

# **Erarbeitung eines Modells zur Entwicklung und Optimierung von Lichtbogenschweißbrennern**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**

**(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Yury Postnikov

geb. am 15.05.1971 in Kramatorsk

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. E. h. H. Herold

Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Dr.-Ing. G. Bürkner

Promotionskolloquium am 13.10.2004

## Abstract

In der Arbeit wird ein Modell erarbeitet, das den Konstrukteur beim Prozess der Entwicklung und Optimierung von Lichtbogenschweiß- und Schneidbrennern hinsichtlich der beanspruchungsgerechten Dimensionierung der gesamten Brennerkonstruktion sowie einzelner Baugruppen, bzw. Bauteile des Brenners unterstützen soll.

Als Vorlage für die Erarbeitung von experimentellen und theoretischen Methodiken für die Betrachtung der Prozesse, die im Lichtbogenschweiß- und Schneidbrenner während des realen Schweißbetriebs verlaufen und später zum Aufbau des Modells verwendet werden, wurden typische Vertreter aller schweißtechnischen Werkzeuge mit Lichtbogennutzung, nämlich MSG-Lichtbogenschweißbrenner ausgewählt.

Anhand der im Rahmen der vorgelegten Arbeit durchgeführten Analyse einer Reihe schweißtechnischer Werkzeuge mit Lichtbogennutzung, die MSG- und WIG-Schweißbrenner umfasst, wurden auf der Funktions- sowie auf der Konstruktionsebene der Aufbau o.g. Brennerarten, die durch den jeweiligen technologischen Prozess bedingten Unterschiede in ausgeführten Funktionen und in der konstruktiven Ausstattung, sowie Ähnlichkeiten definiert und beschrieben.

Es wurde festgestellt, dass die thermische Beanspruchung der Brenner jeder Art die Hauptbelastung ist und im wesentlichen die Lebensdauer und den Erfolg des praktischen Einsatzes jeder Brennerkonstruktion bestimmt.

Die thermische Belastung wird hauptsächlich durch das Brennen des elektrischen Lichtbogens verursacht, wobei der Brenner die Wärme durch Strahlung, Konvektion, elektrischen Widerstand der stromleitenden Teile aufnimmt. Um die thermische Belastung bei jeder Brennerart auf einem zulässigen Niveau zu halten, müssen Maßnahmen für die Abführen der unnötigen Wärme realisiert werden. Das sind die Selbstkühlung und die Zwangskühlung.

Zwei Hauptfaktoren, die diese Prozesse beeinflussen, die konstruktive Ausstattung und die Parameter der Zwangskühlung, wurden im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen und theoretischen Untersuchungen hinsichtlich ihre Einwirkung auf das Niveau der thermischen Belastung der Brennerkonstruktion anhand der ausgewählten typischen Vertreter der MSG-Lichtbogenschweißbrenner betrachtet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen liefern die Informations- und Beweisbasis für das erarbeitete Modell und ermöglichen es, den Prozess der Entwicklung und Optimierung der Lichtbogenschweiß- und Schneidbrenner wissenschaftlich zu betrachten.

Die Ergebnisse der praktischen Experimente, dargestellt in den angefügten ausführlichen Tabellen, stellen die Zusammenhänge zwischen der Konstruktionsart der einzelnen Brenner Elemente und dem Niveau der Temperatur dar. Diese Ergebnisse sollen

dem Brennerkonstrukteur bei den Entscheidungen über das Gesamtkonzept der zu projektierenden Lichtbogenschweißwerkzeuge als Grundlage dienen.

Die Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen anhand mathematischer Modelle zur Beschreibung der physikalischen Prozesse der Wärmeabfuhr durch Zwangskühlung und eines vorgeschlagenen logischen Algorithmus, sind die Grundlage für die Berechnung und Optimierung der Parameter der Flüssigkeitskühlung.

Das vorgeschlagene Modell zu Entwicklung und Optimierung von Lichtbogenschweiß- und Schneidbrennern wurde im Rahmen der vorgelegten Arbeit an realen MSG-Brennerobjekten angewendet und überprüft und brachte sehr zufriedenstellende Ergebnisse, die in Form eines Gerätes „Cooling-Booster“ zu Verstärkung des Kühleffektes in den Kühlkanälen der Lichtbogenschweiß-, bzw. Schneidbrennern verschiedener Art mit Flüssigkeitskühlung realisiert sind. Auch erlaubten die erreichten Ergebnisse ein Blick nach vorn zu richten und das Konzept eines idealen MSG-Lichtbogenschweißbrenners anzubieten.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	I
Verwendete Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen	IV
<b>1 Einleitung. Kritische Bewertung von Literatur und Patenten. Problemanalyse. Aussichten für die Zukunft</b>	<b>1</b>
1.1 Bedeutung neuer Schweißverfahren und Werkstoffe für die weitere Entwicklung der schweißtechnischen Werkzeuge und Anlagen	1
1.2 Belastungen und Einflüsse auf den Schweißbrenner während des Betriebes. Elektrischer Lichtbogen als Wärmequelle	13
1.3 Entwicklungsstand und Entwicklungstendenzen der verfahrensrealisierenden Mittel (VRM)	19
<b>2 Wissenschaftliche Problemstellung und Lösungswege</b>	<b>26</b>
2.1 Problemstellung und angestrebte Lösungsziele	26
2.2 Lösungsstrategien	28
<b>3 Charakterisierung des schweißtechnischen Werkzeuges mit Lichtbogennutzung</b>	<b>30</b>
3.1 Aufbau des schweißtechnischen Werkzeuges mit Lichtbogennutzung	30
3.1.1 MSG-Schweißprozess. Aufbau eines MSG-Schweißbrenners	30
3.1.2 WIG-Schweißprozess. Aufbau eines WIG-Schweißbrenners	33
3.2 Klassifizierung der Funktionen des Schweißbrenners. Analyse des funktionellen und konstruktiven Aufbaus von MSG- und WIG-Schweißbrenner	35
3.2.1 Funktionen einzelner Bauelemente bzw. Baugruppen des MSG-Schweißbrenners	37
3.2.2 Funktionen einzelner Bauelemente bzw. Baugruppen des WIG-Schweißbrenners	43
3.3 Thermische Belastung des Schweißbrenners während des Betriebes	50
3.3.1 Erwärmung des Brenners. Mathematisches Modell. Einflussfaktoren	50
3.3.2 Kühlung des Brenners. Mathematisches Modell. Einflussfaktoren	62
<b>4 Methoden zur Durchführung theoretischer und praktischer Untersuchungen</b>	<b>80</b>
4.1 Planung der praktischen Untersuchungen, um den Zusammenhang zwischen konstruktivem Aufbau des selbstgekühlten Brenners und dem zulässigen Niveau der thermischen Belastung zu klären. Auswahl relevanter Brennerkonstruktionsreihen	80
4.2 Planung der praktischen Untersuchungen zur Klärung des Zusammenhangs	

---

	zwischen dem konstruktiven Aufbau des zwangsgekühlten Brenners und dem zulässigen Niveau der thermischen Belastung. Auswahl der relevanten Brennerkonstruktionsreihen	83
4.3	Planung der Untersuchungen zur Optimierung der Flüssigkeitskühlung	85
<b>5</b>	<b>Praktische Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der konstruktiven Gestaltung des Brenners sowie dessen einzelner Bauelemente auf das Niveau der zulässigen thermischen Belastung</b>	<b>86</b>
5.1	Aufbau des Prüfstandes und entsprechender Prüfvorrichtungen für die Durchführung der praktischen Versuche	86
5.2	Diskussion der Versuchsergebnisse	89
<b>6</b>	<b>Einfluss der Parameter der Zwangskühlung auf das Niveau der thermischen Belastung des Brenners. Modellierung der thermischen Prozesse im Brenner</b>	<b>111</b>
6.1	Theoretische Untersuchungen. Modellierung, Betrachtung und Optimierung der Zwangskühlung	111
6.1.1	Betrachtungen zur Flüssigkeitskühlung. Modell zur Betrachtung der Flüssigkeitskühlung. Aufteilung auf die einzelnen Blöcke	111
6.1.1.1	Theoretische Berechnung der Flüssigkeitskühlung. Kühlmittel Wasser	112
6.1.1.2	Berechnung für den Brenner Typ 511, als typischer Vertreter wassergekühlter Brenner	113
6.1.1.3	Berechnung für den Brenner Typ 9W	115
6.1.2	Betrachtungen zur Gaskühlung. Modell zur Betrachtung der Gaskühlung. Aufteilung auf die einzelnen Blöcke	119
6.1.2.1	Theoretische Berechnung der Kühlwirkung des Schutzgases. Schutzgas CO <sub>2</sub> .	119
6.1.2.2	Berechnung für den Brenner Typ 511, als typischer Vertreter wassergekühlter Brenner	120
6.1.3	Vergleich zwischen Flüssigkeits- und Gaskühlung am Beispiel des Brenners Typ 511	123
6.1.4	Fragen der Effektivität der Zwangskühlung. Auswertung und Schlussfolgerungen zur weiteren Optimierung	132
6.1.5	Erstellung eines Algorithmus zur mathematischen Berechnung und Analyse der Prozesscharakteristiken der Flüssigkeitskühlung	133
6.2	Experimentelle Untersuchungen zur weiteren Optimierung der Parameter der Flüssigkeitskühlung	134
6.2.1	Untersuchung des Einflusses von erhöhtem Wasserdurchfluss auf die Wärmeaufnahme in erwärmten Kühlkanälen des Brenners Typ 411	134

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	<u>III</u>
6.2.2 Untersuchung des Brenners Typ 411 mit Hochleistungskühlung	138
6.3 Entwicklung eines Gerätes zur Verstärkung der Kühlwirkung in den flüssigkeitsgekühlten Brennern	141
<b>7 Ausblick. Ideale Brenner</b>	<b>143</b>
<b>8 Zusammenfassung</b>	<b>145</b>
Literaturverzeichnis	149
Verzeichnis der Bilder und Tabellen	154
Anhang	

## Verwendete Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung	
$A$	Fläche des Strahlers	$m^2$
$A_i$	Querschnitt des Leiters	$m^2$
$A_{Lb}$	Fläche des Lichtbogens	$m^2$
$A_w$	Fläche des Werkstücks	$m^2$
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2 \cdot K)$
$A$	Oberfläche	$m^2$
$A_{Ob_i}$	Oberfläche eines einzelnen Brennelementes	$m^2$
$a$	Temperaturleitfähigkeit des Kühlmediums	$m^2/s$
$A_{Br_i}$	Fläche des Brennelementes $i$	$m^2$
$A_{im}$	Querschnittsfläche des Kontaktes zwischen den Brennelementen $i$ und $m$	$m^2$
$\alpha_i$	Wärmeübergangskoeffizient eines einzelnen Brennelements	$W/(m^2 \cdot K)$
$A_{KK_i}$	Oberfläche des Kühlkanals	$m^2$
$C_{12}$	Strahlungsaustauschzahl	$W/(m^2 \cdot K^4)$
$c_f$	Strömungsgeschwindigkeit des Fluids	$m/s$
$c_p$	spezifische Wärmekapazität des Kühlmediums	$J/(kg \cdot K)$
$d_{gl}$	gleichwertiger Durchmesser (für den Fall, dass Kühlkanal keinen Kreisquerschnitt, sondern einen rechteckigen, dreieckigen, ringförmigen oder spaltförmigen Querschnitt besitzt)	$m$
$e_{BrUm_i}$	Einstrahlzahl zwischen Brennelement $i$ und Umgebung	-
$e_{12}$	Einstrahlzahl zwischen zwei Körpern	-
$e_{BrLb_i}$	Einstrahlzahl zwischen Lichtbogen und Brennelement $i$	-
$e_{BrW_i}$	Einstrahlzahl zwischen Werkstück und Brennelement $i$	-
$I$	Schweißstrom	$A$
$l_i$	Länge des Leiters	$m$
$l$	Länge des Kühlkanals	$m$
$l_o$	kennzeichnende Längeabmessung	$m$
$Nu_f$	Nußelt-Zahl des Kühlmediums	-

$Pr_f$	Prandtl-Zahl des Kühlmediums	-
$Pr_w$	Prandtl-Zahl des Kühlkanals	-
$\dot{Q}_{\Sigma Br}$	Gesamter Wärmestrom, der in den Brenner hinein fließt	W
$\dot{Q}_{\Sigma El}$	Gesamter Wärmestrom durch ohmsche Belastung	W
$\dot{Q}_{12}$	Wärmestrom zwischen zwei Strahlern	W
$\dot{Q}_{\Sigma Ab}$	Der gesamte Wärmestrom, der aus dem Brenner abfließt	W
$\dot{Q}_{El_i}$	Wärmestrom durch ohmsche Belastung eines einzelnen Brennelements	W
$\dot{Q}_{\Sigma Kont}$	Gesamter Wärmestrom durch Kontaktwiderstände	W
$\dot{Q}_{\Sigma Konv}$	Abfließender Wärmestrom durch Konvektion	W
$\dot{Q}_{\Sigma KonvW}$	Gesamter Wärmestrom durch Konvektion	W
$\dot{Q}_{Konv_i}$	Abfließender Wärmestrom durch Konvektion von einem einzelnen Brennelement $i$	W
$\dot{Q}_{KonvW_i}$	Wärmestrom durch Konvektion in einen einzelnen Brennelement $i$	W
$\dot{Q}_{\Sigma WLeit}$	Abfließender Wärmestrom durch Wärmeleitung	W
$\dot{Q}_{WLeit_i}$	Abfließender Wärmestrom durch Wärmeleitung von einem einzelnen Brennelement $i$	W
$\dot{Q}_{\Sigma StrLb}$	Gesamter Wärmestrom durch Strahlung des Lichtbogens	W
$\dot{Q}_{\Sigma StrW}$	Gesamter Wärmestrom durch Strahlung des Werkstücks	W
$\dot{Q}_{\Sigma StrBr}$	Abfließender Wärmestrom durch Strahlung	W
$\dot{Q}_{\Sigma Zwang}$	Abfließender Wärmestrom durch Zwangskühlung	W
$R_{El_i}$	Ohmsche Widerstand eines einzelnen stromleitenden Brennelement $i$	$\Omega$
$R_{Kont_i}$	Kontaktwiderstand im Brennelement $i$	$\Omega$
$Re_f$	Reynolds-Zahl des Kühlmediums	-
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	K
$T_1$	Temperatur des ersten Strahlers	K
$T_2$	Temperatur des zweiten Strahlers	K
$T_{Br_i}$	Temperatur des Brennelements $i$	K
$T_f$	Temperatur des Kühlmediums	K

$T_{f_i}$	Temperatur des Kühlmediums	K
$T_{KK_i}$	Temperatur des Kühlkanals	K
$T_{Lb}$	Lichtbogentemperatur	K
$T_O$	Temperatur der Oberfläche	K
$T_{O_i}$	Temperatur der Oberfläche eines einzelnen Brennelements $i$	K
$T_{Um}$	Umgebungstemperatur	K
$T_w$	Temperatur des Werkstücks	K
$U$	Umfang des Kühlkanals	m
$\dot{V}$	Durchfluss	m <sup>3</sup> /s
$\dot{V}_{kr}$	Kritische Durchfluss	m <sup>3</sup> /s
$\omega$	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
$\omega_{kr}$	Kritische Strömungsgeschwindigkeit	m/s
$\chi$	Leitwert	S·m/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_1$	Emissionszahl des ersten Strahlers	-
$\nu$	kinematische Viskosität des Kühlmediums	m <sup>2</sup> /s
$\delta_i$	Dicke eines einzelnen Brennelements	m
$\eta$	dynamische Viskosität des Kühlmediums	Pa·s
$\varepsilon_{Um}$	Emissionszahl der Umgebung	-
$\varepsilon_2$	Emissionszahl des zweiten Strahlers	-
$\varepsilon_{Bf_i}$	Emissionszahl des Brennelements $i$	-
$\varepsilon_{Lb}$	Emissionszahl des Lichtbogens	-
$\varepsilon_w$	Emissionszahl des Werkstücks	-
$\rho_i$	spezifischer Widerstand	$\Omega$ ·m/mm <sup>2</sup>
$\sigma$	Strahlungskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )
$\alpha$	Temperaturkoeffizient	1/K
$\lambda_f$	Wärmeleitfähigkeit des Kühlmediums	W/(K·m)
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit des Kühlmediums	W/(K·m)
$\lambda_i$	Wärmeleitfähigkeit eines einzelnen Brennelements	W/(K·m)

# **1 Einleitung. Kritische Bewertung von Literatur und Patenten. Problemanalyse. Aussichten für die Zukunft.**

## **1.1 Bedeutung neuer Schweißverfahren und Werkstoffe für die weitere Entwicklung der schweißtechnischen Werkzeuge und Anlagen**

Der Lichtbogen ist ein technologisches Werkzeug für thermische Bearbeitungsverfahren. Zu seiner Zündung, Aufrechterhaltung, präzisen Steuerung und Führung sind sogenannte verfahrensrealisierende Arbeitsmittel erforderlich.

Der gegenwärtige Entwicklungsstand und die Tendenzen der weiteren Entwicklung von Lichtbogenschweiß- und Schneidbrennern, die man als verfahrensrealisierende Mittel (VRM) mit Lichtbogennutzung bezeichnet, sind sehr stark an die in der Schweißfertigung eingesetzte Werkstoffe und ihre Bearbeitungsverfahren gebunden.

In den letzten Jahren haben sich die schon traditionellen Schweißverfahren wie MSG- und WIG -Schweißen weiterentwickelt, außerdem kamen neue Verarbeitungsverfahren mit Nutzung des elektrischen Lichtbogens als Energiequelle hinzu.

Die Entwicklung erfolgte in Richtung einer Verbesserung der Qualität der Schweißverbindung und auch der Erweiterung der technologischen Möglichkeiten sowie der Erarbeitung neuer Technologien, um neue, komplizierter gewordene Schweißaufgaben zu realisieren.

Diese Entwicklung wurde im wesentlichen durch die folgenden Hauptfaktoren geprägt, die in diesem Arbeitsabschnitt analysiert werden:

- verbreitete Anwendung solcher Werkstoffe, wie verzinktes Blech; Aluminium-, Magnesium und Titanlegierungen; hochlegierte Stähle,
- durch die globale Anwendung moderner Rechentechnik wurde ein prinzipiell neues Niveau bei der Erarbeitung und Optimierung von technologischen Fertigungsabläufen erreicht,
- die Wirtschaftsverhältnisse zeichnen sich durch verschärfte Konkurrenz und höhere Lohnkosten aus,
- Forderungen nach Arbeitsplätzen, die weder die Umwelt belasten noch die Gesundheit des Schweißers gefährden.

Den Start für die Nutzung solcher Werkstoffe haben Großunternehmen für die Luft- und Raumfahrtindustrie, insbesondere für militärische Bereiche gegeben, danach wurde sie auf die Automobilindustrie und deren Zulieferer erweitert. Heute kommen schon ganz deutlich auch Mittel- und Kleinunternehmen mit einem höheren Anteil an neuen Werkstoffen in die Fertigung. Der Anteil an innovativen Werkstoffen in den KMU steigt stetig [1]. Eine Befragung

in deutschen Unternehmen (54 % davon waren Betriebe mit 5 bis 10 Beschäftigten) ergab, dass überwiegend folgende gewalzte und gegossene Materialien verschweißt werden:

- Stahl: 97 %,
- Stahlblech: 73 %,
- nichtrostender Edelstahl: 61 %,
- Aluminium: 50 %.

Die Kleinindustrie umfasst zur Zeit eine fast unüberschaubare Menge von Unternehmen, von denen jeder eine schmale Spezialisierung in der Fertigung hat, aber insgesamt bieten sie auf dem Markt ein sehr breites Sortiment von geschweißten Erzeugnissen. Als Gegenwert führt dies zum Zuwachs von schweißtechnischen und schweißtechnologischen Problemen, die es zu lösen gilt.

Gegenwärtig wird zur Lösung eines technischen Problems oftmals eine Sonderfertigung von Erzeugnissen gewählt. Eine Sonderfertigung erfordert fast immer die Erarbeitung einer neuen Technologie und neuer Montagepläne. Dazu kommt oft der Bedarf an neuen Werkzeugen und Maschinen, die wiederum auch speziell entwickelt und gefertigt werden müssen. Dies trifft zu bei Konstruktionen, die z.B. höhere Ansprüche an die Festigkeit und Belastbarkeit bei geringerer Größe und geringerem Gewicht erfüllen sollen [2], oder z.B. in aggressiven Medien arbeiten [3]. Dafür könnten mehrere Beispiele angeführt werden.

Die Korrosionsbeständigkeit geschweißter Erzeugnisse ist von großer Bedeutung für Produzenten und spätere Anwender. In vielen Branchen kommen beschichtete Bleche zum Einsatz, die eine hohe Korrosionsbeständigkeit aufweisen. Dadurch werden Korrosionsschäden an Erzeugnissen vermieden. Zink hat durch seine Eigenschaften bei der Herstellung von beschichteten Blechen eine besondere Bedeutung [4]. Verzinktes Walzmaterial bietet neben guten Korrosionseigenschaften Preisvorteile. In großem Umfang werden verzinkte Teile im Automobilbau, in der Bauwirtschaft, in der Lüftungs- und Klimatechnik, in der Haustechnik, für die Herstellung von Weißware und in der Möbelindustrie eingesetzt. Es existieren zwei prinzipielle Möglichkeiten, den Korrosionsschutz durch eine Zinkoberfläche zu realisieren:

- nachträgliche Feuerverzinkung fertiger Bauteile und Erzeugnisse
- Benutzung von vorverzinkten Flachzeugen

Um die erste Möglichkeit zu realisieren, ist eine sorgfältige Vorbereitung und eine genaue Einspannung der zu verzinkenden Bauteile erforderlich. Die zweite Variante bietet mehr Komfort bei der Gestaltung des gesamten Fertigungsprozesses, stellt aber Fragen nach einem geeigneten Fügeverfahren, um vorverzinkte Bleche zu verbinden. Zink beginnt bei etwa 420°C zu schmelzen und bei etwa 906°C zu verdampfen. Diese Eigenschaften

wirken sich ungünstig auf den Schweißprozess aus, da mit der Zündung des Lichtbogens der Verdampfungsprozess des Zinks eingeleitet wird. Die Zinkdämpfe und Oxide können zu Poren, Bindefehlern, Rissbildung und zu einem instabil brennenden Lichtbogen führen; außerdem fehlt anschließend der Korrosionsschutz im Verbindungsbereich. Daher ist es für verzinkte Bleche günstiger, wenn im Fügeprozess wenig Wärme eingebracht wird.

Lange Zeit war das MSG-Schweißen der dominierende Prozess für die Herstellung stoffschlüssiger Verbindungen verzinkter Feinbleche [5]. Als Schweißzusätze wurden dabei entweder artgleiche, auf den zu verbindenden Grundwerkstoff abgestimmte Massiv- bzw. Fülldrähte oder artfremde Schweißzusätze (Bronzedrähte) verwendet. Um die prozessspezifischen Nachteile des MSG-Schweißens auszuschließen, wird in letzter Zeit für die Verbindung vorverzinkter Bleche überwiegend das MSG-Löten eingesetzt. Beim MSG-Löten wird nach Ergebnissen metallographischer Untersuchungen der Grundwerkstoff Stahl bei der Verbindungsbildung nicht angeschmolzen. Als Zusatzwerkstoff wird oft ein Siliciumbronze-Schweißdraht verwendet. Das MSG-Löten hat in der Praxis folgende Vorteile nachgewiesen [4]:

- keine Korrosion der Schweißnaht,
- minimale Spritzerbildung,
- geringer Abbrand der Beschichtung,
- niedrige Wärmeinbringung,
- einfache Nachbearbeitung der Naht,
- katodische Schutzwirkung des Zinks auf dem unbeeinflussten Grundwerkstoff im unmittelbaren Nahtbereich.

Die Realisierung des MSG-Lötens stellt besondere Anforderungen an die in der Fertigung eingesetzten Lötbrenner, Drahtvorschubgeräte und Schweißstromquellen. Im Vergleich zu Stahldrähten sind Bronzedrähte sehr weich. Der Drahttransport muss abrieb- und störungsfrei sein.

Die Gewichtsreduzierung der geschweißten Konstruktionen hat in den letzten Jahren immer weiter an Bedeutung gewonnen. Die Menschheit ist immer an die Nutzung naturgegebener Ressourcen gebunden [6]. Durch das Abnehmen der vorhandenen Ressourcen werden auch die Metalle nicht mehr uneingeschränkt zur Verfügung stehen.

Die Verkehrstechnik hat die Forderungen nach Energiereduzierung, Umweltbelastung und Recyclefähigkeit in verstärktem Maße zu erfüllen. Aluminium, Magnesium, Titan, sowie ihre Legierungen sind in der Lage, diese Forderungen zu realisieren.

Aluminiumlegierungen erschließen sich aufgrund ihrer positiven Gebrauchseigenschaften wie geringes spezifisches Gewicht, gute Korrosions- und Recycleigenschaften sowie gute Verarbeitbarkeit immer größere Anwendungsfelder. Sie

werden dabei im Rahmen von Leichtbaukonzepten zunehmend als Ersatz für Stahlwerkstoffe eingesetzt.

Beim Fertigen von Konstruktionen aus Aluminiumwerkstoffen sind die folgenden Probleme bekannt [7]: das Leichtmetall reagiert empfindlich auf Verunreinigung, verzieht sich leicht unter Wärmeeinfluss und erfordert insgesamt eine spezielle Behandlung. Auch Konstruktionskonzepte mussten, wie bei der Anfertigung der Seitenwände des ICE 3-Zuges, geändert werden. Es wurde von der Differentialbauweise mit ihren vielen Schweißnähten zur integralen Bauweise, bei der vorgefertigte Strangpressprofile eingesetzt werden, gewechselt [7]. Diese verrippten Hohlteile aus Aluminiumwerkstoffen verringern die Bauteilzahl und bringen eine höhere Verwindungssteifigkeit mit sich, was das spätere Einspannen und Schweißen deutlich erleichtert. Die Anwendung des MIG-Tandemschweißverfahrens bei der Serienfertigung erlaubt es, das Wärmeeinbringen und damit den Verzug des Materials zu minimieren. Um dieses Schweißverfahren zu realisieren, müssen jedoch entsprechende MIG-Tandemschweißbrenner konzipiert und gebaut werden. Außerdem ist es notwendig, den Brenner mit Sensoren auszustatten, die erforderlich sind, um während der Schweißung die beiden Drahtelektroden optimal zur Fuge zu positionieren und Toleranzen der Fugengeometrie zu beherrschen.

Magnesiumlegierungen werden im Automobilbau eingesetzt, um das Gewicht einzelner Komponenten und damit auch des Gesamtfahrzeuges zu reduzieren. Zwar stellt man in [6] fest, dass in der Automobil-Industrie in den letzten Jahren eine widersprüchliche Entwicklung zu verzeichnen ist: neue Konstruktionen von Fahrzeugen sind in der Regel schwerer geworden. Die Gründe dafür sieht man im gewachsenen Sicherheits- und Komfortbedürfnis.

Magnesiumlegierungen im Fahrzeugbau werden derzeit überwiegend in Gusskonstruktionen eingesetzt [8]. Die zunehmende Zahl von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten belegen das ständig wachsende Interesse an diesem Werkstoff. Neben den klassischen Anwendungen, den Getriebegehäusen, gibt es erste Karosserieelemente aus Magnesiumguss. Für das Fügen von Bauteilen aus Magnesium stehen neben den mechanischen Verfahren und dem Kleben die Lichtbogenschweißverfahren zur Verfügung. Dabei haben Letztere bei der Verarbeitung von Leichtmetallen im Automobilbau die größte Bedeutung. Für das Fügen von Magnesium werden die folgenden Schweißprozesse eingesetzt: MIG-Schweißen, WIG-Schweißen, Plasmaschweißen, Laserschweißen und Elektronenstrahlschweißen.

Die Auswahl des jeweiligen Prozesses wird dabei wesentlich durch den geforderten Mechanisierungsgrad sowie die Kosten bestimmt [9]. Das MIG-Schweißen ist aufgrund seiner guten Automatisierbarkeit am weitesten verbreitet. Im Bereich der Prototypen- oder Kleinserienfertigung, sowie zur Nacharbeit in der Serienfertigung oder Reparatur im Schadensfall werden keine hohen Anforderungen an den Mechanisierungsgrad gestellt. Bei

diesen vorwiegend manuellen Anwendungen können die verfahrensspezifischen Vorteile des WIG- und Plasmaschweißens genutzt werden, wie z.B.:

- Entkoppelung von Energie- und Werkstofftransfer,
- Verbindungsschweißen mit und ohne Zusatzwerkstoff,
- Reduzierung der minimalen Schweißleistung gegenüber dem MIG-Schweißen,
- hohe Nahtgüte gegenüber dem MIG-Schweißen.

Beim Lichtbogenschweißen von Aluminium- bzw. Magnesiumlegierungen muss berücksichtigt werden, dass die Oxidschicht auf den Magnesiumbauteilen die Reinigungswirkung des Lichtbogens bei positiver Polung der Elektrode erfordert. Das bedeutet gleichzeitig eine höhere thermische Belastung der Elektrode und in der Folge des gesamten schweißtechnischen Werkzeuges. Entsprechend müssen Schweißanlagen und WIG-Schweißbrenner ausgelegt werden.

Die Nutzung von Titanwerkstoffen nimmt stetig zu. Dies gilt auch für den chemischen Behälterbau, bei dem hohe Korrosionswiderstände gefragt sind. Da die Titanwerkstoffe bei erhöhten Temperaturen eine besonders hohe Affinität zu atmosphärischen Gasen besitzen, können in der Fügetechnik nur Schweißprozesse eingesetzt werden, bei denen im Vakuum oder unter Schutzgasatmosphäre geschweißt wird. Heute werden Titanwerkstoffe im Behälterbau hauptsächlich durch Wolfram-Inertgasschweißen, zunehmend auch durch Plasma-, Laser- oder Elektronenstrahlschweißen gefügt. Dies geschieht in Schutzgaskammern oder in atmosphärischer Umgebung, sofern im Nahtbereich ein ausreichender Gasschutz gewährleistet ist.

Das Metall-Inertgaschweißen von Titan hingegen wird in Deutschland bislang nicht eingesetzt. Es stellt jedoch mit seiner hohen Abschmelzleistung und seiner großen Schweißgeschwindigkeit ein besonders wirtschaftliches Schweißverfahren dar [10].

Die Realisierung des Metall-Inertgaschweißens von Titan in einer Schutzgaskammer ist entscheidend von der Handhabung des Schweißbrenners abhängig. Die herkömmlichen wassergekühlten Brenner mit langen Schlauchpaketen lassen sich nur unzureichend in eine Schutzgaskammer integrieren, wobei der Brenner sehr stark thermisch belastet wird.

Bei Schweißungen außerhalb der Schutzgaskammer sind Schweißbrenner mit speziellen Einrichtungen notwendig, um den Schutz der Nahtzone zu gewährleisten.

Lichtbogenschweißverfahren finden ihre Anwendung auch im mikrotechnischen Bereich, z. B. in der elektromechanischen Branche. Der Mikro-Lichtbogen wird als Werkzeug zum Schweißen und Löten von elektromechanischen Komponenten eingesetzt [11]. Die Forderung nach hoher Leistungs- und Packungsdichte bei Halbleiterbauelementen findet seine Weiterführung in der fortschreitenden Miniaturisierung von elektromechanischen Komponenten, wie zum Beispiel bei Sensoren, Schaltern, Schützen und Relais. Durch die

Weiterentwicklung von Stromquellen, Steuerungen und Brennern gelingt es heute, die Verbindungstechnik bei kleinen Bauteilabmessungen, die bisher überwiegend dem Laserverfahren vorbehalten waren, für das Mikro-Plasma-, Mikro-WIG- und Mikro-MSG-Schweißen wirtschaftlich zu erschließen. Gegenüber dem Laserschweißen konkurrieren die Lichtbogenprozesse aufgrund ihres geringeren Investitionsaufwandes und ihrer geringeren Anforderungen an die Bauteiltoleranzen. Bei Punkt-Schweiß- und Lötverbindungen ist die gleichbleibende Zündsicherheit und –häufigkeit der Lichtbogenprozesse in automatischen Fertigungslinien unverzichtbare Voraussetzung für deren Einsatz. Die Pausenzeiten für das Rüsten der Brenner sollen kurz gehalten werden. Neben dem Zeitaspekt wird auch die für die Serienfertigung von Kleinteilen erforderliche Reproduzierbarkeit von Elektrodenabstand und –position zur Verbindungsstelle berücksichtigt. Die Schweißbrenner für die Anwendung im mikrotechnischen Bereich sollen neben sehr geringeren Abmessungen hohe Zuverlässigkeit, Reproduzierbarkeit und Standzeit besitzen.

Im letzten Jahrzehnt formierte sich das Wissen über Schweißtechnologien und Montageabläufe zu einer exakten Wissenschaft. Vorher entstand dieses Wissen hauptsächlich durch praktische Erfahrungen und hatte meistens einen beschreibenden Charakter. Aus diesem Grund war es schwierig, die komplette Analyse technologischen Wissens durchzuführen und die Zusammenhänge auf mathematischer Basis darzustellen. Ein systematisches Arbeiten wurde erst mit der modernen Rechentechnik möglich, die in der Lage war, große Datenmengen zu verarbeiten. Für die Entwicklung der Fertigungs- und Montagepläne wurde eine entsprechende Software ausgearbeitet. Die Besonderheit der Software für die Fertigungsvorbereitung sind große, umfassende Datenbanken. Die schnelle Rechentechnik und ausreichende Datenbanken, die vorhandene praktische Erfahrungen akkumulieren, machen die Fertigungsvorbereitung einfach und schnell, aber was viel wichtiger ist, sie bieten die Möglichkeit, mehrere technologische Varianten zu analysieren und zu optimieren.

Um eine optimale Technologie der Fertigung einer Schweißkonstruktion zu verwirklichen, wird entsprechendes Werkzeug benötigt, das selbst optimal zu dieser Aufgabe passt. Daraus ergibt sich, dass auch das Werkzeug optimiert werden muss.

Wirtschaftliche Gründe sind ebenso wichtig wie technische und technologische. Um hinsichtlich der Lohnkosten auf dem internationalen Markt konkurrenzfähig zu bleiben, muss man den Lohnkostenanteil an den Fertigungskosten geschweißter Erzeugnisse reduzieren. Dies bedeutet, mehr Längeneinheiten der Schweißnaht pro Zeiteinheit zu fertigen oder die Maschinenstundensätze zu steigern. Hierfür gibt es zwei Wege: Anwendung der Automatisierung und Robotisierung sowie Erhöhung der Abschmelzleistung.

Mit der Schweißaufgabe ist das Nahtvolumen vorgegeben, deswegen wird versucht, die Schweißzeit, besonders die Lichtbogenbrennzeit, zu verkürzen. Dies kann nur durch eine größere Abschmelzleistung und/oder höhere Schweißgeschwindigkeit erfolgen [12, 13, 14,

15]. Für solche MAG-Schweißprozesse wird der Begriff MAG-Hochleistungs-Schweißen verwendet. Die genaue Definition des MAG-Hochleistungs-Schweißens ist im DVS-Merkblatt 0909-1 gegeben. Bezogen auf den beim MAG-Schweißen meist eingesetzten Massivdraht mit 1,2 mm Durchmesser, muss danach die Drahtvorschubgeschwindigkeit, einzeln oder in der Summe, über 15 m/min liegen. Für andere Zusatzwerkstoffe gilt die korrespondierende Abschmelzleistung von 8 kg/h als unterstes Limit [16].

Beim MIG/MAG-Schweißen kann eine deutliche Leistungssteigerung durch das gemeinsame Abschmelzen von zwei oder mehreren Drahtelektroden erzielt werden. Zuerst wurde das MIG/MAG-Doppeldrahtschweißen, bei dem ein gemeinsames Abschmelzen zweier Drahtelektroden in einem Lichtbogen erfolgt, entwickelt und für unterschiedliche Anwendungen eingesetzt [17]. Für das MIG/MAG-Doppeldrahtschweißen ist ein spezieller Schweißbrenner erforderlich, der mehrere Drahtförderkanäle besitzt. Beide Elektrodendrähte verfügen allerdings über das gleiche Potenzial, so dass sich Prozessstörungen am ersten Draht sofort auf den zweiten Draht auswirken. Durch den Einsatz einer einzigen leistungsstarken Stromquelle ist eine getrennte Einstellung der Schweißparameter für beide Elektroden nicht möglich. Ein zeitgleiches Einleiten der Pulsphase an beiden Drahtelektroden verursacht durch gegenseitige elektromagnetische Beeinflussung der Lichtbögen eine nicht geradlinig ins Schweißbad gerichtete Tropfenablösung [18]. Hohe Abschmelzleistungen, die beim Einsatz von MSG-Schweißen mit mehreren Elektroden realisiert werden, sind mit der Freisetzung extreme Wärmemengen verbunden und verursachen als Folge eine sehr starke thermische Belastung des Schweißbrenners.

Das große Interesse der Anwender sowie die guten Praxiserfolge und zunehmenden Erfahrungen mit dieser neuen Technik führten zu einer Weiterentwicklung: dem MIG/MAG-Tandemschweißen. Hierbei werden zwei Drahtelektroden von zwei getrennten Stromquellen und zwei elektrisch voneinander getrennten Kontaktrohren innerhalb des Brenners abgeschmolzen [17]. Dies bietet bei vergleichbarer Abschmelzleistung und Schweißgeschwindigkeit verbesserte Einstellmöglichkeiten des Lichtbogens bei schwierigen Schweißaufgaben und eine deutlich geringere Störanfälligkeit gegenüber dem Doppeldrahtschweißen.

Das MSG-Doppeldrahtschweißen hat diverse Einsatzmöglichkeiten zum Fügen von Stahl- und Al-Werkstoffen. Wegen der hohen thermischen und physischen Belastung des Schweißers während der manuellen Führung des Brenners werden Hochleistungsschweißprozesse eher nur in vollmechanisierter oder automatisierter Fertigung angewendet. Durch den zunehmenden Einsatz in der Produktion kamen verstärkt auch Schwachstellen des MAG-Hochleistungsschweißens zum Vorschein.

Ein Problem besteht darin, dass bei hohen Drahtfördergeschwindigkeiten eine Lichtbogenrotation einsetzt, die instabil ist und Schweißfehler in der Naht verursacht. Durch den Einsatz spezieller Schutzgasgemische ist es gelungen, auch diese Lichtbogenart beim

MAG-Hochleistungsschweißen so zu stabilisieren, dass diese Verfahrensvariante für vollmechanisierte Anwendungen in der Produktion eine wirtschaftlich interessante Alternative bietet [19].

Ein zweites Problem sind die hohen Anforderungen der MAG-Hochleistungsschweißprozesse hinsichtlich der Bauteiltoleranzen [20]. Es ist erforderlich Sensoren einzusetzen, um die Unregelmäßigkeiten der Fügestelle zu erfassen und den Prozess optimal den Gegebenheiten anzupassen.

Eine andere neue Variante des MSG-Hochleistungsschweißens ist das Schweißen mit Bandedelektrode. Hierbei handelt es um einen noch nicht ausgereiften Prozess, z.Z. wird aber an der Weiterentwicklung der Gerätetechnik, Zusatzwerkstoffe und Schutzgase gearbeitet [15]. Bei diesem Prozess wird die Elektrode mit flachem Querschnitt unter Schutzgas abgeschmolzen, ähnlich wie beim Eindrahtprozess MSG. Durch den flachen Querschnitt verändert sich aber das Ablöseverhalten der Tropfen im Lichtbogen, das teilweise zu anderen Ergebnissen als beim MSG-Eindrahtschweißen führt.

Auch für das Fügen von Aluminiumlegierungen wird das MIG-Schweißen mit Bandedelektrode eingesetzt [21]. Typische Einsatzgebiete sind der Maschinen-, Anlagen- und Behälterbau sowie der Fahrzeugbau. Die Anwendungen werden künftig sowohl bei kontinuierlich fertigen Schweißstraßen für Halbzeuge, wie Rohre, Profile und Bänder, als auch in der Teilefertigung von z.B. Achs- und Karosserieteilen, Felgen und vielfältigen Komponententeilen zu finden sein.

Für das MIG-Schweißen mit Bandedelektrode von Aluminiumlegierungen werden Stromquellen eingesetzt, die mindestens eine Stromstärke 400 A liefern. Besondere Anforderungen werden an die Drahtförderung und den Schweißbrenner gestellt [21]. Der automatische Schweißprozess verlangt ein komplettes Drahtvorschubsystem, das die Bandedelektrode kraftvoll und stabil über längere Distanzen fördert. Ein hohes Anlaufdrehmoment und das sehr gute Durchzugsvermögen garantieren im Dauerbetrieb reproduzierbare Drahtvorschubgeschwindigkeiten. Die hohen thermischen Belastungen des MIG-Schweißens mit Bandedelektrode erfordern einen Schweißbrenner, der mit einem Zweikreis-Kühlsystem ausgestattet ist und somit Kontaktröhre und Schutzgasdüse separat mit einer Flüssigkeit kühlen kann. Eine sichere Stromkontaktierung wird durch eine spezielle, konstruktive Gestaltung des Kontaktröhres erreicht.

Um alle Vorteile des Hochleistungsschweißens in der Praxis zu realisieren, ist es notwendig, ein präzises, thermisch und mechanisch standfestes Werkzeug zu entwickeln. Die Steigerung der Produktivität durch die Erhöhung der Abschmelzleistung fördert den Aufstieg des Schweißstromes. Dies führt zu stärkerer thermischer Belastung des Werkzeuges, die proportional der 2. Potenz des Stromwertes ansteigt. Man stellt fest, dass der Faktor der thermischen Belastung bei modernen schweißtechnischen Werkzeugen von großer Bedeutung ist. Ein solches Werkzeug, z.B. ein Schweißbrenner, muss ohne

Unterbrechung längere Zeit arbeiten und die Reproduzierbarkeit der Qualität garantieren, sowie eine lange Lebensdauer nachweisen.

Ein breiter Einsatz vollautomatisierter bzw. robotisierter Fertigungseinheiten für geschweißte Erzeugnisse unterstützt die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens nicht nur durch Senken des Lohnanteils in den Produkten, sondern durch hohe, reproduzierbare Qualität der Fertigung [22]. Die moderne Automobilindustrie und deren Zulieferbetriebe sind ohne Anwendung von Schweißrobotern nicht vorstellbar.

Die Anzahl der in Deutschland eingesetzten Industrie-Roboter aller Typen steigt stetig und hat in den vergangenen Jahren folgende Dynamik aufgewiesen [23]:

**Tabelle 1.** In Deutschland eingesetzte Industrie-Roboter

Jahr	Stückzahl
1990	28.240
1992	39.390
1994	48.840
1996	66.600
1998	85.560
2000	108.990

Deutschland belegt den dritten Platz in die Welt nach der Anzahl der eingesetzten Schweißroboter, die ca. 40% aller Industrie-Roboter beträgt [24].

