißenergiequelle des Herstellers EWM des Typs „Phoenix 330“, einem wassergekühlten Handschweißbrenner von „Alexander Binzel Schweisstechnik GmbH & Co. KG“ (MB 401) in neutraler Position gearbeitet. Zusätzlich wurden Vergleichsuntersuchungen mit einer Schweißenergiequelle des Herstellers Fronius des Typs „Trans Puls Synergic 5000“ und einem wassergekühlten Roboterbrenner (Robacta Drive CMT) durchgeführt. Beide Schweißenergiequellen verwenden moderne Invertertechnologie. Durch die Netzgleichrichtung vor dem Transformator besitzen diese Anlagen einen hohen Leistungsfaktor. Die folglich reduzierten Schalt- und Transformatorverluste bewirken einen hohen Anlagenwirkungsgrad von $\eta_{Anlage} = 0{,}80…0{,}90$ [Mat06, S. 64…65]. Viele Schweißquellenhersteller geben dabei den Anlagenwirkungsgrad Ihrer Schweißquellen am optimalen Arbeitspunkt an, so dass laut Datenblatt Anlagenwirkungsgrade von teilweise oberhalb $\eta_{Anlage} = 0{,}90$ erreicht werden [Fro12].

4.3 Messwerterfassung

Zur Bestimmung und Berechnung des Wärmeeintrags in das Bauteil und der Wirkungsgrade sowie der Energieflüsse beim Lichtbogenschweißen werden folgende Messgrößen erfasst und ausgewertet:

- elektrische Parameter (Stromstärke und Spannung)
- Temperatur durch Pt 100 Thermoelemente
- Gewicht (Masse des Kalorimetermediums, Durchflussmengen)

a) Elektrische Parameter

Zur Erfassung der Stromstärke und der Spannung werden Strom- und Spannungswandler der Firma LEM verwendet. Der Spannungswandler wirkt dabei als definierter Transformator. Innerhalb des Belastungsbereiches wird die angelegte Netzspannung auf den maximalen Messbereich transformiert. Im definierten Übersetzungsverhältnis werden somit Messspannungen zwischen $U_{Mess} = -10…10$ V ausgegeben.
Stromwandler basieren auf dem Prinzip des „Halleffektes“. Umgibt eine Spule einen stromdurchflossener Leiter, bildet das Stromkabel die Primärwindung und erzeugt ein Magnetfeld. Die senkrecht dazu angeordnete Spule ist die Sekundärwindung. Der Sekundärstrom ist gegenüber dem zu messenden Primärstrom verringert – und zwar umgekehrt proportional zum Verhältnis der Anzahlen der Primär- und Sekundärwindungen.

Die Hallspannung fällt dabei senkrecht sowohl zur Stromfluss- als auch zur Magnetfeldrichtung am Leiter ab. Über ein definiertes Übersetzungsverhältnis wird eine Messspannung zwischen U_{Mess} = -10…10 V generiert. Diese Messspannungen werden über eine Messkarte der Firma Texas Instruments erfasst und an das Computersystem übermittelt. Dabei werden maximale Abtastraten von über f_{Abtast} = 1 GHz erreicht. Die Auswertung und Steuerung erfolgt über die Mess- und Analysesoftware Diadem®.

Berechnung der Schweißleistung
Die Schweißleistung wird allgemein mit folgender Formel 4.1 berechnet:

Formel 4.1 $$P_S = U_S * I_S$$

Für die Berechnung der notwendigen Faktoren (Schweißspannung und Schweißstromstärke) zur Ermittlung der Schweißleistung werden in der Literatur [Jos03] drei unterschiedliche Varianten beschrieben:

i. arithmetischer Mittelwert
Jeweilige Ermittlung der arithmetischen Mittelwerte der Schweißspannung U_S und der Schweißstromstärke I_S nach der theoretischen Formel 4.2 und anschließender Multiplikation nach Formel 4.1 zu $\overline{P}_{S\,arithm}$.

Formel 4.2 $$\bar{x}_{arithm} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

ii. quadratischer Mittelwert
Jeweilige Ermittlung der quadratischen Mittelwerte der Schweißspannung U_S und der Schweißstromstärke I_S nach der theoretischen Formel 4.3 und anschließender Multiplikation nach Formel 4.1 zu $\overline{P}_{S\,quadrat}$.

Formel 4.3 $$\bar{x}_{quadrat} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

iii. Multiplikation der Momentanwerte
Die genaueste Methode ist die punktweise Multiplikation der Momentanwerte der Schweißspannung U_S und der Schweißstromstärke I_S. Dadurch wird ein neuer Messkanal bzw. das punktuelle Produkt gebildet, wo die momentane Schweißleistung abgebildet wird. Das Ergebnis der Berechnung des arithmetischen Mittelwertes des neuen Kanals ist der reale Mittelwert der Schweißleistung $\overline{P}_S$.

Hierfür ist es von entscheidender Bedeutung, mit welcher Abtastrate die Schweißparameter aufgezeichnet und gespeichert werden. Dabei gilt üblicherweise die Prämisse die Aufnahmefrequenz höchstmöglich zu wählen. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn sich die Schweißwerte in einem kurzen Zeitraum schnell und stark ändern. Vorwiegend ist das beim Impuls- oder Wechselstromschweißen zu beobachten, aber auch der Kurzlichtbogen weist keinen konstanten Verlauf der Schweißspannung und Schweißstromstärke auf. Eine hohe Aufnahmefrequenz bewirkt dabei einen genaueren Digitalisierungsgrad der Messgrößen.
Joseph [Jos03] stellt heraus, dass die Ergebnisse der einzelnen Messmethoden eine erhebliche Abweichung aufweisen. Anhand Tabelle 4-1 wird deutlich, wie groß die Abweichungen der thermischen Wirkungsgrade sind, wenn unterschiedliche Methoden zur Schweißleistungsbestimmung verwendet werden. Dabei sind die Abweichungen beim Standardlichtbogen im Leistungsbereich des Sprühlichtbogens weitaus geringer, als beim Impulslichtbogen.

Der Autor [Jos03] beschreibt weiterhin, dass Messmethode iii) die genaueste Messmethode ist. Aus dessen Sicht liefert Messmethode i) durchschnittlich etwa 12 % höhere Werte und Messmethode ii) etwa 10 % geringere Ergebnisse. Zu selben Erkenntnissen kam auch Pepe [Pep08] in seinen Analysen. Die Untersuchungen zeigen, dass die Wahl der richtigen Berechnungsmethode eine große Bedeutung hat.
Eigene Untersuchungen verschiedener Schutzgasschweißprozesse bestätigen die Aussagen aus Tabelle 4-1. Die Ermittlung von prozentualen Abweichungen von Messmethode i) zu iii) erbrachten etwa 20 % geringere Schweißleistungen. Im Gegenzug lieferte Messmethode ii) zu iii) etwa 16 % höhere Werte. Zu beachten ist hierbei der Vorzeichenwechsel in den Angaben. In den Untersuchungen von [Jos03] wird der thermische Wirkungsgrad verglichen, welcher umso größer ist, je geringer die berechnete eingebrachte Schweißleistung ist.

Tabelle 4-1: Abweichung der Schweißleistung bei verschiedenen Bestimmungsmethoden (Parameter: MAG-Impulsschweißen; v_S = 45…85 cm/min; V = 15 l/min 95 % Ar 5 % CO_2; a = 18 mm)

v_D	Methode i)				Methode ii)				Methode iii)
in m/min	I_S in A	U_S in V	P_S in W	Abweichung in % von Methode iii)	I_S in A	U_S in V	P_S in W	Abweichung in % von Methode iii)	P_S in W
4	22,96	117,21	2691,1	**-28,7**	23,54	191,67	4512,6	**30,3**	3464,1
6	24,75	168,78	4178,0	**-23,7**	25,44	240,73	6124,7	**18,5**	5169,2
8	28,08	206,06	5786,3	**-17,9**	28,80	263,49	7588,6	**11,2**	6822,0
10	31,10	249,13	7747,3	**-10,4**	31,58	288,14	9098,8	**6,4**	8551,4

b) Temperaturmessung

Die Erwärmung des Kalorimetermediums durch die einwirkende Schweißenergie wird mit hochgenauen Thermoelementen des Typs Pt100 1/10 DIN gemessen. Mit steigender Temperatur verändert sich der Widerstand und direkt proportional die Spannung. Die Spannungsdifferenz wird erfasst und ausgewertet. Der Vorteil dieser Thermoelemente liegt darin, dass sie auf Grund der geringen Grenzabweichung des Platinmaterials ohne Neukalibirierung untereinander austauschbar sind.
Während den Untersuchungen wurden die Schweißversuche bei einer durchschnittlichen Raumtemperatur von T_R = 22 °C durchgeführt. Die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Start- und Endtemperatur beträgt ΔT = 5 K.

Tabelle 4-2: Genauigkeitsklassen von Pt100 Thermoelementen [Ome12]

	Abweichung bei Pt100 nach IEC 751 Temperatur			
Temperatur in °C	in ± K Klasse B	in ± K Klasse A	in ± K 1/3 DIN	in ± K 1/10 DIN
-200	1,3	0,55	0,43	0,38
-100	0,8	0,35	0,27	0,12
0	0,3	0,15	0,1	0,03
100	0,8	0,35	0,27	0,12
200	1,3	0,55	0,43	0,38

Formel 4.4
$$\Delta T_{Typ_X} = \frac{dT_{100°C} - dT_{0°C}}{100°C - 0°C} * (T_{Mess} - 0°C) + dT_{0°C}$$

Die Verwendung von Pt100 Thermoelementen mit verschiedenen Genauigkeitsklassen (Tabelle 4-2) [Ome12] beeinflusst das Messergebnis. Die Abschätzung der Messgenauigkeit erfolgt auf Grundlage einer linearen Interpolation (Formel 4.4, exemplarisch für einen typischen Messbereich zwischen T = 0…100 °C).

Nachfolgend werden anwendungsbezogen die Abweichungen von verschiedenen Genauigkeitsklassen bei Raumtemperatur und einer resultierenden Temperaturdifferenz von $\Delta T = 5$ K dargestellt:

- Abweichungen Klasse B $T_{Mess} = T_{R\,22°C} = \pm 0{,}410$ K → 8,20 % von $\Delta T = 5$ K
- Abweichungen Klasse A $T_{Mess} = T_{R\,22°C} = \pm 0{,}194$ K → 3,88 % von $\Delta T = 5$ K
- Abweichungen bei 1/3 DIN $T_{Mess} = T_{R\,22°C} = \pm 0{,}137$ K → 2,75 % von $\Delta T = 5$ K
- Abweichungen bei 1/10 DIN $T_{Mess} = T_{R\,22°C} = \pm 0{,}05$ K → 1,00 % von $\Delta T = 5$ K

Anhand der prozentualen Abweichungen wird deutlich, dass die Genauigkeit der Thermoelemente einen gravierenden Einfluss hat und die höchstmögliche Genauigkeit bei der Erfassung der Temperaturdifferenz gewählt werden muss. Aus diesem Grund werden für die Temperaturmessung Pt 100 Thermoelemente der Genauigkeitsklasse 1/10 DIN verwendet. Trotzdem ist eine mittlere Messungenauigkeit der Temperaturerfassung von 1 % zu erwarten.

c) Masse Kalorimetermedium

Zur Berechnung des Wärmeeintrages ist neben der genauen Bestimmung der Temperaturdifferenz die Messung der Masse des Kalorimetermediums notwendig.
Für die verschiedenen Kalorimetertypen wurden unterschiedliche Wagentypen mit spezifischen Genauigkeitsklassen verwendet (Tabelle 4-3). Für die Bestimmung der Durchflussmengen wurden die Kühlkreisläufe am Rücklauf aufgetrennt und die Kalorimeterflüssigkeit in einem Gefäß gesammelt. Über ein definiertes Zeitintervall wurde das Volumen gesammelt und auf der Waage für das Tropfenkalorimeter gewogen. Hierfür wurden mindestens fünf Versuche durchgeführt. Das Ergebnis ist die Kenntnis der Durchflussmenge pro Zeit.

Tabelle 4-3: Genauigkeitsklassen der verwendeten Waagentypen

Kalorimetertyp	**maximale Masse** in kg	**verwendete Masse** in g	**Messgenauigkeit**	**Fehleranteil** in %
schräg für Schutzgasschweißen	60	22.000	± 20 g	0,0911
eben für UP-Schweißen	300	54.400	± 100 g	0,1804
Tropfenkalorimeter	8,1	800	± 0,1 g	0,0143
Tropfen	0,22	7	± 0,1 mg	0,0014

Anhand der dargestellten Fehleranteile in Tabelle 4-3 wird deutlich, dass die Messgenauigkeit der Waage von mittlerer Bedeutung ist, da der Fehleranteil unterhalb 0,2 % liegt.

4.4 Kalorimetrie

Zur energetischen Bilanzierung des Schweißprozesses müssen die Energieflüsse mit geeigneten Messmethoden bestimmt werden. Neben der Erzeugung von elektromagnetischen Wellenlängen im sichtbaren Bereich wird der Großteil der Energie in Wärme umgewandelt. Diese Wärme kann kalorimetrisch erfasst werden. Die verwendete Kalorimetertechnologie beruht darauf, dass die Wärme im Kalorimetermedium (Wasser) gespeichert wird und mit Hilfe von Formel 3.17 der Wärmeeintrag berechnet wird.
Folgende Wärmemengen werden für die energetische Bilanzierung des Schweißprozesses ermittelt:

- Energieeintrag in das Bauteil,
  zusätzliche Differenzierung in Lichtbogen- und Tropfenenergie
- Abstrahlungsenergie des Schweißlichtbogens
- Kühlungsenergie des externen Kühlkreislaufes der Schweißenergiequelle

a) Schräges Kalorimeter zur Messung des Energieeintrags in das Bauteil

Für die exakte Bestimmung des Wirkungsgrades von Fügeverfahren wurde ein neuer Kalorimetertyp bzw. eine Kombination verschiedener Typen entwickelt. Das Ergebnis ist ein Differenz-Temperatur-Flüssigkeits-Kalorimeter, welches die positiven Eigenschaften eines Flüssigkeits- und eines Differenz-Masse-Kalorimeters kombiniert.
Im ersten Untersuchungsabschnitt konzentrierten sich die Arbeiten auf die Konstruktion und Bewertung von Kalorimetern mit unterschiedlichen Messprinzipien. Das zunächst favorisierte Differenz-Masse-Kalorimeter unter Verwendung von flüssigem Stickstoff wurde trotz hoher Genauigkeit und Reproduzierbarkeit während der Messung auf Grund von zu hohen systematischen Messfehlern bis zur Bestückung des Kalorimeters nicht weiter verfolgt. Der wesentliche Nachteil dieses Messprinzips liegt darin, dass der eigentliche Schweißvorgang außerhalb des Kalorimeters erfolgt. Bis zur Bestückung der Messvorrichtung treten somit nicht quantifizierbare Wärmeverluste auf.
Infolgedessen wurde mit verschiedenen Differenz-Temperatur-Kalorimetern unter Verwendung von Wasser als Kalorimeterflüssigkeit experimentiert. Deren Grundprinzip besteht darin, dass direkt im Kalorimeter geschweißt wird und die Probe nach dem Schweißen im Kalorimetermedium versenkt wird. Untersucht wurden verschiedene Varianten mit statisch befülltem und durchströmtem Kalorimeter. In beiden Fällen wurde der Temperaturunterschied im Kalorimetermedium zwischen den Zuständen vor und nach dem Schweißen ausgewertet. Im Ergebnis wurde der Kalorimeteraufbau nach Abbildung 4-3 realisiert.

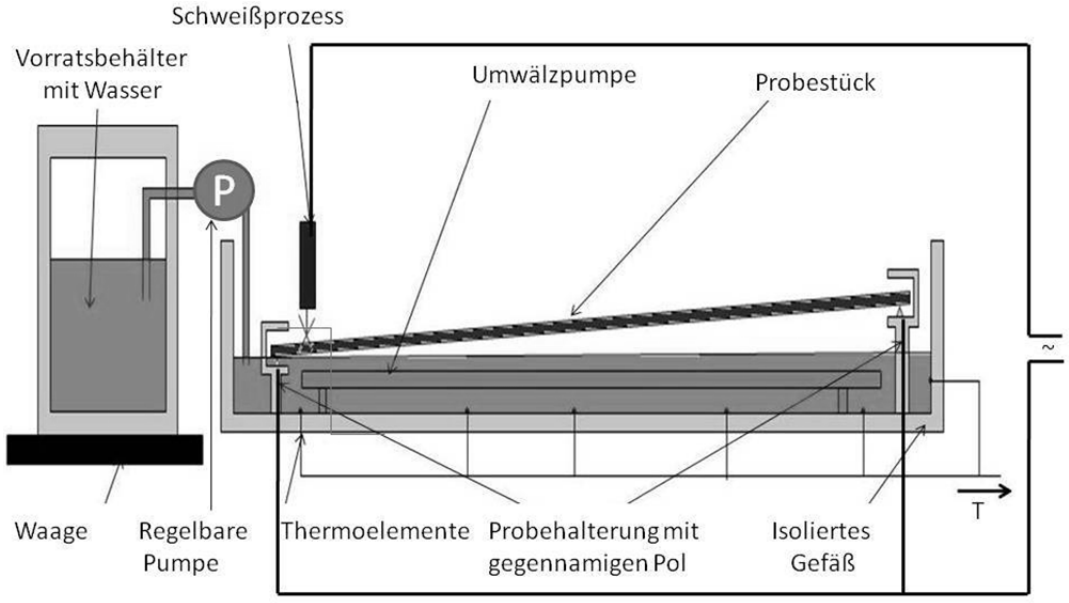


Abbildung 4-3: Prinzipskizze des entwickelten schrägen Kalorimeters

Das Kalorimeter besteht aus einem nach oben offenen, isolierten Gefäß in dem die Probe in einem definierten Winkel zum Wasserspiegel eingespannt ist. Die Kontaktierung wird direkt über die beiden Probenhalterungen sicher gestellt, welche durch eine Kunststoffisolierung, ohne Kontakt zur Kalorimeterflüssigkeit, auf der Unterseite des Kalorimeters erfolgt. Gleichzeitig wurde die Auflagefläche der Probe auf der Halterung, welche gleichzeitig die elektrische Kontaktierung realisiert, minimiert, um den Wärmeverlust zu reduzieren. Dies bietet zudem die Möglichkeit der differenzierten Kontaktierung, um den Einfluss der elektromagnetischen Blaswirkung zu untersuchen. Die Probengeometrie beträgt 1.000 x 100 mm, die Blechdicke kann im Bereich von $1 \leq t \leq 15$ mm variiert werden. Der gewählte Aufbau ermöglicht das Schweißen langer Nähte und minimiert somit den Einfluss von Lichtbogenzündung und -abschalten auf das

Messergebnis des stationären Schweißprozesses. Die große Spannweite im untersuchbaren Blechdickenbereich lässt direkte Vergleichsuntersuchungen von verschiedenen Lichtbogentechnologien mit unterschiedlichen Lichtbogenleistungen zu. Gleichzeitig kann der Einfluss zwei- und dreidimensionaler Wärmeableitung analysiert werden.
Zur Vorbereitung wird der Vorratsbehälter mit etwa V = 30 l temperiertem Wasser gefüllt. Die Starttemperatur wird für alle Versuche gleich gehalten und entspricht der Raumtemperatur. Ähnlich des Differenz-Masse-Kalorimeters greifen die Umgebungsbedingungen über die Oberseite des Kalorimeters an. Dadurch kommt es zum minimalen Temperaturausgleich zwischen Kalorimetermedium und Umgebung. Zur Vermeidung unnötiger Energieverluste an die Umgebung ist das Volumen des Kalorimeters an die eingebrachten Schweißenergien angepasst, um nach dem Schweißen maximale Temperaturerhöhung von $\Delta T = 5$ K zu erzielen. Zum Messbeginn wird der Wasserspiegel bis zur Oberkante der tiefsten Stelle des fixierten Probekörpers aufgefüllt. Gleichzeitig wird mit Hilfe einer Umwälzpumpe der Probekörper von unten benetzt, eine Durchmischung des Wassers erzielt und somit eine homogene Temperaturverteilung im Messsystem erreicht. Im Anschluss erfolgt der Fügevorgang bzw. die Energieeinbringung. Hierbei wird der Brenner automatisiert, mittels eines Roboters, in einem konstanten Abstand zur Probekörperoberfläche und mit definierter Geschwindigkeit entlang der schiefen Ebene bewegt. Der Höhenunterschied zwischen unterer und oberer Probenhalterung beträgt $\Delta h = 70$ mm, was einer Neigung von $\alpha = 4$ ° entspricht. Die durchschnittliche Schweißnahtlänge beträgt $l_S = 800$ mm. Gleichzeitig wird ein mit der Fügegeschwindigkeit genau regelbarer Volumenstrom an Kalorimetermedium, aus dem Vorratsbehälter in das Kalorimetergefäß gepumpt. Durch die Schräglage der Probe wird der bereits geschweißte Teil sofort bedeckt und somit die eingebrachte Energie im Kalorimetermedium gespeichert, ohne den voraus laufenden Fügevorgang zu beeinträchtigen. Gleichzeitig wird vermieden, dass zu viel Kalorimeterflüssigkeit schlagartig erwärmt wird und verdampft, da die Abkühlung der Probe unmittelbar nach dem partiellen Fügeprozess erfolgt und nicht erst nach vollendetem Fügeprozess. Die Fördermenge der Pumpe ist der Fügegeschwindigkeit angepasst, so dass der Fügeprozess nicht durch die Flüssigkeit gestört wird. Der zeitliche Verlauf der Temperaturänderung wird über den gesamten Messzyklus mit Hilfe von hochgenauen Thermoelementen, welche im Kalorimetergefäß definiert verteilt sind, erfasst und für die anschließende Auswertung gespeichert.

Mit diesem Grundaufbau wurde eine Vielzahl von Untersuchungen zur Feinabstimmung durchgeführt. Dies betraf insbesondere die Synchronisation von Pumpenleistung/Volumenstrom und Schweißgeschwindigkeit sowie die Verteilung der Messstellen im Kalorimetermedium. Der steigende Wasserspiegel darf den Schweißprozess nicht beeinflussen. Gleichzeitig sollte der Wasserspiegel aber möglichst nah am Schweißprozess positioniert werden, um die Abstrahlungsverluste von der geschweißten Blechoberfläche minimal zu halten.

Tabelle 4-4: Technische Daten des schrägen Kalorimeters

Abmessungen außen	1100 x 240 x 210 mm	(l x b x h)
Abmessungen innen	1050 x 195 x 180 mm	(l x b x h)
Probenabmessungen	1000 x 100 mm	(l x b)
Höhenunterschied zwischen unterer und oberer Probenhalterung	$\Delta h = 70$ mm, entspricht $\alpha = 4°$	
Probenmaterialstärke	$1 \leq t \leq 15$ mm	(h)
Schweißgeschwindigkeit	$15 \leq v_S \leq 200$ cm/min	
Freie Werkstoffauswahl, aber im festen Zustand		

Zusammenfassung der Vorteile des schrägen Kalorimeters:

- geringste Wärmeverluste, da Bauteil im eingebauten Zustand gefügt wird
- Betrachtung des quasi stationären Fügebereiches
- für alle gängigen thermischen Fügeverfahren anwendbar, welche an der Atmosphäre erfolgen (z.B. MSG, WIG, Plasma, Laser…)
  → direkter Vergleich verschiedener Fügeverfahren mit einer Apparatur möglich
- keine Energieverluste durch Verdunstung des Kalorimetermediums
- einfacher und sicherer Aufbau
- kurze Versuchsdauer (ca. t = 600 s pro Messung)

b) Ebenes Kalorimeter zur Messung des Energieeintrags in das Bauteil

Das oben beschriebene Kalorimeter (Abschnitt 4.4 Absatz a) ist für alle Schweißverfahren ohne pulverförmiger Zusatzwerkstoffzuführung (z.B. WIG, MSG, Plasma, Laser,…) geeignet. Für die Untersuchung von Schweißverfahren mit pulverförmiger Zusatzwerkstoffzuführung z.B. Plasmapulverauftragschweißen oder Unterpulverschweißen wurde ein weiterer Kalorimetertyp entwickelt. Durch die Schräglage des Bauteils und den ansteigenden Wasserspiegel, im oben beschriebenen Kalorimeter, zieht das Schweißpulver Wasser in den Prozess und der Schweißvorgang bricht ab. Aus diesem Grund muss das Bauteil für die Analyse dieser Schweißverfahren unbedingt eben eingespannt werden und die Oberfläche vom umgebenden Kalorimetermedium abgeschirmt werden.
Das neu entwickelte Kalorimeter basiert auf dem Funktionsprinzip eines Flüssigkeits- bzw. Plattenkalorimeters (Abbildung 4-4). Dabei wird auch hier die resultierende Temperaturdifferenz im Kalorimetermedium in Folge des Energieeintrages durch den Schweißprozess ermittelt.

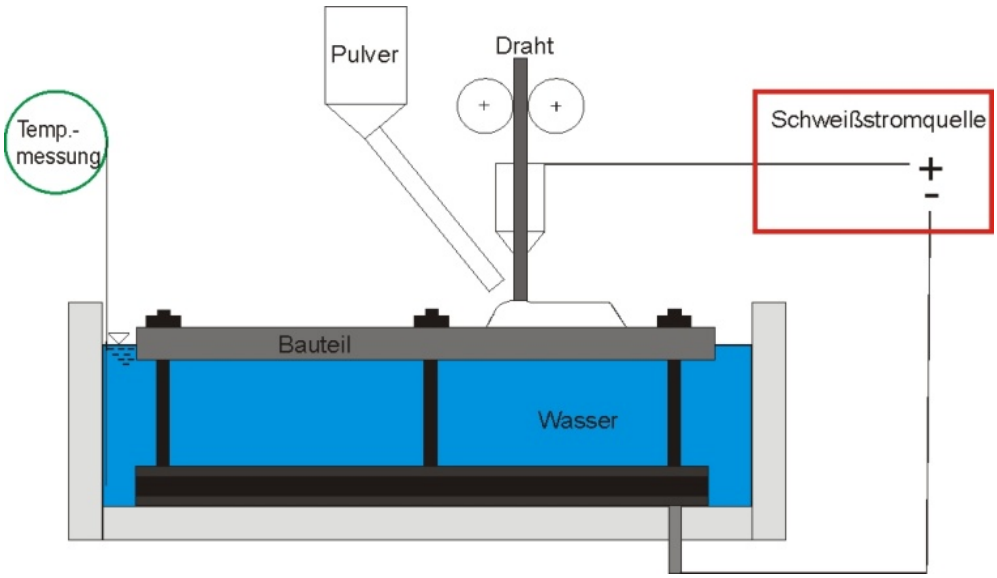


Abbildung 4-4: Prinzipskizze des entwickelten ebenen Kalorimeters

Auf Grund der zu erwartenden hohen Spannungen und Verzüge im Bauteil, bedingt durch die hohe Schweißleistung beim Unterpulverschweißen mit dicken Elektroden, musste eine starre Einspannung realisiert werden (Abbildung 4-5). Mehr Steifigkeit brachte auch die Anpassung der Bauteilgeometrie (l x b x h) 500 x 250 x 20 mm. Diese ist dicker, halb so lang und um das 2,5 fache breiter als beim schrägen Kalorimeter.
Zur Vorbereitung wird das Bauteil waagerecht in die massive Schweißkonstruktion eingelegt und durch einen Rahmen bzw. Niederhalter fixiert. Die Spannvorrichtung wird gleichzeitig genutzt, um den Stromkreis zwischen dem Werkstück und der Schweißstromquelle, zu schließen. In das Kalorimetergefäß werden circa V = 55 l auf

Raumtemperatur temperiertes Wasser eingebracht. Zur Umwälzung und homogenen Verteilung des Wassers sind stirnseitig zwei Umwälzpumpen angebracht. Um einen optimalen Wärmeübergang zu realisieren, erfolgt die Umwälzung direkt unterhalb des Bauteils. Auf Grund der zwei- bis dreifach höheren Schweißleistung des UP-Schweißprozesses im Vergleich zu den betrachteten MSG-Prozessen muss die Umwälzung und Temperaturverteilung im Kalorimeter schnellstmöglich erfolgen, um eventuelle Verdampfungsverluste zu verhindern. Die Leistung der Pumpen sorgt bei einer durchschnittlichen Schweißzeit von $t_s = 50$ s dafür, dass das Wasser während des Schweißprozesses etwa zweimal komplett umgewälzt wird.
Die Temperatur des Kalorimetermediums wird über sechs gleichmäßig im Kalorimetergefäß verteilte Thermoelemente erfasst und deren zeitlicher Verlauf gespeichert. Dabei sollte die Wassertemperatur zum Messbeginn der Umgebungstemperatur entsprechen.
Zur Messung der Wassermenge, der Masse des Schweißpulvers und des Zusatzwerkstoffs wurde unterhalb des Kalorimetergefäßes eine hochgenaue Waage positioniert. Je nach Bestückungszustand werden die jeweiligen Massen bestimmt.
Das benötigte Schweißpulver wird in einer Schütthöhe von etwa $s = 40…50$ mm aufgebracht. Die durchschnittliche Schweißnahtlänge beträgt $l_S = 400$ mm. Der Schweißbrenner wird automatisiert mit konstanter Schweißgeschwindigkeit und konstantem Abstand bewegt. Während des Schweißprozesses wird die Schweißspannung und -stromstärke erfasst und anschließend ausgewertet. Um bei der anschließenden Berechnung die eingebrachte Wärmemenge in das Schweißpulver berücksichtigen zu können, wird dessen Masse nach dem Aufbringen bestimmt. Nach erfolgtem Energieübergang vom Grund- und Zusatzwerkstoff in das Kalorimetermedium wird das unbenutzte Schweißpulver abgesaugt und die entstandene Schlacke gewogen. Dies ist notwendig, um die eingebrachte Wärmemenge in die Schlacke zu bestimmen, sowie um eventuelle Einflüsse des Schweißpulvers auf den Wärmeeintrag zu ermitteln.
Über die Kenntnis der Temperaturdifferenz, des Volumens der Kalorimeterflüssigkeit und der eingebrachten Schweißenergie kann im Anschluss der Energieumsatz (Formel 3.17) und somit der Wirkungsgrad (Formel 3.11) des Prozesses berechnet werden.

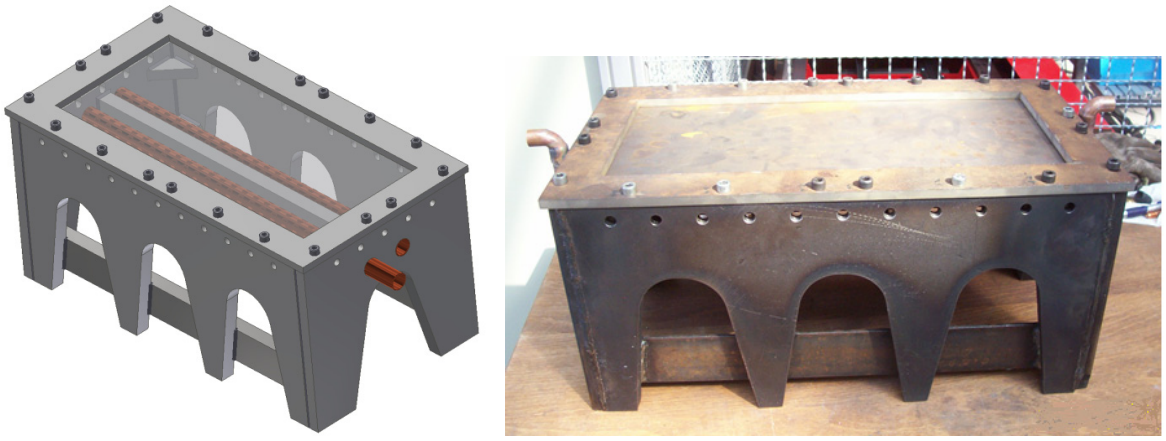


Abbildung 4-5: Bauteilaufnahme für das Kalorimeter beim pulverhaltigem Schweißen

Wesentliche Unterschiede zum verwendeten Kalorimetertyp mit schräg eingespanntem Bauteil sind die ebene Positionierung des Bauteils (Grund: Schweißpulver bleibt trocken), das größere Wasservolumen (notwendig, da höherer Energieeintrag) und die kürzere Schweißnahtlänge.

c) Kalorimeter zur Messung der Lichtbogenleistung

Der entwickelte Versuchsstand muss zwei Funktionen erfüllen. Die exakte Messung der mittleren Tropfentemperatur beim MSG-Schweißen, aber auch die Ermittlung der Wärmemenge, welche ausschließlich der Lichtbogen (ohne den schmelzflüssigen Tropfen) in das Bauteil überträgt.
Während der Versuche ersetzt eine Rohrkathode das zu verschweißende Bauteil. Diese Baugruppe dient dem Zweck die schmelzflüssigen Tropfen vom Schweißlichtbogen zu trennen und die Energie bzw. Wärme zu messen, welche der Lichtbogen in das Bauteil einbringen würde (Abbildung 4-6).

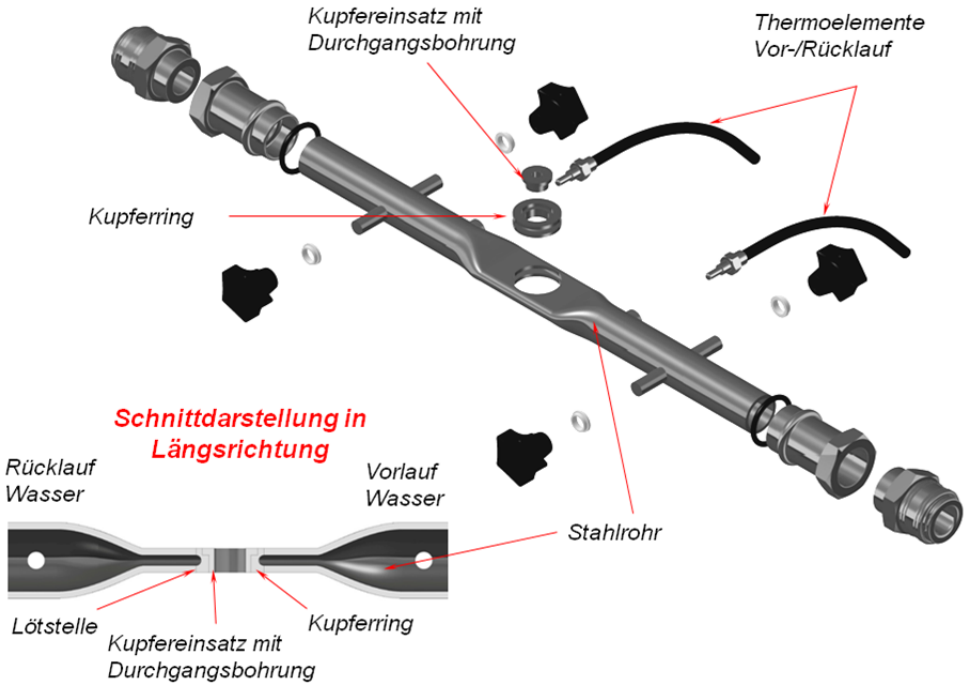


Abbildung 4-6: Aufbau des Rohrkalorimeters zur Messung der Lichtbogenleistung und zur Trennung der schmelzflüssigen Tropfen vom Schweißlichtbogen [Kra12]

Dabei erfüllen die einzelnen Komponenten unterschiedliche Funktionen. Die Rohrkathode besteht prinzipiell aus einem Stahlrohr, in welches eine Kupferplatte eingelötet wurde. In diese wurden, entsprechend der Schnittdarstellung in Abbildung 4-6, ringförmige Kupfereinsätze eingesetzt. Der Lichtbogen brennt während des Prozesses auf diesen Kupferbauteilen. Während des Schweißens wird ein konstanter Volumenstrom temperierten Wassers durch das Stahlrohr geleitet, wodurch die Kupferelemente gekühlt werden. Dadurch wird die während der Schweißversuche entstehende Prozesswärme abtransportiert. Somit wird der Kupfereinsatz weniger beschädigt beziehungsweise angeschmolzen.

Vor Beginn der Untersuchungen musste die Problematik der Lichtbogenzündung gelöst werden. Die Zündung des Lichtbogens beim MSG-Schweißen erfolgt durch den Kontakt der Drahtelektrode mit dem Bauteil. Bei dem konstruierten Versuchsstand befindet sich jedoch eine Durchgangsbohrung unter der Drahtelektrode, welche dafür bestimmt ist, die schmelzflüssigen Tropfen während des Prozesses vom Lichtbogen zu trennen. Um die Zündung des Lichtbogens zu gewährleisten, musste die sich im Kupfereinsatz befindende Durchgangsbohrung zunächst verschlossen werden. Nach dem Zünden des Lichtbogens wird diese wieder geöffnet, damit die separierten Tropfen hindurch fallen. Die Lösung ist die Zündung des Lichtbogens mittels eines Zündbleches. Abbildung 4-7 stellt den Zündvorgang schematisch dar.

Im ersten Schritt wird das Zündblech auf die Rohrkathode aufgelegt. Das Loch im Kupfereinsatz ist dadurch verschlossen. Im Anschluss erfolgt die Zündung des Lichtbogens durch den Kontakt der Drahtelektrode mit dem Blech. Nach der Zündung des Lichtbogens brennt dieser auf dem Zündblech. Wird das Blech entfernt, brennt der Lichtbogen auf dem Kupfereinsatz weiter und die während des Prozesses entstehenden schmelzflüssigen Metalltropfen fallen durch die Durchgangsbohrung im Kupfereinsatz.

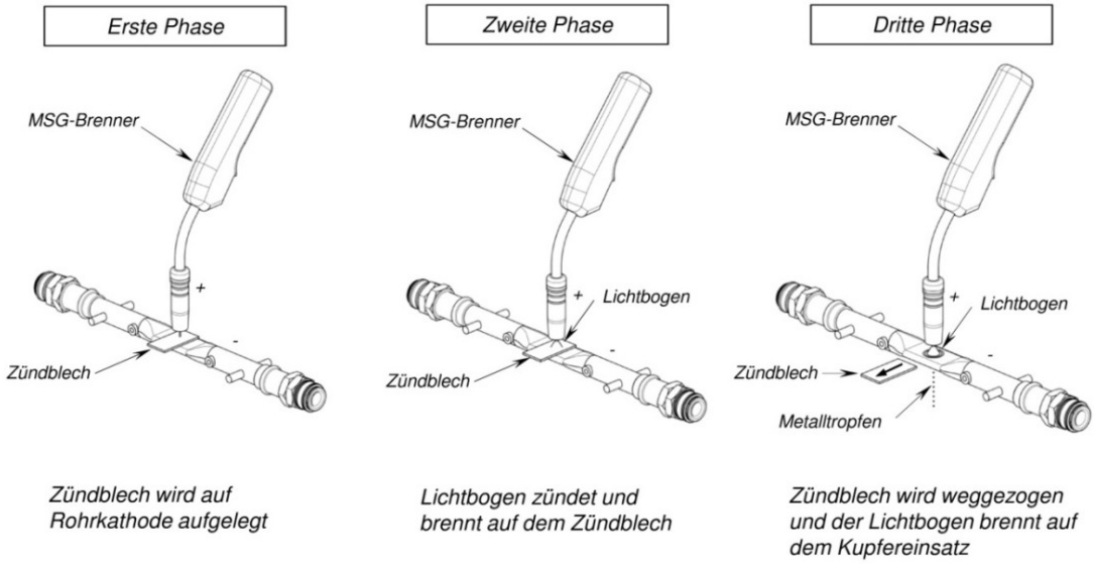


Abbildung 4-7: Vorgang der Lichtbogenzündung beim MSG-Schweißen [Kra12]

Durch die Verwendung unterschiedlicher Kupfereinsätze ist es möglich, die Bohrungsdurchmesser zu variieren. Dadurch kann untersucht werden, welchen Einfluss der nach unten austretende Lichtbogen auf die Erwärmung des Kalorimeters hat. Anhand der Ergebnisse wurden die Geometrie und der Bohrungsdurchmesser so ausgewählt (Abbildung 4-8), dass der größtmögliche Anteil der Energie des Lichtbogens durch das Rohrkalorimeter gemessen werden kann. Der verwendete Bohrungsdurchmesser beträgt d = 5 mm und stellt dabei das Optimum zwischen Verschleißreduzierung und Messgenauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit dar.

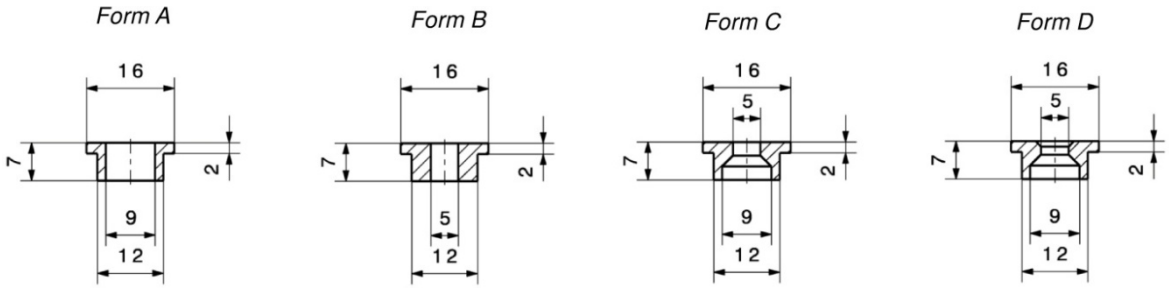


Abbildung 4-8: Geometrien und Bohrungsdurchmesser der Kupfereinsätze [Kra12]

In Vorversuchen erwies sich die Geometrie der Form A als ungeeignet. In Folge des relativ großen Bohrungsdurchmessers von d = 9 mm traten erhebliche Schwierigkeiten bei der Lichtbogenzündung auf. Außerdem brannte der Lichtbogen während des Prozesses in der Bohrung nach unten, bis dieser schließlich erlosch. Ebenfalls trat bei Form A ein sehr großer Lichtbogenbereich unter der Rohrkathode aus, welche die Messungen stark beeinflusst. Um diese Effekte zu beseitigen, wurde der Durchmesser der Durchgangsbohrung auf d = 5 mm reduziert. Das Ziel einer einfachen Lichtbogenzündung und die Prozessanalyse über eine Messzeit von mindestens t = 30 s konnte damit realisiert werden. Ebenso wurde die Größe des austretenden Lichtbogens stark minimiert.

Die Gefahr der Verstopfung des Kupfereinsatzes durch anhaftende Tropfen ist bei Form B sehr hoch. Form C zeigt den optimierten und verwendeten Kupfereinsatz. Hierbei ist die Durchgangsbohrung über etwa zwei Drittel der Gesamthöhe des Kupfereinsatzes auf d = 9 mm aufgebohrt. Dies minimiert die Fläche, an der die Tropfen anhaften können. Des Weiteren ist der austretende Lichtbogenbereich klein. Bei hohen Schweißleistungen (oberhalb P_S = 7.000 W) kam es bei den Formen A bis C zum geringfügigen Aufschmelzen der oberen Kanten der Durchgangsbohrung. Dies beeinflusst den Prozess in vernachlässigbarem Maße. Form D sollte diesen Effekt minimieren. Allerdings schmolzen auch hier die Kanten des Kupfereinsatzes, bei sehr hohen Leistungen geringfügig an, sodass diese Form keine zusätzlichen positiven Eigenschaften lieferte. Die Beeinflussung in Folge des Anschmelzens des Bohrungsdurchmessers bei zu hohen Schweißleistungen wurde dadurch behoben, indem bei Verschleiß ein Austausch des Kupfereinsatzes erfolgte.
Um den Energieeintrag des Lichtbogens zu messen, wurden im Vor- und im Rücklauf des Rohrkalorimeters hochgenaue Thermoelemente installiert. Dadurch kann während des Prozesses die Temperaturdifferenz ermittelt werden. Mit der Kenntnis der Durchflussmenge bzw. des Volumenstromes und der spezifischen Wärmekapazität des Wassers wird mit Formel 3.17 die eingebrachte Wärmemenge berechnet.

d) Kalorimeter zur Messung der Tropfentemperatur

Wie im Abschnitt 3.5 beschrieben, ist die direkte Einleitung der schmelzflüssigen Metalltropfen in eine kalorimetrische Flüssigkeit (Wasser) eine vorteilhafte kalorimetrische Methode. Geforderte Bedingung ist eine möglichst kurze Fallstrecke des aufgeschmolzenen Zusatzwerkstoffs. Dabei darf die Kalorimeterflüssigkeit nicht durch den aus der Bohrung austretenden Lichtbogen beeinflusst werden. Abbildung 4-9 zeigt den Aufbau des realisierten Tropfenkalorimeters.

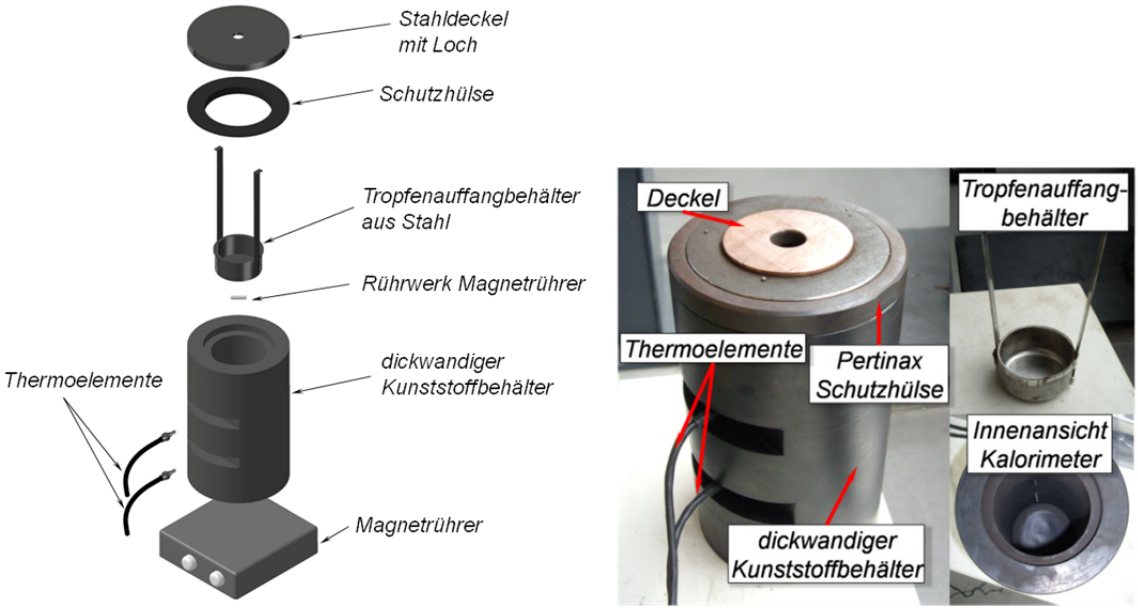


Abbildung 4-9: schematischer Aufbau des Tropfenkalorimeters [Kra12]

Das verwendete Kalorimetergefäß ist ein dickwandiger, zylinderförmiger Kunststoffbehälter aus Polyoxymethylen (POM). Dieser Werkstoff eignet sich aufgrund seiner sehr geringen Wärmeleitfähigkeit ausgezeichnet, um eine gute Isolation zu gewährleisten. In diesen Kunststoffbehälter wurden zwei hochgenaue Thermoelemente des Typs Pt100 1/10 DIN (Tabelle 4-2) integriert, um die Temperatur des Wassers zu messen.

Zur Realisierung eines schnellen und gleichmäßigen Wärmeaustausches wird während der Versuche das Wasser mittels eines Magnetrührers umgewälzt. In das Gefäß ist ein Tropfenauffangbehälter aus Stahlwerkstoff eingebracht. In diesem werden die erstarrten Metalltropfen aufgefangen, um diese nach der Messung entnehmen zu können. Im Anschluss wird die Tropfengeometrie analysiert und deren Masse bestimmt. Der Füllstand des Wassers beträgt l = 150 mm, was das Erstarren des aufgeschmolzenen Zusatzwerkstoffs auf dem Weg zum Tropfenauffangbehälter sicherstellt. In den Deckel wurde eine d = 20 mm Bohrung eingebracht, durch welche die Metalltropfen in das Kalorimeter gelangen. Nach Beendigung des Schweißversuches wurde diese Öffnung verschlossen, um den Wärmeaustausch ohne äußere Beeinflussung sicherzustellen.
Mit der Kenntnis der jeweiligen Massen der Einbauteile und des Kalorimetermediums, sowie der jeweiligen spezifischen Wärmekapazitäten und der absoluten Temperaturdifferenz im Kalorimeter kann mit Formel 4.13 die eingebrachte Wärmemenge berechnet werden.

e) Gesamtsystem zur Messung der Tropfentemperatur und Lichtbogenleistung

Der realisierte Versuchsstand hat die Aufgabe, die Tropfentemperatur und die Lichtbogenleistung synchron zueinander, in Abhängigkeit definiert veränderter Schweißparameter, zu messen. Der Schweißbrenner, die Bohrung im Rohrkalorimeter und die Öffnung im Tropfenkalorimeter müssen in der exakt gleichen Achse zueinander ausgerichtet werden. Der Schweißbrenner wurde dazu in eine Vorrichtung eingespannt, welche ausschließlich die Verschiebung innerhalb der Richtung der z-Achse zulässt. Der Gesamtaufbau des Messsystems ist in Abbildung 4-10 dargestellt.