Der Erfolg einer Investition in Schweißrobotersysteme hängt mehr und mehr von der optimalen Gestaltung des Gesamtkonzepts ab [25]. Bei der Planung von Roboterfertigungszellen bzw. -linien sollen folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- schweißrobotergerechte Konstruktion des Produktes,
- optimale und begründete Auswahl des Schweißprozesses,
- Maßnahmen zum richtigen Positionieren des Erzeugnisses und Nahtverfolgung,
- Einsatz von hochzuverlässigen schweißtechnischen Werkzeugen, Stromquellen,
- Flexibilität beim Umstellen des gesamten Komplexes auf eine neue Schweißaufgabe,
- Sicherheitseinrichtungen und Arbeitsplatzgestaltung.

Mit dem Einsatz von hochzuverlässigen schweißtechnischen Werkzeugen mit hoher Belastbarkeit und anderer Gerätetechnik sollen Ausfälle von Roboterfertigungszellen und -linien vermieden werden, dadurch wird deutlich zur Wirtschaftlichkeit solcher Komplexe beigetragen. Die verschleißbedingten Ausfälle an Schweißbrennern sind dabei ein großes Problem [26]. Im Unterschied zu den handgeführten Brennern, die ein bis zwei Arbeitsschichten pro Tag mit regelmäßiger Wartung eingesetzt sind, arbeiten

robotergeführten Brennern dagegen bis zu vollen 3 – 4 Schichten ohne Wartung. Der Schwachpunkt bei der Automatisierung des Schutzgasschweißens ist die Abnutzung des Stromkontaktrohrs direkt im Kopf des Brenners. Dadurch sinkt die Kontaktqualität ab, so dass die Sicherheit der Stromübertragung nicht mehr gewährleistet ist. Dieser Zustand führt nicht nur zu Schweißnahtfehlern, sondern es entsteht die Gefahr, dass die Drahtelektrode in der Stromdüse festbrennt. Dadurch kann der Lichtbogen hochsteigen und das Kontaktrrohr zerstören. Um das zu vermeiden, muss der Schweißbrenner zum richtigen Zeitpunkt ausgetauscht und neu nachgerüstet werden.

Der Brenneraustausch in einer Fertigungslinie ist eine komplizierte und zeitaufwendige Aufgabe, weil sie aus Sicherheitsgründen zunächst heruntergefahren werden und nach dem Austausch komplett neu angefahren werden muss. Um große Betriebszeitverluste zu vermeiden, wäre es sinnvoll, Brenner automatisch während des Betriebs der Linie zu wechseln. Für die Realisierung eines solchen Konzeptes sind entsprechende Roboterschweißbrenner und Wechselstationen notwendig.

Forderungen nach Arbeitsplätzen, die weder die Umwelt belasten noch die Gesundheit des Schweißers gefährden, besonders beim Schweißen neuer Werkstoffe, spielen oft eine entscheidende Rolle hinsichtlich des Einsatzes einer bestimmten Schweißtechnologie [27]. Beim Schweißen solcher Werkstoffe laufen verschiedenartige metallurgische und chemisch/physikalische Vorgänge ab. Dabei treten prozessbedingte Gefahren auf, die zu unterschiedlichen Belastungen des menschlichen Körpers führen können. Zu den Hauptbelastungen, denen die Schweißer täglich ausgesetzt sind, gehören neben hohen Lärmbelastungen der Kontakt mit einer Vielzahl von Schadstoffen, die im Schweißprozess freigesetzt werden. Eine Besonderheit ist dabei das Schweißen von hochlegierten Werkstoffen und Nickel-Basislegierungen, da beim Schweißen dieser Werkstoffe krebserzeugende Schadstoffe freigesetzt werden [28]. Diese Schadstoffe, bei denen es sich vorrangig um Nickeloxide und/oder Chrom-VI-Verbindungen handelt, stammen zu 95 % aus dem Schweißzusatz. Beim Schweißen solcher Werkstoffe steigt der Bedarf an frischer Luft zur Minderung der freigesetzten Schadstoffe auf den erlaubten Luftgrenzwert um das 10fache [29]. Um gesundheitliche Gefährdungen sowohl der Schweißer am Arbeitsplatz als auch derjenigen Personen, die in der Nähe des Schweißplatzes arbeiten, sowie um Belastungen der Umwelt weitgehend auszuschließen, sind geeignete Schutzmaßnahmen erforderlich. Gelangen diese Stoffe in die freie Atmosphäre, belasten sie die Umwelt. Die Schutzmaßnahmen und ihre Auswahl ergeben sich vorrangig aus § 19 der Gefahrstoffverordnung. Dort werden verschiedene Forderungen in folgender Reihenfolge getroffen [30]:

1. Einsatz von schadstoffärmeren Schweißverfahren (Verfahrensumstellung)
2. Erfassung der Schadstoffe an der Entstehungsstelle (Absaugung im Entstehungsbereich)

3. Erfassung der Schadstoffe durch raumluftechnische Maßnahmen
4. Einsatz geeigneter persönlicher Schutzmaßnahmen (z. B. fremdbelüfteter Helm).

Durch diese Schutzmaßnahmen soll erreicht werden, dass die Luftgrenzwerte (MAK-Werte<sup>1</sup>) am Arbeitsplatz sicher eingehalten werden. Es existieren folgende drei Möglichkeiten zur Umsetzung der oben gegebenen Empfehlungen und damit zur Erfassung der beim Schweißen entstehende Schadstoffe (Aerosole, Gase, Stäube, Metaldämpfe):

- Lüftung der gesamten Halle,
- örtlich installierte Absaugsysteme sowie
- brennerintegrierte Absaugsysteme [31].

Die letzte Variante hat gegenüber den beiden anderen Varianten den Vorteil, dass die Schadstoffe direkt am Entstehungsort erfasst werden. Ferner beträgt der wirksame Saugvolumenstrom nur ca. 150 m<sup>3</sup>/h [32], was gleichzeitig einen niedrigeren Energieverbrauch und geringere Installationskosten bedeutet. Ein weiteres, von vielen nur ungenügend beachtetes Argument für die Direktabsaugung ist, dass wenn der Schweißrauch unmittelbar am Entstehungsort abgesaugt wird, er sich nicht am Roboter, an der Vorrichtung oder an den Kabinenwänden absetzen kann. Über die Jahre betrachtet können hier beachtliche Reinigungskosten gespart werden [33]. Örtlich installierte Absaugsysteme mit 1.000 m<sup>3</sup>/h Saugvolumenstrom und Hallenabsaugungen mit über 100.000 m<sup>3</sup>/h sind wegen ihren hohen Montage- und Betriebskosten sowie Heizungskosten eher als kritisch zu betrachten [34]. Durch die Anwendung von örtlichen und Hallenabsaugungen wird zwar die Konzentration von Schadstoffen in der Arbeitszone auf ein zulässiges Maß reduziert, direkt unter dem Schweißerschutzhelm ist die Schadstoffkonzentration trotzdem viel höher als erlaubt [35].

Außerdem ist zu beachten, dass bei Schweißarbeiten in geschlossenen Objekten (z. B. Behälter, Rohre, Schiffe, usw.) die Anwendung solcher Absaugsysteme technisch unmöglich ist [46].

Trotz der Auswahl verschiedener Absaugmöglichkeiten stellt man in [37] folgendes fest: „Eine ausführliche Marktforschung hat ergeben, dass mehr als 40 % der installierten Schweißrauchabsauganlagen aller Hersteller nicht verwendet werden, weil die Geräte zu wenig komfortabel in Bedienung und Handhabung sind“. Darüber hinaus fehlt es auch an Schutzgasbrennersystemen mit integrierten Absaugmechanismen, die einerseits einen

---

<sup>1</sup> Der MAK-Wert (maximale Arbeitsplatzkonzentration) ist die höchstzulässige Konzentration eines Arbeitsstoffes als Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Luft bei einer achtstündigen Exposition und einer durchschnittlichen Wochenarbeitszeit von 40 Stunden, bei der die Gesundheit der Beschäftigten nicht beeinträchtigt wird.

extrem hohen Erfassungsgrad (fast 100 %) der beim Schweißen entstehenden Schadstoffe ermöglichen und somit den Schweißer und die Umwelt vor deren negativen, gesundheitsschädlichen Einflüssen effektiv schützen sowie andererseits für einen ausreichenden Schutz des hochlegierten Schweißbades vor der Atmosphäre und damit für eine hohe Schweißnahtgüte sorgen. Außerdem sind die derzeit verfügbaren Absaugbrenner nur bei Schweißungen in einfachen Schweißpositionen (PA, PB) wirksam, beim Schweißen in schwierigen Positionen (PC, PF, PG, PE) jedoch zu ineffizient.

Außerdem verursachen Schweißleistungen von beispielsweise 18 kW (450 A, 40 V), wie sie beim Hochleistungsschweißen auftreten können, Temperaturen im Brennerkopfbereich, die die Absauggase derart erhitzen, dass selbst die Schläuche der Brenner verbrennen würden. Damit ist ein Durchführen dieser Gase durch die Griffschale praktisch ausgeschlossen. In diesen Fällen muss mit einem Bypass gearbeitet werden. Diese Absaugbrenner sind meistens schwer, unflexibel und unhandlich. Bei der Anwendung solcher Werkzeuge wird der Schweißer schnell müde und seine Handgelenke werden stark belastet. Das ist mit ein Grund, weshalb die Schweißer ungern mit Absaugbrennern arbeiten.

Die zusätzliche hohe thermische Belastung der Absaugbrenner durch strömende Absauggase erfordert entsprechende Maßnahmen, um die Brenner zu kühlen.

Die Integration von Absaugausrüstungen kompliziert die Brennerkonstruktion und fordert eine Optimierung der Absaugkanäle, um einen höheren Erfassungsgrad zu realisieren.

#### **Zusammenfassung der Besonderheiten des modernen Standes der Entwicklung technologischer Verfahren mit Lichtbogennutzung:**

- globale Verbreitung neuer metallischer Werkstoffe wie Aluminium- und Titanlegierungen, hochlegierte Stähle,
- Umstellung der Klein- und mittelständischen Industrie auf neue Werkstoffe,
- schwieriger werdende technologische Aufgaben für die Montage und das Schweißen der Erzeugnisse,
- viele Beispiele der Sondertechnologie und Sonderfertigung,
- neue Möglichkeiten für die Entwicklung und Optimierung der Technologie der Montage und des Schweißens mit Hilfe der modernen Rechentechnik,
- neue Möglichkeiten der Schweißanlagen in der Leistung, Steuerbarkeit, Formierung des Schweißzyklus,
- Verstärkung der Konkurrenz, dringende Notwendigkeit auf die Wirtschaftlichkeit zu achten,
- Umweltbewusstsein, gesunde Arbeitsplätze.

#### **Anforderungen an das schweißtechnische Werkzeug:**

- Sonder-Schweißwerkzeug, das oft nur einmal speziell gebaut wird,
- Anpassung an die neuen Schweißmaschinen und Anlagen,
- spezielle Anwendung bei Anlagen mit Lichtbogennutzung; hohe thermische und mechanische Belastbarkeit,
- Stabilität und Reproduzierbarkeit der Qualität,
- gesunde Arbeitsbedingungen, Erfüllung der ergonomischen Bedingungen.

## 1.2. Belastungen und Einflüsse auf den Schweißbrenner während des Betriebes. Elektrischer Lichtbogen als Wärmequelle

Im Kapitel 1.1. wurde anhand von Beispielen der schweißtechnischen Bearbeitungsverfahren mit Lichtbogennutzung analysiert, welche Anforderungen das Verfahren an das Werkzeug stellt. Für die erfolgreiche praktische Umsetzung des Verfahrens und Anfertigung eines Erzeugnisses spielt das Werkzeug mit seinen Eigenschaften eine zentrale Rolle.

Während des Betriebes nimmt der Schweißbrenner die Belastungen und Einflüsse auf. Das Niveau dieser Belastungen ist durch die Verfahrensparameter vorgegeben und ihre Einwirkung auf das Werkzeug wird durch seine Eigenschaften (Stromstärkebereich, Einschaltdauer, Standzeit des Brenners) bestimmt.

Dabei zeigte sich, dass folgende Belastungen relevant sind:

Thermische Belastung:

- durch Stoff- und Kontaktwiderstände in den stromleitenden Teilen, sowie bei der
- Übertragung des Schweißstromes im Brenner auf die Drahtelektrode bzw. Elektrode,
- durch Wärmestrahlung vom Lichtbogen, Schmelzbad und Werkstück,
- durch Konvektion vom Lichtbogen, Schmelzbad und Werkstück,
- durch Wärmeleitung von benachbarten Bauelementen.

Mechanische Belastung:

- durch Kollision mit Werkstück bzw. Vorrichtungsteilen,
- durch Abschaben bzw. Abklopfen der Spritzer,
- durch Verdrehen bzw. Knicken des Schlauchpaketes,
- durch Festklemmen bzw. Festschmelzen des Schweißdrahtes,
- durch Gleiten bzw. Reiben des Schweißdrahtes beim Transport im Brenner und im Schlauchpaket,
- durch unsachgemäße Handhabung.

**Die Gewährleistung eines entsprechenden Stromstärkebereichs, die Einschaltdauer, die Standzeit des Brenners und seine Elemente sind die**

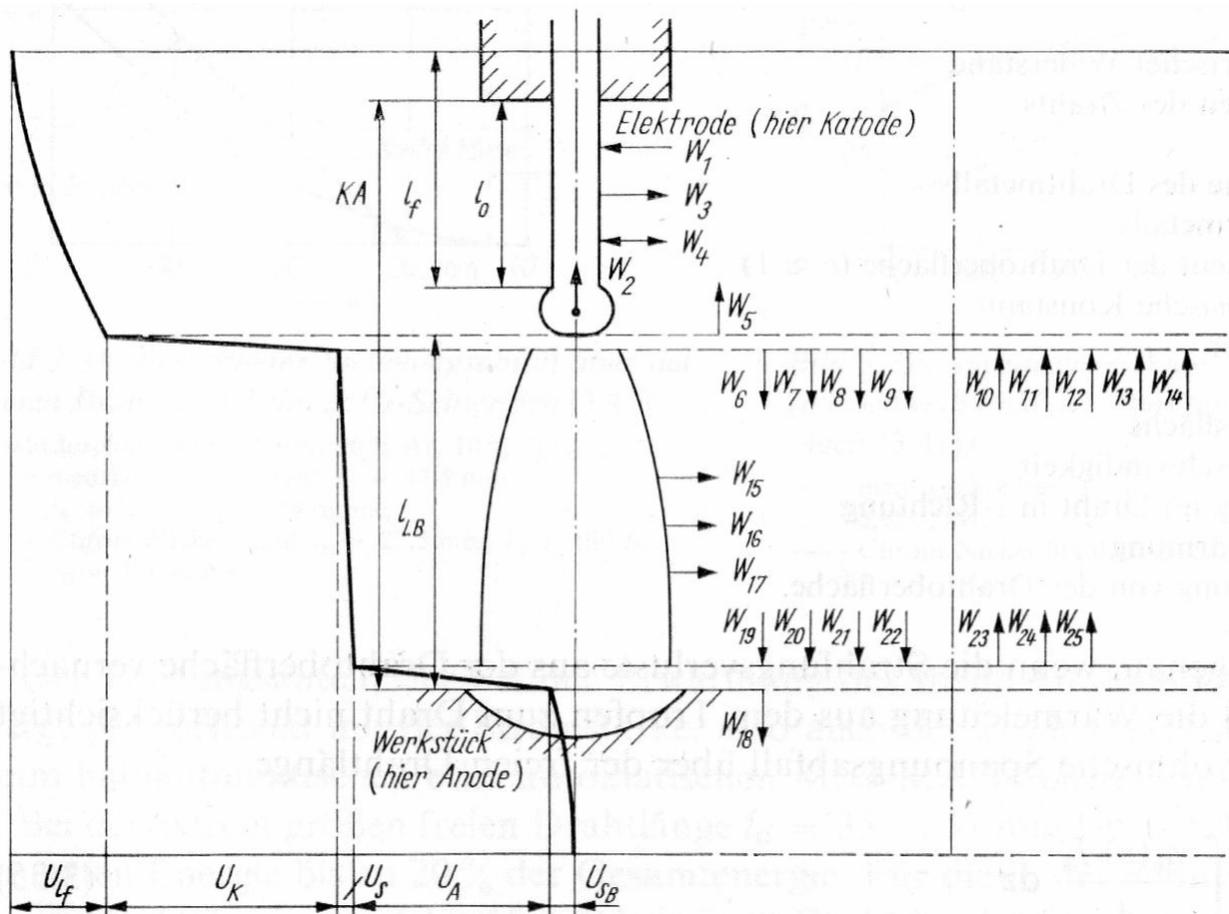
## **Hauptanforderung an das VRM. Die Erfüllung dieser Anforderung garantiert die volle Funktionsfähigkeit des Brenners (VRM).**

Die größte Belastung, die auf den Brenner während der Funktionsausführung einwirkt, ist die thermische Belastung. Die thermische Belastung entsteht während des Austritts der Wärme aus dem Lichtbogen, aus den stromleitenden Teilen und aus dem Werkstück, falls es vorgewärmt war. Es zeigte sich, dass die thermische Belastung den größten Einfluss hat und maßgeblich die Lebensdauer des Brenners bestimmt. Deshalb ist eine intensive Kühlung des Brenners erforderlich, um den negativen Einfluss dieses Faktors zu mindern. Maß der thermischen Belastung des Brenners ist die Temperatur.

Bei allen betrachteten Bearbeitungsverfahren dient den elektrischen Lichtbogen primär als Wärmequelle. Der freibrennende Schweißlichtbogen ist eine elektrische Entladung in einem ionisierten Gas. Durch physikalische Prozesse, die im Lichtbogen verlaufen, wird die elektrische Energie in Wärme umgewandelt.

In [38] wird für den Fall des MSG-Schweißens der Lichtbogenbereich mit Schmelzbad und Elektrode als Energiequellengebiet und die abfließenden Wärmemengen in Elektrode, Schmelzbad und Umgebung als Energiesenkegebiete von Schellhase betrachtet. Es sind fünf Quellengebiete festzustellen, **Bild 1**:

- der Bereich der freien Drahtlänge,
- der Katodenfall,
- der Säulenspannungsabfall,
- der Anodenfall,
- der Spannungsabfall in der Schmelze.



**Bild 1:** Zusammenstellung von Energieanteilen im Schweißlichtbogen [38]

Im einzelnen sind die Energieanteile zu berücksichtigen:

- $W_1$  – Joulische Erwärmung des Elektrodendrahts
- $W_2$  – Wärmeleitung aus dem geschmolzenen Tropfen
- $W_3$  – Wärmeabstrahlung von der Drahtoberfläche
- $W_4$  – Wärme aus Thomson-Effekt
- $W_5$  – Wärme aus der Katodenfallschicht durch Wärmeleitung
- $W_6$  – Austrittsarbeit der Elektronen
- $W_7$  – Ionisationsarbeit der Elektronen
- $W_8$  – Energieanteil der Metaldampfabströmung
- $W_9$  – Energieanteil der Kaltdrahtzuströmung
- $W_{10}$  – Energieanteil aus der werkstückseitigen Gasströmung
- $W_{11}$  – Energieanteil aus der werkstückseitigen Metaldampfströmung
- $W_{12}$  – Energieanteil aus der Kinetik des Ionenrückfalls
- $W_{13}$  – Energieanteil der Rekombination der Ionen
- $W_{14}$  – Energieanteil aus der Strahlung der Bogensäule
- $W_{15}$  – Energie der Wärmeableitung
- $W_{16}$  – Energieanteil der Gasabströmung (Konvektion)

$W_{17}$  – Energieabstrahlung

$W_{18}$  – Wärmeleitung zur Schmelze

$W_{19}$  – Energieanteil aus der elektrodenseitigen Gasströmung

$W_{20}$  – Energieanteil aus der werkstückseitigen Metaldampfströmung

$W_{21}$  – Energieanteil aus der Kinetik des Elektroneneinfalls

$W_{22}$  – Energieanteil aus der Strahlung der Bogensäule

$W_{23}$  – Austrittsarbeit der Sekundärionen

$W_{24}$  – Energieanteil der Metaldampfströmung

$W_{25}$  – Energieanteil der Kaltgaszuströmung

Der Leistungsanteil der freien Drahtlänge wird nach [Schellhase] für die in der Schweißpraxis üblichen freien Drahtlängen von 6 bis 15 mm bei einem Drahtdurchmesser von 1,2 mm zwischen 5 und 10% der Gesamtenergie eingeschätzt. Der Leistungsanteil, der bei der Erwärmung des freien Drahtendes freigesetzt wird, steigt proportional mit der Stromstärke.

Der Leistungsanteil der Lichtbogensäule liegt zwischen 10 und 30% der Gesamtenergie. Der Hauptanteil der Strahlungsenergie wird aus der Lichtbogensäule an die Umgebung abgegeben. Außerdem verliert die Lichtbogensäule Energie durch Konvektion (Heißgasabströmung) und durch Wärmeleitung (thermischer Diffusionsvorgang in die Atmosphäre).

Bei der Aufstellung der Katodenbilanz nach [ ] werden die Energieanteile, die die Bogensäule durchlaufen, um einen Faktor  $\varepsilon$  reduziert. Die Katodenbilanz wird:

$$W_5 + \varepsilon_{10}W_{10} + \varepsilon_{11}W_{11} + W_{12} + W_{13} + W_{14} = W_6 + W_7 + W_8 + W_9 \quad (1.1)$$

Der katodische Anteil beträgt bei 150 A Stromstärke 40 bis 45% am Gesamtenergieumsatz, im Werkstück werden 30 bis 37% erzeugt. Die Bilanz für 300 A Stromstärke beträgt nach Literaturangaben für die Katode 30% und für die Anode 45 bis 50% der gemessenen Anteile der Gesamtenergie.

Auf dem Bild [ ] ist die Anode am Werkstück. Die Anodenbilanz ist:

$$W_{18} + W_5 + \varepsilon_{19}W_{19} + \varepsilon_{20}W_{20} + W_{21} + W_{22} = W_{23} + W_{24} + W_{25} \quad (1.2)$$

Die Anodebilanz wird durch den Elektroneneintritt in die Anode und die katodische Strömung bestimmt, während als Kühleffekt die Metall- und Gasströmung auftritt.

Im brennenden elektrischen Lichtbogen wird elektrische Energie in Wärmeenergie umgesetzt. Dieser Prozess verläuft aber nicht ohne Energieverluste und hat einen bestimmten Wirkungsgrad, der unterschiedliche Werte für verschiedene Lichtbogenarten annehmen kann. Beim elektrischen Lichtbogen zwischen nichtschmelzenden Elektroden (z.B. WIG-Schweißen) verteilt sich nach Energiebilanzen von Kulagin, Rykalin und Kirdo die volle Leistung (100%) des Lichtbogens wie folgt:

- ca. 20% werden an die Umgebung abgegeben,
- ca. 20% werden für die Erwärmung der Elektroden verbraucht,
- ca. 60% beträgt somit die effektive Leistung des Lichtbogens.

Beim Schweißen mit abschmelzender Elektrode (MSG-Schweißprozesse) sieht die energetische Bilanz des Lichtbogens anders aus:

- ca. 20% werden an die Umgebung abgegeben,
- ca. 30% werden für das Schmelzen der Elektrode genutzt; davon gehen aber 5% durch Spritzer verloren, 25% bleiben als Wärmeinhalt im Tropfen,
- ca. 50% dienen der Erwärmung des Grundwerkstoffes,
- die Effektive Leistung beträgt somit bei diesem Prozess ca. 75%.

Man stellt fest, dass bei beiden Prozessen ca. 20% der gesamten Lichtbogenenergie an die Umgebung abgegeben werden. Ein Teil dieser Energie geht wieder in den Brenner, wird von Brennerteilen absorbiert und erwärmt das Werkzeug.

Aus der **Tabelle 2** kann man die Gesamte Lichtbogenenergie für verschiedene MSG-Brennertypen bei der maximalen Belastung ablesen.

**Tabelle 2:** Gesamte Lichtbogenenergie für verschiedene MSG-Brennertypen bei der maximalen Belastung

Brennertyp	$I_{\max}, A$	$U_{\max}, V$ $U_{\max} = 14 + 0,05I_{\max}$	$P_{Lb}, W$
5W	315	30	9450
7W	500	39	19500
7.1W	400	34	13600
9W	560	42	23520
241	320	30	9600
411	400	34	13600
511	500	39	19500
351	320	30	9600
452	450	36,5	16425
601	600	44	26400

Das tatsächliche thermische Verhalten eines Schweißbrenners lässt sich nur im Schweißversuch mit hinreichender Genauigkeit untersuchen. Die thermische Belastung des Schweißbrenners wird durch sehr komplexe Vorgänge verursacht und ist von den Eigenschaften sowohl des Lichtbogens als auch des Brenners abhängig. Man kann die Erwärmung eines Lichtbogenschweißbrenners vereinfacht auf mehrere Einzelvorgänge, die in den ausgewählten Hauptelementen des Brenners (z. B.: Stromdüse; Düsenstock; Gasdüse; Innenrohr; Stromkabelverlaufen, zurückführen (**Bild 2**)).



### **1.3 Entwicklungsstand und Entwicklungstendenzen der Verfahrensrealisierenden Mittel (VRM)**

Um den Anforderungen der modernen Schweißfertigung nachzukommen, werden immer neue Typen von Verfahrensrealisierenden Mitteln mit Lichtbogennutzung, d.h. Schweiß- und Schneidbrennern von Brennerherstellern auf den Markt gebracht.

Um das MSG-Löten von verzinkten Feinbleche erfolgreich in der Produktion einzusetzen, wurden entsprechende schweißtechnische Werkzeuge und Geräte entwickelt und gebaut. Es wird ein Vier-Rollen-Antrieb verwendet, der mit geeigneten Vorschubrollen selbst bei geringen Anpresskräften eine ausreichende Kraft auf den zu fördernden Draht überträgt. Üblicherweise werden glatte, polierte Halbrundnutrollen eingesetzt. Um den Reibungswiderstand im Schlauchpaket gering zu halten, kommen Teflon- bzw. Kunststoff-Grafit-Seelen zum Einsatz. Eine weitere Voraussetzung für eine störungsfreie Drahtförderung ist ein präziser Drahteinlauf. Ein groß dimensioniertes, massives Kontaktrohr im Lötbrenner ermöglicht einen zuverlässigen Stromübergang auf den Bronzedraht [4]. Dadurch konnten die Probleme der Kraftübertragung bei der Drahtförderung sowie des Stromübergangs in der Stromdüse zufriedenstellend gelöst werden.

Zur Realisierung aller Vorteile des Hochleistungsschweißens wurde ein Brenner für das Metall-Aktivgasschweißen mit zwei Drahtelektroden (Tandemschweißen) entwickelt [40]. Der moderne Stand der Stromquellenentwicklung erlaubt die Anwendung zweier unabhängiger mikroprozessorgesteuerter Stromquellen. Dabei können auch unterschiedlich dicke Drahtelektroden verarbeitet werden. Zur Gewährleistung der entsprechenden Kühlung des Brenners ergab sich hier weiterer Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Optimierung von Kühlkanälen im Brenner sowie der Entwicklung eines leistungsfähigen Kühlsystems.

Bei der Anfertigung der Seitenwänden des ICE 3-Zuges wurde ein speziell von der Fa. „Cloos Schweißtechnik“ entwickelter, in Höhe und Neigung verstellbarer Schweißkopf mit Tandembrenner und Rauchabsaugschläuchen, vorlaufendem Lasersensor und Videokamera mit Zusatzbeleuchtung eingesetzt [7]. Die kompakten Brenner in gerade bzw. gebogener Form kommen an jede Schweißnaht heran. Ein Kühlsystem mit doppelt wassergekühlter Kontaktrohraufnahme und Mehrfachkühlung der Gasdüse sorgt für eine optimale Wärmeableitung. Der beim Tandemschweißen erforderliche konstante Vorschub beider Drahtelektroden wurde über ein zweimotoriges elektronisch synchronisiertes Antriebssystem „Duo-Drive“ garantiert. Ein tachogeregelter Kompaktantrieb am Schweißbrenner arbeitete dabei systemführend und bestimmte die Drahtfördergeschwindigkeit. In diesem Beispiel wurden die Problemen der Wärmeableitung von thermisch belasteten Brennerbauteilen gut gelöst, obwohl die Gesamtkonstruktion des Brenners einen sehr hohen Komplexitätsgrad aufweist.

Bei der Entwicklung der Lichtbogenschweißbrenner für das Metall-Inertgasschweißen von Ti-Legierungen besteht ein großer Nachholbedarf. Die Vorversuche haben gezeigt, dass sich die herkömmlichen wassergekühlten Brenner mit langen Schlauchpaketen schlecht in die Schutzgaskammer integrieren lassen und große Schwierigkeiten bei der Abdichtung der Schlauchführung bereiten [10]. Werden statt wassergekühlter Brenner luftgekühlte eingesetzt, müssen Pausen beim Schweißen eingelegt werden, da die Kühlung zu schwach ist. Damit entfiere der Vorteil des Metall-Inertgasschweißens, nämlich seine Wirtschaftlichkeit durch die hohe Schweißgeschwindigkeit. Die Lösung sollte zunächst durch eine ausreichende Dimensionierung der strom- und wärmeleitenden Brennerbauelemente gesucht werden, wofür genaue Erkenntnisse über die Wärmeströme im Brenner notwendig sind.

Um Rüstzeiten bei den Anlagen für das Mikro-WIG-Schweißen zu sparen, wurden die folgenden zwei Maßnahmen ergriffen [11]. Zum einen wurden Sonderelektroden entwickelt, bei denen stirnseitig in eine erodierte Vertiefung ein Einsatz aus Thorium- oder Ceroxid eingebracht wurde. Dadurch wird vor allem bei niedrigem Strom eine sichere Zündung erreicht. Mit diesen Elektroden werden bis zu 15 000 Zündfolgen statt 6000 mit herkömmlichen erreicht. Um Wechselzeiten zu minimieren, wurde zum anderen ein WIG-Brenner mit Schnellwechselkopf in einer gas- und einer wassergekühlten Version entwickelt. Die Elektrode wird im Wechselkopf über eine Einstellehre außerhalb der Fertigungslinie justiert und kann bei kurzer Unterbrechung des Fertigungstaktes gewechselt werden. Um den Elektrodenabstand zur Fügestelle während des Betriebes nachstellen zu können, wurden für Anwendungen bis ca. 20 A Schweißstrom luft- und wassergekühlte Sonderbrenner entwickelt, die mit nachstellbarer Elektrode arbeiten. Nach Erreichen einer vorgegebenen Zahl von Zündfolgen ergibt sich an der Elektrode ein Abbrand, der durch Tastendruck pneumatisch nachgestellt wird. Eine andere Möglichkeit der Reduzierung des Elektrodenabbrands besteht in einer effizienten Kühlung und Optimierung der Brennerkonstruktion.

Beim WIG - Schweißen ist es notwendig, wegen der verschiedenen Werkstoffe während der Arbeitsaufgabe, auf verschiedene Brennerarten/Schutzgase umzustellen. Um Zeit zu sparen, wurde der „Multiple Torch Selector“ [41], entwickelt.

Beim MSG-Doppeldrahtschweißen wird in der Regel ein Brenner mit einer runden Gasdüsengeometrie und paralleler Anordnung der Drahtelektroden in einem gemeinsamen Kontaktrohr verwendet. Hierdurch wird der Brenner sehr kompakt und ermöglicht eine gute Zugänglichkeit zum Bauteil, beide Drähte verfügen über das gleiche Potential. Der Schweißbrenner mit gemeinsamem Potential kann für ein sensorgeführtes Schweißen nicht genutzt werden [18].

Für Schweißprozesse mit hoher Abschmelzleistung und hohen Anforderungen an die Bauteiltoleranzen könnte der Lichtbogen als Sensor genutzt werden [20]. Der

Lichtbogensensor gehört zu den Prozesskenngößen auswertenden Sensoren und zeichnet sich durch die Eigenschaft aus, den Lichtbogen als Messinstrument zu nutzen. Sein störungsunempfindlicher Aufbau sowie fehlende Beeinträchtigung der Zugänglichkeit des Schweißbrenners zum Werkstück sind weitere Vorteile. Dass keine Sensorkomponenten in direkter Umgebung des Schweißprozesses erforderlich sind, zählt zu den weiteren Vorteilen, die zu einer weiten Verbreitung dieses Sensorprinzips in der industriellen Fertigung beigetragen haben. Dieses Prinzip wurde in einem MSG-Schweißbrenner mit rotierendem Innenteil erfolgreich umgesetzt und für das robotisierte Schweißen verwendet. Die hohe Komplexität des Brenners beeinträchtigt aber die Zuverlässigkeit der Konstruktion und verhindert den breiten Einsatz.

Brenner für das MSG-Bandschweißen befinden sich, wie auch das Verfahren selbst, noch in der Entwicklungsphase. Hier entsteht ein beträchtlicher Bedarf für Projektierungen und experimentelle Untersuchungen hinsichtlich hoher Belastbarkeit, effektiver Kühlung und stabiler Stromübertragung bei Brennern dieser Klasse.

Alle Brenner für derartige Hochleistungsprozesse benötigen ein effizientes Kühlsystem, um die Vorteile dieser Prozesse in der Praxis zu realisieren. In dieser Hinsicht gibt es einen großen Nachholbedarf, weil die handelsüblichen Kühlgeräte in diesem keine ausreichende Leistung erbringen.

Moderne Brenner zeichnen sich vor allen durch kleine Baugrößen aus. Dieser Faktor könnte entscheidend für den breiten Einsatz in der Serienfertigung sein. Das Einhalten kleiner Abmessungen des Brenners ist nur durch eine erfolgreiche Lösung des Problems der Wärmeabfuhr von durch Strom belasteten Brennerteilen möglich [42].

Bei der Anwendung der Robotersysteme ist es notwendig, die Wechselzeiten des Brenners möglichst kurz zu halten, [43]. Hierfür wird ein Brennerwechselsystem angewendet [26, 44]. In diesem System wird der Brenner entriegelt und herausgenommen, der Draht wird automatisch abgeschnitten. Der neue, auf einer Prüf- und Richtlehre überprüfte und voreingestellte Brennerhals wird ebenso schnell per Schnellverschluss aufgesetzt, verriegelt und der Schweißdraht automatisch eingeführt. Die Maßnahmen gegen die Verschmutzung der Schweißbrennern [45] sowie der geschweißten Erzeugnisse [46, 47] sind auch bedeutend im Hinblick auf Zeit- und Kosteneinsparung bei der robotisierten Fertigung.

Um einen sichereren Drahttransport beim robotisierten Schweißen zu garantieren, werden zusammen mit dem Roboterschweißbrenner Push-Pull-Drahtvorschubsysteme zum Einsatz gebracht [25]. Die Züandsicherheit spielt beim Roboterschweißen, wie bei jedem automatisierten Prozess, eine bedeutende Rolle. Roboterschweißbrenner werden mit speziellen konstruktiven Lösungen ausgestattet, um die Lichtbogenzündung zu garantieren. Speziell integrierte Nocken im Drahtförderkanal oder eine exzentrische Positionierung des Kontaktrohrs dienen dem Ziel der Zwangskontaktierung.

Störungen, die durch schlechte Kontaktierung auftreten, beeinträchtigen den Schweißprozess sehr stark und führen zu Qualitätseinbrüchen bei den gefertigten Erzeugnissen. Bei der Beurteilung des Schutzgasschweißprozesses spielt die Lichtbogenstabilität eine entscheidende Rolle. Sie wird beim Schutzgasschweißen einerseits sehr wesentlich von der chemischen Zusammensetzung der Drahtelektrode, deren Oberflächenbeschaffenheit und einigen physikalischen Eigenschaften bestimmt [48]. Andererseits spielen die Eigenschaften des Stromkontaktrohrs eine große Rolle. Um eine hohe Prozessstabilität zu garantieren, sollten die Kontaktrohre daher einen möglichst hohen Verschleißwiderstand aufweisen [49]. Übliche Werkstoffe für Stromkontaktröhre sind Kupfer und Kupferlegierungen. Am häufigsten sind Reinkupfer und Kupfer-Zirkonium- oder Kupfer-Chrom-Zirkonium-Legierungen im Einsatz. Als Nachteil betrachtet man die relativ geringe Härte sowie die niedrige Erweichungstemperatur von etwa 300°C. Es muss berücksichtigt werden, dass, in Abhängigkeit von der eingestellten Schweißstromstärke und den Kühlbedingungen der Brenner, Temperaturen von über 500°C im Stromkontaktrohr auftreten können. Deswegen geraten Werkstoffe in den Blickpunkt, bei denen sich stabile Oxide bzw. Carbide in feinsten Verteilung in der Matrix befinden. Diese Dispersoide führen zu einer Festigkeitssteigerung gegenüber dem nicht verstärkten Matrixwerkstoff, die bis zu Temperaturen nahe dem Schmelzpunkt von Kupfer erhalten bleibt. Vertreter dieser Werkstoffe sind „GlidCop“ und „Discup“. Auf die konstruktive Gestaltung des Kontaktrohrs, die Genauigkeit seiner geometrischen Form als ein wesentlicher Faktor des störungsfreien Stromübergangs wird großer Wert gelegt [50]. Eine andere Möglichkeit, die Standzeit der Stromdüse zu erhöhen und einen störungsfreien Robotereinsatz zu ermöglichen, ist die Temperatur der Stromdüse auf einem Niveau bis 300°C mit Hilfe hocheffektiver Brennerkühlung zu halten. Dafür sind weitere Untersuchungen, sowie theoretische Betrachtungen mit anschließenden Berechnungen der Wärmeableitung notwendig.

Die Auswertung des nationalen und internationalen Schrifttums verdeutlicht, dass es speziell auf dem Gebiet der brennerintegrierten Absaugsysteme für das MSG-Schweißen kaum neue und bahnbrechende Weiterentwicklungen gab, obwohl in den letzten Jahren die Normen zur Regulierung der MAK-Werte von Schadstoffemissionen beim Schweißen stetig strenger geworden sind und somit auch der Bedarf an verbesserten Absaugsystemen gestiegen ist. Speziell beim Schweißen hochlegierter Werkstoffe besteht jedoch nicht nur die Notwendigkeit, die krebserzeugenden Schadstoffe am Entstehungsort gezielt zu erfassen, sondern auch Schweißnähte zu erzeugen, die neben guten mechanisch-technologischen Gütewerten gleichzeitig hohe Korrosionsbeständigkeiten besitzen. Dieser letztgenannte Fakt stellt eine wesentliche Bedingung für die Optimierung des Absaugprozesses dar. Bei der Absaugung der entstehenden Schadstoffe darf die Schutzgasglocke, die das Schmelzbad vor der Atmosphäre abschirmt, nicht beschädigt werden. Aus diesem Grund sind gemäß [51]

für die Strömungsgeschwindigkeit der absaugenden Luft folgende Grenzwerte nicht zu überschreiten:

- für das Schweißschutzgas 100 % CO<sub>2</sub>: 0,5...0,6 m/s
- für das Schweißschutzgas 100 % Ar: 0,2...0,3 m/s

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der hochlegierten Stähle und Ni-Basislegierungen erfordern jedoch den Einsatz von verschiedenen und in manchen Fällen sogar speziell entwickelten Schutzgasgemischen, wie z. B.: 98 % Ar, 2 % CO<sub>2</sub>, Rest Ar ; 30 % He, 2,5 % CO<sub>2</sub>, Rest Ar; 30 % He , 2 % H<sub>2</sub> , 0,05 % CO<sub>2</sub>. Deshalb besteht hier die Notwendigkeit, auch für diese Schutzgasgemische entsprechende Grenzwerte zu ermitteln.

Eine weitere Hauptbedingung ist die Anpassung des Geschwindigkeitsverlaufes der abgesaugten Luft an die genutzte Schweißposition (PA, PB, PC, PF, PG, PE) und zwar so, dass die entstehenden Schadstoffe nahezu hundertprozentig erfasst werden, ohne die Schweißnaht zu schädigen. Bisherige Untersuchungsergebnisse zeigen, dass derzeitige brennerintegrierte Absaugungen dies nur unzureichend ermöglichen und aus diesem Grund zusätzliche Schutzmaßnahmen ergriffen werden müssen. Konventionelle Absaugbrenner mit einer oberhalb der Brennerspitze angeordneten Erfassungseinrichtung sind nicht für alle Schweißfälle gleichermaßen wirkungsvoll einsetzbar. Schwerpunktmäßig lassen sie sich nur für Schweißaufgaben in Wannenposition einsetzen [52].

Zusätzliche hohe thermische Belastung des Absaugbrenners durch abgesaugte erhitzte Gase verringert die Standzeit und Zuverlässigkeit der Brennerbauteile und bedeutet zusätzliche Kosten für die Instandsetzung der vorhandenen sowie für die Beschaffung neuer Werkzeuge. Es ist auch mit ein Grund, weshalb die Absaugschweißbrenner keinen breiten Einsatz finden. Durch ausreichende Kühlung wird es möglich, das Problem des vorzeitigen Verschleißes zu lösen.

Wesentliche wissenschaftliche Beiträge zu den Grundlagen von brennerintegrierten Absaugsystemen lieferten die Promotionsarbeit von SCHRÖDER [51] und die Forschungsarbeiten vom schwedischen Institutet för Verkstadtsteknisk Forskning (IVF) [53]. SCHRÖDER [51] beschreibt in seinen Untersuchungen die Charakteristiken und Besonderheiten von verschieden konstruktiv gestalteten Absaugschweißbrennern sowie die Strömungsverhältnisse der abgesaugten Luft. Seine Untersuchungen beziehen sich jedoch nur auf den einfachsten Fall, dem Schweißen in der Position PA. In [53] erfolgte eine Analyse von Fakten zur praktischen Anwendung und Testung von bereits existierenden und auf dem Markt erhältlichen MSG-Schweißbrennern mit integrierter Absaugung. Es fehlen jedoch Schlussfolgerungen zur Entwicklung neuer Systeme von Absaugbrennern sowie die Betrachtungen hinsichtlich ihre thermischen Belastung.

Die Geschichte zeigt anhand der angeführten Beispiele, dass die Entwicklung und Konstruktion von Lichtbogenschweißbrennern zumeist auf der Basis praktischer Erfahrungen erfolgt. Bis heute werden bei der Brennerentwicklung und beanspruchungsgerechten Dimensionierung keine umfassenden Berechnungen eingesetzt. Es fehlen auch die Grundlagen, um die Gestaltung und Ausführung der Brennerkonstruktion komplett zu berechnen.