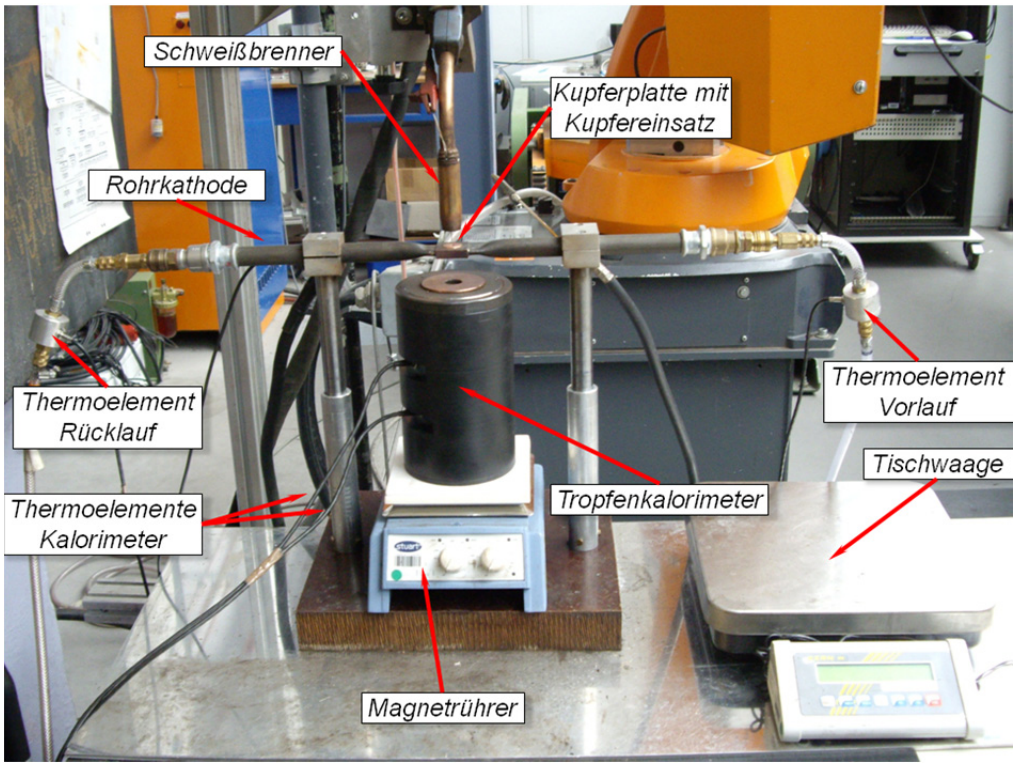


Abbildung 4-10: System zur Messung der Tropfentemperatur und Lichtbogenleistung beim MSG-Schweißen [Kra12]

In Abbildung 4-11 ist der Schweißprozess während zwei Impulsperioden dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Metalltropfen am Rohrkalorimeter vom Lichtbogen separiert werden und in Richtung Tropfenkalorimeter fallen. Der Abstand der einzelnen Tropfen ist relativ konstant, was auf einen gleichmäßigen Prozessverlauf schließen lässt. Die Aufnahmen zwei und vier zeigen den während der Impulsstromphase nach unten austretenden Lichtbogen.

Die Erwärmung des Kalorimeters in Folge des Lichtbogens muss durch einen geeigneten Abstand zwischen Kalorimeterflüssigkeit und Rohrkalorimeter minimiert und bei der Berechnung berücksichtigt werden.
Ferner wird deutlich, dass der Lichtbogen symmetrisch über der Durchgangsbohrung brennt. Das bestätigt die Ausrichtung des Systems und zeigt, dass keine magnetische Blaswirkung den Lichtbogen ablenkt.

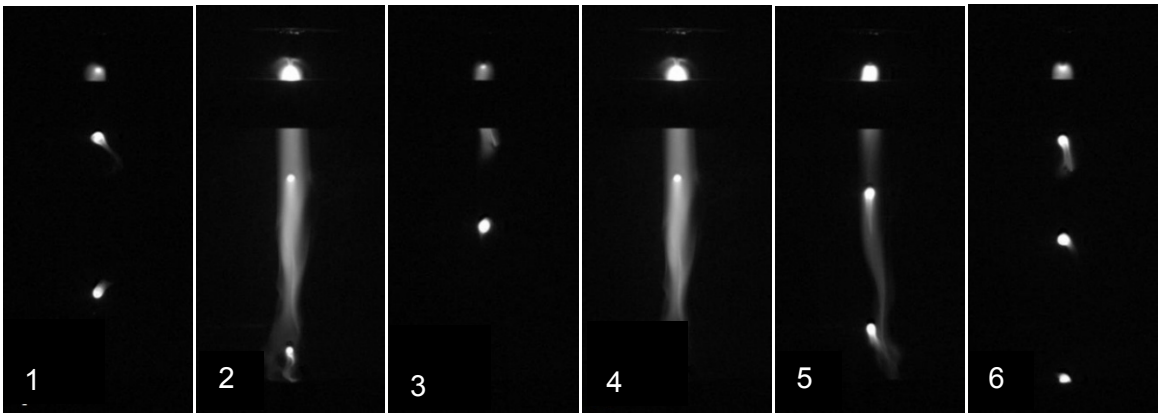


Abbildung 4-11: Tropfendurchgang durch das Rohrkalorimeter [Kra12] (Parameter: s = 10 mm, V_{SG} = 15 l/min Argon, ZW: G3Si1 d = 1,0 mm, v_D = 6 m/min Impuls, Tropfenfallhöhe h = 70 mm)

Durch den Eintrag definierter Wärmeinhalte in die Kalorimeterflüssigkeit erfolgte die Kalibrierung des Messsystems. Einerseits wurden spezifische Massen verschiedener Metallschmelzen verwendet, aber auch temperierte Flüssigkeiten. Nach der Messung der resultierenden Erwärmung im Kalorimeter wurde mit Formel 3.17 der Wärmeeintrag berechnet.
Zur Ermittlung des optimalen Abstandes zwischen Rohrkathode und Wasseroberfläche des Tropfenkalorimeters wurden umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt. Hierzu wurde der Abstand zwischen s = 50…90 mm in Δs = 10 mm Intervallen variiert sowie der jeweilige Wärmeeintrag bei Drahtvorschubgeschwindigkeiten von v_D = 2 m/min bis v_D = 10 m/min untersucht. Bei einem Abstand von s = 70 mm zwischen Wasseroberfläche und Rohrkathode war die Streuung der Tropfentemperatur in den jeweils drei Referenzschweißungen und innerhalb der untersuchten Leistungsbereiche minimal, so dass diese Distanz als Standardwert gewählt wurde. Dies lässt darauf schließen, dass die zusätzliche Wärmezufuhr in das Kalorimeter durch den austretenden Lichtbogen sowie die Abkühlung der Tropfen in Folge der Fallhöhe bei diesem Abstandswert in einem optimalen Verhältnis zueinander stehen.

f) Kalorimeter zur Messung der Abstrahlungsenergie des Schweißlichtbogens

Die Messung der Wärmestrahlung, Wärmeleitung und des Wärmedurchgangs des Schweißlichtbogens wurde mit einer speziell konstruierten Messglocke durchgeführt. In Abbildung 4-12 ist der prinzipielle Aufbau der Messapparatur schematisch dargestellt.
Um den statischen Zustand der Abstrahlungsenergie messen zu können, musste eine Schweißdauer von mindestens t = 240 s realisiert werden. Dies erfolgte an einer Rohrschweißanlage. Das verwendete Rohr des Werkstoffs S 235 JR hatte einen Durchmesser von d = 220 mm. Die Oberfläche ist sandgestrahlt und hat eine Materialstärke von t = 5 mm. Die Schweißgeschwindigkeit wird der Schweißleistung angepasst.
Die Messglocke besteht aus einer doppelwandig geschweißten Aluminiumkonstruktion. Aus der zentralen Kühlung gelangt über einen Schlauch temperiertes Wasser, von T_{vor} = 15…16 °C, in den Hohlraum der Glocke. Zur Temperaturmessung wurden hochgenaue Thermoelemente des Typs Pt100 1/10 DIN (geschirmt) verwendet.

Die Thermoelemente sind mittels eines Adapters in den Vorlauf bzw. Rücklauf integriert. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit befinden sich die Thermoelemente direkt an der Messglocke. Dadurch werden Messfehler, welche beispielsweise durch die Abkühlung bis zum Messpunkt entstehen, reduziert. Nach der Messung der Vorlauftemperatur T_{vor}, durchströmt das Wasser die Glocke, erwärmt sich und verlässt diese über den Rücklaufschlauch. Hier ist ein weiteres Thermoelement zum Messen der Rücklauftemperatur $T_{Rück}$ eingebracht. Dadurch ist es möglich, die Temperaturdifferenz zu ermitteln. Mit Hilfe des konstant eingestellten Durchflussvolumens kann die abgestrahlte Wärmemenge mit Hilfe von Formel 4.5 berechnet werden.

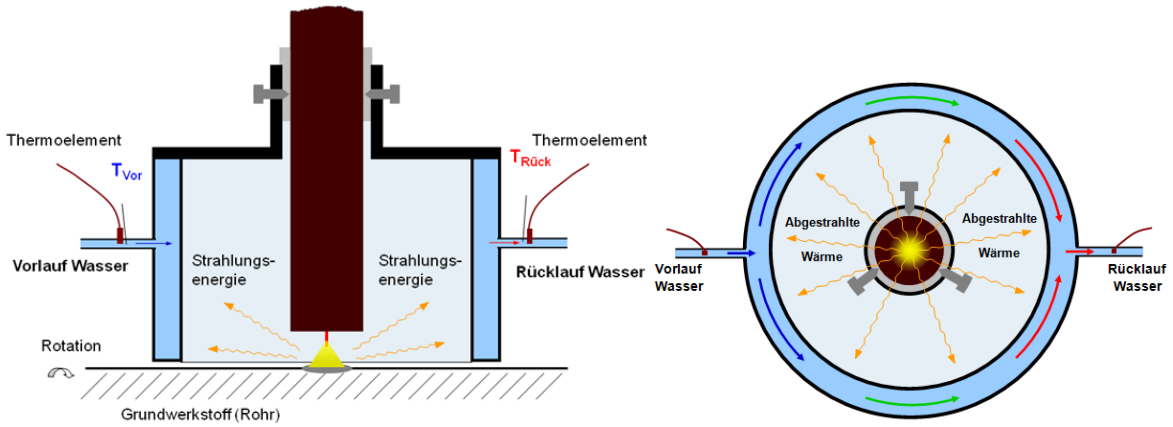


Abbildung 4-12: Prinzipskizze zur Messung der Abstrahlungsenergie des Lichtbogens

Während des Schweißprozesses wird Wärme, hauptsächlich vom Lichtbogen, an die Umgebung abgestrahlt. Um diese Abstrahlungswärme Q_{ab_Umg} zu ermitteln, werden die Temperaturen T_{Vor} und $T_{Rück}$ hochgenau gemessen. Während des Schweißens erwärmt sich das Wasser in der Apparatur. Somit steigt die Rücklauftemperatur $T_{Rück}$, bis sich diese auf einem Plateau einpendelt und nahezu konstant bleibt. Der komplette Temperatur-Zeit-Verlauf wird exemplarisch in Abbildung 4-13 dargestellt. Mit der Software jBEAM® werden diese Messdaten analysiert sowie ausgewertet. Als T_{Vor} wird die Vorlauftemperatur der Messglocke gewählt. $T_{Rück}$ ist das arithmetische Mittel aus der Rücklauftemperatur im statischen Zustand.

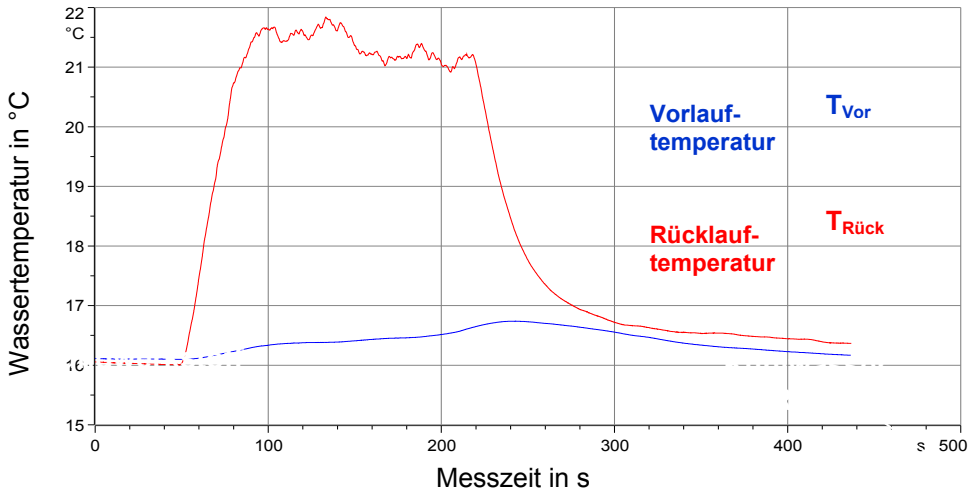


Abbildung 4-13: Beispielhafter Verlauf von T_{Vor} und $T_{Rück}$ beim MAG – Schweißen (Parameter: GW S235 JR G2, ZW G3Si1 d = 1,2 mm, s = 15 mm, v_S = 90 cm/min, 15 l/min 82 % Ar 18 % CO_2, v_D = 10 m/min)

Mit Hilfe von Formel 4.5 wird die an die Umgebung abgestrahlte Wärmemenge berechnet.

Formel 4.5 $$Q_{ab_Umg} = c_{H_2O} * m_{H_2O} * (T_{Rück} - T_{Vor})$$

Durch ein Loch im Kopfbereich wird der Schweißbrenner in die Messglocke geschoben und fixiert. Eine umschließende Gummidichtung verhindert das Ausströmen der durch den Schweißprozess erhitzten Luft durch die Öffnung.
Jedoch treten Verluste und Messungenauigkeiten durch den minimalen Spalt zwischen Messglocke und Rohr auf. Auf Grund des kontinuierlichen Schutzgasstromes tritt in diesem Bereich heißes Gas und Wärmestrahlung aus. Dieser Verlustwert ist schwer quantifizierbar.

g) Kalorimeter zur Messung der Kühlungsenergie

Um die übertragene Strahlungswärme an den Schweißbrenner, die Widerstandserwärmung der stromführenden Bauteile im Schweißbrenner und die Erwärmung des Strom-Wasser Kabels im Schlauchpaket zu ermitteln, wurde die Temperaturdifferenz des Kühlwasservor- und -rücklaufs direkt an der Schweißenergiequelle gemessen. Somit wird die Kühlung des externen Brennerkühlkreislaufes der Schweißenergiequelle analysiert. Abbildung 4-14 zeigt die zwei an den Kühlwasserschläuchen zur Schweißenergiequelle integrierten Thermoelemente, welche die Vorlauf- und die Rücklauftemperatur erfassen.
Die an den Schweißbrenner und das Schlauchpaket abgegebene Wärmemenge Q_{ab_Br} wurde kalorimetrisch bestimmt, funktionell analog der Methode zur Messung der Abstrahlwärme an die Umgebung. Der Schweißbrenner erwärmt sich einerseits durch die Widerstandserwärmung der Elektrode und der integrierten stromführenden Brennerbauteile sowie durch die abgestrahlte Energie des Lichtbogens. Weiterhin erwärmt sich das wassergekühlte, Strom-Wasser Kabel im Schlauchpaket durch dessen Widerstandserwärmung. Genau wie bei der Messglocke, wird die Wärmemenge mit Formel 4.5 berechnet.



Abbildung 4-14: Prinzipdarstellung der Integration von Thermoelementen zur Messung der Kühlleistung

Die gemessene Kühlungsenergie an die externe Brennerkühlung der Schweißenergiequelle kann in die Erwärmung des Schlauchpaketes und des Schweißbrenners unterteilt werden. Hierfür muss die Widerstandserwärmung des Strom-Wasser Kabels von der berechneten Brennerkühlungsenergie subtrahiert werden.

Das Joulesches Gesetz (Formel 4.6) beschreibt die Erwärmung eines elektrischen Leiters durch das Anlegen eines Stromes. Der elektrische Widerstand des Strom-Wasser Kabels wird durch dessen Leitungslänge, Werkstoff und Leitungsquerschnitt beeinflusst und mit Formel 4.7 berechnet.

Formel 4.6 $$Q = I_S^2 * R_{Leitung} * t_S$$

Formel 4.7 $$R_{Leitung} = \frac{\rho_{el} * l_{Leitung}}{A_{Leitung}}$$

Die exemplarische Darstellung der Widerstandserwärmung des Strom-Wasser Kabels (Tabelle 4-5) stellt den Anteil der Energie dar, welcher für den Schweißprozess nicht nutzbar, durch die externe Brennerkühlung der Schweißenergiequelle abgeführt wird. Am Beispiel eines MSG- Sprühlichtbogens wird deutlich, dass die Erwärmung des Strom-Wasser Kabels bei einer Schweißstromstärke von I_S = 300 A pro Sekunde etwa $P_{Leitung}$ = 287 W beträgt, was circa 3 % der benötigten Schweißleistung darstellt.

Tabelle 4-5: Widerstandserwärmung im Strom-Wasser Kabel
(Parameter: $A_{Leitung}$ = 16 mm², Kupferkabel ρ_{Cu} = 0,017 Ω*mm²/m, $l_{Leitung}$ = 3 m, t_S = 1 s)

Stromstärke in A	Erwärmung in W
50	8,0
100	31,9
150	71,7
200	127,5
250	199,2
300	286,9
350	390,5
400	510,0

h) Untersuchung der Lichtbogengeometrie

Für die Analyse der Abstrahlungsenergie und des Prozessverhaltens wurde die Lichtbogengeometrie mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera ermittelt. Die Schweißversuche wurden auf der Rohranlage durchgeführt. Während des Schweißens wird das Rohr mit fließendem Wasser von Innen gekühlt, was die Temperaturschwankungen im Grundmaterial reduziert. Der Vorteil bei diesem Aufbau ist die statische Positionierung des Schweißbrenners, wodurch negative Nebeneffekte auf Grund der Brennerbewegung eliminiert werden. Dadurch kann die Geometrie des Lichtbogens in verschiedenen Prozesszuständen ermittelt werden. Verwendet wurde das Kamerasystem v660 von der Firma Vision Research. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-15 dargestellt. Die Software „Phantom Cine Viewer“ wurde für die Analyse der Videosequenzen verwendet.

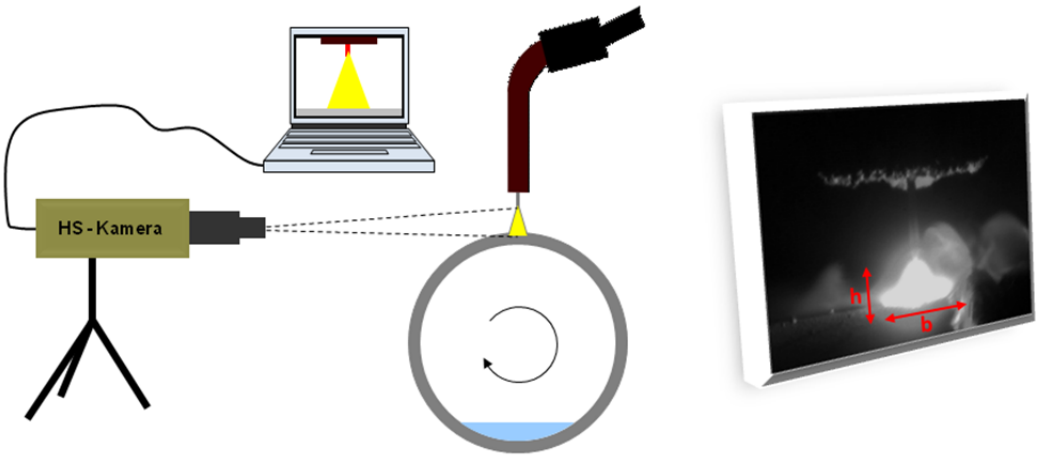


Abbildung 4-15: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Lichtbogengeometrie

Ziel dieser Messungen ist, die Lichtbogengeometrie verschiedener Prozesszustände beim Schweißen zu analysieren. Je nach Veränderung des Lichtbogens kann auf eine steigende oder sinkende Abstrahlungsenergiemenge geschlossen werden. Die Erhöhung der Lichtbogenmantelfläche führt beispielsweise zum Anstieg der Abstrahlungsenergie des Lichtbogens. Aus den aufgenommenen Videosequenzen wurden einzelne charakteristische Bilder gespeichert und mit der Software AxioVision® Rel. 4.8 von der Firma Carl Zeiss analysiert und vermessen. Dazu wurde die Lichtbogenbreite b und die Höhe h gemessen. Aus diesen Werten wird die Lichtbogenmantelfläche mit Formel 4.8 berechnet.

Formel 4.8 $$A_M = 0{,}5 * \pi * b * \sqrt{((0{,}5 * b)^2 + h^2)}$$

4.5 Fehlerbetrachtung der Kalorimeter

Die Beurteilung der Ergebnisgenauigkeit und Messsicherheit der Kalorimeter erfolgt auf der Basis einer Größtfehlerberechnung. Dadurch ist es möglich mit einer geringen Anzahl an Versuchen eine Obergrenze für die Messunsicherheit zu ermitteln. Die Messabweichungen setzen sich aus systematischen und zufälligen Fehlern zusammen. Systematische Fehler sind durch ihre konstanten Fehleranteile bei identischen Versuchsbedingungen gekennzeichnet. Der zufällige Fehleranteil ergibt sich aus dem Streubereich der Ergebnisse und kann mit Hilfe einer hinreichend großen Anzahl an Versuchen reduziert werden. Zufällige Fehler treten im Versuchsaufbau, z.B. durch den Wechsel von Sonne und Schatten, oder durch Zugluft auf und werden als Standardabweichung in den Diagrammen dargestellt. Standardabweichung bezeichnet die Streuung der Variable um Ihren Mittelwert.

a) Kalorimeter zur Bestimmung des Wärmeeintrages in das Bauteil, der Abstrahlungs- und Kühlungsenergie

Für die kalorimetrische Untersuchung des Wärmeeintrages wurde einerseits das Bauteil schräg in die Vorrichtung eingelegt und andererseits für die Analyse von Schweißprozessen mit pulverförmigen Zusatzwerkstoff eine ebene Einspannung realisiert. Der Wirkungsgrad des Schweißverfahrens stellt das Messergebnis dar und ist mit folgenden systematischen Fehlern behaftet, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben:

- Messgenauigkeit der Kalorimeter
- Messabweichungen der Waagen
- Messabweichungen der Thermoelemente

Formel 4.9 gibt die Ermittlung des systematischen Gesamtfehlers an. Dabei werden die Fehlergrößen der Temperatur und der Waage gesondert betrachtet. Dies ist auf Grund Ihrer gegenseitigen Abhängigkeit von einander notwendig [Blü02]. Die Bestimmung dieser Fehleranteile erfolgt mit Hilfe des Produktes aus der partiellen Ableitung der Formel 3.11 und Formel 3.17 nach der jeweiligen Fehlergröße und des absoluten Fehlers. Die Messunsicherheit der Leistungsbestimmung ist unabhängig von diesen beiden und darf somit als relativer Wert in der Formel 4.10 als Summand geführt werden.

Formel 4.9

$$\Delta\eta_{eff_X} = \left|\frac{\partial\eta_{eff}}{\partial m_{H_2O}}\right| * \Delta m_X + \left|\frac{\partial\eta_{eff}}{\partial\Delta T}\right| * \Delta T_X + \Delta P_X$$

Nach partieller Integration der ersten beiden Summanden folgt:

Formel 4.10

$$\Delta\eta_{eff_X} = \left|\frac{c_W * \Delta T}{P_S * t_S}\right| * \Delta m_X + \left|\frac{Q_{Zusatz_Typ_X} + c_W * m_{H_2O}}{P_S * t_S}\right| * \Delta T_X + \Delta P_X$$

Anschließend werden die in Tabelle 4-6 aufgeführten Referenzwerte für das MSG- und Unterpulverschweißen in die Formel 4.10 eingesetzt. Diese stellen die Mittelwerte der jeweils untersuchten Prozesse dar.

Tabelle 4-6: Basismesswerte der Kalorimetertypen zur Gesamtfehlerberechnung

	Einheit	Schräges Kalorimeter	Ebenes Kalorimeter
$P_{Schweiß}$	W	9.432	16.180
$t_{Schweiß}$	S	82	45
$Q_{Zusatz_Typ_X}$	J/K	2.633	28.681
c_W	J/(kg*K)	4.183	
ΔT	K	4,38	3,06
ΔT_X	K	0,05	0,05
m_{Wasser}	Kg	22,10	55,40
Δm_W	kg	0,02	0,1
ΔP_X		0,0115	

Für die jeweiligen Kalorimetertypen ergibt sich ein Gesamtfehler von:

$$\Delta\eta_{eff_Kal_schräg} = 0{,}00047 + 0{,}00615 + 0{,}0115 = 0{,}01812 \approx 2\%$$

$$\Delta\eta_{eff_Kal_eben} = 0{,}001756 + 0{,}01788 + 0{,}0115 = 0{,}03114 \approx 3\%$$

Demzufolge sind die Gesamtfehler der Kalorimeter mit $\Delta\eta_{eff_Kal_schräg}$ = ± 2 % und $\Delta\eta_{eff_Kal_eben}$ = ± 3 % zu beziffern, was der Standardabweichung des Systems entspricht.
Die Fehleranalyse der Messsysteme zur kalorimetrischen Bestimmung der Abstrahlungsenergie und Kühlungsenergie ergab, dass deren jeweiliger Messfehler dem des schrägen Kalorimeters entspricht. ($\Delta\eta_{eff_Kal_Abstr}$ = ± 2 % und $\Delta\eta_{eff_Kal_Kühl}$ = ± 2 %)

b) Gesamtsystem zur Messung der Tropfentemperatur und Lichtbogenleistung

Nachteil des verwendeten Kalorimeters zur Analyse der Tropfentemperatur ist, dass bei der Einleitung der Schweißtropfen eine Beeinflussung des Kalorimeters durch den austretenden Lichtbogen nicht ausgeschlossen werden kann. Ebenfalls verändert sich die Temperatur der Schweißtropfen bereits während des Falls in das Kalorimeter, sodass die Fallhöhe der Tropfen von der Kupferkathode bis ins Kalorimeter möglichst klein gehalten werden muss. Diese Einschränkung steht jedoch im Gegensatz zu der möglichst geringen Beeinflussung durch den an der Kupferkathode austretenden Lichtbogen. Somit muss der zusätzlich durch den Lichtbogen verursachte Wärmeeintrag in das Kalorimeter genauso berücksichtigt werden, wie die Abkühlung der Tropfen während der Flugphase.
Die direkte Einleitung der schmelzflüssigen Metalltropfen in die Kalorimeterflüssigkeit besitzt den Vorteil, dass der Wärmeausgleich zwischen Tropfen und Flüssigkeit relativ schnell abläuft.

Die Tropfen bleiben nach dem Abkühlen in ihrer Form weitgehend erhalten und erlauben so genauere Untersuchungen des Tropfengewichts und der Geometrie. Schwer kontrollierbar ist allerdings das Verdampfen minimaler Mengen Wasser beim Eintauchen der Tropfen in die Flüssigkeit.
Die verwendeten Thermoelemente des Typs Pt100 1/10 DIN besitzen bei T_{Raum} = 22 °C eine Abweichung von $\Delta T_{22°C}$ = ± 0,05 K [Ome12]. Das bedeutet, dass bei einer durchschnittlichen, im Kalorimeter gemessenen Temperaturdifferenz von ΔT = 4 K eine mittlere Messungenauigkeit von ± 0,84 % bei der Temperaturmessung zu erwarten ist.
Zusätzlich wurde die Masse des Wassers im Kalorimeter und die Masse des abgeschmolzenen Zusatzwerkstoffs bestimmt. Bei der Tropfenkalorimetrie wurde eine Wassermenge von konstant m_W = 728,1 g in das Kalorimeter gefüllt. Dies ergibt bei der Ermittlung der Masse eine Messungenauigkeit von Δm_W = ± 0,014 % (Tabelle 4-3). Die Tropfenmasse wurde mit einer Analysewaage bestimmt. Das durchschnittlich gemessene Gewicht der eingebrachten Tropfen betrug m_T = 7 g. Dies ergibt bei der Bestimmung der Masse des eingebrachten Schweißgutes eine Messungenauigkeit von Δm_T = ± 0,0014 % (Tabelle 4-3).
Zur Ermittlung der Schweißstrom- und Schweißspannungsverläufe wurden Strom- und Spannungswandler der Firma LEM verwendet. Die Messgenauigkeit des Stromwandlers beträgt ΔI_S = ± 0,45 %. Die Messabweichung des Spannungswandlers ist ΔU_S = ± 0,70 %. Folglich kann die berechnete Schweißleistung um bis zu ΔP_S = ± 1,15 % abweichen.
Durch Addition der einzelnen Messabweichungen wurde eine Messungenauigkeit von ΔT_{Tr} = ± 2 % bei der Ermittlung der Tropfentemperatur berechnet.

4.6 Berechnung der Energieeinträge bzw. Wirkungsgrade

a) Kalorimeter zur Bestimmung des Wärmeeintrages in das Bauteil, der Abstrahlungs- und Kühlungsenergie

Die Berechnung des effektiven Wirkungsrades der Prozesse wird folgend beschrieben.
Während des Schweißprozesses wird der Verlauf der Schweißspannung U_S und des Schweißstromes I_S mit einer Abtastrate von mindestens f = 20.000 Hz ermittelt. Die benötigte Schweißleistung wird mit Formel 4.11 berechnet. Die dazu benötigte Schweißzeit t_S wird aus dem Verhältnis aus Schweißgeschwindigkeit v_S und Nahtlänge l_S bestimmt (Formel 4.12).

Formel 4.11
$$P_S = \frac{1}{t_E - t_S} * \int_{t_S}^{t_E} U_S * I_S * dt$$

Formel 4.12
$$t_s = \frac{v_S}{l_S}$$

Zur Ermittlung der eingebrachten Wärmemenge in das Kalorimeter ist die Bestimmung der Masse des Kalorimetermediums sowie die Start- und Endtemperatur (T_S und T_E) notwendig. Die konstanten Größen der spezifischen Wärmekapazität c des Kalorimetermediums und des thermischen Korrekturwertes T_{Korr} des Kalorimeters werden in Formel 4.13 eingesetzt.
Der Korrekturwert beschreibt die Erwärmung bzw. Abkühlung des Kalorimetermediums nach dem erfolgten Energieeintrag durch den Angleich der Temperatur im Kalorimeter an die Umgebungstemperatur. Dieser Wert wurde in Vorversuchen ermittelt. Hierfür wurden definierte Temperaturdifferenzen zwischen Umgebung und Kalorimeter eingestellt. Der spezifische Temperaturverlauf wurde über eine Messzeit von t = 600 s aufgezeichnet. Die daraus ermittelte Temperaturänderung beschreibt den thermischen Korrekturwert des Kalorimeters, siehe Abbildung 4-16. Das Ergebnis ist, dass die Temperatur im Kalorimeter steigt, wenn dessen Temperaturniveau unterhalb der Umgebungstemperatur liegt.

Anderseits fällt die Temperatur, wenn die Temperatur im Kalorimeter höher, als die Umgebungstemperatur ist.
Zur Reduzierung des notwendigen Korrekturwertes musste einerseits die Temperaturdifferenz nach dem Wärmeeintrag gering gehalten werden, sowie die Endtemperatur nahe der Umgebungstemperatur eingestellt werden. Für zusätzliche im Kalorimeter befindliche Bauteile, wie die Umwälzpumpe, Rohr- und Schlauchstücke, aber auch die Probe an sich wurden die Massen und Wärmekapazitäten bestimmt (Parameter n). Mit der Kenntnis der spezifischen Erwärmung der Bauteile in Folge des Wärmeeintrages, kann die gesamte eingebrachte Wärmemenge Q_{GW+ZW} zu berechnet werden (Formel 4.13). Mit Formel 3.11 wird schlussendlich der effektive Wirkungsrad des Prozesses bestimmt.

Formel 4.13 $$Q_{GW+ZW} = \sum_1^n [m_n * c_n * (T_E - T_S + T_{Korr})]$$

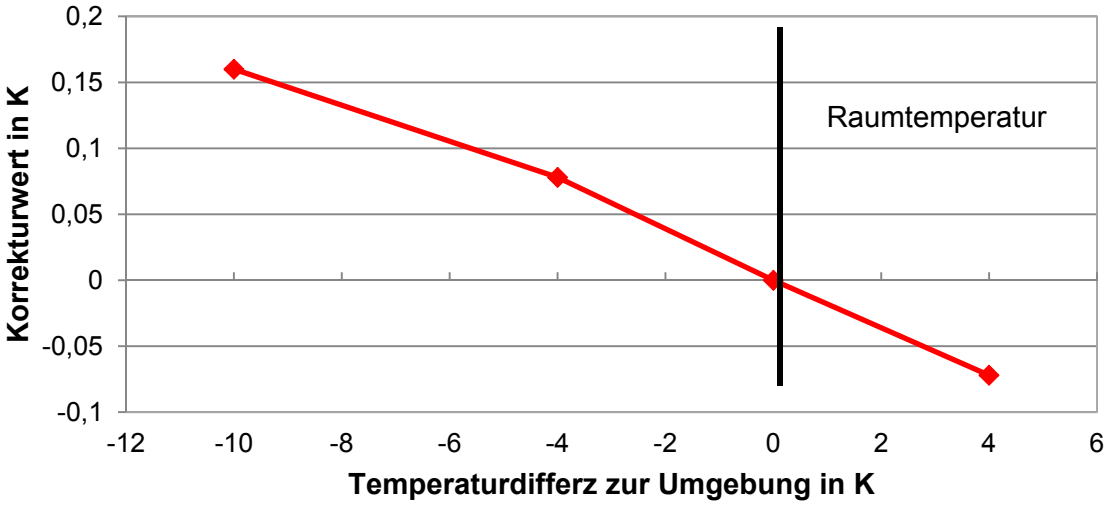


Abbildung 4-16: Verlauf des Korrekturwertes in Relation zur Umgebungstemperatur

Die Berechnung der Abstrahlungsenergie des Schweißprozesses wurde in Abschnitt 4.4 f) und die Kühlungsenergie des Schweißprozesses in Abschnitt 4.4 g) beschrieben.

b) Tropfenkalorimeter und Lichtbogenleistung

Zur Berechnung der Tropfentemperatur muss neben der Masse der Kalorimeterflüssigkeit, die resultierende Temperaturdifferenz im Kalorimeter ermittelt werden. Zusätzlich erwärmen die eingebrachten Tropfen neben dem Wasser auch die Einbauten, wie den Tropfenauffangbehälter, den Magnetrührer und einen Teil des Kalorimeterbehälters (ca. 9 % der eingebrachten Energie). Folglich müssen diese spezifischen Wärmemengen in die Berechnung des Wärmeeintrags in das Tropfenkalorimeter integriert werden (Formel 4.14).

Formel 4.14 $$Q_{Kal} = \sum_1^n [m_n * c_n * \Delta T]$$

Nach dem Schweißvorgang und der Messung der Temperaturdifferenz im Kalorimeter werden die eingebrachten Metalltropfen vom Kalorimetermedium getrennt und getrocknet. Anschließend wird die Masse der eingebrachten Metalltropfen bestimmt. Mit der Kenntnis der durchschnittlichen, spezifischen Wärmekapazität (Datenbank der Werkstoffsimulationssoftware JMatPro® c_{Tr} = 0,685 J/(g*K) für unlegierte Stähle) im Temperaturbereich zwischen T = 25…1.550 °C, kann die Wärmemenge der Metalltropfen berechnet werden.

Formel 4.15 $$Q_{Tr} = c_{Tr} * m_{Tr} * (T_{Tr} - T_E)$$

Die Tropfentemperatur (Formel 4.16) wird berechnet durch Gleichsetzen der Wärmemengen von Formel 4.14 und Formel 4.15 und anschließendem Umstellen.

Formel 4.16

$$T_{Tr} = \frac{\sum_1^n [m_n * c_n * \Delta T]}{c_{Tr} * m_{Tr}} + T_E$$

Die eingebrachte Wärmemenge des Lichtbogens wird mit der Kenntnis der Durchflussmenge durch die Rohrkathode und der resultierenden statischen Temperaturdifferenz nach Formel 4.5 berechnet.

4.7 Experimentelle Untersuchungen

Zur statistischen Absicherung der Messergebnisse wurden pro Parameter mindestens drei Versuche durchgeführt. Die Standardabweichungen der Versuche wurden in die Diagramme als Fehlerindikatoren eingezeichnet. Sind innerhalb der Auswertung große Abweichungen aufgetreten, so wurde diese Versuchsreihe wiederholt und entstandene Messungenauigkeiten genau analysiert.
Im folgenden Abschnitt werden für die betrachteten Schweißverfahren, die jeweils eingestellten Referenzparameter und die untersuchten Schweiß- bzw. Prozessparameter dargestellt.

a) WIG-Schweißen

Referenzversuchsparameter:
- d = 3,2 mm Wolframelektrode; α = 20°
- Grundwerkstoff S235 JR t = 5 mm
- Minuspolung, Gleichstrom
- Schweißstromstärke I_S = 150 A
- Schweißgeschwindigkeit v_S = 30 cm/min
- Elektrodenabstand s = 4 mm
- V_{SG} = 15 l/min Argon
- d = 12,5 mm Keramik-Schutzgasdüse

Tabelle 4-7: Untersuchte Schweiß- und Prozessparameter beim WIG-Schweißen:

Einflussgröße	Untersuchungsbereich	Intervall
Schweißstromstärke	I_S = 50…300 A	50 A
Elektrodenabstand zum Werkstück	s = 2…8 mm	2 mm
Lichtbogenart	Wechselstrom mit 25 bzw. 50 % positiver Elektrodenpolung	
Schutzgaszusammensetzung	Argon/ArHe30/ArHe50/ArHe70/Helium	
	2,5 % bzw. 5 %H mit Argon	
Schutzgasmenge	V_{SG} = 5...15 l/min	5 l/min
Gasdüsendurchmesser	d = 18,75 mm und d = 12,5 mm Keramik-Schutzgasdüse	
verschiedene Zusatzbedingungen	Spitzengeometrie α = 15 °...30 °	5 °
	Elektrodendurchmesser d = 2,4; 3,2; 4,8 mm	
	Blechdicke t = 4; 5; 15 mm	
	Grundwerkstoff CrNi 1.4301; S235; Al 99,5	

b) Plasmaschweißprozess

Referenzversuchsparameter:
- d = 4 mm Wolframelektrode; α = 20 °
- Elektrodenrückstand r = 3 mm
- Grundwerkstoff S235 JR t = 5 mm
- Minuspolung, Gleichstrom
- Schweißstrom I_S = 100 A
- Schweißgeschwindigkeit v_S = 40 cm/min
- Plasmagasdüsenabstand s = 4 mm
- V_{PG} = 4 l/min Argon, V_{SG} = 10 l/min Argon

Tabelle 4-8: Untersuchte Schweiß- und Prozessparameter beim Plasmaschweißen

Einflussgröße	Untersuchungsbereich	Intervall
Schweißstromstärke	I_S = 50…150 A	50 A
Abstand zum Werkstück	s = 2…8 mm	2 mm
Elektrodenrückstand	r = 1…3 mm	0,5 mm
Gaszusammensetzung	Argon/ArHe30/ArHe50/ArHe70/Helium	
	5 % H mit Argon	
Gasmenge	Schutzgasmenge V_{SG} = 5...15 l/min	5 l/min
	Plasmagasmenge V_{PL} = 2…8 l/min	2 l/min

c) MSG-Schweißen

Referenzversuchsparameter:
- d = 1,2 mm G3Si1 für MAG-Schweißen
  AlMg4,5Mn für MIG-Schweißen
- Grundwerkstoff S235 JR t = 5 mm für MAG
  Al 99,5 t = 5 mm für MIG
- Drahtfördergeschwindigkeit v_D = 10 m/min
  Sprühlichtbogen
- Schweißgeschwindigkeit v_S = 70 cm/min
- Brennerabstand s = 18 mm
- Brennerstellung neutral
- V = 15 l/min 95 % Argon 5 % CO_2 für MAG
  100 % Argon für MIG

Tabelle 4-9: Untersuchte Schweiß- und Prozessparameter beim MAG-Schweißen

Einflussgröße	Untersuchungsbereich	Intervall
Schweißleistung und Lichtbogenart	v_D = 2…16 m/min	2 m/min
	Vergleich von Kurz- und Impulslichtbogen	
	Vergleich von Sprüh- und Impulslichtbogen	
Schutzgaszusammensetzung	Argon mit 5/10/18/25…100 % CO_2-Anteil	
Zusatz- und Grundwerkstoffzusammensetzung	G3Si1, G 199 LSi sowie S 235, 1.4301	
Kontaktrohrabstand	s = 10…40 mm	
Lichtbogenlänge/Schweißspannung	ΔU = -1,2…6,3 V	1,5 V
Gasmenge	V_{SG} = 10...20 l/min	5 l/min

Tabelle 4-10: Untersuchte Schweiß- und Prozessparameter beim MIG-Schweißen

Einflussgröße	Untersuchungsbereich	Intervall
Schweißleistung und Lichtbogenart	v_D = 2…10 m/min	4 m/min
	Vergleich von Kurz- und Impulslichtbogen	
	Vergleich von Sprüh- und Impulslichtbogen	
Schutzgaszusammensetzung	Argon/ArHe30/ArHe50/ArHe70/Helium	

d) Unterpulverschweißen

Referenzversuchsparameter:
- d = 3,0 mm EN 14171 S2
- Grundwerkstoff S235 JR t = 20 mm
- Schweißpulvertyp Aluminat Rutil UNIFLUX D1 (EN 760: SA AR 1 97 AC)
- Drahtfördergeschwindigkeit v_D = 1,5 m/min
- Schweißgeschwindigkeit v_S = 51 cm/min
- Brennerabstand s = 30 mm
- Brennerstellung neutral

Tabelle 4-11: Untersuchte Schweiß- und Prozessparameter beim Unterpulverschweißen

Einflussgröße	Untersuchungsbereich	Intervall
Schweißstromstärke	I_S = 400…600 A	100 A
Schweißspannung	U_S = 28…40 V	6 V
Schweißpulvertyp	Aluminat Basisch OP139 (EN760 - SA AB 1 68 AC H5)	
	Aluminat Rutil Uniflux D1 (EN 760: SA AR 1 97 AC)	
	Aluminat Fluorid OP33 (EN760 - SA AF 2 54 D2) Zusatzwerkstoff EN ISO 14343-A S 22 93 NL d=3,2mm	

4.8 Grund- und Zusatzwerkstoffe

Die Untersuchungen wurden mit folgenden Grundwerkstoffen durchgeführt:

- unlegierter Baustahl S235 – gestrahlte Oberfläche t = 5…20 mm
  Werkstoffnummer: 1.0038
  EN 10025-2: S235JR
  DIN 17199: St 37-2
- nichtrostender austenitischer Werkstoff t = 4 mm
  Werkstoffnummer: 1.4301
  EN 10088-2: X 5 CrNi 18-10
- Aluminium Al99,5 t = 5 mm
  EN AW-1050A, EN AW-Al 99,5

Für die Untersuchung des Unterpulverschweißens mit der Stahldrahtelektrode S2 OK Autrod 12.20 wurden folgende Schweißpulver verwendet:

- Aluminat Rutil Uniflux D1 (EN 760: SA AR 1 97 AC)
- Aluminat Basisch OP 139 (EN 760: SA AB 168 AC H5)

Für das Unterpulverschweißen mit der Duplexstahldrahtelektrode OK Autrod 2209 wurde folgendes Schweißpulver verwendet:

- Aluminat Fluorid OP 33 (EN 760: SA AF 2 54 DC)

Folgende Zusatzwerkstoffe (Tabelle 4-12) wurden zum Verschweißen der oben beschrieben Grundwerkstoffe verwendet.

Tabelle 4-12: Verwendete Zusatzwerkstoffe und deren Bezeichnungen nach Norm

verwendete Zusatzwerkstoffe	relevante Norm	Bezeichnung
rost- und säurebeständiger Stahl - G 199 LSi	Werkstoffnummer	1.4316
	EN 13072	G(W) 19 9 L(Si)
	DIN 8556	SGX2 CrNi 19 9
verkupferte Stahldrahtelektrode - G3Si1	Werkstoffnummer	1.5125
	DIN EN 440	G3Si1
verkupferte UP-Stahldrahtelektrode - S2	EN ISO 14171-A	S2
		OK Autrod 12.20
verkupferte UP-Duplexstahldrahtelektrode	Werkstoffnummer	1.4462
	EN ISO 14343-A	G 22 9 3 N L/ W 22 9 3 N L
		OK Autrod 2209
Aluminium - AlMg4,5Mn	Werkstoffnummer	3.3548
	DIN 1732	SG-AlMg4,5Mn
Aluminium - AlMg5	Werkstoffnummer	3.3556
	DIN 1732	SG-AlMg 5
Aluminium - AlSi5	Werkstoffnummer	3.2245
	DIN 1732	SG-AlSi 5
Kupfer-Silizium Legierung - CuSi3	Werkstoffnummer	2.1461
	DIN 1733	SG CuSi3

5 Versuchsdurchführung und Auswertung

Im folgenden Abschnitt werden die ermittelten Wirkungsgrade, Energieflüsse und Schweißergebnisse in Abhängigkeit der betrachteten Einflussfaktoren für folgende Schweißverfahren:

- WIG- und Plasmaschweißprozess
→ nicht abschmelzende Elektrode
- MSG- und Unterpulverschweißprozess
→ abschmelzende Elektrode

beschrieben. Zudem werden Ansätze und Begründungen für das parameter- bzw. verfahrensspezifische Verhalten des Energieflusses beim Schweißen angeführt. Die prozentualen Angaben der Differenzen innerhalb der Auswertung geben das Verhältnis an, welches notwendig ist, vom kleineren zum größeren Wirkungsgrad zu gelangen.

5.1 Schweißuntersuchungen mit nicht abschmelzender Elektrode

5.1.1 WIG-Schweißprozess

Für die folgend beschriebenen Untersuchungen wurde gezielt jeweils ein definierter Parameter variiert.

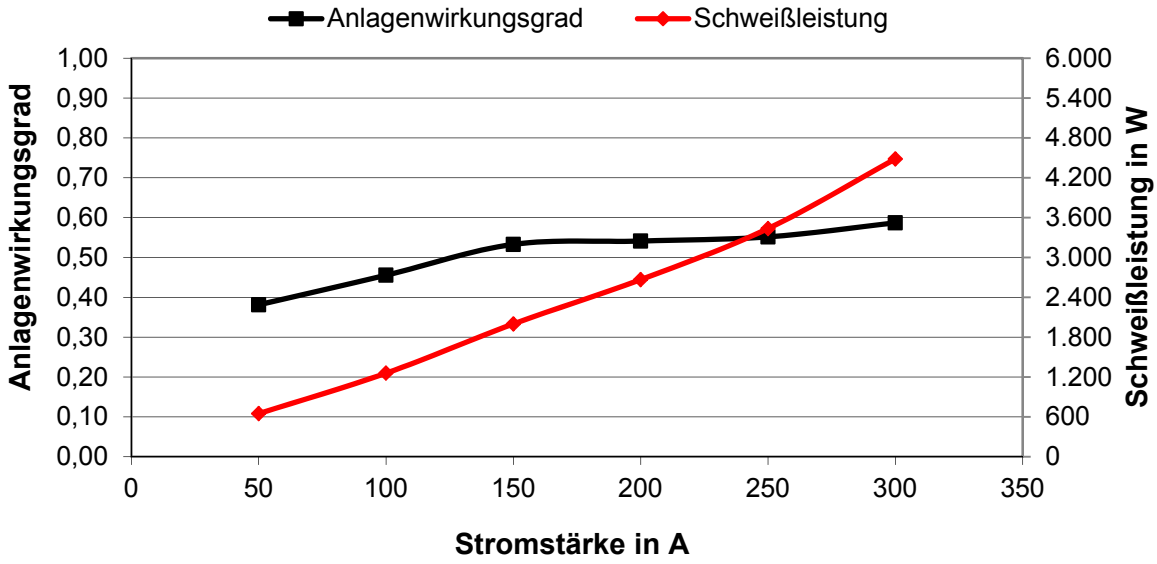


Abbildung 5-1: *Anlagenwirkungsgrad der WIG-Schweißstromquelle* „TIG-Insquare W600 AC/DC“

Die ermittelten Anlagenwirkungsgrade zeigen, dass der Energieverbrauch der Schweißstromquelle vornehmlich von der entnommenen Schweißleistung abhängig ist. Je höher die Schweißleistung ist, desto höher ist der Anlagenwirkungsgrad (Abbildung 5-1). Grund hierfür ist, dass die Verbraucher innerhalb der Anlage überwiegend eine statische Leistungsaufnahme besitzen. So ist die Kühlung der Schweißenergiequelle nicht temperaturgeregelt, sondern zeitgeregelt. Das heißt, während dem Schweißen und während der Nachlaufzeit werden konstant $P_{Kühl}$ = 550 W benötigt. Im normalen Standby-Zustand werden $P_{Standby}$ = 125 W verbraucht. Ist die entnommene Schweißleistung höher, nehmen die statischen Verbrauchsgrößen prozentual gesehen einen geringeren Anteil ein, weshalb der Anlagenwirkungsgrad steigt. Im betrachteten Schweißstromstärkenbereich von I_S = 50…300 A steigt der Anlagenwirkungsgrad von η_{Anlage} = 0,38 auf η_{Anlage} = 0,59.

a) Einfluss der Schweißleistung bzw. Schweißstromstärke

Für diese Versuchsreihe wurde die Schweißstromstärke schrittweise von I_S = 50 A auf I_S = 300 A erhöht.
Anhand Abbildung 5-2 wird deutlich, dass der Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Prozesses mit steigender Schweißleistung sinkt. Dieser Verlauf deckt sich mit den Untersuchungen von Schellhase [Sch85]. Der Lichtbogenwirkungsgrad sinkt von η_{LB} = 0,79 (I_S = 50 A) um gut 10 % auf η_{LB} = 0,70 (I_S = 300 A). Dabei nimmt der Wärmeeintrag in das Bauteil stark zu.

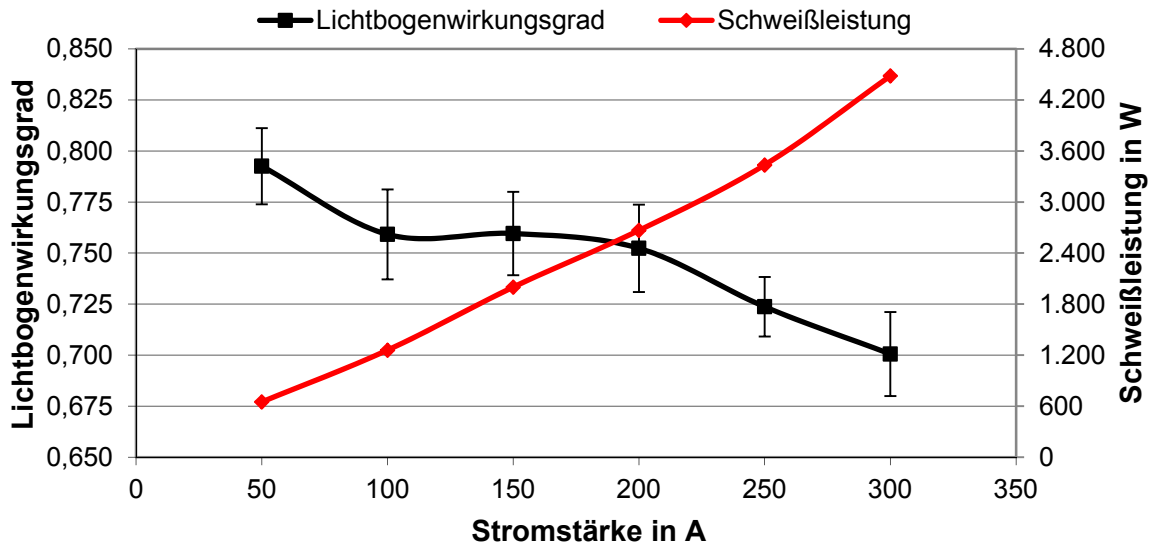


Abbildung 5-2: Einfluss der Schweißstromstärke auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses (s = 4 mm, V = 15 l/min Argon, v_S = 30 cm/min, Minuspolung)

Querschliffe der Schweißnaht zeigen, dass sich die Schweißnahtfläche bei der Erhöhung der Schweißleistung von I_S = 150 A auf I_S = 250 A um mehr als das Dreifache vergrößert. In Folge dessen steigt der Schmelzwirkungsgrad von η_{Schm} = 0,10 auf η_{Schm} = 0,31.
Neben dem erhöhten Schmelzwirkungsgrad wird auch ein stetig steigender Anteil für den eigentlichen Fügeprozess nicht nutzbarer Energie emittiert. So ist der Anstieg der Abstrahlungsenergie des Lichtbogens steiler, als der der Schweißleistung (Abbildung 5-3). Das heißt der prozentuale Anteil der abgestrahlten Energie steigt stark an. Eine alleinige Begründung kann nicht in der Vergrößerung der Lichtbogenmantelfläche gefunden werden, da diese in einem geringeren Verhältnis zur Schweißleistung zunimmt [Eva98]. Bei konstantem Brennerabstand nimmt die Mantelfläche (Abbildung 5-4) des Lichtbogens bei Erhöhung der Schweißstromstärke zu. Der Lichtbogen wird breiter und der Lichtbogenansatzpunkt an der Wolframelektrode wandert nach oben. Gleichzeitig wird der Lichtbogen heißer, weshalb die Temperaturschichten eine größere Temperaturdifferenz zur Umgebung aufweisen. Beim Vergleich zwischen Schweißstromstärken von I_S = 100 A und I_S = 200 A steigt die Lichtbogenkerntemperatur von T_{Kern} = 16.500 K auf T_{Kern} = 19.400 K [Göt10]. In Folge dessen wird mehr Energie in Form langwelliger, elektromagnetischer Wellen (Wärme) emittiert, weshalb der prozentuale Anteil der umgesetzten Energie im Bauteil sinkt.

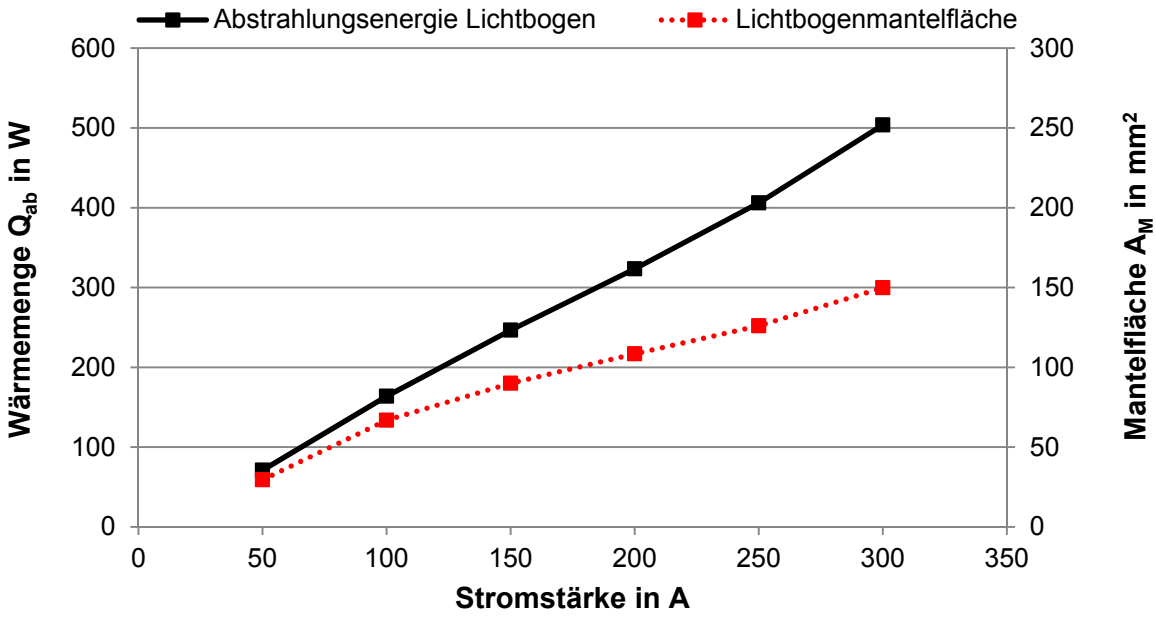
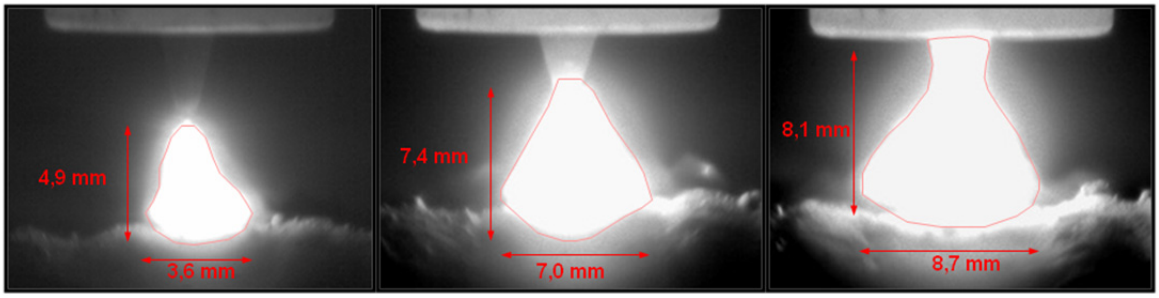


Abbildung 5-3: *Einfluss der Schweißstromstärke auf die Abstrahlungsenergie und die Mantelfläche des WIG-Schweißlichtbogens (s = 4 mm, V = 15 l/min Argon, v_S = 30 cm/min, Minuspolung)*



I_S = 50 A I_S = 150 A I_S = 250 A

Abbildung 5-4: *Einfluss der Schweißstromstärke auf die Lichtbogengeometrie des WIG-Schweißprozesses (s = 4 mm, V = 15 l/min Argon, v_S = 30 cm/min, Minuspolung)*

In Folge des heißeren Lichtbogens und des steigenden Lichtbogenansatzpunktes nimmt die thermische Belastung der Wolframelektrode und somit auch die des Schweißbrenners zu. Hinzu kommt, dass neben der vermehrten Widerstandserwärmung in der Elektrode und den stromführenden Brennerbauteilen auch im Schlauchpaket das Strom-Wasser Kabel stärker erwärmt wird, wie es in Tabelle 4-5 exemplarisch dargestellt ist. Der Anstieg der Erwärmung der externen Kühlung der Schweißenergiequelle ist etwa um das Doppelte steiler, als der der Schweißleistung, was Abbildung 5-5 verdeutlicht. Dies kann auch mit dem Jouleschen Gesetz (Formel 4.6) begründet werden. Da die Stromstärke bei der Berechnung der Widerstandserwärmung quadratisch eingeht, bewirkt die Verdopplung der Schweißstromstärke folglich die Erzeugung der Vierfachen Wärmemenge.

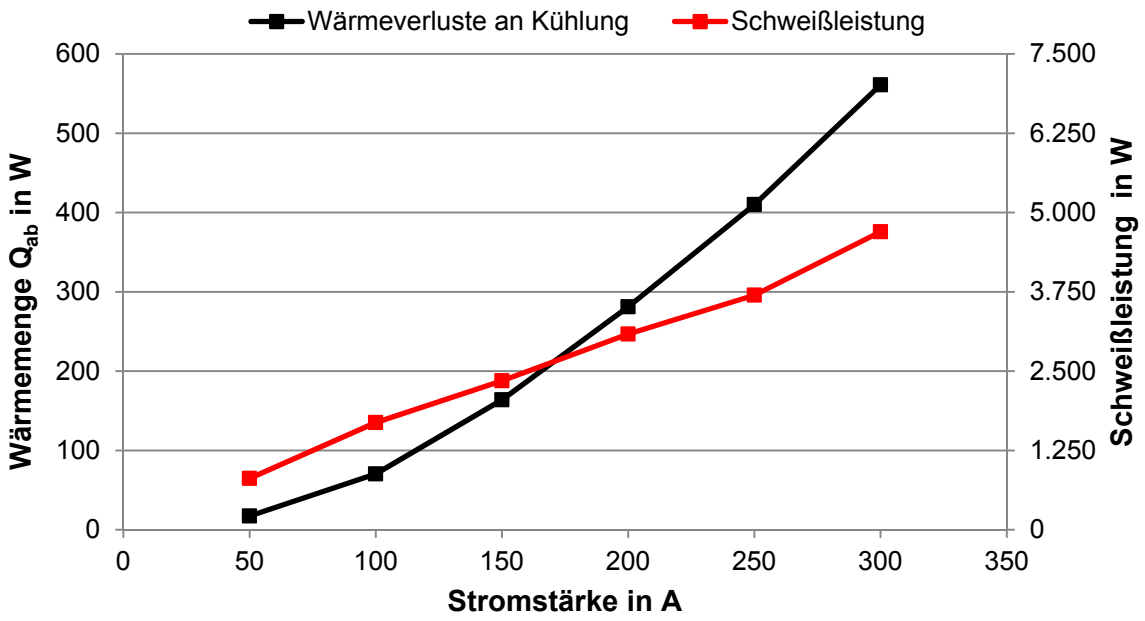


Abbildung 5-5: Einfluss der Schweißstromstärke auf die Wärmeverluste an die Kühlung der Schweißstromquelle (s = 4 mm, V = 15 l/min Argon, v_S = 30 cm/min, Minuspolung)

Zusammenfassend lassen sich die Untersuchungen zum Einfluss der Schweißstromstärke auf den Energiefluss beim WIG-Prozess in Abbildung 5-6 darstellen.

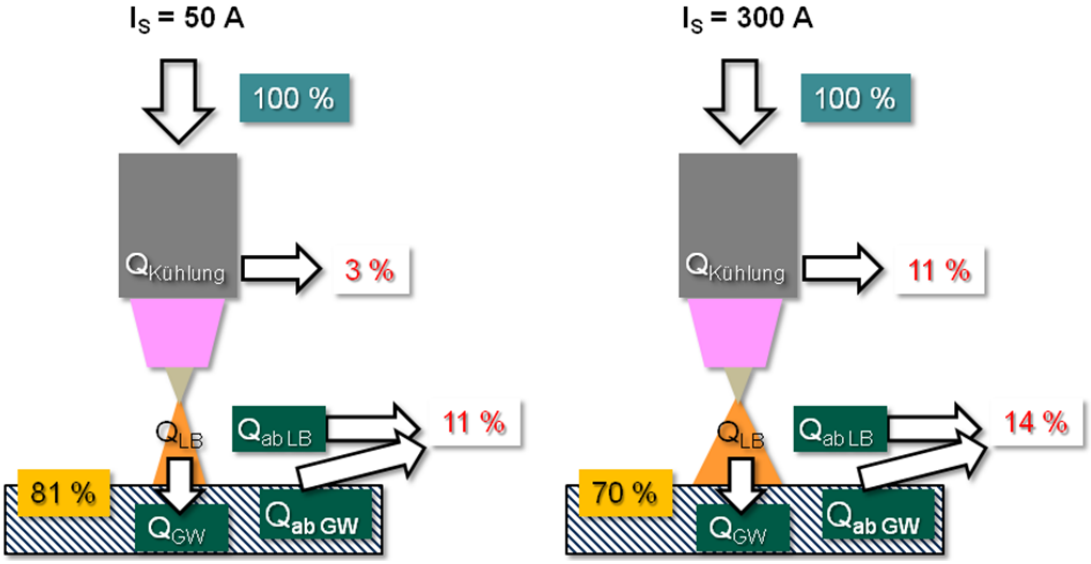


Abbildung 5-6: Einfluss der Schweißstromstärke auf den Energiefluss beim WIG-Schweißprozess (s = 4 mm, V = 15 l/min Argon, v_S = 30 cm/min, Minuspolung) Hinweis: jeweils 5 % des Energieflusses undefiniert

Der prozentuale Energieeintrag in das Bauteil im Verhältnis zur Schweißleistung sinkt mit steigender Schweißstromstärke. Gleichzeitig steigt der Anteil der Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie leicht an, welcher durch den Lichtbogen an die Umgebung abgegeben wird. Auf Grund der nicht abschmelzenden Wolframelektrode, des heißen Lichtbogens und der Widerstandserwärmung ist die thermische Belastung der externen Brennerkühlung sehr hoch.

Diese Aufteilung deckt sich grundsätzlich auch mit den Untersuchungen von Katsaounis [Kat90] und [DuP95]. Die gemessene Kühlungsenergie der Schweißstromquelle beinhaltet die Erwärmung der Elektrode und des stromführenden Strom-Wasser Kabels. Laut DuPont [DuP95] beträgt allein die Widerstandserwärmung der Elektrode 14…18 %, was die eigenen Untersuchungen in diesem Ausmaß nicht bestätigen.

b) Einfluss des Elektrodenabstandes zum Grundwerkstoff

In Abbildung 5-7 wird der Einfluss des Lichtbogenwirkungsgrades bei Veränderung des Abstandes zwischen Wolframelektrode und Werkstück dargestellt. Hierzu wurde der Abstand der Wolframelektrode zum Werkstück schrittweise von s = 2 mm auf s = 8 mm gesteigert.
Je größer der Abstand wird, desto kleiner ist der Lichtbogenwirkungsgrad, was die Untersuchungen in [Ghe79] bestätigen. Der Lichtbogenwirkungsgrad sinkt von η_{LB} = 0,78 (s = 2 mm) um knapp 8 % auf η_{LB} = 0,72 (s = 8 mm). Die benötigte Schweißleistung steigt dabei kontinuierlich an. Da auf Grund unterschiedlicher Energiedichten der Schweißprozesse die Wärmeverteilung im Bauteil nicht homogen ist, wird als Vergleichsgröße die Erwärmung des Kalorimetermediums genutzt. Die Untersuchungen zum Einfluss des Elektrodenabstandes zeigen, dass das Kalorimetermedium um etwa 30 % stärker erwärmt wird, wenn der Elektrodenabstand von s = 2 mm auf s = 8 mm steigt.

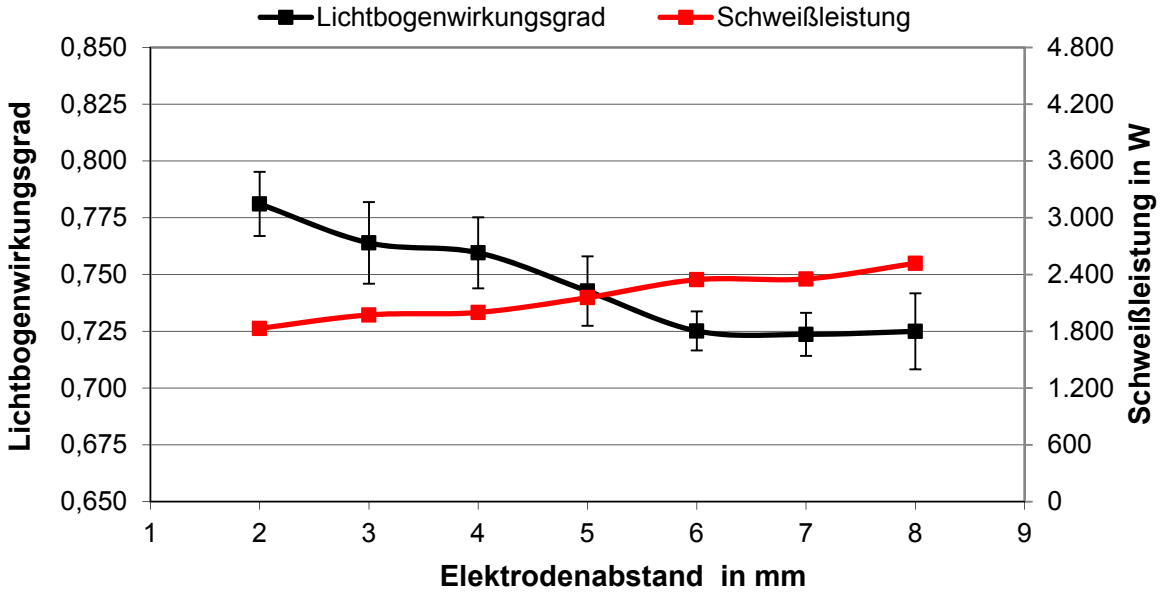


Abbildung 5-7: Einfluss des Elektrodenabstandes auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses (I_S = 150 A, V = 15 l/min Argon, v_S = 30 cm/min, Minuspolung)

Auf Grund des erhöhten Abstandes zwischen Bauteil und Wolframelektrode muss zur Zündung und Aufrechterhaltung des Lichtbogens ein längerer Bereich ionisiert werden. Der Widerstand innerhalb der Lichtbogensäule ist bei einer größeren Lichtbogenlänge höher, was eine steigende Schweißspannung erfordert. Die Ionisationsenergie bleibt jedoch konstant. Als Beispiel wird folgende Anpassung der Schweißspannung für s = 2 mm (U_S = 11,5 V) und für s = 8 mm (U_S = 16,5 V) angeführt, bei konstanter Schweißstromstärke. Da die erhöhte Schweißspannung bei der Wirkungsgradberechnung (Formel 3.12) den Nenner vergrößert, führt dies zur Reduzierung des Lichtbogenwirkungsgrades.
Gleichzeitig bewirkt die vermehrte Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Wärmeströmung des Lichtbogens an die Umgebung das Absinken des Lichtbogenwirkungsgrades.

Je länger der Lichtbogen wird, desto größer ist der Anteil der abgestrahlten Energiemenge über die Lichtbogenmantelfläche (Abbildung 5-8). Der Anstieg der gemessenen Abstrahlungsenergie und die gleichzeitige Vergrößerung der Lichtbogenmantelfläche erfolgen im gleichen Verhältnis. Es ist somit von einem direkten bzw. proportionalen Zusammenhang auszugehen.
Die Erwärmung der Elektrode und des externen Kühlsystems ist aufgrund der konstanten Schweißstromstärke weitgehend unabhängig vom Elektrodenabstand. Da jedoch die Schweißleistung mit zunehmendem Elektrodenabstand steigt, sinkt der prozentuale Anteil des externen Brennerkühlkreislaufes der Schweißenergiequelle am Gesamtenergieumsatz. Diese Untersuchungsergebnisse zum Einfluss des Elektrodenabstandes auf die Abstrahlungsenergie und den externen Kühlkreislauf der Schweißenergiequelle werden auch in [Ghe79] bestätigt.

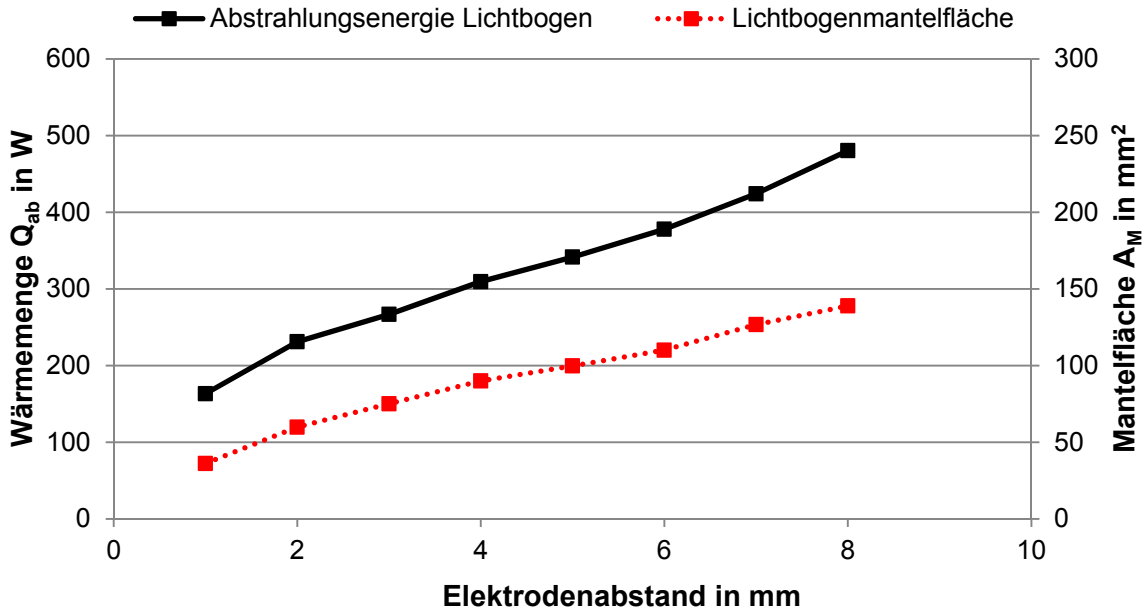


Abbildung 5-8: *Einfluss des Elektrodenabstandes auf die Abstrahlungsenergie des WIG-Schweißlichtbogens*
(I_S = 150 A, V = 15 l/min Argon, v_S = 30 cm/min, Minuspolung)

Zusammenfassend wird der Einfluss des Elektrodenabstandes zum Werkstück auf den Energiefluss beim WIG-Schweißen in Abbildung 5-9 dargestellt. Mit zunehmendem Abstand der Wolframelektrode steigt der Anteil der abgestrahlten Energie des Lichtbogens stark an. Dabei sinkt die thermische Belastung des Schweißbrenners leicht ab. Gleichzeitig nimmt der prozentuale Anteil, der im Bauteil umgesetzten Wärmemenge ab. Die Dimensionen des Abstandseinflusses stimmen mit den Untersuchungen von Katsaounis [Kat90] überein.

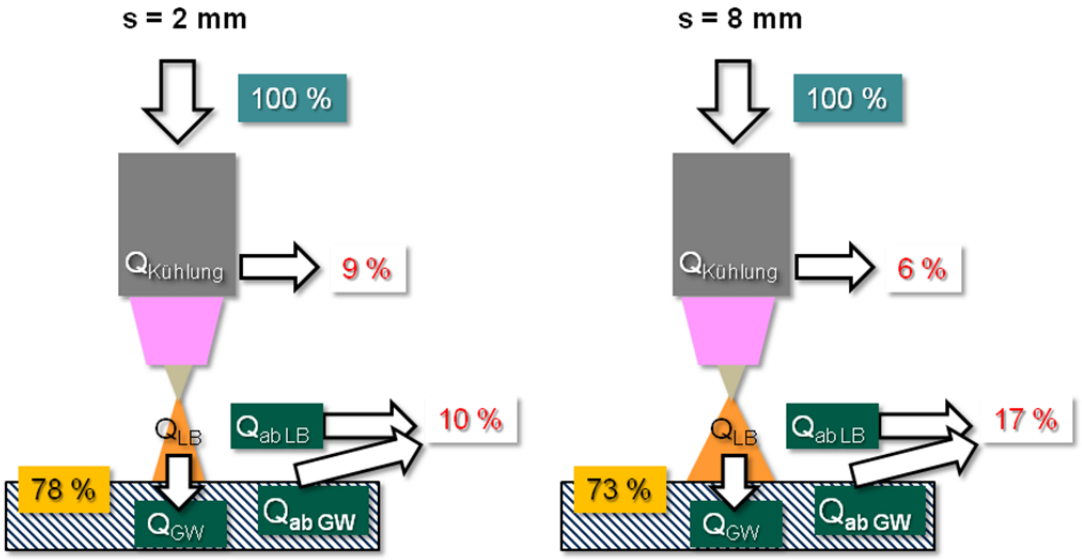


Abbildung 5-9: *Einfluss des Elektrodenabstandes auf den Energiefluss beim WIG-Schweißprozess*
(I_S = 150 A, V = 15 l/min Argon, v_S = 30 cm/min, Minuspolung)
Hinweis: 3…4 % des Energieflusses undefiniert

c) Einfluss der Elektrodenpolung

Schweißungen mit Gleichstrom und Minuspolung der Elektrode wurden mit dem Wechselstromschweißen (25 % bzw. 50 % Anteil positiver Elektrodenpolung) verglichen, wobei eine rechteckige Impulsform verwendet wurde. Lapin [Lap03] bestätigt, dass die rechteckige Pulsform der sinusförmigen vorzuziehen ist.
Bei Erhöhung des Anteils der positiven Elektrodenpolung im Schweißprozess wird das Bauteil weniger erwärmt, während die eingesetzte Schweißleistung nahezu konstant bleibt. Dabei sinkt der Lichtbogenwirkungsgrad von η_{LB} = 0,76 um gut 10 % auf η_{LB} = 0,68, wenn der positive Anteil der Elektrodenpolung 50 % beträgt (Abbildung 5-10).

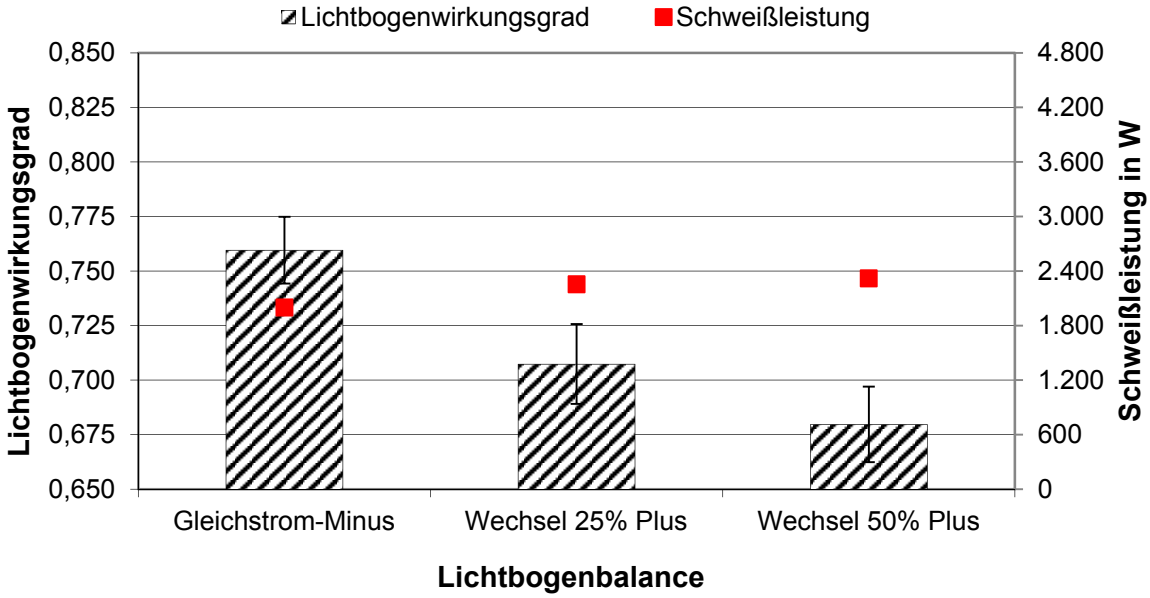


Abbildung 5-10: *Einfluss der Lichtbogenbalance auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses*
(I_S = 150 A, s = 4 mm, V = 15 l/min Argon, v_S = 30 cm/min)

Die ermittelten Lichtbogenwirkungsgrade sind allgemein höher, aber in ihrer Tendenz und ihrem Ausmaß übereinstimmend zu den dargestellten Werten von [Sch85], [Lap03] und [Can05]. Gleichzeitig bewirkt eine zunehmende positive Elektrodenpolung eine stärkere thermische Belastung bzw. einen höheren Verschleiß der Wolframelektrode. Bei positiver Elektrodenpolung verläuft der Energiefluss vermehrt über die Wolframelektrode und wird verstärkt über die Brennerkühlung abgeführt. Mit steigender Schweißstromstärke nimmt dadurch der Elektrodenverschleiß stark zu. Die Geometrie der Elektrodenspitze wird runder und die Energie wird weniger konzentriert in das Schmelzbad eingebracht. Gleichzeitig sinkt der Lichtbogendruck auf die Schmelze. Folglich sinken laut Lapin [Lap03] die Schmelzbadgröße und der Schmelzwirkungsgrad.

Ausgehend von einer nahezu konstanten Schweißleistung bei reduziertem Wärmeeintrag in das Kalorimetermedium, müssen bei der energetischen Bilanz weitere Verlustquellen analysiert werden. So steigen die thermische Belastung sowie der Verschleiß der Wolframelektrode stark an, je größer der positive Anteil der Elektrodenpolung wird. Sowohl die abgegebene Energiemenge an den externen Kühlkreislauf der Schweißenergiequelle als auch die Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergie des Lichtbogens steigen beispielsweise um mehr als 20 % an, wenn eine 25 % positive Elektrodenpolung verwendet wird (Abbildung 5-11). Das heißt, die positive Elektrodenpolung sollte nur dann verwendet werden, wenn dessen Wirkung (z.B. Aufbrechen der Oxidschicht beim Verbinden von Aluminium bzw. Reduzierung der Porosität in der Schweißnaht durch Reduzierung des Wasserstoffanteils in der Schweißzone [Wac13]) tatsächlich benötigt wird.

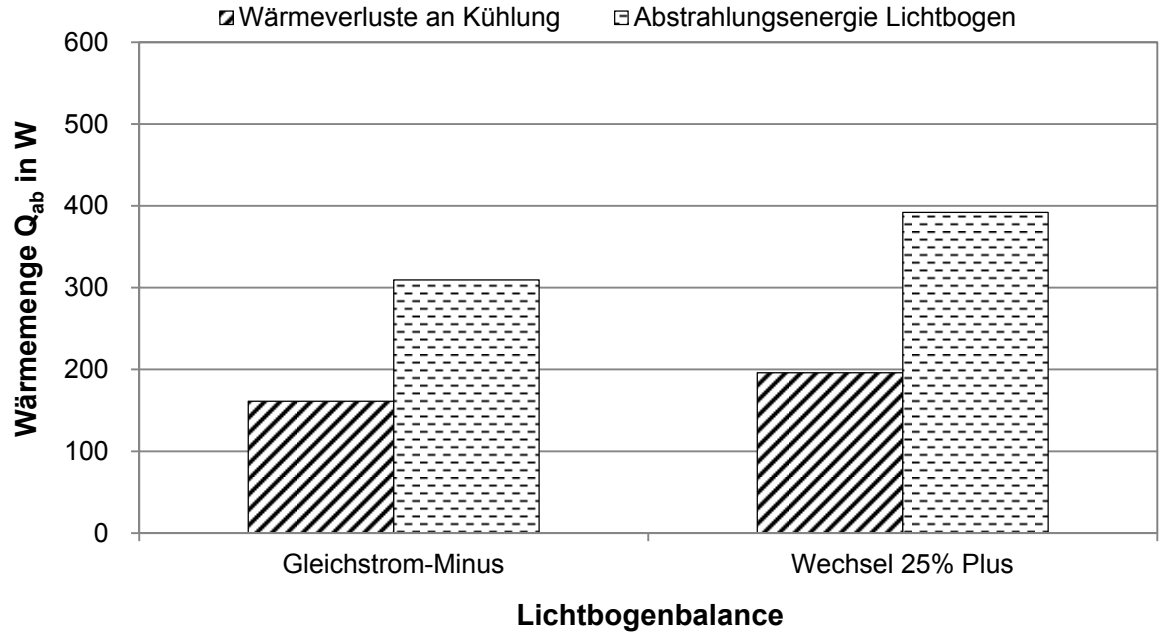


Abbildung 5-11: Einfluss der Lichtbogenbalance auf die abgegebene Wärmemenge des WIG-Schweißprozesses (I_S = 150 A, s = 4 mm, V = 15 l/min Argon, v_S = 30 cm/min)

d) Einfluss der Schutzgaszusammensetzung

Für die Untersuchung des Einflusses der Schutzgaszusammensetzung wurde einerseits der Heliumanteil, aber auch der Einfluss von Wasserstoff im Argon-Schutzgasstrom betrachtet.
Anhand Abbildung 5-12 wird deutlich, dass durch die Zumischung von Helium der Lichtbogenwirkungsgrad um etwa 3 % gesteigert werden kann, was mit den Ergebnissen aus der Literatur übereinstimmt [Kat90], [Can05]. Helium benötigt mehr Energie, um den gleichen Ionisationsgrad, als Argon zu erreichen, was zu einem höheren Energietransport und heißeren Lichtbogen führt. Gleichzeitig wird durch die Anpassung des Schutzgases der Wärmeübergangswert zum Grundwerkstroff verändert. Mit steigendem Heliumgehalt im Schweißschutzgas wird die Schmelzbadgeometrie zunehmend runder und die Schweißnaht breiter. Diese Eigenschaften von Helium als Schutzgas erlauben eine höhere Schweißgeschwindigkeit und steigern die Nahtqualität. Durch diesen Vorteil wird zudem mehr Wärme in das Bauteil eingebracht, da der Lichtbogen bei gleicher Länge mehr Energie überträgt. Hierfür ist eine höhere Schweißleistung notwendig. Ein relativ steiler Anstieg der Schweißleistung ist ab einem Volumengehalt von 70 % Helium im Argonschutzgas zu verzeichnen. Ab diesem Anteil ist der Lichtbogen Helium dominiert und die Ionisationsenergie steigt, was auch die Untersuchungen in [Zij89] und [Ush95] bestätigen.

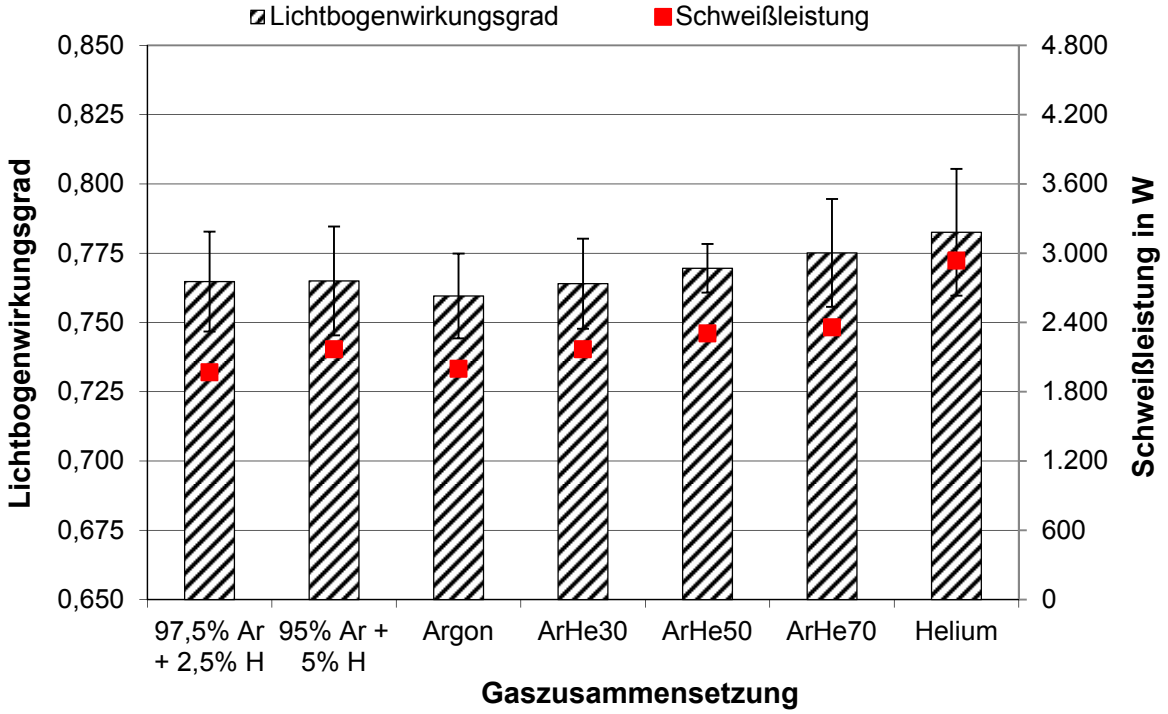


Abbildung 5-12: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses (I_S = 150 A, s = 4 mm, V = 15 l/min, v_S = 30 cm/min, Minuspolung)

In weiteren Betrachtungen wurde die Beimischung von 2,5 % bzw. 5 % Wasserstoff zum Argon untersucht. Jedoch wurde nur eine minimale Wirkungsgradsteigerung ermittelt, welche im Bereich der Standardabweichung liegt.

Der Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf den prozentualen Wärmeeintrag in das Bauteil ist relativ gering. Da gleichzeitig die benötigte Schweißleistung steigt, wenn andere Schutzgase als Argon verwendet werden, nimmt die Erwärmung des Kalorimetermediums stark zu. Im Vergleich zu reinem Argon ist das Kalorimetermedium mehr als 40 % wärmer, wenn reines Helium als Schutzgas verwendet wird.

Auch die Zumischung von 5 % Wasserstoff in das Argonschutzgas bewirkt eine verstärkte Erwärmung um 8 %. Die Analysen der Lichtbogengeometrie zeigen zudem, dass auf Grund der reduzierenden Wirkung von Wasserstoff die Lichtbogenmantelfläche um bis zu 20 % abnimmt. Gleichzeitig sinkt die Kühlungsenergiemenge des externen Kühlkreislaufes der Schweißstromquelle und die Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergien des Lichtbogens.

e) Einfluss der Schutzgasmenge und des Gasdüsendurchmessers

Anhand Abbildung 5-13 wird deutlich, dass der Lichtbogenwirkungsgrad um 6 % auf knapp $\eta_{LB} = 0{,}76$ erhöht werden kann, wenn anstatt V = 5 l/min V = 15 l/min Schutzgas verwendet werden.
Die Steigerung des Lichtbogenwirkungsgrades durch die Erhöhung der Schutzgasmenge kann folgende Ursachen haben. Einerseits muss zur erfolgreichen Lichtbogenzündung und für einen stabilen Schweißprozess der Bereich zwischen Elektrode und Werkstück gleichmäßig ionisiert werden. Dieser Vorgang wird durch eine erhöhte Menge an Schutzgas erleichtert. Andererseits bewirkt eine größere Schutzgasmenge eine höhere Strömungsgeschwindigkeit. Folglich kann die Energie besser von der Wolframelektrode zum Werkstück übertragen werden. Laut Katsaounis [Kat90] wird zudem die Lichtbogensäule durch den höheren Volumenstrom eingeschnürt und stärker fokussiert. Nicht zu verachten ist jedoch auch, dass mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit auch die Verwirbelungen des Schutzgases zunehmen und Inhomogenitäten in der Schutzgasabdeckung verursachen.
Ein ähnlicher Effekt konnte bei der Verringerung des Gasdüsendurchmessers beobachtet werden. Je kleiner der Gasdüsendurchmesser ist, desto konzentrierter tritt das Schutzgas aus, was die Strömungsgeschwindigkeit und Schutzgasbewegung erhöht. Somit wird der Energietransport von der Elektrode zum Werkstück verbessert. Durch die Verkleinerung des Durchmessers der Keramikgasdüse von d = 18,75 mm auf d = 12,5 mm (bei konstanter Schutzgasmenge) steigt der Lichtbogenwirkungsgrad um etwa 7 % auf $\eta_{LB} = 0{,}78$.

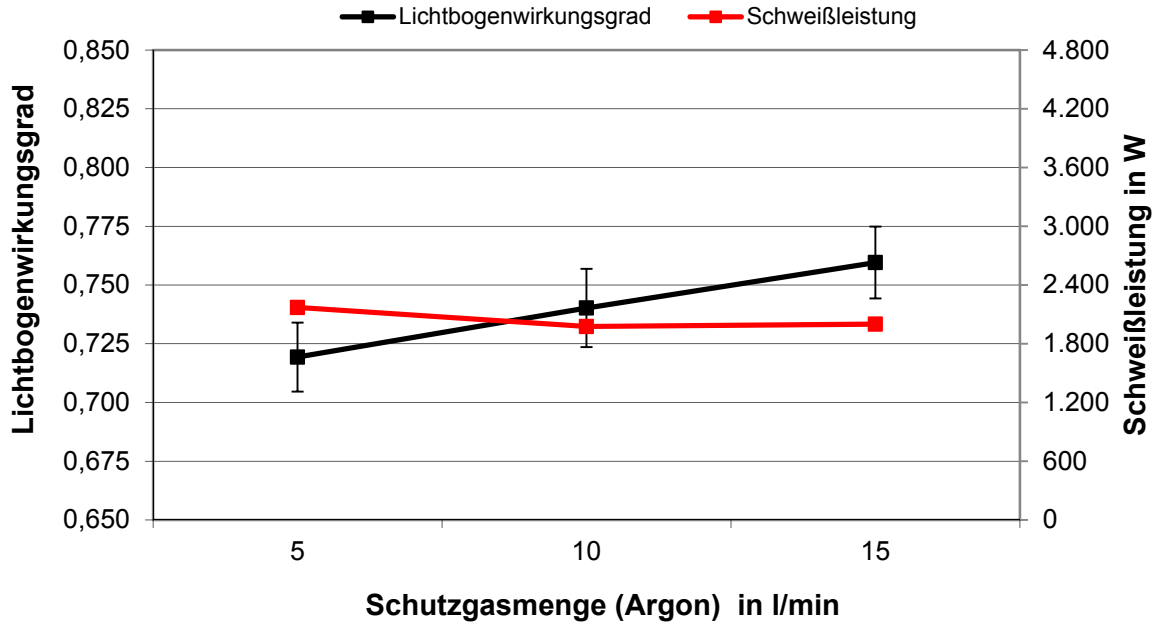


Abbildung 5-13: Einfluss der Schutzgasmenge auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses (I_S = 150 A, s = 4 mm, Argon SG, v_S = 30 cm/min, Minuspolung)

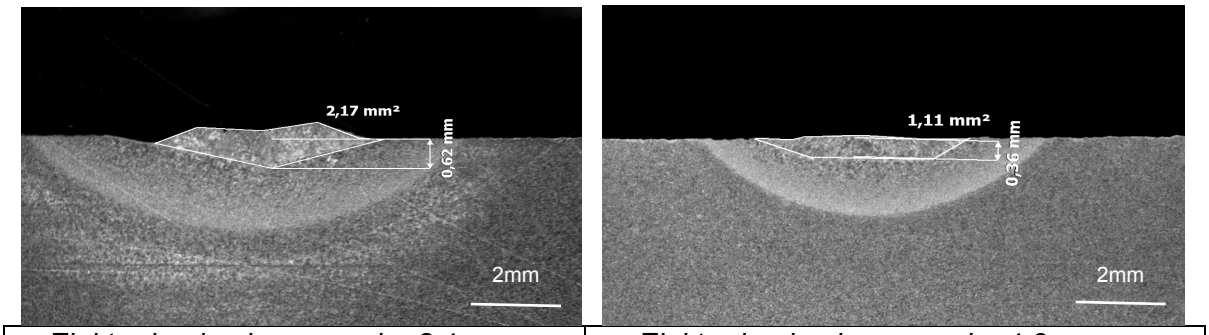
f) Einfluss der Elektrodengeometrie und des Elektrodendurchmessers

In weiteren Betrachtungen wurde der Einfluss des Spitzenwinkels der Wolframelektrode auf den Lichtbogenwirkungsgrad untersucht. Es zeigte sich, dass der Lichtbogenwirkungsgrad bei einer „schärfer“ angeschliffenen Wolframelektrode minimal größer ist (circa 2 %), wenn der Elektrodenwinkel nicht α = 30 °, sondern α = 15 ° beträgt. Durch den definierteren und konzentrierteren Austritt der Elektronen aus der Wolframelektrodenspitze, sinkt laut Katsaounis [Kat90] die Lichtbogenmantelfläche. Folglich sinkt die abgestrahlte Energiemenge des Lichtbogens. Gleichzeitig nimmt die Lichtbogenstabilität zu. Die Aussage von Katsaounis [Kat90], dass ein kleinerer Spitzenwinkel einen größeren Verschleiß der Wolframelektrode bewirkt, konnte bestätigt werden.

Der Durchmesser der Wolframelektrode ist direkt mit ihrer Strombelastbarkeit verbunden. Um den notwendigen Durchmesser der Elektrode zu bestimmen wird in der Literatur folgende Berechnung angegeben (Formel 5.1 [Wac13]):

Formel 5.1
$$I_{\max,Elektrode} = d_{Elektrode}[mm] * 100A - 80A$$

Für die Untersuchung des Einflusses des Durchmessers der Wolframelektrode wurde der Schweißstrom konstant gehalten, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Jedoch kam es bei den Schweißversuchen mit der dünnsten Wolframelektrode zu deren partiellen Abbrand. Die Ursache ist die zu hohe Stromdichte an der Elektrodenspitze, was das Ergebnis der Berechnung mit Formel 5.1 bestätigt. Hingegen führen zu geringe Schweißstromdichten bei zu großen Elektrodendurchmessern zu einer ungenügenden Erwärmung der Wolframelektrode. Auf Grund der zu niedrigen Kathodentemperatur werden die Zündung des Lichtbogens und die Elektronenemission erschwert.
Ein Einfluss des Elektrodendurchmessers auf den Lichtbogenwirkungsgrad konnte nicht ermittelt werden. Jedoch sinkt die erforderliche Schweißleistung um mehr als 20 % ab, wenn der Elektrodendurchmesser von d = 2,4 mm auf d =4,8 mm erhöht wird. Im gleichen Maße sinkt der Wärmeeintrag in das Kalorimetermedium. Da eine Konstantstrom geregelte Schweißkennlinie verwendet wurde, sinkt die erforderliche Schweißspannung mit steigendem Elektrodendurchmesser. Eine Begründung ist, dass die Widerstandserwärmung durch den erhöhten Elektrodendurchmesser und der folglich geringeren Stromdichte kleiner ist und somit der Spannungsabfall in der Wolframelektrode sinkt. Da die Schweißleistung und der Energieeintrag im gleichen Verhältnis sinken, bleibt der Lichtbogenwirkungsgrad unverändert (Formel 3.12).



Elektrodendurchmesser d = 2,4 mm	Elektrodendurchmesser d = 4,8 mm

Abbildung 5-14: Querschliff WIG-Schweißnaht verschiedener Elektrodendurchmesser (I_S = 150 A, s = 4 mm, Argon SG, v_S = 30 cm/min, Minuspolung)

Gleichzeitig sinkt auch das Schweißnahtvolumen und der Einbrand (Abbildung 5-14). Dies hat zur Folge, dass der Schmelzwirkungsgrad von $\eta_{Schm} = 0,06$ (d = 2,4 mm) auf unter $\eta_{Schm} = 0,04$ (d = 4,8 mm) abnimmt. Deshalb ist grundsätzlich nicht zu empfehlen den größtmöglichen Wolframelektrodendurchmesser zu verwenden. Die ermittelten Messwerte des Schmelzwirkungsgrades bestätigen die Untersuchungen von Fuerschbach [Fue89] ($\eta_{Schm} = 0,06…0,19$) und stehen im Gegensatz zu den höheren Angaben von DuPont [DuP95] ($\eta_{Schm} = 0,36$).

g) Einfluss der Blechdicke und des Grundwerkstoffs

Beim Vergleich zwischen t = 4 mm, t = 5 mm und t = 15 mm dicken Blechen des Werkstoffs S235 JR konnte kein Unterschied bei der Erwärmung des Kalorimetermediums in Folge des Fügeprozesses festgestellt werden. Lediglich die Zeit bis zur gleichmäßigen Temperaturverteilung im Kalorimeter stieg mit zunehmender Blechdicke, wobei die Temperaturdifferenz unverändert blieb. Die Konsequenz liegt nahe, dass die eingebrachte Energiemenge bei zwei- oder dreidimensionaler Wärmeableitung konstant ist. Dies schließt jedoch eine unterschiedliche Wärmeausbreitung und -geschwindigkeit nicht aus, welche maßgeblich den Schmelzwirkungsgrad beeinflusst.

Bei der verwendeten Konstantstrom Kennlinie zum WIG-Schweißen ist die erforderliche Schweißspannung vom Grundwerkstoff abhängig:

- CrNi-Stahl	$U_S = 13,3$ V, $I_S = 150$ A	$\eta_{Schm} = 0,05$
- S 235 (Baustahl)	$U_S = 14,0$ V, $I_S = 150$ A	$\eta_{Schm} = 0,04$
- Al 99,5	$U_S = 17,0$ V, $I_S = 150$ A	$\eta_{Schm} = 0,03$

Ein Grund für den höheren Spannungsabfall beim Schweißen von Aluminium ist unter anderem das notwendige Aufbrechen der Oxidschicht. Folglich ändert sich die Schweißleistung, was auch zur unterschiedlichen Erwärmung des Bauteils führt. Da die Änderung der Schweißleistung weitgehend proportional zur Bauteilerwärmung verläuft, erscheint der Lichtbogenwirkungsgrad weitgehend unabhängig vom Grundwerkstoff. Innerhalb der Untersuchungen ist festzustellen, dass der Lichtbogenwirkungsgrad nicht vom Werkstoff oder der Bauteilgeometrie abhängt, sondern vornehmlich von den Prozessparametern beeinflusst wird. Dies bestätigen auch Erkenntnisse aus der Literatur [Kat90]. Der Lichtbogenwirkungsgrad gibt ausschließlich das Verhältnis zwischen dem Bauteil zugeführter Energie (Schweißleistung) und im Bauteil umgesetzter Energie (Erwärmung im Kalorimeter) an.
Anhand der untersuchten Querschliffe konnte jedoch ein Einfluss auf den Schmelzwirkungsgrad ermittelt werden, was auch die Ergebnisse von Fuerschbach [Fue91] bestätigen. Eine höhere Wärmeleitfähigkeit im Bauteil bewirkt einen verbesserten Wärmetransport im Werkstoff, weshalb im Verhältnis zwischen eingebrachter Energie im Bauteil und theoretisch notwendiger Energie zum Erzeugen des Schmelznahtvolumens weniger Schmelze gebildet wird. So ist der Schmelzwirkungsgrad des CrNi-Stahls am höchsten, während der des Aluminiums am geringsten ist.
Allgemein ist der Schmelzwirkungsgrad des WIG-Schweißens eher als klein einzustufen. Gründe sind die niedrige Leistung des Prozesses, die niedere Leistungsdichte (Abbildung 3-16) und der geringe Lichtbogendruck.