Häufig haben die Maßnahmen verschiedener Hersteller zur Verbesserung der Ergonomie des Brenners überwiegend empirischen Charakter. Es wird, je nach Bedarf des Marktes, nur das Koaxialkabel oder die Griffschale bzw. der Knickschutz des Brenners verbessert. Oft gilt dabei als Kriterium der persönliche Geschmack des Konstrukteurs und nicht die wissenschaftliche Betrachtung des Objektes anhand ergonomischer Kriterien [54]. Die Brenner werden nach DIN EN 60974-7 „Lichtbogenschweißeinrichtungen. Teil 7: Brenner“ [55] entwickelt, gefertigt und getestet. Der Vergleich von Firmenkatalogen [56] verschiedener Brennerproduzenten sowie die durchgeführte Patentenrecherche in der Datenbanken PATOS-DE (Teil A und Teil B); PATOSWEB; DEPATISNET zeigt, dass es viele Ähnlichkeiten in den Produktlinien gibt und für jeden Strombereich bestimmte Konstruktionsarten vorherrschen. Die Brenner für den Strombereich von 120 -150 A sind bei allen Herstellern gleich aufgebaut. Unterschiede findet man bei den wassergekühlten Brennern; hier gibt es ein-, zwei- und dreikreisgekühlte Konstruktionen; direkte und indirekte Wasserkühlung der Gasdüse usw.

Die Auswahl der Brennerkonstruktion hängt auch von dem jeweiligen Herstellerland ab. In den USA und den GUS-Staaten sind für den Strombereich 500 - 600 A oft luftgekühlte Brenner im Einsatz, dagegen herrschen in Deutschland und Europa ab Stromstärken von 350 A schon wassergekühlte Brenner vor. Für Asien wird ein kleinerer Handgriff als für Europa gefordert.

Die Gestaltung der modernen Schweißstromquellen hat einen unmittelbaren Einfluss auf die zu verwendenden Schweißbrenner. Tragbare Geräte arbeiten mit einem nur durch die Umgebungsluft gekühlten Brenner. Eine gängige Größe ist ein (ohne Schlauchpaket) ca. 160 g schwerer Brenner, der bis zu etwa 140 A belastbar ist [57]. Luftgekühlte Brenner bis 200 A werden schon schwerer (beispielweise 450 g) und sperriger. Hier kann es gerade beim Schweißen von Aluminium wegen der im Vergleich zu Gleichstrom höheren Erwärmung des Brenners empfehlenswert sein, einen leichten wassergekühlten Brenner zu verwenden, der dann auch nur 150 g wiegt. Allerdings muss dann eine Kühlwasserversorgung vorgesehen werden. Einige Hersteller liefern in solchen Fällen Zusatzgeräte zur Versorgung des Brenners mit Kühlwasser, die man mit der leichten Stromquelle zu einer Einheit verbinden kann. Bei den größeren Werkstattgeräten ist das Wasserkühlsystem meist in der Maschine eingebaut.

Nach einer Analyse der aktuellen Produktprogramme aus Firmenkatalogen verschiedener Brennerproduzenten sowie der Patentenrecherche stellt man außerdem fest, dass auf dem Gebiet der schweißtechnischen Werkzeuge nach der Komplexität der Konstruktion sowie der Auswahl von Funktionen zwei große Bereiche zu unterscheiden sind:

1. Schweiß- bzw. Schneidbrenner,
2. Komplexe Systeme von Schweiß- bzw. Schneidbrennern, die neben dem Brenner selbst andere Baugruppen (z.B. Drahtvorschubgerät, Steuereinheit, Absaugung, usw.) in sich integriert haben.

**Die Besonderheiten des gegenwärtigen Entwicklungsstandes der Schweißbrenner sind:**

- sehr breites Spektrum der Schweißbrenner nach Strombereich und Art der Anwendung,
- viele Ähnlichkeiten bei der Produktion von verschiedenen Produzenten,
- es fehlt ein klares System für Berechnungen und zur Optimierung der Brennerkonstruktionen,
- feste Normen und Vorschriften.

**Als Entwicklungstendenzen bei den Schweißbrennern zeichnen sich ab:**

- weitere Spezialisierung für konkrete Schweißaufgaben, Sonderausstattungen,
- Entwicklung von Brennerserien für das Hochleistungsschweißen,
- Entwicklung von Brennern, die besonders für das Schweißen mit bestimmten Werkstoffarten geeignet sind,
- Weiterentwicklung und Verbesserung von Brennersystemen für den Einsatz beim Roboterschweißen,
- Entwicklung und Nutzung von mathematischen und physikalischen Modellen für die Berechnung und Optimierung der Brenner,
- Zusammenfassung der vorhandenen Erfahrungen zum Brennerbau in den Datenbanken/Expertensystemen.

**Es besteht Nachholbedarf für eine weitere Brennerentwicklung hinsichtlich:**

- Betrachtung der Wärmeströme im Brenner,
- praxisrelevante Berechnung und Dimensionierung von Brennerbauteilen,
- optimale konstruktive Gestaltung der inneren Kühlkanäle des Brenners,
- Entwicklung eines Kühlsystems mit hoher Leistung.

## **2 Wissenschaftliche Problemstellung und Lösungswege**

### **2.1 Problemstellung und angestrebte Lösungsziele**

In der modernen industriellen Fertigung werden überwiegend folgende thermische Bearbeitungsverfahren mit Lichtbogennutzung angewendet: E-Handschiessen, UP-Schiessen, MSG-Schiessen, WIG-Schiessen, Plasma-Schiessen und Plasma-Schneiden. Diese traditionellen Schweißverfahren wurden ständig perfektioniert, was auch zur Entwicklung neuer Verfahrensvarianten auf deren Basis führte; außerdem kamen noch vor kurzem unbekanntes Bearbeitungsverfahren wie MIG-Laser-, WIG-Laser-, Plasma-Laser-Schiessen mit Nutzung des elektrischen Lichtbogens als Energiequelle in die Produktionsstätten.

Im Rahmen der vorgelegten Arbeit werden nur Schweißprozesse mit freibrennendem nichtkonzentriertem Lichtbogen, insbesondere das MSG-Schiessen, WIG-Schiessen und entsprechende Werkzeuge für ihre Realisierung betrachtet.

Zu jedem Verarbeitungsverfahren gehört ein nach entsprechenden verfahrensspezifischen Anforderungen konzipiertes, konstruiertes und angefertigtes Werkzeug bzw. eine Werkzeugklasse. Bei allen diesen Verarbeitungsverfahren ist das Werkzeug oder verfahrensrealisierende Mittel (VRM) die wichtigste Voraussetzung für die praktische Umsetzung des jeweiligen Verfahrens in einem Fertigungsprozess. Die technologischen Parameter des Werkzeugs bestimmen, welche Werkstoffe in welcher Materialdicke verarbeitet werden können. Die Zugänglichkeit des Werkzeugs wird bestimmt durch die Form und Komplexität des zu verarbeitenden Werkstückes. Nicht zuletzt hängt die Qualität der gefertigten Erzeugnisse von den technologischen Möglichkeiten des Werkzeugs ab. Die Effektivität hinsichtlich des Energieverbrauchs bestimmt im wesentlichen die Wirtschaftlichkeit des Werkzeugs und damit des gesamten Verfahrens. Eigenschaften des Werkzeugs wie Zuverlässigkeit, Lebensdauer des gesamten Werkzeugs sowie seiner einzelnen Komponenten und die Kompatibilität mit anderen Geräten beeinflussen die Möglichkeit für die Mechanisierung und Automatisierung des Fertigungsprozesses.

Die Brennerhersteller produzieren eine Vielzahl von Werkzeugen mit Lichtbogennutzung – Schweiß- und Schneidbrenner für alle gängigen Bearbeitungsverfahren und Einsatzmöglichkeiten. Bei allen in ihren Produktionsprogrammen vertretenen Brennerarten (MSG-Brenner, WIG-Brenner, Plasma-Schweiß- und Schneidbrenner sowie ihrer Modifikationen und Ausführungen), die jeweils nach den durch Verfahren und Einsatzgebiet bestimmten Anforderungen gebaut werden, stellt man folgende Gemeinsamkeiten in den Anforderungsprofilen fest. Zu den dominierenden gehören:

- hohe Belastbarkeit,
- lange Lebensdauer,
- Genauigkeit der Positionierung,
- kleinstmögliche Abmessungen, kompakte Bauform.

Das Erfüllen dieser o.g. Kriterien bei allen Arten von Lichtbogenschweiß- bzw. Schneidbrennern erfordert eine effektive Lösung des Kühlproblems auf Funktions- sowie Konstruktionsebene.

Dazu ist es notwendig, auf wissenschaftlich begründete Methoden für die Auswahl verfahrensgerechter Konstruktionsvarianten sowie auf Berechnungen bei der Dimensionierung der Bauteile zurückzugreifen. Hier ist ein großes Defizit entstanden, weil z.Z. alle diese Fragen der Brennerprojektierung meist auf empirischem Wege gelöst werden. Dies hat auch dazu geführt, dass der Prozess der Brennerentwicklung separat und getrennt von den Prozessen der Erzeugnisentwicklung und Technologieentwicklung betrachtet und durchgeführt wurde. Als Folge dieser Situation ergeben sich die Schwierigkeiten bei der Integration entwickelter schweißtechnischer Werkzeuge in den Produktionsprozess.

Eine technische Optimierung des Schweißbrenners kann nur dann erfolgreich durchgeführt werden, wenn folgenden Fragen beantwortet werden können:

- Welche Wärmeströme sind im Brenner vorhanden?
- Welche Wärmemengen fließen in den Brenner während des Betriebes hinein?
- Welche Modelle beschreiben die Wärmeflüsse?
- Wie richtig und praxisrelevant ist das Modell?

Heute ist der richtige Zeitpunkt, um in der Entwicklung der schweißtechnischen Werkzeuge oder verfahrensrealisierenden Mittel (VRM) einen Schritt nach vorn zu machen. Einerseits fordern die hochentwickelten Schweißverfahren die Weiterentwicklung schweißtechnischer Werkzeuge; andererseits bietet die hochentwickelte Computertechnik die Möglichkeit, die Entwicklungsaufgaben der VRM auf prinzipiell neuem Niveau zu realisieren. Das bedeutet, günstige Bedingungen für eine Werkzeugentwicklung auf wissenschaftlicher Basis zu schaffen, damit der letzte Schritt in der Automatisierung durch die Kette Erzeugnisentwicklung - Technologieentwicklung - Werkzeugentwicklung erfolgen kann.

Als Ableitung aus den beschriebenen vorhandenen Problemen und dem festgestellten Entwicklungsbedarf ergeben sich im Rahmen der vorgelegten Arbeit die **angestrebte Lösungsziele**.

Vorrangiges Ziel der Arbeit ist es, wissenschaftliche Grundlagen über die Vorgänge in Lichtbogenschweiß- und Schneidbrennern zu erarbeiten. Dazu ist es erforderlich, die

- für die Betrachtung relevanten Wärmeströme im Brenner zu finden,
- Diese ausgewählten Wärmeströme zu beschreiben und zu quantifizieren.

Weiterhin sollen brennerartenübergreifende Prinzipien und Methoden der Projektierung des kompletten Brenners, seiner Komponenten, Baugruppen und Teilsysteme ermittelt und in Form eines Modells erfasst werden.

Analysen und die Erarbeitung neuer Lösungen auf der Funktions- und Konstruktionsebene unter Nutzung mathematischer Berechnungen zur Modellierung der wichtigsten Funktionen von Lichtbogenschweiß- und Schneidbrennern sollen die Grundlagen für die Weiterentwicklung und Optimierung von technologischen Werkzeugen mit Lichtbogennutzung schaffen.

## 2.2 Lösungsstrategien

Um die im Rahmen dieser Arbeit angestrebte Ziele zu erreichen, wurden folgende Lösungsstrategien für den jeweiligen einzelnen Abschnitt ausgearbeitet und vorgeschlagen:

- Als Ausgangsbasis für die angestrebten Weiterentwicklungen dienen die zum heutigen Zeitpunkt auf dem Markt verfügbaren und ausgereiften Geräte- und Schweißbrennerkonzepte: diese Betrachtung kann nicht nur Informationen über die modernsten Trends der funktionellen und konstruktiven Gestaltung des Lichtbogenschweißbrenners, sondern auch Erkenntnisse über das Verhalten des Brenners gegenüber den Belastungen während des Betriebs, insbesondere den thermischen, geben.
- Analyse der Funktionsweise der Werkzeuge mit Lichtbogennutzung für die Realisierung verschiedener Verfahren: das erlaubt es zu bestimmen, welche Funktionen das jeweilige Brennerbauelement erfüllt und wie wichtig die Rolle jedes Elementes bezüglich der Standfestigkeit des gesamten Werkzeuges gegenüber thermischer Belastung ist.
- Analyse der konstruktiven Bauvarianten verschiedener Brennerarten und der Gestaltung ihrer einzelnen Komponenten: dadurch werden Erkenntnisse über den Einfluss der verwendeten Materialien, Bauform und Geometrie des einzelnen Elementes auf die von ihm zu erfüllende Funktion, insbesondere hinsichtlich der Wärmeaufnahme und Wärmeabführung, gewonnen.
- Bestimmung der Zusammenhänge zwischen der konstruktiven Gestaltung der Elemente des Brenners und der von ihnen zu erfüllenden Funktionen: das trägt dazu bei, die wichtigsten Wärmeströme im Brenner und ihre Verteilung durch Brenner-elemente zu ermitteln.
- Aufbauend auf den ermittelten theoretischen (logischen) Abhängigkeiten zwischen der konstruktiven Gestaltung des Brenners und seinen Funktionen soll ein ausgewähltes Modell als typischer Vertreter der VRM mit Lichtbogennutzung in

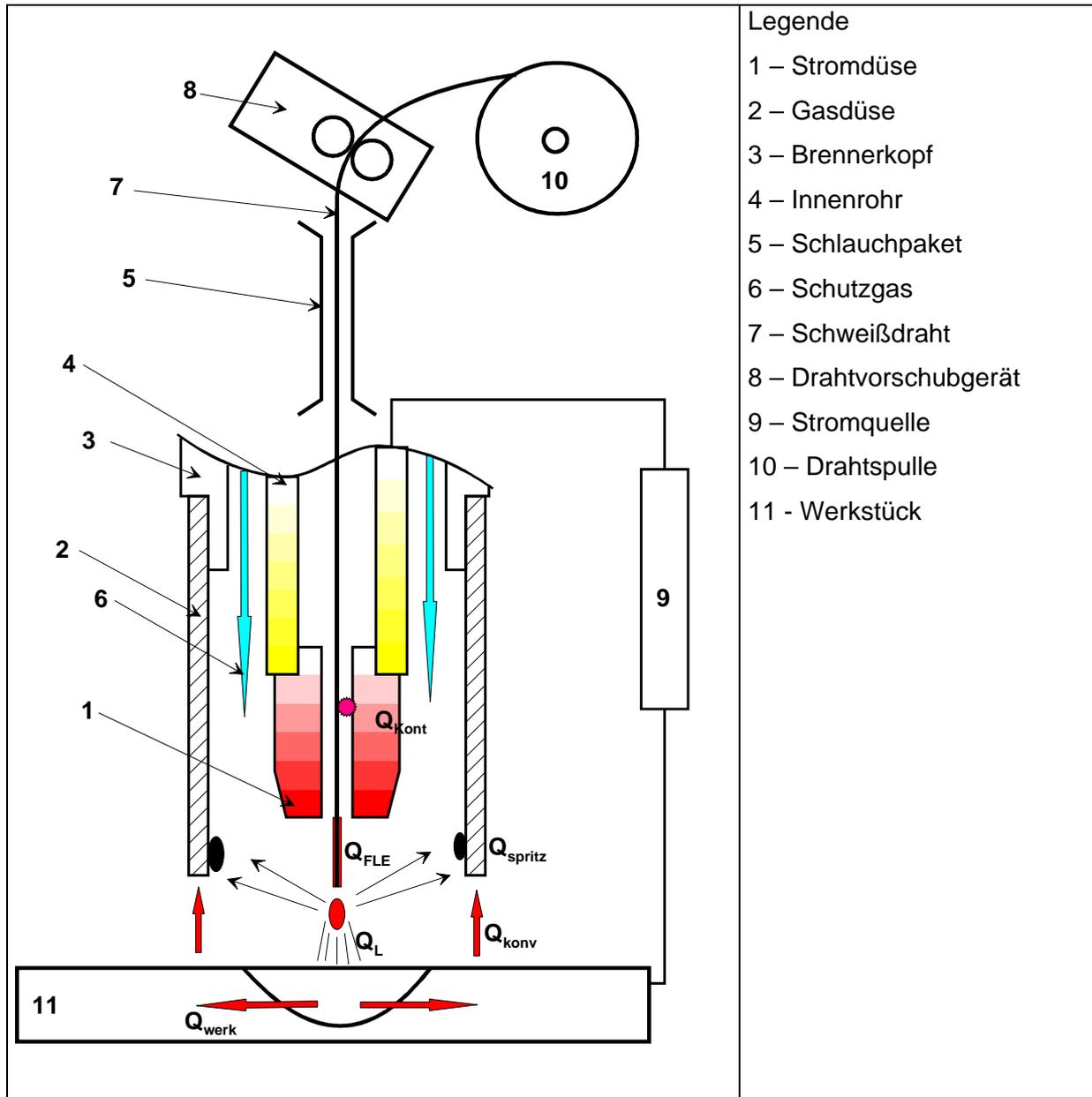
Hinblick auf seine Funktionalität analysiert und optimiert werden: es soll eine theoretische Analyse über das Verhalten der Wärmeströme, die durch die verschiedenen physikalischen Prozesse bedingt sind, in den Brennelementen bei der Wärmeaufnahme und bei der Wärmeabführung entstehen. Anschließend werden Angaben (Annahmen, Ausgrenzungen) für die weitere Modellierung der Wärmeabführung durch Zwangskühlung vorbereitet.

- Auf der Grundlage mathematischer Berechnungen der Kühlfunktion des Brenners sollen theoretische Abhängigkeiten zwischen der geometrischen Form und Abmessung des Kühlkanals, den Eigenschaften des Kühlmediums einerseits und der erreichbaren Kühleffektivität andererseits festgestellt werden: damit wird die Grundlage für eine zahlenmäßige Analyse verschiedener Brennerkonstruktionen mit Zwangskühlung hinsichtlich ihre Kühlungseffizienz geschaffen.
- Aufbauend auf den theoretischen Berechnungen sollen vorhandene typische VRM mit Lichtbogennutzung in Hinblick auf ihre Effektivität analysiert und optimiert werden: es werden die besseren Konstruktionskonzepte ermittelt , Möglichkeiten der weiteren Optimierung der Zwangskühlung ausgewertet und die Vorgehensweise für die nächste Schritte in diesen Richtungen bestimmt.
- Die erreichten Ergebnisse sollen dazu dienen, einige ausgewählte Brenner als typische Vertreter der VRM mit Lichtbogennutzung komplex logisch und mathematisch zu beschreiben. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für weitere wissenschaftliche Betrachtungen der gesamten Klasse von Lichtbogenschweiß- und Schweißbrennern in Form eines Expertensystems: die Ergebnisse dieser Etappe sollen Angaben über die Richtigkeit des Modells und der gemachten Betrachtungen liefern. Damit wird überprüft, wie praxisrelevant die ermittelten Lösungen sind.

### 3 Charakterisierung des schweißtechnischen Werkzeuges mit Lichtbogennutzung

#### 3.1 Aufbau des schweißtechnischen Werkzeuges mit Lichtbogennutzung.

##### 3.1.2 MSG-Schweißprozess. Aufbau eines MSG-Schweißbrenners



**Bild 3:** Schema des MSG-Schweißprozesses

Beim Metall-Schutzgasschweißen (MSG) (**Bild 3**) brennt der Lichtbogen zwischen dem Werkstück und einer abschmelzenden Elektrode. Der Lichtbogenbereich wird durch eine Schutzgaslocke aus inertem oder aktivem Gas von der Atmosphäre abgeschirmt. Der Zusatzdraht wird von einer Spule über das Transportsystem, aus Drahtvorschubgerät und

Schlauchpaket bestehend, dem Brenner kontinuierlich zugeführt. Der Schweißstrom fließt vom Stromkontaktröhre, über das freie Drahtende des Schweißdrahtes zum negativ gepolten Werkstück. Die Stromdichte im Draht erreicht bis zu 200 A/mm<sup>2</sup>. Durch Widerstandserwärmung heizt sich das freie Drahtende auf. Im Lichtbogen werden Elektronen des Schmelzbades des Werkstücks zum Drahtende hin beschleunigt, so dass die Drahtspitze bis zum Anschmelzen erwärmt und ein Schmelztropfen an der Drahtspitze gebildet wird. Wie der schmelzflüssige Werkstoff in das Schmelzbad übergeht, ist abhängig von der Stromdichte im Schweißdraht, den physikalischen Eigenschaften des Zusatzwerkstoffs und den eingestellten Prozessparametern, im Speziellen der Stromverlaufsform. Moderne Inverterschweißstromquellen können die unterschiedlichen Lichtbogenarten Kurz- und Sprüh-/Langlichtbogen (ungepulste Betriebsart) und den Impulslichtbogen (gepulste Betriebsart) realisieren.

**MSG-Schweißbrenner** sind Brenner für Prozesse, bei denen der Lichtbogen zwischen einer abschmelzenden Drahtelektrode und sowohl das elektrodenseitige als auch das werkstückseitige Schmelzbad durch ein inertes oder aktives Gas geschützt werden.

Der Hals des Brenners besteht aus konzentrischen Röhren. Das innerste Rohr dient zur Gaszufuhr, nimmt die Drahtführung auf und im Fall der flüssiggekühlten Brenner bildet es mit dem darüberliegenden Rohr einen Zwangskreislauf für das Kühlwasser. Letzteres dient der Kühlung der vorderen Brennerteile sowie auch des Stromkabels. Beide Röhre führen den Schweißstrom und enden in einem Gewindestück zur Aufnahme der Stromkontaktdüse. Unterhalb des Gewindestücks befinden sich mehrere radiale Bohrungen für den Gasaustritt. Das äußere Mantelrohr ist gegen die beiden inneren Röhre elektrisch isoliert und weist an seinem vorderen Ende einen konischen Sitz zur Aufnahme der Gasdüse auf. Die leicht auswechselbare Gasdüse ist in ihrem hinteren Bereich geschlitzt und sorgt mit Hilfe eines Federrings für eine gute Passung und somit Wärmeübergang in die Wandung des Mantelrohrs. Eine teilweise innere Auskleidung der Gasdüse (Gasverteiler oder Spritzerschutz) verhindert Kurzschlüsse zum Stromkontaktröhre durch Metallspritzer. Ein mit Zentralanschluss oder mit anderen Anschlussarten versehenes Schlauchpaket wird im Bereich des Brennerhandgriffs mit Schraub- oder Quetschverbindungen an den Brennerschaft angeschlossen. Gas- und Stromdüse sind zur Reinigung, zum Wechsel auf andere Drahtdurchmesser oder bei Verschleiß leicht demontierbar.

MSG-Schweißbrenner werden in verschiedenen Ausführungen für manuelles, mechanisiertes und für robotisiertes Schweißen gefertigt. Schweißbrenner in manueller Ausführung decken den Stromstärkebereich von ca. 120 A bis ca. 450-500 A ab. Höherer Stromstärken sind bei manueller Ausführung des Schweißprozesses wegen der erforderlichen hohen Schweißgeschwindigkeiten und der sehr starken thermischen

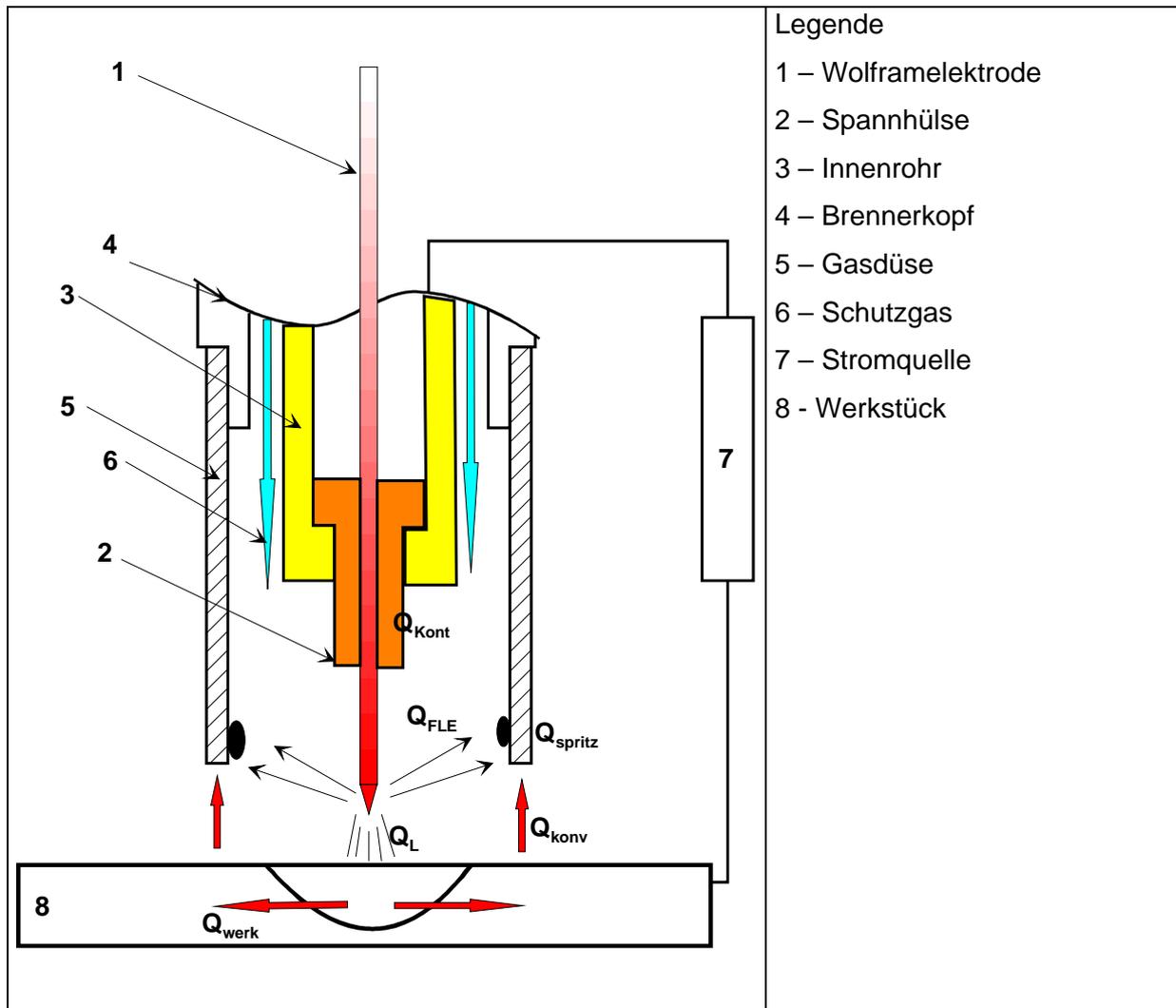
Belastung des Schweißers durch die Wärmestrahlung nicht realisierbar. Brenner für maschinelle und robotisierte Ausführung des Schweißprozess können mit wesentlich höheren Stromstärken eingesetzt werden.

Die MSG-Schweißbrenner unterteilen sich auch nach der Art der Kühlung in selbstgekühlte und flüssiggekühlte. Selbstgekühlte Brenner sind einfacher als flüssiggekühlte aufgebaut, unterscheiden sich aber bei gleicher Belastbarkeit durch höheres Gewicht und größere Abmessungen der Gesamtkonstruktion. Flüssiggekühlte MSG-Schweißbrenner sind dagegen relativ kompliziert und aus mehreren Teilen aufgebaut, was auch entsprechend höhere Preise zur Folge hat. Sie benötigen unbedingt bei ihrem Betrieb ein spezielles Kühlsystem mit einer Pumpe, Flüssigkeitsbehälter und einen Wärmetauscher; arbeiten aber bei insgesamt niedrigerer thermischer Belastung. Dadurch sind wesentlich höhere Standzeiten der Verschleißteile und der Brenner selbst, im Gegensatz zu selbstgekühlten Brennern zu verzeichnen.

MSG-Schweißbrenner können mit anderen Geräten, wie z. B. einem Mechanismus für die Absaugung beim Schweißen entstehender Schadstoffe, oder auch einem Drahtvorschubmechanismus kombiniert werden. Im ersten Fall spricht man von einem Lichtbogenschweißbrenner mit integrierter Absaugung, im anderen vom Push-Pull-Brenner.

**MOG-Schweißbrenner** sind Brenner für Prozesse, bei denen der Lichtbogen zwischen einem mit Pulver gefüllten Zusatzdraht und dem Werkstück brennt. Das Schmelzbad wird durch Schlacke und der Lichtbogen durch ein Schutzgas, das infolge thermischen Zerfalls gasbildender Komponenten des Pulvers entsteht, geschützt. Konstruktiv ähnelten sie den MSG-Schweißbrennern.

### 3.1.2 WIG-Schweißprozess. Aufbau eines WIG-Schweißbrenners



**Bild 4:** Schema des WIG-Schweißprozesses

Beim Wolfram-Inertgasschweißen (**Bild 4**) brennt der Lichtbogen zwischen dem Werkstück und einer Elektrode aus einer hochschmelzenden Wolframlegierung. Das inerte Schutzgas schirmt Schmelze und Elektrode vor der Atmosphäre ab. Der Zusatzdraht wird dem Schweißgut seitlich zugeführt; bei manueller Anwendung von Hand, bei vollmechanisiertem Prozess mittels Drahtzufuhreinrichtung.

Eine exakte Positionierung von Elektrode und Zusatzdraht ist erforderlich, da die Lichtbogenlänge nur wenige Millimeter beträgt. Elektrode und Prozessparameter müssen so beschaffen sein, dass der Lichtbogen an der Elektrodenspitze einen stabilen Brennfleck bildet. Die Ausbreitung des Lichtbogens vom Elektrodenspitzenbrennfleck aus erfolgt unter einem Winkel von etwa 45°, abhängig von der Form der Elektrodenspitze sowie von der Art des Schutzgases. Eine Vergrößerung der Lichtbogenlänge verringert die Energiedichte an der Werkstückoberfläche und die Schweißnaht verbreitert sich erheblich. Die Charakteristiken

des Lichtbogens werden auch durch die Art und die Regelungsmöglichkeiten der eingesetzten WIG-Stromquelle bestimmt. Es ist zu bemerken, dass beim Einsatz von Impulstechnik so wie beim MSG-Schweißen höhere thermische Belastungen des Brenners entstehen.

Die Oxidschicht auf der Oberfläche von Leichtmetallen, wie Aluminium und Magnesium, muss beim Schweißen aufgebrochen werden. Dies erfolgt durch die katodische Reinigungswirkung des Lichtbogens. Bei einer positiv gepolten Elektrode wird die Oxidschicht durch die Wechselwirkung zwischen Elektronen und positiven Ionen zerstört. Die Elektrode wird durch den Elektronenbeschuss thermisch stark belastet. Bei einer negativen Polung der Elektrode wird das Werkstück durch die auftreffenden Elektronen erhitzt. Die Oxidschicht bleibt dabei jedoch geschlossen und behindert den Schmelzfluss.

Üblicherweise wird bei den Leichtmetallen Aluminium und Magnesium mit Wechselstrom geschweißt. Während der positiven Halbwelle, der Reinigungsphase, wird die Oxidschicht aufgebrochen. Während der negativen Halbwelle kühlt sich die Elektrode wieder ab. Der zeitliche Anteil der positiven Halbwelle einer Periode ist variabel und wird als Balance bezeichnet. Die Balance wird durch die erforderliche Reinigungswirkung bestimmt. Angestrebt wird eine kurze positive Halbwelle. Gegenüber einem Gleichstromlichtbogen mit positiver Elektrode wird bei Wechselstrom aufgrund der geringeren Elektrodenbelastung ein kleinerer Elektrodendurchmesser bzw. eine kegelförmige Elektrodenspitze verwendet. Dadurch erhöht sich die Stromdichte im Lichtbogen, die Schweißnaht wird schmaler. Die zeitliche Stabilität der Elektrodenform ist abhängig von der Stromdichte in der Elektrode, dem Anteil der positiven Halbwelle einer Periode und dem verwendeten Elektrodenwerkstoff. Zur Verbesserung der Standzeit werden dotierte Wolframelektroden verwendet, mit geringen Beimengungen von Thorium, Cer, Lanthan oder Zirkonium.

**WIG-Schweißbrenner** sind Brenner für Schweiß- und Umschmelzprozesse mit einem zwischen einer Dauerelektrode und dem Werkstück brennenden Lichtbogen.

WIG-Schweißbrenner werden in verschiedenen Ausführungen gefertigt: für manuelles, mechanisiertes und für robotisiertes Schweißen. Die WIG-Schweißbrenner unterscheiden sich auch nach der Art der Kühlung in selbstgekühlte und flüssiggekühlte. Brenner mit Selbstkühlung decken den Stromstärkebereich von ca. 90 A bis ca. 200 A beim Schweißen mit Wechselstrom ab und den Stromstärkebereich von 100 bis 240 A beim Konstantstromschweißen. WIG-Brenner mit Flüssigkeitskühlung arbeiten mit Belastungen bis zu 400 A bei Wechselstrom und 600 A bei Konstantstrom. WIG-Schweißbrenner für maschinellen Einsatz können, um Pausenzeiten in der Schweißfertigung zu reduzieren, mit einem Mechanismus für das Nachstellen der Wolframelektrode ausgerüstet sein. Auf der Basis der WIG-Schweißbrenner können Systeme für das WIG-Schweißen mit Kaltdraht-

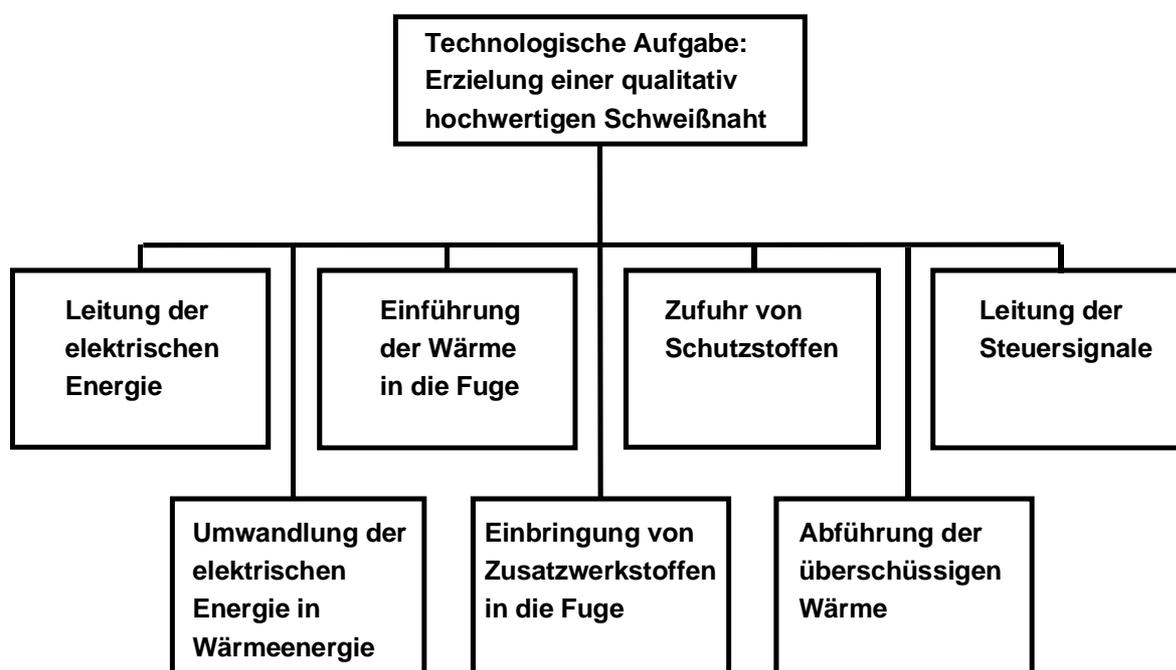
bzw. Heißdrahtzuführung aufgebaut werden. In der Regel gehören dann zu einem solchen Komplex außer dem WIG-Schweißbrenner ein Brennerkopfaufsatz für Drahtzuführung, Drahtförderkanal und ein Drahtvorschubgerät, wenn man von der Kaltdrahtzuführung spricht und zusätzlich eine separate Stromquelle sowie Stromzuleitung zu dem Brennerkopfaufsatz, wenn man die Heißdrahtzuführung verwendet.

### 3.2 Klassifizierung der Funktionen des Schweißbrenners. Analyse des funktionellen und konstruktiven Aufbaus von MSG-, WIG-Schweißbrennern

Der Schweißbrenner ist ein technologisches Werkzeug oder verfahrensrealisierendes Mittel (VRM). Technologische Hauptaufgabe des Schweißbrenners ist es, die Qualität der Schweißnaht zu gewährleisten. Im Rahmen dieser Hauptaufgabe hat der Brenner folgende Funktionen auszuführen:

- Leitung der elektrischen Energie,
- Umwandlung der elektrischen Energie in Wärmeenergie,
- Einführung der Wärme in die Fuge,
- Einbringen der Zusatzwerkstoffe in die Fuge,
- Zuführung prozessspezifischer Hilfsstoffe,
- Abführung der im Prozess nicht benötigten Wärme,
- Leitung der Steuersignale.

Eine Übersicht der Funktionen ist im **Bild 5** „Schema der Klassifizierung der Funktionen des Schweißbrenners“ dargestellt.



**Bild 5:** Schema der Klassifizierung der Funktionen des Schweißbrenners

Diese Funktionen werden durch die Anforderungen an das Werkzeug (VRM) bestimmt, die sich wiederum aus den technologischen Anforderungen (schweißtechnische Aufgabe) ergeben. Die zu realisierende Schweißaufgabe beinhaltet:

- Werkstoffart,
- Zusatzwerkstoffart,

- Geometrie der Halbzeuge,
- Geometrische Form des Zusatzwerkstoffes (Draht; Band; Pulver),
- Schweißparameter,
- Schweißposition,
- Behandlung des Erzeugnisses vor, während, nach dem Schweißen,
- Qualitätsanforderungen an die Schweißverbindung.

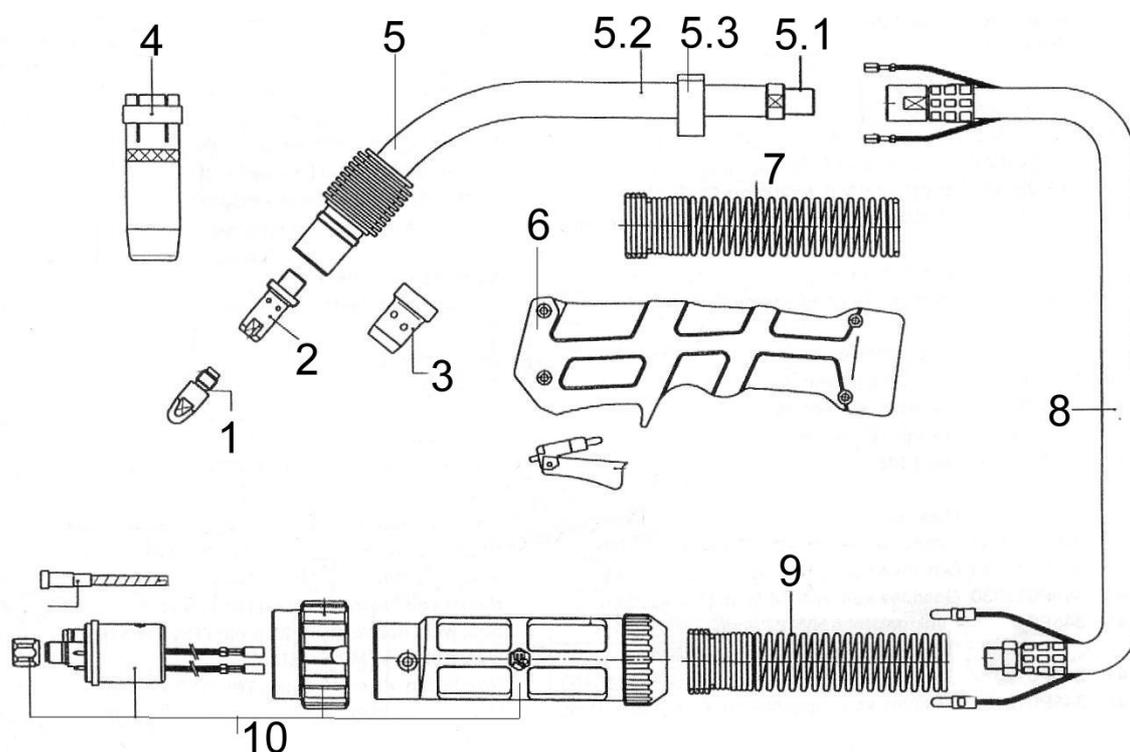
Anforderungen an das VRM, die sich aus der schweißtechnischen Aufgabe ergeben, sind zum Beispiel für den MSG-Schweißbrenner:

- Stromstärkebereich, Einschaltdauer, Standzeit des Brenners und der einzelnen Elemente,
- Kühlungsart (Flüssigkeit/Gas),
- Art der Ausführung (Automaten-, Hand-, Roboterbrenner),
- störungsfreie Transport des Zusatzwerkstoffes,
- Anpassung an die Schweißanlage,
- Ansprüche an die Ergonomie,
- geringes Gewicht,
- Zugänglichkeit zur Fügestelle,
- Sicherung der Qualität durch ausreichenden Schutz der noch erhitzter Fügestelle gegenüber atmosphärischen Einflüssen,
- Gewährleistung eines stabilen Schweißprozesses,
- Reproduzierbarkeit des Prozesses.

### 3.2.1 Funktionen einzelner Bauelemente bzw. Baugruppen des MSG-Schweißbrenners

Der MSG-Schweißbrenner (**Bild 6**) besteht aus folgenden Bauteilen, bzw. Baugruppen: Stromdüse (1), Düsenstock (2), Schutzgasverteiler (3), Schutzgasdüse (4), Brennerhals (5), Griffschale (6), Knickschutz an der Griffschale (7), Schlauchpaket (8), Knickschutz am Stromquellenanschluss (9), Stromquellenanschluss (10).

In der **Tabelle 3** sind den o.g. Komponenten des Brenners die auszuführenden Funktionen zugeordnet.