5.1.2 Plasmaschweißprozess

Für die Analyse von Einflussgrößen beim Plasmaschweißen wurde definiert jeweils ein Parameter variiert. Auf Grund des technisch ähnlichen Funktionsprinzips lassen sich tendenziell analoge Abhängigkeiten, wie beim WIG-Schweißen erwarten, was in den folgenden Abschnitten analysiert wird.

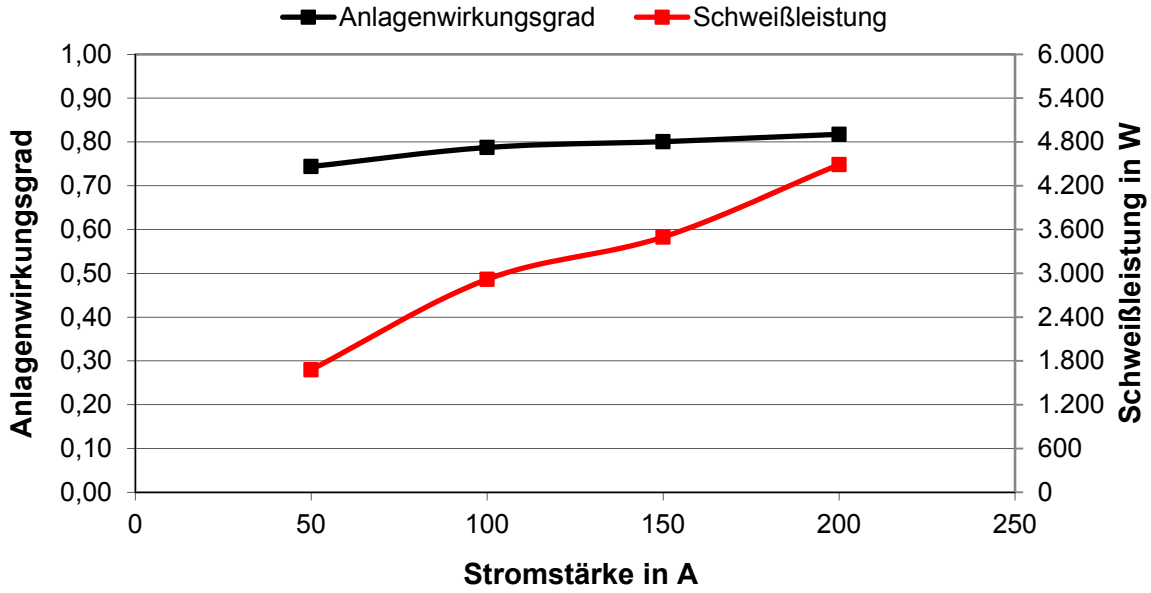


Abbildung 5-15: Anlagenwirkungsgrad der Plasmaschweißstromquelle Plasmastar Typ „20/250“

Mit zunehmender Schweißleistung steigt der Anlagenwirkungsgrad (Abbildung 5-15). Die verwendete Plasmaschweißstromquelle besitzt jedoch kein internes Kühlsystem, sondern ist an die zentrale Kühlung angeschlossen. Aus diesem Grund ist der Anlagenwirkungsgrad im betrachteten Schweißleistungsbereich von I_S = 50…200 A mit η_{Anlage} = 0,74 bis η_{Anlage} = 0,82 relativ hoch. Im Vergleich dazu haben moderne Inverterstromquellen zum MSG-Schweißen, laut Datenblatt, im optimalen Arbeitspunkt einen Anlagenwirkungsgrad oberhalb η_{Anlage} = 0,90 [Fro12], wobei die Kühlleistung eingerechnet ist. Im Standby-Zustand und in der Nachlaufphase werden von dieser Schweißenergiequelle konstant $P_{Standby}$ = 145 W verbraucht.

a) Einfluss der Schweißleistung bzw. Schweißstromstärke

Die Untersuchungen zeigen, dass bei Erhöhung der Plasmastromstärke von I_S = 50 A auf I_S = 150 A der Lichtbogenwirkungsgrad von η_{LB} = 0,80 um knapp 3 % sinkt.
Diese Verminderung ist etwas geringer, als bei der Analyse des WIG-Schweißprozesses innerhalb des gleichen Leistungsbereiches. Eine Ursache kann die stärkere Einschnürung des Lichtbogens und der damit verbundenen geringeren Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergie des Lichtbogens sein. Auf Grund der Lichtbogeneinschnürung ist die Lichtbogenbreite auch im höheren Leistungsbereich nahezu konstant. In Folge dessen verändern sich die Lichtbogenmantelfläche und der thermisch beeinflusste Oberflächenbereich des Bauteils nur geringfügig. Gleichzeitig steigt die thermische Belastung der Plasmadüse, sowie die Erwärmung des Brenners, der stromführenden Bauteile und die Widerstandserwärmung im Strom-Wasser Kabel an, so dass ein erhöhter Anteil an Kühlungsenergie an die externe Kühlung der Schweißstromquelle abtransportiert werden muss.

b) Einfluss des Abstandes der Plasmagasdüse zum Werkstück und des Elektrodenrückstandes

Analog zum WIG-Schweißprozess, sinkt der Lichtbogenwirkungsgrad des Plasmaprozesses bei der Erhöhung des Abstandes der Plasmagasdüse zum Werkstück. Im direkten Vergleich zwischen einem Abstand von s = 2 mm und s = 8 mm sinkt dieser um knapp 4 % auf η_{LB} = 0,72 (I_S = 100 A).
Eine Begründung liefert die Analyse der Lichtbogengeometrie. Je größer der Abstand zum Werkstück wird, desto größer wird die Lichtbogenmantelfläche und der Anteil der Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergie des Lichtbogens steigt. Die Folge ist, dass die Energieeinbringung in das Werkstück sinkt. Der wärmste Bereich des Lichtbogens befindet sich unterhalb der Elektrodenspitze. Aus diesem Grund nimmt die einwirkende Temperatur des Lichtbogens auf das Werkstück mit steigendem Abstand ab. Gleichzeitig wird eine höhere Schweißspannung zur Zündung und Aufrechterhaltung der Lichtbogensäule benötigt, was die erforderliche Schweißleistung erhöht. Grund hierfür ist der steigende Widerstand im Lichtbogen bei steigendem Plasmagasdüsenabstand. Dies bewirkt zudem einen erhöhten Energieeintrag in die externe Kühlung der Schweißenergiequelle.

Die Analyse des Elektrodenrückstandes zeigte keinen nennenswerten Unterschied zwischen den ermittelten Lichtbogenwirkungsgraden. Bei der Anpassung des Elektrodenrückstandes von r = 1 mm auf r = 3 mm beträgt die Differenz etwa 1 % (bei konstanten Randbedingungen und einem Brennerabstand von s = 4 mm), was im Bereich der Standardabweichung des Messsystems liegt.
Durch die Reduzierung des Elektrodenrückstandes nimmt die Einschnürung des Lichtbogens ab und der Plasmalichtbogen nähert sich mehr und mehr der Geometrie eines WIG-Lichtbogens an. Da dies vor allem eine geringere Schweißspannung bewirkt, sinkt die Schweißleistung und die eingebrachte Energiemenge in das Bauteil. In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies eine Schweißspannungsreduzierung um ΔU = 4,5 V von U_S = 26,8 V und eine Senkung der Temperaturdifferenz im Kalorimetermedium um 15 %, wenn der Elektrodenrückstand von s = 3 mm auf s = 1 mm verändert wird. Gleichzeitig werden der Einbrand und die Wärmeeinflusszone zunehmend kleiner.
Anhand des betrachteten Zahlenbeispiels wird deutlich, dass mit zunehmendem Elektrodenrückstand die eingebrachte Wärmemenge in das Bauteil steigt. Dieses Verhalten geht allerdings einher mit einer gesteigerten Schweißleistung, einer zunehmenden thermischen Belastung der Plasmadüse und des Schweißbrenners. Aus diesem Grund bleibt der Lichtbogenwirkungsgrad rechnerisch konstant.

c) Einfluss der Gaszusammensetzung

Durch die Variation der Gaszusammensetzung konnte der Lichtbogenwirkungsgrad des Plasmaschweißprozesses, innerhalb der Versuchsreihe, um etwa 7 % verändert werden.
Dazu wurde jeweils gleichzeitig die Gaszusammensetzungen von Plasma- und Schutzgas variiert. Durch die Zuführung von 5 % Wasserstoff zum Argongasstrom konnte eine Steigerung um knapp 4 % auf einen Lichtbogenwirkungsgrad von fast η_{LB} = 0,78 erreicht werden. Im Vergleich zum WIG-Prozess ist diese Veränderung dabei fast viermal höher.
Im Gegensatz zum WIG-Schweißprozess steigt der Lichtbogenwirkungsgrad jedoch nicht durch Beimischung von Helium an. Es kommt vielmehr zu einer reduzierenden Wirkung um knapp 4 % (Abbildung 5-16). Auf Grund der hohen benötigten Ionisationsenergie des Heliums war mit der verwendeten Anlagentechnologie die Zündung des Lichtbogens mit 100 % Helium nicht möglich. Somit konnten die Untersuchungen nur bis zu einem Mischungsverhältnis von 70 % Helium mit 30 % Argon durchgeführt werden. Der Lichtbogenwirkungsgrad beträgt an diesem Arbeitspunkt η_{LB} = 0,72.

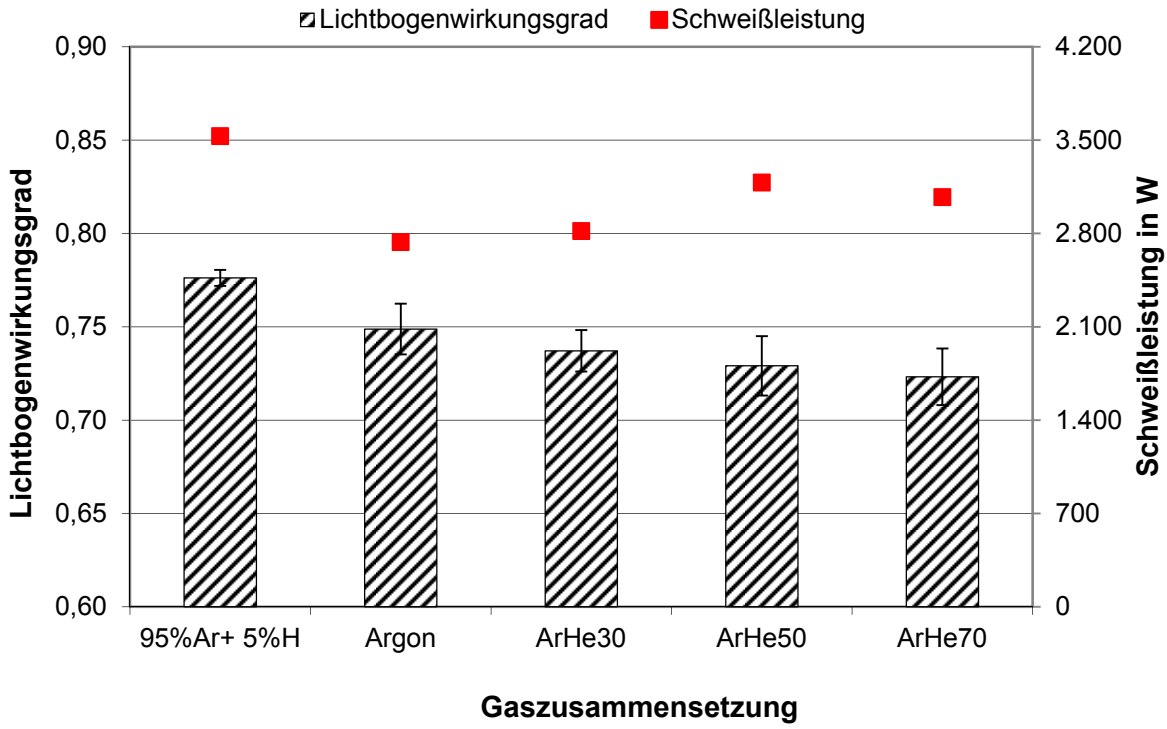


Abbildung 5-16: Einfluss der Gaszusammensetzung auf den Lichtbogenwirkungsgrad des Plasmaschweißprozesses (I_S = 100 A, s = 4 mm, V_{PG} = 4l/min, V_{SG} = 10 l/min, v_S = 40 cm/min, Minuspolung)

Physikalisch betrachtet ist die Wärmeleitfähigkeit von Helium um das Neunfache höher, als die von Argon, weshalb vermehrt Wärme vom Lichtbogenkern nach außen transportiert wird. Beim Plasmaschweißen ist der Lichtbogen jedoch durch die Plasmadüse künstlich eingeschnürt. Dadurch bewirkt die Erhöhung der Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergie durch die Beimischung von Helium eine stärkere thermische Belastung der Plasmadüse, da diese die resultierende Aufweitung des Lichtbogens behindert. Die Ionisationsenergie von Helium ist um mehr als 50 % höher, als die von Argon. Das hat zur Folge, dass vor allem an den Randschichten ein hoher Energieumsatz erfolgt und die Temperaturen an der Bauteiloberfläche steigen [Mat06]. Diese Faktoren zusammen bewirken eine bessere Wärmeverteilung im Lichtbogen bei zugleich hohem Energieeintrag in das Bauteil. Die hierfür höhere benötigte Schweißleistung wird dafür genutzt, eine hohe Schweißgeschwindigkeit und eine reduzierte Flankenbindefehlergefahr zu realisieren.
Wasserstoff hingegen hat eine reduzierende Wirkung auf die Breite des Schweißlichtbogens bzw. des stromführenden Bereiches. Das heißt der Lichtbogen wird eingeschnürt und somit die Energiedichte des Plasmaprozesses erhöht. Dadurch sinkt die thermische Belastung der Plasmadüse und die Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergie des Lichtbogens wird reduziert. Die Konsequenz ist, dass der Lichtbogenwirkungsgrad auf einen Wert von η_{LB} = 0,78 ansteigt.

d) Einfluss der Gasmenge

Es wurde sowohl die Variation der Plasma-, als auch der Schutzgasmenge betrachtet. Bei der Analyse der Ergebnisse wurde festgestellt, dass beide Anpassungen ein Optimum aufweisen und außerhalb dieses Bereiches eine Reduzierung des Lichtbogenwirkungsgrades erfolgt. Dabei ist zu beachten, dass die erzielten Ergebnisse stark von der gewählten Brennergeometrie abhängen.
Dieser optimale Bereich befindet sich bei der verwendeten Plasmabrennerkonfiguration bei V_{PG} = 4 l/min und V_{SG} = 10 l/min und bewirkt einen Lichtbogenwirkungsgrad von η_{LB} = 0,74. Dieser Wert ist jedoch individuell für diesen Versuchsaufbau zu betrachten und kann nicht einfach übertragen werden. So führen z.B. bei anderen Brennertechnologien auch andere Gasmengen zu ungewünschten Strömungen an der Schmelzbadoberfläche, welche eine unregelmäßigen Nahtoberraupe bewirken („Humping"-Effekt) [Kot10]. Durch Reduzierung der Plasma- und bzw. oder der Schutzgasmenge nimmt die Gasbewegung und dessen Strömungsgeschwindigkeit ab. Das kann der Grund sein, weshalb weniger Energie von der Elektrode zum Werkstück übertragen wird. Dieser Effekt konnte auch schon beim WIG-Schweißen beobachtet werden. Im konkreten Fall sinkt der Lichtbogenwirkungsgrades beim Plasmaschweißen um gut 8 %, bei der Reduzierung der Plasmagasmenge von V_{PG} = 4 l/min auf V_{PG} = 2 l/min.
Mit zunehmender Plasma- bzw. Schutzgasmenge steigt bei ansonsten konstanten Einstellwerten der Druck auf die Schmelze an. Zu hohe Gasmengen blasen den aufgeschmolzenen Werkstoff aus der Schmelzzone heraus (Effekt des Plasmaschneidens), was auch an den Querschliffen zu erkennen war. Dabei wird die Wärmeausbreitung und Wärmeleitung innerhalb der Fügezone gestört, was eine Verminderung des Lichtbogenwirkungsgrades hervorruft. Im konkreten Fall nahm dieser um bis zu 5 % ab.

5.2 Schweißuntersuchungen mit abschmelzender Elektrode

5.2.1 Metallschutzgasschweißen

Mit zunehmender Schweißleistung nimmt der Anlagenwirkungsgrad der MSG-Schweißstromquellen stetig zu. Im betrachteten Arbeitsbereich zwischen P_S = 1.000…15.000 W von η_{Anlage} = 0,68 auf η_{Anlage} = 0,81, was in Abbildung 5-17 zu erkennen ist.

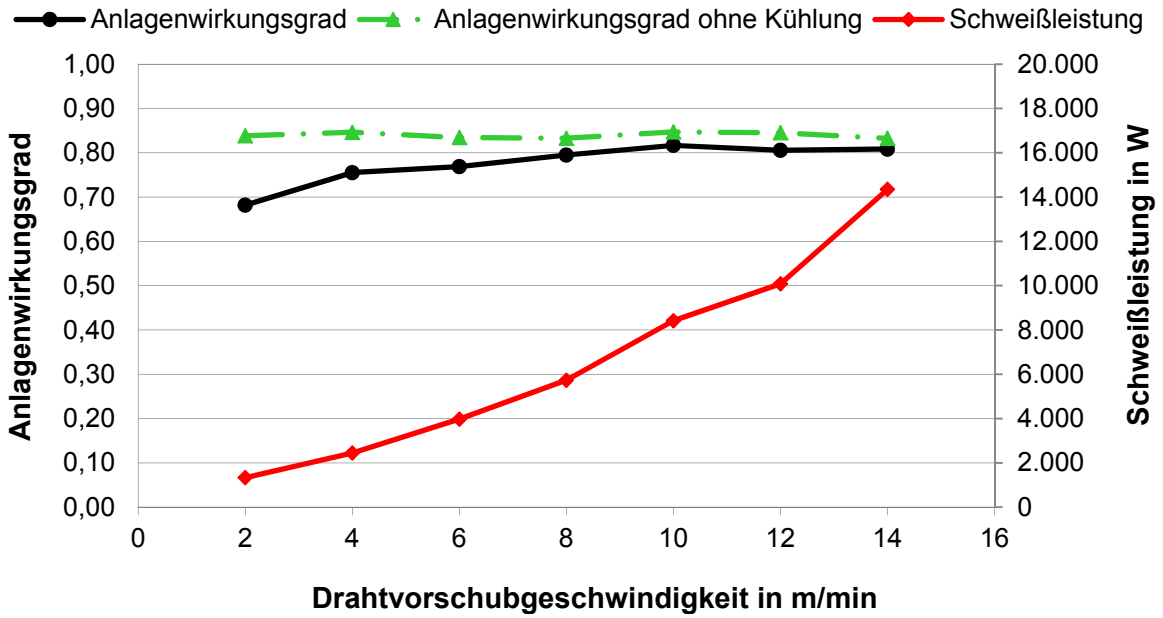


Abbildung 5-17: Anlagenwirkungsgrad der MSG-Schweißstromquelle EWM „Phoenix 330"

Wird dabei die konstant geregelte Kühlleistung von $P_{Kühl}$ = 320 W von der entnommenen Netzleistung subtrahiert, so steigt der „Anlagenwirkungsgrad ohne Kühlung“ (grüne Strich-Punkt-Linie) auf gleichbleibend etwa 84 %. Dadurch wird rein rechnerisch das System der konstant arbeitenden externen Brennerkühlung eliminiert und ausschließlich der Anlagenwirkungsgrad für die Wandlung und Erzeugung der Schweißleistung dargestellt. Der Energieverbrauch der Schweißenergiequelle im Standby-Zustand beträgt $P_{Standby}$ = 90 W.
Der Anlagenwirkungsgrad der Schweißenergiequelle der Firma Fronius liegt auf gleichem Niveau. Lediglich im Standby-Zustand wird $\Delta P_{Standby}$ = 50 % weniger Energie benötigt.

a) Einfluss der Schweißleistung bzw. der Lichtbogenart

Die Änderung der Schweißleistung erfordert die Anpassung der Drahtvorschubgeschwindigkeit, was die Änderung der Lichtbogenart bzw. des Werkstoffübergangs bewirken kann. Wie in Abbildung 5-18 zu erkennen, ist der effektive Wirkungsgrad des Kurzlichtbogen bis zu einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von v_D = 8 m/min (Kurz- und Übergangslichtbogenbereich) deutlich höher als der des Impulslichtbogens. Da in diesem Bereich die Schweißleistung beim Impulsschweißen um etwa ΔP_S = 20 % höher ist, wurde gleichzeitig eine um ΔT = 15 % höhere Temperatur der Kalorimeterflüssigkeit gemessen. (Da auf Grund unterschiedlicher Energiedichten der Schweißprozesse die Wärmeverteilung im Bauteil nicht homogen ist, wird als Vergleichsgröße die Erwärmung des Kalorimetermediums genutzt.) Erst ab v_D = 10 m/min (Sprühlichtbogenbereich) ist die benötigte Schweißleistung des Impulsprozesses geringer und die Temperatur der Kalorimeterflüssigkeit im betrachteten Fall um circa ΔT = 17 % niedriger, als die des Standardprozesses. Dies bestätigen auch die Ergebnisse der Tropfenkalorimetrie (Abschnitt 5.3 Absatz b). In diesem Leistungsbereich sind die Tropfentemperatur, die Schweißleistung und die Einbrandgeometrie des Sprühlichtbogenprozesses höher.
Im Leistungsbereich des sich ausbildenden Kurzlichtbogens wird in der Kurzschlussphase ein Großteil der zugeführten elektrischen Energie bei der Widerstandserwärmung zwischen Zusatzwerkstoff und Werkstück umgesetzt. Dieser direkte Energiefluss während der Kurzschlussphase weist eine hohe Effizienz auf, gleichzeitig ist der entstehende Lichtbogen temporär und von kleiner Dimension. Im Sprühlichtbogen verschieben sich die Energieanteile mehr in Richtung Lichtbogen und die für den Prozess nicht nutzbaren Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergien über die Lichtbogensäule nehmen zu.
Impulsprozesse wechseln mit definierter Frequenz zwischen Hoch- und Niedrigstromphasen. Im Vergleich zum Kurz- oder Sprühlichtbogen liegen bei gleicher Abschmelzleistung völlig andere Lichtbogen- und Abschmelzverhältnisse vor. Im unteren Leistungsbereich sind die Lichtbogenmantelfläche und die Anteile der Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergien des Lichtbogens beim Impulsprozess größer. Dieses Verhalten ist im oberen Leistungsbereich genau entgegengesetzt. Ergänzend ist zu erwähnen, dass die Gestaltung des Impulses (Pulsdauer, Grundstrom, Pulsstrom…) den effektiven Wirkungsgrad stark beeinflusst. Die Untersuchungen ergaben Abweichungen von mehr als 5 %.
Anhand der Analyse der durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei der Angabe der effektiven Wirkungsgrade für MSG-Prozesse eine Unterteilung nach Lichtbogenarten zu empfehlen ist:

- Kurzlichtbogen η_{eff} = 0,85 (+1 % / -2 %)
- Impulslichtbogen η_{eff} = 0,77 (+6 % / -3 %)
- Sprühlichtbogen η_{eff} = 0,70 (+4 % / -1 %)

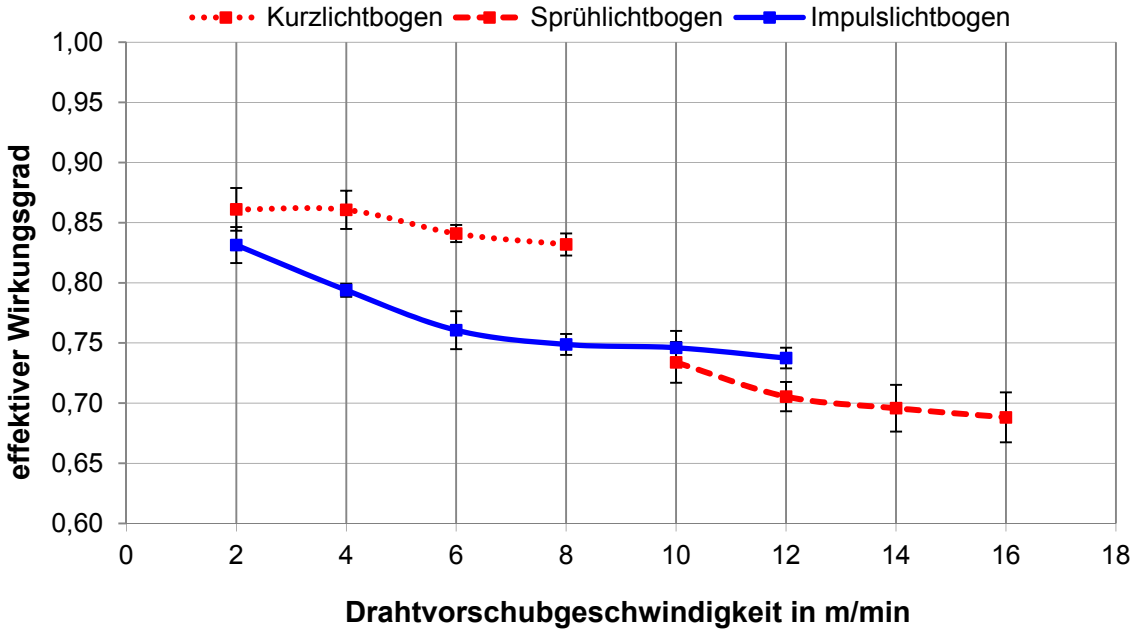


Abbildung 5-18: *Einfluss der Lichtbogenart auf den effektiven Wirkungsgrad beim MSG-Schweißen*
(s = 18 mm, V_{SG} = 15 l/min 95%Ar 5%CO_2, ZW: G3Si1 d = 1,2 mm, v_S = 40…110 cm/min)

Weitere Erkenntnisse zum Energiefluss beim MSG-Schweißen können durch die Betrachtung der Lichtbogenmantelfläche gefunden werden. Die Schweißleistung und die Lichtbogenmantelfläche steigen im gleichen Verhältnis zueinander an, wenn die Drahtvorschubgeschwindigkeit erhöht wird. Eine Verdopplung des Drahtvorschubs bewirkt auch in etwa eine Verdopplung der Lichtbogenmantelfläche und Schweißleistung. Dass der Lichtbogen nicht nur Strahlung emittiert, sondern auch absorbiert bestätigt Hertel [Her11] in seinem P1-Strahlungstransportmodell. Eine vermehrte Strahlungsabsorption wurde im Lichtbogenkern und Lichtbogenrandbereich festgestellt. Durch die Absorption im Lichtbogenkern sollen die Strahlungsemissionen des Lichtbogenkerns ausgeglichen werden. Die Reabsorption im Lichtbogenrandbereich bewirkt hingegen eine Erhöhung der Lichtbogenmantelfläche.
Die Verdopplung der Drahtvorschubgeschwindigkeit (gleichzeitig verdoppelte Lichtbogenmantelfläche) bewirkt mehr als eine Verdreifachung der Abstrahlungs-, Wärmeleitungs- und Konvektionsenergien (Abbildung 5-19). Dies ist durch die Anpassung der Lichtbogenart vom Kurz- zum Sprühlichtbogen begründet. In Folge dessen findet der Energietransport zum Bauteil vermehrt über den Lichtbogen statt. Die Lichtbogenmantelfläche ist beim Sprühlichtbogen größer und zeitlich konstant ausgebildet, während der Lichtbogen auf Grund der Kurzschlüsse beim Kurzlichtbogen regelmäßig zusammenbricht und von seiner Dimension kleiner ist. Folglich wird weniger Energie in Form von Wärme und Licht an die Umgebung abgegeben. Gleichzeitig steigt neben der Lichtbogentemperatur mit zunehmender Drahtvorschubgeschwindigkeit auch der Anteil verdampften Metalls an [Göt10]. Die Emissionsrate des Lichtbogens wird erhöht und die abgestrahlte Wärmemenge steigt stark an. Laut Rouffet [Rou10] ist die Emissionsrate (Plasma im Lichtbogenkern strahlt stark ab → beschreibt den hellen Bereich bei Lichtbogenaufnahmen) des Metalldampfes um mehr als das Sechsfache höher, als die von Argon. Hertel [Her11] beschreibt auch, dass die Strahlungsemission des Metalldfampfes höher ist, als die des Argonlichtbogens, der Unterschied seiner Messungen beträgt bis zu vier Größenordnungen.

Gleichzeitig benötigt die partielle Verdampfung von Zusatzwerkstoff Energie, weshalb die spektroskopischen Messungen von Rouffet [Rou10] zeigen, dass die Temperatur im Lichtbogenkern (metalldampfdominiert, bis ca. 60 % Eisendampfanteil im Kern des Lichtbogenplasma) etwa T_{Libo_Metall} = 8.000 K beträgt, während der umgebende Bereich (argondominiert) nahe des Lichtbogenkerns etwa T_{Libo_Argon} = 13.000 K heiß ist. Die spektroskopischen Messungen von Weltmann [Wel11] ergaben allerdings Temperaturen im Lichtbogenkern von T_{Libo_Metall} = 10.000 K. Dies zeigt, dass die exakte Temperaturbestimmung der heißen Plasmen weiterhin eine technische Herausforderung darstellt. Die Untersuchungen des Lichtbogenclusters [Uhr11] zeigen zudem, dass der Metalldampfanteil im Lichtbogen bis zu 50 % betragen kann. Auf Grund der hohen Strahlungsemission des Metalldampfes im Lichtbogenkern ist dieser Bereich kälter, als der umgebende argondominierte Lichtbogen, laut Hertel [Her11] müssen hierfür die Metalldampfanteil nur wenige Prozent betragen. Rose [Ros11] zeigte weiterhin, dass der Metalldampfanteil mit zunehmenden Wärmeeintrag in den Prozess bzw. höherer Stromstärke ansteigt. Dies könnte auch den starken Anstieg der Abstrahlungs-, Wärmeleitungs- und Konvektionsenergien des Lichtbogens (Abbildung 5-19) begründen.

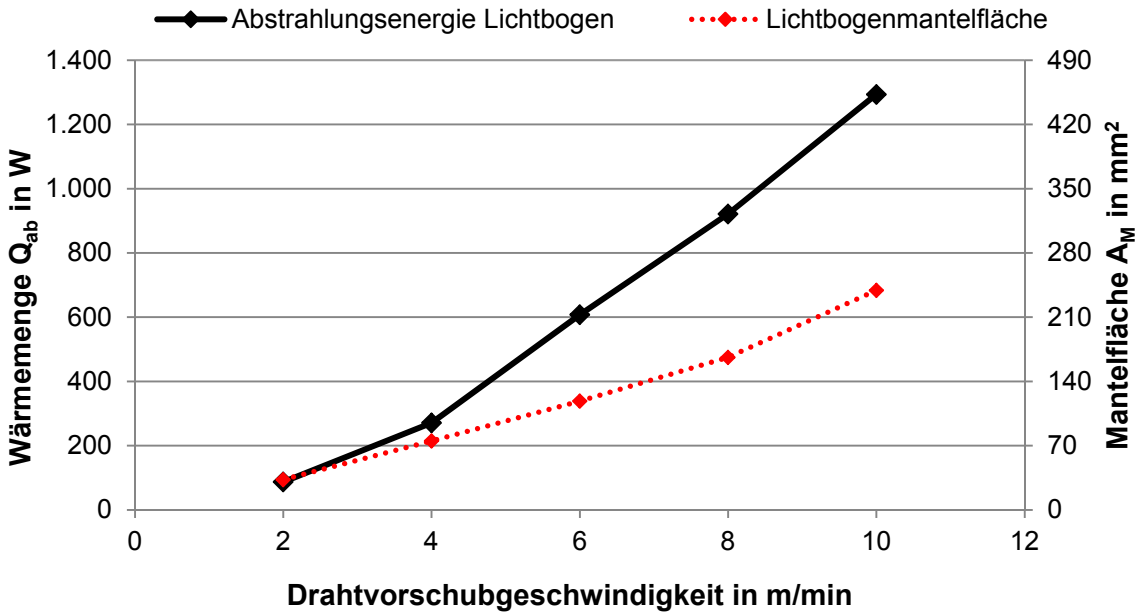


Abbildung 5-19: Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit auf die Abstrahlungsenergie des Lichtbogens beim MSG-Schweißen (s = 18 mm, V_{SG} = 15 l/min 95%Ar 5%CO_2, ZW: G3Si1 d = 1,2 mm, v_S = 40…90 cm/min)

Durch die Verdopplung der Drahtvorschubgeschwindigkeit verdoppelt sich auch die Schweißleistung, während die Erwärmung des Brennerkühlsystems einen steileren Anstieg aufweist, siehe Abbildung 5-20. Der Verlauf der Schweißleistung sowie der Wärmeverluste an die externe Brennerkühlung der Schweißenergiequelle zeigt, dass im Sprühlichtbogenbereich (v_D = 10 m/min) die abgeführte Wärme und die notwendige Schweißenergie stärker zunehmen, als im Kurzlichtbogenbereich. Das verdeutlicht den veränderten Energietransport der beiden Lichtbogenarten. Dabei kann die Erwärmung des Brenners auf Grund der Widerstandserwärmung des kontinuierlich nachlaufenden Zusatzwerkstoffes vernachlässigt werden. Jedoch steigt die Widerstandserwärmung in den stromführenden Bauteilen im Schweißbrenner mit zunehmender Schweißstromstärke an. Die thermische Belastung des Brenners, bei abschmelzender Elektrode, ist hauptsächlich durch die Abstrahlungs-, Wärmeleitungs- und Konvektionsenergie des Lichtbogens begründet. Hinzu kommt die mit der höheren Schweißleistung verbundene stärkere Erwärmung des Strom-Wasser Kabels (Tabelle 4-5).

In Folge dessen wird das Brennerkühlsystem der Schweißenergiequelle mit steigender Schweißleistung stärker beansprucht.

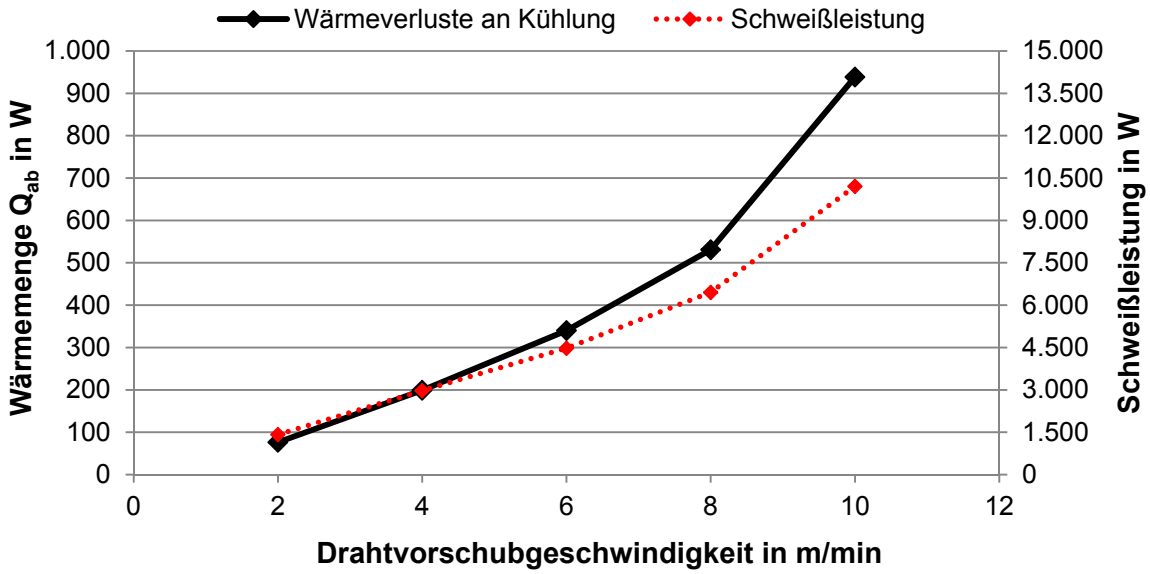


Abbildung 5-20: Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit auf die Wärmeverluste an die Kühlung der Schweißenergiequelle beim MSG-Schweißen (s = 18 mm, V_{SG} = 15 l/min 95%Ar 5%CO_2, ZW: G3Si1 d = 1,2 mm, v_S = 40…90 cm/min)

Zusammenfassend wird der Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit auf den Energiefluss beim MSG-Schweißen in Abbildung 5-21 dargestellt. Mit steigender Drahtvorschubrate und der damit verbundenen Anpassung der Lichtbogenart nimmt der prozentuale Anteil der eingebrachten Wärmemenge in das Bauteil ab. Während im Kurzlichtbogenbereich die Einbrandfläche im Verhältnis zur gesamten Nahtfläche relativ klein ist (18 % bei v_D = 10 m/min), steigt der Anteil der Einbrandfläche am gesamten Schweißnahtquerschnitt mit zunehmendem Drahtvorschub an (48 % bei v_D = 10 m/min). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Energietransport zunehmend über den Lichtbogen erfolgt und stetig weniger Energie während der Kurzschlussphasen übertragen wird. Abbildung 5-21 (unten) zeigt zudem, dass die Nahtbreite mit der Drahtvorschubgeschwindigkeit steigt und der Benetzungswinkel sinkt. Die Schweißgeschwindigkeit wurde dabei der Drahtvorschubgeschwindigkeit angepasst, so dass Ergebnisse mit konstanten Streckenenergien verglichen werden. Die Änderung der Benetzung kann damit erklärt werden, dass mit steigender Tropfentemperatur ebenfalls die Viskosität der schmelzflüssigen Metalltropfen abnimmt. Dadurch verläuft der in den partiell aufgeschmolzenen Grundwerkstoff aufgebrachte Zusatzwerkstoff großflächiger (siehe hierzu Abschnitt 5.3 Absatz a) und b)). Begünstigt wird dies durch eine großflächigere Erwärmung des Grundwerkstoffs durch den Lichtbogen. Das lässt schlussfolgern, dass der Einbrand vorwiegend durch den Lichtbogen hervorgerufen wird und der abschmelzende Zusatzwerkstoff einen untergeordneten Einfluss auf dessen Ausbildung hat (siehe Abschnitt 5.3).
Der Anteil der Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergien des Lichtbogens steigt im Vergleich zwischen v_D = 2 m/min und bei v_D = 10 m/min um mehr als das Doppelte von 6 % auf 13 %. Hingegen nimmt der prozentuale Anteil der Energie der externen Brennerkühlung der Schweißenergiequelle an der entnommenen Schweißleistung lediglich von 6 % auf 9 % zu. Verglichen mit der energetischen Bilanz von Probst stimmt der prozentuale Anteil des Energieeintrages in das Bauteil durch den Lichtbogen und den abgeschmolzenen Zusatzwerkstoff überein.

Jedoch sind die Strahlungsverluste an die Umgebung und die Kühlungsverluste an den Brenner real eher an der unteren beschrieben Grenze von [Pro76], [Pro82].

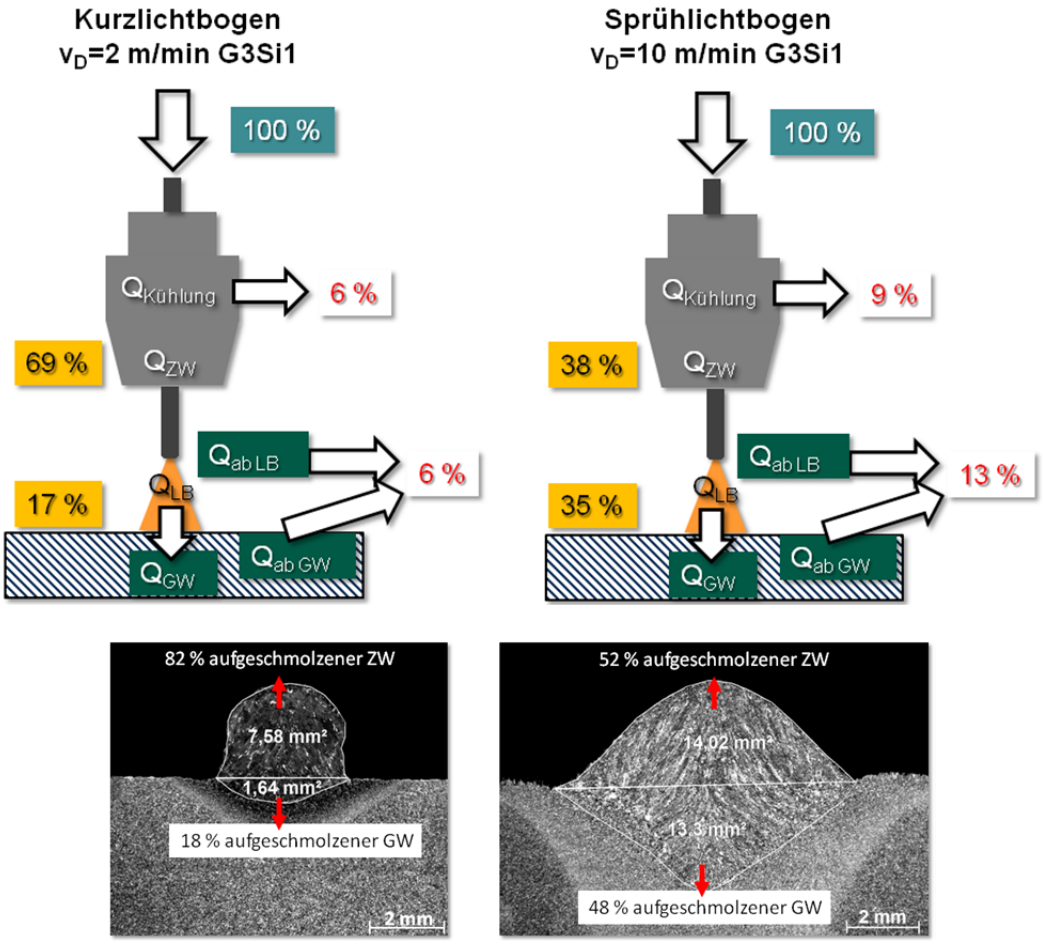


Abbildung 5-21: Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit auf den Energiefluss und die Schweißnahtgeometrie beim MSG-Schweißen (s = 18 mm, V_{SG} = 15 l/min 95%Ar 5%CO_2, ZW: G3Si1 d = 1,2 mm, v_S = 40 cm/min bei v_D = 2 m/min; v_S = 90 cm/min bei v_D = 10 m/min)

b) Einfluss der Schweißspannung bzw. Lichtbogenlänge

Durch die Anpassung der Schweißspannung wird der effektive Wirkungsgrad stark beeinflusst. Je größer die Spannung eines stabilen Lichtbogens ist (bei gleichen Randbedingungen), desto geringer wird der effektive Wirkungsgrad. So sinkt dieser von η_{eff} = 0,78 auf η_{eff} = 0,69 ab, wenn die Schweißspannung manuell um ΔU = 6 V erhöht wird (Abbildung 5-22). Dies ist, wie schon beim WIG- und Plasmaprozess, darin begründet, dass die Lichtbogenmantelfläche mit zunehmender Schweißspannung (Erhöhung der Lichtbogenlänge) größer wird und somit mehr Energie an die Umgebung in Form von Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergie abgegeben wird. Gleichzeitig ist eine höhere Schweißspannung nötig, um den Lichtbogen mit größerer Lichtbogenlänge aufrechtzuerhalten (Widerstand im Lichtbogen steigt). Konkret nahm die Lichtbogenmantelfläche um knapp 75 % zu, als die Spannung um ΔU = 5 V erhöht wurde. Folglich nehmen die Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergien des Lichtbogens um mehr als 30 % zu, während die Wärmeverluste an die Brennerkühlung der Schweißenergiequelle relativ unverändert blieben.

Der wärmste Bereich des Lichtbogens befindet sich unterhalb der Elektrodenspitze. Umso länger der Lichtbogen eingestellt ist, desto geringer wird folglich die einwirkende Lichtbogentemperatur auf das Bauteil [Her11].
Das Absinken des effektiven Wirkungsgrades bei einer Spannungsreduzierung um ΔU = -1,2 V ist durch einen ungleichmäßigen Schweißprozess begründet. Der Verlauf der Kurve (Abbildung 5-22) zeigt, dass der Wirkungsgraderhöhung durch Reduzierung der Schweißspannung natürliche Grenzen gesetzt sind. Durch stromstärkebegrenzende Maßnahmen während der Kurzschlussphase, intelligente Schweißprogramme und extrem kurze Reaktionszeiten können jedoch moderne Schweißstromquellen kleinere Lichtbogenlängen prozesssicher realisieren und somit den effektiven Wirkungsgrad erhöhen.

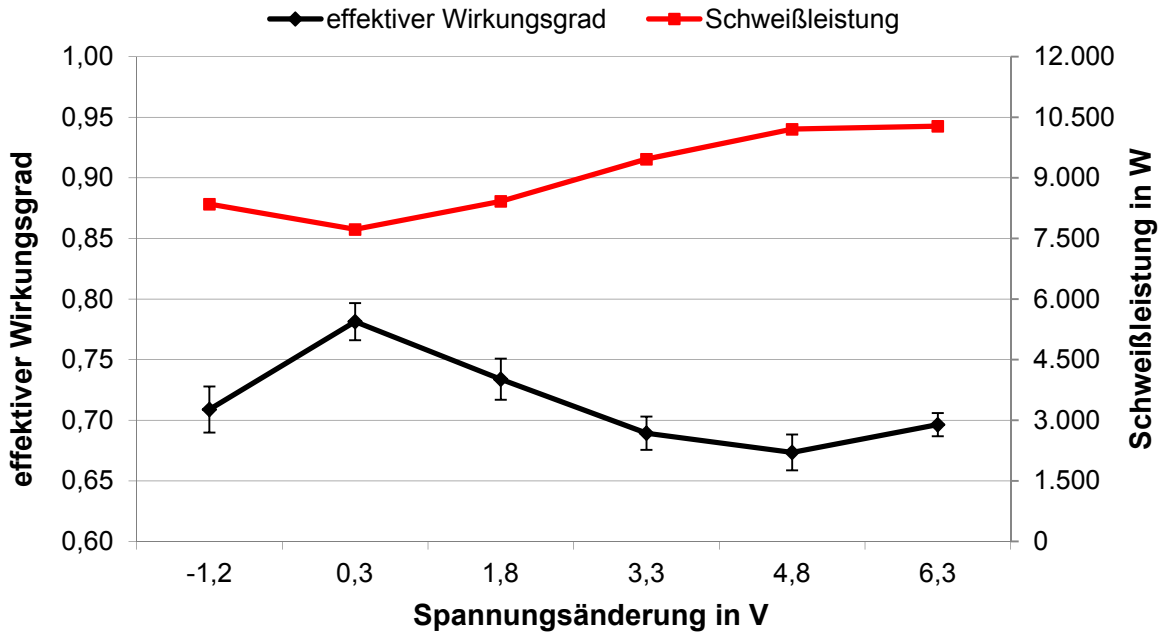


Abbildung 5-22: Einfluss der Schweißspannung auf den effektiven Wirkungsgrad beim MSG-Schweißen (V_{SG} = 15 l/min 95%Ar 5%CO_2, ZW: G3Si1 d = 1,2 mm, v_D = 10 m/min Standard, v_S = 90 cm/min)

c) Einfluss des Kontaktrohrabstandes zum Grundwerkstoff

Die Erhöhung des Kontaktrohrabstandes wirkt gegenteilig zur Steigerung der Schweißspannung. Mit zunehmendem Brennerabstand steigt der effektive Wirkungsgrad an. Im direkten Vergleich nimmt der effektive Wirkungsgrad um etwa 10 % zu, wenn der Brennerabstand von s = 10 mm auf s = 40 mm erhöht wird (Abbildung 5-23). Dabei ist zu erwähnen, dass die größten Änderungen im relativ nahen Abstandsbereich zwischen s = 10…15 mm zu verzeichnen sind.
Eine Erklärung dieses Verhaltens kann durch nähere Betrachtung der inneren Regelung der Schweißenergiequelle gefunden werden. Bei der Anpassung des Brennerabstandes bleibt die Lichtbogengeometrie unverändert. Das heißt, die Lichtbogenmantelfläche bleibt konstant, wodurch auch die Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergie des Lichtbogens fast unverändert bleibt. Jedoch wird das freie Drahtende angepasst, was zu einem unterschiedlichen Wärmeinhalt des Zusatzwerkstoffs, in Folge des ohmschen Widerstandes führt. Je größer der Kontaktrohrabstand ist, desto länger ist das freie Drahtende (bei gleichbleibender Lichtbogengeometrie). Dadurch steigt die Widerstandserwärmung im Zusatzwerkstoff an [Pro96]. Allgemein gilt, der Widerstand im Draht wird mit ansteigender, freier Drahtlänge

größer. Das bedeutet nach Formel 4.6 einen Anstieg der erzeugten Wärmemenge im Draht. Die Analyse der Schweißparameter macht deutlich, dass die erforderliche Schweißleistung im Vergleich zwischen s = 10 mm und s = 40 mm um ΔP_S = 35 % abgesunken ist. Die reduzierte Schweißleistung bewirkt dabei ein Absinken des Wärmeeintrags in das Bauteil um circa 25 %.

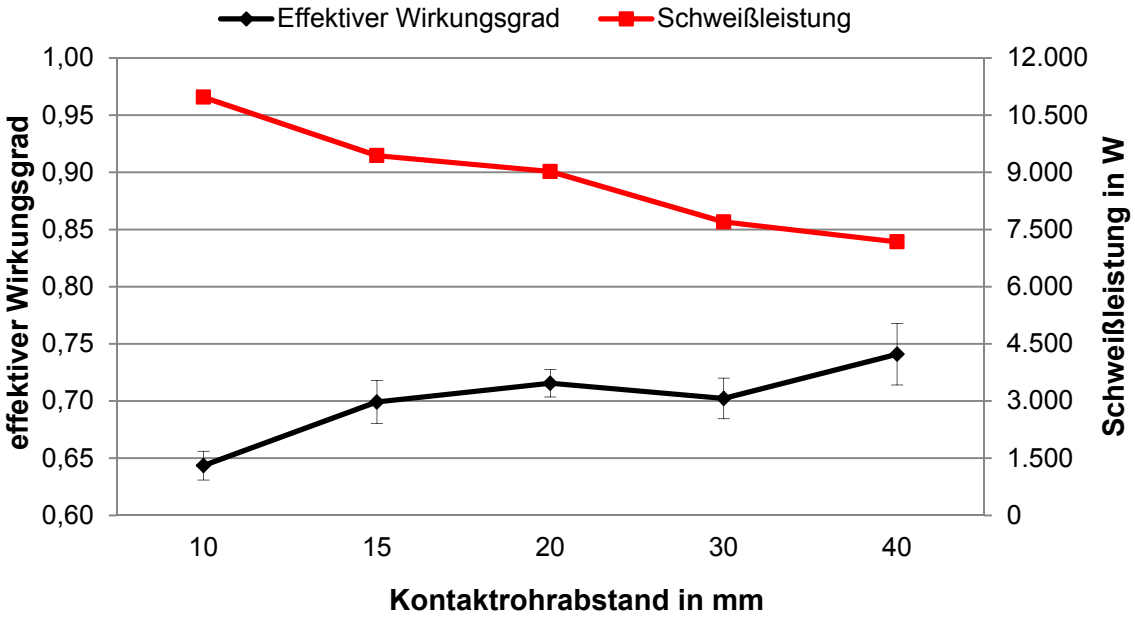
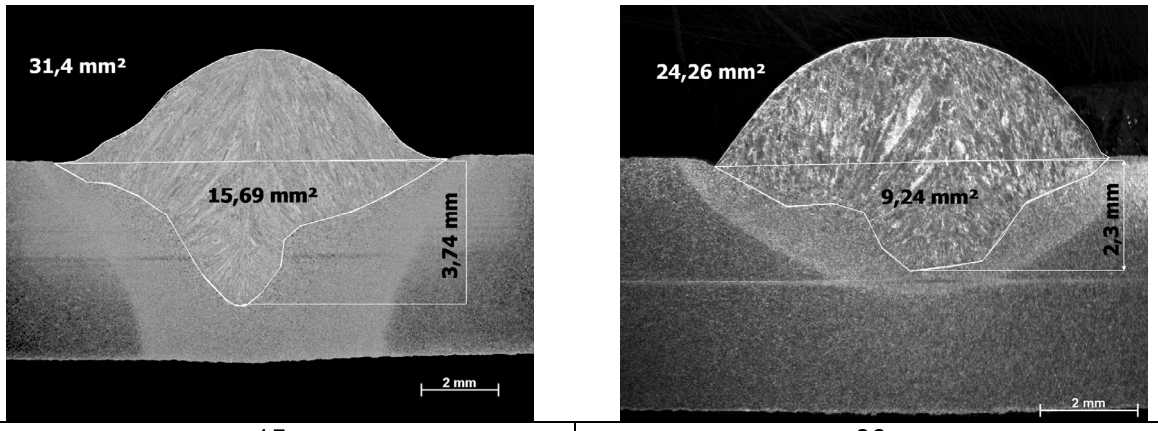


Abbildung 5-23: Einfluss des Kontaktrohrabstandes auf den effektiven Wirkungsgrad beim MSG-Schweißen (V_{SG} = 15 l/min 95%Ar 5%CO_2, ZW: G3Si1 d = 1,2 mm, v_D = 10 m/min Standard, v_S = 80 cm/min)

Der MSG Schweißprozess ist derart geregelt, dass über die eingestellte Drahtvorschubgeschwindigkeit die Schweißstromstärke und gleichzeitig über die gewünschte Lichtbogenlänge die Schweißspannung angepasst wird. Ist die Zusatzwerkstofftemperatur, durch die vermehrte Widerstandserwärmung (Kontaktrohrabstand steigt), am Lichtbogenansatzpunkt höher, muss durch den Lichtbogen weniger Energie zugeführt werden, um die gleiche Abschmelzleistung zu realisieren. Die Folge ist die Reduzierung der Schweißleistung. Die Intensität des Lichtbogens sinkt, was die geringere Einbrandfläche bewirken kann. Nähere Untersuchungen der Tropfentemperatur beim MSG-Schweißen klären diesen Sachverhalt (Absatz 5.3 Abschnitt d)).
Durch die Verlängerung des freien Drahtendes ist folglich weniger Energie notwendig, um das gleiche Volumen an Zusatzwerkstoff aufzuschmelzen. Jedoch verändert sich die Schweißnahtgeometrie maßgeblich. Bestätigt wird dies durch die Analyse der Querschliffe und der Berechnung der Schmelzwirkungsgrade (Abbildung 5-24). Der Schmelzwirkungsgrad sinkt von η_{Schm} = 0,62 auf η_{Schm} = 0,55, wenn der Kontaktrohrabstand von s = 15 mm auf s = 30 mm erhöht wird. Das bestätigt die Erkenntnisse in [Cha90]. Eigene Untersuchungen zum Einfluss des Kontaktrohabstandes im Bereich zwischen s = 10 mm und s = 30 mm zeigen, dass während der Anteil des Zusatzwerkstoffs am insgesamt aufgeschmolzenen Werkstoff leicht ansteigt (plus 4 %), sinkt der Anteil des Grundwerkstoffs am gesamten Schweißnahtvolumen stark ab (minus 11 %). Das Resultat ist eine vermehrte Nahtüberhöhung bei stark reduziertem Einbrand (minus 50 %).

Die Erhöhung des Kontaktrohrabstandes oder die Reduzierung des Drahtquerschnittes lässt sich laut Müller [Mül83, S. 11] technisch, auf Basis der Prinzipien des Jouleschen Gesetzes, zur Steigerung der Abschmelzleistung durch Erhöhung des Ohmschen Widerstandes im Zusatzwerkstoff nutzen. Dieser Sachverhalt hat einen positiven Effekt beim Auftragschweißen oder Auffüllen von großen Nahtquerschnitten.



s = 15 mm	s = 30 mm

Abbildung 5-24: Querschliff MAG-Schweißnaht mit verändertem Kontaktrohrabstand (v_D = 10 m/min, V_{SG} = 15 l/min 95%Ar 5%CO_2, ZW: G3Si1 d = 1,2 mm, GW: S 235, v_S = 80 cm/min)

d) Einfluss der Schutzgaszusammensetzung

Kohlendioxid

Durch die Beimischung von Kohlendioxid zum Argonschutzgas wird der effektive Wirkungsgrad gesteigert. Die Analyse der Querschliffe und Schweißversuche zeigte eine leicht breitere Einbrandgeometrie und eine höhere eingebrachte Wärmemenge in das Kalorimetermedium bei vermehrter Zuführung von CO_2 als Schutzgas. Des Weiteren hat CO_2 laut Killing [Kil96] die Eigenschaft die Viskosität und die Schmelzbadbewegung (Marangoni-Effekt) der entstehenden Schmelze zu reduzieren, was den Energietransport im Bauteil verbessert. Zwischen 5 %...25 % CO_2-Anteil im Argonschutzgas befinden sich die Differenzen im Bereich der Standardabweichung, so dass von kaum interpretierbaren Zusammenhängen gesprochen werden kann. Ab einem Wert von 25 % CO_2 und 75 % Argon wurde der Lichtbogen zunehmend unruhiger, die Tropfengeometrie größer und deren Ablösung unregelmäßiger. Jedoch wird der effektive Wirkungsgrad zunehmend größer. Konkret steigt der effektive Wirkungsgrad durchschnittlich um 3 % an [5 %...100 % CO_2].

Wird die Drahtvorschubgeschwindigkeit im Bereich zwischen v_D = 4…8 m/min betrachtet, nehmen die effektiven Wirkungsgrade der verschiedenen Schutzgaszusammensetzungen im gleichen Verhältnis ab (Abbildung 5-25). Oberhalb von v_D = 8 m/min sinkt der effektive Wirkungsgrad bei 95 % Argon und 5 % CO_2 stark ab. Dabei wechselt die Lichtbogenart vom Übergangs- (kurzschlussbehaftet) zum Sprühlichtbogen (kurzschlussfrei). Hingegen ist bei der Verwendung von 100 % CO_2 das Absinken des effektiven Wirkungsgrades in diesem Arbeitsbereich minimal. Ursache kann der sich einstellende Langlichtbogen sein. Der Energietransport erfolgt teilwiese über den Lichtbogen aber auch während vereinzelter Kurzschlussphasen direkt über den Zusatzwerkstoff- Widerstandserwärmung.

Die Differenz des höheren Energieeintrages zwischen CO_2-reichen und CO_2-armen Schutzgas ist, ergänzend zu den bereits beschriebenen Punkten, mit der Rekombinationsenergie des molekularen Gases an der relativ kalten Metalloberfläche zu erklären. Die zusätzlich benötigte Dissoziationsenergie wird durch Anheben der Schweißspannung zur Verfügung gestellt. Diese Energiemenge wird bei der Rekombination der Ionen am Werkstück in Wärme umgewandelt [Ger06].

Das sorgt für einen besseren Wärmeeintrag in das Bauteil sowie zur Erhöhung des Schmelzwirkungsgrades gegenüber Schweißprozessen mit höherem Argonanteil.

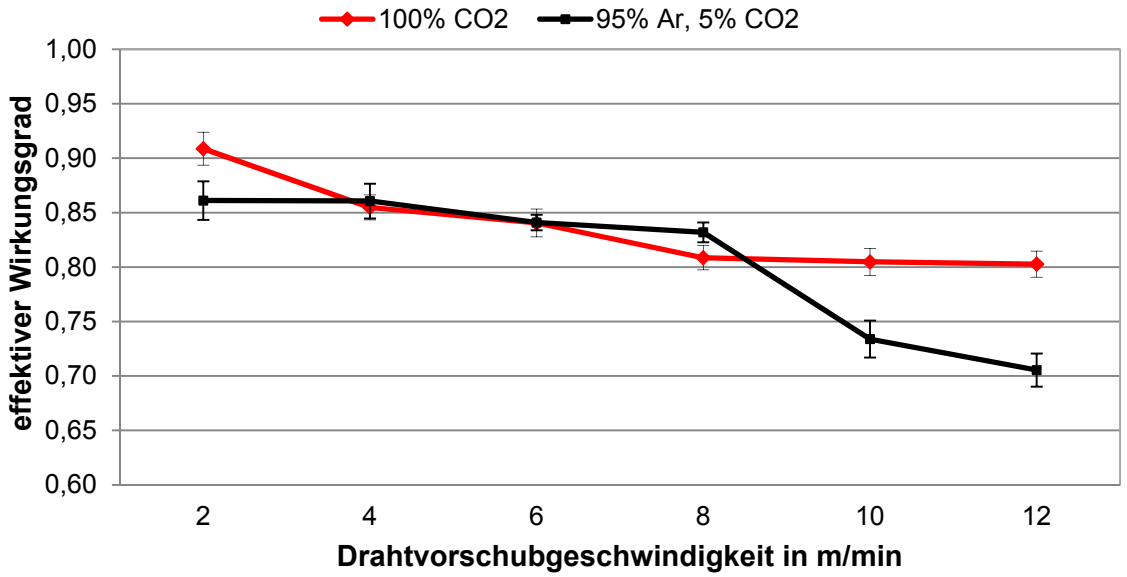


Abbildung 5-25: Einfluss der Gaszusammensetzung auf den effektiven Wirkungsgrad beim MAG-Schweißen (V_{SG} = 15 l/min, ZW: G3Si1 d = 1,2 mm, GW: S 235, Standardlichtbogen, v_S = 80 cm/min)

Am Referenzbeispiel der Drahtvorschubgeschwindigkeit v_D = 10 m/min wurde der Unterschied zwischen 5 % CO_2 und 100 % CO_2 im Schutzgas näher analysiert. Während die benötigte Schweißleistung nur leicht absinkt, nimmt die Lichtbogenmantelfläche um mehr als 160 % ab. Die Zumischung von CO_2 in den Argonlichtbogen erhöht die Stromdichte und eine kleinere Fläche der Elektrode wird vom Lichtbogen umschlossen. Ein Resultat dessen ist, dass die Erwärmung des Bauteils um durchschnittlich 15 % zunimmt. Die Tropfengröße steigt und die Tropfenablösefrequenz sinkt. Die hohe Stromdichte führt zudem zu einem konzentrierteren Lichtbogenbereich zwischen Elektrode und Werkstück. Ab einem CO_2-Gehalt von 20 %...30 % ist dieser so stark, dass der Tropfen beim Ablösen und dem freien Fall durch den Lichtbogen derart behindert wird, dass dieser exzentrisch auf die Werkstückoberfläche auftrifft [Sod08].
Dzelnitzki [Dze99] beschreibt das Verhalten CO_2-haltiger Lichtbogen folgendermaßen: Auf Grund der höheren Wärmeleitfähigkeit des Schutzgases wird mehr Wärme in den Außenbereich des Lichtbogens transportiert. Dabei bildet sich ein schmaler und heißer Lichtbogenkern mit hoher Stromdichte aus. Der Lichtbogenansatzpunkt ist tiefer und punktförmig und weist somit eine kleinere Lichtbogenlänge auf.
Untersuchungen zum Spannungsabfall im Stickout (Abschnitt 5.4 Absatz b) zeigen diesen höheren Energieumsatz bei zunehmenden CO_2-Anteil. Bei ansonsten konstanten Parametern lässt sich schlussfolgern, dass der Lichtbogen kürzer wird und die Schweißleistung sinkt. Im gleichen Maße sinken auch die Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergien des Lichtbogens. Selbst die Wärmeverluste an die Brennerkühlung der Schweißenergiequelle sinken um 40 %. Das Resultat ist eine um knapp 40 % größere Einbrandfläche, während die Einbrandtiefe unbeeinflusst bleibt. Dies geht einher mit der Erhöhung des effektiven Wirkungsgrades um durchschnittlich 3 %.

Helium

Durch die vermehrte Zumischung von Helium in das Argonschutzgas konnte der effektive Wirkungsgrad um bis zu 7 % auf η_{eff} = 0,84 gesteigert werden (Abbildung 5-26). Es ist zu beachten, dass für diese Untersuchungen Aluminiumwerkstoff verwendet wurde. Eine Ursache kann die geringere Schmelztemperatur von Aluminium sein, da eine niedrigere Lichtbogentemperatur benötigt wird. Dies hat einen positiven Einfluss auf die Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergien des Lichtbogens.

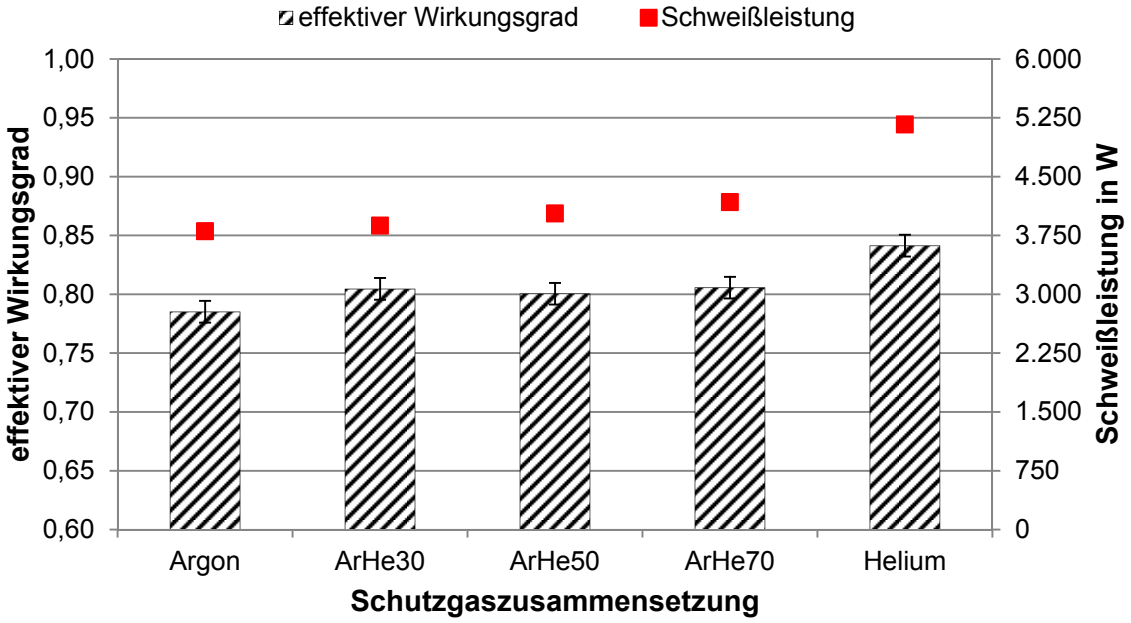
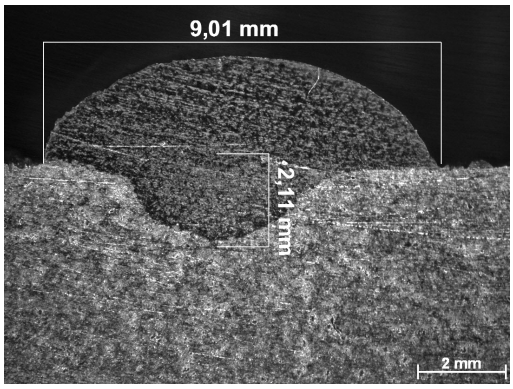
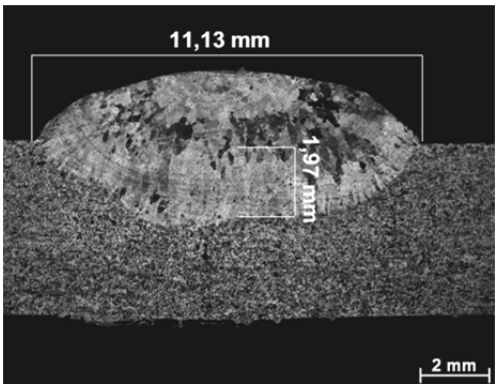


Abbildung 5-26: Einfluss der Gaszusammensetzung auf den effektiven Wirkungsgrad beim MIG-Schweißen (V_{SG} = 15 l/min, ZW: AlMg4,5 Mn d = 1,2 mm, GW: Al99,5, v_D = 10 m/min Standard, v_S = 90 cm/min)

Wie auch Untersuchungen in [Kat90] und [Ush95] zeigen, ist der Lichtbogen bis zu einem Volumengehalt von 70 % Helium argondominiert. Erst ab diesem Schwellwert steigt die Schweißspannung und folglich die Schweißleistung stark an.

Dabei wirken die gleichen positiven Einflüsse auf den Lichtbogen, wie beim WIG- oder Plasmaprozess. Helium besitzt eine bessere Wärmeleitfähigkeit, benötigt auf Grund seiner höheren Ionisationsenergie eine höhere Schweißleistung und brennt somit mit einem energieintensiveren Lichtbogen. Die Naht wird breiter und flacher, weshalb die Mantelfläche des entstehenden Schmelzbades steigt. Die höhere und großflächigere Wärmeeinbringung des heliumhaltigen Lichtbogens reduziert die Gefahr von Flankenbindefehlern. Gleichzeitig wird die Energie besser in das Bauteil übertragen und der effektive Wirkungsgrad steigt, was auch die Untersuchungen von Tusek [Tus97] beweisen. Dies wird anhand der Querschliffe in Abbildung 5-27 bestätigt. Mit zunehmendem Heliumgehalt im Schutzgas wird die Naht breiter, was die Wärmeleitung innerhalb des Werkstücks fördert. Der positive Einfluss von Helium auf den Energieeintrag und die Nahtgeometrie wird dadurch deutlich.





15 l/min 70 %Argon 30 % Helium	15 l/min 30 %Argon 70 % Helium

Abbildung 5-27: Querschliffe MIG-Schweißen (s = 18 mm, V_{SG} = 15 l/min, ZW: AlMg4,5 Mn d = 1,2 mm, GW: Al99,5, v_D = 10 m/min Standard, v_S = 90 cm/min)

e) Einfluss der Schutzgasmenge

Durch vermehrte Zuführung von Schutzgas wird, wie auch beim WIG- und Plasmaprozess, der effektive Wirkungsgrad gesteigert. Im Leistungsbereich des sich einstellenden Sprühlichtbogens wurde die Gasdurchflussmenge von V_{SG} = 10 l/min auf V_{SG} = 20 l/min erhöht und eine Zunahme des effektiven Wirkungsgrades um knapp 3 % verzeichnet.
Die zusätzliche Menge an Schutzgas lässt die Strömungsgeschwindigkeit steigen, weshalb die vermehrte Bewegung des Schutzgases einen besseren Wärmetransport von der Elektrode zum Werkstück ermöglicht. Gleichzeitig steigt der Staudruck des Lichtbogens auf den Grundwerkstoff. Das kann die Ursache sein, dass mehr Energie in das Werkstück eingebracht wird, was den effektiven Wirkungsgrad erhöht.

f) Einfluss der Schweißgeschwindigkeit

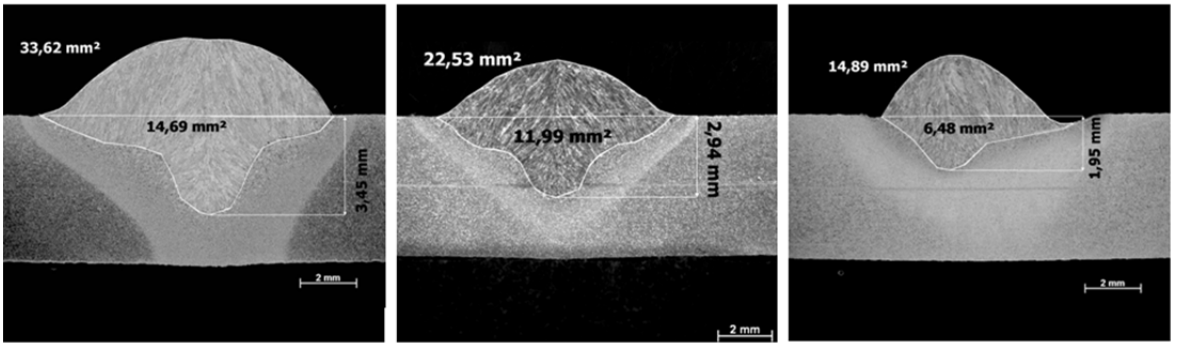
Die Untersuchungen des effektiven Wirkungsgrades in Abhängigkeit zur Schweißgeschwindigkeit zeigen einen unveränderten Wert von η_{eff} = 0,71, bei einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von v_D = 10 m/min. Der Energieeintrag in das Bauteil änderte sich jedoch proportional zur Schweißgeschwindigkeit. Dabei blieb die erforderliche Schweißleistung konstant.

Tabelle 5-1: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Nahtgeometrie beim MSG-Schweißen (Parameter siehe Abbildung 5-28)

Schweißgeschwindigkeit in m/min	**Einbrandtiefe** in mm	**Nahtbreite** in mm	**Einbrandfläche** in mm²	**Schmelzwirkungsgrad**
60	3,45	10,42	14,69	0,55
100	2,94	9,25	11,99	0,62
140	1,95	6,71	6,48	0,54

Die Querschliffe der Schweißnähte beweisen, dass die Naht- bzw. Einbrandfläche mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit (Tabelle 5-1) sinkt, was auch Matthes [Mat06, S.199] bestätigt. Das Optimum befindet sich zwischen zu hoher und zu geringer Schweißgeschwindigkeit (Abbildung 5-28). Allgemein reduziert eine hohe Schweißgeschwindigkeit die Streckenenergie, weshalb zunehmend weniger Energie zur Bildung der Schmelze eingebracht wird. Am größten ist aber der Einfluss einer geringen Schweißgeschwindigkeit, da hierbei das Schmelzbad vorläuft und der Lichtbogen nicht auf festem sondern auf flüssigem Metall, welches eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit

besitzt, brennt [Mat06] [Pro76]. Diese Aussagen bestätigt auch die Analyse des Schmelzwirkungsgrades. Das Optimum der verwendeten Konfiguration scheint bei v_S = 100 cm/min zu liegen. Immerhin können bei dieser Schweißgeschwindigkeit 62 % (η_{Schm} = 0,62), der in das Bauteil integrierten Wärme, zur Ausbildung der Schmelze genutzt werden. [Chi00] berechnete beim Laserstrahlschweißen ein theoretisches Maximum des Schmelzwirkungsgrades von η_{Schm} = 0,48. Die Konsequenz ist, dass der Energieeintrag in das Bauteil mit abschmelzender Elektrode als effektiver zu bewerten ist. Als grundlegende Differenz ist festzuhalten, dass der Energieeintrag beim Laserschweißen auf Grund von hochenergetischen, elektromagnetischen Wellen (Licht) und beim Schutzgasschweißen auf Basis des elektrischen Stromflusses erfolgt. Das kann die Ursache für die höheren Schmelzwirkungsgrade beim Lichtbogenschweißen mit abschmelzender Elektrode sein.



v_S = 60 cm/min	v_S = 100 cm/min	v_S = 140 cm/min

Abbildung 5-28: Querschliffe MAG-Schweißen mit steigender Schweißgeschwindigkeit (s = 18 mm, V_{SG} = 15 l/min 95%Ar 5%CO_2, ZW: G3Si1 d = 1,2 mm, GW: S235, v_D = 10 m/min Standard)

g) Einfluss des Grund- und Zusatzwerkstoffs

Stahlwerkstoff

Die kalorimetrischen Untersuchungen des Wärmeeintrages in das Bauteil zeigten keine nennenswerten Differenzen zwischen der Verwendung von unlegiertem Baustahl und austenitschem Werkstoff. Die Unterschiede zwischen beiden Werkstoffen befinden sich im Bereich der Standardabweichung.

Der Werkstoff hat hingegen einen Einfluss auf den Schmelzwirkungsgrad (Abbildung 5-29). In dieser Versuchsreihe wurde der Grundwerkstoff variiert, während der Zusatzwerkstoff eine Standardstahlelektrode (G3Si1) ist. Allgemein ist der Schmelzwirkungsgrad beider aufgeschmolzenen Grundwerkstoffe auf gleichem Niveau. Jedoch wird anteilig gesehen 25 % mehr Grundwerkstoff aufgeschmolzen, wenn austenitischer Werkstoff verwendet wird. Auf Grund der etwa Dreifach geringeren Wärmeleitfähigkeit des Austenits (1.4301) wird die Wärmeleitung innerhalb des Grundwerkstoffs reduziert [Fue91]. Dadurch kann ein größerer Anteil der eingebrachten Schweißleistung zur Schmelzebildung beitragen. Gleichzeitig ist die Schmelztemperatur des austenitischen Werkstoffs etwa ΔT_{Schm} = 60 K geringer, die Wärmekapazität um etwa Δc_{Wst} = 0,05 J/(g*K) kleiner sowie der spezifische elektrische Widerstand um Faktor Vier höher. Diese Werkstoffeigenschaften stehen gegenseitig in Wechselwirkung, wobei die genauen Zusammenhänge nicht eindeutig quantifizierbar sind. Dies wurde auch bei der Auswertung der Abkühlzeiten $t_{8/5}$ der geschweißten Bauteile deutlich. Durch die Verwendung von austenitischen Grundwerkstoff, anstatt unlegiertem Baustahl stieg die Abkühlzeit von $t_{8/5}$ = 7,56 s um gut 20 % auf $t_{8/5}$ = 9,51 s an. Die Streckenenergie wurde hierfür konstant gehalten.

Dieses Beispiel beweist, dass die Wärme länger in der Schweißzone verweilt. Die Menge an insgesamt eingebrachter Energie in das Bauteil bleibt jedoch unbeeinflusst.

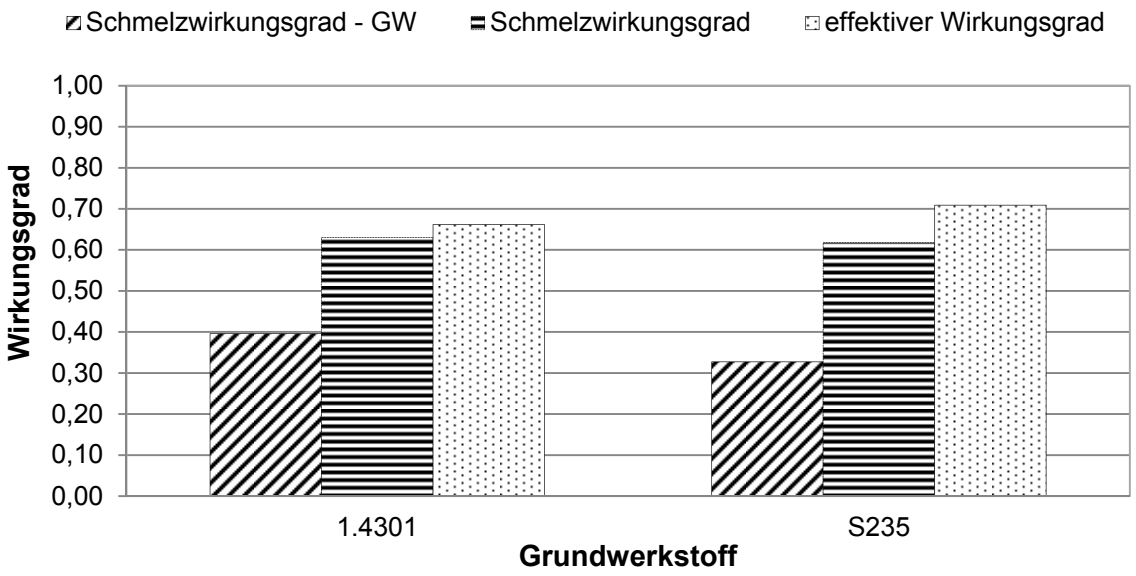


Abbildung 5-29: Einfluss des Grundwerkstoffs auf den Wirkungsgrad beim MAG-Schweißen (V_{SG} = 15 l/min 95%Ar 5%CO_2, ZW: G3Si1 d = 1,2 mm, v_D = 10 m/min Standard, s = 18 mm, v_S = 80 cm/min)

Aluminiumwerkstoff

Allgemein ist der effektive Wirkungsgrad beim Schweißen mit Aluminiumzusatzwerkstoff etwa sieben Prozent höher, als mit Stahlwerkstoff (Abbildung 5-30). Ursache hierfür sind unter anderem die um mehr als das Vierfache höhere Wärmeleitung von Aluminium und die um mehr als die Hälfte geringere Schmelztemperatur, verglichen mit Stahl.

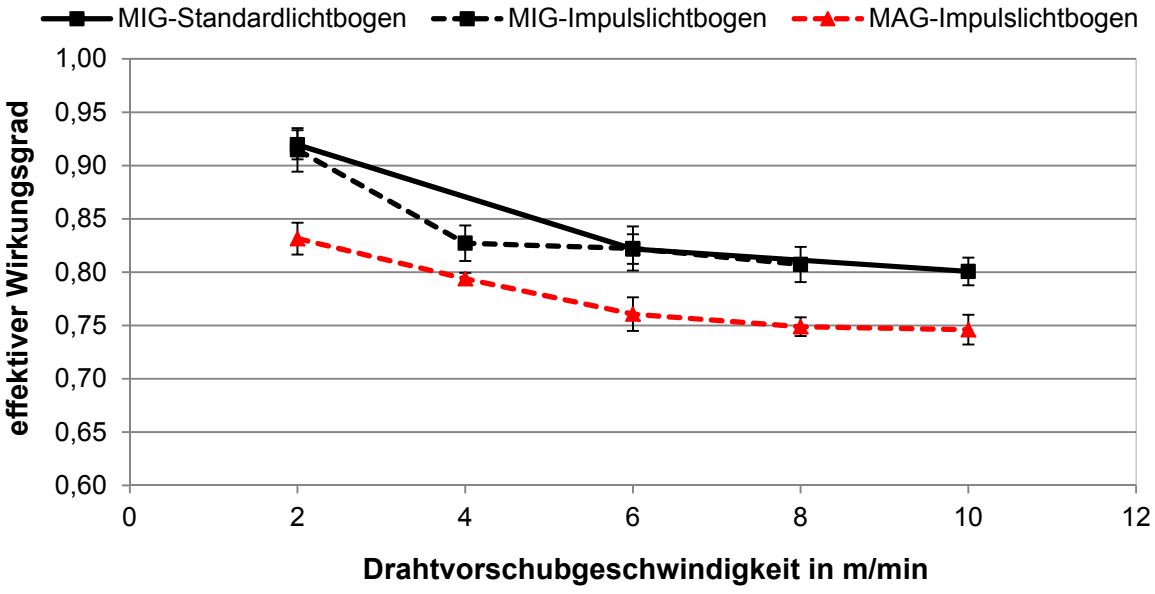


Abbildung 5-30: Einfluss des Drahtvorschubs auf den effektiven Wirkungsgrad beim MAG- und MIG-Schweißen (V_{SG} = 15 l/min MAG: 95%Ar 5%CO_2, MIG: 100 % Ar; ZW: d = 1,2 mm MAG: G3Si1, MIG: AlMg5; GW: MAG: S235, MIG: Al99,5; v_S = 40…80 cm/min; s = 18 mm)

Die benötigte Schweißleistung, um die gleiche Drahtvorschubgeschwindigkeit zu realisieren, ist beim MAG-Stahlschweißen mehr als doppelt so hoch als die beim MIG-Aluminiumschweißen (Abbildung 5-31). Dabei ist die Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergie des Lichtbogens bei der Verwendung von Stahlwerkstoff 50 % höher, als bei Aluminium. Gleichzeitig ist die Lichtbogenmantelfläche bei Stahl um 30 % kleiner, was unter anderem auf die höhere Energiedichte des aktivgashaltigen Schutzgases zurückzuführen ist. Eine geringere Lichtbogentemperatur beim MIG-Aluminiumschweißen ist dadurch zu erwarten.
Zudem wird die eingebrachte Energie schneller im Aluminiumgrundwerkstoff verteilt, was den Schmelzwirkungsgrad der Aluminiumschweißverbindungen senkt. Während beim Stahlwerkstoff 37 % (v_D = 6 m/min) der eingebrachten Schweißwärme für die Schmelzebildung genutzt werden, beträgt der Schmelzwirkungsgrad beim Aluminiumschweißen nur 19 % (v_D = 6 m/min).

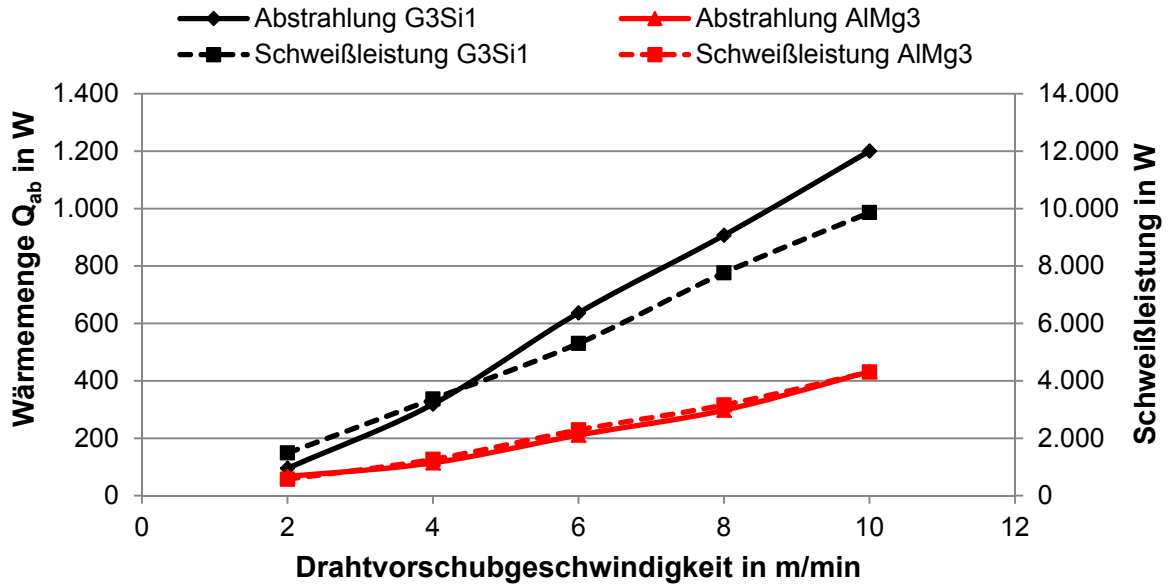


Abbildung 5-31: Einfluss des Werkstoffs auf die Abstrahlungsenergie und die Schweißleistung beim MAG- und MIG-Schweißen (V_{SG} = 15 l/min MAG: 95%Ar 5%CO_2, MIG: 100 % Ar; ZW: d = 1,2 mm MAG: G3Si1, MIG: AlMg3; GW: MAG: S235, MIG: Al99,5; v_S = 40…80 cm/min; s = 15 mm)

h) Verwendung wärmeminimierter Schweißverfahren

Innerhalb dieser Betrachtungen wurden folgende wärmeminimierten Schweißverfahren:

- CMT des Herstellers Fronius
- ColdArc des Herstellers EWM
- Impulslöten bzw. -schweißen
- MIG-AC-Schweißen bzw. Löten

anhand definierter Randbedingungen untersucht und verglichen. Es wurde sowohl die Drahtvorschubgeschwindigkeit zwischen v_D = 2 m/min und v_D = 8 m/min variiert als auch der Zusatzwerkstoff verändert. Untersucht wurden die Zusatzwerkstoffe CuSi3, G199 LSi, AlSi5 und AlMg5 mit einem Drahtdurchmesser von d = 1,0 mm. Hierfür wurden die Standardkennlinien der jeweiligen Hersteller verwendet, ein konstanter Brennerabstand von s = 15 mm eingestellt und V = 15 l/min Schutzgas eingesetzt.

Beispielhaft wird ein Vergleich der vier wärmeminimierten Schweißverfahren mit den Zusatzwerkstoffen CuSi3 und AlMg5 angeführt. Zusätzlich wird der Energieeintrag in das Kalorimetermedium beim Stahlzusatzwerkstoff G3Si1 (d = 1,2 mm) mit dem Standard-, Impuls- und CMT-Schweißprozess verglichen.

CuSi3 Zusatzwerkstoff

Der effektive Wirkungsgrad sinkt mit steigender Drahtvorschubgeschwindigkeit (Abbildung 5-32). Dieses Verhalten wurde auch schon beim Standard-MSG-Prozess deutlich. Die Differenz zwischen Maximalwert und Minimalwert des effektiven Wirkungsgrades beträgt bei (Bereich zwischen v_D = 2 m/min und v_D = 8 m/min):

- CMT 14 % (η_{eff} = 0,93 zu η_{eff} = 0,79)
- ColdArc 8 % (η_{eff} = 0,89 zu η_{eff} = 0,81)
- Impulslöten 15 % (η_{eff} = 0,90 zu η_{eff} = 0,75)
- MIG-AC-Löten 8 % (η_{eff} = 0,76 zu η_{eff} = 0,68)

Der Unterschied der maximalen effektiven Wirkungsgrade ist auf den teilweise ungleichmäßigen bzw. unsauberen Prozessverlauf im unteren Leistungsbereich zurückzuführen. Makroskopische Aufnahmen der Schweißnähte im unteren Leistungsbereich zeigten an den Außenkanten und im Saumbereich einen zum Teil ungleichmäßigen Verlauf, was eine unterschiedliche Wärmeeinbringung in das Bauteil zeigt.
Laut Kruscha [IIM12] ist die Erwärmung des Bauteils auf elektrische und thermische Vorgänge in der Kathodenrandschicht zurückzuführen. Da beim Wechselstromschweißen bzw. AC-Löten ständig die Elektrodenpolung und somit der Energiefluss vom und zum Bauteil verändert wird, kann dadurch der anteilig geringere Wärmeeintrag in das Kalorimetermedium begründet werden.

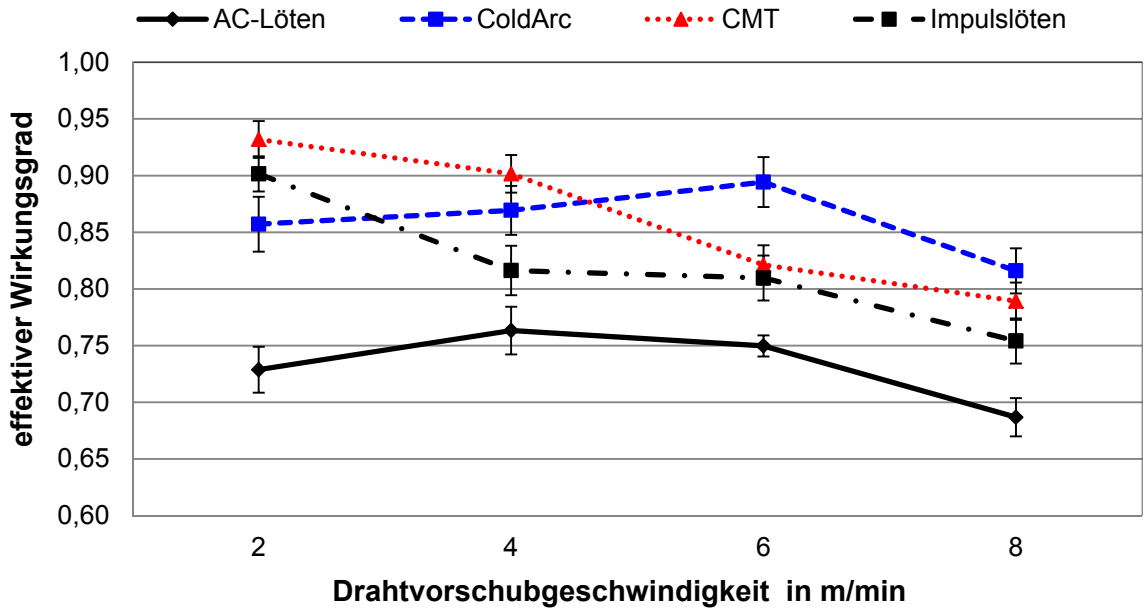


Abbildung 5-32: Einfluss wärmeminimierter MSG-Verfahren auf den effektiven Wirkungsgrad bei CuSi3 Zusatzwerkstoff (V_{SG} = 15 l/min Ar, GW: S235, v_S = 30…60 cm/min)

Der effektive Wirkungsgrad ist aber eine oberflächliche Vergleichsgröße, wenn der reale Wärmeeintrag in das Bauteil von Interesse ist. Dieser ist immer in Relation zur Schweißleistung zu betrachten. In Tabelle 5-2 wird gezeigt, dass die durchschnittlichen effektiven Wirkungsgrade des Impulsprozesses, des ColdArc- und des CMT-Prozesses nur um 4 % voneinander abweichen. Im Gegensatz dazu ist der Wärmeeintrag in das

Bauteil um 30 % geringer, wenn z.B. der ColdArc- Prozess verwendet wird. Weiterhin kann im Vergleich zum Impulsschweißprozess der Wärmeeintrag mehr als halbiert werden, wenn der CMT-Prozess mit seiner in der Kurzschlussphase reversierenden Drahtbewegung eingesetzt wird. Dabei ist zu erwähnen, dass bei allen Verfahren das gleiche Volumen an Zusatzwerkstoff geschmolzen wurde. Unterscheidungen werden anhand der Schweißnahtgeometrie, dem Benetzungswinkel der Schmelze und dem Anteil an aufgeschmolzenem Grundwerkstoff deutlich.
Dieses Beispiel zeigt, dass nicht allein ein hoher effektiver Wirkungsgrad des Prozesses anzustreben ist, sondern dass zu gleichen Teilen die notwendige Schweißleistung zur Realisierung der Schweißaufgabe angepasst bzw. zumindest beachtet werden sollte.

Tabelle 5-2: Vergleich wärmeminimierter MSG-Schweißprozesse bei CuSi3 Zusatzwerkstoff (V_{SG} = 15 l/min Ar, GW: S235)

Verfahren	Drahtvorschub in m/min	Schweißgeschw. in cm/min	Temperaturdifferenz in K	effektiver Wirkungsgrad	Schweißleistung in W
Impuls-	2	20	2,35	0,90	820
lichtbogen	4	30	3,10	0,82	1940
	6	40	3,80	0,81	3320
	8	50	3,90	0,75	4520
		Durchschnitt:	**3,29**	**0,82**	**2650**
ColdArc	2	20	1,45	0,89	490
	4	30	2,41	0,87	1230
	6	40	2,89	0,86	1520
	8	50	3,33	0,82	2980
		Durchschnitt:	**2,52**	**0,86**	**1555**
CMT	2	20	1,00	0,93	310
	4	30	1,35	0,90	660
	6	40	1,90	0,82	1480
	8	50	2,00	0,79	2000
		Durchschnitt:	**1,56**	**0,86**	**1113**

AlMg5 Zusatzwerkstoff
Auch beim Aluminiumzusatzwerkstoff sinkt der effektive Wirkungsgrad mit steigender Drahtvorschubgeschwindigkeit ab. Die Differenz zwischen Maximalwert und Minimalwert des effektiven Wirkungsgrades beträgt im Bereich zwischen v_D = 2 m/min und v_D = 8 m/min:

- CMT 19 % (η_{eff} = 0,96 zu η_{eff} = 0,77)
- ColdArc 14 % (η_{eff} = 0,96 zu η_{eff} = 0,82)
- Impulsschweißen 16 % (η_{eff} = 0,91 zu η_{eff} = 0,75)
- MIG-AC-Schweißen 8 % (η_{eff} = 0,85 zu η_{eff} = 0,77)

Minimalwerte wurden bei einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von v_D = 8 m/min erzielt, während die Maximalwerte bei v_D = 2 m/min erreicht wurden. Im Vergleich zum Zusatzwerkstoff CuSi3 war der Schweißprozess in allen Leistungsbereichen gleichmäßiger, was auch am regelmäßigeren Verlauf des Wirkungsgrades im Diagramm zu erkennen ist (Abbildung 5-33).
Allgemein ist der effektive Wirkungsgrad beim Schweißen mit Aluminiumzusatzwerkstoff etwas höher. Die Wärmeleitung von Aluminium ist hoch und die Schmelztemperatur relativ gering. Dadurch sinken die Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergien des Lichtbogens und die benötigte Schweißleistung erheblich. Gleichzeitig wird die eingebrachte Energie schnell im Bauteil verteilt.

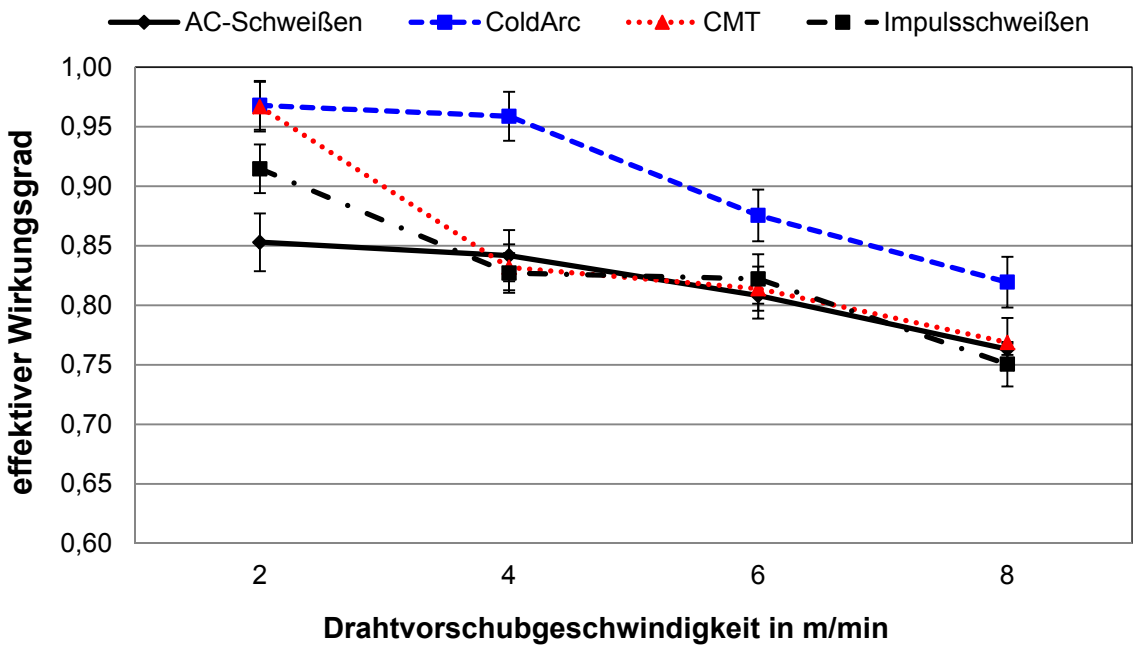


Abbildung 5-33: Einfluss wärmeminimierter MSG-Verfahren auf den effektiven Wirkungsgrad bei AlMg5 Zusatzwerkstoff (V_{SG} = 15 l/min Ar, GW: Al99,5, v_S = 30…60 cm/min)

G3Si1 Zusatzwerkstoff

Innerhalb dieser Versuchsreihe wurde der reale Energieeintrag in das Kalorimetermedium bei verschiedenen MSG-Lichtbogenschweißprozessen analysiert (Abbildung 5-34). Im untersten Schweißleistungsbereich ist der reale Energieeintrag in das Kalorimetermedium beim Standardprozess am geringsten. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass bei v_D = 2 m/min sehr viele Kurzschlüsse auftreten, wo ein direkter Energiefluss von der Drahtelektrode zum Grundwerkstoff stattfindet und der Zusatzwerkstoff effektiv abgeschmolzen wird. Beim CMT- bzw. Impulsprozess werden Kurzschlüsse gezielt reduziert bzw. vermieden, weshalb der Anteil des Energieeintrages in das Bauteil durch den Lichtbogen höher ist. Wird die Drahtvorschubgeschwindigkeit weiter erhöht, erfolgt die Gruppierung der Fügeverfahren nach der Menge des Energieeintrages in das Bauteil folgendermaßen (von hoch zu tief): Standardprozess, Impulsprozess und CMT-Prozess. Während bei v_D = 4 m/min die Spanne 8 % beträgt, steigt der Unterschied im Wärmeeintrag bei v_D = 10 m/min auf knapp 25 % an, um die gleiche Abschmelzleistung zu realisieren.

Der Schmelzwirkungsgrad steigt dabei mit zunehmender Drahtvorschubgeschwindigkeit an. Die Erhöhung zwischen v_D = 2…10 m/min beim Standardprozess beträgt etwa 10 %, beim Impuls- und CMT-Prozess etwa 30 %. Der Schmelzwirkungsgrad des Standard MSG-Prozesses ist mindestens 5 % höher, als der der geregelten MSG-Prozesse.

Die Ergebnisse beweisen, wie auch schon beim Zusatzwerkstoff CuSi3 (Tabelle 5-2), dass der Energieeintrag in das Bauteil merklich gesenkt werden kann, wenn geregelte MSG-Lichtbogenprozesse verwendet werden.