**Bild 6:** Schema des kompletten MSG-Brenners mit Schlauchpaket

**Tabelle 3:** Funktionen einzelner Bauelemente bzw. Bauteile des MSG-Schweißbrenners

Pos.	Benennung	Funktion
1	<b>Stromdüse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leitung des elektrischen Stromes</li> <li>- Stromübertragung auf den Schweißdraht</li> <li>- Führung und Positionierung des Schweißdrahtes</li> <li>- Leitung der Wärme</li> </ul>
2	<b>Düsenstock</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leitung des elektrischen Stromes zur Stromdüse</li> <li>- Sichere Aufnahme der Stromdüse</li> <li>- Zuleitung des Schutzgases in die Schutzgasdüse oder in den Schutzgasverteiler</li> <li>- Führung des Schweißdrahtes</li> <li>- Ableitung der Wärme von der Stromdüse in das Innenrohr des Schweißbrenners</li> </ul>
3	Schutzgasverteiler	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formung der Schutzgasströmung</li> <li>- Schutz der Öffnungen für das Schutzgas am Düsenstock von Metallspritzen</li> <li>- Keine wärmetechnische Bedeutung</li> </ul>
4	<b>Schutzgasdüse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formung einer laminaren, turbulenzfreien Schutzgasströmung</li> <li>- Potenzienschutz</li> <li>- Richten der Schutzgasströmung auf die Schweißzone</li> <li>- Aufnahme und Ableitung der durch Strahlung vom Lichtbogen und Schmelzbad aufgenommenen Wärme</li> </ul>
5	Brennerhals	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Der Brennerhals besteht aus den drei Teilen 5.1,; 5.2 und 5.3. Deren Benennung und Funktionen sind unter Pos. 5.1, 5.2 und 5.3 beschrieben</li> </ul>
5.1	<b>Innenrohr des</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leitung des elektrischen Stromes vom</li> </ul>

	<b>Brennerhalses</b>	<p>Stromkabel zum Düsenstock</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Leitung des Schutzgases</li> <li>- Führung des Schweißdrahtes (mit Hilfe einer Drahtförderspirale)</li> <li>- Führung und Positionierung der Drahtförderspirale im Brenner</li> <li>- Aufnahme und Ableitung der im Prozess nicht benötigten, jedoch anfallenden Wärme von benachbarten Bauteilen des Brenners durch Wärmeleitung</li> <li>- Aufnahme und Ableitung der im Prozess nicht benötigten, jedoch anfallenden Wärme von den benachbarten Bauteilen des Brenners mittels zirkulierender Kühlflüssigkeit</li> <li>- Gewährleistung der mechanischen Festigkeit der gesamten Brennerkonstruktion</li> <li>- Verbesserung des elektrischen Kontaktes zwischen der Stromdüse und dem Schweißdraht durch Biegung bzw. integrierte Nocken</li> </ul>
5.2	<b>Außenrohr des Brennerhalses (mit dem Gasdüsensitz)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewährleistung der mechanischen Festigkeit der gesamten Brennerkonstruktion</li> <li>- Aufnahme und Ableitung der im Prozess nicht benötigten, jedoch anfallenden Wärme von den benachbarten Bauteilen des Brenners (<i>vor allem von der Gasdüse über den Gasdüsensitz für den Fall eines selbstgekühlten Brenners</i>) durch Wärmeleitung sowie Wärmeübergang durch Konvektion und Strahlung</li> <li>- Schutz der inneren Elemente des Brenners vor mechanischen, thermischen, elektrischen Schädigungen</li> <li>- Verbindung des Brennerhalses mit den Bauelementen, die die Raumposition des Brenners einstellen und fixieren</li> </ul>

5.3	Befestigungskörper des Brennerhalses	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fixieren und Befestigung des Brennerhalses in der Griffschale</li> <li>- Anschluss der Leitungen aus dem Schlauchpaket an die inneren Teile des Brennerhalses</li> <li>- Aufnahme und Ableitung der im Prozess nicht benötigten, jedoch anfallenden Wärme von den benachbarten Bauteilen des Brenners durch Wärmeleitung</li> </ul>
6	Griffschale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fixieren und Befestigung des Brennerhalses</li> <li>- Führung des Schweißbrenners während des Schweißprozesses durch den Schweißer, die mechanische Vorrichtung oder den Roboter</li> <li>- Gewährleistung der ergonomischen Anforderungen (im Fall des manuellen Schweißens)</li> <li>- Schutz der Hand des Schweißers vor der thermischen Belastung durch die inneren Teile des Brenners</li> <li>- Elektrischer Schutz</li> <li>- Umschließt und schützt die inneren Elemente des Brenners gegen äußere mechanische Einflüsse</li> <li>- Nimmt die integrierten Steuerorgane (Schalttaste, Programmabruf-taste) auf</li> <li>- Enthält u. a. integrierte Servicefunktionen (Absaugung, Drahtfördermechanismus, usw.)</li> <li>- Integration und Befestigung des Knickschutzes</li> </ul>
7	Knickschutz an der Griffschale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schutz des Schlauchpaketes mit allen Leitungen vor Einknicken, Durchtrennen, Überdrehen</li> <li>- Gewährleistung der nötigen Beweglichkeit bei der Handhabung durch den Schweißer</li> <li>- Minimierung der Belastung des Handgelenkes des Schweißers</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keine wärmetechnische Bedeutung</li> </ul>
8	<p><b>Schlauchpaket</b> besteht aus:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Stromkabel</b> (Kupferkabel)</li> <li>- Drahtförderkanal</li> <li>- Kühlflüssigkeitsleitung</li> <li>- Schutzgasleitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewährleistung der nötigen Beweglichkeit und eines ausreichenden Aktionsbereiches</li> <li>- Leitung des elektrischen Stromes vom Stromquellenanschluss durch das Stromkabel zum Innenrohr</li> <li>- Leitung des Schutzgases</li> <li>- Führung des Schweißdrahtes (mittels Drahtförderspirale, die bei abriebgefährdeten Schweißzusätzen, zusätzlich eine Seele aus hitzebeständigem Kunststoff enthält)</li> <li>- Fixierung und Zentrierung der Drahtförderspirale im Ein- und Auslaufbereich des Schlauchpaketes</li> <li>- Aufnahme und Ableitung der im Prozess nicht benötigten, jedoch anfallenden Wärme von dem Innenrohr des Brenners durch Wärmeleitung</li> <li>- Zu- und Abführung der Kühlflüssigkeit, die während der Zirkulation Wärme von den im Prozess erhitzten Brennerbauteilen und vom Stromkabel aufgenommen hat, durch entsprechenden Schlauchleitungen</li> <li>- Leitung der Signale von den Steuerorganen in der Griffschale zum Anschluss an der Stromquelle</li> </ul>
9	Knickschutz am Stromquellenanschluss	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schutz des Schlauchpaketes mit allen Funktionselementen gegen Schädigungen durch Knicken, Durchtrennen, Überdrehen</li> <li>- Keine wärmetechnische Bedeutung</li> </ul>
10	Stromquellenanschluss	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anschluss und Verbindung des Brenners mit der Schweißstromquelle bestimmten Typs</li> <li>- Kontakt des elektrischen Stromes zwischen Stromquelle und Stromkabel</li> <li>- Leitung des Schutzgases</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Führung des Schweißdrahtes</li> <li>- Zu- und Ableitung der Kühlflüssigkeit</li> <li>- Kontakt der Steuerleitungen</li> <li>- Integration des Knickschutzes</li> </ul>
--	--	---

Für die weitere wärmetechnische Betrachtung eines MSG- Brenners wurden seine folgende Hauptelemente, die eine große wärmetechnische Bedeutung haben, ausgewählt: **1** - Stromdüse; **2** – Düsenstock; **3** – Gasdüse; **4** – Außenrohr mit dem Gasdüsensitz; **5** – Innenrohr; **6** – Stromkabel.

Bei der Gestaltung von MSG-Schweißbrennern existieren zwei grundsätzlich unterschiedliche Vorgehensweisen für die Realisierung des Wärmeflusses in den thermisch belasteten Brennerteilen.

Nach dem erstem Prinzip werden konstruktionstechnische Maßnahmen ergriffen, um die gesamte Wärme vorn im Brenner zu behalten und ihren Fluss nach hinten zum Brennergriff zu vermeiden. Konstruktiv wird dies mit Hilfe verschiedener Isolierungen realisiert, die eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Die gesamte während des Schweißbetriebs vom Brenner aufgenommene Wärme staut sich in der Gasdüse, im Stromkontaktrohr und im Düsenstock. Der Brenner ist zwar in diesem vorderen Bereich fast glühend, bleibt aber hinten im Bereich der Griffschale kühl. Zwar wird dadurch die zulässige Arbeitstemperatur an der Griffschale nicht überschritten; es besteht aber die Gefahr, dass vorn bei zu hoher thermischer Belastung der Schweißdraht in der Bohrung der Stromdüse klemmt und damit der Schweißprozess unterbrochen wird. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass Verschleißteile wie Stromdüse, Düsenstock, Gasdüse, Gasverteiler wegen des hohen Verschleißes infolge thermischer Überlastung oft gewechselt werden müssen.

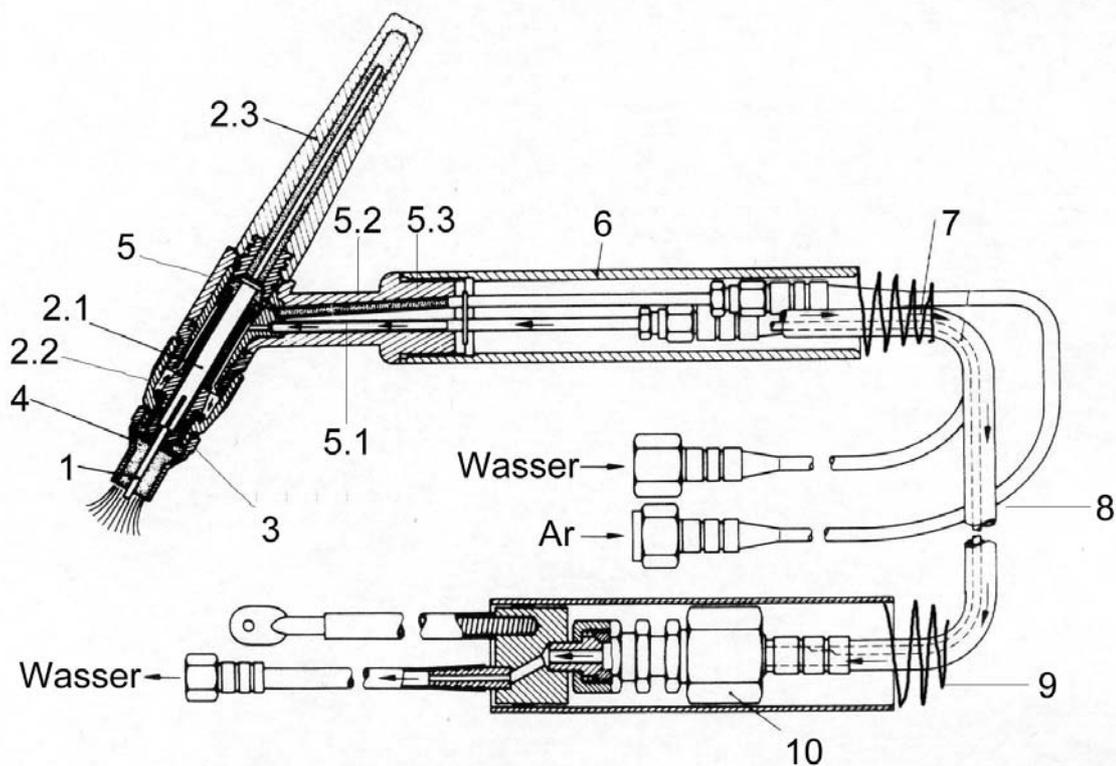
Beim zweiten Gestaltungsprinzip wird der Wärmefluss innerhalb des Brenners von vorn nach hinten ermöglicht und dort wird die Wärme aus dem Brennerhals in das Stromkabel aus Kupfer geleitet oder durch ein Kühlmedium abtransportiert. Bei diesem Gestaltungsprinzip stellt man sich das Ziel, durch die Verwendung von Werkstoffen mit sehr guter Wärmeleitfähigkeit sowie der Zwangskühlung den Wärmefluss nach hinten zu beschleunigen. Damit werden die vorderen Bauelemente des Brenners nicht überhitzt und verlieren als Folge dann nicht ihre mechanischen Eigenschaften; d. h. verschleifen nicht vorzeitig. Problematisch ist, dass dabei der hintere Bereich des Brenners (die Griffschale) über die zulässige Arbeitstemperatur erhitzt wird.

Das erste Gestaltungsprinzip ist meist in MSG-Schweißbrennern von nordamerikanischen Produzenten zu finden. Nach diesem Prinzip gebaute Brenner sind in der Regel groß dimensioniert und materialintensiv gebaut. Dagegen sind die europäischen Brenner nach dem zweitem Gestaltungsprinzip in leichteren Bauweisen anzutreffen.

### 3.2.2 Funktionen einzelner Bauelemente bzw. Baugruppen des WIG-Schweißbrenners

Der WIG-Schweißbrenner (**Bild 7**) besteht aus folgenden Teilen, bzw. Baugruppen: Wolframelektrode (1), Spannhülse (2.1), Spannhülsegehäuse (2.2), Brennerkappe (2.3), Schutzgasverteiler (3), Schutzgasdüse (4), Brennerkörper (5), Griffschale (6), Knickschutz an der Griffschale (7), Schlauchpaket (8), Knickschutz am Stromquellenanschluss (9), Stromquellenanschluss (10).

In der **Tabelle 4** sind den o.g. Komponenten des Brenners die von ihnen auszuführenden Funktionen zugeordnet.



**Bild 7:** Schema eines kompletten wassergekühlten WIG-Brenners mit Schlauchpaket

**Tabelle 4:** Funktionen einzelner Bauelemente bzw. Baugruppen des WIG-Schweißbrenners

Pos.	Benennung	Funktion
1	<b>Wolframelektrode</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lichtbogenträger</li> <li>- Leitung des elektrischen Stromes zum Lichtbogen</li> <li>- Durch leicht ionisierbare Zusätze Erleichterung des Zündprozesses und Aufrechterhaltung</li> </ul>

		<p>sowie Stabilisierung des Lichtbogens</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wärmeableitung</li> </ul>
2	Spannelemente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Baugruppe „Spannelemente“ besteht aus drei Bauteilen: der Spannhülse; dem Spannhülsegehäuse und der Brennerkappe. Deren einzelne Funktionen sind unter Positionen 2.1, 2.2 und 2.3 beschrieben</li> </ul>
2.1	<b>Spannhülse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Übertragung des elektrischen Stromes auf die Wolframelektrode</li> <li>- Fixierung und Zentrierung der Wolframelektrode</li> <li>- Ableitung der Wärme von der Wolframelektrode in den Düsenstock</li> </ul>
2.2	<b>Spannhülsegehäuse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leitung des elektrischen Stromes vom Innerrohr zu der Spannhülse</li> <li>- Aufnahme und Fixierung der Spannhülse</li> <li>- Zuführung des Schutzgases zum Schutzgasverteiler</li> <li>- Abführung der Wärme von den Spannelementen in das Innenrohr des Schweißbrenners</li> </ul>
2.3	Brennerkappe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Festspannen der Wolframelektrode durch Druck auf die Spannhülse</li> <li>- Justieren der Wolframelektrode</li> <li>- Verhinderung des Schutzgasaustritts</li> <li>- Keine wärmetechnische Bedeutung</li> </ul>
3	Schutzgasverteiler (Gaslinse)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formung einer laminarer Schutzgasströmung</li> <li>- Schutz der Öffnungen für das Schutzgas im Düsenstock vor Metallspritzen</li> <li>- Keine wärmetechnische Bedeutung</li> </ul>
4	<b>Schutzgasdüse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formung der Schutzgasströmung</li> <li>- Gewährleistung eines sicheren Gasschutzes</li> </ul>

		<p>des Schmelzbades und des abschmelzenden Bereiches des Zusatzdrahtes</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Schutz der inneren Elemente des Brenners von thermischer Belastung</li> <li>- Aufnahme und Ableitung der durch Strahlung vom Lichtbogen und Schmelzbad aufgenommenen Wärme</li> </ul>
5	Brennerkörper	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Der Brennerkörper besteht aus drei Bauteilen: Innenrohr; Außenrohr und Befestigungskörper. Deren Funktionen sind unter Positionen 5.1, 5.2 und 5.3 beschrieben</li> </ul>
5.1	<b>Innenrohr des Brennerkörpers</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Übertragung des elektrischen Stromes vom Stromkabel zum Düsenstock</li> <li>- Leitung des Schutzgases</li> <li>- Aufnahme und Abführung der von benachbarten Bauteilen des Brenners aufgenommenen Wärme durch Wärmeleitung</li> <li>- Wärmeaustausch mit der zirkulierenden Kühlflüssigkeit</li> <li>- Gewährleistung der mechanischen Festigkeit der gesamten Brennerkonstruktion</li> </ul>
5.2	Außenrohr des Brennerkörpers	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewährleistung der mechanischen Festigkeit der gesamten Brennerkonstruktion</li> <li>- Aufnahme und Ableitung der im Prozess nicht benötigten, jedoch anfallenden Wärme von benachbarten Bauteilen des Brenners durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung</li> <li>- Schutz der inneren Bauelemente des Brenners vor mechanischen, thermischen und elektrischen Schädigungen</li> <li>- Verbindung des Brennerhalses mit den Bauelementen, die die Raumposition des Brenners einstellen und fixieren</li> </ul>

5.3	Befestigungskörper des Brennerkörpers	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fixieren und Befestigen des Brennerkörpers in der Griffschale</li> <li>- Anschluss der Leitungen aus dem Schlauchpaket an die inneren Teile des Brennerhalses</li> <li>- Aufnahme und Ableitung der im Prozess nicht benötigten, jedoch anfallenden Wärme von den benachbarten Bauteilen des Brenners durch Wärmeleitung</li> </ul>
6	Griffschale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fixieren und Befestigung des Brennerkörpers</li> <li>- Führung des Schweißbrenners während des Schweißprozesses durch den Schweißer bzw. eine mechanische Vorrichtung oder den Roboter</li> <li>- Gewährleistung der ergonomischen Anforderungen (im Fall des manuellen Schweißens)</li> <li>- Schutz der Hand des Schweißers vor thermischer Belastung durch die inneren Teile des Brenners</li> <li>- Elektrischer Schutz</li> <li>- Umschließt und schützt die inneren Bauelemente des Brenners gegenüber äußeren mechanischen Einflüssen</li> <li>- Aufnahme integrierter Steuerorgane (Schalttaste, Programmabruf-taste)</li> <li>- Aufnahme integrierter Servicefunktionen (z.B. Bauelemente des Drahtfördemechanismus)</li> <li>- Integration und Befestigung des Knickschutzes</li> </ul>
7	Knickschutz an der Griffschale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schutz des Schlauchpaketes mit allen Funktionselementen gegenüber Knicken, Durchtrennen, Überdrehen</li> <li>- Gewährleistung der nötigen Beweglichkeit bei der Handhabung durch den Schweißer</li> <li>- Minimierung der Belastung des Handgelenkes</li> </ul>

		<p>des Schweißers</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Keine wärmetechnische Bedeutung</li> </ul>
8	<p><b>Schlauchpaket</b> besteht aus:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Stromkabel</b> (Kupferkabel)</li> <li>- Kühlflüssigkeitsleitung</li> <li>- Schutzgasleitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewährleistung der nötigen Beweglichkeit und eines ausreichenden Aktionsbereiches</li> <li>- Leitung des elektrischen Stromes vom Stromquellenanschluss durch das Stromkabel zum Innenrohr</li> <li>- Leitung des Schutzgases</li> <li>- Aufnahme und Ableitung der im Prozess nicht benötigten, jedoch anfallenden Wärme von dem Innenrohr des Brenners durch Wärmeleitung</li> <li>- Zu- und Abführung der Kühlflüssigkeit, die während der Zirkulation Wärme von den im Prozess erhitzten Brennerbauteilen und vom Stromkabel aufgenommen hat durch entsprechende Schlauchleitungen</li> <li>- Leitung der Signale von Steuerorganen in der Griffschale zum Anschluss an der Stromquelle</li> </ul>
9	Knickschutz beim Stromquellenanschluss	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schutz des Schlauchpaketes mit allen Funktionselementen gegen Schädigungen durch Knicken, Durchtrennen, Überdrehen</li> <li>- Keine wärmetechnische Bedeutung</li> </ul>
10	Stromquellenanschluss	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anschluss und Integration des Brenners mit der Schweißstromquelle bestimmten Typs</li> <li>- Kontakt des elektrischen Stromes zwischen Stromquelle und Stromkabel</li> <li>- Integration des Knickschutzes</li> </ul>

Für die weitere wärmetechnische Betrachtung eines WIG- Brenners wurden seine folgende Hauptelemente, die große wärmetechnische Bedeutung haben, ausgewählt: 1 – **Wolframelektrode**; 2 – **Spannhülse**; 3 – **Spannhülsegehäuse**; 4 – **Gasdüse**; 5 – **Innenrohr**; 6 – **Stromkabel**.

Beim WIG-Schweißbrenner wird der Brennerkörper weitaus weniger von der sich im Schweißprozess aufheizenden Wolframelektrode als von der Rückstrahlwärme des Werkstückes und der Strahlung des Lichtbogens selbst erwärmt [58].

Die Spitze der Wolframelektrode muss eine Mindesttemperatur erreichen, um eine gute Elektronenemission, somit gutes Zünden und einen stabilen Lichtbogen zu gewährleisten. Andererseits soll die Temperatur aber nicht endlos steigen, da die Elektrode dann in der Standzeit stark eingeschränkt ist.

Die bestmögliche Kühlung des Brennerkörpers hat Vorrang. Zur Auswahl steht neben der nötigen Selbst- auch die Flüssigkeitskühlung. Bei letzterer ist zu unterscheiden zwischen offenem und geschlossenem Kühlsystem. Das offene Kühlsystem (direkte Kühlung der Spannelemente der Wolframelektrode) bietet die beste Wärmeabfuhr. Sicherlich kann im Laborbetrieb jedes Dichtsystem jegliche Leckage ausschließen. In der Praxis sieht es jedoch anders aus. Verschleiß durch Abnutzung, aber auch Bedienungsfehler bieten eine zu große Unsicherheit, um die Schweißnahtgüte auf Dauer sicherzustellen. Daraus resultiert die Entscheidung für geschlossene Kühlsysteme.

Gasgekühlte Brennerkörper haben wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Gases im Vergleich zu wassergekühlten ihre Grenzen prinzipiell in der Relation von Schweißstrom zu Baugröße. Die herkömmlichen gasgekühlten Brennerkopfkonstruktionen sind fast alle sehr massiv aus Messing und/oder Kupfer hergestellt. Sie nehmen Wärme während des Schweißvorganges auf und leiten diese Wärme in den Schweißpausen an das Schlauchpaket und die Umgebung ab. Die Standzeit der Verschleißteile, insbesondere der Spannhülse und der Gasdüsen, wird reduziert.

### **Zusammenfassung**

Die Unterschiede zwischen den Brennern verschiedener Arten auf der Funktionsebene sind vor allem durch die Besonderheiten des jeweiligen Schweißprozesses bedingt und am stärksten im Bereich von Brennerkopf bzw. Brennerhals spürbar.

Der Brennerhals des MSG-Schweißbrenners ist so gestaltet, dass der Zusatzdraht zum Schweißbad geführt wird und durch ihn der Schweißstrom übertragen wird. Bei den WIG-Schweißbrennern dagegen ist die Elektrode nichtabschmelzend.

Die zwei analysierten Brennerarten haben Ähnlichkeiten in den Funktionen, die von folgenden Bauelementen bzw. Baugruppen ausgeführt werden: Brennerhals (Brennerkörper), Gasdüse, Griffschale, Knickschutz, Schlauchpaket und Stromquellenanschluss.

Ein entscheidendes Ähnlichkeitsmerkmal besteht darin, dass bei allen verglichenen Brennerarten Bauelemente vorhanden sind, die elektrische Energie zum Lichtbogen leiten

und auch Elemente, deren Funktion die Wärmeableitung von thermisch belasteten Gebieten des Brenners ist.

Wenn man die konstruktive Gestaltung dieser Bauelemente bzw. Baugruppen betrachtet, findet man außerdem auch hier viele Ähnlichkeitsmerkmale, insbesondere was die Form, die Geometrie und die angewendeten Werkstoffe betrifft.

Solche Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Vergleichsanalysen auf Funktions- und Konstruktionsebene erlauben es, die Beschreibung der Zusammenhänge sowie der Gestaltungsprinzipien für eine Brennerart auch näherungsweise auf andere Brennerarten zu übertragen.

Dies erlaubt es, den Zeitaufwand zu reduzieren und den Umfang der theoretischen und experimentellen Untersuchungen einzugrenzen, indem man sich z.B. auf den MSG-Schweißbrenner konzentriert, und tiefergehend anhand konkreter Beispiele der typischen Vertreter einer Brennerart die Zusammenhänge zwischen Konstruktion und Funktion der zu betrachtenden Baugruppe versteht, beschreibt und modelliert. Bei der Übertragung der erzielten Ergebnisse auf andere Brennerkonstruktionen müssen dann zweifelsohne die Unterschiede und am Anfang zugelassene Vereinfachungen berücksichtigt werden.

### 3.3 Thermische Belastung des Schweißbrenners während des Betriebes

#### 3.3.1 Erwärmung des Brenners. Mathematisches Modell. Einflussfaktoren

Für den Fall eines **MSG-Schweißbrenners** bzw. **WIG-Schweißbrenners** lässt sich der gesamte Wärmestrom, der vom Brenner während des Betriebs aufgenommen wird, nach folgender Gleichung berechnen:

$$\dot{Q}_{\Sigma Br} = \dot{Q}_{\Sigma El} + \dot{Q}_{\Sigma Kont} + \dot{Q}_{\Sigma StrLb} + \dot{Q}_{\Sigma StrW} + \dot{Q}_{\Sigma KonvW} \quad (3.1)$$

Hierin:

$\dot{Q}_{\Sigma Br}$  - gesamter Wärmestrom, der in den Brenner hinein fließt

$\dot{Q}_{\Sigma El}$  - gesamter Wärmestrom durch ohmsche Belastung

$\dot{Q}_{\Sigma Kont}$  - gesamter Wärmestrom durch Kontaktwiderstände

$\dot{Q}_{\Sigma StrLb}$  - gesamter Wärmestrom durch Strahlung des Lichtbogens

$\dot{Q}_{\Sigma StrW}$  - gesamter Wärmestrom durch Strahlung des Werkstücks

$\dot{Q}_{\Sigma KonvW}$  - gesamter Wärmestrom durch Konvektion

Andererseits lässt sich der gesamte Wärmestrom, der von dem Brenner während des Betriebs aufgenommen wird, als Summe der Wärmeströme, die in einzelne zur Betrachtung ausgewählte Brenner Elemente hinein fließen, darstellen:

$$\dot{Q}_{\Sigma Br} = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_{Br_i} \quad (3.2)$$

Für die Betrachtung eines **MSG-Brenners** wurden in den Kapitel 3.2.1 6 seine folgenden Hauptelemente ausgewählt: 1 - Stromdüse; 2 – Düsenstock; 3 – Gasdüse; 4 – Außenrohr; 5 – Innenrohr; 6 – Stromkabel. Für den Fall eines MSG-Brenners nimmt die Gleichung (3.2) folgende Form an:

$$\dot{Q}_{\Sigma Br_{MSG}} = \dot{Q}_{Br_{1MSG}} + \dot{Q}_{Br_{2MSG}} + \dot{Q}_{Br_{3MSG}} + \dot{Q}_{Br_{4MSG}} + \dot{Q}_{Br_{5MSG}} + \dot{Q}_{Br_{6MSG}} \quad (3.3)$$

Es bedeuten:

$\dot{Q}_{Br_{1MSG}}$  - in die Stromdüse hineinfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Br_{2MSG}}$  - in den Düsenstock hineinfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Br_{3MSG}}$  - in die Gasdüse hineinfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Br_{4MSG}}$  - ins Außenrohr hineinfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Br_{5MSG}}$  - ins Innenrohr hineinfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Br_{6MSG}}$  - in die Stromkabel hineinfließender Wärmestrom

Im Fall der Analyse der Erwärmung eines **WIG- Brenners** wurden im Kapitel 3.2.2 6 Hauptelemente zur Betrachtung ausgewählt. Das sind: 1 – Wolframelektrode; 2 – Spannhülse; 3 – Spannhülsegehäuse; 4 – Gasdüse; 5 – Innenrohr; 6 – Stromkabel. Auf den WIG- Brenner bezogen sieht die Gleichung (3.2) folgend aus:

$$\dot{Q}_{\Sigma Br_{WIG}} = \dot{Q}_{Br_{1WIG}} + \dot{Q}_{Br_{2WIG}} + \dot{Q}_{Br_{3WIG}} + \dot{Q}_{Br_{4WIG}} + \dot{Q}_{Br_{5WIG}} + \dot{Q}_{Br_{6WIG}}$$

(3.4)

Hierin:

$\dot{Q}_{Br_{1WIG}}$  - in die Wolframelektrode hineinfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Br_{2WIG}}$  - in die Spannhülse hineinfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Br_{3WIG}}$  - in das Spannhülsegehäuse hineinfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Br_{4WIG}}$  - in die Gasdüse hineinfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Br_{5WIG}}$  - ins Innenrohr hineinfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Br_{6WIG}}$  - in die Stromkabel hineinfließender Wärmestrom

Der Wärmestrom, der in ein ausgewähltes Brennelement  $i$  hineinfließt lässt sich als Summe der Wärmeströme, die durch verschiedene physikalischen Prozesse verursacht sind und das o.g. Bauteil mit thermischer Energie bereichern, berechnen:

$$\dot{Q}_{Br_i} = \dot{Q}_{El_i} + \dot{Q}_{Kont_i} + \dot{Q}_{StrLb_i} + \dot{Q}_{StrW_i} + \dot{Q}_{KonvW_i} + \dot{Q}_{WLeit_{ki}} \quad (3.5)$$

Es bedeuten:

$\dot{Q}_{Br_i}$  - Wärmestrom, der in das Brennelement  $i$  hineinfließt

$\dot{Q}_{El_i}$  - Wärmestrom durch ohmsche Belastung

$\dot{Q}_{Kont_i}$  - Wärmestrom durch Kontaktwiderstand

$\dot{Q}_{StrLb_i}$  - Wärmestrom durch Strahlung des Lichtbogens

$\dot{Q}_{StrW_i}$  - Wärmestrom durch Strahlung des Werkstücks

$\dot{Q}_{KonvW_i}$  - Wärmestrom durch Konvektion

$\dot{Q}_{WLeit_{ki}}$  - Wärmestrom, der vom Brennelement  $k$  in das Element  $i$  durch Wärmeleitung hineinfließt

Bei der Betrachtung der **Hauptelemente des MSG-Brenners (Bild 11)** kommt man zur folgenden Gleichungen bezüglich jeden Brennelements:

Die **Stromdüse** erhält die Wärme durch ohmsche Belastung, Kontaktwiderstand, Strahlung des Lichtbogens, Strahlung des Werkstücks:

$$\dot{Q}_{Br_{1MSG}} = \dot{Q}_{El_{1MSG}} + \dot{Q}_{Kont_{1MSG}} + \dot{Q}_{StrLb_{1MSG}} + \dot{Q}_{StrW_{1MSG}} \quad (3.6)$$

Der **Düsenstock** wird durch ohmsche Belastung, Kontaktwiderstand, Strahlung des Lichtbogens, Strahlung des Werkstücks und Wärmestrom, der von der Stromdüse in ihm durch Wärmeleitung hineinfließt erwärmt:

$$\dot{Q}_{Br_{2MSG}} = \dot{Q}_{El_{2MSG}} + \dot{Q}_{Kont_{2MSG}} + \dot{Q}_{StrLb_{2MSG}} + \dot{Q}_{StrW_{2MSG}} + \dot{Q}_{WLeit_{12MSG}} \quad (3.7)$$

Die **Gasdüse** erhält die thermische Energie durch Strahlung des Lichtbogens, Strahlung des Werkstücks und durch Konvektion von der Werkstückoberfläche:

$$\dot{Q}_{Br_{3MSG}} = \dot{Q}_{StrLb_{3MSG}} + \dot{Q}_{StrW_{3MSG}} + \dot{Q}_{KonvW_{3MSG}} \quad (3.8)$$

Das **Außenrohr** erhält die thermische Energie durch Strahlung des Lichtbogens, Strahlung des Werkstücks und durch Konvektion von der Werkstückoberfläche sowie durch Wärmestrom, der von der Gasdüse ins Außenrohr durch Wärmeleitung hineinfließt:

$$\dot{Q}_{Br_{4MSG}} = \dot{Q}_{StrLb_{4MSG}} + \dot{Q}_{StrW_{4MSG}} + \dot{Q}_{KonvW_{4MSG}} + \dot{Q}_{WLeit_{34MSG}} \quad (3.9)$$

Der ins **Innenrohr** des MSG-Brenners hineinfließende Wärmestrom besteht aus folgenden Anteilen: Erwärmung durch ohmsche Belastung, Kontaktwiderstand und Wärmestrom, der vom Düsenstock (bedeutend) und vom Außenrohr (unbedeutend) ins Innenrohr durch Wärmeleitung hineinfließt:

$$\dot{Q}_{Br_{5MSG}} = \dot{Q}_{El_{5MSG}} + \dot{Q}_{Kont_{5MSG}} + \dot{Q}_{WLeit_{25MSG}} + \dot{Q}_{WLeit_{45MSG}} \quad (3.10)$$

Das **Stromkabel** wird durch ohmsche Belastung, Kontaktwiderstand und Wärmestrom, der vom Innenrohr ins Stromkabel durch Wärmeleitung hineinfließt erwärmt:

$$\dot{Q}_{Br_{6MSG}} = \dot{Q}_{El_{6MSG}} + \dot{Q}_{Kont_{6MSG}} + \dot{Q}_{WLeit_{56MSG}} \quad (3.11)$$

Bei der Betrachtung der **Hauptelementen des WIG-Brenners (Bild 12)** werden folgende Gleichungen bezüglich des in jedes Brennererelement hineinfließenden Wärmestroms relevant:

Die **Wolframelektrode** bekommt die Wärme durch ohmsche Belastung, Kontaktwiderstand, Strahlung des Lichtbogens, Strahlung des Werkstücks:

$$\dot{Q}_{Br_{1WIG}} = \dot{Q}_{El_{1WIG}} + \dot{Q}_{Kont_{1WIG}} + \dot{Q}_{StrLb_{1WIG}} + \dot{Q}_{StrW_{1WIG}} \quad (3.12)$$

Die **Spannhülse** wird durch ohmsche Belastung, Kontaktwiderstand und Wärmestrom, der von der Wolframelektrode in die Spannhülse durch Wärmeleitung hineinfließt erwärmt:

$$\dot{Q}_{Br_{2WIG}} = \dot{Q}_{El_{2WIG}} + \dot{Q}_{Kont_{2WIG}} + \dot{Q}_{WLeit_{12WIG}} \quad (3.13)$$

Die **Spannhülsegehäuse** wird durch ohmsche Belastung, Kontaktwiderstand, Strahlung des Lichtbogens, Strahlung des Werkstücks und Wärmestrom, der von der Spannhülse in sie durch Wärmeleitung hineinfließt, erwärmt:

$$\dot{Q}_{Br_{3WIG}} = \dot{Q}_{El_{3WIG}} + \dot{Q}_{Kont_{3WIG}} + \dot{Q}_{StrLb_{3WIG}} + \dot{Q}_{StrW_{3WIG}} + \dot{Q}_{WLeit_{23WIG}} \quad (3.14)$$

Die **Gasdüse** erhält die thermische Energie durch Strahlung des Lichtbogens, Strahlung des Werkstücks und durch Konvektion von der Werkstückoberfläche:

$$\dot{Q}_{Br_{4WIG}} = \dot{Q}_{StrLb_{4WIG}} + \dot{Q}_{StrW_{4WIG}} + \dot{Q}_{KonvW_{4WIG}} \quad (3.15)$$

Der ins **Innenrohr** des WIG-Brenners hineinfließende Wärmestrom besteht aus folgenden Anteilen: Erwärmung durch ohmsche Belastung, Kontaktwiderstand und Wärmestrom, der vom Spannhülsegehäuse und von der Gasdüse ins Innenrohr durch Wärmeleitung hineinfließt:

$$\dot{Q}_{Br_{5WIG}} = \dot{Q}_{El_{5WIG}} + \dot{Q}_{Kont_{5WIG}} + \dot{Q}_{WLeit_{35WIG}} + \dot{Q}_{WLeit_{45WIG}} \quad (3.16)$$

Das **Stromkabel** wird durch ohmsche Belastung, Kontaktwiderstand und Wärmestrom, der vom Innenrohr ins Stromkabel durch Wärmeleitung hineinfließt erwärmt:

$$\dot{Q}_{Br_{5WIG}} = \dot{Q}_{El_{6WIG}} + \dot{Q}_{Kont_{6WIG}} + \dot{Q}_{WLeit_{56WIG}} \quad (3.17)$$

Die einzelnen Komponenten der o.g. Gleichungen lassen sich nach folgender Formel [70] berechnen:

#### Erwärmung durch ohmsche Belastung

Jedes stromleitende Brennelement  $i$ , durch das elektrischer Strom fließt, erwärmt sich, weil er einen elektrischen Widerstand hat:

$$\dot{Q}_{El_i} = I^2 R_{El_i} \quad (3.18)$$

Hierin sind:

$\dot{Q}_{El_i}$  - Wärmestrom durch ohmsche Belastung eines einzelnen Brennelements

$I$  - Schweißstrom

$R_{El_i}$  - Ohmscher Widerstand eines einzelnen stromleitenden Brennelementes

Ohmscher Widerstand jedes einzelnen stromleitenden Brennelements:

$$R_{El_i} = \rho_i \frac{l_i}{A_i} \quad (3.19)$$

$\rho_i$  - spezifischer elektrischer Widerstand des Werkstoffes, ist von der Temperatur abhängig.  $\rho = 1/\chi$ , worin  $\chi$  - Leitwert ist. Als Bezugswert gilt  $\rho_{20}$  bei der Temperatur  $\nu = 20^\circ\text{C}$ . Bei vielen metallischen Werkstoffen gilt, abgesehen von sehr tiefen und sehr hohen Temperaturen, ein linearer Zusammenhang:

$$\rho = \rho_{20}(1 + \alpha(\nu - 20^\circ\text{C})) \quad (3.20)$$

$\alpha$  - Temperaturkoeffizient

$l_i$  - Länge des Leiters

$A_i$  - Querschnitt des Leiters

Aus der folgenden **Tabelle 5** kann man die unterschiedlichen spezifischen Widerstände, Leitwerte und Temperaturkoeffizienten für einige stromleitende Werkstoffe, die auch für den Brennerbau benutzt werden, entnehmen.

**Tabelle 5:** Widerstände, Leitwerte und Temperaturkoeffizienten für einige stromleitende Werkstoffe

Werkstoff	$\rho_{20}$ $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$	$\chi_{20}$ $\text{S} \cdot \text{m} / \text{mm}^2$	$\alpha$ $1 / \text{K}$
Silber	0,016	62,5	0,0038
Kupfer	0,01786	56,0	0,0039
Aluminium	0,02857	35,0	0,0038
Stahl	0,1...0,15	7...10	0,0045...0,006
Zinn	0,11	9	0,0042
Bronze	0,018...0,056	18...55	
Messing	0,07...0,09	11...14	0,0015
Chromnickelstahl	1,1	0,91	0,0002

In den folgenden **Tabellen 6, 7** sind Angaben über die geometrischen Abmessungen, Querschnitte und Werkstoffarten der stromleitenden Brennerbauteilen für luft- und flüssiggekühlte MSG-Lichtbogenschweißbrenner zusammengestellt.

**Tabelle 6:** Luftgekühlte Brenner. Geometrische Abmessungen, Querschnitte und Werkstoffarten der stromleitenden Brennerbauteile

Typ	Strombereich, A	Stromdüse	Düsenstock	Innenrohr	Stromkabel, mm <sup>2</sup>	Gesamtgewicht, kg (Prospekt)
TBI 120	100/120	∅ 6 M6 25		Ms ∅	8	
140/145	140/160	∅ 6 M6 25		Ms ∅8/3	10	0,35
150	150/180	∅ 6 M6 25		Ms ∅10/5	16	0,95 1,25 (DR*)
230	180/200	∅ 8 M6 25	M6/M6	Ms ∅11/6	25	1,00
240	220/250	∅ 8 M6 25 ∅ 8 M6 28	M6/M6	ECu ∅12/6	35	1,35 1,60 (DR)
250	200/230	∅ 8 M6 28 ∅10M8 30		Ms ∅11/6	25	1,20 1,50 (DR)
260	260/290	∅ 8 M6 28 ∅10M8 30	M6/M8 22 M8/M8 20	ECu ∅12/6	35	1,55
360	320/340	∅ 8 M6 28 ∅10M8 30	M6/M8 28 M8/M8 34	ECu ∅12/6	50	1,80 2,10 (DR)
380	350/370	∅10M8 30	M8/M10	ECu ∅12/6	50	2,10
6G	375	∅10M8 30	M8 38	ECu ∅12/6	50	

\*- Brennerausführung mit drehbarem Brennerhals

Erläuterung zur Tabelle:

Stromdüse: ∅ 6 M6 25:

- ∅ 6 – Außendurchmesser 6 mm
- M6 – Gewinde für die Einschrauben in den Düsenstock
- 25 – Länge der Stromdüse, mm

Düsenstock: M6/M8 22:

- M6 – Gewinde für die Stromdüse
- M8 - Gewinde für die Einschrauben auf das Innenrohr
- 22 – Länge des Düsenstocks, mm

Innenrohr: Ms ∅11/6

- MS – Werkstoff Messing ( Ecu – elektrolytisches Kupfer)
- ∅11/6 – Außendurchmesser 11 mm / Innendurchmesser 6 mm

**Tabelle 7:** Wassergekühlte Brenner. Geometrische Abmessungen, Querschnitte und Werkstoffarten der stromleitenden Brennerbauteile

Typ	Strombereich, A	Stromdüse	Düsenstock	Innenrohr, mm <sup>2</sup>	Stromkabel, mm <sup>2</sup>	Gesamtgewicht, kg (Prospekt)
TBI 241	280/320	∅6 M6 25 ∅8 M6 28	M6/M6	16	16	1,40
411	350/400	∅8 M6 28 ∅10M8 30	M8/M10	16	16	1,50
511	450/500	∅8 M6 28 ∅10M8 30	M8/M10	16	16	1,65
601	500/600	∅10M8 30	M8/M8	16	16	2,00
5W	280/315	∅6 M6 25 ∅8 M6 28		16	16	1,40
7W	450/500	∅10M8 30		16	16	1,60
7.1W	280 -400 320 -400	∅10M8 30		16	16	1,50- 1,80
9W	500/560	∅10M8 30		16	16	1,40

Allein im Schlauchpaket wird wegen des elektrischen Stoffwiderstandes des Stromkabels eine beträchtliche Menge elektrischer Energie in Wärmeenergie umgewandelt; diese Leistung geht auf dem Wege zum Lichtbogen verloren. Die freigesetzte Wärme hat eine negative Wirkung auf den Lichtbogenbrenner, weil sich das Schlauchpaket erwärmt und verbrennen könnte, wenn diese Wärme nicht in ausreichendem Maße abgeführt wird. Für einige flüssiggekühlte MSG-Lichtbogenbrenner mit einem Querschnitt des Stromkabels von ca. 17,3 mm<sup>2</sup> und einem Schlauchpaket von 3 m Länge ist die freigesetzte Wärmeleistung  $P_{Sch_{max}}$  in der **Tabelle 8** berechnet und zusammengestellt worden. Es ist auch die Wärmeleistung bezogen auf 1 m Länge des Schlauchpaketes angegeben.