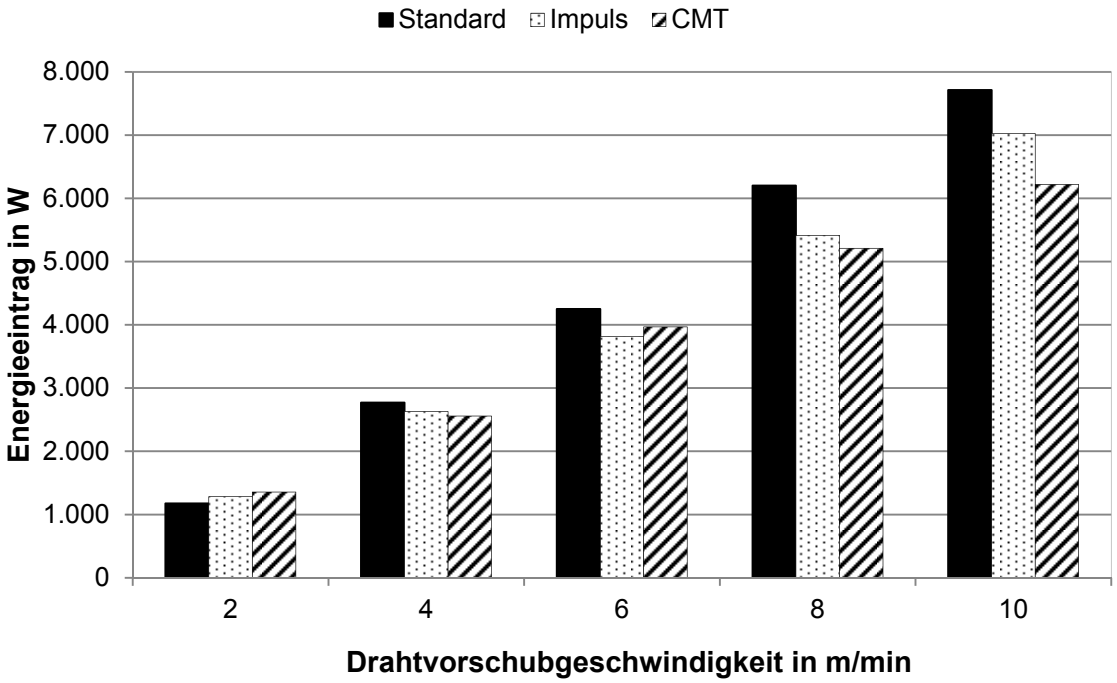


Abbildung 5-34: Einfluss wärmeminimierter MSG-Verfahren auf den Energieeintrag in das Bauteil bei G3Si1 Zusatzwerkstoff (V_{SG} = 15 l/min 95 %Ar 5 %CO_2, GW: S235, v_S = 30…80 cm/min)

5.2.2 Vergleich beider Kalorimetertypen

Um die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit des schrägen und ebenen Kalorimeters zu analysieren, wurden mit beiden Typen gleiche MSG Schweißungen durchgeführt. Hierfür wurden die unter Abschnitt 4.7 Absatz c) beschriebenen Referenzwerte für den Stahlwerkstoff verwendet. Auf Grund des knapp Dreifach größeren Wasservolumens sowie der größeren Masse des Grundwerkstoffs und der Einbauteile beim ebenen Kalorimeter, wurde die Schweißgeschwindigkeit von v_S = 60 cm/min auf v_S = 20 cm/min angepasst. Die umfangreichen Schweißungen mit dem Referenzparameter mit dem ebenen Kalorimeter wurde ein effektiver Wirkungsgrad von η_{eff} = 0,73 ermittelt. Beim schrägen Kalorimetertyp beträgt der effektive Wirkungsgrad η_{eff} = 0,71. Die Untersuchungen zeigen, dass die Ergebnisse im Rahmen der Standardabweichung liegen und miteinander vergleichbar sind. Der Nachweis, dass beide Kalorimetertypen vergleichbare Messergebnisse liefern ist somit erbracht.

5.2.3 Unterpulverschweißen

Diese Untersuchungen wurden mit einer Schweißenergiequelle des Typs ESAB LAE 1250 durchgeführt. Das Handling des Schweißbrenners wurde mit einem Drei-Achs-Portal realisiert. Die Bestimmung des Energieeintrages in das Bauteil wurde mit dem hierfür entwickelten, ebenen Differenz-Temperatur-Kalorimeter (Abschnitt 4.4 Absatz b) durchgeführt.

a) Einfluss des Schweißpulvertyps

Die durchgeführten Schweißversuche zeigen einen starken Einfluss des Schweißpulvertyps auf den Energieeintrag in das Bauteil. Gleichzeitig ist die Schweißleistung, trotz konstanter Schweißspannung und Drahtvorschubgeschwindigkeit, nicht auf gleichem Niveau. Der Energieumsatz ist folglich abhängig vom Schweißpulvertyp, unter der Bedingung, dass die Schlackenmasse konstant bleibt. Der höchste effektive Wirkungsgrad ist beim Aluminat Rutilen Pulvertyp mit $\eta_{eff} = 0{,}97$ zu verzeichnen, der geringste effektive Wirkungsgrad beim Aluminat Fluoriden Pulvertyp $\eta_{eff} = 0{,}90$ (Abbildung 5-35). Laut [Bec66] und [And68] bewirkt ein hoher MnO-Gehalt im Schweißpulver eine Erhöhung des Wirkungsgrades von $\eta = 0{,}77$ auf $\eta = 0{,}85$. Dieses Verhalten kann auf die exotherme Reaktion des Schweißpulvers zurückgeführt werden. Neben dem Zubrand von Mangan aus dem Schweißpulver in das Schweißgut, ist auch der Zubrand von Silizium verantwortlich für eine exotherme Reaktion des Schweißpulvers [DIN12]. Um diese zu analysieren wurde das Verfahren der Dynamischen Wärmestromdifferenzkalorimetrie (DSC) verwendet. Dabei wird die Enthalpie der Probe in Abhängigkeit der Temperatur untersucht.

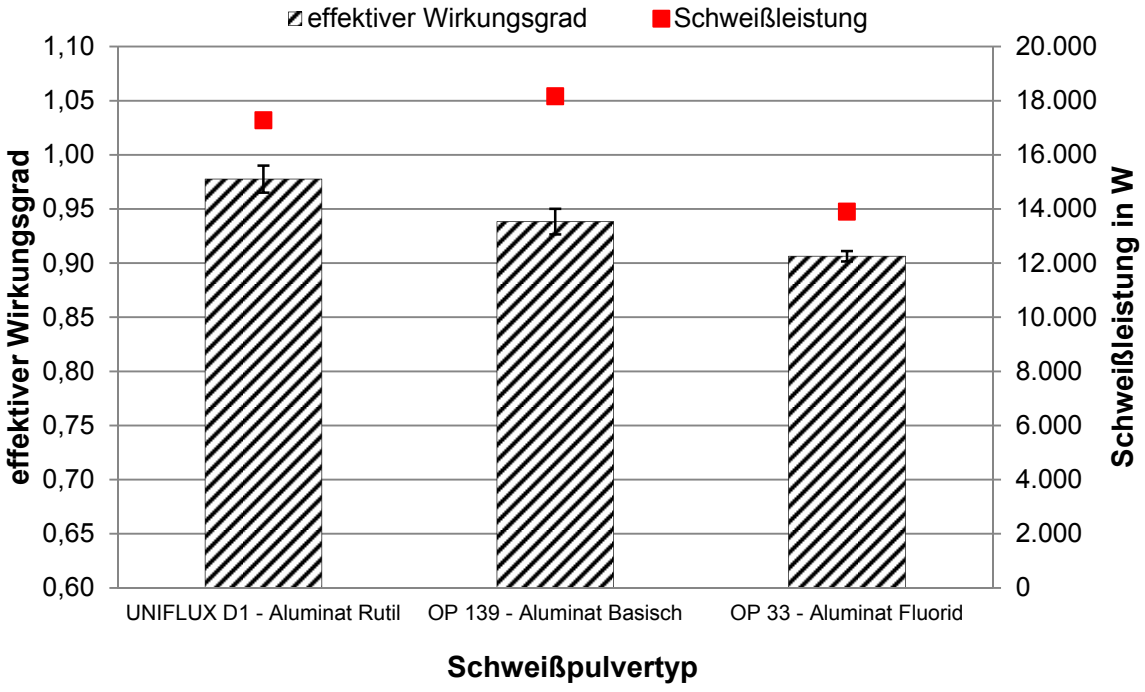


Abbildung 5-35: Einfluss des Schweißpulvertyps auf den Wirkungsgrad beim Unterpulverschweißen (U_S = 34 V, Konstantspannungskennlinie, s = 30 mm, v_D = 1,5 m/min, ZW: EN 14171 S2 d=3,0mm bzw. EN ISO 14343-A S 22 93 NL d=3,2mm, GW: S235, v_S = 50 cm/min)

Die DSC-Untersuchungen zeigen, dass das Schweißpulver mit dem geringsten Anteil an MnO und SiO_2 die meiste Energie benötigt (Tabelle 5-3), um die Phasen- und Eigenschaftsänderung bei der kontinuierlichen Erwärmung zu erzielen. Die Analysen verdeutlichen, dass teilweise starke exotherme Reaktionen bei hohen MnO, Al_2O_3 und SiO_2 -Gehalten auftreten und somit die Phasenumwandlung beim kontinuierlichen Erwärmen des Schweißpulvers erleichtern. Aus diesem Grund steigt der Energieeintrag in das Bauteil an, was gleichzeitig den effektiven Wirkungsgrad erhöht. Die Differenz zwischen dem Aluminat Rutilen- und dem Aluminat Fluoriden Schweißpulver beträgt $\Delta\eta_{eff} = 7$ %. Da dieser Anteil unter anderem auf die exotherme Reaktion des Schweißpulvers [Qui03] zurückzuführen ist, wurde dieser Betrag von den weiteren untersuchten Schweißparametern subtrahiert. Somit werden die Untersuchungen mit sich neutral verhaltenden Schweißpulver nachträglich simuliert und ausgewertet.

Tabelle 5-3: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Schweißpulver sowie der Anteil von Silizium und Mangan im Schweißgut (DIN EN ISO 14174 [DIN12])

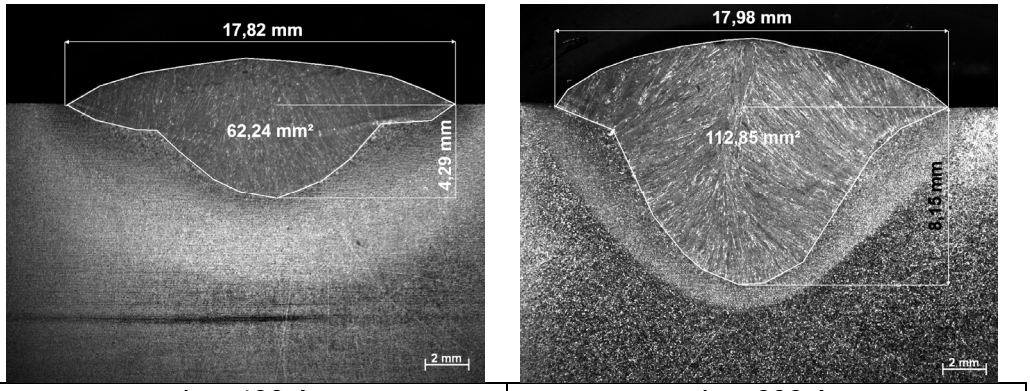
Legierungselement	prozentualer Anteil **Aluminat Rutil** EN 760: SA AR 1 **97** AC	 **Aluminat Basisch** EN 760: SA AB 1**68** AC H5	 **Aluminat Fluorid** EN 760: SA AF 2 **54** DC
Al_2O_3 + MnO	55%	30%	15%
CaO + MgO		25%	
SiO_2 + TiO_2	30%	20%	10%
CaF_2	5%	20%	50%
Anteil durch Pulver im Schweißgut			
Silizium	Zubrand >0,7%	Zubrand 0,1…0,3%	neutral
Mangan	Zubrand 0,3…0,5%	Zubrand 0,5…0,7%	Abbrand 0,1…0,3%

Die Analyse der Schmelzwirkungsgrade zeigte, dass die zusätzliche exotherme Energiemenge des Schweißpulvers nicht zur Bildung des Schmelzbades zur Verfügung steht. Auf Grund der Wärmeleitung trägt dieser Energieanteil dennoch zur Erwärmung des Bauteils und somit des Kalorimetermediums bei.
Beim Unterpulverschweißen mit Aluminat Rutilem Pulvertyp werden 38 % ($\eta_{Schm} = 0{,}38$) der effektiv zugeführten Schweißleistung zur Schmelzebildung verwendet. Beim Aluminat Basischen Fülltyp beträgt der Schmelzwirkungsgrad $\eta_{Schm} = 0{,}49$. Wird der Aluminat Fluoride Pulvertyp mit austenitischem Grund- und Zusatzwerkstoff verwendet, beträgt der Schmelzanteil bezogen auf die eingebrachte Schweißenergie $\eta_{Schm} = 0{,}52$. Der höhere spezifische elektrische Widerstand des austenitischen Werkstoffs, bewirkt einen größeren Spannungsabfall im freien Drahtende und hat eine stärkere Erwärmung zur Folge. Gleichzeitig ist die Wärmeleitfähigkeit des austenitischen Grundwerkstoffes geringer, als die des un- bzw. niedriglegierten Werkstoffs. Dadurch wird die eingebrachte Wärme schlechter im Bauteil verteilt. Konsequenz daraus ist, dass mit weniger Schweißleistung gleichviel oder mehr Schweißgut erzeugt wird. Dies wirkt sich positiv auf den Schmelzwirkungsgrad aus.

b) Einfluss der Schweißstromstärke

Für diese Untersuchungen wurde die Schweißstromstärke schrittweise von $I_S = 400$ A auf $I_S = 600$ A gesteigert. Gleichzeitig nahm die Drahtvorschubgeschwindigkeit von $v_D = 1{,}2$ m/min auf $v_D = 1{,}8$ m/min zu. In Folge dessen stieg der effektive Wirkungsgrad minimal von $\eta_{eff} = 0{,}92$ ($I_S = 400$ A) auf $\eta_{eff} = 0{,}94$ ($I_S = 600$ A). Dieser Verlauf deckt sich mit den Analysen von [Bec66] und [And68].
Die verwendete Schweißenergiequelle kann entweder mit einer Konstantstrom- oder Konstantspannungskennlinie verwendet werden. Innerhalb dieser Versuchsreihe wurde die Schweißspannung konstant gehalten ($U_S = 32$ V), um die Schweißstromstärke definiert zu verändern. In Folge dessen verkleinert sich die entstehende Schweißkaverne, da die Lichtbogenlänge sinkt, weshalb die Energieübertragung zum Bauteil verbessert

wird. Eine Bestätigung dieser Aussage liefert unteranderem das um circa 12 % reduzierte Schlackenvolumen. Gleichzeitig steigt das Schweißnahtvolumen stark an, die Einbrandtiefe verdoppelt sich, während die Schweißnahtbreite weitgehend unverändert bleibt (Abbildung 5-36). In Folge dessen nahm der Schmelzwirkungsgrad von η_{Schm} = 0,40 (I_S = 400 A) auf η_{Schm} = 0,53 (I_S = 600 A) zu, wobei mindestens 80 % der umgesetzten Energie zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffs verwendet wird. Die Konsequenz ist ein hoher Aufmischungsgrad. Diese Angaben decken sich mit den Untersuchungen von [Cha90] und [Tus99]. Hauptgrund für den größeren Einbrand ist zudem die höhere Streckenenergie, da bei unveränderter Schweißgeschwindigkeit die Schweißstromstärke erhöht wurde. Der Anteil des Schmelzwirkungsgrades des Zusatzwerkstoffs bleibt bei steigendem Energieeintrag relativ unverändert. Dieser Sachverhalt wiederspricht den Erkenntnissen in [She12]. Die Autoren stellten fest, dass bei steigender Schweißstromstärke der Schmelzwirkungsgrad des Zusatzwerkstoffs steigt und der des Grundwerkstoffs unverändert bleibt. Diese Aussage in [She12] wiederspricht den Analysen der Querschliffe in Abbildung 5-36. Abgesehen von der Aufteilung der Schmelzwirkungsgrade von Grund- und Zusatzwerkstoff, stimmen die Dimension und der Trend des gesamten Schmelzwirkungsgrades von Shen [She12] mit den eigenen Ergebnissen überein.
Offen ist, ob die Erhöhung des effektiven Wirkungsgrades auf die erhöhte Schweißstromstärke oder auf die verkleinerte Schweißkaverne (kürzerer Lichtbogen) zurückzuführen ist. Dieser Sachverhalt wird im nächsten Absatz diskutiert.



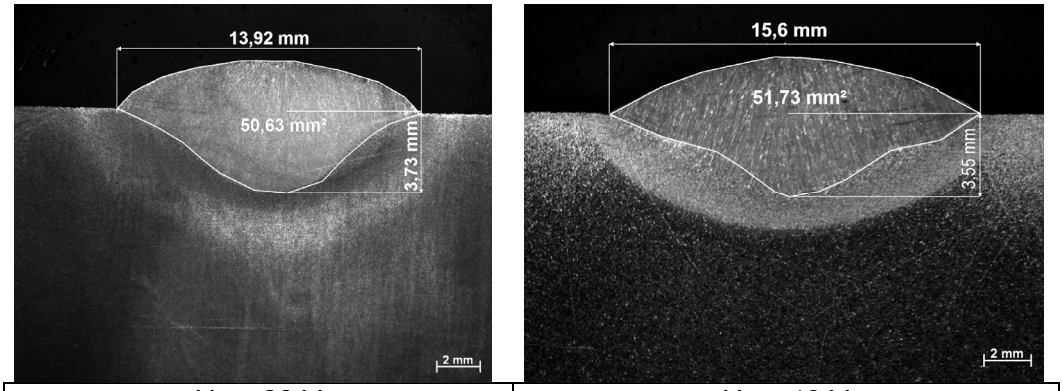
I_S = 400 A	I_S = 600 A

Abbildung 5-36: Querschliffe von Unterpulverschweißnähten mit veränderter Schweißstromstärke (Konstantspannungskennlinie U_S = 32 V, s = 30 mm, v_D = 1,5 m/min, ZW: EN 14171 S2 d=3,0mm, Schweißpulvertyp: Aluminat Rutil, *GW: S235, v_S = 50 cm/min)*

c) Einfluss der Schweißspannung

Für diese Untersuchung wurde die Konstantstromkennlinie der Schweißenergiequelle verwendet. Die eingestellte Schweißstromstärke beträgt I_S = 400 A. Steigt die Schweißspannung von U_S = 28 V auf U_S = 40 V, sinkt der effektive Wirkungsgrad von η_{eff} = 0,94 auf η_{eff} = 0,87 kontinuierlich ab. Dabei nehmen die Größe der Schweißkaverne und die Lichtbogenlänge zu. Ein Beweis dafür ist die erhöhte Schlackenmasse um knapp 40 %. Dieser Verlauf stimmt mit den Untersuchungen von Becker [Bec66] überein.
Die Analyse der Querschliffe zeigt (Abbildung 5-37), dass die Schweißnahtbreite mit steigender Schweißspannung zunimmt, während die Einschweißtiefe sinkt. Gleichzeitig wird eine 70 % höhere Schweißleistung benötigt. Jedoch nimmt die Schweißnahtfläche nur minimal zu. Das ist auch der Grund, weshalb der Schmelzwirkungsgrad von η_{Schm} = 0,44 auf η_{Schm} = 0,28 sinkt.

Folglich wird die Anpassung der Schweißspannung dazu genutzt, um bei der Füllung von Schweißnähten die Schweißnahtbreite in gewissen Grenzen anpassen zu können [Kil91]. Andererseits wird in [Cha90] behauptet, dass der Schmelzwirkungsgrad mit steigender Schweißspannung steigt, was im Wiederspruch zu den eigenen Untersuchungen steht. Als Resultat ist festzuhalten, dass die Schweißspannung auch beim Unterpulverschweißen geringstmöglich gewählt werden sollte, um eine effektive Energieübertragung zum Grundwerkstoff zu gewährleisten.



U_S = 28 V	U_S = 40 V

Abbildung 5-37: Querschliffe von Unterpulverschweißnähten mit veränderter Schweißspannung (Konstantstromkennlinie I_S = 400 A, s = 30 mm, v_D = 1,5 m/min, ZW: EN 14171 S2 d=3,0mm, Schweißpulvertyp: Aluminat Rutil, *GW: S235, v_S = 50 cm/min)*

5.3 Analyse der Tropfentemperatur beim MSG-Prozess

Innerhalb dieser Untersuchungen wurde mit dem Tropfenkalorimeter die Tropfentemperatur und mit der Rohrkathode die jeweilige Lichtbogenleistung in Abhängigkeit der benötigten Schweißleistung ermittelt. Damit wurde der Einfluss verschiedener Schweißparameter auf den Wärmeeintrag in das Bauteil analysiert. Anhand von Querschliffen wurden die metallurgischen Auswirkungen auf das Schweißergebnis untersucht.

a) Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit

Beim MSG-Impulsschweißen wurden in Abhängigkeit zur Drahtvorschubgeschwindigkeit und zum Durchmesser des Zusatzwerkstoffs die Tropfentemperatur und die Lichtbogenleistung analysiert. Die sich in Abhängigkeit der Drahtvorschubgeschwindigkeit einstellenden mittleren Tropfentemperaturen werden in Abbildung 5-38 dargestellt.
Die Schweißleistung steigt linear zur Drahtvorschubgeschwindigkeit an. Auf Grund der höheren Stromdichte und des zugleich steigenden Widerstandes nimmt die Joulesche Erwärmung im freien Drahtelektrodenende zu. Gleichzeitig steigt die Lichtbogentemperatur, weshalb der übergehende Tropfen zusätzlich stärker erhitzt wird.
Das Tropfenvolumen bleibt im betrachteten Leistungsbereich annähernd konstant (Tabelle 5-4). Folglich kann das zunehmende Abschmelzvolumen, was durch die höhere Drahtvorschubgeschwindigkeit bewirkt wird, nur durch Erhöhung der Impulsfrequenz (Tabelle 5-4) und einer steigenden Fallgeschwindigkeit der Tropfen kompensiert werden. Eine kürzere Verweilzeit der Tropfen im Lichtbogen senkt die Tropfentemperatur.
Die reduzierenden und erhöhenden Parameter agieren gegeneinander. Diese Aussagen bestätigen auch die Untersuchungen von [Sch85, S. 51]. Das wird der Grund sein, weshalb im Vergleich zwischen v_D = 4 m/min zu v_D = 8 m/min die Tropfentemperatur nur um circa ΔT_{Tr} = 100 K steigt.

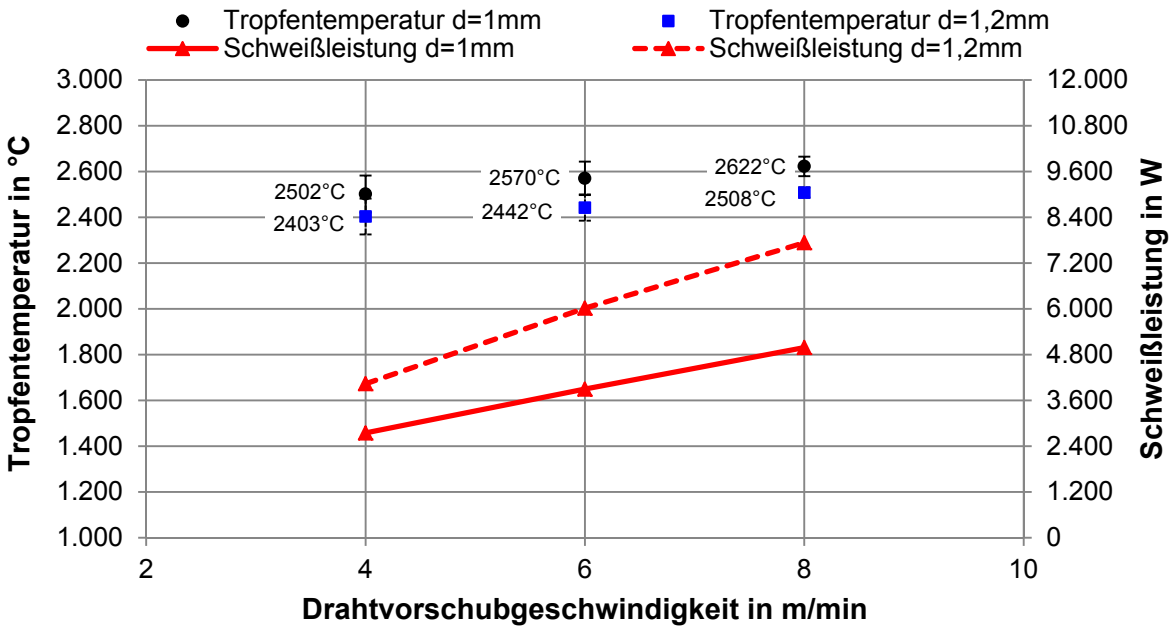


Abbildung 5-38: Mittlere Tropfentemperatur und Schweißleistung in Abhängigkeit der Drahtvorschubgeschwindigkeit und des Drahtdurchmessers (s = 10 mm, V_{SG} = 15 l/min Argon, ZW: G3Si1, Impulslichtbogen, Tropfenfallhöhe h = 70 mm)

Die Tropfenvolumen sind bei v_D = 2 m/min und v_D = 10 m/min höher, als im Bereich v_D = 4…8 m/min, was in Tabelle 5-4 verdeutlicht wird. Das ist eine Ursache, weshalb der Verlauf der Tropfentemperatur von dem im mittleren Leistungsbereich (v_D = 4…8 m/min) leicht abweicht. Gleichzeitig traten in diesem Leistungsbereich geringfügige Prozessinstabilitäten auf.
Siewert [Sie11] beschreibt in seinen Untersuchungsergebnissen ein anderes Temperaturverhalten des Schweißtropfens. Seinen Messungen zur Folge hat der Tropfen unmittelbar vorm Ablösen von der Zusatzwerkstoffelektrode die höchste Temperatur von etwa T = 2.800 °C. Der Tropfen würde während seinem Fall durch den Lichtbogen abkühlen und eine mittlere Tropfentemperatur von T_{Tr} = 2.250 °C (MSG-Impulslichtbogen im mittleren Leistungsbereich) besitzen. Auf Grund dessen geht Siewert [Sie11] davon aus, dass der Tropfen im Inneren heißer ist, als im Randbereich. Die Aussage, dass der Tropfen im Lichtbogen abkühlt erscheint mit der Kenntnis, dass die Lichtbogentemperatur im Kern mindestens T_{Libo} = 8.000 K [Wel11], [Rou10] beträgt, als eher unwahrscheinlich.

Tabelle 5-4: Impulsfrequenz und Tropfenvolumen in Abhängigkeit der Drahtvorschubgeschwindigkeit und des Drahtdurchmessers (s = 10 mm, V_{SG} = 15 l/min Argon, ZW: G3Si1, Tropfenfallhöhe h = 70 mm)

Drahtvorschub-geschwindigkeit in m/min	**d = 1 mm**		**d = 1,2 mm**	
	Impulsfrequenz in Hz	**Tropfen** in mm	**Impulsfrequenz** in Hz	**Tropfen** in mm
2	30	1,185		
4	80	1,077	90	1,17
6	120	1,077	140	1,156
8	160	1,077	170	1,192
10	190	1,096		

Abbildung 5-39 zeigt den prozentualen Anteil der entnommenen Schweißleistung, welcher durch den abgeschmolzenen Zusatzwerkstoff (Tropfenwirkungsgrad) und welcher durch den Lichtbogen (Lichtbogenwirkungsgrad) auf das Bauteil übertragen wird. Dabei steigt der Tropfenwirkungsgrad mit zunehmender Drahtvorschubgeschwindigkeit. Gleichzeitig

sinkt jedoch der Lichtbogenwirkungsgrad. Dies zeigt, dass es bei einer Veränderung der Drahtvorschubgeschwindigkeit ebenfalls zu einer Verschiebung der Energieanteile im Lichtbogenbereich kommt. Dieser Effekt ist unter anderem durch die zunehmende Widerstandserwärmung im freien Drahtelektrodenende mit steigender Schweißstromstärke zu erklären. Folglich kann der Anteil des Lichtbogens zum Schmelzen des Zusatzwerkstoffs sinken. Zusätzlich steigt der Anteil der Abstrahlungs-, Wärmeleitungs- und Konvektionsenergie des Lichtbogens an.

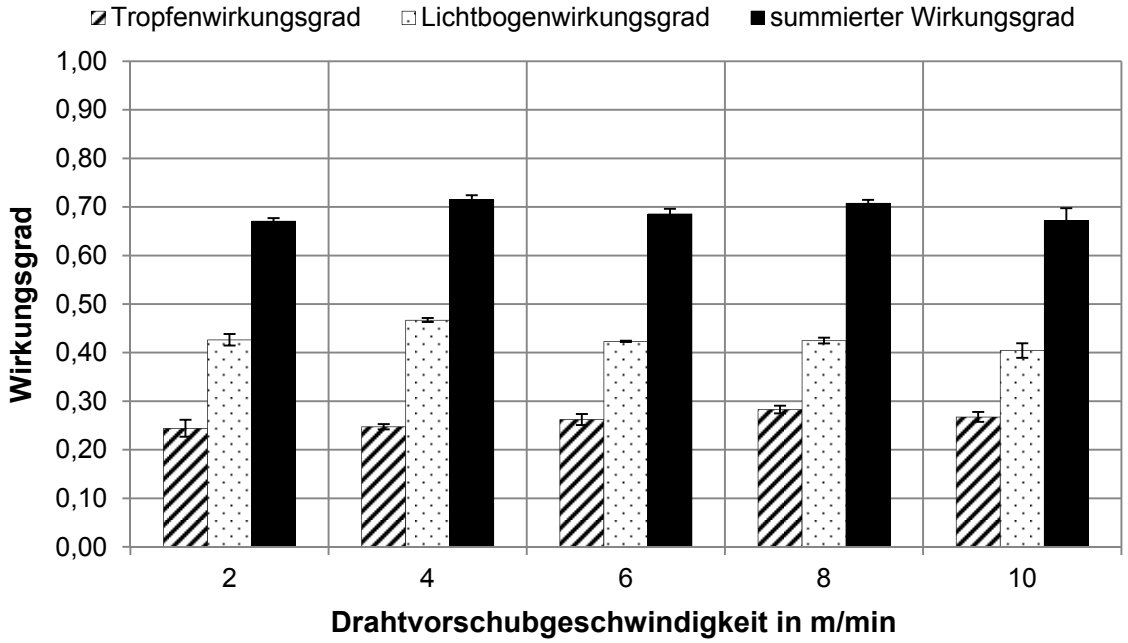


Abbildung 5-39: Lichtbogenwirkungsgrad und Tropfenwirkungsgrad in Abhängigkeit der Drahtvorschubgeschwindigkeit (s = 10 mm, V_{SG} = 15 l/min Argon, ZW: G3Si1 d = 1,0 mm, Impulslichtbogen, Tropfenfallhöhe h = 70 mm)

Theoretisch ist der summierte Wirkungsgrad aus dem Lichtbogen- und Tropfenwirkungsgrad gleichzusetzen mit dem effektiven Wirkungsgrad. Jedoch zeigt das Diagramm, dass der summierte Wirkungsgrad durchschnittlich 69 % beträgt. Im Verhältnis zum kalorimetrisch ermittelten Wärmeeintrag stellen diese geringeren Werte eine Abweichung von mindestens 7 % dar. Hauptsächlich ist das durch die Abstrahlungs-, Wärmeleitungs- und Konvektionsenergie des Lichtbogens (primär in Folge des an der Rohrkathode austretenden Lichtbogens) während des Prozesses zu begründen. Aber auch der Fallweg des abgeschmolzenen Zusatzwerkstoffs und die Ionisationsenergie des Kupferwerkstoffs der Rohrkathode stellen ein Fehlerpotential dar.

Der Tropfendurchmesser steigt mit zunehmendem Drahtdurchmesser an (Tabelle 5-4). Konkret ist der Tropfendurchmesser bei d = 1,2 mm durchschnittlich Δd_{Tr} = 0,1 mm größer, als bei d = 1 mm. Anhand der Verläufe der mittleren Tropfentemperatur in Abhängigkeit der Drahtvorschubgeschwindigkeit (Abbildung 5-38) ist zu erkennen, dass die Tropfentemperaturen bei einem Drahtdurchmesser von d = 1,2 mm um circa ΔT_{Tr} = 100 K niedriger sind als bei einem Drahtdurchmesser von d = 1 mm. Im betrachteten Leistungsbereich (v_D = 4…8 m/min) wurde der Tropfentemperaturverlauf somit in tiefere Bereiche parallel verschoben, als der Drahtdurchmesser erhöht wurde.
Da zum Schmelzen eines größeren Drahtdurchmessers eine höhere Leistung und andere Impulsfrequenz benötigt wird, ist das elektrische Feld zwischen Grund- und Zusatzwerkstoff stärker. Dadurch kann die Tropfenverweilzeit im Lichtbogen reduziert werden. Gleichzeitig wirkt die Gravitationskraft stärker auf einen schwereren Tropfen ein.

Hinzu kommt der Einfluss der Wärmeleitung im Werkstoff, welcher eine temperaturabhängige Kenngröße ist. Anhand spektroskopischer Untersuchungen [IIM12], [Göt10] wurde Metalldampf im Lichtbogen nachgewiesen. Aus diesem Grund muss der Randbereich des abgeschmolzenen Zusatzwerkstoffs Temperaturen oberhalb der Verdampfungstemperatur aufweisen. Die Erwärmung des Tropfens im Lichtbogen erfolgt einerseits durch elektrische Erwärmung und andererseits durch Wärmeleitung des mehr als T_{Libo} = 6.000 K heißen Lichtbogens [Mat06]. Ein größerer Tropfendurchmesser hat die Folge, dass der Kernbereich in gleicher Zeit weniger erwärmt werden kann.
Somit ist der massebezogene Gesamtenergiegehalt des Tropfens mit steigendem Drahtdurchmesser kleiner. Das Ergebnis der Untersuchungen des Einflusses des Draht- bzw. Tropfendurchmessers ist, dass die Tropfentemperatur mit steigendem Durchmesser sinkt.
Auf Grund der veränderten Tropfengeometrie und der geringeren Tropfentemperatur bei größerem Drahtdurchmesser verändert sich auch die Energieverteilung. Im Vergleich zu Abbildung 5-39 ist bei d = 1,2 mm der Tropfenwirkungsgrad um durchschnittlich 4 % geringer (in Relation zur benötigten Schweißleistung). Ein um etwa den gleichen Betrag erhöhter Lichtbogenwirkungsgrad gleicht das Verhältnis aus, so dass der summierte Wirkungsgrad objektiv unabhängig vom Drahtdurchmesser scheint.

b) Einfluss der Lichtbogenart

Systembedingt können mit dem Tropfenkalorimeter nur kurzschlussfreie Schweißprozesse untersucht werden. Aus diesem Grund wurde ein Vergleich zwischen Sprüh- und Impulslichtbogen bei einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von v_D = 10 m/min durchgeführt. Der Werkstoffübergang beim Impulsschweißen wird als „Projektilübergang“ bezeichnet. Dabei löst sich während des Schweißprozesses in der Regel pro Stromimpuls genau ein Tropfen vom Elektrodenende ab, wodurch ein sehr gleichmäßiger Werkstoffübergang entsteht. Die Tropfenablösung wird durch den Pulsstrom und den verstärkten Pincheffekt forciert. Beim Sprühlichtbogen erfolgt die Tropfenablösung kontinuierlich auf Grund der Schwerkraft, des elektrischen Feldes, der Pinchkraft und der Viskosität des erhitzten Zusatzwerkstoffs. Dieser Werkstoffübergang wird als „Strömungsübergang“ bezeichnet. Die Tropfentemperatur ist beim Schweißen mit dem Sprühlichtbogen circa ΔT_{Tr} = 70 K höher, als beim Impulslichtbogen. Die Analyse der Tropfengeometrie zeigt, dass deren Durchmesser beim Schweißen mit dem Sprühlichtbogen um circa Δd_{Tr} = 0,2 mm kleiner sind, als beim Impulslichtbogenprozess. Wie schon bei der Analyse des Einflusses des Drahtdurchmessers festgestellt wurde, weisen kleinere Tropfendurchmesser beim MSG-Schweißen eine höhere Tropfentemperatur und einen größeren massebezogenen Gesamtenergieinhalt auf. Gleichzeitig ist die benötigte Schweißleistung beim Sprühlichtbogenprozess etwa ΔP_S = 15 % höher, als beim Impulslichtbogen, wodurch insgesamt während des Prozesses mehr Energie auch im Bauteil umgesetzt wird. Der Großteil der höheren Energiemenge des Sprühlichtbogens wird aber nicht über den abgeschmolzenen Zusatzwerkstoff in den Grundwerkstoff übertragen, sondern über den kontinuierlich einwirkenden Sprühlichtbogen. Dies bestätigen auch die Untersuchungen von [Sch85, S. 52]. Dieser Sachverhalt wird auch bei der Analyse der Querschliffe deutlich, da der Einbrand sowie die Nahtbreite zunehmen.

c) Einfluss der Schutzgaszusammensetzung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss einer vermehrten Zumischung von CO_2 im Argonschutzgas auf die mittlere Tropfentemperatur sowie die Größe und Verteilung der thermischen Energie im Lichtbogen analysiert.
Bei einem Anteil von 10 % CO_2 im Argonschutzgas steigt die mittlere Tropfentemperatur stark an. Auf Grund der besseren elektrischen und thermischen Leitfähigkeit des Kohlendioxids ist die Stromdichte des Lichtbogens höher, was zu einem schmaleren und

heißeren Lichtbogenkern führt [Dze99]. Das kann die Ursache sein, weshalb der übergehende Tropfen durch den Lichtbogen stärker aufgeheizt wird und die mittlere Tropfentemperatur um mehr als ΔT_{Tr} = 100 K auf knapp T_{Tr} = 2.700 °C ansteigt. Ebenfalls sinkt durch die Beimischung von Kohlendioxid der Lichtbogenansatzpunkt, was zur Beeinflussung der Tropfentemperatur beiträgt. Ein Resultat ist, dass das freie Drahtelektrodenende geringfügig länger wird und der abschmelzende Zusatzwerkstoff aufgrund der höheren Widerstandserwärmung stärker aufgeheizt wird. Gleichzeitig kann die Pinchkraft weniger stark zur Ablösung der Tropfen beitragen. Zudem wird der Lichtbogen geringfügig kürzer, wodurch die Wärmeleitungs-, Wärmeströmungs- und Wärmestrahlungsenergie des Lichtbogens sinken. Schlussendlich steigt die Bauteilerwärmung um circa 3 % an. Der Lichtbogenwirkungsgrad bleibt weitgehend unverändert, während der Energieanteil, welcher durch den abgeschmolzenen Zusatzwerkstoff (Tropfenwirkungsgrad) übertragen wird, um den Betrag der zusätzlichen Bauteilerwärmung ansteigt.

d) Einfluss des Kontaktrohrabstandes

Ein weiterer Bestandteil dieser Untersuchungen war die Analyse des Einflusses unterschiedlicher Kontaktrohrabstände auf die mittlere Tropfentemperatur. Da sich bei einem größeren Kontaktrohrabstand auch die Lichtbogengeometrie verändert, wurde die Spannungskorrektur während der Prozesse so angepasst, dass sich stets die gleiche Lichtbogenlänge einstellte.

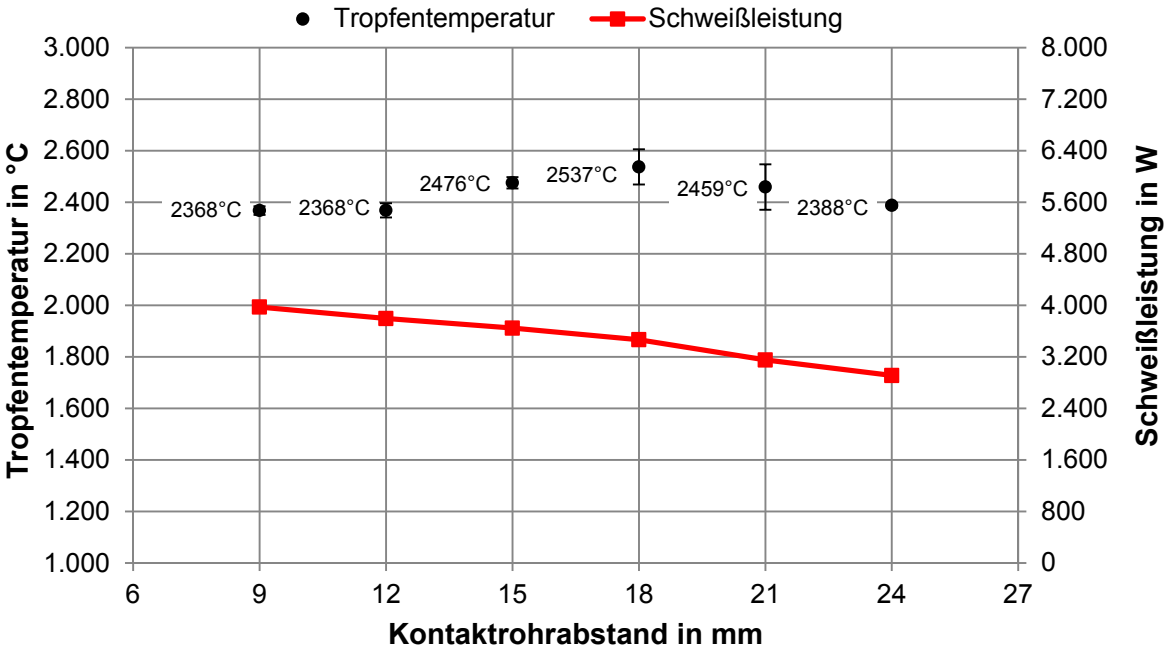


Abbildung 5-40: Mittlere Tropfentemperatur und benötigte Schweißleistung in Abhängigkeit des Kontaktrohrabstandes (V_{SG} = 15 l/min Argon, ZW: G3Si1 d = 1,0 mm, Impulslichtbogen, v_D = 6 m/min, Tropfenfallhöhe h = 70 mm)

Anhand Abbildung 5-40 wird deutlich, dass die Tropfentemperatur mit zunehmendem Kontaktrohrabstand ansteigt. Der Anstieg der Temperaturen zwischen einem Kontaktrohrabstand von s = 9 mm und s = 18 mm beträgt circa ΔT_{Tr} = 150 K. Ab einem Kontaktrohrabstand von s = 18 mm fällt die mittlere Tropfentemperatur jedoch wieder ab.
Dabei steigt mit zunehmendem Kontaktrohrabstand die Länge des freien Drahtelektrodenendes an, da die Lichtbogenlänge konstant gehalten wird. In Folge dessen steigt die Widerstandserwärmung im Zusatzwerkstoff an. Dies kann sogar dazu

führen, dass die Temperatur am Tropfenansatz bereits so hoch wird, dass der Draht ohne Einwirkung des Lichtbogens schmilzt. Die Folge eines zu lang gewählten freien Drahtendes ist, dass kein stabiler Schweißprozess gewährleistet werden kann [Sch85, S. 60].
Die benötigte Schweißleistung sinkt mit zunehmendem Kontaktrohrabstand. Da der Zusatzwerkstoff bereits stärker durch die Widerstandserwärmung vorgewärmt ist, wird offensichtlich weniger Energie vom Lichtbogen benötigt, um den Tropfen abzulösen.
Dieser Sachverhalt wird auch in Abbildung 5-41 deutlich. Während der Lichtbogenwirkungsgrad von $\eta_{Libo} = 0{,}48$ (s = 9 mm) auf $\eta_{Libo} = 0{,}43$ (s = 24 mm) sinkt, steigt der Tropfenwirkungsgrad von $\eta_{Tr} = 0{,}24$ (s = 9 mm) auf $\eta_{Libo} = 0{,}33$ (s = 24 mm). Folglich nimmt auch der summierte Wirkungsgrad von 72 % auf 76 % zu. Eine Beeinflussung der Tropfentemperatur in Folge der Veränderung der Tropfengeometrie ist auf Grund einer konstanten Impulsfrequenz und unveränderten Abschmelzleistung nicht zu erwarten. Das Absinken der Tropfentemperatur bei einem Kontaktrohrabstand von s = 21…24 mm, im Gegensatz zum übrigen Verlauf, kann auf die geringere notwendige Schweißleistung zurückgeführt werden.

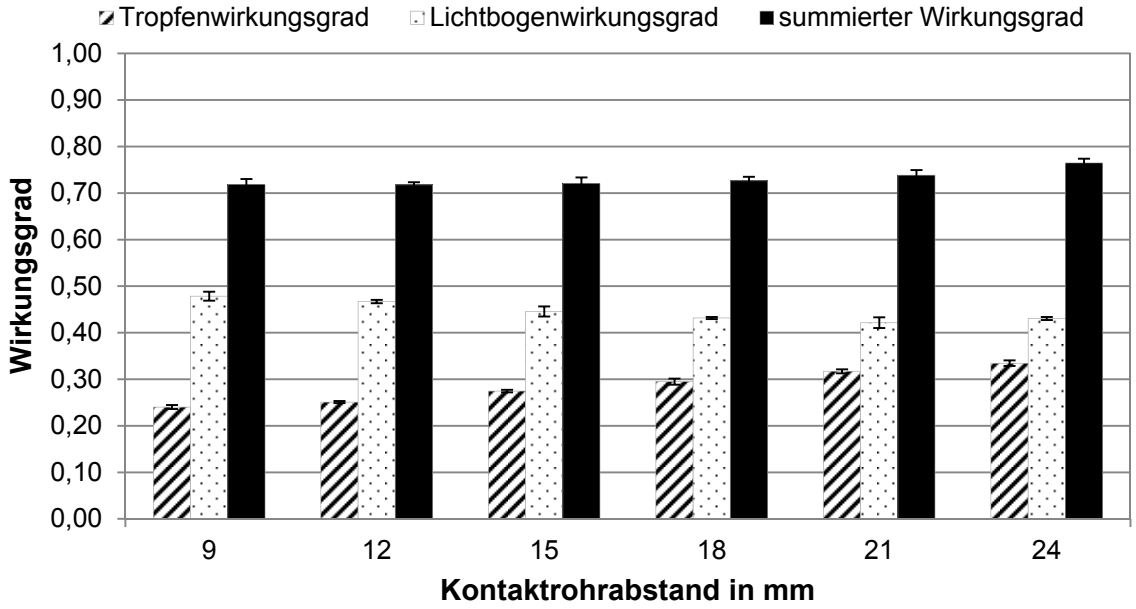


Abbildung 5-41: Lichtbogenwirkungsgrad und Tropfenwirkungsgrad in Abhängigkeit des Kontaktrohrabstandes (V_{SG} = 15 l/min Argon, ZW: G3Si1 d = 1,0 mm, Impulslichtbogen, v_D = 6 m/min, Tropfenfallhöhe h = 70 mm)

Ein ähnlicher Sachverhalt wurde in [Jun13] beschrieben. Der Zusatzwerkstoff beim MSG-Schweißen wurden hierzu mit einem WIG-Lichtbogen gezielt vorgewärmt. Dadurch stieg die Temperatur am Lichtbogenansatz bzw. Tropfenablösepunkt. In Folge dessen nahm die Schweißstromstärke und der Wärmeeintrag in das Bauteil bzw. der Einbrand ab.
Die Analyse der Querschliffe in Abbildung 5-24 zeigt, dass der Schmelzwirkungsgrad bei angepasstem Kontaktrohrabstand und konstanter Drahtvorschubgeschwindigkeit unverändert bleibt. Die Analyse der Querschliffe der Schweißversuche, welche in den Diagrammen Abbildung 5-40 und Abbildung 5-41 dargestellt sind, ergaben einen konstanten Schmelzwirkungsgrad von $\eta_{Schm} = 0{,}41$. Jedoch ändert sich die Aufteilung des Anteils des Schmelzwirkungsgrades zwischen Grund- und Zusatzwerkstoff. Während bei einem Kontaktrohrabstand von s = 9 mm $\eta_{Schm_GW} = 0{,}14$ und $\eta_{Schm_ZW} = 0{,}27$ berechnet wurden, reduziert sich der Anteil des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffs drastisch mit steigendem Kontaktrohrabstand. Bei einem Kontaktrohrabstand von s = 24 mm ergab die Kalkulation $\eta_{Schm_GW} = 0{,}06$ und $\eta_{Schm_ZW} = 0{,}35$.

Dabei beziehen sich die Schmelzwirkungsgrade auf das Verhältnis zwischen theoretisch notwendiger Energie zum Aufschmelzen des Schweißnahtvolumens zur real eingebrachten Energie in das Bauteil. Zusammenfassend wird deutlich, dass mit zunehmendem Kontaktrohrabstand auch der Einbrand in den Grundwerkstoff abnimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Intensität des Lichtbogens durch das Absinken der Schweißleistung ebenfalls sinkt. Demgegenüber steigen die Tropfentemperatur und auch der Tropfenwirkungsgrad an. Folglich sind der Lichtbogen und dessen Intensität hauptverantwortlich für den Einbrand im Grundwerkstoff und der Energieeintrag des stark überhitzten Tropfens ist von untergeordneter Bedeutung.
Die Aussage, dass der abgeschmolzene Zusatzwerkstoff weniger dazu beiträgt den Grundwerkstoff aufzuschmelzen, als der übertragene Anteil des direkten Wärmestroms des Lichtbogens, von Probst [Pro82] kann damit bestätigt werden. Auch die Untersuchungen von Zhao [Zha13] zeigen, dass der Einbrand hauptsächlich von der Schweißstromstärke und somit vom Lichtbogenanteil verursacht wird. Weiterhin stellt er fest, dass dieser Zusammenhang sowohl für das Unterpulverschweißen, als auch für das MSG-Schweißen gilt.

5.4 Analyse des Spannungsabfalls beim MSG-Prozess

Für die Analyse der Spannungsverteilung von Schweißprozessen bieten geregelt gepulste Lichtbögen die beste Bewertungsgrundlage, da innerhalb des Schweißprozesses kontinuierlich verschiedene Leistungsbereiche durchlaufen werden und Kurzschlüsse nur am Schweißstart stattfinden. Dadurch kann die Spannungsverteilung am Stickout bzw. der freien Drahtelektrode, in der Lichtbogensäulenrandschicht und in die Lichtbogensäule differenziert analysiert werden. In Tabelle 5-5 werden Untersuchungsergebnisse der Einflussgrößen Drahtvorschubgeschwindigkeit, Schutzgaszusammensetzung und des Brenner- bzw. Kontaktrohrabstandes (Bedingung: Lichtbogenlänge konstant) dargestellt.