**Tabelle 8:** Freigesetzte Wärmeleistung in dem Schlauchpaket, Länge 3 m

Brennertyp	$I_{\max}, A$	$P_{Sch \max}, W$ für 3 m	$P_{Sch \max}, W$ für 1m
5W	315	297,7	149
7W	500	750	250
7.1W	400	480	160
9W	560	941	314
241	320	307,2	102,4
411	400	480	160
511	500	750	250
351	320	307,2	102,4
452	450	607,5	202,5
601	600	1080	360

Erwärmung durch Kontaktwiderstände

$$\dot{Q}_{Kont_i} = I^2 R_{Kont_i} \quad (3.21)$$

$I$  - Schweißstrom

$R_{Kont_i}$  - Kontaktwiderstand im Brennerelement  $i$

Dieser Erwärmungsfaktor spielt eine wesentliche Rolle bei der Wärmeentstehung im MSG-Schweißbrenner. Der Zusatzdraht läuft durch die Stromdüse und hat dabei mit dieser einen mechanischen Gleitkontakt, über den auch der Schweißstrom von der Stromdüse auf den Draht übergeht. Den entstehenden Kontakt kann man als dynamisch bezeichnen, weil sich seine Größe, Form und der Widerstand stetig während des Schweißprozesses ändern.

Der Kontaktwiderstand in der Stromdüse wird durch das Verhalten des Zusatzdrahtes und der Stromdüse bestimmt und ist von der Oberfläche, der Werkstoffart, den Abmessungen und der Form sowohl des Drahtes als auch der Stromdüse abhängig.

Erwärmung durch Strahlung des Lichtbogens

Im brennenden elektrischen Lichtbogen wird elektrische Energie in Wärmeenergie umgesetzt. Dieser Prozess verläuft aber nicht ohne Energieverluste, so dass bis ca. 20% der gesamten Lichtbogenenergie an die Umgebung durch Strahlung abgegeben werden. Ein Teil dieser abgestrahlten Energie geht wieder in den Brenner zurück, wird von Brenneranteilen absorbiert und erwärmt das Werkzeug.

Im Idealfall wird zwischen zwei im Vergleich zu ihrem Abstand sehr großen schwarzen Flächen der Größe  $A$  und der Temperatur  $T_1$  und  $T_2$  durch Strahlung ein Wärmestrom

$$\dot{Q}_{12} = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.22)$$

ausgetauscht.

Schweißbrenner sowie Lichtbogen sind keine idealen schwarzen Körper, weil sie nicht die ganze Strahlungsenergie bei allen Wellenlängen absorbieren können. Sie gehören zu den grauen Strahlern. Graue Strahler mit Emissionszahlen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  tauschen einen Wärmestrom

$$\dot{Q}_{12} = C_{12} A (T_1^4 - T_2^4). \quad (3.23)$$

Es bedeuten:

$\dot{Q}_{12}$  - Wärmestrom zwischen zwei Strahlern

$C_{12}$  - Strahlungsaustauschzahl

$A$  - Fläche des Strahlers

$T_1$  - Temperatur des ersten Strahlers

$T_2$  - Temperatur des zweiten Strahlers

$$C_{12} = \sigma \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \quad (3.24)$$

$\sigma$  - Strahlungskoeffizient

$\varepsilon_1$  - Emissionszahl des ersten Strahlers

$\varepsilon_2$  - Emissionszahl des zweiten Strahlers

Für den Fall zweier beliebig im Raum angeordneter Flächen hängt der Wärmestrom sehr stark von der geometrischen Anordnung sowie der Abmessung des Strahlers ab:

$$\dot{Q}_{12} = e_{12} A_1 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.25)$$

$e_{12}$  - Einstrahlzahl zwischen zwei Körpern

Für den Fall des Wärmeumtauschs zwischen dem elektrischen Lichtbogen und dem Brenner durch Strahlung nimmt die Gleichung (3.24) die Form an:

$$\dot{Q}_{StrLb_i} = e_{BrLb_i} A_{Lb} \varepsilon_{Lb} \varepsilon_{Br_i} \sigma (T_{Lb}^4 - T_{Br_i}^4) \quad (3.26)$$

Hierin bedeuten:

$e_{BrLb_i}$  - Einstrahlzahl zwischen Lichtbogen und Brennerelement  $i$

$A_{Lb}$  - Fläche des Lichtbogens

$\varepsilon_{Lb}$  - Emissionszahl des Lichtbogens

$\varepsilon_{Br_i}$  - Emissionszahl des Brennerelements  $i$

$T_{Lb}$  - Lichtbogentemperatur

$T_{Br_i}$  - Temperatur des Brennerelements  $i$

#### Erwärmung durch Strahlung des Werkstücks

Bei der Betrachtung des Wärmestromes zwischen dem Werkstück und dem Lichtbogenschweißbrenner gelten die gleichen theoretischen Überlegungen wie bei der Betrachtung des Wärmestromes zwischen dem Lichtbogen und dem Brenner, natürlich unter Berücksichtigung der entsprechenden Koeffizienten, Flächengrößen und der Temperatur.

$$\dot{Q}_{StrW_i} = e_{BrW_i} A_w \varepsilon_w \varepsilon_{Br_i} \sigma (T_w^4 - T_{Br_i}^4) \quad (3.27)$$

Hierin:

$e_{BrW_i}$  - Einstrahlzahl zwischen Werkstück und Brennerelement  $i$

$A_w$  - Fläche des Werkstücks

$\varepsilon_w$  - Emissionszahl des Werkstücks

$T_w$  - Temperatur des Werkstücks

Festzustellen ist, dass die Erwärmung des Brenners in beiden Fällen sehr stark von der räumlichen Position des eingesetzten Brenners und des Strahlers abhängt. Außerdem hat die Emissionszahl einen sehr starken Einfluss auf die vom Brenner aufgenommene Wärmemenge. Dieser Parameter wird vor allem durch die Werkstoffart und den Zustand der Oberfläche bestimmt. Insbesondere der Zustand der Oberfläche des Brenners ist ein sehr variabler Parameter. Durch Abnutzung und Verschmutzung der Brenneroberfläche während des Betriebs schwankt die Emissionszahl stark.

#### Erwärmung durch Konvektion

Im Schweißprozess umströmen von der Werkstückoberfläche aufsteigende erhitzte Gase und Dämpfe den Lichtbogenschweißbrenner und geben die innere Energie ihrer Moleküle ab. So erfolgt die Erwärmung des Lichtbogenschweißbrenners durch freie Konvektion der Gase. Dieser Prozess wird durch folgende Gleichung mathematisch beschrieben:

$$\dot{Q}_{KonvW_i} = \alpha A_i (T_f - T_{O_i}) \quad (3.28)$$

Worin:

$\alpha$  - Wärmeübergangskoeffizient

$A_i$  - Oberfläche des Brennerelementes  $i$

$T_f$  - Temperatur des Fluids

$T_{O_i}$  - Temperatur der Oberfläche des Brennerelementes  $i$

Die freie Konvektion wird durch die Temperatur des Mediums und durch die Fallbeschleunigung bedingt und aus diesem Grunde ist ihre Wirkung hinsichtlich der Brennererwärmung von der Schweißposition abhängig.

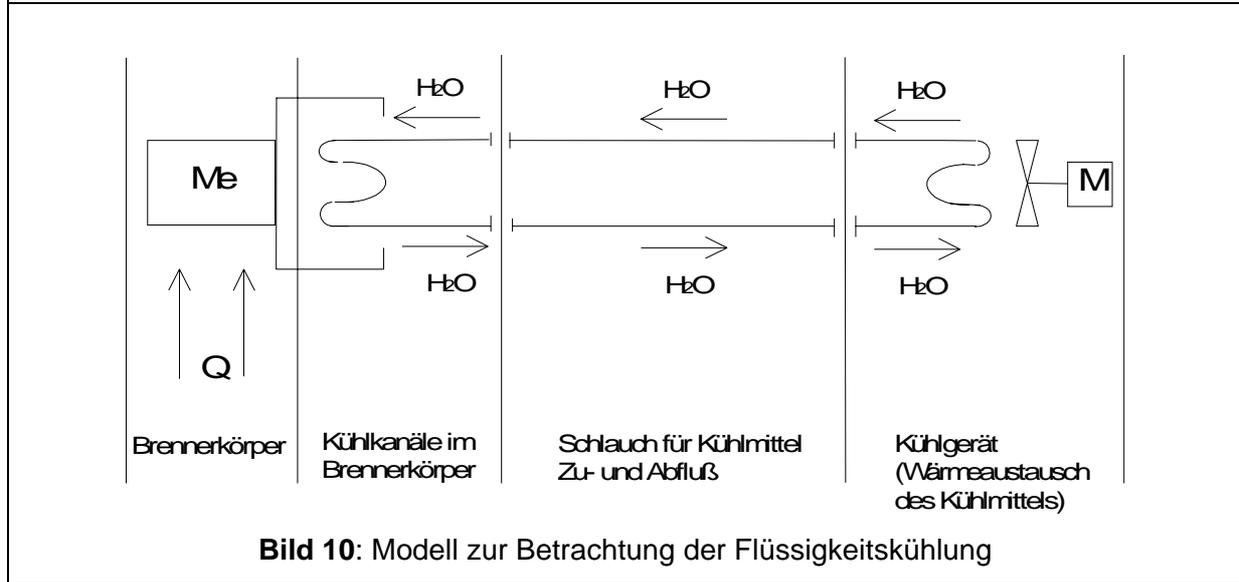
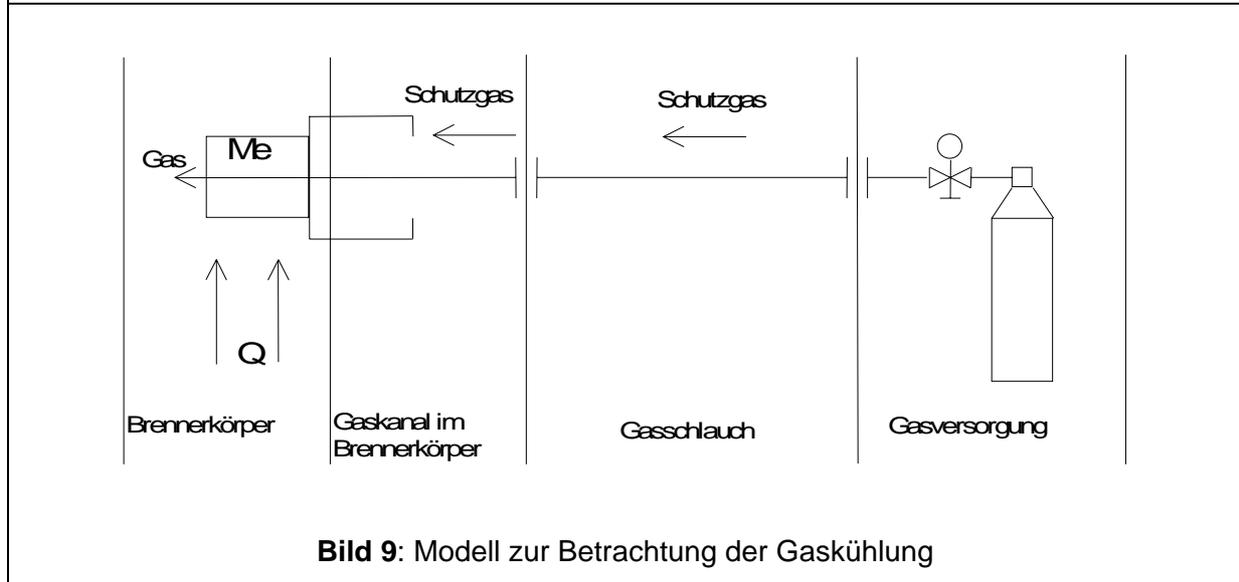
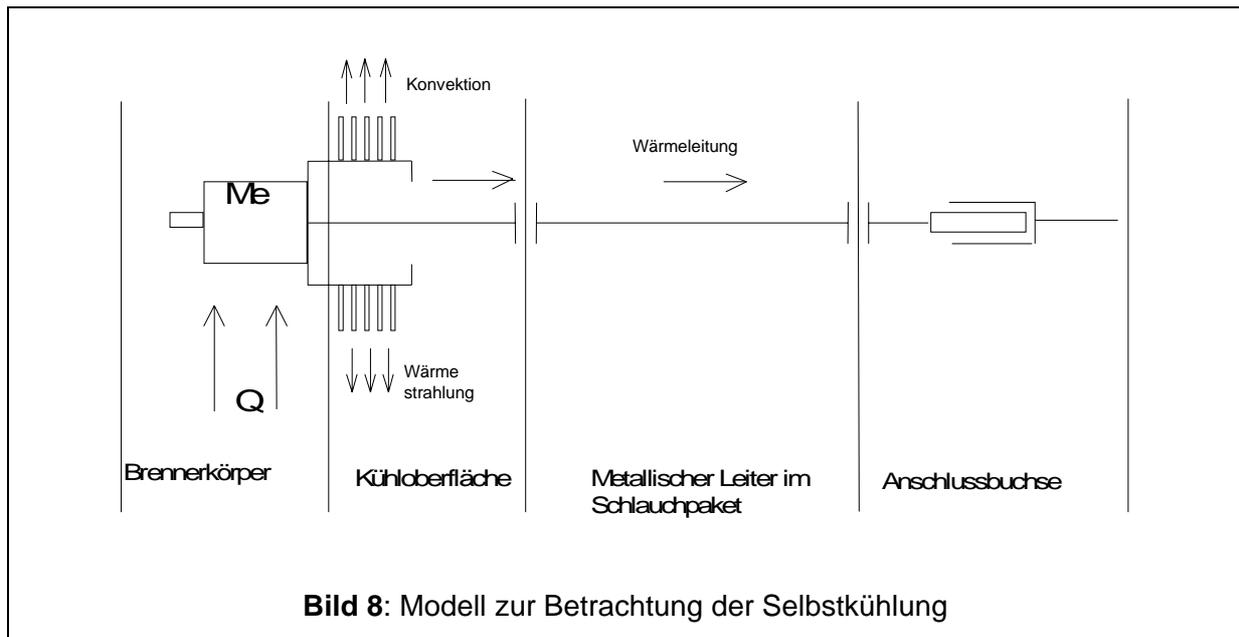
### 3.3.2 Kühlung des Brenners. Mathematisches Modell. Einflussfaktoren

Die Gewährleistung eines entsprechenden Stromstärkebereichs, die Einschaltdauer, die Standzeit des Brenners und seiner Bauelemente sind die Hauptanforderung an das VRM. Die Erfüllung dieser Anforderungen garantiert die volle Funktionsfähigkeit des Brenners (VRM). Die größte Belastung, die auf den Brenner während der Funktionsausführung einwirkt, ist die thermische Belastung. Sie entsteht durch den Übergang der Wärme aus dem Lichtbogen und aus den stromleitenden Teilen. Damit die thermische Belastung auf einem zulässigen Niveau gehalten wird, ist es notwendig, die unerwünschte Wärme aus dem Brenner abzuführen. Dazu gibt es im Prinzip zwei Möglichkeiten:

- **Zwangskühlung** (Wärme wird durch ein Kühlmittel mit niedrigerer Temperatur als der Brenner selbst abgeführt)
- **Selbstkühlung** (Wärme wird durch Wärmeübergang (Strahlung, Konvektion in die Umgebung) und durch Wärmeleitung (z.B. in das Stromkabel) abgeführt)

Die Wahl zwischen diesen beiden Kühlmöglichkeiten soll nach qualitativer Abschätzung der Wärmebilanz im Schweißbrenner erfolgen. Auf der einen Seite dieser Bilanz steht die Wärmemenge, die während des Schweißens den Brenner erwärmt, auf der anderen Seite die Wärmemenge, die je nach Art der Kühlung abgeführt wird.

In den **Bildern 8, 9, 10** sind schematische Modelle zur Beschreibung von Selbst- und Zwangskühlung dargestellt. Bei der Betrachtung der Zwangskühlung muss man zwei Prozesse unterscheiden: Kühlung durch ein strömendes Gas und Kühlung durch eine strömende Flüssigkeit. Beide werden separat wegen der großen Unterschiede hinsichtlich der Wirkung auf den gesamten Prozess des Wärmeabtransports sowie der konstruktiven Gestaltung der Brenner betrachtet.



Für den Fall eines **MSG- bzw. WIG-Schweißbrenners mit Zwangskühlung** (z.B. Flüssigkeitskühlung) lässt sich der gesamte Wärmestrom, der aus dem Brenner während des Betriebes abgeführt wird, nach folgender Gleichung berechnen:

$$\dot{Q}_{\Sigma Ab} = \dot{Q}_{\Sigma StrBr} + \dot{Q}_{\Sigma WLeit} + \dot{Q}_{\Sigma Konv} + \dot{Q}_{\Sigma Zwang} \quad (3.29)$$

$\dot{Q}_{\Sigma Ab}$  - Der gesamte Wärmestrom, der aus dem Brenner abfließt

$\dot{Q}_{\Sigma StrBr}$  - Abfließender Wärmestrom durch Strahlung

$\dot{Q}_{\Sigma WLeit}$  - Abfließender Wärmestrom durch Wärmeleitung

$\dot{Q}_{\Sigma Konv}$  - Abfließender Wärmestrom durch Konvektion

$\dot{Q}_{\Sigma Zwang}$  - Abfließender Wärmestrom durch Zwangskühlung

Für den Fall eines **MSG- bzw. WIG-Schweißbrenners mit Selbstkühlung** lässt sich der gesamte Wärmestrom, der vom Brenner während des Betriebs abgeführt wird, nach Gleichung 3.29 berechnen:

$$\dot{Q}_{\Sigma Ab} = \dot{Q}_{\Sigma StrBr} + \dot{Q}_{\Sigma WLeit} + \dot{Q}_{\Sigma Konv} \quad (3.30)$$

Andererseits lässt sich der gesamte Wärmestrom, der aus dem Brenner abgeführt wird, als Summe der aus einzelnen zur Betrachtung ausgewählten Brenner-elementen abfließenden Wärmeströme darstellen:

$$\dot{Q}_{\Sigma Ab} = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_{Ab_i} \quad (3.31)$$

Für die Betrachtung der Kühlung eines **MSG- Brenners** wurden im Kapitel 3.2.1 6 seinen Hauptelementen ausgewählt: 1 - Stromdüse; 2 – Düsenstock; 3 – Gasdüse; 4 – Außenrohr mit dem Gasdüsensitz; 5 – Innenrohr; 6 – Stromkabel. Für den Fall eines MSG- Brenners nimmt die Gleichung 3.31 folgende Form an:

$$\dot{Q}_{\Sigma Ab_{MSG}} = \dot{Q}_{Ab_{1MSG}} + \dot{Q}_{Ab_{2MSG}} + \dot{Q}_{Ab_{3MSG}} + \dot{Q}_{Ab_{4MSG}} + \dot{Q}_{Ab_{5MSG}} + \dot{Q}_{Ab_{6MSG}} \quad (3.32)$$

Es bedeuten:

$\dot{Q}_{Ab_{1MSG}}$  - aus der Stromdüse abfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Ab_{2MSG}}$  - aus dem Düsenstock abfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Ab_{3MSG}}$  - aus der Gasdüse abfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Ab_{4MSG}}$  - aus dem Außenrohr abfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Ab_{5MSG}}$  - aus dem Innenrohr abfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Ab_{6MSG}}$  - aus dem Stromkabel abfließender Wärmestrom

Im Fall der Analyse der Abkühlung eines **WIG- Brenners** waren im Kapitel 3.2.2 6 Hautelementen zur Betrachtung ausgewählt. Das sind: 1 – Wolframelektrode; 2 – Spannhülse; 3 – Spannhülsegehäuse; 4 – Gasdüse; 5 – Innenrohr; 6 – Stromkabel. Auf den WIG- Brenner bezogen sieht die Gleichung 3.31 folgend aus:

$$\dot{Q}_{\Sigma Ab_{WIG}} = \dot{Q}_{Ab_{1WIG}} + \dot{Q}_{Ab_{2WIG}} + \dot{Q}_{Ab_{3WIG}} + \dot{Q}_{Ab_{4WIG}} + \dot{Q}_{Ab_{5WIG}} + \dot{Q}_{Ab_{6WIG}} \quad (3.33)$$

Hierin:

$\dot{Q}_{Ab_{1WIG}}$  - aus der Wolframelektrode abfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Ab_{2WIG}}$  - aus der Spannhülse abfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Ab_{3WIG}}$  - aus der Spannhülsegehäuse abfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Ab_{4WIG}}$  - aus der Gasdüse abfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Ab_{5WIG}}$  - aus dem Innenrohr abfließender Wärmestrom

$\dot{Q}_{Ab_{6WIG}}$  - aus dem Stromkabel abfließender Wärmestrom

Der Wärmestrom, der aus einem ausgewählten Brennerelement  $i$  abfließt, lässt sich als Summe der Wärmeströme, die durch verschiedene physikalischen Prozesse verursacht sind und aus diesem Element abfließen, berechnen:

Für den Fall eines **MSG- bzw. WIG-Schweißbrenners mit Zwangskühlung** (z.B. Flüssigkeitskühlung) lässt sich der gesamte Wärmestrom, der von dem Brennerelement  $i$  während des Betriebs abgeführt wird, nach folgender Gleichung berechnen:

$$\dot{Q}_{Ab_i} = \dot{Q}_{StrBr_i} + \dot{Q}_{WLeit_{im}} + \dot{Q}_{Konv_i} + \dot{Q}_{Zwang_i} \quad (3.34)$$

$\dot{Q}_{Ab_i}$  - Der gesamte Wärmestrom, der aus dem Brennerelement  $i$  abfließt

$\dot{Q}_{StrBr_i}$  - Abfließender Wärmestrom durch Strahlung

$\dot{Q}_{WLeit_{im}}$  - Wärmestrom, der aus dem Brennerelement  $i$  in das Element  $m$  durch Wärmeleitung abfließt

$\dot{Q}_{Konv_i}$  - Abfließender Wärmestrom durch Konvektion

$\dot{Q}_{Zwang_i}$  - Abfließender Wärmestrom durch Zwangskühlung

Für den Fall eines **MSG- bzw. WIG-Schweißbrenners mit Selbstkühlung** entfällt die Anteil  $\dot{Q}_{Zwang_i}$  und der gesamte Wärmestrom, der aus dem Brennerelement  $i$  abfließt, lässt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$\dot{Q}_{Ab_i} = \dot{Q}_{StrBr_i} + \dot{Q}_{WLeit_{im}} + \dot{Q}_{Konv_i} \quad (3.35)$$

Bei der Betrachtung der **Hauptelementen des MSG-Brenners mit Zwangskühlung** (**Bild 11**) kommt man zur folgenden Gleichungen bezüglich jeden Brennerelements:

Die **Stromdüse** verliert die Wärme durch Strahlung, Wärmeleitung in den Düsenstock und Konvektion:

$$\dot{Q}_{Ab_{1MSG}} = \dot{Q}_{StrBr_{1MSG}} + \dot{Q}_{WLeit_{12MSG}} + \dot{Q}_{Konv_{1MSG}} \quad (3.36)$$

Der **Düsenstock** wird auch durch Strahlung, Wärmeleitung ins Innenrohr und Konvektion gekühlt:

$$\dot{Q}_{Ab_{2MSG}} = \dot{Q}_{StrBr_{2MSG}} + \dot{Q}_{WLeit_{25MSG}} + \dot{Q}_{Konv_{2MSG}} \quad (3.37)$$

Die **Gasdüse** verliert die thermische Energie durch Strahlung, Wärmeleitung durch den Gasdüsensitz ins Außenrohr, Konvektion von der Oberfläche und, wenn flüssiggekühlt wird, durch Zwangskühlung :

$$\dot{Q}_{Ab_{3MSG}} = \dot{Q}_{StrBr_{3MSG}} + \dot{Q}_{WLeit_{34MSG}} + \dot{Q}_{Konv_{3MSG}} + \dot{Q}_{Zwang_{3MSG}} \quad (3.38)$$

Der aus dem **Außenrohr** des MSG-Brenners mit Zwangskühlung abfließende Wärmestrom besteht aus folgenden Anteilen: Wärmeableitung durch Strahlung, Konvektion von der Oberfläche und, wenn das Gasdüsensitz flüssiggekühlt ist, durch Zwangskühlung:

$$\dot{Q}_{Ab_{4MSG}} = \dot{Q}_{StrBr_{4MSG}} + \dot{Q}_{Konv_{4MSG}} + \dot{Q}_{Zwang_{4MSG}} \quad (3.39)$$

Der aus dem **Innenrohr** des MSG-Brenners mit Zwangskühlung abfließende Wärmestrom besteht aus folgenden Anteilen: sehr geringe Wärmeleitung in das Stromkabel und hauptsächlich Wärmeableitung durch Zwangskühlung:

$$\dot{Q}_{Ab_{5MSG}} = \dot{Q}_{WLeit_{56MSG}} + \dot{Q}_{Zwang_{5MSG}} \quad (3.40)$$

Die Wärme aus dem **Stromkabel** wird nur durch Zwangskühlung abgeführt:

$$\dot{Q}_{Ab_{6MSG}} = \dot{Q}_{Zwang_{6MSG}} \quad (3.41)$$

Bei der Betrachtung der **Hauptelemente des MSG-Brenners mit Selbstkühlung** ergeben sich folgenden Änderungen:

- es entfällt der Anteil  $\dot{Q}_{Zwang_i}$
- Das **Außenrohr** des selbstgekühlten MSG-Brenners wird nur durch Strahlung und Konvektion von der Oberfläche gekühlt

$$\dot{Q}_{Ab_{4MSG}} = \dot{Q}_{StrBr_{4MSG}} + \dot{Q}_{Konv_{4MSG}} \quad (3.42)$$

- Das **Innenrohr** des selbstgekühlten MSG-Brenners wird nur durch Wärmeleitung in das Stromkabel gekühlt:

$$\dot{Q}_{Ab_{5MSG}} = \dot{Q}_{WLeit_{56MSG}} \quad (3.43)$$

- Die Wärme aus dem **Stromkabel** wird jetzt durch Strahlung und Konvektion abgeführt:

$$\dot{Q}_{Ab_{6MSG}} = \dot{Q}_{StrBr_{6MSG}} + \dot{Q}_{Konv_{6MSG}} \quad (3.44)$$

Bei der Betrachtung der **Hauptelementen des WIG-Brenners mit Zwangskühlung** (**Bild 12**) werden folgende Gleichungen bezüglich des aus jedem Brennelement abfließenden Wärmestroms relevant:

Die **Wolframelektrode** verliert die Wärme durch Strahlung, Wärmeleitung in den Düsenstock und Konvektion:

$$\dot{Q}_{Ab_{1WIG}} = \dot{Q}_{StrBr_{1WIG}} + \dot{Q}_{WLeit_{12WIG}} + \dot{Q}_{Konv_{1WIG}} \quad (3.45)$$

Die **Spannhülse** wird durch Strahlung, Wärmeleitung in das Spannhülsegehäuse gekühlt:

$$\dot{Q}_{Ab_{2WIG}} = \dot{Q}_{StrBr_{2WIG}} + \dot{Q}_{WLeit_{23MSG}} \quad (3.46)$$

Das **Spannhülsegehäuse** gibt die Wärme durch Strahlung, Wärmeleitung ins Innenrohr ab:

$$\dot{Q}_{Ab_{3WIG}} = \dot{Q}_{StrBr_{3WIG}} + \dot{Q}_{WLeit_{35MSG}} \quad (3.47)$$

Die **Gasdüse** verliert die thermische Energie durch Strahlung, Wärmeleitung ins Innenrohr und Konvektion von der Oberfläche:

$$\dot{Q}_{Ab_{4WIG}} = \dot{Q}_{StrBr_{5WIG}} + \dot{Q}_{WLeit_{45WIG}} + \dot{Q}_{Konv_{5WIG}} \quad (3.48)$$

Der aus dem **Innenrohr** des zwangsgekühlten WIG -Brenners abfließende Wärmestrom besteht aus folgenden Anteilen: sehr geringe Wärmeleitung in das Stromkabel und hauptsächlich Wärmeableitung durch Zwangskühlung:

$$\dot{Q}_{Ab_{5WIG}} = \dot{Q}_{WLeit_{56WIG}} + \dot{Q}_{Zwang_{5WIG}} \quad (3.49)$$

Die Wärme aus dem **Stromkabel** wird nur durch Zwangskühlung abgeführt:

$$\dot{Q}_{Ab_{6WIG}} = \dot{Q}_{Zwang_{6WIG}} \quad (3.50)$$

Bei der Betrachtung der **Hauptelementen des WIG-Brenners mit Selbstkühlung** ergeben sich folgenden Änderungen:

- as entfällt die Anteil  $\dot{Q}_{Zwang_i}$
- Das **Innenrohr** des selbstgekühlten WIG-Brenners wird nur durch Wärmeleitung in das Stromkabel gekühlt:

$$\dot{Q}_{Ab_{5WIG}} = \dot{Q}_{WLeit_{56WIG}} \quad (3.51)$$

- Die Wärme aus dem **Stromkabel** wird jetzt durch Strahlung und Konvektion abgeführt:

$$\dot{Q}_{Ab_{6WIG}} = \dot{Q}_{StrBr_{6WIG}} + \dot{Q}_{Konv_{6WIG}} \quad (3.52)$$

Die einzelnen Komponenten der o.g. Gleichungen lassen sich nach folgender Formel [70] berechnen:

#### Abkühlen durch Strahlung

Für den Fall zweier beliebig im Raum angeordneter Flächen hängt der Wärmestrom sehr stark von ihrer geometrischen Anordnung sowie der Abmessung des strahlenden Körpers ab:

$$\dot{Q}_{StrBr_i} = e_{BrUm_i} A_{Br_i} \varepsilon_{Br_i} \varepsilon_{Um} \sigma (T_{Br_i}^4 - T_{Um}^4) \quad (3.53)$$

Hierin:

$e_{BrUm_i}$  - Einstrahlzahl zwischen Brennerelement  $i$  und Umgebung

$A_{Br_i}$  - Fläche des Brennerelementes  $i$

$\varepsilon_{Br_i}$  - Emissionszahl des Brennerelements  $i$

$\mathcal{E}_{Um}$  - Emissionszahl der Umgebung

$T_{Br_i}$  - Temperatur des Brennelements  $i$

$T_{Um}$  - Umgebungstemperatur

### Abkühlen durch Wärmeleitung

Wärmestrom  $\dot{Q}_{WLeit_{im}}$ , der aus dem Brennelement  $i$  in das Element  $m$  durch Wärmeleitung abfließt ist nach Gleichung 3.51 zu bestimmen:

$$\dot{Q}_{WLeit_{im}} = \alpha_{im} A_{im} (T_i - T_m) \quad (3.54)$$

Worin:

$\alpha_{im}$  - Wärmeübergangskoeffizient zwischen den Brennelementen  $i$  und  $m$

$A_{im}$  - Querschnittsfläche des Kontaktes zwischen den Brennelementen  $i$  und  $m$

$T_i$  - Temperatur am Ende des Brennelements  $i$

$T_m$  - Temperatur am Anfang des Brennelements  $m$

### Kühlen durch Konvektion

An der Oberfläche des erwärmten Brenners erhitzen sich atmosphärische Gase sich und steigen auf; dabei nehmen sie die Wärme vom Brennerkörper auf. Auf diese Weise erfolgt die Abkühlung des Lichtbogenschweißbrenners durch freie Konvektion dieser Gase. Jeder Lichtbogenschweißbrenner besteht aus mehreren Elementen  $i=1\dots n$ , die unterschiedliche Temperatur sowie Oberfläche haben. Dieser Prozess wird durch folgende Gleichung mathematisch beschrieben

$$\dot{Q}_{Konv_i} = \alpha_i A_{Ob_i} (T_{f_i} + T_{O_i}) \quad (3.55)$$

Hierin bedeuten:

$\dot{Q}_{Konv_i}$  - Wärmestrom durch Konvektion von einem einzelnen Brennelement  $i$

$\alpha_i$  - Wärmeübergangskoeffizient eines einzelnen Brennerelements

$A_{Ob_i}$  - Oberfläche eines einzelnen Brennerelements

$T_{f_i}$  - Temperatur des Kühlmediums

$T_{O_i}$  - Temperatur der Oberfläche eines einzelnen Brennerelements  $i$

### Kühlen durch Zwangskühlung

Diese Art der Kühlung wird innerhalb des Brenners realisiert, wobei er mit Kühlkanälen versehen wird, durch die ein Medium strömt, das eine niedrigere Temperatur als der Brenner selbst besitzt. An der Wand des Kühlkanals findet der Wärmeaustausch mit dem Kühlmedium statt und infolge der Strömung wird die Wärme aus dem Kühlkanal herausgetragen. Als Kühlmedien können Flüssigkeiten oder Gase verwendet werden. Bei der Abkühlung des Lichtbogenschweißbrenners durch die Zwangskühlung findet ein Prozess des Wärmeübergangs mit erzwungener Konvektion statt, der durch folgende Gleichung beschrieben werden kann:

$$\dot{Q}_{Zwang_i} = \alpha A_{KK_i} (T_f - T_{KK_i}) \quad (3.56)$$

Hierin bedeuten:

$\alpha$  - Wärmeübergangskoeffizient

$A_{KK_i}$  - Oberfläche des Kühlkanals

$T_{f_i}$  - Temperatur des Kühlmediums

$T_{KK_i}$  - Temperatur des Kühlkanals

Die Oberfläche des Kühlkanals, durch die die Wärme in das Kühlmedium übergeht, wird wie folgt bestimmt:

$$A_{KK_i} = Ul \quad (3.57)$$

mit:

$U$  - Umfang des Kühlkanals

$l$  - Länge des Kühlkanals

Den Wärmeübergangskoeffizienten erhält man aus der Nußelt-Zahl zu:

$$\alpha = \frac{Nu_f \lambda_f}{d_{gl}} \quad (3.58)$$

mit:

$Nu_f$  - Nußelt-Zahl des Kühlmediums

$\lambda_f$  - Wärmeleitfähigkeit des Kühlmediums

$d_{gl}$  - gleichwertiger Durchmesser (für den Fall, dass der Kühlkanal keinen Kreisquerschnitt, sondern einen rechteckigen, dreieckigen, ringförmigen oder spaltförmigen Querschnitt besitzt)

Die Berechnung der Nußelt-Zahl für den Fall laminarer Strömung ( $Re < 2300$ ) erfolgt mit Hilfe folgender Gleichung:

$$Nu_f = 0,15 Re_f^{0,33} Pr_f^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (3.59)$$

Es bedeuten

$Re_f$  - Reynolds-Zahl des Kühlmediums

$Pr_f$  - Prandtl-Zahl des Kühlmediums

$Pr_w$  - Prandtl-Zahl an der Wand des Kühlkanals

Die Reynolds-Zahl gibt für ein von festen Wänden vollständig umschlossenes Fluid, das mit aufgezwungenen Geschwindigkeiten unterhalb der Schallgeschwindigkeit strömt, das Verhältnis von Trägheits- und Reibungskraft an:

$$Re = c_f l_o / \nu \quad (3.60)$$

Hierin bedeuten:

$c_f$  - Strömungsgeschwindigkeit des Fluids

$l_o$  - kennzeichnende Längeabmessung, in Rohren mit rechteckigem oder Kreisringquerschnitt der gleichwertige Durchmesser

$d_{gl} = 4A/U$ , mit  $A$  als Strömungsquerschnitt und  $U$  als Querschnittsumfang  
[71]

$\nu$  - kinematische Viskosität des Kühlmediums

Für die Berechnung der Nußelt-Zahl im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung ( $Re=2300..10000$ ) wird folgende Gleichung angegeben [71]:

$$Nu_f = 0,116 \left( Re_f^{\frac{2}{3}} - 125 \right) Pr_f^{\frac{1}{3}} \left( 1 + \frac{d_i}{L_i} \right)^{\frac{2}{3}} (\eta_f / \eta_w)^{0,14} \quad (3.61)$$

Die Prandtl-Zahl wird hierbei durch folgende Gleichung bestimmt:

$$Pr = \nu / a = \eta c_p / \lambda \quad (3.62)$$

mit

$a$  - Temperaturleitfähigkeit des Kühlmediums

$\eta$  - dynamische Viskosität des Kühlmediums

$c_p$  - spezifische Wärmekapazität des Kühlmediums

$\lambda$  - Wärmeleitfähigkeit des Kühlmediums

Die Größe der dynamischen Viskosität ergibt sich in:

$$\eta = \frac{\lambda Pr}{c_p} \quad (3.63)$$

Das Verhältnis der dynamischen Viskositäten in der Flüssigkeit und in der Grenzschicht an der Wand des Kühlkanals ermittelt man mit Hilfe der Gleichung:

$$\eta_f / \eta_w = \frac{Pr_f \lambda_f}{Pr_w \lambda_w} \quad (3.64)$$

worin:

$\lambda_f$  - Wärmeleitfähigkeit des Kühlmediums

$\lambda_w$  - Wärmeleitfähigkeit der Grenzschicht an der Wand

In der **Tabelle 9** sind acht verschiedene Varianten der konstruktiven Gestaltung der Kühlkanäle in komplexen Brennern (Brennersysteme) mit Flüssigkeitskühlung dargestellt.

**Variante 1** (Einkreisgekühlter Brenner. Ein geschlossener Kühlkanal im Innenrohr) ist sehr häufig in realen MSG-Brennerkonstruktionen umgesetzt. Bei dieser Gestaltungsvariante erstreckt sich die Kühlung auf das Innenrohr. Aus dem Innenrohr wird durch Widerstandserwärmung entstandene und durch Wärmeleitung vom Düsenstock und von der Gasdüse zugeführte Wärme abgeführt.

**Variante 2** (Zweikreisgekühlter Brenner. Parallelgeschaltete geschlossene Kühlkanäle im Innenrohr und im Gasdüsensitz) wird in den zwangsgekühlten MSG-Brennern realisiert, die thermisch stark belastet sind. Diese Gestaltungsvariante ist aufwändiger bei der Brennerherstellung, wobei der gesamten Brenner effiziente Kühlung bietet. Im Unterschied zur 1. Variante wird auch aus dem Gasdüsensitz Wärme abgeführt, die aus der Gasdüse durch Wärmeleitung ins Innere des Brenners drängt.

**Variante 3** (Dreikreisgekühlter Brenner. Parallelgeschaltete geschlossene Kühlkanäle im Innenrohr, im Gasdüsensitz und in der Gasdüse) ist mit sehr großem Aufwand bei der Umsetzung verbunden. Dieses Gestaltungsprinzip wird nur für die unter besonders schweren Bedingungen arbeitenden zwangsgekühlten MSG-Brennern verwendet. Im Unterschied zur 1. und 2. Variante wird gerade aus der Gasdüse durch Strahlung und Konvektion aufgenommene Wärme abgeführt.

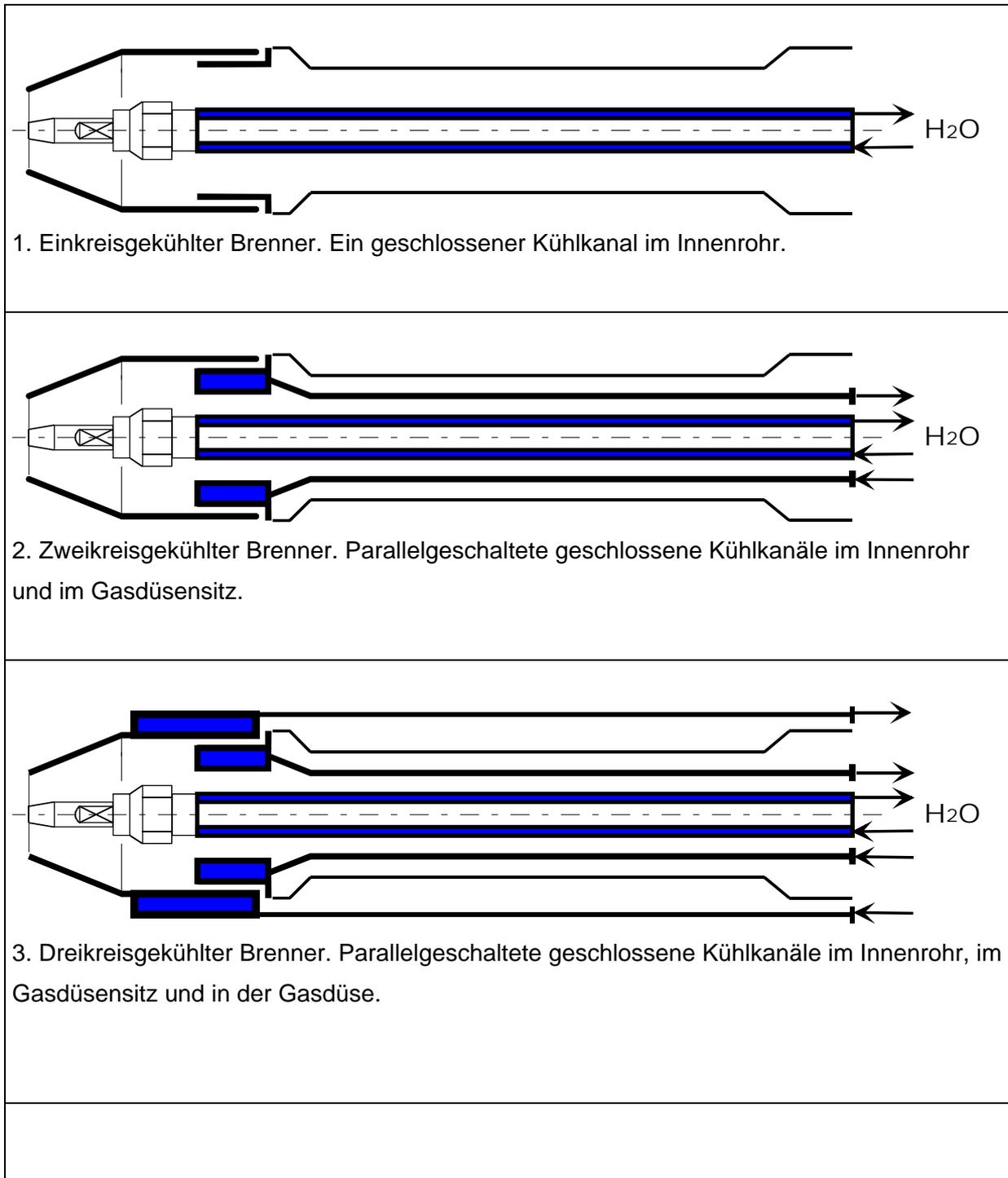
**Variante 4** (Zweikreisgekühlter Brenner. Parallelgeschaltete Kühlkanäle im Innenrohr (geschlossen) und im Gasdüsensitz (offen)) statt zwei separater geschlossener Kühlkanäle in der Gasdüse und im Gasdüsensitz, hat nur einen offenen Kühlkanal im Gasdüsensitz, so dass das Kühlmittel auch einen Teil der inneren Gasdüsenoberfläche umströmt und aus der Gasdüse durch Strahlung und Konvektion aufgenommene Wärme abführt. Diese Gestaltungsvariante ist sehr aufwändig und hat technische Probleme, die mit der hermetischen Abdichtung des offenen Kühlkanals und dem Austritt des Kühlmittels bei der Gasdüsenwechsel verbunden sind.

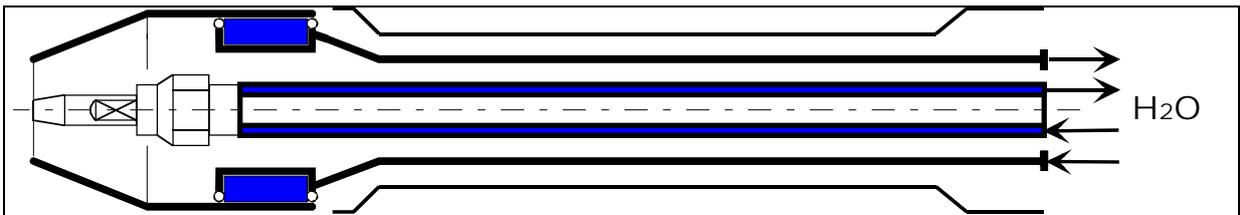
**Variante 5** (Zweikreisgekühlter Brenner. In Reihe geschaltete Kühlkanäle im Innenrohr (geschlossen) und im Gasdüsensitz (offen)), hat Ähnlichkeit mit der Variante 4, aber schlechtere Kühlwirkung, weil die Kühlkanäle in Reihe geschaltet sind und dadurch der Durchfluss des Kühlmediums geringer als in den Varianten mit Parallelschaltung ist. Durch dieses Merkmal sind auch die **6. und 7. Gestaltungsvariante** gekennzeichnet und deswegen in der Praxis der Brennerherstellung wenig verbreitet.

**Variante 8** könnte als eine Kompromisslösung zwischen **1. und 3. Variante** gesehen werden, wobei der Realisierungsaufwand niedriger ist, weil der komplizierte flüssiggekühlte Gasdüsensitz entfällt. Andererseits führt eine mit Kühlkanälen versehene Gasdüse zur

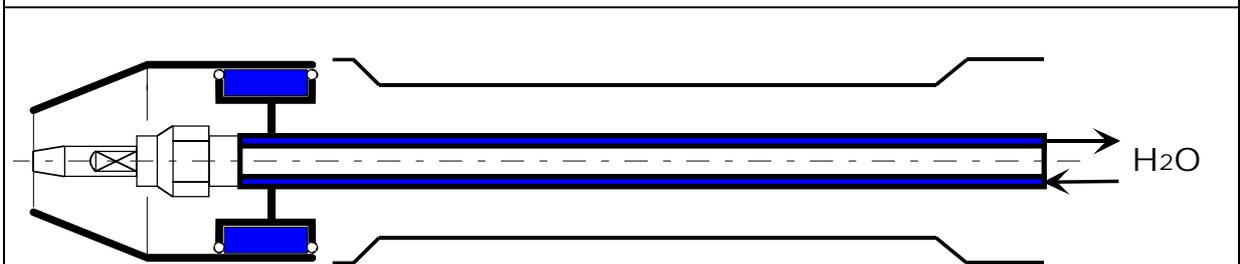
Vergrößerung von Außenmaßen und Gewicht des Brenners und ist aus diesem Grunde in den realen MSG-Brennerkonstruktionen nicht gerne gesehen.

**Tabelle 9:** Verschiedene Varianten der konstruktiven Gestaltung der Kühlkanäle in komplexen Brennern (Brennersysteme) mit Flüssigkeitskühlung

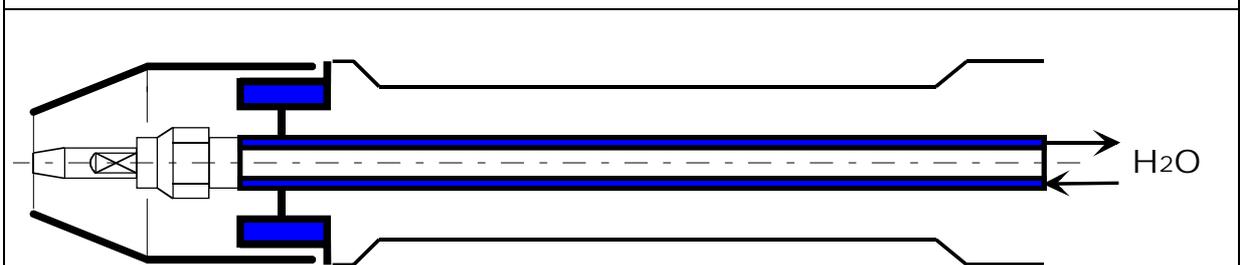




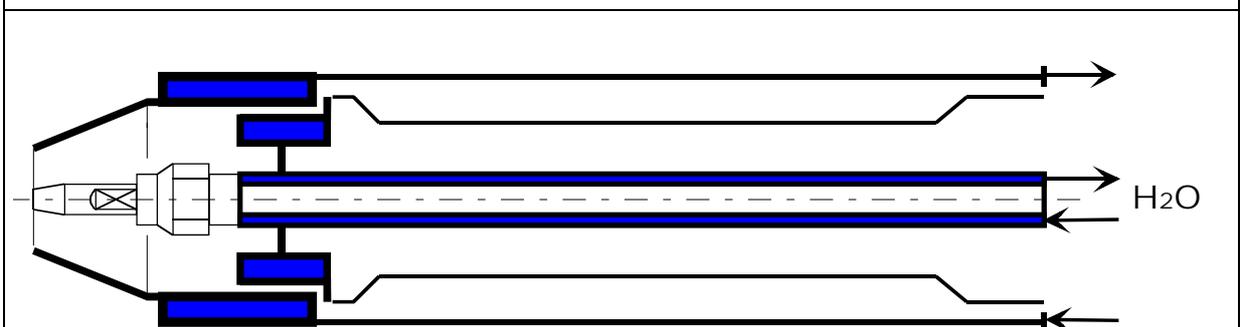
4. Zweikreisgekühlter Brenner. Parallelgeschaltet Kühlkanäle im Innenrohr (geschlossen) und im Gasdüsensitz (offen).



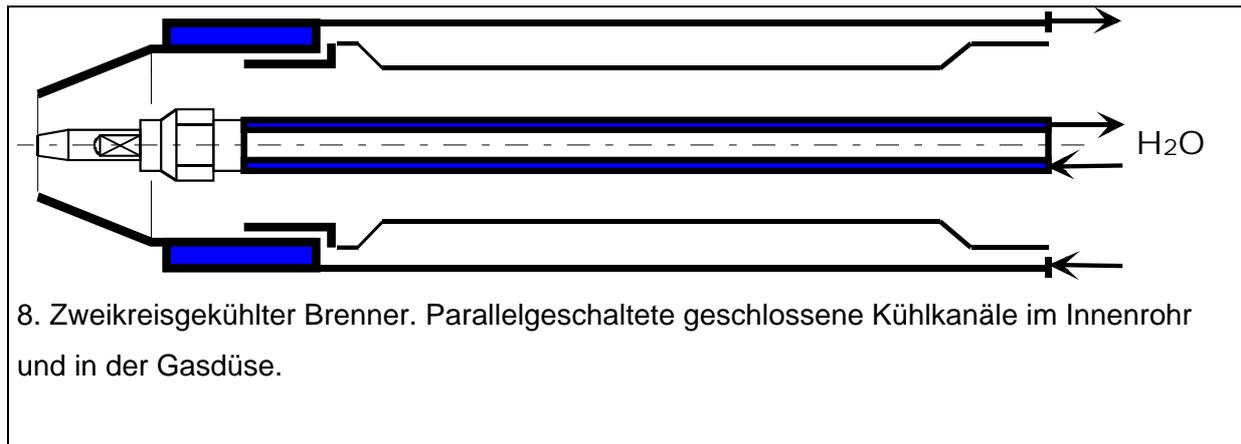
5. Zweikreisgekühlter Brenner. In Reihe geschaltete Kühlkanäle im Innenrohr (geschlossen) und im Gasdüsensitz (offen).



6. Zweikreisgekühlter Brenner. In Reihe geschaltete geschlossene Kühlkanäle im Innenrohr und im Gasdüsensitz.



7. Dreikreisgekühlter Brenner. In Reihe geschaltete geschlossene Kühlkanäle im Innenrohr und im Gasdüsensitz. Parallelgeschalteter geschlossener Kühlkanal in der Gasdüse.



Bei der Betrachtung des Mechanismus der Wärmeabführung aus dem Brenner stellt man fest, dass den größten Einfluss auf diesen Prozess folgenden zwei Faktoren haben:

- Die konstruktive Gestaltung des Brenners und seiner einzelnen Bauelemente (Dieser Faktor ist relevant sowohl für selbstgekühlte als auch für zwangsgekühlte Brenner)
- Die Parameter der Zwangskühlung (Dieser Faktor ist für zwangsgekühlte Brenner relevant):
  - Art des Kühlmediums
  - Einlauftemperatur des Kühlmediums
  - Durchfluss des Kühlmediums

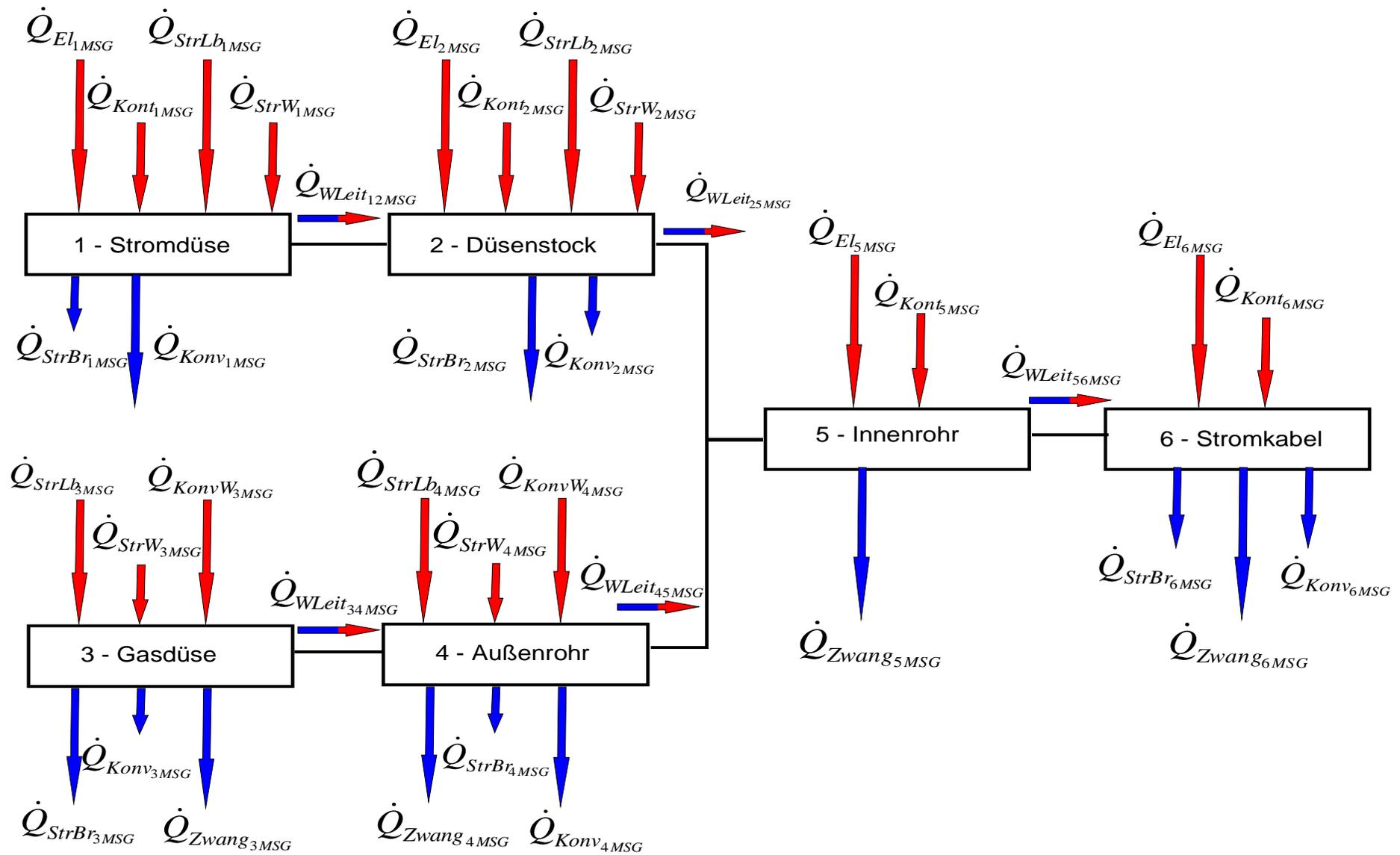


Bild 11: Schema der Wärmeströme in den Hauptelementen eines MSG-Brenners

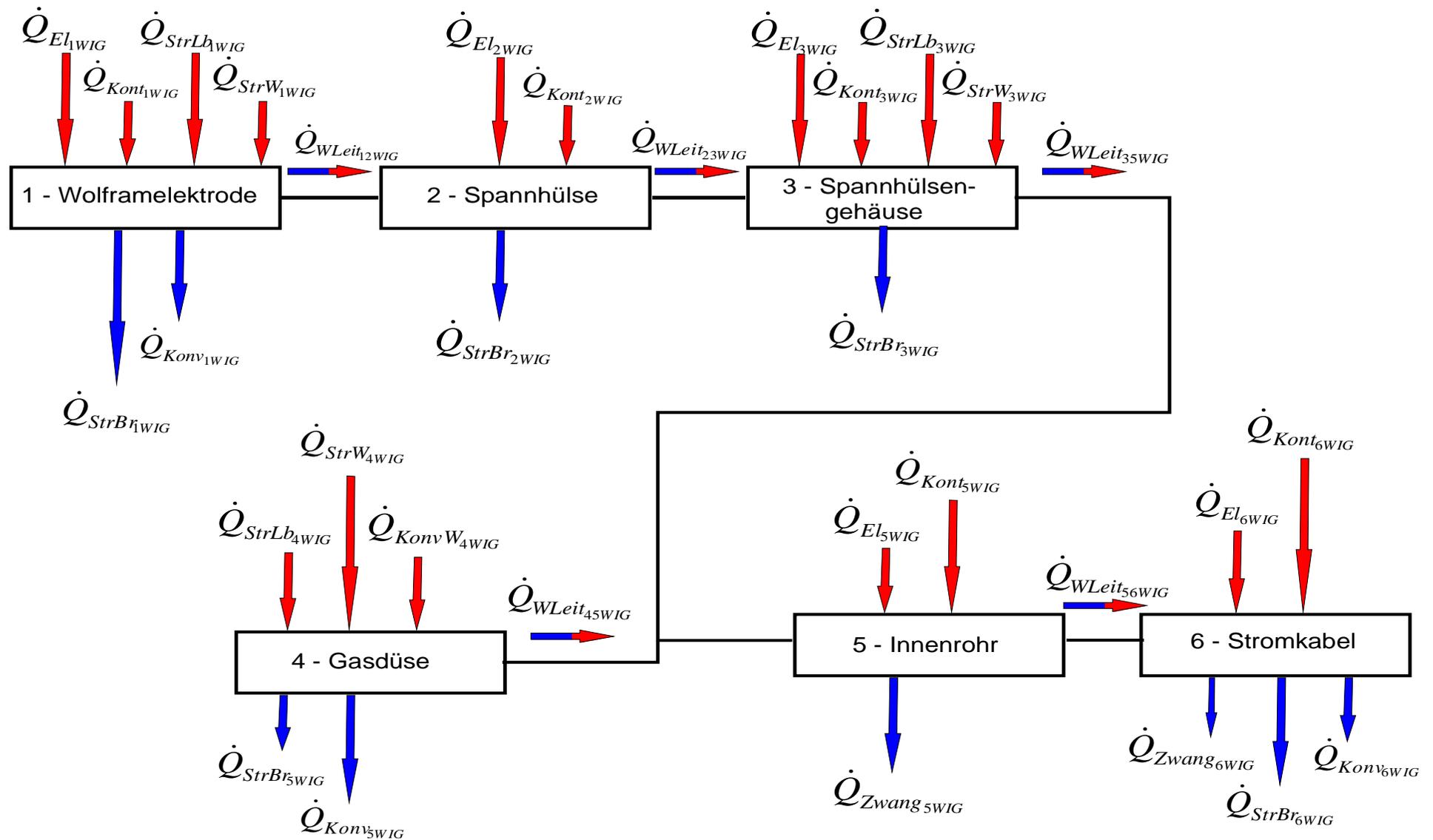


Bild 12: Schema der Wärmeströme in den Hauptelementen eines WIG-Brenners

## 4 Methoden zur Durchführung theoretischer und praktischer Untersuchungen

Die im Rahmen der vorgelegten Arbeit geplanten und durchgeführten Untersuchungen sollen dazu dienen, den Einfluss zweier Faktoren: der konstruktiven Gestaltung des Brenners und der Parameter der Zwangskühlung auf das Niveau der thermischen Belastung des Brenners zu erörtern und anhand der Zusammenhänge, die aus diesen Untersuchungen ermittelt werden, zu beschreiben. Grundsätzlich werden für alle geplanten praktischen und theoretischen Untersuchungen typische Vertreter der MSG-Schweißbrennern ( in größten Stückzahlen auf den europäischen Markt vertreten) ausgewählt.

### 4.1 Planung der praktischen Untersuchungen, um den Zusammenhang zwischen konstruktivem Aufbau des selbstgekühlten Brenners und dem zulässigen Niveau der thermischen Belastung zu klären. Auswahl relevanter Brennerkonstruktionsreihen

Die erste Untersuchungsreihe beinhaltet die Analyse sinnvoller Varianten der konstruktiven Ausstattung des Brenners und praktische Experimente mit entsprechenden Baumustern im realen Schweißprozess, um den quantitativen Einfluss vorgenommener Änderungen der Bauteilen, bzw. Baugruppen des Brenners auf seine thermische Belastung anhand der gemessenen Temperaturen zu ermitteln.

Diese Untersuchungsreihe wird unterteilt nach zwei Klassen der MSG-Schweißbrennern. Zur ersten Klasse, die untersucht wird, gehören selbstgekühlte MSG-Schweißbrenner. Für die Kühlung dieser Brenner während des Schweißbetriebes sind folgende im Kapitel 3.3.2. beschriebene physikalischen Prozesse der Wärmeübertragung relevant:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Strahlung

Wie diese physikalischen Prozesse durch den konstruktiven Aufbau des Brenners, die Form, die Abmessungen und die Werkstoffart der einzelnen Bauelementen der zu untersuchenden Werkzeuge beeinflusst werden, kann man nur durch praktische Experimente ermitteln. Für diese Versuchsreihe wurden folgende typische Vertreter der selbstgekühlten MSG-Schweißbrenner ausgewählt (**Tabelle 10**) .

**Tabelle 10:** Typische Vertreter von selbstgekühlten MSG-Schweißbrenner

Lfd. Nr.	Brenner	Belastbarkeit, A bei Mischgas	Belastbarkeit, A bei CO <sub>2</sub>	Einschaltdauer, ED %
1	Typ 150	150	180	60
2	Typ 360	320	340	60
3	Typ 6L	350	380	60

Diese Wahl wurde nach folgenden Prinzipien getroffen:

- Es soll möglichst der gesamte Stromstärkebereich abgedeckt sein, in dem selbstgekühlte MSG-Schweißbrenner eingesetzt werden. Dabei handelt es sich um mehrere Konstruktionen, die jeweils für einen bestimmten max. Stromstärkebereich vorgesehen sind.
- Für einen bestimmten Stromstärkebereich wurde der Brenner ausgewählt, dessen Konstruktionsart am häufigsten in der Praxis und bei brennerherstellenden Firmen in Europa anzutreffen ist.

Jeder Brennertyp besteht aus mehreren Bauelementen und Baugruppen. Prinzipiell könnte man an jeder Baugruppe bzw. jedem Bauteil Änderungen hinsichtlich der Konstruktion, Form und Werkstoffart vornehmen und die sich daraus ergebenden Einflüsse auf die thermische Belastung des gesamten Brenners ermitteln. Sinnvoller erscheint für die Vorgehensweise bei der Versuchsplanung jedoch folgendes: um die gegenseitige Beeinflussung mehrerer an einem Brennertyp vorgenommener Änderungen auszuschließen, wird für jeden ausgewählten typischen Vertreter (Brennertyp) nur eine Änderungsmaßnahme vorgesehen. Dies erlaubt viel präziser bei der Durchführung von Testschweißungen den Einfluss jeder einzelnen konstruktiven Änderung hinsichtlich der thermischen Belastung des Brenners zu definieren. Eine ausreichende Anzahl für die Untersuchung ausgewählter Brennerkonstruktionen erlaubt es fast alle möglichen Varianten der Ausstattung in das Versuchsprogramm einzubeziehen und am Ende bezüglich jeder konstruktiven Variante und des jeweils entsprechenden Niveaus der thermischen Belastung eine qualitative und quantitative Aussage zu treffen.

Für die Untersuchungen sind generell folgende Änderungen in der Brennerkonstruktion interessant:

- Brennerhals aus Stahl (St37.4 NBK, W.Nr.: 1.0255) und aus Messing (Ms 60, CuZn38Pb2, W.Nr.: 2.0371.10)
- Außenrohr aus Stahl (St37.4 NBK, W.Nr.: 1.0255) und aus Messing (Ms 60, CuZn38Pb2, W.Nr.: 2.0371.10)

- Düsenstock aus Kupfer ( W.Nr.: 2.0060.32) und aus Messing (Ms 60, CuZn38Pb2, W.Nr.: 2.0371.10)

Die folgende **Tabelle 11** zeigt, wie die zu untersuchende Gestaltungsvarianten auf die Brennertypen verteilt werden:

**Tabelle 11:** Gestaltungsvarianten typischer Vertreter der selbstgekühlten MSG-Schweißbrenner

NN	Brenner	Konstruktive Varianten	
1	Typ 150	Brennerhals aus Stahl (St37.4 NBK, W.Nr.: 1.0255)	Brennerhals aus Messing (Ms 60, CuZn38Pb2, W.Nr.: 2.0371.10)
2	Typ 360	Außenrohr aus Stahl (St37.4 NBK, W.Nr.: 1.0255)	Außenrohr aus Messing (Ms 60, CuZn38Pb2, W.Nr.: 2.0371.10)
3	Typ 6L	Außenrohr aus Stahl mit großdimensionierten Kühlrippen (St37.4 NBK, W.Nr.: 1.0255)	Außenrohr aus Messing mit großdimensionierten Kühlrippen (Ms 60, CuZn38Pb2, W.Nr.: 2.0371.10)
4	Typ 6L	Düsenstock aus Kupfer ( W.Nr.: 2.0060.32)	Düsenstock aus Messing (Ms 60, CuZn38Pb2, W.Nr.: 2.0371.10)

Mit jedem einzelnen Brennertyp sind Versuche geplant. Die Versuchsplanung beinhaltet dabei den Versuchstitel, die Zielstellung, die Beschreibung der Einstellparameter und die zu untersuchenden Brennermuster sowie die Beschreibung der Anordnung und der Anzahl der Messpunkte für die Temperaturmessungen. Für jeden einzelnen Brennertyp ist in den Titelblätter für jede Versuchsreihe von 1 bis 4 (**s. Anlage**) die detaillierte Versuchsplanung angegeben.

Nach diesem Planungsschemata werden alle Versuchsreihen am Brennerprüfstand durchgeführt und der detaillierte Ablauf sowie die Ergebnisse der Experimente in der Anlage dieser Arbeit beigefügt.

#### 4.2 Planung der praktischen Untersuchungen zur Klärung des Zusammenhangs zwischen dem konstruktiven Aufbau des zwangsgekühlten Brenners und dem zulässigen Niveau der thermischen Belastung. Auswahl der relevanten Brennerkonstruktionsreihen

Zur zweiten Klasse von Brennern gehören MSG-Schweißbrenner mit Zwangskühlung. Der gesamte thermische Zustand solcher Brenner wird durch den Verlauf folgender im Kapitel 3.3.2. beschriebener physikalischer Prozesse bestimmt:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Strahlung
- Erzwungene Konvektion in den Kühlkanälen des Brenners [durch den Wasserfluss ( Faktor 1 ) und durch den Schutzgasfluss ( Faktor 2 )].

Neben den für die erste Klasse relevanten Faktoren der konstruktiven Gestaltung kommt hier ein anderer Faktor ins Spiel, der einen enormen Einfluss auf das Niveau der thermischen Belastung eines zwangsgekühlten Lichtbogenschweißbrenner hat, die Parameter der Zwangskühlung. Diese beiden Hauptfaktoren müssen für den Fall des zwangsgekühlten MSG-Schweißbrenner separat und nach verschiedener Vorgehensweise betrachtet werden.

Zuerst wird für den zwangsgekühlten Brenner wie auch für den selbstgekühlten durch die praktischen Experimente der Einfluss der konstruktiven Gestaltung auf das Niveau der thermischen Belastung untersucht. Für diese Zwecke sind folgende typischen Vertreter der flüssiggekühlten Brenner ausgewählt worden (**Tabelle 12**):

**Tabelle 12:** Typische Vertreter zwangsgekühlter Brenner

Lfd. Nr.	Brenner	Belastbarkeit, A bei Mischgas	Belastbarkeit, A bei CO <sub>2</sub>	Einschaltdauer, ED %
1	Typ 5W	280	315	100
2	Typ "Everest"	280	315	100
3	Typ 7W	450	500	100
4	Typ 9W	500	560	100
5	Typ 9W Rob	450	500	100

Die Auswahlkriterien waren die gleichen wie bei den selbstgekühlten Brennern.

In erste Linie ist die Untersuchung folgenden Änderungen in der Brennerkonstruktion interessant:

- Stromdüse einschraubbar/Stromdüse einklemmbar. Damit soll die Vermutung, dass aus einer einklemmbaren Stromdüse die Wärme besser in den Düsenstock als aus einer einschraubbare Stromdüse abgeleitet wird, geprüft werden
- Einkreisgekühlt / Zweikreisgekühlt / Dreikreisgekühlt. Es soll die Angaben hinsichtlich der Einwirkung der konstruktiven Gestaltung der Kühlkanäle auf der Temperatur der thermisch belasteten Brennerbauelementen liefern.
- Düsenträger aus Kupfer ( W.Nr.: 2.0060.32)/ Düsenträgeraufsatz aus Messing (Ms 59, CuZn35Ni2, W.Nr.: 2.0540.31)/ Düsenträger aus Messing (Ms 59, CuZn35Ni2, W.Nr.: 2.0540.31). Düsenträger aus Kupfer hat unzureichenden mechanischen Verschleißwiderstand bei dem öfteren Wechseln der Gasdüse. Den Versuch soll Information geben welcher aus drei möglichen Gestaltungsvarianten neben den ausreichenden mechanischen Eigenschaften gute wärmetechnische Bedingungen für die Wärmeableitung aus der Gasdüse ins Außenrohr über den Gasdüsenträger bzw. Gasdüsenträgeraufsatz bietet.

In **Tabelle 13** sind die zu untersuchenden Gestaltungsvarianten für die jeweiligen Brennertypen zusammengestellt:

**Tabelle 13:** Gestaltungsvarianten typischen Vertreter der zwangsgekühlten Brenner

Lfd. Nr.	Brenner	Konstruktive Varianten		
1	Typ 5W	Einkreisgekühlt, Stromdüse einschraubbar		
2	Typ "Everest"	Einkreisgekühlt, Stromdüse einklemmbar		
3	Typ 7W	Zweikreisgekühlt		
4	Typ 9W	Zweikreisgekühlt (bzw. Dreikreisgekühlt)		
5	Typ 9W Rob	Zweikreisgekühlt, Düsenträger aus Kupfer ( <u>W.Nr.: 2.0060.32</u> )	Zweikreisgekühlt, Düsenträgeraufsatz aus Messing ( <u>Ms 59, CuZn35Ni2, W.Nr.: 2.0540.31</u> )/	Zweikreisgekühlt, Düsenträger aus Messing ( <u>Ms 59, CuZn35Ni2, W.Nr.: 2.0540.31</u> )/

### **4.3 Planung der Untersuchungen zur Optimierung der Flüssigkeitskühlung**

Die zweite Reihe der in der vorgelegten Arbeit durchgeführten Experimente beinhaltet die Untersuchungen des Einflusses der Parametern der Zwangskühlung auf die Temperatur der Brennerbauelementen. Bei der Untersuchung des Einflusses der Parameter der Zwangskühlung auf die Temperatur der einzelnen Bauelementen des Brenners wurde anders vorgegangen als bei der Untersuchung des Einflusses der konstruktiven Gestaltung. Hier wurden zuerst theoretische Überlegungen und mathematische Berechnungen durchgeführt, um eine Zielrichtung bei der Optimierung der Zwangskühlung zu bestimmen und dann anhand der praktischen Experimente zuerst mit einem Brennermodell und erst danach mit einem realen Brenner die Ergebnisse zu überprüfen.

Basierend auf den theoretischen Betrachtungen wird ein mathematisches Model zur Berechnung der Zwangskühlung erstellt.

Unter Benutzung dieses Modells wird separat die Effektivität der Zwangskühlung bei Verwendung verschiedener Kühlmedien berechnet.

Auf der Basis dieser theoretischen Berechnungen soll eine Entscheidung für die weitere Optimierung der Zwangskühlung getroffen werden.

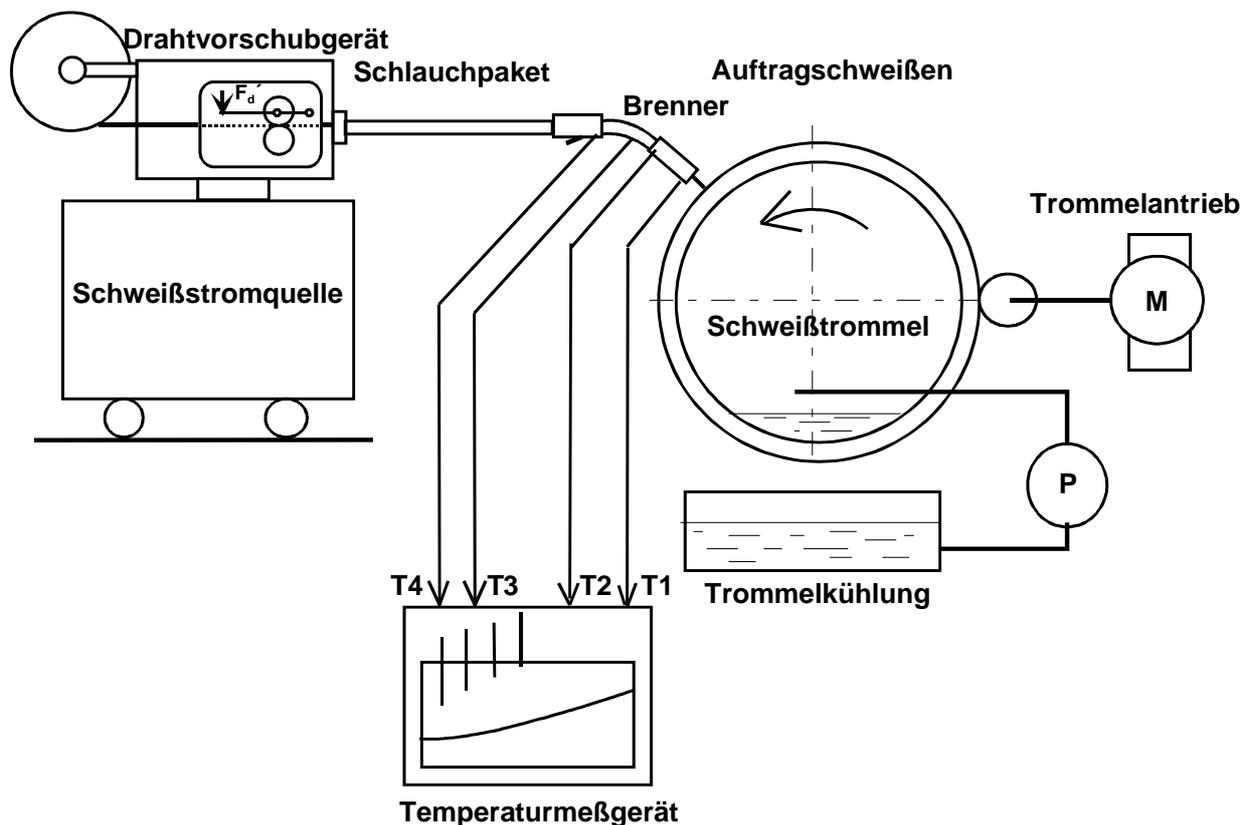
Danach soll ein praktisches Experiment mit dem Brennermodell erfolgen, um die theoretischen Schlussfolgerungen über den Einfluss der Parametern der Zwangskühlung auf die vom Kühlmedium aus dem Brenner aufgenommene Wärmemenge zu bestätigen.

Die Versuchsreihe mit dem realen zwangsgekühlten MSG-Lichtbogenschweißbrenner soll zeigen, wie groß der Einfluss der Parameter der Zwangskühlung auf die gesamte Temperaturbilanz des Brenners unter realen Schweißbedingungen ist.

## 5 Praktische Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der konstruktiven Gestaltung des Brenners sowie dessen einzelner Bauelemente auf das Niveau der zulässigen thermischen Belastung

### 5.1 Aufbau des Prüfstandes und entsprechender Prüfvorrichtungen für die Durchführung der praktischen Versuche

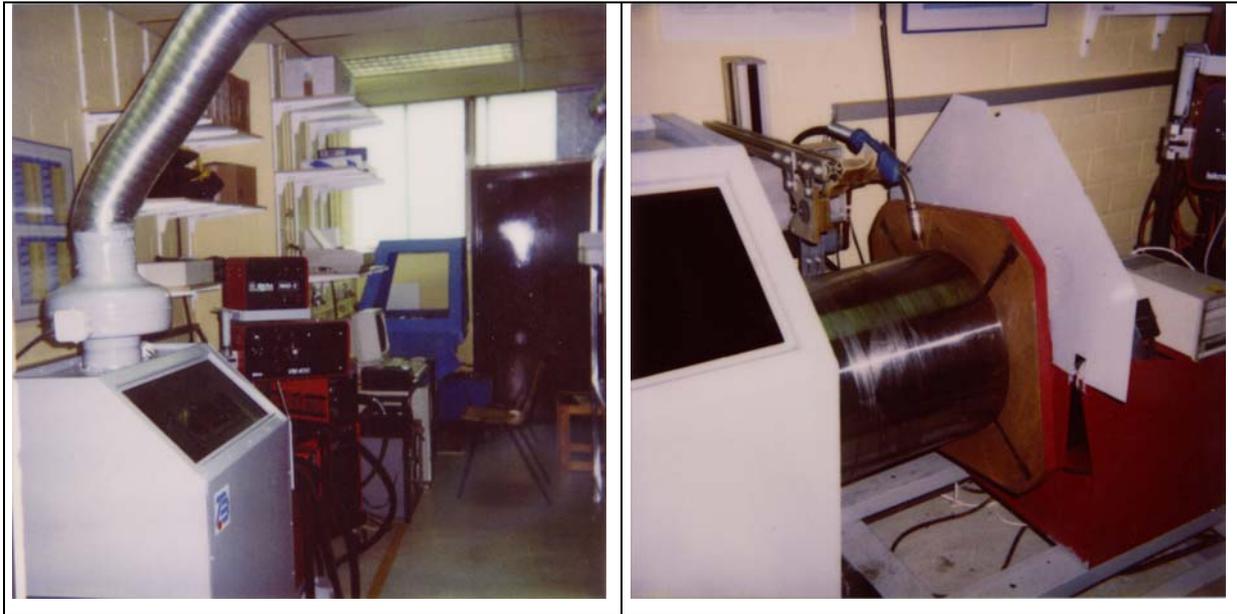
Die Versuchseinrichtung (**Bild 13, 14**) für die Temperaturmessungen am Brenner wurde entsprechend den Anforderungen nach DIN EN 60974-7 gebaut. Sie besteht aus einer Schweißstromquelle der Fa. „Kemppi“, die Stromstärken bis zu 500 A zulässt, und einem Drahtvorschubgerät, mit dem der Brenner über einen Zentralanschluss verbunden ist. Die Schweißungen erfolgen als Auftragsschweißungen auf ein dickwandiges Stahlrohr (Stahl S235), das auf einem Drehmanipulator waagrecht befestigt ist. Der auf einem Schlitten montierte Brenner wird parallel zum Rohr über einen Vorschubantrieb verfahren.



**Bild 13:** Schema der Versuchseinrichtung für die Temperaturmessungen am Brenner entsprechend den Anforderungen in DIN EN 60974-7

Sowohl die der Drehzahl des Rohres proportionale Schweißgeschwindigkeit als auch die Vorschubgeschwindigkeit des Brenners sind geregelt und stufenlos einstellbar. Das Rohr wird mit einem Kühlwasserdurchsatz mit Hilfe einer Pumpe aus einem Vorratsbehälter von 50 l Inhalt durchströmt. Als Strahlungs- und Rauchschutz dient eine über das Rohr

verfahrbare Haube mit Absaugeinrichtung. Je nach getestetem Brennertyp wird Drahtelektrode G3 Si1 nach DIN EN 440 mit einem Durchmesser von 1,0 mm bzw. 1,2 mm verwendet. Als Schutzgas dient ein Gemisch aus 82% Ar und 18% CO<sub>2</sub> (M 21 nach DIN EN 439). Die Messwerte von Strom und Spannung werden von der Schweißstromquelle abgelesen; die Temperaturen im getesteten Brenner auf einem Vier-Kanal-Kompensationsschreiber „Sensycom“ der Fa. „Hartman und Braun“ aufgezeichnet. Zur Messung der Temperaturen werden je nach Bedarf an Stromdüse, Gasdüse, Gasdüsesitz, Brennerhals oder Griffschale Thermoelemente angebracht.



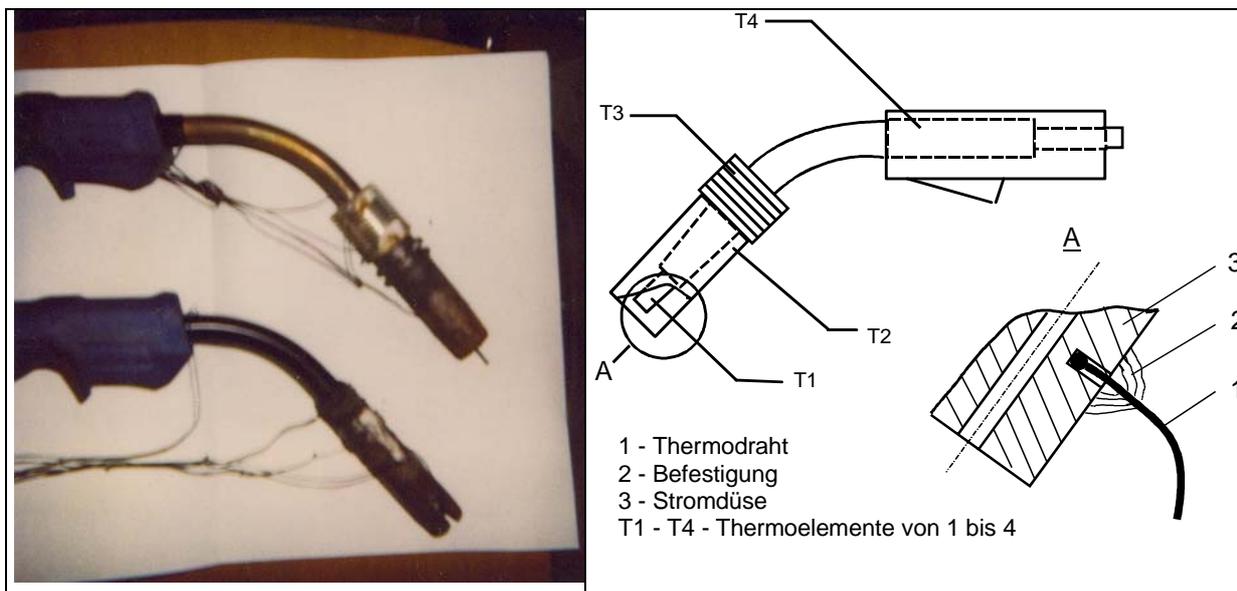
**Bild 14:** Versuchseinrichtung für die Temperaturmessungen am Brenner nach Anforderungen der DIN EN 60974-7

Der Abstand zwischen Brenner und Schweißtrommel wird mittels einer Lehre eingestellt. Durch sorgfältiges Ausrichten der Brennerschlittenführung und Verwendung eines bearbeiteten Rohres, konnten die Abstandschwankungen auf etwa  $\pm 0,2$  mm beschränkt werden. Außerdem ist der Versuchsstand mit einem berührungslos arbeitendes Wegmeßsystem in Verbindung mit einem Abstandsregelkreis ausgestattet.

Obwohl Strom und Spannung im wesentlichen den jeweiligen Betriebspunkt beim Schweißen beschreiben, erschien es zweckmäßig, zusätzlich die Drahtvorschubgeschwindigkeit zu registrieren. Damit war es möglich, einmal die erbrachte Schweißleistung (kg Schweißgut pro Zeiteinheit) direkt zu ermitteln, zum anderen den gewünschten Betriebspunkt durch Vorwahl der Spannung und der Drahtvorschubgeschwindigkeit vor Versuchsbeginn einzustellen und somit eine bessere Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu erzielen.

Bei der Ausbildung und Anbringung der Thermoelemente muss eine Reihe von Gesichtspunkten berücksichtigt werden [69]. Zum einen durften am Brenner nur geringfügige

Änderungen vorgenommen werden, da sich durch zusätzliche Befestigungsvorrichtungen für die Thermoelemente oder durch nennenswerte Aussparungen und Bohrungen die Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe ändern und damit die Messwerte erheblich verfälscht werden. Zum anderen muss eine gute Wärmeleitung zwischen Grundkörper und Thermoelement sichergestellt sein, da dieses bekanntlich nur seine Eigentemperatur wiedergibt. Außerdem sind die Zuleitungen so geschützt zu verlegen, dass sie nicht der Strahlung und den Schweißspritzern ausgesetzt sind. Ferner sollten Gas- und Stromkontaktdüse demontierbar sein, ohne die Gefahr einer Beschädigung der Thermoelemente oder ihrer Zuleitungen. Die Thermoelemente sollten aus wirtschaftlichen Gründen leicht herstellbar und einfach anzubringen sein.