Tabelle 5-5: Spannungsverteilung im MSG-Pulsprozess
(V_{SG} = 15 l/min, ZW: G3Si1 d = 1,0 mm, GW: S235, v_S = 60 cm/min)

Einflussgröße	Drahtvorschub		Schutzgasart		Brennerabstand	
	v_D=2m/min	v_D=10m/min	100% Ar	90% Ar, 10% CO2	s=9mm	s=24mm
U_Stickout	2,78	4,84	4,24	5,47	4,24	6,89
U_Randschicht	15,34	15,75	15,75	21,23	15,75	17,17
U_Säule	6,81	11,70	9,28	6,56	9,28	9,85
U_Summe	**24,93**	**32,29**	**29,27**	**33,26**	**29,27**	**33,91**
Konstanten	100% Ar; s=15mm		v_D=6m/min; s=15mm		v_D=6m/min; 100% Ar	

a) Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit

Mit steigender Drahtvorschubgeschwindigkeit nimmt der Spannungsabfall am Stickout bzw. der freien Drahtelektrode leicht zu, was in Tabelle 5-5 deutlich wird. Grund hierfür ist, dass die erforderliche Schweißstromstärke ansteigt, was zu einer stärkeren Erwärmung des freien Drahtendes führt (Joulesches Gesetz). Der Widerstand im Werkstoff steigt, was zum Spannungsanstieg führt. Dieses Verhalten wird durch die Analyse der Wärmeverluste an die externe Kühlung der Schweißstromquelle (Abbildung 5-20) bestätigt.
Der Spannungsabfall in den beiden Randschichten der Anode und Kathode bleibt relativ unverändert. Jedoch steigt die umgesetzte Spannung in der Lichtbogensäule um fast das Doppelte an. Die höhere Schweißleistung bewirkt einen heißeren Lichtbogen (Erwärmung durch den Leistungsumsatz in der Kathode steigt stark an [IIM12]) und kann einen höheren Metalldampfanteil im Prozess bewirken, was eine vermehrte Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie des Lichtbogens (Abbildung 5-19) bedingt. Dieser Sachverhalt wird auch dadurch bestätigt, dass die Temperatur des abgeschmolzenen Zusatzwerkstoffs steigt (siehe Abschnitt 5.3a)).

Durch Multiplikation der Spannungsabfälle mit der Schweißstromstärke, können die Leistungsumsätze der jeweiligen Betrachtungsgebiete berechnet werden (Formel 4.1). Wie im Abschnitt 5.3 bewiesen, wird die Erwärmung des Bauteils durch den Lichtbogen und den abgeschmolzenen Zusatzwerkstoff verursacht. Das heißt das Produkt der Schweißstromstärke mit dem Spannungsabfall im Stickout (Erwärmung des Bauteils durch abgeschmolzenen Zusatzwerkstoff) und dem Spannungsabfall in der Randschicht (Erwärmung des Bauteils durch den Lichtbogen) stellt theoretisch den Energieeintrag in das Bauteil dar. Dieser Energieeintrag ist theoretisch gleich dem Energieeintrag, welcher kalorimetrisch ermittelt wurde. Die Ergebnisse in Tabelle 5-6 zeigen, dass die Abweichungen der kalorimetrisch bestimmten Energieeinträge P_{BT} und berechneten Leistungsumsätze der Spannungsabfälle P_{BT_theo} im konkreten Fall minimal sind. Bei einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von $v_D = 2$ m/min wurde ein kalorimetrisch bestimmter Leistungsumsatz in das Bauteil von $P_{BT} = 1.221$ W und ein berechneter Leistungsumsatz von $P_{BT_theo} = 1.201$ W ermittelt. Im höheren Leistungsbereich von $v_D = 10$ m/min beträgt $P_{BT} = 4.476$ W und $P_{BT_theo} = 4.649$ W. Da die Methodik der Spannungsverteilung im Lichtbogen laut Kruscha [IIM12] vornehmlich bei geregelt gepulsten Prozessen einsetzbar ist, ist diese Methode zur Bestimmung des Energieeintrages in das Bauteil nur bedingt geeignet. Gleichzeitig ist die Bestimmung der Schweißstromstärke an Impulsprozessen schwierig, wie es in Abschnitt 4.3 a) bewiesen ist. In weiteren Stichversuchen mit dem arithmetischen Mittelwert der Schweißstromstärke wurde eine durchschnittliche Abweichung beider Energieeinträge in das Bauteil – Kalorimetrie sowie das Produkt aus Spannungsabfall und Schweißstromstärke - von durchschnittlich 15 % ermittelt. Eine Anwendung dieser Berechnung zur Ermittlung des Energieeintrages in das Bauteil ist aus den beschriebenen Gründen nicht zu empfehlen.

Tabelle 5-6: Vergleich berechneter und kalorimetrisch bestimmter Energieumsatz beim MSG-Pulsprozess
(V_{SG} = 15 l/min, ZW: G3Si1 d = 1,0 mm, GW: S235, v_S = 60 cm/min)

Einflussgröße	**Drahtvorschub**	
	v_D=2m/min	**v_D=10m/min**
I_S in A	66,30	225,80
P_S in W	1472	6049
$U_{Stickout}$	2,78	4,84
$U_{Randschicht}$ in V	15,34	15,75
U_{BT}= $U_{stiuckout}$+$U_{Randschicht}$ in V	18,12	20,59
P_{BT} kalorimetrisch in W	1221	4476
P_{BT_theo}=I_S*$U_{Randschicht}$ in W	1201	4649
Differenz in %	-2	4
$U_{Säule}$ in V	6,81	11,70
P_{Abstr} + $P_{Brenner}$ kalorimetrisch in W	173	1272
$P_{Verlust_theo}$=I_S*$U_{Säule}$ in W	452	2642
Differenz in %	62	52

Laut Kruscha [IIM12] beschreibt das Produkt aus dem Spannungsabfall in der Lichtbogensäule mit der Schweißstromstärke die „Verlustgrößen“ des Schweißprozesses $P_{Verlust_theo}$. Diese messbaren Größen sind die Leistung der Abstrahlungs-, Wärmeleitungs- und Konvektionsenergie des Lichtbogens P_{Abstr} und die Kühlungsleistung des externen Kühlkreislaufes $P_{Brenner}$. Wird die theoretische Berechnung laut Kruscha [IIM12] mit den kalorimetrisch bestimmten Messwerten verglichen, wurden real mehr als 50 % weniger „Verluste“ gemessen, siehe Tabelle 5-6. Bei einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von $v_D = 2$ m/min wurde ein kalorimetrisch bestimmter „Leistungsverlust“ von $P_{Abstr}+P_{Brenner} = 173$ W und ein theoretisch berechneter Leistungsumsatz von

$P_{Verlust_theo}$ = 452 W ermittelt. Im höheren Leistungsbereich von v_D = 10 m/min beträgt die kalorimetrisch gemessene „Verlustleistung“ $P_{Abstr}+P_{Brenner}$ = 1.272 W und die laut Kruscha [IIM12] theoretisch berechnete Verlustenergie des Schweißprozesses $P_{Verlust_theo}$ = 2.642 W. Die Ergebnisse zeigen, dass die Differenz zwischen kalorimetrisch gemessenen Energieverlusten des Schweißprozesses und theoretisch berechneten Verlustgrößen mit steigender Schweißleistung immer größer werden. Das heißt, diese theoretische Auswertemethodik von Kruscha [IIM12] ist im konkreten Fall ungeeignet.

b) Einfluss der Schutzgaszusammensetzung

Bei der Betrachtung des Einflusses der Schutzgaszusammensetzung wurde der CO_2-Anteil im Argonschutzgas variiert. Das Aktivgas CO_2 hat die Eigenschaft, dass es am Lichtbogenansatzpunkt dissoziiert, weshalb an den Randschichten neben der Ionisationsenergie des Schutzgases (Argon E_{Ion} = 15,76 eV) noch die notwendige Dissoziationsenergie benötigt wird (CO_2 E_{Diss} = 4,30 eV; O_2 E_{Diss} = 5,08 eV) [Mat06, S. 49]. Dabei erfolgt vorerst die Spaltung in Kohlenmonooxid (CO) und Sauerstoff. Dieser Vorgang benötigt mindestens eine Lichtbogentemperatur von T_{Libo} = 1.700 °C [Dra12]. Im Anschluss erfolgt die weitere Dissoziation von Sauerstoff. Auf Grund der zusätzlich notwendigen Dissoziationsvorgänge steigt der Spannungsabfall in den Randschichten um $\Delta U_{Säule}$ = 5,5 V, wenn sich 10 % CO_2 im Argonschutzgas befinden (Tabelle 5-5). Das Resultat ist eine stärkere Erwärmung des Kalorimetermediums bzw. des Bauteils um circa 5 %, während dafür etwa 6 % weniger Schweißleistung benötigt wurde.
Gleichzeitig wird der Spannungsabfall in der Lichtbogensäule reduziert, was eine geringere Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie an die Umgebung erwarten lässt. Dies konnte an den durchgeführten Untersuchungen bestätigt werden (siehe Absatz 5.2.1, Abschnitt d) Einfluss der Schutzgaszusammensetzung). Dabei ist der prozentuale Spannungsabfall in der Lichtbogensäule höher, als die messbare Abstrahlungsenergie und die Wärmeverluste an die Kühlung. Kruscha [IIM12] beschreibt aber, dass der Spannungsabfall im Lichtbogen multipliziert mit der Schweißstromstärke ausschließlich die Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie des Lichtbogens darstellt und würde nicht zur Erwärmung des Bauteils beitragen. Diese Aussage kann nicht durch die eigenen Untersuchungen bestätigt werden. Vielmehr wurde deutlich, dass auch der Lichtbogen entscheidend die Temperatur im Bauteil beeinflusst.
Laut Soderstrom [Sod08] ist die elektrische Leitfähigkeit von CO_2 höher, als die des Argons. Aus diesem Grund sinkt die umschließende Fläche des Lichtbogens um das freie Drahtende. Gleichzeitig steigen die Feldstärke und die lokale Temperatur am Lichtbogenansatzpunkt. Die zu erwartende Folge ist einerseits die Verlängerung des Stickouts und die Erhöhung des Widerstandes am Lichtbogenansatzpunkt. Das Resultat ist die Erhöhung des Spannungsabfalls am freien Drahtende und eine höhere Tropfentemperatur, was auch die eigenen Ergebnisse zeigen.

c) Einfluss des Brenner- bzw. Kontaktrohrabstandes

Bei der Analyse des Brennerabstandes auf den Spannungsabfall im Schweißprozess wurde die Lichtbogenlänge konstant gehalten. Aus diesem Grund blieb die notwendige Spannung in der Lichtbogensäule unverändert. Durch die Erhöhung des Brennerabstandes steigt die Länge des freien Drahtendes an und der Spannungsabfall im Stickout nimmt kontinuierlich zu (Tabelle 5-5). Dabei stieg die Größe des grafisch ausgewerteten Bereiches des Spannungsabfalls in den Randschichten des Lichtbogens leicht an. Die Untersuchungen zur Tropfentemperatur zeigten eine Temperaturerhöhung, während der Leistungsumsatz im Lichtbogen sinkt (Abschnitt 5.3, Absatz d).

5.5 Messung der $t_{8/5}$- Abkühlzeiten

Die Anordnung der einzelnen Thermoelemente zur Messung der Abkühlzeit kann Abbildung 3-14 entnommen werden. Hierzu wurden jeweils drei Thermoelemente des Typs K in einem Abstand von maximal s = 10 mm von der Schweißnaht an der Bauteiloberseite und im Bauteilkern angebracht.
In Tabelle 5-7 werden die gemessenen $t_{8/5}$-Abkühlzeiten und die durch das Einsetzen der ermittelten Wirkungsgrade in Formel 3.1 berechneten Abkühlzeiten dargestellt. Auch eine Gegenüberstellung der kalorimetrisch gemessen effektiven Wirkungsgrade und der berechneten Wirkungsgrade in Abhängigkeit vom Grundwerkstoff und der Schweißleistung wird in Tabelle 5-7 gezeigt. Die berechneten Werte stimmen mit den gemessenen Werten bei der Verwendung von un- und niedrig legiertem Stahl (am Beispiel S 235, Werkstoffnummer 1.0037) überein. Somit wird bestätigt, dass die kalorimetrisch bestimmten, absoluten Wirkungsgrade die reale Erwärmung im Bauteil beschreiben.
Auf Grund der circa dreifach geringeren Wärmeleitfähigkeit von austenitischem Grundwerkstoff, im Verhältnis zum Baustahl z.B. S235, müsste die berechnete Abkühlzeit um den Faktor Drei ansteigen und der berechnte effektive Wirkungsgrad stark sinken. Die Messergebnisse der Abkühlzeiten (*Tabelle 5-7*) weisen jedoch nur eine Erhöhung um circa 40 % auf und die Wirkungsgrade (Abschnitt 5.2.1 Absatz g) beschreiben eine durchschnittliche Reduzierung um 4 %.
Neben der Messung mit Thermoelementen wurde die berührungslose Messmethodik mittels eines Quotientenpyrometers untersucht, wie es die Firma HKS Prozesstechnik [Hks13] anbietet. Während die Messungen bei der Verwendung von un- und niedrig legiertem Stahl durchschnittlich 30 % zu hohe Abkühlzeiten ergaben, ist die Übereinstimmung zwischen den berechneten (Einsetzen der kalorimetrisch ermittelten Wirkungsgrade) und den pyrometrisch gemessen Abkühlzeiten bei austenitischem Werkstoffen höher.

Tabelle 5-7: Messung der Abkühlzeiten und Berechnung der Wirkungsgrade nach einsetzen von Formel 3.3 in Formel 3.5
(V_{SG} = 15 l/min 95 %Ar 5 %CO_2, ZW: G3Si1 d = 1,2 mm, v_S = 30…50 cm/min, s = 18 mm)

Werkstoff	**Drahtvorschub** in m/min	**Leistung** in W	**gemessene $t_{8/5}$ Thermoelement** in s	**gemessene $t_{8/5}$ Pyrometer** in s	**berechnete t8/5** in s	**gemessener Wirkungs-grad**	**berechneter Wirkungs-grad**
S 235	4	3035	3,26	3,87	2,92	0,82	0,88
CrNi	4	3169	5,12	8,34	7,38	0,82	0,74
S 235	10	10144	7,56	10,56	7,74	0,71	0,69
CrNi	10	10169	9,51	15,78	14,91	0,69	0,56

5.6 Diskussion Messprinzip Kalorimeter

Die entstehenden Temperaturfelder beim Schweißen bewirken eine voreilende Wärme im Bauteil. Auf Grund dessen ändert sich der Schweißnahtquerschnitt und die Schweißparameter könnten theoretisch angepasst werden, um konstante Schweißergebnisse zu erhalten. Diese Adaption ist jedoch derzeitig in keiner Schweißenergiequelle integriert, da hierfür eine Rückmeldung über die aktuelle Schweißgeschwindigkeit des Prozesses notwendig wäre.
Die entwickelten Kalorimeter zur Ermittlung des Energieeintrages in das Bauteil werden hingegen kontinuierlich von der Unterseite gekühlt. Dadurch werden konstante Bauteileigenschaften erreicht und der Einfluss der voreilenden Temperaturfelder eliminiert. Der zu betrachtende Punkt ist der Einfluss der konstanten Bauteiltemperatur auf die Aussagefähigkeit der Messergebnisse bzw. ermittelten Wirkungsgrade.
Hierzu wurden Schweißversuche auf unterschiedlich temperierten Stahlbauteilen mit dem MSG-Prozess durchgeführt. Die Drahtvorschubgeschwindigkeit wurde in einem Bereich von v_D = 2…10 m/min in Δv_D = 2 m/min Intervallen angepasst. Die Bauteiltemperatur beginnend vom Raumtemperaturniveau in ΔT_{BT} = 100 K Schritten bis auf T_{BT} = 500 °C gesteigert. Die Schweißgeschwindigkeit wurde kontinuierlich mit der Drahtvorschubgeschwindigkeit erhöht, um eine vergleichbare Streckenenergie sicherzustellen.
Im Vergleich zwischen den Bauteiltemperaturen T_{BT} = 20 °C und T_{BT} = 500 °C haben sich folgende Messgrößen verändert:

- ca. ΔP_S = 3,5 % geringere Schweißleistung
- durchschnittlich 20 % flachere Nahtüberhöhung
- etwa 34 % breitere Schweißnaht
- durchschnittlich 82 % vergrößerte Einbrandfläche

Da die Drahtvorschubgeschwindigkeit konstant gehalten wurde, zeigten die Untersuchungen, dass der überwiegende Teil der Schweißnahtflächenzunahme auf den gesteigerten Einbrand zurückzuführen ist. Die Zunahme der Nahtüberhöhung ist nach der eingehenden Analyse der Querschliffe zu vernachlässigen.
Wird bei der Berechnung des Schmelzwirkungsgrades (Formel 3.13) eine Start- und Endtemperatur T_0 = 20 °C verwendet, so steigt der Schmelzwirkungsgrad durchschnittlich um 20 % an, wenn die Bauteiltemperatur von T_{BT} = 20 °C auf T_{BT} = 500 °C erhöht wird. Richtigerweise muss jedoch die reale, vorgewärmte Bauteiltemperatur als T_0 in Formel 3.13 eingesetzt werden, so dass der Schmelzwirkungsgrad um durchschnittlich 6 % sinkt, wenn bei gleicher Drahtvorschubgeschwindigkeit die Bauteiltemperatur von T_{BT} = 20 °C auf T_{BT} = 500 °C erhöht wird (Tabelle 5-8). Dabei stellen die entnommen Querschliffe jeweils nur eine Momentaufnahme des Schweißergebnisses dar. Zudem entstehen Messunsicherheiten bei der manuellen Ermittlung der Querschnittsflächen der Schweißnaht.
Bei der Analyse der Schmelzwirkungsgrade des Grundwerkstoffs zeigt sich, dass dieser mit steigender Bauteiltemperatur um durchschnittlich 30 % ansteigt (Tabelle 5-8). Hingegen sinkt der Schmelzwirkungsgrad des Zusatzwerkstoffs im Mittel um etwa 15 % ab (Tabelle 5-8). Das Absinken des Schmelzwirkungsgrades des Zusatzwerkstoffes ist dadurch zu begründen, dass das Volumen an Zusatzwerkstoff konstant bleibt, jedoch durch die Anpassung der Start- und Endtemperatur T_0 dem Zusatzwerkstoff ein geringerer Wärmeinhalt zugeteilt wird. Trotzdem kommt es zur Verschiebung des Energieflusses im Bauteil, wenn die Temperatur erhöht wird. Die Untersuchungen zur Tropfenkalorimetrie (Abschnitt 5.3 Absatz d) zeigen, dass der Einbrand durch die Lichtbogenleistung hervorgerufen wird. Ist die Bauteiltemperatur höher, ist die Temperaturdifferenz bis zum Erreichen der Schmelztemperatur geringer. Gleichzeitig sinkt die Schweißleistung nur geringfügig, so dass als Konsequenz das Einbrandvolumen steigt.

Tabelle 5-8: Einfluss der Bauteiltemperatur auf den Schmelzwirkungsgrad (V_{SG} = 15 l/min 95 %Ar 5 %CO_2, ZW: G3Si1 d = 1,2 mm, v_S = 30…140 cm/min, s = 18 mm)

Drahtvorschub-geschwindigkeit in m/min	**Bauteil-temperatur** in °C	**Schmelzwirkungsgrad**		
		gesamte Naht	**Grundwerkstoff**	**Zusatzwerkstoff**
2	500	0,088	0,014	0,074
	400	0,104	0,018	0,086
	300	0,098	0,014	0,084
	200	0,107	0,011	0,096
	100	0,106	0,012	0,094
	20	0,109	0,011	0,099
6	500	0,217	0,091	0,136
	400	0,229	0,087	0,142
	300	0,232	0,081	0,156
	200	0,226	0,080	0,146
	100	0,255	0,088	0,167
	20	0,259	0,081	0,178
10	500	0,432	0,193	0,239
	400	0,425	0,178	0,247
	300	0,417	0,157	0,259
	200	0,422	0,160	0,262
	100	0,413	0,154	0,259
	20	0,414	0,156	0,260

Die Untersuchung des Einflusses einer stark erhöhten Bauteiltemperatur auf den effektiven Wirkungsgrad ist nicht möglich. Als Kalorimeterflüssigkeit wird Wasser verwendet, dessen Verdampfungstemperatur bei T = 100 °C liegt. Die Abstrahlungsverluste steigen während der Messung an, wenn die Temperaturdifferenz zur Umgebung steigt. Auch ein zu großer Abstand zwischen dem Schweißprozess und dem Wasserspiegel bewirkt eine Reduzierung der Messgenauigkeit.
Ausgehend vom annähernd konstanten Schmelzwirkungsgrad bei veränderter Bauteiltemperatur und der nahezu gleichbleibenden Schweißleistung ist davon auszugehen, dass der effektive Wirkungsgrad im untersuchten Temperaturbereich weitgehend unverändert bleibt. Da eine Beeinflussung des Wirkungsgrades durch eine veränderte Bauteiltemperatur ausschließbar scheint, ist das verwendete kalorimetrische Messsystem als geeignet für die Ermittlung des Wärmeeintrages in das Bauteil einzuschätzen.

6 Zusammenfassung

Innerhalb dieser Arbeit wurden verschiedene Messmethoden zur Bestimmung des Energieflusses beim Lichtbogenschweißen vorgestellt und deren spezifischen Eigenschaften beschrieben. Die damit gewonnen Messergebnisse zur systematischen Analyse der Einflussgrößen auf den Energiefluss verschiedener Schweißverfahren wurde dargestellt. In der anschließenden Ergebnisdiskussion wurden die Wirkzusammenhänge erörtert. Eine strukturierte Zusammenfassung der Erkenntnisse wird in den folgenden Abschnitten gezeigt.

6.1 Schweißversuche mit nicht abschmelzender Elektrode

6.1.1 WIG-Schweißprozess

Der absolute, mittlere Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Prozesses beträgt $\eta_{LB} = 0{,}75$ (Mittelwert aus allen ermittelten Lichtbogenwirkungsgraden des WIG-Prozesses bei Veränderung der beschriebenen Parameter), was eine Abweichung von knapp 25 % zu dem in DIN EN 1011-1 [DIN09] beschriebenen Wert von $\eta_{th} = 0{,}60$ darstellt.

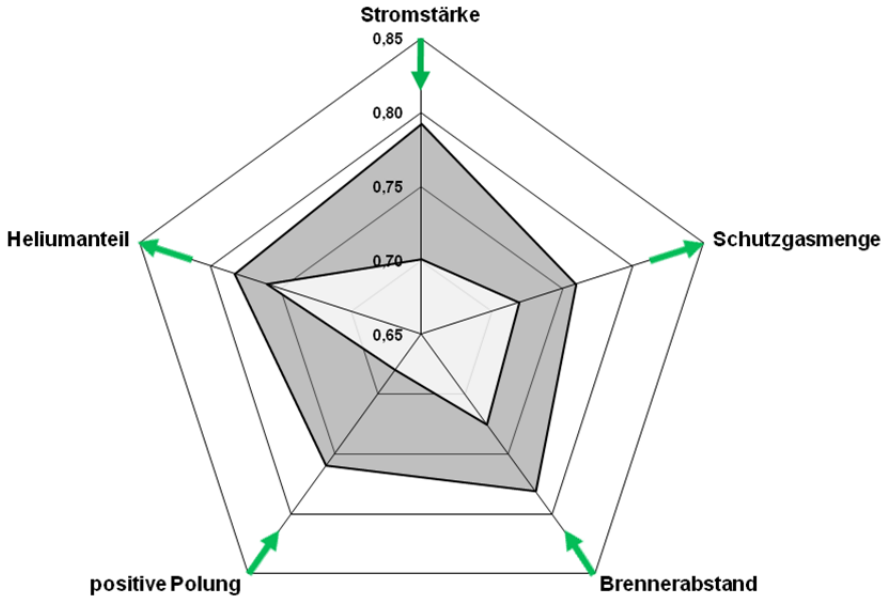


Abbildung 6-1: Darstellung der ermittelten Einflussgrößen auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses

Anhand Abbildung 6-1 werden untersuchte Haupteinflussgrößen auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißens in Form eines Ringdiagramms dargestellt. Die grau dargestellte Fläche beschreibt den Bereich zwischen minimalen (innen) und maximalen (außen) ermittelten Lichtbogenwirkungsgraden in Abhängigkeit zu den untersuchten Einflussparametern. Die Pfeilrichtung gibt an, ob der beschriebene Parameter erhöht oder reduziert werden muss, um den Lichtbogenwirkungsgrad zu steigern. Dabei bedeutet beispielsweise ein nach innen gerichteter Pfeil, dass der Einflussparameter zu reduzieren ist, um den Lichtbogenwirkungsgrad zu erhöhen.

Faktoren, welche den Lichtbogenwirkungsgrad reduzieren:

- Erhöhung der Schweißstromstärke
  Dadurch steigen jedoch die Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie des Lichtbogens und die notwendige Energie des externen Brennerkühlkreislaufs der Schweißenergiequelle stark an.
- Erhöhung des Elektrodenabstandes zum Werkstück
  Dabei nimmt die Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie des Lichtbogens erheblich zu.
- Verwendung einer positiven Elektrodenpolung
  In Folge dessen steigt die thermische Belastung der Elektrode, wodurch die übertragene Energie an die Brennerkühlung der Schweißenergiequelle stark ansteigt.

Faktoren, welche den Lichtbogenwirkungsgrad erhöhen:

- Erhöhung der Schutzgasmenge
  Der Wärmetransport von der Elektrode zum Bauteil wird verstärkt.
- Erhöhung des Heliumanteils im Schutzgas
  Höhere Ionisationsenergie des Lichtbogens, was eine höhere Schweißleistung und folglich eine stärkere Erwärmung des Bauteils bewirkt.
- Reduzierung des Elektrodenwinkels
  Die Lichtbogenkonzentration nimmt leicht zu.

Untersuchte Faktoren, welche den Lichtbogenwirkungsgrad nicht beeinflussen:

- Erhöhung des Elektrodendurchmessers
  Jedoch sinkt der Schmelzwirkungsgrad proportional mit der Schweißleistung ab.
- Grundwerkstoff
  Aber der Grundwerkstoff hat einen Einfluss auf die benötigte Schweißleistung und den resultierenden Schmelzwirkungsgrad.
- Blechdicke

6.1.2 Plasmaschweißprozess

Der absolute, mittlere Lichtbogenwirkungsgrad des Plasmaschweißprozesses beträgt $\eta_{LB} = 0{,}74$ (Mittelwert aus allen ermittelten Lichtbogenwirkungsgraden des Plasmaprozesses bei Veränderung der beschriebenen Parameter), was eine Abweichung von knapp 25 % zu dem in DIN EN 1011-1 [DIN09] beschriebenen Wert $\eta_{th} = 0{,}60$ darstellt. In Abbildung 6-2 werden die betrachteten Parameter und beschriebenen Einflussgrößen auf den Lichtbogenwirkungsgrad des Plasmaschweißprozesses in Form eines Ringdiagramms dargestellt. Die grau dargestellte Fläche beschreibt den Bereich zwischen minimalen (innen) und maximalen (außen) ermittelten Lichtbogenwirkungsgraden des Plasmaschweißprozesses in Abhängigkeit zu den untersuchten Einflussparametern. Dabei bedeutet beispielsweise ein nach außen gerichteter Pfeil, dass der Einflussparameter zu erhöhen ist, um den Lichtbogenwirkungsgrad zu steigern.
Im Vergleich zum WIG-Schweißprozess ($\eta_{LB} = 0{,}75$) ist der mittlere Lichtbogenwirkungsgrad fast identisch. Auch die Beeinflussung des Wirkungsgrades durch gezielte Änderung der Schweißparameter bzw. technologischen Randbedingungen ist tendenziell identisch. Dies ist begründet durch die ähnlichen technischen Wirkprinzipien.

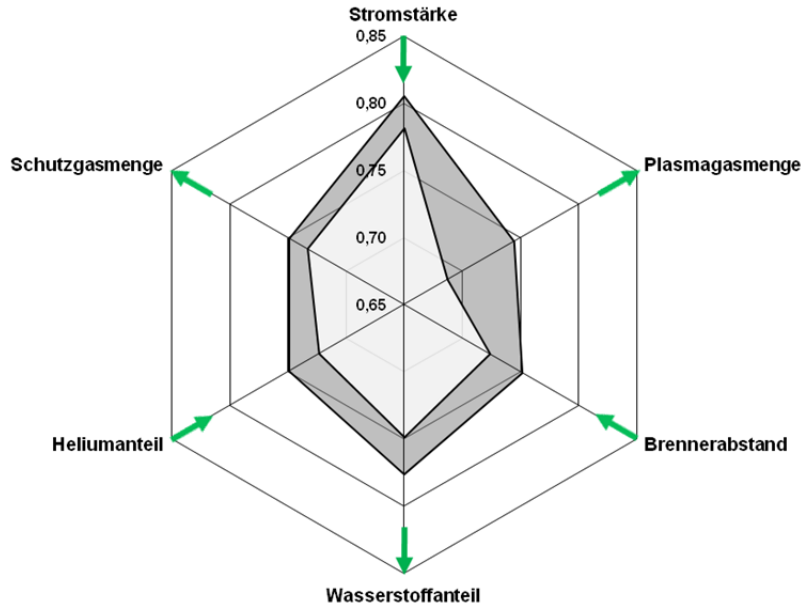


Abbildung 6-2: Darstellung der ermittelten Einflussgrößen auf den Lichtbogenwirkungsgrad des Plasmaschweißprozesses

Lichtbogenwirkungsgrad reduzierende Faktoren:

- Erhöhung der Schweißstromstärke
- Erhöhung des Elektrodenabstandes zum Werkstück
- Erhöhung des Heliumanteils im Schutzgas
  Grund hierfür ist, dass die Wärmeleitung im Heliumschutzgas besser ist, was einen erhöhten Wärmetransport an die Umgebung (Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie des Lichtbogens) und an den externen Brennerkühlkreislauf der Schweißenergiequelle bewirkt.

Faktoren, welche den Lichtbogenwirkungsgrad erhöhen:

- Verwendung von Wasserstoff im Schutzgas
  Dadurch wird der Lichtbogen zusätzlich eingeschnürt und die Energieübertragung konzentrierter.

Untersuchte Faktoren, welche den Lichtbogenwirkungsgrad nicht beeinflussen:

- Reduzierung des Elektrodenrückstandes
  Jedoch sinkt der Schmelzwirkungsgrad proportional mit der Schweißleistung ab. Gleichzeitig sinkt die abgegebene Kühlungsenergie an den Plasmabrenner und an den externen Brennerkühlkreislauf der Schweißenergiequelle.

6.2 Schweißversuche mit abschmelzender Elektrode

6.2.1 Metallschutzgasschweißen

Der effektive Wirkungsgrad beim Metallschutzgasschweißen ist kein globaler Mittelwert von $\eta_{th} = 0{,}80$, wie er in DIN EN 1011-1 [DIN09] festgelegt ist. Vielmehr muss eine Einteilung nach der Lichtbogenart erfolgen:

- Kurzlichtbogen $\eta_{eff} = 0{,}85$
- Impulslichtbogen $\eta_{eff} = 0{,}77$
- Sprühlichtbogen $\eta_{eff} = 0{,}70$

Faktoren, welche den effektiven Wirkungsgrad reduzieren:

- Erhöhung der Schweißstromstärke
  Die Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie des Lichtbogens und die übertragene Energie an den externen Brennerkühlkreislauf der Schweißenergiequelle nehmen stark zu. Gleichzeitig steigt der Schmelzwirkungsgrad.
- Erhöhung der Schweißspannung
  Die Konsequenz ist ein starker Anstieg der Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie des Lichtbogens.

Faktoren, welche den effektiven Wirkungsgrad erhöhen sind:

- Erhöhung der Schutzgasmenge
  Der Wärmetransport von der Elektrode zum Bauteil wird verbessert.
- Erhöhung des Helium- oder CO_2-Anteils im Schutzgas
- Erhöhung des Kontaktrohrabstandes
  Die energetisch effektivere Widerstandserwärmung im Zusatzwerkstoff steigt. Aber in Folge dessen wird eine geringere Schweißleistung benötigt und die Einbrandgeometrie in den Grundwerkstoff wird kleiner.
- Der effektive Wirkungsgrad beim MIG-Aluminiumschweißen ist durchschnittlich um 7 % höher. Die Grund- und Zusatzwerkstoffauswahl hat zudem einen Einfluss auf die benötigte Schweißleistung und den resultierenden Schmelzwirkungsgrad.

Untersuchte Faktoren, welche den Lichtbogenwirkungsgrad nicht beeinflussen:

- Erhöhung des Schweißgeschwindigkeit
  Jedoch sinkt der Schmelzwirkungsgrad. Dabei bildet sich ein von der Schweißgeschwindigkeit abhängiges Optimum der Einbrandgeometrie aus.

6.2.2 Wärmeminimiertes Metallschutzgasschweißen

Eine Klassifizierung der wärmeminimierten Fügeverfahren ist innerhalb der untersuchten Leistungsbereiche nicht möglich. Beim betrachteten Lötprozess mit CuSi3 Zusatzwerkstoff hatte der CMT-Prozess den höchsten effektiven Wirkungsgrad, gefolgt vom ColdArc-Prozess, dem Impulslöten und dem MIG-AC-Lötprozess.
Hingegen wurde beim Schweißprozess mit AlMg5 der höchste effektive Wirkungsgrad beim ColdArc-Prozess ermittelt. Anschließend folgte der CMT-Prozess, das Impulsschweißen und das MIG-AC-Schweißen, wobei die Ergebnisse des effektiven Wirkungsgrades ab einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von $v_D = 4$ m/min fast identisch sind.
Zudem wurde festgestellt, dass die prozessgeregelten (z.B. ColdArc) bzw. anlagengeregelten (z.B. CMT) Kurzlichtbogenprozesse einen leicht höheren effektiven Wirkungsgrad als klassische MSG-Verfahren aufweisen.

Die entscheidendere Größe ist jedoch die benötigte Schweißleistung, welche bei prozessgeregelten und anlagengeregelten Prozessen teilweise erheblich geringer ist und somit der absolute Wärmeeintrag in das Bauteil sinkt. Bei allen vier untersuchten wärmeminimierten Schweißprozessen fiel der effektive Wirkungsgrad mit ansteigender Schweißleistung geringfügiger ab, als beim Standard-MSG-Schweißprozess. Ursache hierfür ist die verfahrensbedingt gezielte Vermeidung von langen Kurzschlussphasen und großen Lichtbogenlängen. Darüber hinaus ist der sich einstellende Wirkungsgrad bei diesen „künstlichen" Lichtbogenarten stark vom Prozessdesign abhängig. Dies führte teilweise zu nicht interpretierbaren Wirkungsgradsprüngen.

6.2.3 Analyse der Tropfentemperatur beim MSG-Schweißen

Die Verwendung des beschriebenen Tropfenkalorimeters ermöglicht eine differenzierte Betrachtung des Energieeintrages beim MSG-Schweißen. So kann prozess- und parameterabhängig der übertragene Energieanteil des Schweißtropfens sowie des Lichtbogens untersucht werden. Der jeweilige Einfluss auf das Schweißergebnis wurde durch die Analyse von Querschliffen ermittelt.

Drahtvorschubgeschwindigkeit
Beim betrachteten Impulslichtbogen steigt mit zunehmender Drahtvorschubgeschwindigkeit die Tropfentemperatur kontinuierlich an (v_D = 4…8 m/min → ΔT_{Tr} = + 100 K). In Relation zur benötigten Schweißleistung betrachtet, nimmt der übertragene Energieanteil durch den abgeschmolzen Zusatzwerkstoff zu. Gleichzeitig sinkt der Anteil des Energieeintrages durch den Lichtbogen ab (siehe Abbildung 5-39). Gründe hierfür sind einerseits die steigende Widerstandserwärmung im freien Drahtende und die zunehmende Lichtbogentemperatur.

Elektrodendurchmesser
Die Erhöhung des Elektrodendurchmessers bewirkt eine Senkung der Tropfentemperatur (d_{ZW} = 1,0…1,2 mm → ΔT_{Tr} = - 100 K). Dabei nimmt der übertragene Energieanteil durch den abgeschmolzenen Zusatzwerkstoff ab und ein größerer Leistungsanteil wird durch den Lichtbogen übertragen. Die Summierung der Energieanteile zeigt jedoch, dass Prozentual betrachtet der absolute Energieeintrag in das Bauteil unabhängig vom Elektrodendurchmesser ist.

Lichtbogenart
Im Vergleich zwischen dem Impuls- und Sprühlichtbogen, ist die Tropfentemperatur bei der elektrisch nicht forcierten Ablösung des Zusatzwerkstoffs (Sprühlichtbogen) höher. Ein Grund hierfür ist der kleinere Tropfendurchmesser und die höhere Schweißleistung beim Sprühlichtbogenprozess.

Schutzgaszusammensetzung
Die vermehrte Zumischung von Kohlendioxid in das Argonschutzgas bewirkt eine Zunahme der Tropfentemperatur (100 % Ar zu 90 % Ar mit 10 % CO_2 → ΔT_{Tr} = + 100 K). Ursachen sind unter anderem die bessere thermische und elektrische Leitfähigkeit des Schutzgases sowie die stärkere Einschnürung und Konzentration des Lichtbogens.

Länge des freien Drahtendes
Bei der Verlängerung des freien Drahtendes ist kontinuierlich eine geringere Schweißleistung notwendig, um die gleiche Abschmelzleistung zu realisieren. Im Bereich zwischen einem Brennerabstand von s = 9…18 mm steigt die Tropfentemperatur um ΔT_{Tr} = +150 K an. Im folgenden Verlauf sinkt die Tropfentemperatur wieder ab. Während der übertragene Energieanteil durch den Lichtbogen abnimmt, steigt der prozentuale Leistungsanteil des abgeschmolzenen Zusatzwerkstoffs stark an. Die Analyse der Querschliffe zeigt eine kontinuierliche Reduktion des Einbrandes. Das beweist, dass der Einbrand beim MSG-Schweißen durch die übertragene Energie des Lichtbogens erzeugt wird und zweitrangig durch das Auftreffen des überhitzten Zusatzwerkstoffs.

Zusammengefasst wurden mittlere Tropfentemperaturen in einem Bereich zwischen T_{Tr} = 2.350…2.700°C ermittelt. Vergleichbare Tropfentemperaturniveaus wurden spektroskopisch am INP Greifswald [Lic10] im Rahmen des Clusters „Lichtbogenschweissen“ ermittelt. Die Untersuchungen zeigen zudem, dass eine ausschließlich gezielte Änderung der Tropfentemperatur im Schweißprozess nicht möglich ist. Grund dafür ist, dass die Änderung der Tropfentemperatur stets an die Anpassung mehrerer Schweißparameter gebunden ist und in Folge dessen Verschiebungen der Energieanteile im Lichtbogenbereich auftreten. Ebenfalls zeigen die Ergebnisse, dass der Lichtbogen und dessen Intensität den entscheidenden Einfluss auf die Entstehung des Einbandes in den Grundwerkstoff besitzt. Die Temperatur der Tropfen hingegen hat eine untergeordnete Wirkung auf die Ausbildung der Einbrandgeometrie.

Die Werte der summierten Wirkungsgrade (Lichtbogen- und Tropfenwirkungsgrad) liegen durchschnittlich 7 % unter denen des effektiven Wirkungsgrades, welcher kalorimetrisch am Bauteil ermittelt wurden. Der Unterschied zwischen gezielt veränderten Parametern wirkt sich zudem geringer auf den summierten Wirkungsgrad aus, als auf den kalorimetrisch ermittelten effektiven Wirkungsgrad. Jedoch sind die Tendenz und deren grundsätzlicher Verlauf identisch. Neben der kalorimetrischen Bestimmung der Erwärmung im Bauteil ist es somit grundsätzlich möglich den Wärmeeintrag in das Bauteil auch über die Summierung der Tropfen- und Lichtbogenwirkungsgrade zu ermitteln. Die beschriebenen Abweichungen sind einerseits auf das Austreten des Lichtbogens aus der Rohrkathode zurückzuführen, da in Folge dessen nicht die gesamte Lichtbogenenergie gemessen wird. Andererseits kühlen die Tropfen auf dem Weg zwischen dem Selektieren und dem Eintreten in die Kalorimeterflüssigkeit ab, weshalb die Tropfen einen geringeren, messbaren Energieeintrag erzeugen.

6.2.4 Analyse des Spannungsabfalls beim MSG-Schweißen

Durch die Analyse des Spannungsabfalls konnten die beschriebenen Begründungen zum Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit, der Schutzgasart und des Kontaktrohrabstandes auf den Energiefluss bestätigt werden. So stiegen beispielsweise der Spannungsabfall im freien Drahtende und in der Lichtbogensäule, bei Erhöhung der Drahtvorschubgeschwindigkeit. Messbar waren eine höhere Tropfentemperatur und eine vermehrte Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie des Lichtbogens. Die vermehrte Spannungsdifferenz in den Randschichten, durch die Beimischung von CO_2 in das Argonschutzgas, führte unter anderem zu einem höheren effektiven Wirkungsgrad und zur Erhöhung des Energieeintrags in das Kalorimetermedium. Auch die stärkere Erwärmung des freien Drahtendes und der folglich gesteigerte Widerstand im Zusatzwerkstoff bei erhöhtem Kontaktrohrabstand wurde bei der Analyse des Spannungsabfalls deutlich.
Als ergänzendes Werkzeug zur energetischen Bilanzierung von Schweißprozessen und zur Visualisierung von Energieverteilungen ist somit die Betrachtung des Spannungsabfalls im Schweißprozess geeignet. Eine absolute Betrachtung des Wirkungsgrades oder Energieeintrages in das Bauteil kann aus jetziger Sicht nicht realisiert werden, da die berechneten Werte kaum mit den kalorimetrisch gemessenen Messwerten übereinstimmen.

6.2.5 Messung der $t_{8/5}$-Zeiten

Die Messungen der $t_{8/5}$-Zeiten mit Hilfe von in das Bauteil eingebrachten Thermoelementen ergaben für un- und niedriglegierte Werkstoffe eine sehr gute Übereinstimmung mit den kalorimetrisch gemessenen Ergebnissen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die kalorimetrisch ermittelten Energieeinträge realistisch sind. Somit beschreibt der effektive Wirkungsgrad den absoluten Wärmeeintrag im Verhältnis zur Schweißleistung.
Messungen mit austenitischem Werkstoff ergaben, dass eine höhere Übereinstimmung mit der berührungslosen Messung der $t_{8/5}$-Zeiten, als mit in das Bauteil integrierten Thermoelementen besteht.

6.2.6 Unterpulverschweißen

Die Analysen des Wärmeeintrages in das Bauteil beim Unterpulverschweißen zeigten eine starke Abhängigkeit vom verwendeten Schweißpulvertyp. Trotz identisch eingestellter Parameter (Konstantspannungskennlinie) ist der effektive Wirkungsgrad bei der Verwendung von Aluminat Rutilem Schweißpulver um 7 % höher, als bei Aluminat Fluoridem Schweißpulver.
Da eine Konstantspannungskennlinie der Schweißenergiequelle verwendet wurde, steigt der effektive Wirkungsgrad mit zunehmender Schweißstromstärke an. Gründe hierfür sind unter anderem die sich verkleinernde Schweißkaverne und dem folglich besseren Energieeintrag in das Bauteil und der reduzierten Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie des Prozesses.
Untersuchungen des Einflusses der Schweißspannung zeigen, dass der effektive Wirkungsgrad mit zunehmender Schweißspannung abnimmt. Dabei wird die Geometrie der Schweißkaverne stetig größer, was unter anderem den Energieeintrag in das Bauteil senkt und die für den Schweißprozess nicht nutzbaren Energieanteile - Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie - steigert.
Im Durchschnitt konnte pulverneutral betrachtet ein mittlerer effektiver Wirkungsgrad von $\eta_{eff} = 0{,}92$ ermittelt werden. Das heißt 8 % der Schweißleistung trägt nicht zur Erwärmung des Bauteils und zur Schmelzebildung bei.

6.3 Vorschlag zur Anpassung der Wirkungsgrade innerhalb der Normung

Wie schon im Abschnitt 3.2 Absatz h) beschrieben, wird in der aktuellen Normung (DIN EN 1011-1 [DIN09]) der relative thermische Wirkungsgrad der Schweißprozesse dargestellt. Diese Werte werden somit im Verhältnis zum „künstlich bzw. nachträglich“ als 100 % gesetzten Energieeintrag des Unterpulverschweißens beschrieben.
Da der kalorimetrisch ermittelte mittlere effektive Wirkungsgrad des Unterpulverschweißens $\eta_{eff} = 0{,}92$ beträgt, müsste dieser mit dem Faktor $F = 1{,}087$ multipliziert werden, um einen relativen effektiven Wirkungsgrad von 100 % zu erreichen. Werden folglich alle kalorimetrisch ermittelten Wirkungsgrade mit diesem Faktor multipliziert, müssten die Werte innerhalb der Norm, wie in Tabelle 6-1 rechte Spalte dargestellt, größer werden.

Da die berechneten effektiven Wirkungsgrade aus den gemessenen $t_{8/5}$-Zeiten (durch Umstellen von Formel 3.1) mit den kalorimetrisch ermittelten Wirkungsgraden übereinstimmen, ist zu empfehlen, dass die in der Norm (DIN EN 1011-1 [DIN09]) verwendeten relativen thermischen Wirkungsgrade geändert werden. Stattdessen sollte der kalorimetrisch ermittelte, absolute Lichtbogen- bzw. effektive Wirkungsgrad für die Norm und Regelwerke sowie neuer Literaturquellen verwendet werden.

Der zuständige Normenausschuss – NA 092-00-04 AA „Arbeitsausschuss Qualitätssicherung beim Schweißen“ (DVS AG Q 2) wurde im Dezember 2013 darüber informiert und dem Gremium ein geeigneter Vorschlag zur Anpassung von DIN EN 1011-1 unterbreitet. Auf deutscher Ebene (DIN) wurde diese Anpassung akzeptiert und wurde im April 2014 auf europäischer Ebene (EN)- ISO/TC 44/SC 10 „Unification of requirements in the field of welding“ vorgestellt und diskutiert. Der Vorschlag zur Anpassung wird derzeitig im Gremium international verteilt. Die Meinung ist, dass der Wirkungsgrad für die Berechnung der Wärmeeinbringung in das Bauteil sowie für Prozesssimulationen unumgänglich ist. Für die Berechnung der Streckenenergie ist dieser Faktor jedoch von unter geordneter Bedeutung.

Tabelle 6-1: Anpassung der Wirkungsgrade in Relation zum UP-Schweißen (MAG-Schweißen mit Stahlwerkstoff, MIG-Schweißen mit Aluminium Werkstoff)

Prozessnr.	Schweißverfahren	Wirkungsgrad		
		laut DIN EN 1011-1	kalorimetrisch	angepasst an UP
12	UP-Schweißen	1,00	0,94	1,00
135	MAG- Kurzlichtbogen/wärmeminimiert	0,80	0,85	0,92
135	MAG- Sprühlichtbogen	0,80	0,70	0,76
135	MAG-Impulslichtbogen	0,80	0,77	0,84
131	MIG- Kurzlichtbogen (Al)	0,80	0,88	0,95
131	MIG- Sprühlichtbogen (Al)	0,80	0,77	0,84
131	MIG-Impulslichtbogen (Al)	0,80	0,83	0,90
141	WIG-Schweißen	0,60	0,75	0,81
15	Plasmaschweißen	0,60	0,74	0,80

Die Auswirkung unterschiedlicher effektiver Wirkungsgrade auf die Abkühlzeiten von MAG geschweißten Werkstoffen wird durch eine Beispielrechnung in Tabelle 6-2 dargestellt. In [Thy13] und [Sch13] wird für temperatursensible Werkstoffe, wie den S960QL (1.8933), eine $t_{8/5}$-Zeit von $t_{8/5}$ = 5…10 s empfohlen, um die mechanisch technologischen Gütewerte einzuhalten.
Für die Berechnung der Abkühlzeit $t_{8/5}$–Zeit wurden einerseits die spezifischen Werkstoffeigenschaften für die Berechnung mit Formel 3.1 verwendet. Andererseits wurde die vereinfachte Formel 3.2 für un- und niedriglegierte Stähle verwendet. Beim Vergleich beider Rechnungen werden durchschnittliche Abweichungen von $\Delta t_{8/5}$ = ±0,3 s deutlich. Dieser Fakt beweist, dass die Fehlerquellen in der Berechnung der Abkühlzeiten vielfältig sind.

Tabelle 6-2: Berechnung der Abkühlzeiten $t_{8/5}$ mit verschiedenen Wirkungsgraden (MAG-Schweißen: U_S = 26,5 V; I_S = 225 A; v_S = 50 cm/min; b = 8 mm)

effektiver Wirkungsgrad	Abkühlzeit $t_{8/5}$; zweidimensioanle Wärmeableitung	
	real nach Formel 3.1	vereinfacht nach Formel 3.2
	in s	in s
0,85	6,20	6,57
0,80	5,82	5,49
0,69	4,33	4,09

Tabelle 6-2 zeigt allgemein, dass die Berechnung der Abkühlzeit, unter Annahme eines effektiven Wirkungsgrades von η_{eff} = 0,85…0,80, einen Wert von $t_{8/5}$-Zeit = 6 s ergibt. Das heißt, mit den gewählten Schweißparametern ist eine qualitätsgerechte Schweißung möglich. Wird jedoch ein effektiver Wirkungsgrad von η_{eff} = 0,69 verwendet, wie z.B. bei Anwendung des Sprühlichtbogens, ergibt sich eine $t_{8/5}$-Zeit = 4 s. Diese liegt außerhalb der Toleranz und macht eine qualitätsgerechte Schweißung schwierig. Es können Kaltrisse oder Aufhärtungen entstehen.