**Bild 15:** Befestigung der Thermoelemente am Brenner

Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Temperaturmessungen wurden die einzelnen Thermoelemente aus isolierter Meterware angefertigt, was im Vergleich zu fertigen Mantelthermoelementen kostengünstiger ist und zudem eine größere Flexibilität bei der Gestaltung ermöglicht. Angewendet wird ein Draht von jeweils 0,2 mm Durchmesser nach DIN 4371 aus Nickel-Chrom und Nickel, der bis zu Temperaturen von ca. 1300 °C eingesetzt werden kann. Zur Anfertigung der Thermoelemente wurde die Isolation der Meterware teilweise entfernt, die blanken Drähte an den Enden verdreht und anschließend verschweißt. Aus Gründen des besseren Wärmeübergangs und des Schutzes vor Schweißspritzern wurden die Thermoelemente ausschließlich in Bohrungen untergebracht und mit Hilfe einer speziellen keramischen Paste verklebt (**Bild 15**).

## 5.2 Diskussion der Versuchsergebnisse

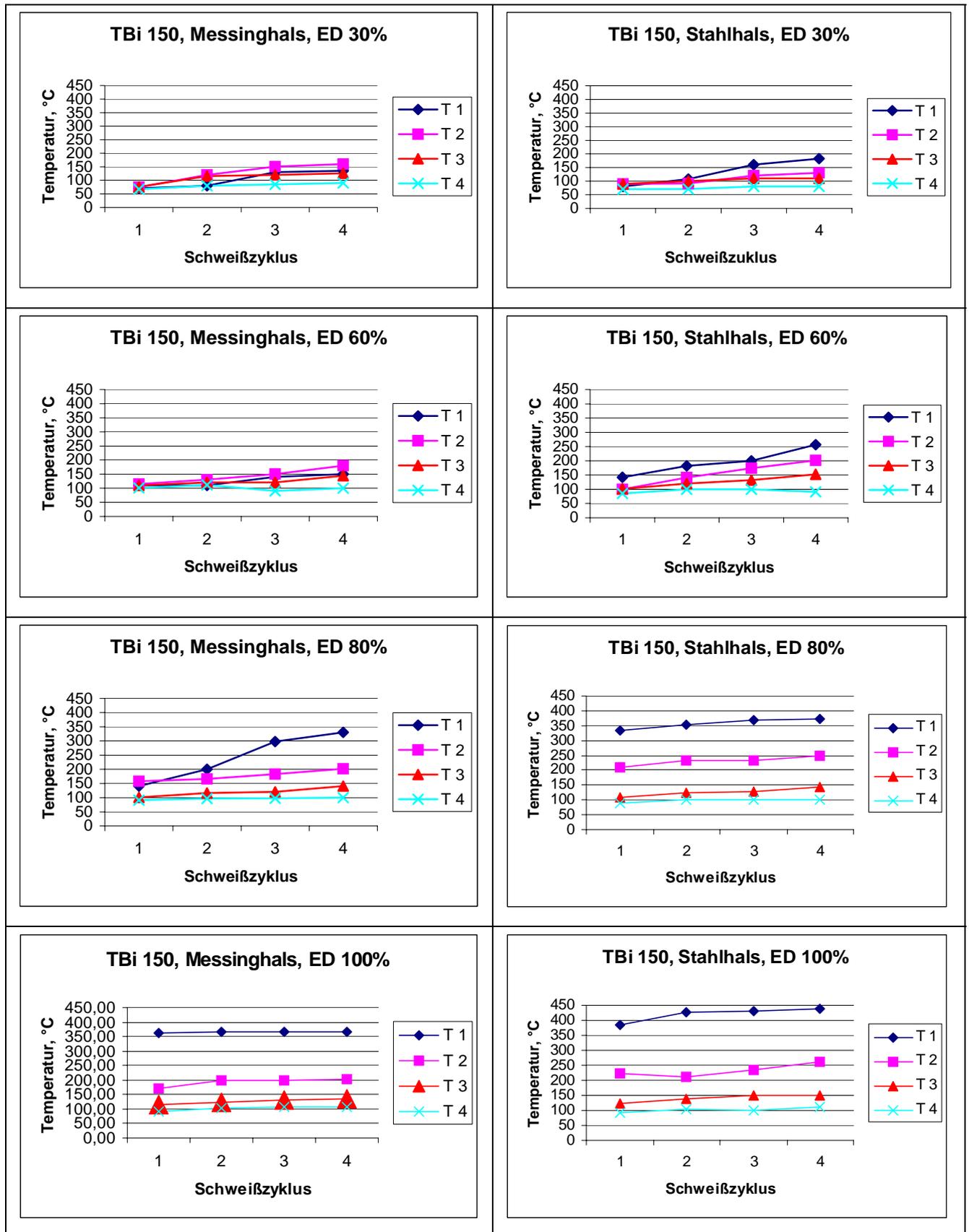
### Ergebnisse des Vergleichs der Brenner vom Typ 150 mit dem Brennerhals aus Stahl und aus Messing.

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Erwärmungsdynamik zwischen dem Brennerhals Typ 150 aus Messing und im Brennerhals Typ 150 aus Stahl (**Bild 16**) erlaubt folgende Schlussfolgerungen:

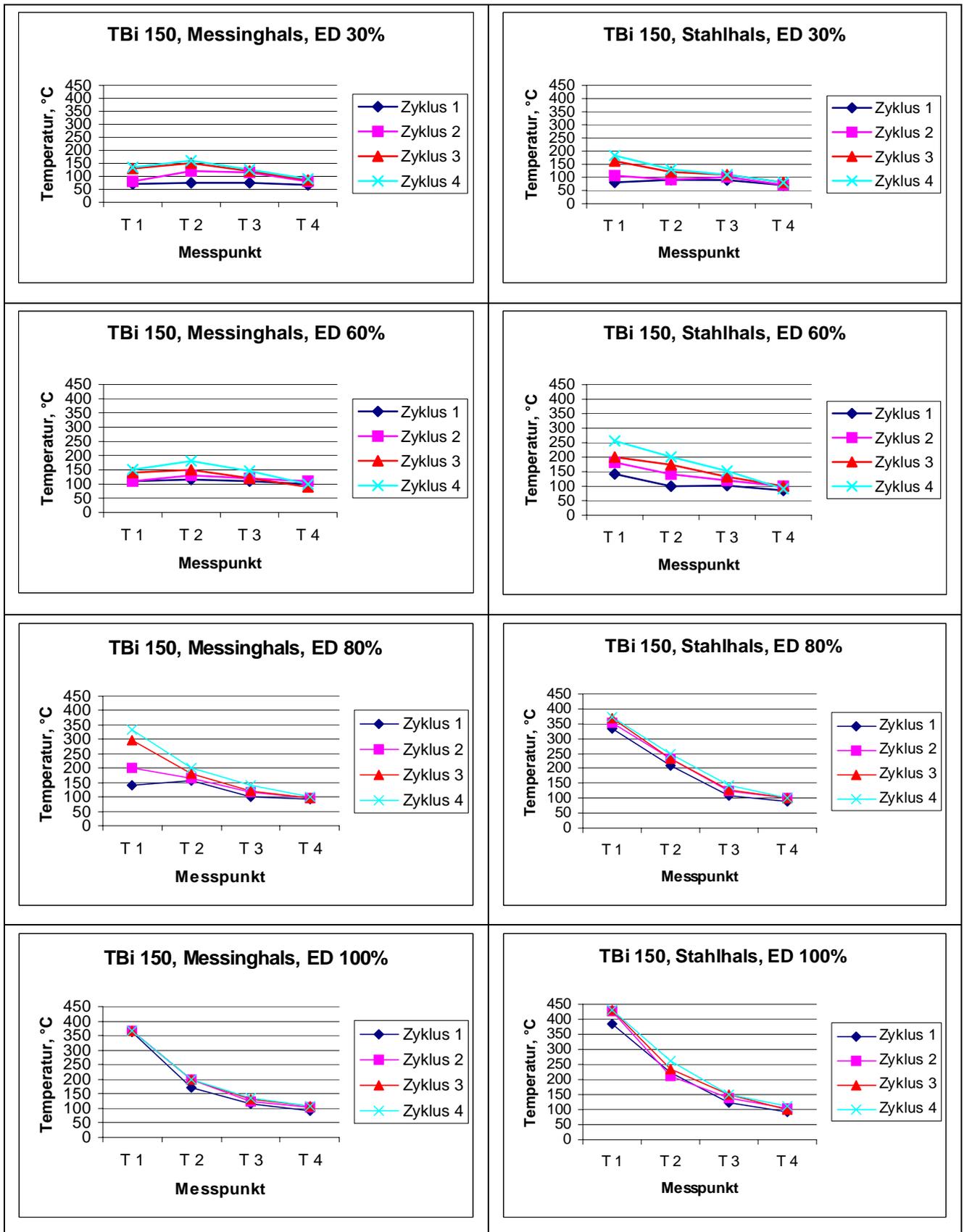
- Im Brennerhals Typ 150 aus Stahl (rechte Reihe der Diagramme) werden die maximalen Temperaturen in allen Messpunkten bei der Einschaltdauer 80% nach dem zweiten Schweißzyklus erreicht.
- Im Brennerhals Typ 150 aus Messing (linke Reihe der Diagramme) werden dagegen die maximalen Temperaturen in alle Messpunkten erst bei der Einschaltdauer 100% nach dem zweiten Schweißzyklus erreicht.
- Die maximalen Temperaturen bei der Einschaltdauer 100% im Brennerhals aus Stahl sind wegen der geringeren Wärmeleitfähigkeit höher als im Brennerhals aus Messing: die Stromdüse (T1) ist um 70°C wärmer (437°C gegenüber 367°C); der Gasdüsensitz (T2) ist um 57°C wärmer (260°C gegenüber 203°C); die Mitte des Halses (T3) ist um 17°C wärmer (150°C gegenüber 134°C) und das Ende des Halses (T4) ist um 4°C wärmer (111°C gegenüber 107°C).

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Messing und im Brennerhals Typ 150 aus Stahl (**Bild 17**) erlaubt folgende Rückschlüsse:

- Im Brennerhals Typ 150 aus Messing (linke Reihe der Diagramme) erkennt man im Messpunkt (T2) Gasdüsensitz einen charakteristischen Knick  $T2 > T1$ . Dass der Gasdüsensitz (T2) wärmer als die Stromdüse (T1) ist, wird durch das Zusammentreffen zweier Wärmeströme (aus der Stromdüse und aus der Gasdüse) in diesem Punkt verursacht. Die Wärmeleitfähigkeit des Messingrohrs ist ausreichend, um einen Stau der Wärme aus der Stromdüse zu verhindern; deswegen ist  $T1 < T2$ .
- Im Brennerhals Typ 150 aus Stahl staut sich wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Stahls der Wärmefluss aus der Stromdüse vor dem Eingang in den Brennerhals und die Stromdüsentemperatur T1 ist immer höher als T2.



**Bild 16:** Vergleich der Erwärmungsdynamik zwischen dem Brennerhals Typ 150 aus Messing und dem Brennerhals Typ 150 aus Stahl



**Bild 17:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Messing und im Brennerhals Typ 150 aus Stahl

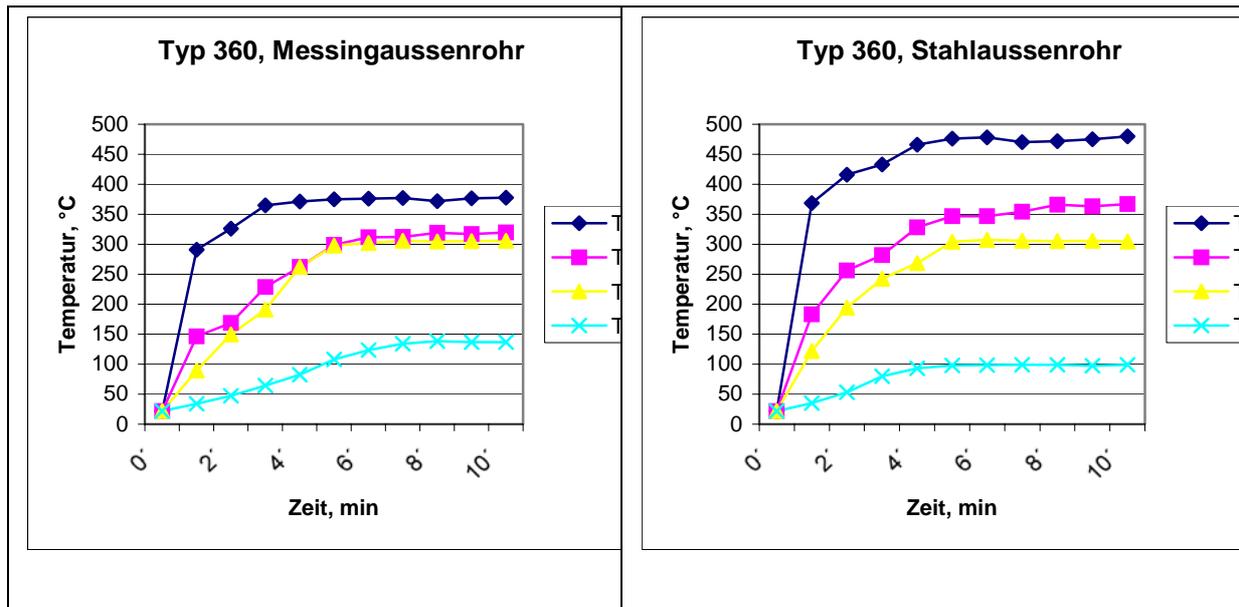
### **Ergebnisse des Vergleichs der Brenner vom Typ 360 mit dem Außenrohr aus Stahl und aus Messing.**

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 360 mit Außenrohr aus Messing und im Brenner Typ 360 mit Außenrohr aus Stahl (**Bild 18**) erlaubt folgende Rückschlüsse:

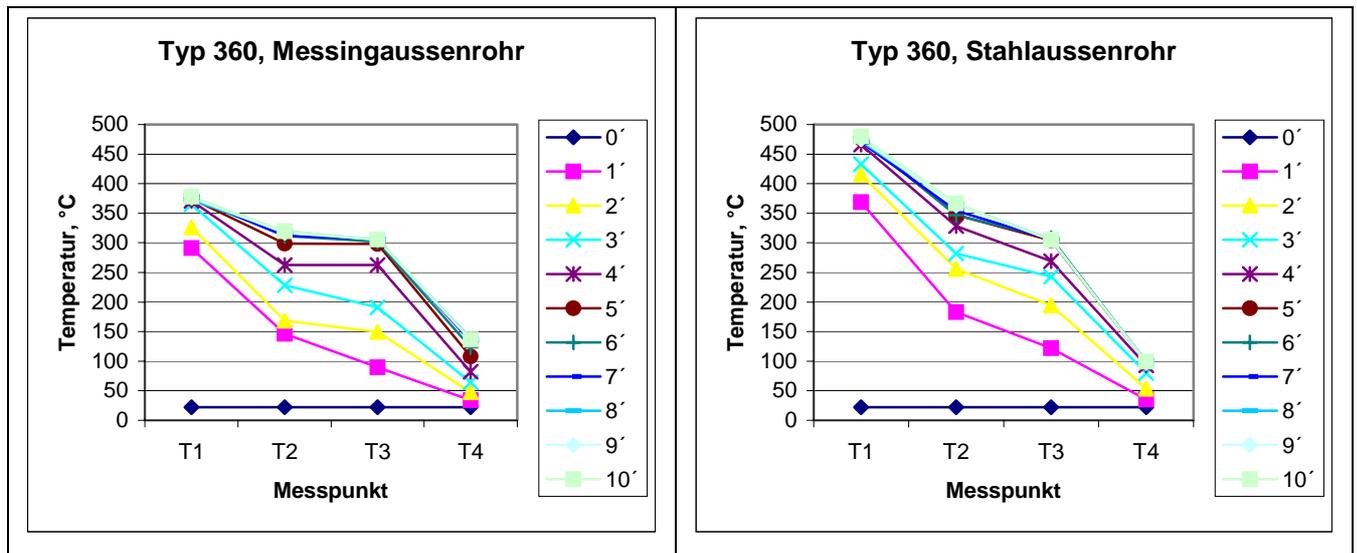
- Die Stromdüse und die Gasdüse des Brenners Typ 360 mit dem Außenrohr aus Stahl erwärmen sich schneller als die gleichen Bauelemente des Brenners Typ 360 mit dem Außenrohr aus Messing. Der Kühlkörper hat wegen seiner geringen Abmessungen keine besondere Wirkung auf den Wärmeabtransport.
- Dagegen steigt die Temperatur am Ende des Brennerhalses des Brenners Typ 360 mit dem Außenrohr aus Stahl wesentlich langsamer an als beim Brenner mit Messingaußenrohr.

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Temperaturverteilung im Brenner Typ 360 mit Außenrohr aus Messing und im Brenner Typ 360 mit Außenrohr aus Stahl (**Bild 19**) lässt folgendes erkennen:

- Im Brenner Typ 360 mit dem Außenrohr aus Stahl staut sich die Wärme im vorderen Bereich des Brenners wegen der schlechteren Wärmeleitfähigkeit des Stahls. Die maximalen Temperaturen im Brenner Typ 360 mit dem Außenrohr aus Stahl sind höher als die in dem gleichen Brenner mit dem Außenrohr aus Messing: die Stromdüse (T1) ist um fast 100°C wärmer (479,8°C gegenüber 377,8°C); die Gasdüse (T2) ist um ca. 50 °C wärmer (366,8°C gegenüber 319,6°C), was sich sehr negativ auf die Standzeit dieser Bauelementen auswirkt.
- Im Gegensatz dazu ist die Temperatur am Ende des Brennerhalses (T4) wegen schlechteren Wärmeleitfähigkeit des Stahls um fast 40°C geringer als beim Brenner mit Messingaußenrohr ( 99,2°C gegenüber 136,8°C), was als positiv für die Begrenzung der thermischen Belastung des Brennergriffes und der Hand des Schweißers angesehen werden kann.



**Bild 18:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 360 mit einem Außenrohr aus Messing und im Brenner Typ 360 mit einem Außenrohr aus Stahl



**Bild 19:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 360 mit einem Außenrohr aus Messing und im Brenner Typ 360 mit einem Außenrohr aus Stahl

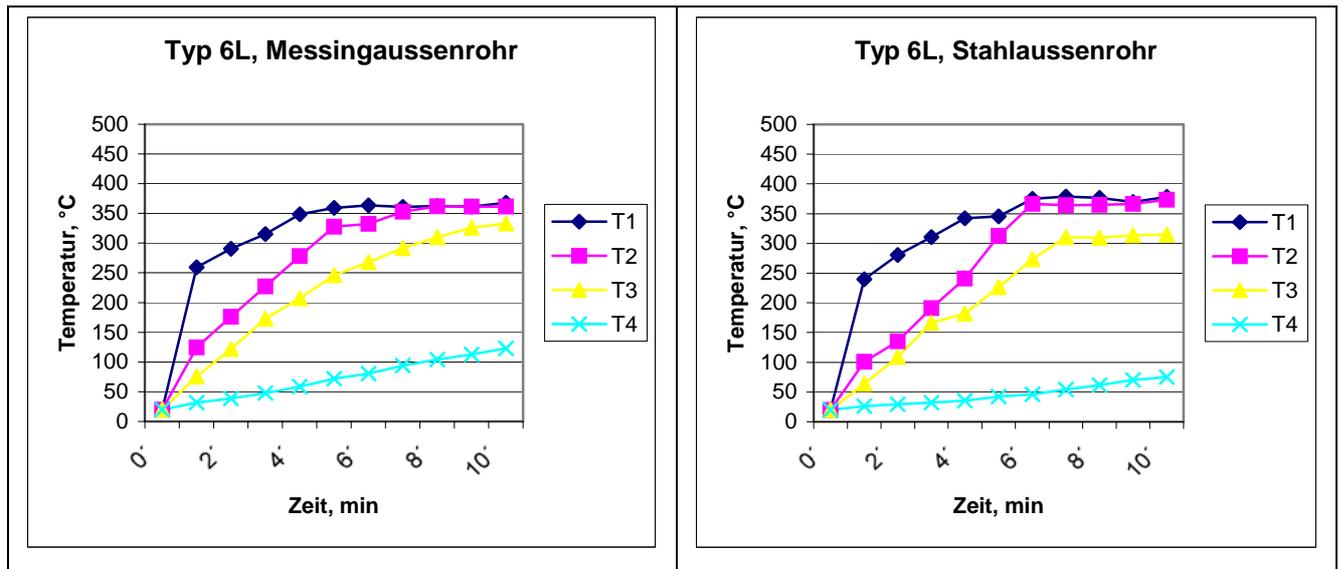
## **Ergebnisse des Vergleichs der Brenner vom Typ 6L mit Außenrohren aus Stahl bzw. aus Messing.**

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 6L mit einem Außenrohr aus Messing und im Brenner Typ 6L mit einem Außenrohr aus Stahl (**Bild 20**) erlaubt folgende Rückschlüsse:

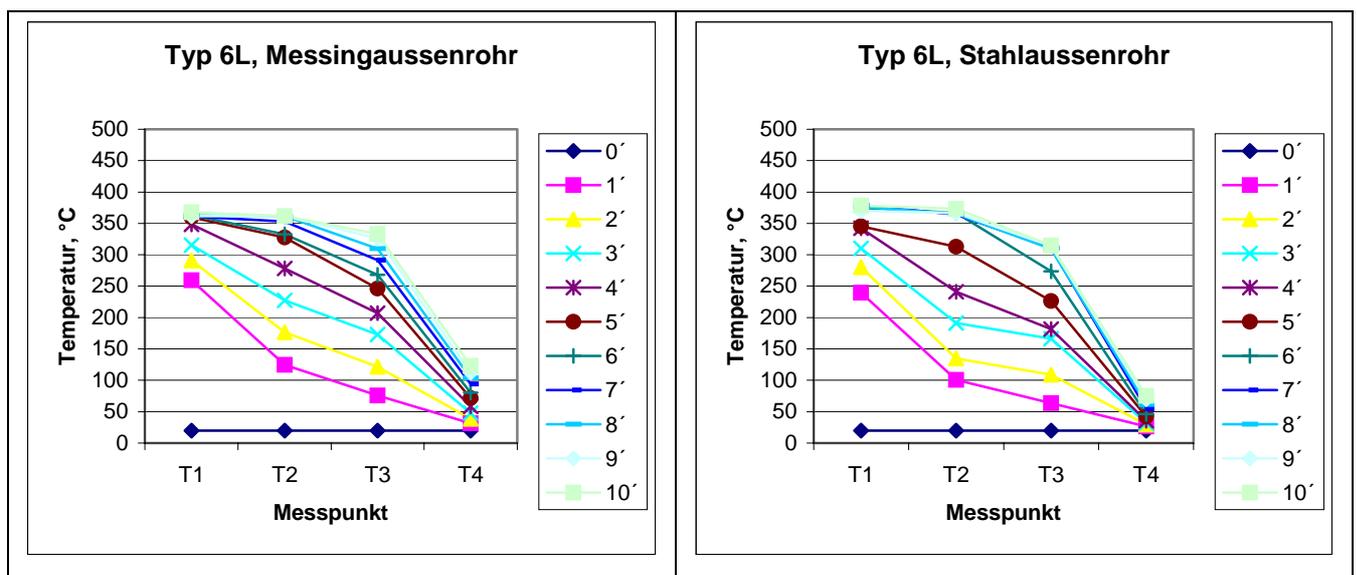
- Die Stromdüse und die Gasdüse des Brenners Typ 6L mit dem Außenrohr aus Stahl erwärmen sich fast genau so wie die gleichen Bauelemente des Brenners Typ 6L mit dem Außenrohr aus Messing. Der groß dimensionierten Kühlkörper hat eine starke Wirkung auf den Wärmeabtransport und kompensiert die schlechte Wärmeleitfähigkeit des Außenrohrs.
- Die Temperatur am Ende des Brennerhalses des Brenner Typ 6L mit dem Außenrohr aus Stahl steigt wesentlich langsamer an als beim Brenner mit Messingaußenrohr.

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Temperaturverteilung im Brenner Typ 6L mit einem Außenrohr aus Messing und im Brenner Typ 6L mit einem Außenrohr aus Stahl (**Bild 21**) erlaubt folgende Schlussfolgerungen:

- Im Brenner Typ 6L mit dem Außenrohr aus Stahl staut sich die Wärme nicht im vorderen Bereich des Brenners trotz der schlechteren Wärmeleitfähigkeit des Stahls, sondern wird durch den groß dimensionierten Kühlkörper (T3) in die Umgebung abgeleitet. Die maximalen Temperaturen im Brenner Typ 6L mit dem Außenrohr aus Stahl sind fast gleich wie im gleichen Brenner mit dem Außenrohr aus Messing.
- Im Gegensatz dazu ist die Temperatur des Endes des Brennerhalses (T4) wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Stahls und der guten Wirkung des Kühlkörpers um fast 40°C geringer als beim Brenner mit Messingaußenrohr ( 75,2°C gegenüber 123,2°C), was ebenfalls positiv für die Begrenzung der thermischen Belastung des Brennergriffes und der Hand des Schweißers ist.



**Bild 20:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 6L mit einem Außenrohr aus Messing und im Brenner Typ 6L mit einem Außenrohr aus Stahl



**Bild 21:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 6L mit einem Außenrohr aus Messing und im Brenner Typ 6L mit einem Außenrohr aus Stahl

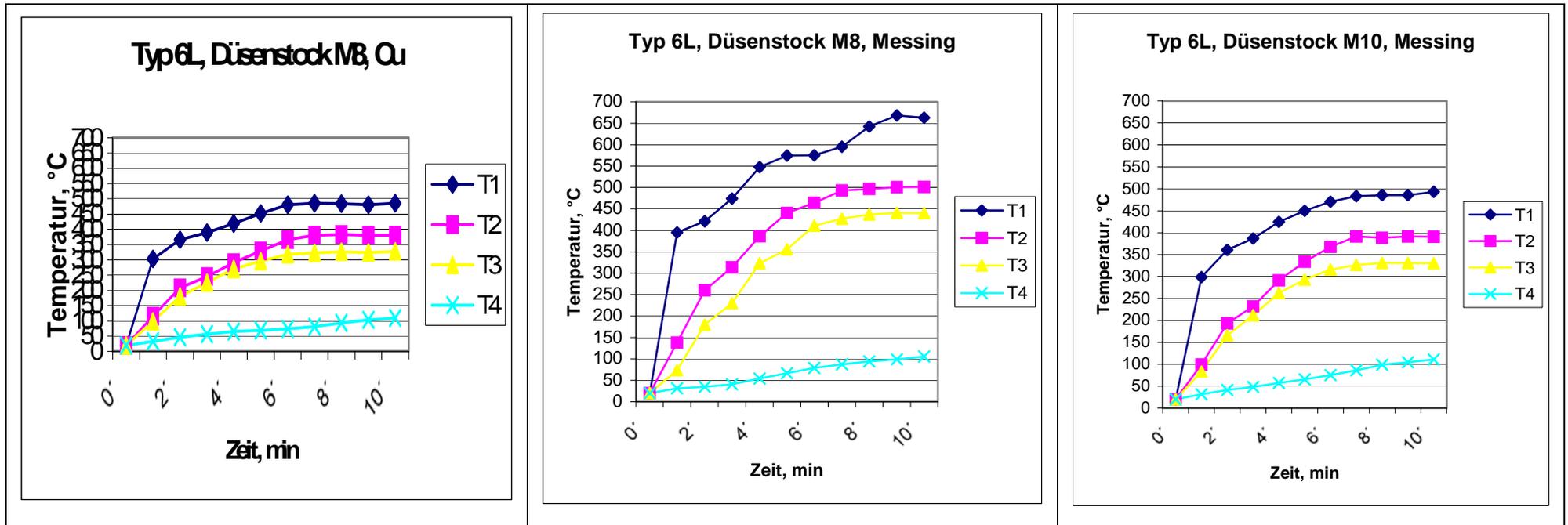
## **Ergebnisse des Vergleichs der Brenner vom Typ 6L mit dem Düsenstock aus Kupfer und aus Messing.**

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Kupfer, im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Messing und im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M10 aus Messing (**Bild 22**) erlaubt folgende Feststellungen:

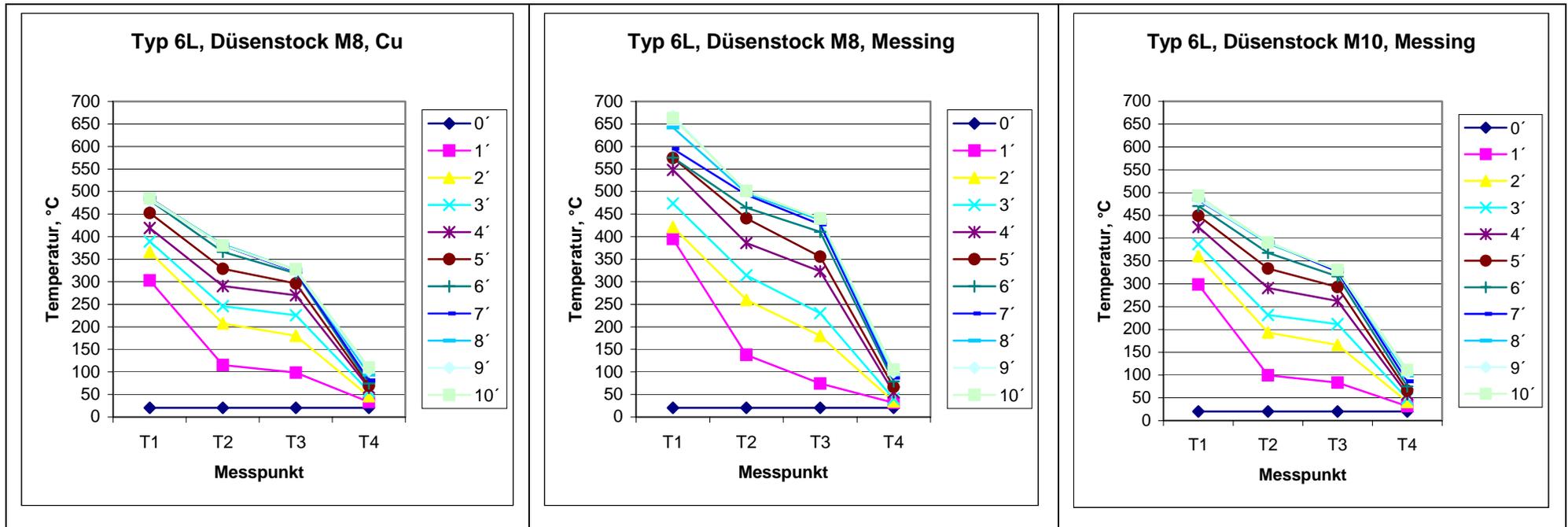
- Die Stromdüse, die Gasdüse und der Kühlkörper des Brenners Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Messing erwärmen sich schneller und stärker als die gleichen Bauelemente des Brenners Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Kupfer.
- Die Erwärmungsdynamik aller o.g. Bauelemente des Brenners Typ 6L mit dem Düsenstock M10 aus Messing ist dagegen identisch zum Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Kupfer. Schlechtere Wärmeleitfähigkeit des Messings wird durch größeren Querschnitt und der Gewindeoberfläche kompensiert.

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Temperaturverteilung im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Kupfer, im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Messing und im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M10 aus Messing (**Bild 23**) erlaubt folgende Rückschlüsse:

- Im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Messing staut sich die Wärme im vorderen Bereich des Brenners wegen der schlechteren Wärmeleitfähigkeit des Messings. Die maximalen Temperaturen im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Messing sind höher als im gleichen Brenner mit dem Düsenstock M8 aus Kupfer: die Stromdüse (T1) ist um ca. 80°C wärmer (662,6°C gegenüber 485,2°C); die Gasdüse (T2) ist um ca. 120 °C wärmer (501,4°C gegenüber 380,6°C); das Kühlkörper ist um ca. 100°C wärmer (440,2°C gegenüber 327,4°C).
- Im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M10 aus Messing staut sich die Wärme nicht im vorderen Bereich des Brenners. Die maximalen Temperaturen im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M10 aus Messing halten sich auf dem gleichen Niveau wie im Brenner mit dem Düsenstock M8 aus Kupfer.



**Bild 22:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Kupfer, im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Messing und im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M10 aus Messing

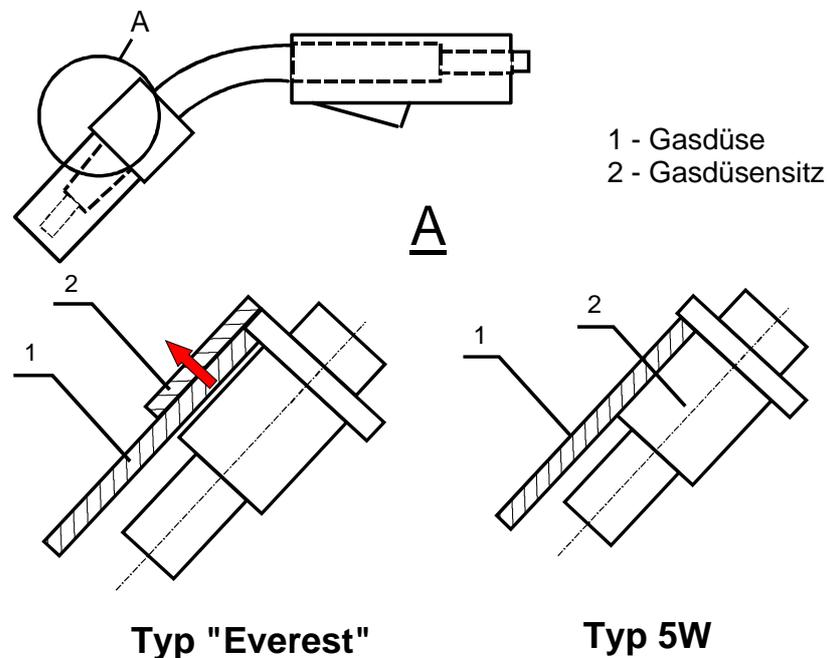


**Bild 23:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Kupfer, im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Messing und im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M10 aus Messing

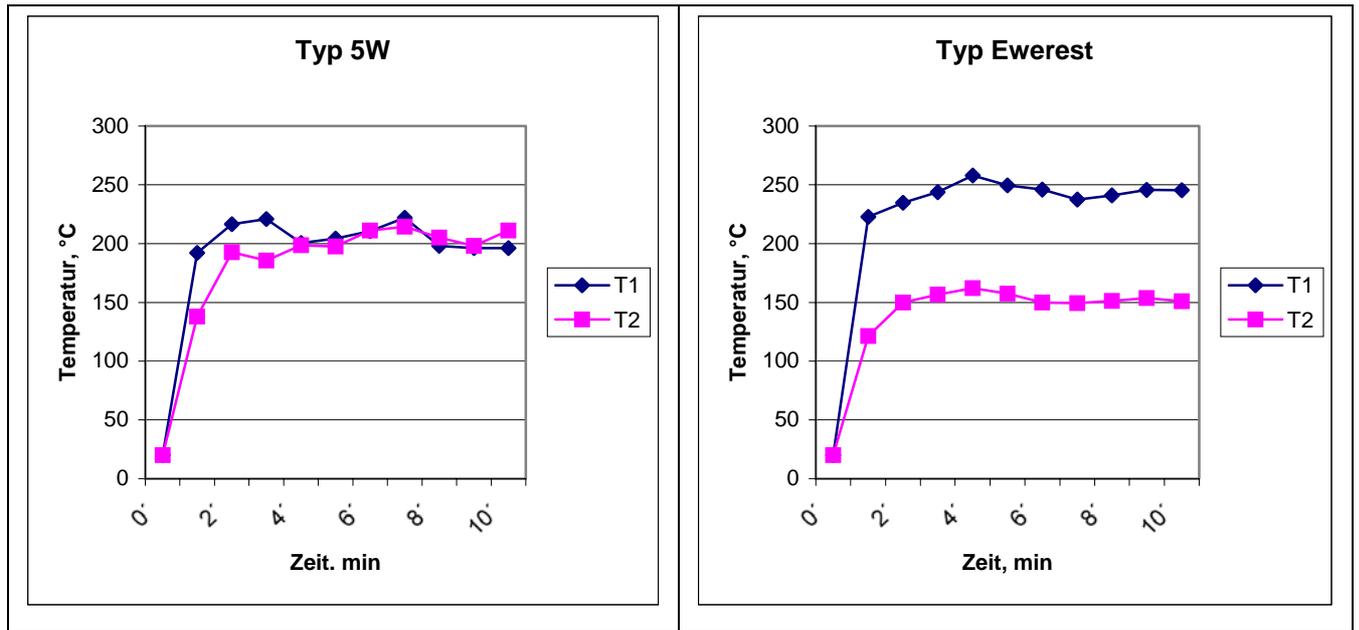
## Ergebnisse des Vergleichs der Brenner vom Typ „Everest“ und Typ 5W.

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 5W und im Brenner Typ „Everest“ (**Bild 25**) und der Ergebnisse des Vergleichs der Temperaturverteilung im Brenner Typ 5W und im Brenner Typ „Everest“ (**Bild 26**) erlaubt folgende Rückschlüsse:

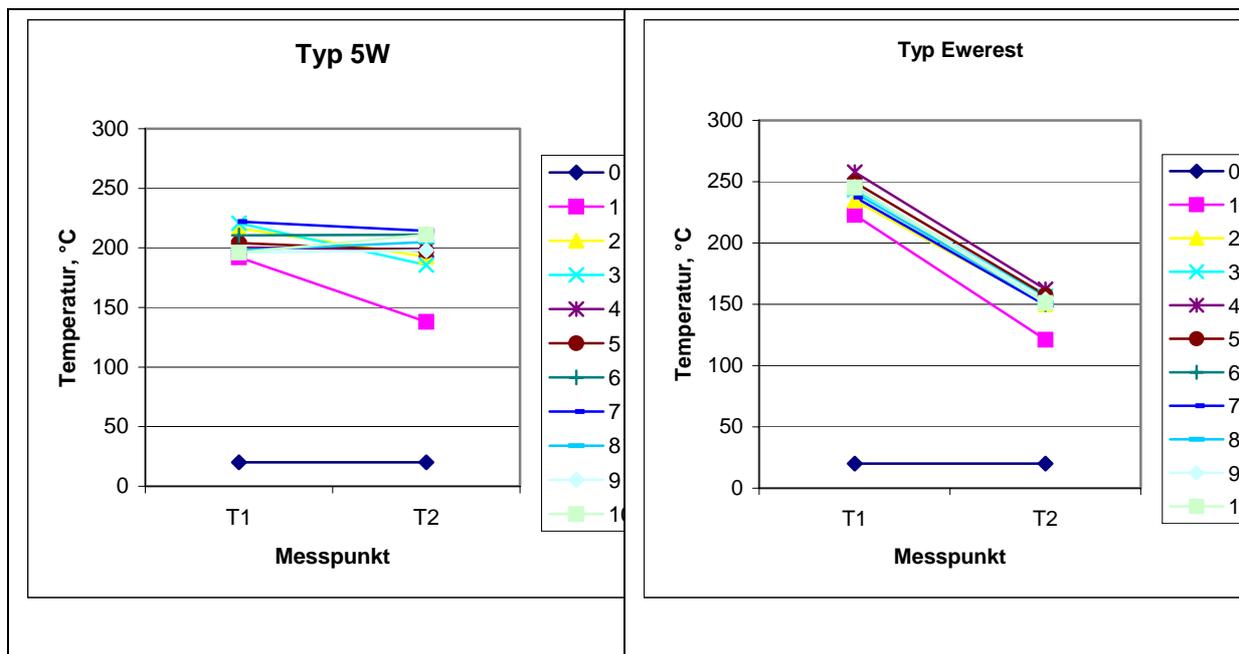
- Die Temperatur der Stromdüse (T1) ist beim Brenner Typ 5W um ca. 50°C niedriger als beim Brenner Typ „Everest“ (196°C gegenüber 245°C). Die Gewindeverbindung zwischen der Stromdüse und dem Düsenstock bei dem Brenner Typ 5W ist besser für den Wärmeübergang als die einklemmbare konische Verbindung im Brenner Typ „Everest“. Obwohl letzterer theoretisch eine viel größere Kontaktfläche hat, erfolgt in der Praxis die Kontaktierung zwischen zwei konischen Oberflächen nur auf einer Linie.
- Die Temperatur der Gasdüse (T2) ist dagegen beim Brenner Typ 5W um ca. 60°C höher als beim Brenner Typ „Everest“ (211°C gegenüber 151°C). Die Gasdüse des Brenners (**Bild 24**) Typ 5W umfasst den Gasdüsensitz. Bei Erwärmung wird sie breiter und der Kontakt sowie der Wärmeübergang verschlechtern sich. Bei dem Brenner Typ „Everest“ (**Bild 24**) umfasst der Gasdüsensitz umgekehrt die Gasdüse. Bei der Erwärmung dehnt sie sich aus und wird noch stärker an den Gasdüsensitz angepresst, dadurch verbessert sich der Kontakt und der Wärmeübergang.