7 Aussichten

Innerhalb der Untersuchungen zur energetischen Bilanzierung von Schutzgasschweißverfahren wurden neue Messmethoden entwickelt, um den Energiefluss beim Schweißen zu analysieren.
Es wurde deutlich, dass der Energieeintrag in das Bauteil bei weitem keine konstante Größe ist, sondern von einer Vielzahl an Parametern beeinflusst wird. Neben dem Schweißprozess an sich, können vor allem die Schweißstromstärke, das Schutzgas, die Schweißspannung und der Brenner- bzw. Elektrodenabstand vom Grundwerkstoff den Wärmeeintrag erheblichen verändern. Für die Analyse von Einflussgrößen auf den Wärmeeintrag verschiedener Schweißverfahren wurde eine Vielzahl an Parametern betrachtet, jedoch bestehen noch offene Punkte, wie die Gestaltung der Pulsformung, der Einfluss wechselnder Elektrodenpolung beim MSG-Schweißen oder das MSG-Hochleistungsschweißen. Auch Prozesskombinationen, wie das Laser-MSG-Hybridschweißen oder das Plasma-MIG-Schweißen haben Untersuchungspotenzial.
Da die Schweißversuche anhand von Blindnahtgeometrien durchgeführt wurden, ist der Einfluss verschiedener Schweißnahtgeometrien und Schweißnahtpositionen zu untersuchen. So kann Beispielsweise die Wärmeleitungs-, Wärmestrahlungs- und Wärmeströmungsenergie des Lichtbogens dazu beitragen die Nahtflanken oder die umliegenden Bauteilgeometrien zusätzlich zu erwärmen. Dadurch könnten die Formfaktoren F2 und F3 verschiedener Nahtformen in DIN EN 1011-2 [DIN01] überarbeitet und der reale Wärmeeintrag in das Bauteil genauer ermittelt werden.
Eine Evaluierung des kalorimetrisch ermittelten Energieeintrages spezifischer Werkstoffe kann zudem an definierten Aufheiz- und Abkühlregimen von definierten Proben mit Hilfe eines Umform- und Abschreckdilatometers erfolgen. Hierfür müsste das entstandene Gefüge der geschweißten Bauteile mit dem des Dilatometers verglichen werden. Dadurch könnten Rückschlüsse auf das Temperaturregime im Werkstoff gezogen werden.

Die Genauigkeit der Kalorimetrie kann unteranderem durch folgende Anpassungen weiter erhöht werden:

- Verwendung eines präziseren Systems zur Bestimmung der elektrischen Messgrößen, wodurch der Fehleranteil von $\Delta P_S = 1{,}15$ % gesenkt wird.
- Durchführung der Fügeversuche in einer Klimazelle, wodurch die Umgebungseinflüsse Luftzug, Sonnenstrahleneinfall und jahreszeitliche Schwankungen der Umgebungstemperatur eliminiert werden.

Die gewonnen Ergebnisse müssen noch in die aktuelle Normung integriert werden. Hierzu sind folgende Arbeitsschritte notwendig:

- Vorstellung der Problematik in zuständigen Fachgremien
- Erarbeitung eines Umsetzungskonzepts
- Integration in die Überarbeitung der Norm
- europäische Bestätigung des Normenvorschlags (EN-Status)
- → Aktualisierung der Norm DIN EN 1011-1 [DIN09]

Um den Unterschied zwischen relativem und absolutem Wirkungsgrad darzustellen, wurde der effektive Wirkungsgrad des Unterpulverschweißens ausschließlich für die Einflussgrößen Schweißpulver, Schweißstromstärke und Schweißspannung innerhalb eines begrenztem Betrachtungsbereiches untersucht. Das Ergebnis ist ein durchschnittlicher effektiver Wirkungsgrad von $\eta_{eff} = 0{,}92$. In Zukunft muss der Energieeintrag in das Bauteil durch das Unterpulverschweißens weiter analysiert und strukturiert ausgewertet werden. Hierzu zählt neben der detaillierten Analyse des Einflusses des Schweißpulvers, der Einfluss des Elektrodendurchmessers und Werkstoffs, sowie die Kombination mehrerer Schweißprozesse in einer Schweißkaverne.

Quellenverzeichnis

Fachbücher

[And68] Anders, W.: *Einfluß der Schweißverfahren und der Schweißbedingungen auf die Wärmeeinbringung beim Schweißen*. In: Schweißtechnik 18, Heft 7, S. 326…328, 1968

[Bau90] Baum, L.; Fichter, V.; Fischer, H.: *Der Schutzgasschweisser, Leitfaden für Ausbildung und Praxis Teil 2: MIG-/MAG-Schweißen*, 3. Auflage. In: DVS Verlag, 1990 Düsseldorf

[Bec66] Becker, G.: *Berechnung von Wärmemengen bei Lichtbogen-schweißverfahren*. In: Schweißtechnik 16, Heft 1, S. 18…19, 1966

[Dil05] Dilthey, U.: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1*. In: Springer Verlag, 3., bearbeitete Auflage, VDI-Buch, 2005, ISBN 3-540-21673-1

[Fah09] Fahrenwaldt, H. J.; Schuler, V. :*Praxiswissen Schweißtechnik-Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. In: GWV Verlage GmbH, 3., aktualisierte Auflage, Wiesbaden, 2009

[Ger06] Gerthsen, T. : *Chemie für den Maschinenbau 1.* In: 1. Auflage Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2006, ISBN 978-3-86644-079-1

[Gsi09] *SFI Aktuell 2009*. In: DVS Verlag, Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Düsseldorf, 2009

[Hem80] Hemminger, W.; Höhne, G.: *Grundlagen der Kalorimetrie*. In: Verlag Chemie GmbH, Akademie Verlag Berlin, 1980

[Hem89] Hemminger, W: *Methoden der thermischen Analyse*. In: Springer Verlag, Berlin, 1989

[Kil91] Killing, R.: *Handbuch der Schweißverfahren – Lichtbogenschweiß-verfahren.* In: Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Düsseldorf 1999, ISBN: 3-87155-087-6

[Kil96] Killing, R.: *Angewandte Schweißmetallurgie*. In: Deutscher Verlag für Schweißtechnik GmbH, Düsseldorf, 1996, ISBN 3-87155-130-9

[Mat06] Matthes, K.-J.; Richter, E.: *Schweißtechnik*. In: Fachbuchverlag Leipzig, 3., aktualisierte Auflage, Carl Hanser Verlag 2006, ISBN-13: 978-3-446-40468-4

[Mül83] Müller, P.; Wolff, L.: *Handbuch des Unterpulverschweißens*. In: DVS Verlag, Teil 1 und 2, Düsseldorf, 1983, ISBN 3 87 155066 3

[Ryk57] Rykalin: *Berechnung der Wärmevorgänge beim Schweißen*. In: VEB Technik Verlag, Berlin, 1957

[Sch85] Schellhase, M.: *Der Schweißlichtbogen – ein technologisches Werkzeug*. In: VEB Verlag Technik, 1. Auflage, Berlin, 1985

[Sch92] Schulze, G.; Krafka, H.; Neumann, P.: *Schweisstechnik*. In: VDI-Verlag GmbH, 1. Auflage, Düsseldorf 1992, ISBN 3-18-401007-4

[Sch03] Schröter, F.: *Höherfeste Stähle für den Stahlbau – Auswahl und Anwendung*. Sonderdruck. In: Bauingenieur Heft 9, S. 426-432, 2003

[Sch04] Schulze, G.: *Die Metallurgie des Schweißens*. In: Springer-Verlag, 3., neubearbeitete und erweiterte Auflage, 2004, ISBN 3-540-20649-3

Artikel aus Fachzeitschriften

[Aru11] Arul, S.; Sellamuthu, R.: *Application of a simplified simulation method to the determination of arc efficiency of gas tungsten arc welding (GTAW) and experimental validation.* In: International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering, Band 4, Nr. 3, S. 265...280, 2011, DOI: 10.1504/IJCMSSE.2011.042824, ISSN: 1753-3465

[Atk02] Atkins, G.; Thiessen, D.; Nissley, N.; Adonyi, Y.: Welding process effects in weldability testing steels. In: Welding Journal, Band 81, S. 61s…68s, April 2002, ISSN: 0043-2296

[Bec56] Becker, G.; Rieger, R.: *Schweißkalorimetrie (Teil 1)*. In: Schweißtechnik, 6. Jahrgang, 47. Mitteilung aus dem ZIS, Heft 1, S. 12…15, 1956

[Ber12] Berthier, A.; Paillard, P.; Carin, M.; Pellerin, S.; Valensi, F.: *TIG and A-TIG welding experimental investigations and comparison with simulation, Part 2-arc constriction and arc temperature.* In: Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 17, Nr. 8, S. 616…620, 2012, ISSN 1362-1718

[Bol95] Boldyrev, A.M.; Birzhev, V.A.; Chernykh, A.V.: *Effect of main droplet transfer characteristics on the mean electrode burnoff rate*. In: Welding International, Band 9, Heft 8, S. 654-656, 1995, ISSN: 0950-7116

[Bos92] Bose, T.K.: *Energy transfer during arc plasma welding*. In: Thermomechanical Aspects of Manufacturing and Materials Processings, S. 187…191, New York, 1992, ISBN 0-89116-826-5

[Can05] Cantin, G.M.D.; Francis, J.A.: *Arc power and efficiency in gas tungsten arc welding of aluminum*. In: Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 10, Nr. 5, S. 200…210, 2005

[Cha90] Chandal, R.S.: *Electrode melting and plate melting efficiencies of submerged arc welding and gas metal arc welding.* In: Materials Science and Technology, Vol. 6, S. 772…777, August 1990, DOI: http://dx.doi.org/10.1179/026708390790193691

[Cve09] Cvetkovski, S.; Karjalainen, L. P.; Kujanpää, V.; Ahmad, A*.: Estimation of heat input in TIG and laser welding of stainless steel sheet.* In: Welding in the World, Band 53, S. 323…328, 2009, ISSN: 0043-2288

[DuP95] DuPont, J. N.; Marder, A.R.: *Thermal efficiency of arc welding processes*. In: Welding journal, Band 74, American Welding Society, S. 406s…416s, 1995, ISSN 0043-2296

[Dut94] Dutta, P.; Joshi, Y.; Franche, C.: *Determination of Gas Tungsten Arc Welding Efficiencies.* In: Experimental Thermal and Fluid Science, Nr. 9, S. 80…89, 1994, ISSN 0894-1777

[Dze99] Dzelnitzki, D.: *Vergrößerung des Einbringvolumens oder Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit? – Vorteile des MAG-Hochleistungsschweißens*. In: Schweissen und Schneiden, Nr. 9, S. 556…564, 1999, ISSN: 0036-7184

[Ege11] Egerland, S.; Pépe, N.; Colegrove, P.A.; Yapp, D.; Leonhartsberger, A.; Scotti, A.: *Measuring the process efficiency of controlled gas metal arc welding processes*. In: Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 16, Nr. 5, S. 412…417, 2011

[Eva98] Evans, D.M.; Huang, D.; Nunes, A.C.; McClure, J.C.: *Arc efficiency of plasma arc welding*. In: Welding journal, Band 77, American Welding Society, S. 53s-58s, 1998, ISSN 0043-2296

[Fue89] Fuerschbach, P. W.; Giedt, W. H.; Tallerico, L. N.: *GTA welding efficiency: calorimetric and temperature field measurements*. In: Welding journal, Band 68, American Welding Society, S. 28s…32s, 1989, ISSN 0043-2296

[Fue91] Fuerschbach, P.W.; Knorovsky, G.A.: *A study of melting efficiency in plasma arc and gas tungsten arc welding*. In: Welding journal, Band 70, American Welding Society, S. 287s…297s, 1991, ISSN 0043-2296

[Fue98] Fuerschbach, P.W.: *Cathodic Cleaning and Heat Input in Variable Polarity Plasma Arc Welding of Aluminum*. In: Welding Journal, Band 77, American Welding Society, S. 76s…85s, 1998, ISSN 0043-2296

[Heu59] Heumann, T.; Predel B.: *Bestimmung der Erstarrungsenthalpien von Metallen und Legierungen durch Differential-Thermoanalyse*. In: Wiley-VCH Verlag GmbH &Co. KGaA, Ausgabe 8, Band 63, Weinheim, S. 988…994, 1959

[Hua10] Huang, M. M.; Zuo, D. W.; Wang, H. F.; Li, X. F.; Wang, M.: *Simulation of temperature field during double-sided multi-layer TIG welding and determination of its thermal efficiency.* In: Key Engineering Materials, Band 426…427, S. 532…536, 2010, ISBN: 087849300X

[Jen06] Jenkins, N.T.; Mendez, P.F.; Eagar, T.W.: *Effect of Arc Welding Electrode Temperature on Vapor and Fume Composition*. In: Welding Journal, S. 491…496, 2006, ISSN 0043-2296

[Jos03] Joseph, A.; Harwig, D.; Farson, D.F.; Richardson, R.: *Measurement and calculation of arc power and heat transfer efficiency in pulsed gas metal arc welding*. In: Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 8, No. 6, S. 400…406, 2003

[Jun13] Jun, Ni; Hongming, Gao: *Effect of the wire Temperature on the Weld Formation in GMAW.* In: Advanced Materials Research, Vol. 652-654, S. 2289…2292, 2013, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.652-654.289

[Lap03] Lapin, I.; Kosovich, V.; Potapov, A.; Savinov, A.: *Energy characteristics of the alternating current arc with right-angled pulses in welding aluminum alloy*. In: Welding International, Vol. 17, Nr. 3, S. 217…220, 2003

[Lat02] Latteier, R.; Nittka, R.: *Der Einfluss des MAG-Schweißens mit Impulslichtbogen und pendelnder Brennerbewegung auf die $t_{8/5}$-Zeit*. In: Schweissen und Schneiden, Band 54, Heft 8, S. 428…433, 2002, ISSN: 0036-7184

[LuM89] Lu, M. J.; Kou, S.: *Power Inputs in Gas Metal Arc Welding of aluminum – Part 1*. In: Welding Journal, Vol. 68, S. 382…388, 1989

[Mar96] Marder, A.R.; DuPont, J.N.: *Dilution in Single Pass Arc Welds*. In: Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 27B, S. 481…489, 1996

[Met94] Metzbower, E.A.; DeMarco, L.; Denney, P.E.; Pratt, W.A.: *Experimental Laser Welding Efficiency*. In: Laser materials processing, Band 77, S. 152…159, 1994

[Mis05] Mishra, S.; DebRoy, T.: *A heat-transfer and fluid-flow-based model to obtain a specific weld geometry using various combinations of welding variables.* In: Journal of Applied Physics 98, p. 044902 (S. 1…10), 2005, ISSN: 1089-7550

[Mal06] Malin, V.; Sciammarella, F.: *Controlling Heat Input by Measuring Net Power*. In: Welding Journal, Juli 2006, S. 44…50, 2006, ISSN 0043-2296

[Orl03] Orlowicz, A.W.; Trytek, A.: *Structural and operating aspects of rapid solidification of surface layer of spheroidal graphite iron castings.* In: International Journal of Cast Metals Research, Band 16, Heft 5, S. 496…504, 2003, ISSN: 1364-0461

[Pro76] Probst, R.; Hartung, F.; Annecke, A.: *Betrachtungen zum Wärmewirkungsgrad beim CO_2-Schweißen*. In: ZIS Mitteilungen, Heft 2, S. 171…182, 1976, ISSN: 0044-1465

[Pro82] Probst, R.; Hartung, F.: *Energetische Betrachtungen zum MAG-Schweissen von Dickblechen*. In: Schweißtechnik Berlin, Band 32, Heft 8, S. 345…348, 1982, ISSN: 0036-7192

[Pro96] Probst, R.; Zwickert, H.: *Lichtbogen-Schmelzschweißprozess-energetische Bilanz*. In: Schweissen und Schneiden, DVS Berichte Band 176, S. 19…26, 1996, ISBN 3-87155-481-2

[Qui03] Quintana, R.; Cruz, A.; Perdomo, L.; Castellanos, G.; García, L.L.; Formoso, A.; Cores, A.: *Study of the transfer efficiency of alloyed elements in fluxes during submerged arc welding process.* In: Revista de Metalurgia, Band 39, Nr. 1, S. 25…34, 2003, ISSN: 0034-8570

[Rou10] Rouffet, M. E.; Wendt, M.; Gött, G.; Kozakov, R.; Schöpp, H.; Weltmann, K. D.: *Spectroscopic investigation of the high-current phase of a pulsed GMAW process.* In: British Journal of Applied Physics, Band 43, S. 1…9, Artikelnr.: 434003, 2010, ISSN: 0022-3727

[Sch13] Schröpfer, D.; Kannengießer, T.; Lausch, T.: *Untersuchungen zum Einfluss der Wärmeführung auf die Eigenspannungsausbildung und Gesamtbeanspruchung in Schweißverbindungen aus hochfestem Feinkornbaustahl*. In: DVS Congress 2013, DVS-Berichte Band 296, 2013, ISBN: 978-3-87155-614-2

[She12] Shen, S.; Oguocha, I. N. A.; Yannacopoulos, S.: *Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded ASTM A709 Grade 50 steel joints.* In: Journal of Materials Processing Technology, Band 212, Heft 1, S. 286…294, 2012, ISSN: 0924-0136

[Sod11] Soderstrom, E.J.; Scott, K.M.; Mendez, P.F.: *Calorimetric Measurement of Droplet Temperature in GMAW*. In: Welding Journal, Vol. 90, S. 77s…84s, April 2011

[Sod08] Soderstrom, E.J.; Mendez, P.F.: *Metal Transfer during GMAW with Thin Electrodes and Ar-CO_2 Shielding Gas Mixtures*. In: Welding Journal, Vol. 87, S. 124s…133s, Mai 2008

[Tus96] Tusek, J.: *Influence of wire extension length on the welding process*. In: International Journal for the Joining of Materials, Band 8, Heft 3, S. 113…119, 1996, ISSN: 0905-6866

[Tus97] Tusek, J.: *Influence of shielding medium on deposition rate in arc welding.* In: Science and Technology of Welding and Joining, Band 2, Heft 4, S. 155…159, 1997, ISSN: 1362-1718

[Tus99] Tusek, J.: *Wirkungsgrad des Lichtbogenschweißens*. In: Schweißen und Schneiden, Band 51, Heft 7, S. 406…411, 1999, ISSN: 0036-7184

[Uno04] Unocic, R.R.; DuPont, J.N.: *Process Efficiency Measurements in the Laser Engineered Net Shaping Process*. In: Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 35 B, S. 143…152, 2004

[Ush95] Ushio, M.; Ikeuchi, K.; Tanaka, M.; Seto, T.: *Effects of shielding gas on metal transfer*. In: Welding International, Vol. 9, Nr. 3, S. 462…466, 1995, ISSN: 0950-7116

[Van78] Van den Heuvel, G.; Jelmorini, G.: *Messungen der Tropfentemperatur im Schweißlichtbogen und ihre Bedeutung in der Praxis*. In: Schweißen und Schneiden, Deutscher Verband für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Band 50, 1978

[Wac13] from Companies: *AC welding of aluminum and its alloys with Arc Voltage Control.* In: Welding and Cutting 12, Nr. 1, S. 10…11, 2013, ISSN 1612-3433

[Yel13] Yelistratov, A.: *Exploring the Forces that Shape Droplets during Gas Metal Arc Welding.* In Welding Journal, Band 92, Nr. 5, S. 48…52, 2013, ISSN: 0043-2296

[Zha11] Zhao, Y.B.; Lei, Z.L.; Chen, Y.B.; Tao, W.: *A comparative study of laser-arc double-sided welding and double-sided arc welding of 6 mm 5A06 aluminum alloy*. In: Materials and Design, Nr. 32, S. 2165…2171, State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, China, 2011

[Zha13] Zhang, Y. M.; Li, X. R.; Kvidahl, L.: *Penetration Depth Monitoring and Control in Submerged Arc Welding.* In: Welding Journal, Band 92, Nr. 2, S. 48s…56s, 2013, ISSN: 0043-2296

[Zhi12] Zhi Jun Huang; Lun Ji Hu; Tao Pen; YuTao Wang; Jia He: *Effect of welding method on the hardness of joint of 600 MPa grade new generation steel*. In: 2nd International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology, AEMT 2012, Zhuhai, S. 1526…1531, 2012, ISBN: 978-303785447-1

[Zij89] Zijp, J.P.; den Ouden, G.: *Effects of shielding gas composition on heat transfer during GTA welding*. In: Advances in Joining and Cutting Processes, Int. Conf, Paper 26, S. 24…32, 1989

Hochschulschriften

[Are11] Arevalo, H. H.: *Development and Assessment of Experimental Rig for Calorimetry via Liquid Nitrogen and Continuous Flow (Water) in Welding Processes*. In: Dissertation, Federal University of Uberlândia, Brazil, 2011

[Chi00] Chin-Lung Chang: *Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik*. In: Dissertation, Herbert Utz Verlag, S. 1…158, 2000, ISBN 3-89675-825-X

[IIM12] Kruscha, J.: *Untersuchungen zum Einsatz geregelt gepulster Lichtbögen zur Beeinflussung der Schmelzbaderstarrung*. In: Abschlussbericht des DFG/AiF-Cluster „Lichtbogenschweißen - Physik und Werkzeug“ Teilprojekt A1, Hochschule Lausitz – IIM, 2012

[Kat90] Katsaounis, A.: *Untersuchungen zum Lichtbogenwirkungsgrad beim WIG-Schweißen für Drücke bis 6 MPa*, In: Forschungsbericht GKSS, S. 1…112, Report-Nr. GKSS 90/E/6, 1990, Zeitschriftencode 5141

[Kot10] Kotsev, T.: Schmelzbadsimulation beim Laserstrahlschweißen unterschiedlicher Materialien. In: Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2010, Link: http://edoc.bibliothek.uni-halle.de/servlets/MCRFileNodeServlet/HALCoRe_derivate_00004504/Dissertation.pdf

[Kra12] Krake, S.: *Entwicklung und konstruktive Umsetzung eines Versuchsstandes zur kalorimetrischen Bestimmung der Tropfentemperatur beim Schweißen mit abschmelzender Elektrode*. In: Diplomarbeit, Technische Universität Chemnitz, 2012

[Lic10] Wilden, J.: *Lichtbogenschweißen – Physik und Werkzeug*. In: Zwischenbericht II über die zweite Förderperiode des Clusters Lichtbogenschweißen, 2010, www.schweisslichtbogen.de

[Pla08] Platzer, B.: *Technische Thermodynamik 1*. In: Vorlesungsskript, TU Chemnitz, 10/2008

[Sco11] Scott, K. M.: *Heat Transfer and Calorimetry of Tubular Ni/WC Wires Deposited with GMAW*. In: Masterarbeit, University of Alberta, Kanada, 2011

[Wil06] Wilhelm, G.: *Quantitative Optimierung des Energieeintrages beim MSG-Hochleistungsschweißen nichtrostender Stähle*. In: Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2006, ISBN 3-87155-976-8

Tagungen

[Col79] Collings, N.; Wong, K.Y.; Guile, A.E.; Eng C.: *Efficiency of tungsten-inert-gas arcs in very-high-speed welding*. In: Proceedings IEE, Vol. 126, Nr. 3, S. 276…280, 1979

[Ghe79] Ghent, H.W.; Roberts, D.W.; Hermance, C.E.; Kerr, H.W.; Strong, A.B.: *Arc efficiencies in TIG welds*. In: Arc Physics and Weld Pool Behaviour-International Conference of the Welding Institute, London, S. 17…23, 8.-10. Mai 1979

[Göt10] Gött, G.; Kozakov, R.; Schöpp, H.: *Plasmadiagnostik am Beispiel des Schweißlichtbogens*. In: DVS Berichte Band 267, DVS Congress, S. 340-345, 2010, ISBN 978-3-87155-592-3

[Her11] Hertel, M.; Schnick, M.; Jäckel, S.; Füssel, U.: *Numerische Simulation des MSG-Lichtbogens und des Werkstoffübergangs*. In: DVS Berichte Band 275, DVS Congress, S. 538-544, 2011, ISBN 978-3-87155-267-0

[Ken98] Kenney, K. L.; Miller, K. S.; Smartt, H. B.: *Heat transfer in pulsed gas metal arc welding*. In: ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research, S. 357…361, Idaho, USA, 1998

[Kot01] Kotowski, J.; Michailov, V.; Wohlfarth, H.; Koch, M.: *Experimentelle und numerische Ermittlung der Energieeinkopplung während des Lasertiefschweißens von Tailored Blanks*. In: 19th CAD-FEM Users Meeting, Berlin, S. 1…10, 2001

[Lis12] Liskevich, O.; Quintion, L.; Americo, S.: *Intrinsic errors on Cryogenic Calorimetry Applied to Arc Welding.* In: IIW-Document, Nr. XII-2061/212-1218-12/IV-1101-12, Denver, USA, 2012

[Moo88] Moon, D.W.; Metzbower, E.A.: *Temperature measurements in a mid-plane of a laser beam weldment in A36*. In: ASM International, Power Beam Processing: Electron, laser, plasma-arc, S. 125…130, 1988

[Pep08] Pepe, N.; Yapp, D.: *Measurements of process efficiency for a range of MIG/MAG welding process*. In: Conference proceedings, S. 1…11, 18.-19. Juni 2008, Cranfield, UK, ISBN 978-1-903761-07-6

[Ros11] Rose, S.; Füssel, U.; Schnick, M.: *Modellierung des dynamischen Lichtbogenverhaltens unter Nutzung experimenteller Daten*. In: DVS-Bericht, Band 275, S. 545…553, 2011, ISBN 978-3-87155-267-0

[Sie11] Siewert, E.; Bachmann, B.: *Experimentelle Erkenntnisse zum Werkstoffübergang*. In: DVS-Bericht, Band 275, S. 531…537, 2011, ISBN 978-3-87155-267-0

[Uhr11] Uhrlandt, D.; Weltmann, K.-D.; Schein, J.; Füssel, U.; Kruscha, J.; Reisgen, U.; Wilden, J.: *Analysemethoden und erweitertes Verständnis für den MSG-Prozess.* In: DVS-Bericht, Band 275, S. 593…598, 2011, ISBN 978-3-87155-267-0

[Shi01] Shinoda-T; Hayashi-C; Kato-Y: *Directed plasma fabrication*. In: International Conference on the Joining of Materials; Helsingor, Dänemark, S. 258…267, 11.-14. Mai 2001; TIB-RN9585(10), BAM-DS-Proc.13-D076/02

[Wel11] Weltmann, K.-D.; Kozakov, R.; Gött, G.; Rouffet, M.; Wendt, M.; Schöpp, H.; Uhrlandt, D.: *Physikalische Eigenschaften des MSG-Lichtbogens.* In: DVS-Bericht, Band 275, S. 521…526, 2011, ISBN 978-3-87155-267-0

Normen, Patente

[DIN96] Norm DIN EN ISO 13916, November 1996: *Anleitung zur Messung der Vorwärm-, Zwischenlagen- und Haltetemperatur.* Deutsche Fassung

[DIN01] Norm DIN EN 1011-2, Mai 2001: *Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen*. Deutsche Fassung

[DIN09] Norm DIN EN 1011-1, Juli 2009: *Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 1: Allgemeine Anleitungen für das Lichtbogenschweißen*. Deutsche Fassung

[DIN12] Norm DIN EN ISO 14174, Mai 2012: *Schweißzusätze – Pulver zum Unterpulverschweißen und Elektroschlackeschweißen – Einteilung*. Deutsche Fassung

[Tre90] Trepte, M.: *Verfahren zum Bestimmen der Arbeitswerte für die Lichtbogen-Schweißverfahren mit abschmelzender Elektrode*. In: Ausschließungspatent DD 293977 A5, Technische Hochschule Köthen, S. 1…5, 1990

Internetdokumente

[Blü02] Internet: http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~bluem/Fehleranalyse.pdf, Stand: 16.01.2013, (Blüm, P. : Einführung in die Fehlerrechnung im Praktikum. Universität Karlsruhe, Praktikumsunterlage, 2002)

[Dra12] Internet: http://www.drak.de/de/info/kohlendioxid/physik.html, Stand 12.10.2012

[Fro12] Internet: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-6FD5389A-2A33A418/fronius_international/hs.xsl/79_6543_DEU_HTML.htm, Stand: 04.09.2012

[Hks13] Internet: http://hks-prozesstechnik.de/fileadmin/uploads/Downloads/weldscanner_T85.pdf, Stand:08.01.2013

[Mig09] Internet: http://www.mig-o-mat.com/de/Produkte/Schweisstechnik/Verfahren2.html, Stand: 09.09.2009

[Oerl12] Internet: http://www.oerlikon-online.de/Handbuch/index.html, Stand: 13.11.2012

[Ome12] Internet: http://www.omega.de/techref/accpt100.html, Stand 05.09.2012

[Tec09] Internet: http://www.technolit.de/App/WebObjects/XSeMIPS.woa/cms/page/pid.102.106.147.1/ecm.p/Anwendung.html, Stand: 09.09.2009

[Thy13] Internet: http://grobblech.thyssenkrupp-steel-europe.com/grobblech/de/produkte/naxtra_xabo/werkstoffblaetter.jsp, Stand: 23.09.2013

Anlage: Schweißverfahren

Schweißen ist Fügen unter Schaffung eines Stoffzusammenhaltes durch Kraft und bzw. oder Wärme mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoff. Durch die Zufuhr von thermischer Energie wird in der Regel der Fügevorgang ermöglicht. Dieser Vorgang kann durch Schweißhilfsstoffe, Schweißschutzgase oder ähnliches erleichtert werden [Mat06, S. 23]. Im Besonderen ist das Schutzgasschweißen zu erwähnen, da dies ein Oberbegriff für alle Schweißverfahren ist, bei denen der Werkstoff durch einen Lichtbogen aufgeschmolzen wird. Hierbei werden die Elektrode, der Lichtbogen und das Schmelzbad durch ein Schweißschutzgas vor der Atmosphäre geschützt.

a) Einteilung der Schmelzschweißverfahren

Die Einteilung der Schmelzschweißverfahren kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Denkbar sind folgende Einteilungskriterien:

- nach dem Zweck des Schweißens (Verbindungs- oder Auftragschweißen)
- nach dem Grad der Automatisierungsmöglichkeit
- nach der Elektrodenart - abschmelzend und nicht abschmelzend (Abbildung 7-1)

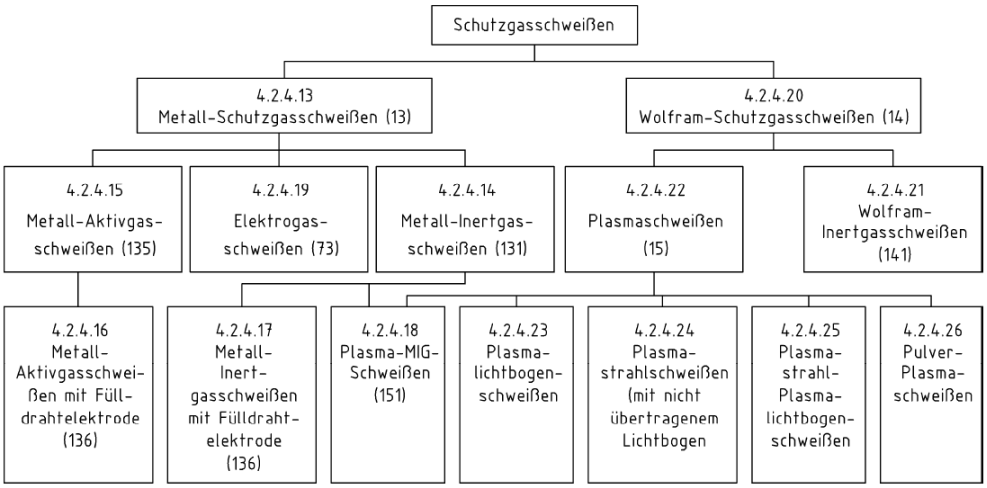


Abbildung 7-1: Einteilung der Schmelzschweißprozesse nach DIN 1910-100 (mit Angabe der Abschnittsnummern aus DIN EN 14610 und mit Angabe der Ordnungsnummern aus DIN EN ISO 4063)

b) Schweißlichtbogen

Der Schweißlichtbogen ist eine Bogenentladung zwischen zwei Elektroden in einem ionisierten Gas. Atmosphärische Luft ist in der Regel ein schlechter Leiter, deshalb ist es nötig den Bereich zwischen Elektrode und Werkstück elektrisch leitfähig zu machen. Die üblicherweise verwendeten Schutzgase besitzen eine gute Ionisierbarkeit und bilden somit schnell eine elektrisch leitfähige Plasmasäule und schützen die Schmelze vor Reaktionen mit Gasen aus der umgebenden Atmosphäre. Um einen Stromfluss sicherzustellen werden durch das angelegte elektrische Feld elektrisch geladene Teilchen in Richtung des entgegengesetzt geladenen Pols beschleunigt. Die Elektronen werden als fast masselos angenommen und deshalb erreichen diese eine sehr große Geschwindigkeit. Auf ihren Weg zur Anode treffen sie mit sehr hoher Energie auf Gasmoleküle. Diese werden durch den Aufprall in verschieden geladene Teilchen aufgespalten und bewegen sich ebenfalls in die entgegengesetzte Richtung ihrer Ladung. Diesen Vorgang nennt man Stoßionisation. Auf diese Art wächst die Zahl der Ladungsträger exponentiell an [Mig09, S. 8].

Ist die erforderliche Ladungsdichte erreicht, erfolgt die Zündung des Lichtbogens. Diese kann durch einen Kurzschluss, z. B. kurzer Kontakt der Elektrode mit der Werkstückoberfläche, erfolgen. Ein kurzes Aufsetzen der Drahtelektrode bewirkt einen Stromfluss und die Erzeugung eines gut leitfähigen und ionisierbaren Metalldampfes, welcher zur Zündung des Lichtbogens durch Stoßionisation führt (bei angelegter Schweißspannung).
Beim Schweißen mit Gleichstrom ist dieser Vorgang nur einmal durchzuführen, da die Lichtbogenstrecke während der gesamten Zeit elektrisch leitfähig bleibt. Wird jedoch mit Wechselstrom geschweißt, muss nach jedem Nulldurchgang eine sofortige Neuzündung des Lichtbogens erfolgen. Dies geschieht unter anderem durch einen Impulsgenerator, der die kurze Zeit mit Hilfe von kurzen, sich schnell wiederholenden Hochspannungsimpulsen überbrückt [Bau90, S. 16].

c) Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG)

Das Wolfram-Inertgas-Schweißen ist im Wesentlichen durch die nicht abschmelzende Wolframelektrode gekennzeichnet. Der Lichtbogen brennt beim WIG-Schweißen zwischen der nicht abschmelzenden Wolframelektrode und dem Werkstück. Die Elektrode ist von einer konzentrischen Düse umgeben, aus der das Schutzgas austritt. Das Schutzgas ist immer inert (meist Argon oder Helium), das heißt das Gas geht keine chemischen Reaktionen ein und schützt die Elektrode und das Schmelzbad vor Oxidation. Der Lichtbogen schmilzt die Kanten der Werkstücke auf, diese fließen ineinander und sorgen somit für eine stoffschlüssige Verbindung. Wird zusätzlicher Werkstoff benötigt (Abbildung 7-2), etwa zum Füllen der Naht oder zum Auftragschweißen, dann kann dies manuell oder durch eine zusätzliche, externe Kaltdrahtzuführung erfolgen. Beim WIG-Schweißen werden Stromquellen mit fallender Kennlinie verwendet. Es ist darauf zu achten, dass Stromquellen verwendet werden, die im Niedrigstrombereich feingegliedert einstellbar sind, da beim WIG-Schweißen mit geringem Schweißstrom gearbeitet wird. Das Schweißen ist sowohl mit Gleich- als auch mit Wechselstrom möglich.
Die Vorteile dieses Verfahren liegen in der hohen Qualität der Schweißnaht (glatte, ebene Naht), im stabilen Lichtbogen und der Spritzerfreiheit. Deshalb findet dieses Verfahren besonders in der Schweißung von dünneren Blechen t < 4mm und beim Verschweißen von Nichteisenmetallen Anwendung. Zusätzlich können alle elektrisch leitfähigen, schweißbaren Werkstoffe mit diesem Verfahren gefügt werden. [Mat06, S. 206]; [Fah09, S. 49…50]

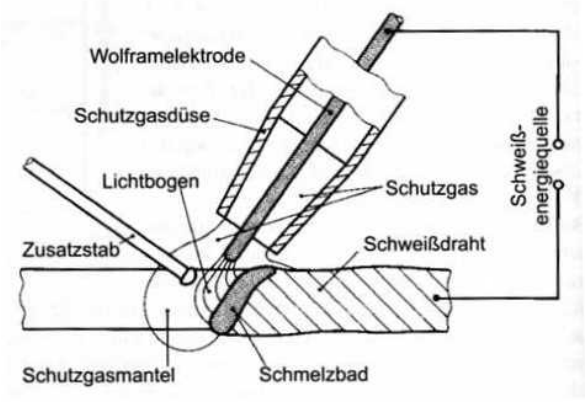


Abbildung 7-2: WIG-Schweißen mit Zusatzwerkstoffzuführung [Mat06, S. 206]

d) Plasmalichtbogenschweißen

Das Plasmalichtbogenschweißen gehört zur Gruppe der Wolfram-Schweißverfahren, da der Lichtbogen zwischen einer Wolframelektrode und dem Werkstück (meist positiv gepolt) brennt (Abbildung 7-3). Als Plasma wird ein Gas bezeichnet, welches sich aus Elektronen, Ionen, Molekülen und Atomen zusammensetzt. Infolge der Ionisation und der angelegten Schweißspannung entsteht der Lichtbogen. Dieser Lichtbogen wird von der gekühlten Plasmadüse und dem kalten Schutzgas mechanisch verengt, was zu einem erheblich verringerten Querschnitt des Lichtbogens und somit zu einer höheren Energiedichte führt. Die eingesetzten Schutzgase sind inert.
Plasmalichtbogenschweißen findet Anwendung beim Durchschweißen großer Blechdicken von bis zu t = 10 mm. Erst bei noch größeren Dicken muss eine Fase angebracht werden. Vorteile des Plasmalichtbogenschweißens gegenüber dem WIG-Schweißen sind [Mat06, S. 235…238]:

- tieferer Einbrand beim Stumpfstoß
- höhere Schweißgeschwindigkeit
- geringere Wärmeeinbringung in das Werkstück →weniger Verzug
  (Grund: konzentriertere Wärmeeinbringung)

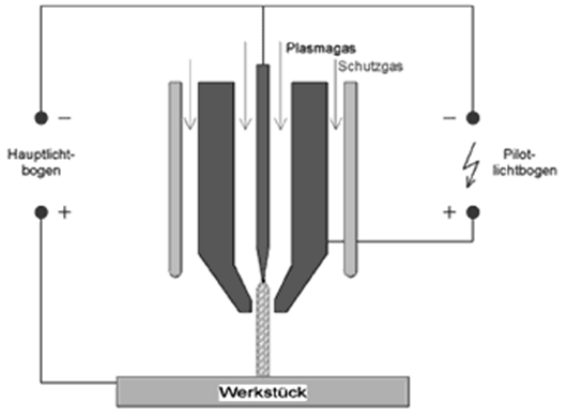


Abbildung 7-3: Prinzipskizze des Plasmalichtbogenschweißens [Mig09]

e) Metall-Aktivgasgasschweißen (MAG)/ Metall-Inertgasschweißen (MIG)

Beim Metall-Schutzgasschweißen (MSG-Schweißen) wird nach der Art des Schutzgases unterschieden, dem Metall-Aktivgasschweißen (MAG) und dem Metall-Inertgasschweißen (MIG). Das Verfahrensprinzip ist bei beiden identisch. Der Lichtbogen brennt zwischen einer abschmelzenden Elektrode und dem Werkstück (Abbildung 7-4).

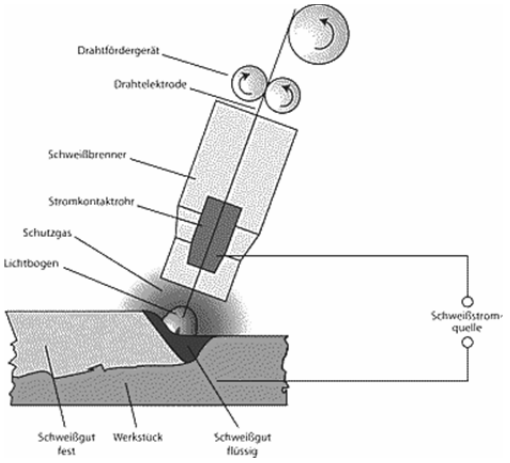


Abbildung 7-4: Verfahrensprinzip des MSG-Schweißens [Tec09]

Die abschmelzende Drahtelektrode wird durch ein Transportrollensystem von der Schweißenergiequelle über das Schlauchpaket zur Stromkontaktdüse befördert, wo die Stromkontaktierung erfolgt. Dieser späte Zeitpunkt der Stromeinbringung ermöglicht es, mit hohen Schweißstromstärken zu arbeiten, ohne die Drahtelektrode übermäßig zu belasten. Aus einer Schutzgasdüse, welche um die Elektrode angeordnet ist, strömt Schutzgas, welches dem Schutz der Naht, der Aufrechterhaltung des Lichtbogens und dem Schutz der Elektrode vor Lufteintritt aus der umgebenden Atmosphäre dient. Das Schutzgas besteht beim MAGC-Prozess aus Kohlendioxid und beim MAGM-Prozess aus verschiedenen Mischgasen mit Argon. Dieser Verfahrenstyp wird zum Schweißen von unlegierten oder niedriglegierten Stählen eingesetzt. Für die Schweißung von höher legierten Stählen werden Schutzgase mit sehr geringem Aktivgasanteil eingesetzt. Nichteisenmetalle bzw. hoch reaktive Metalle werden ausschließlich mit inerten Gasen, wie Argon oder Helium, verarbeitet.
Verwendet wird beim MSG-Schweißen überwiegend Gleichstrom mit der Drahtelektrode als Pluspol. Das hohe Einsatzspektrum, die Möglichkeit zur Automatisierung, die hohe Spaltüberbrückbarkeit und dessen große Flexibilität, sind Vorteile dieses Prozesses [Fah09, S. 49…50].

Arten von MSG-Schweißlichtbögen
Für die Unterscheidung der MSG-Schweißlichtbögen wird als Kriterium die Art der Werkstoffübertragung herangezogen. Exemplarisch werden die vier am häufigsten verwendeten Lichtbogenarten dargestellt:

i) Kurzlichtbogen
Das wesentliche Prinzip des Kurzlichtbogens ist, dass mit kleinen Schweißspannungs- und Schweißstromwerten gearbeitet wird und somit ein stetiger Wechsel zwischen Kurzschluss und Lichtbogenphase erfolgt. Hierbei wird vorwiegend in der Kurzschlussphase der Zusatzwerkstoff durch die hohe Stromstärke abgeschmolzen. Dabei kommt es zu einem feintropfigen Stoffübergang (Abbildung 7-5). Der Kurzlichtbogen findet Anwendung beim Schweißen dünner Bleche oder in Zwangs- oder Wurzellagen [Mat06, S. 185…186].

ii) Sprühlichtbogen
Diese Lichtbogenart ist durch einen fein- bis feinsttropfigen, kurzschlussfreien Werkstoffübergang mit relativ langem Lichtbogen gekennzeichnet. Um dies zu erreichen, muss mit hohen Schweißstrom- und Schweißspannungswerten gearbeitet werden. Das Schutzgas muss dazu mit einem hohen Argonanteil versehen sein. Durch seinen feinsttropfigen Werkstoffübergang wird dieser hauptsächlich für Füll- und Decklagen eingesetzt (Abbildung 7-5). Der Prozess ist als „heiß“ bzw. energieintensiv zu bezeichnen, weshalb er sich zum Verbinden mittlerer bis dicker Bleche eignet [Mat06, S. 184].

iii) Langlichtbogen
Der Langlichtbogen ist durch einen groben Tropfenübergang mit gelegentlichen Kurzschlüssen gekennzeichnet. Der Lichtbogenansatzpunkt wechselt an der Elektrodenspitze, wobei die Tropfenablösung überwiegend durch die Schwerkraft hervorgerufen wird. Laut Soderstrom [Sod08] kann die Pinchkraft an der Drahtelektrode nur wirken, wenn diese vom Lichtbogen ausreichend umschlossen wird. Auf Grund der gelegentlichen Kurzschlüsse kommt es während dieser Phase zur Überhitzung der Schmelze und erzeugt Spritzer. Diese Art der Energieübertragung im hohen Leistungsbereich ist typisch bei der Verwendung von CO_2-reichen Schutzgasen [Mat06, S. 184…185].

iv) Impulslichtbogen

Der Impuls wird durch die Überlagerung eines niedrigen Grundstromes mit einem höheren Pulsstrom ausgelöst. Hierbei hält der Grundstrom das Schmelzbad und das Drahtelektrodenende flüssig und der Pulsstrom sorgt für den Übergang des Zusatzwerkstoffes. Dieser geht dabei idealerweise mit einem Tropfen pro Impuls zum Werkstück über (Abbildung 7-5). Die Tropfengröße und die Tropfenfrequenz sind durch die regelbaren Maschinenparameter einstellbar. Diese Lichtbogenart bietet laut [Mat06] den Vorteil einer geringeren Wärmeeinbringung in den Grundwerkstoff und eines spritzerarmen Werkstoffübergangs (praktisch kurzschlussfrei). Aus diesen Gründen wird das Verfahren vor allem zum Schweißen dünner Bleche und Aluminiumwerkstoffen angewandt [Mat06, S. 186…188].

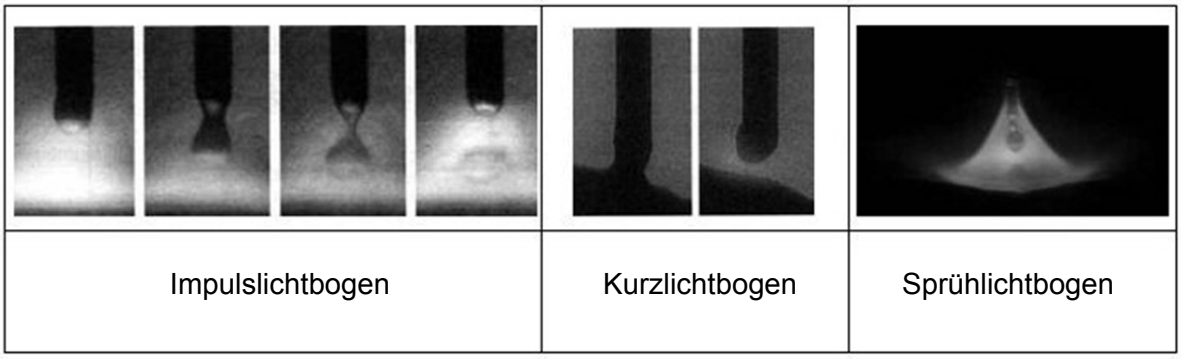


Abbildung 7-5: Auswahl häufig verwendeter MSG-Schweißlichtbogenarten

f) Unterpulverschweißen (UP)

Charakteristisch für dieses Verfahren ist der nicht sichtbare Schweißlichtbogen. Dieser brennt unter einer Pulverschicht zwischen der abschmelzenden Elektrode und dem Bauteil. Die Zündung des Lichtbogens erfolgt in der Regel durch Kurzschluss bzw. Thermoemission. Die hervorgerufenen hohen Temperaturen führen zur Verdampfung von Metall und Schweißpulver, der Lichtbogen bildet sich aus. Die Ansammlung dieser gasförmigen Materialien wird als Schweißkaverne bezeichnet. Deren Größe ist Abhängig vom verwendeten Schweißpulvertyp und von den eingestellten Schweißparameteren. Die Schweißkaverne ist einerseits begrenzt durch eine Hülle aus geschmolzenen Schweißpulver (Schlacke) und andereseits durch den geschmolzenen Grundwerkstoff [Mat06, S. 132…133].

Das Schweißpulver wird dem Fügeprozess kontinuierlich zugeführt. Das Pulver dient nach [Dil05, S. 33…35] im Wesentlichen dazu den Lichtbogen und die Schweißzone vor der Atmosphäre zu schützen, die Leitfähigkeit der Lichtbogenstrecke zu erhöhen, zur Nahtformung und um die Schweißnaht durch die Bildung von Schlacke zu schützen. Die abschirmende Wirkung der Pulverschicht führt laut [Mat06] ebenfalls zu einer Reduzierung der Abstrahlungsverluste der Bogensäule an die Umwelt und so zu einer hohen Abschmelzleistung. Wie in Abbildung 7-6 zu erkennen, ist das UP-Verfahren ein mechanisiertes Verfahren.

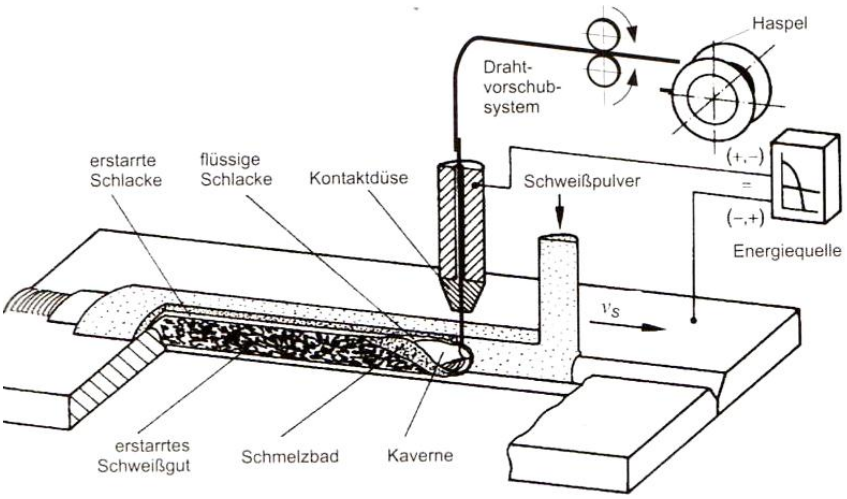


Abbildung 7-6: Verfahrensprinzip des Unterpulverschweißens [Mat06]

Neben der korrekten Wahl der Schweißparameter und der Vorschubbewegung hat auch der Schweißpulvertyp einen maßgeblichen Einfluss auf die Nahtqualität der Schweißnaht. Die Einteilung der Pulver ist abhängig von deren Herstellungsart, mineralischen Zusammensetzung und Korngröße. Die Produktion des Schweißpulvers bestimmt die Bezeichnung erschmolzene oder agglomerierte Pulver [Oerl12, S. 379]. Agglomerierte Schweißpulver besitzen den Vorteil, dass die Herstellungstemperatur unterhalb der Reaktionstemperatur der Einzelkomponenten liegt und so metallische Desoxidations- und Legierungselemente mit in das Schweißgut eingebracht werden können.