**Bild 24:** Brenner Typ 5W und Typ „Everest“. Gestaltungsvarianten



**Bild 25:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 5W und im Brenner Typ „Everest“



**Bild 26:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 5W und im Brenner Typ „Everest“

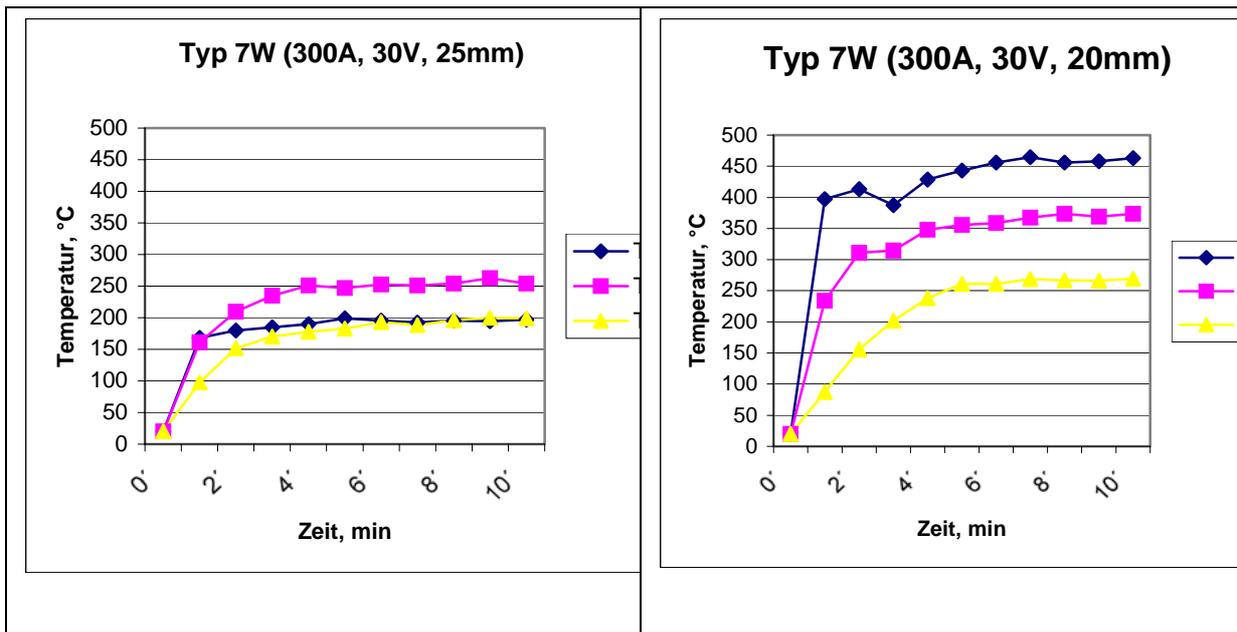
**Ergebnisse des Tests des Brenners vom Typ 7W bei unterschiedlicher Belastung.**

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 7W unter unterschiedlicher Belastung: Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm, **(Bild 27)** erlaubt folgende Schlussfolgerung:

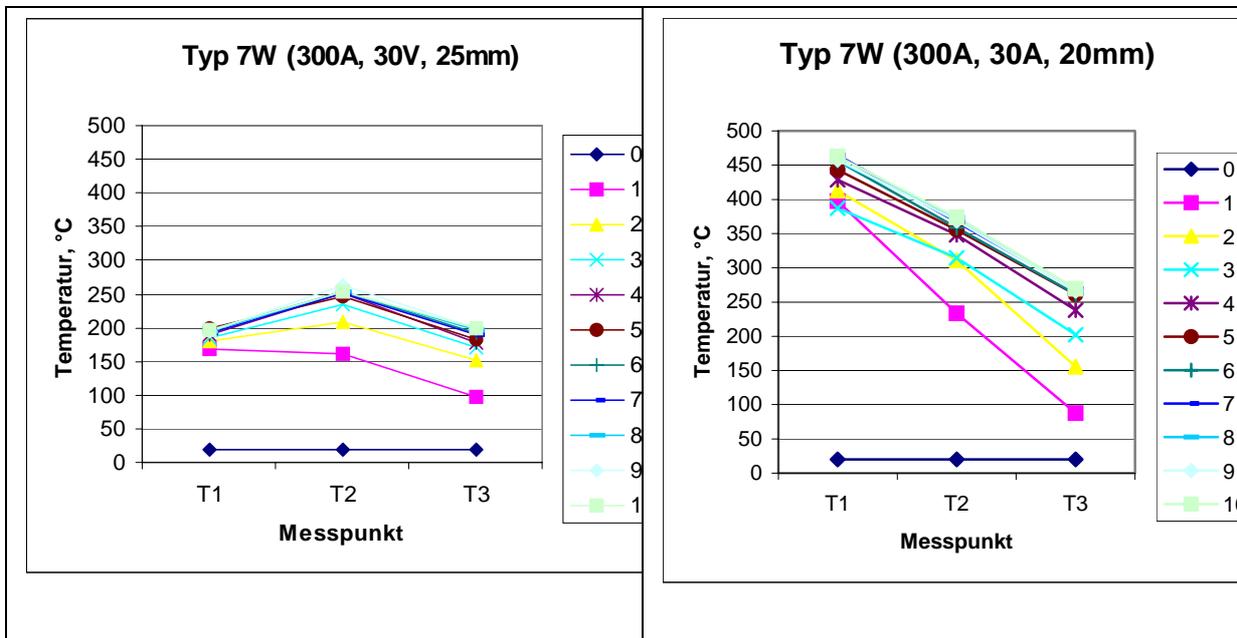
- Die Verringerung des Abstandes zum Werkstück beim zweikreisflüssiggekühlten Brenner Typ 7W um 5 mm führt zu wesentlich schneller und stärkerer Erwärmung der vorderen Elemente.

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Temperaturverteilung im Brenner Typ 7W unter unterschiedlicher Belastung: Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm, **(Bild 27)** lässt folgendes erkennen:

- Die gesamte Wärme staut sich in der Stromdüse und führt zu mehr als doppeltem Anstieg ihrer Temperatur (T1) von 197°C bis zu 462°C. Damit ist die Stromdüse ziemlich stark belastet.
- Einen deutlichen Temperaturanstieg erfährt auch die Gasdüse (T2), um fast 120°C von 254°C bis zu 373,6°C.



**Bild 27:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 7W unter unterschiedlicher Belastung: Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm



**Bild 28:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 7W unter unterschiedlicher Belastung: Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm

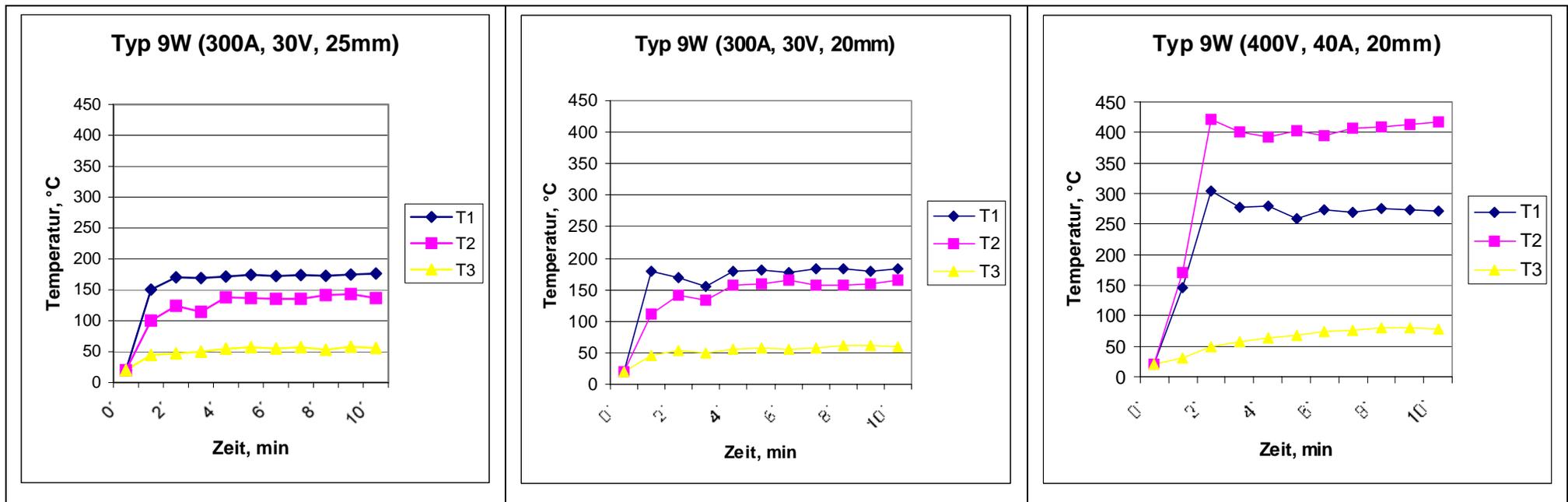
**Ergebnisse des Tests des Brenners vom Typ 9W unter unterschiedlicher Belastung.**

Die Ergebnisse des Vergleichs der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 9W unter unterschiedlicher Belastung: Schweißstrom variabel:300 A; 400 A, Spannung variabel:30 V; 40 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm, **(Bild 29)** zeigen folgendes:

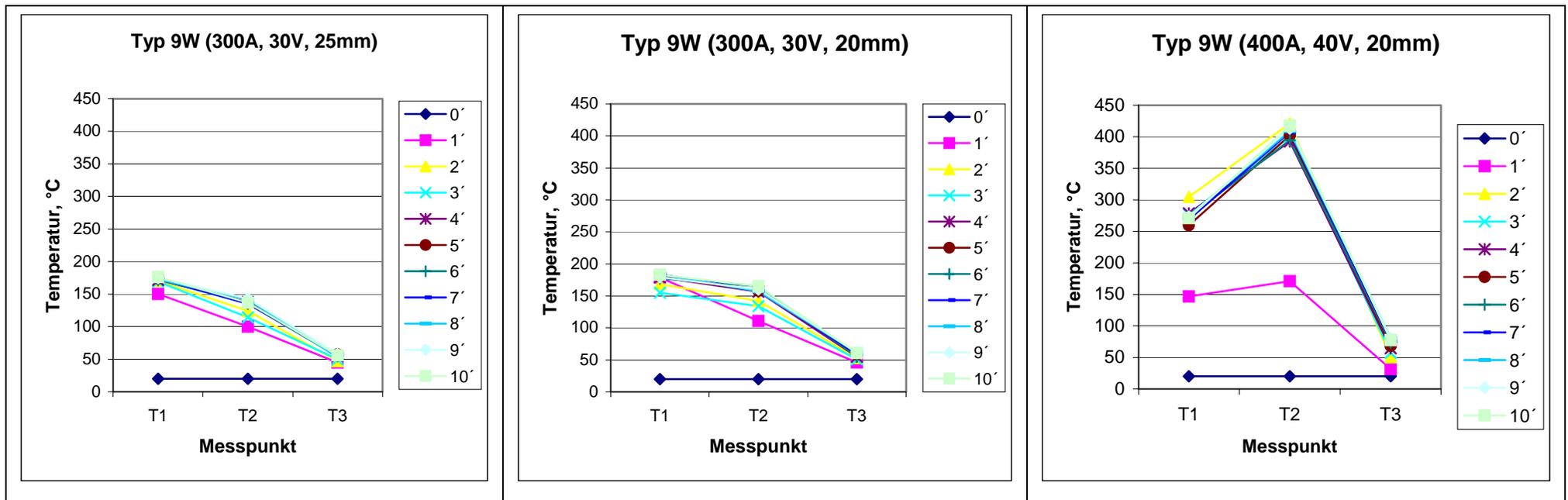
- Bei der Belastung mit Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Abstand 25 mm und bei der Belastung mit Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Abstand 20 mm ändert sich die Erwärmungsdynamik des zweifachflüssiggekühlten Brenners Typ 9W nur geringfügig.
- Bei gleichzeitiger Erhöhung des Schweißstromes bis zu 400 A und Verringerung des Abstandes zum Werkstück bis zu 20 mm steigen die Temperaturen im Brenner rasant und insbesondere in der Gasdüse (T2) um mehr als das Doppelte auf 414,2°C.

Die Ergebnisse des Vergleichs der Temperaturverteilung im Brenner Typ 9W unter unterschiedlicher Belastung: Schweißstrom variabel:300 A; 400 A, Spannung variabel:30 V; 40 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm, **(Bild 30)** zeigen folgendes:

- Die Wärme staut sich in der Gasdüse, deswegen ist es sinnvoll, bei diesem Brenner eine Dreifachkühlung einzusetzen.



**Bild 29:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 9W unter unterschiedlicher Belastung: Schweißstrom variabel:300 A; 400 A, Spannung variabel:30 V; 40 V, Einschaldauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm



**Bild 30:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 9W unter unterschiedlicher Belastung: Schweißstrom variabel:300 A; 400 A, Spannung variabel:30 V; 40 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm

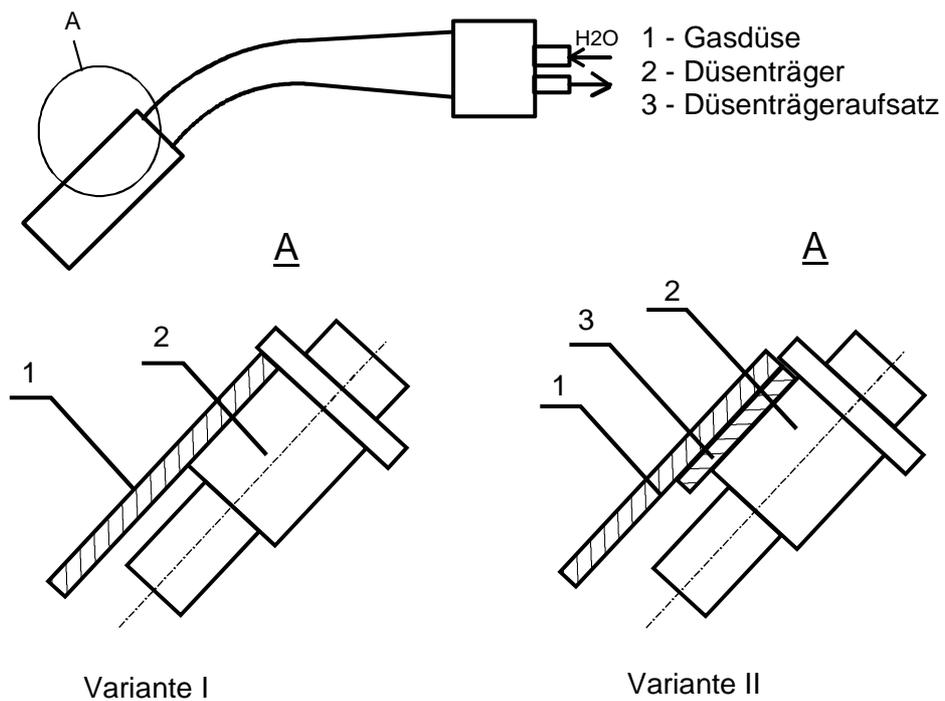
### Ergebnisse des Tests des Brenners vom Typ 9W Rob in verschiedener Ausführung.

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 9W Rob (**Bild 31**) mit dem Düsenträger aus Kupfer, im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträgeraufsatz aus Messing und im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträger aus Messing (**Bild 32**) lässt folgendes erkennen:

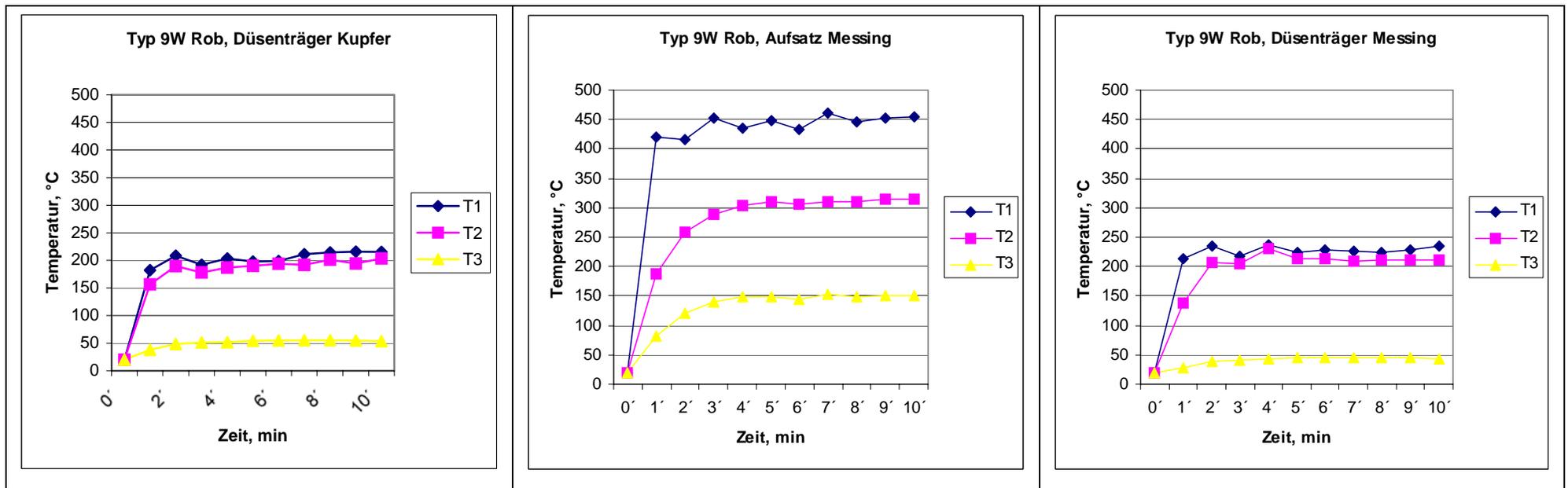
- Die Stromdüse, die Gasdüse und das Außenrohr des Brenners Typ 9W Rob mit dem Düsenträgeraufsatz aus Messing erwärmen sich schneller und stärker als die gleichen Bauelemente des Brenners Typ 9W Rob mit dem Düsenträger aus Kupfer.
- Die Erwärmungsdynamik aller o.g. Bauelemente des Brenners Typ 9W Rob mit dem Düsenträger aus Messing ist dagegen zum Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträger aus Kupfer identisch. Die schlechtere Wärmeleitfähigkeit des Messings wird durch die effektivere Flüssigkeitskühlung kompensiert.

Die Betrachtung der Ergebnisse des Vergleichs der Temperaturverteilung im Brenner Typ 9W Rob (**Bild 31**) mit dem Düsenträger aus Kupfer, im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträgeraufsatz aus Messing und im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträger aus Messing (**Bild 33**) erlaubt folgende Rückschlüsse:

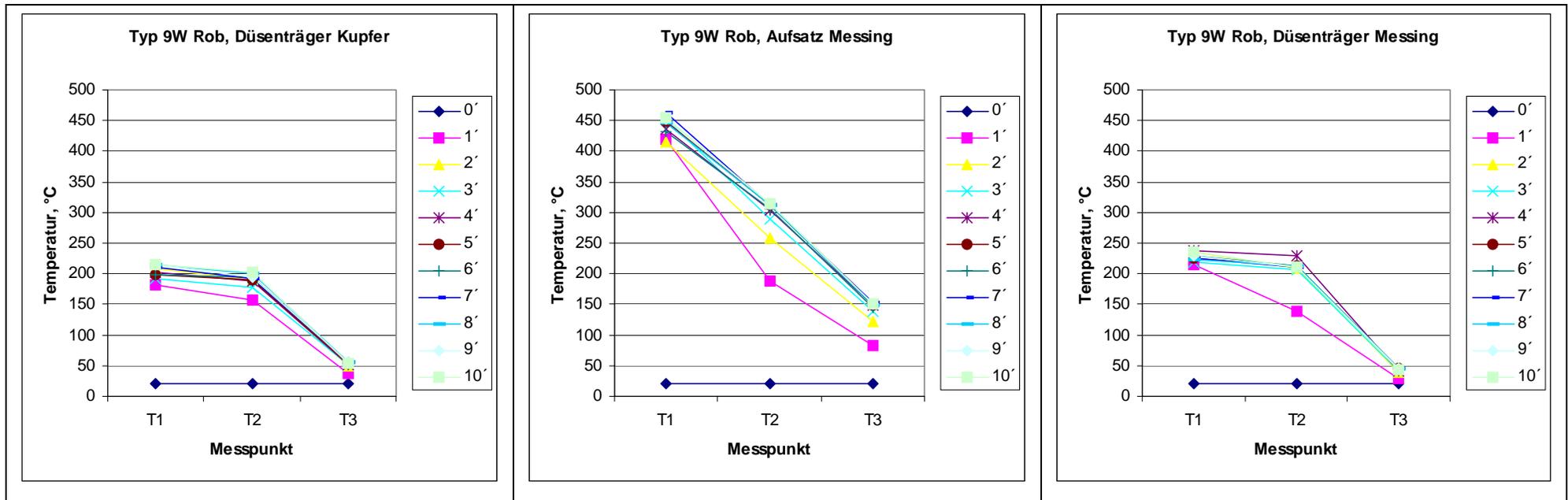
- Im Brenner staut sich die Wärme im vorderen Bereich des Brenners Typ 9W Rob mit dem Düsenträgeraufsatz aus Messing wegen des schlechteren Wärmeleitkontaktes zwischen dem Düsenträgeraufsatz und dem Düsenträger. Die maximalen Temperaturen im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträgeraufsatz aus Messing sind höher als im gleichen Brenner mit dem Düsenträger aus Kupfer: die Stromdüse (T1) ist um ca. 230°C wärmer (455,2°C gegenüber 215,2°C); die Gasdüse (T2) ist um ca. 110 °C wärmer (313,8°C gegenüber 203,2°C); das Außenrohr ist um ca. 100°C wärmer (151,8°C gegenüber 53,8°C).
- Im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträger aus Messing staut sich die Wärme nicht im vorderen Bereich des Brenners, sondern bis in die Kühlkanäle durchfließt. Die maximalen Temperaturen im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträger aus Messing halten sich auf dem gleichen Niveau wie im Brenner mit dem Düsenträger aus Kupfer.



**Bild 31:** Brenner Typ 9W Rob. Gestaltungsvarianten



**Bild 32:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträger aus Kupfer, im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträgeraufsatz aus Messing und im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträger aus Messing



**Bild 33:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträger aus Kupfer, im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträgeraufsatz aus Messing und im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsenträger aus Messing

Zusammenfassend wurden folgende Ergebnisse bei der Ermittlung des quantitativen Einflusses der konstruktiven Gestaltung des Brenners auf seine thermische Belastung erzielt.

Bei den selbstgekühlten MSG-Lichtbogenschweißbrennern verhindert die Anwendung von Werkstoffen mit schlechterer Wärmeleitfähigkeit für die Brennerenteile den Wärmefluss aus dem vorderen Bereich des Brenners nach hinten ins Stromkabel oder nach außen ins Außenrohr. Das führt immer zu einer stärkeren thermischen Belastung von Strom- und von Gasdüse, was auch den schnelleren Verschleiß dieser Elemente bedeutet. Das hintere Teil des Brennerhalses bleibt relativ kühl, was positiv für die Begrenzung der thermischen Belastung für den Brennergriff und die Hand des Schweißers ist.

Eine Kompensationsmöglichkeit beim Einsatz von Brennerenteilen aus Werkstoffen mit geringer Wärmeleitfähigkeit könnte ein größerer Querschnitt und als Folge eine höhere Masse der inneren Teile oder einer großen Kühloberfläche der äußeren Teile des Brenners sein.

Bei den flüssiggekühlten MSG-Lichtbogenschweißbrennern führen alle konstruktiven Maßnahmen, die den Wärmefluss ins Innere des Brenners zu den Kühlkanälen verhindern oder begrenzen, auch zum Anstieg der Temperatur von Strom- und Gasdüse mit gleichen Folgen als bei den selbstgekühlten Brennern.

Die Verhinderung des Wärmeabflusses aus sehr stark thermisch belasteten Brennerenteilen erfolgt in der Regel wegen des Einsatzes von Werkstoffen mit schlechter Wärmeleitfähigkeit, wegen schlechtem Kontakt zwischen den Teilen als Folge technologischer oder konstruktiver Fehler und auch wegen der Anwendung verschiedener zusätzlicher Elemente, wie z.B. eines Gasdüsenträgeraufsatzes, der den vorzeitigen mechanischen Verschleiß der aus weichem Kupfer gefertigten Gasdüsenträger verhindern soll, aber zum Wärmestau führt.

Die Ergebnisse der praktischen Experimente anhand der angefügten ausführlichen Tabellen stellen die Zusammenhänge zwischen der Konstruktionsart einzelner Brennerenteile und dem Niveau der Temperatur dar. Diese Ergebnisse können dem Brennerkonstrukteur bei den Entscheidungen über das Gesamtkonzept der zu projektierenden Lichtbogenschweißwerkzeuge als Grundlage dienen.

## **6 Einfluss der Parametern der Zwangskühlung auf das Niveau der thermischen Belastung des Brenners. Modellierung der thermischen Prozesse im Brenner**

### **6.1 Theoretische Untersuchungen. Modellierung, Betrachtung und Optimierung der Zwangskühlung**

Als Kühlmittel kann man flüssige oder gasförmige Medien benutzen. Es ist interessant zu vergleichen, welche potenziellen Möglichkeiten der Wärmeabführung diese Medien haben. Es wird angenommen, dass in einem zwangsgekühlten Brenner die entstehende Wärme durch den Wasserfluss (Faktor 1) und durch den Schutzgasfluss (Faktor 2) abtransportiert wird. Der Wärmeübergang durch Strahlung (Faktor 3), Konvektion (Faktor 4) in die Umgebung und Wärmeleitung (Faktor 5) werden im Anteil „Zwangskühlung“ nicht berücksichtigt. Als Ergebnis der Betrachtungen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie groß ist der Anteil eines jeden Faktors?
- Welcher Faktor ist für eine weitere Optimierung wichtig?
- Wo liegt die Grenze der Optimierung?
- Ist diese Grenze praktisch erreichbar?

#### **6.1.1 Betrachtungen zur Flüssigkeitskühlung. Modell zur Betrachtung der Flüssigkeitskühlung. Aufteilung auf die einzelnen Blöcke**

Für die theoretische Betrachtung der Flüssigkeitskühlung ist es sinnvoll, das System des wassergekühlten Brenners auf die Blöcke: „Brennerkörper“, „Kühlkanal im Brennerkörper“, „Schlauch“ und „Kühlgerät“ zu verteilen, um diese einzeln nacheinander zu beschreiben. Diese Verteilung wird in Schema „Modell zur Betrachtung der Flüssigkeitskühlung“ (**Bild 10**) im Kapitel 3.3.2 vorgestellt. Um dieses Modell komplett zu beschreiben, sind folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Wärmemenge erhält der Brenner vom Lichtbogen?
- Welcher Anteil der aufgenommenen Wärme wird durch die Brenner-elemente und Verbindungen bis zu den Kühlkanälen durchgeleitet?
- Wie viel Wärme könnte die Flüssigkeit im Bereich der Kühlkanälen aufnehmen?
- Wie viel Wärme nimmt die Kühlflüssigkeit aus dem wassergekühlten Stromzuführungskabel auf?

Um die Möglichkeit zu haben, die Zwangskühlung mit der Flüssigkeit weiter zu optimieren, muss man die Frage beantworten: „Wie viel Wärme könnte die Flüssigkeit im

Bereich der Kühlkanälen aufnehmen?“ Dies wird zunächst am Beispiel Wasser als Kühlflüssigkeit theoretisch und praktisch untersucht.

### 6.1.1.1 Theoretische Berechnung der Flüssigkeitskühlung.

#### Kühlmittel Wasser

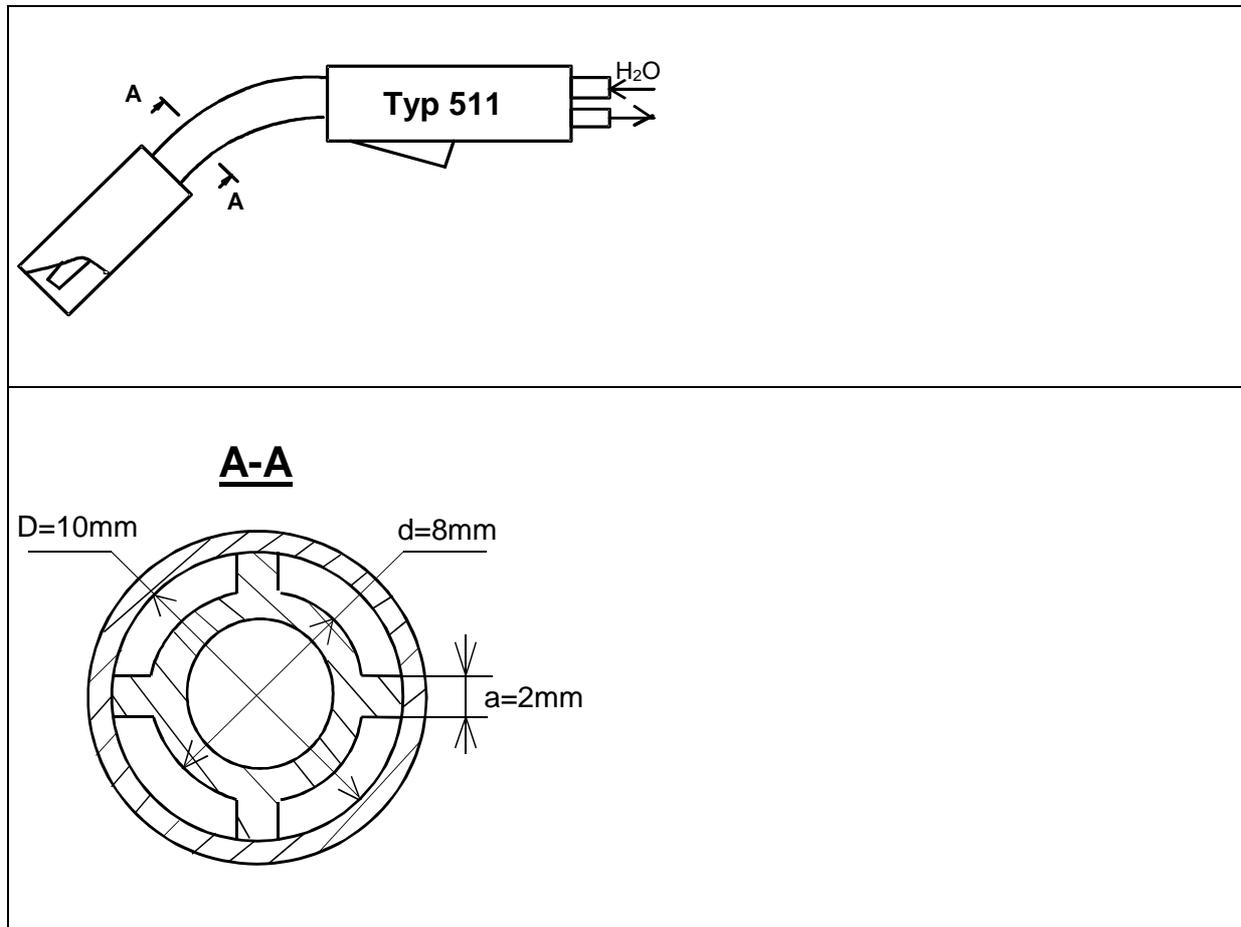
Die theoretischen Berechnungen haben das Ziel:

- den Charakter der Strömungen (turbulent/laminar) in den Kühlkanälen bei dem vom Brennerhersteller vorgegebenen Wasserdurchfluss von 1,0 l/min zu bestimmen,
- den kritischen Wasserdurchfluss, wenn laminare Strömungen auf turbulente folgen, zu finden,
- theoretisch den möglichen Wärmestrom zu bestimmen, in welchem Bereich (turbulenten/laminaren) die Wärmeabnahme höher ist.

Reihenfolge der Berechnungen:

1. Aus den bekannten Abmessungen der Kühlkanäle **Bild 34**: „Brenner Typ 511. Abmessungen des Innenrohrs“ und **Bild 35**: „Brenner Typ 9W. Abmessungen des Innenrohrs. Abmessungen der Gasdüse“ sind der Querschnitt, A und der gleichwertige Durchmesser  $d_{gl}$  zu berechnen.
2. Aus dem vom Brennerhersteller vorgegebenen Wasserdurchfluss von 1,0 l/min wird die Strömungsgeschwindigkeit berechnet.
3. Die Reynolds - Zahl  $Re$  ist zu berechnen. Die kinematische Viskosität aus der **Tabelle 26** [61] ist zu suchen.
4. Die berechnete Reynolds - Zahl  $Re$  ist mit der kritischen Reynolds - Zahl zu vergleichen und der Charakter der Strömungen ist zu bestimmen.
5. Aus der kritischen Reynolds – Zahl ist die kritische Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen.
6. Aus der kritischen Strömungsgeschwindigkeit ist der kritische Wasserdurchfluss zu berechnen.
7. Für jeden der angegebenen Reynolds - Zahlen ist die Nusselt - Zahl  $Nu$  zu berechnen.
8. Aus der Nusselt- Zahl ist der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  zu finden.
9. Aus der bekannten Wandfläche  $A_{KK}$ , dem Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  und dem Temperaturunterschied ist der Wärmestrom  $Q$  zu bestimmen.

### 6.1.1.2 Berechnung für den Brenner Typ 511, als typischer Vertreter wassergekühlter Brenner



**Bild 34:** Brenner Typ 511. Abmessungen des Innenrohrs

Ergebnisse der Berechnung für das Innenrohr nach **Bild 34**:

1. Aus den bekannten Abmessungen der Kühlkanäle **Bild 34**: „Brenner Typ 511. Abmessungen des Innenrohrs“ sind der Querschnitt, A und der gleichwertige Durchmesser  $d_{gl}$  zu berechnen:

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) - \frac{na}{2}(D - d) \quad [60] \quad (6.1)$$

$$A = 20,26\text{mm}^2 = 20,26 * 10^{-6} \text{m}^2$$

$$U = \pi(D + d) - 2na + 2n(D - d) \quad [60] \quad (6.2)$$

$$U = 18\pi * 10^{-3} \text{m}$$

$$d_{gl} = \frac{4A}{U} \quad [60] \quad (6.3)$$

$$d_{gl} = 1,43 * 10^{-3} m \quad d_{gl} = 1,43 * 10^{-3} m$$

$$d_{gl} = 1,43 * 10^{-3} m$$

Der Querschnitt des Kühlkanals ist 20,26 mm<sup>2</sup>; der gleichwertige Durchmesser ist 1,43 mm

2. Aus dem angegebenen Wasserdurchfluss ist die Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen:

$$\omega = \frac{\dot{V}}{A} \quad [60] \quad (6.4)$$

$$\dot{V} = 1,0 \frac{l}{\text{min}} = 0,016 \frac{l}{s} = 0,016 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

$$\omega = 0,79 \frac{m}{s}$$

Die Strömungsgeschwindigkeit ist 0,79 m/s bei einem Wasserdurchfluss von 1,0 l/min.

3. Die Reynolds - Zahl  $R_e$  ist zu berechnen:

$$R_e = \frac{\omega d_{gl}}{\nu} \quad [60] \quad (6.5)$$

$$\nu = 0,387 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s} \quad \text{für eine Wassertemperatur von } 75^\circ\text{C, Tabelle 26 [61]}$$

$$R_e = \frac{0,79 \times 1,43 \times 10^{-3}}{0,387 \times 10^{-6}} = 2919$$

Die Reynolds - Zahl ist  $R_e=2919$  bei 0,79 m/s Strömungsgeschwindigkeit.

4. Die Reynolds - Zahl  $R_e=2919$  ist größer als die kritische Reynoldszahl (2300), deswegen ist die Strömung turbulent.

5. Nach der kritischen Reynolds - Zahl ist die kritische Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen:

$$\omega_{kr} = \frac{R_{ekr} \nu}{d_{gl}} \quad [60] \quad (6.6)$$

$$R_{ekr} = 2300$$

$$\omega_{kr} = \frac{2300 \times 0,387 \times 10^{-6}}{1,43 \times 10^{-3}} = 0,622 \frac{m}{s}$$

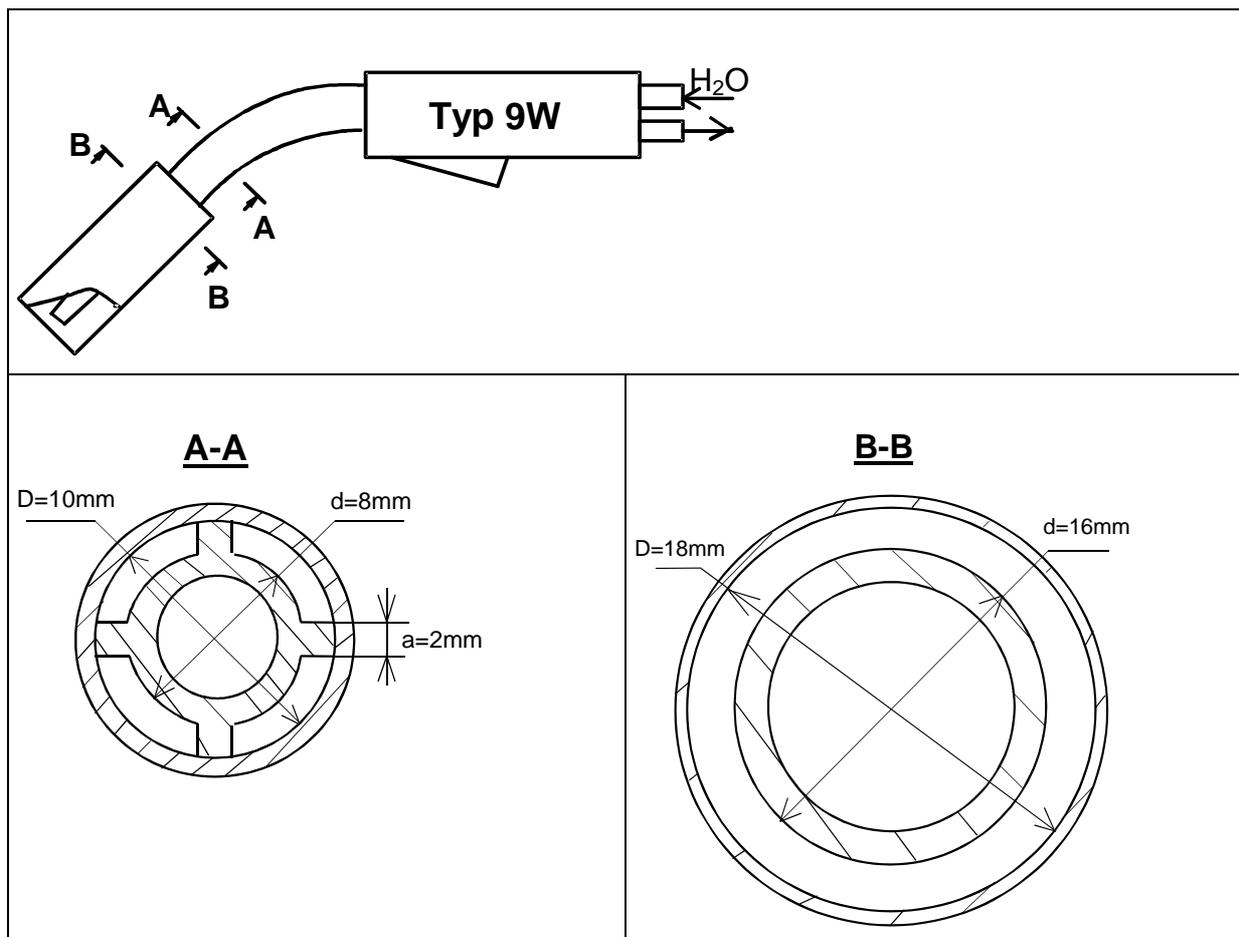
6. Aus der kritischen Strömungsgeschwindigkeit ist der kritische Wasserdurchfluss zu berechnen:

$$\dot{V}_{kr} = A \omega_{kr} \quad [60] \quad (6.7)$$

$$\dot{V}_{kr} = 20,26 \times 10^{-6} \times 0,622 = 12,61 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} = 0,0126 \frac{l}{s} = 0,756 \frac{l}{min}$$

Die kritische Strömungsgeschwindigkeit (Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung) ist 0,622 m/s, das bedeutet einen Wasserdurchfluss von 0,756 l/min.

### 6.1.1.3 Berechnung für den Brenner Typ 9W



**Bild 35:** Brenner Typ 9W. Abmessungen des Innenrohrs. Abmessungen der Gasdüse

Ergebnisse der Berechnung für das Innenrohr nach **Bild 33**:

1. Aus den bekannten Abmessungen der Kühlkanäle **Bild 33**: „Brenner Typ 9W. Abmessungen des Innenrohrs. Abmessungen der Gasdüse“ sind der Querschnitt A und der gleichwertige Durchmesser  $d_{gl}$  zu berechnen:

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) - \frac{na}{2} (D - d) \quad [60] \quad (6.1)$$

$$A = 20,26 \text{ mm}^2 = 20,26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$U = \pi(D + d) - 2na + 2n(D - d) \quad [60] \quad (6.2)$$

$$U = 18\pi \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$d_{gl} = \frac{4A}{U} \quad [60] \quad (6.3)$$

$$d_{gl} = 1,43 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Der Querschnitt des Kühlkanals ist 20,26 qmm; der gleichwertige Durchmesser ist 1,43 mm.

2. Aus dem angegebenen Wasserdurchfluss ist die Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen.

Der Durchfluss von 1,0 l/min teilt sich auf 0,5 l/min im Innenrohr und auf 0,5 l/min in der Gasdüse auf.

$$\omega = \frac{\dot{V}}{A} \quad [60] \quad (6.4)$$

$$\dot{V} = 0,5 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 0,008 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0,008 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\omega = 0,395 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Die Strömungsgeschwindigkeit ist 0,395 m/s bei 0,5 l/min Wasserdurchfluss.

3. Die Reynolds - Zahl  $Re$  ist zu berechnen.

$$R_e = \frac{\omega d_{gl}}{\nu} \quad [60] \quad (6.5)$$

$$\nu = 0,387 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{für eine Wassertemperatur von } 75^\circ\text{C, Tabelle 26 [61]}$$

$$R_e = \frac{0,395 \times 1,43 \times 10^{-3}}{0,387 \times 10^{-6}} = 1459,5$$

Die Reynolds - Zahl ist  $Re=1459,5$  bei 0,395 m/s Strömungsgeschwindigkeit.

4. Die Reynolds - Zahl  $Re=1459,5$  ist kleiner als die kritische Reynoldszahl (2300), deswegen ist die Strömung laminar.

5. Aus der kritischen Reynolds - Zahl ist die kritische Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen:

$$\omega_{kr} = \frac{R_{ekr} \nu}{d_{gl}} \quad [60] \quad (6.6)$$

$$R_{ekr} = 2300$$

$$\omega_{kr} = \frac{2300 \times 0,387 \times 10^{-6}}{1,43 \times 10^{-3}} = 0,622 \frac{m}{s}$$

6. Aus der kritischen Strömungsgeschwindigkeit ist der kritische Wasserdurchfluss zu berechnen:

$$\dot{V}_{kr} = A \omega_{kr} \quad [60] \quad (6.7)$$

$$\dot{V}_{kr} = 20,26 \times 10^{-6} \times 0,622 = 12,61 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} = 0,0126 \frac{l}{s} = 0,756 \frac{l}{min}$$

Die kritische Strömungsgeschwindigkeit (Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung) ist 0,622 m/s, das bedeutet einen Wasserdurchfluss von 0,756 l/min.

Ergebnisse der Berechnung für die Gasdüse:

1. Aus den bekannten Abmessungen der Kühlkanäle **Bild 33**: „Brenner Typ 9W. Abmessungen des Innenrohrs. Abmessungen der Gasdüse“ der Querschnitt, A und der gleichwertige Durchmesser  $d_{gl}$  zu berechnen:

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad [60] \quad (6.8)$$

$$A = 53,0 mm^2 = 53,0 \cdot 10^{-6} m^2$$

$$d_{gl} = D - d \quad [60] \quad (6.9)$$

$$d_{gl} = 2,0 \cdot 10^{-3} m$$

Der Querschnitt des Kühlkanals ist 53,0 mm<sup>2</sup>; der gleichwertige Durchmesser ist 2,0 mm.

2. Aus dem angegebenen Wasserdurchfluss ist die Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen.

Der Durchfluss von 1,0 l/min teilt sich auf 0,5 l/min im Innenrohr und auf 0,5 l/min in der Gasdüse auf.

$$\omega = \frac{\dot{V}}{A} \quad [60] \quad (6.4)$$

$$\dot{V} = 0,5 \frac{l}{min} = 0,008 \frac{l}{s} = 0,008 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

$$\omega = 0,15 \frac{m}{s}$$

Die Strömungsgeschwindigkeit ist 0,15 m/s bei 0,5 l/min Wasserdurchfluss.

3. Die Reynolds - Zahl  $Re$  ist zu berechnen:

$$R_e = \frac{\omega d_{gl}}{\nu} \quad [60] \quad (6.5)$$

$$\nu = 0,387 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s} \quad \text{für Wassertemperatur } 75^\circ\text{C, Tabelle 26 [61]}$$

$$R_e = \frac{0,15 \times 2,0 \times 10^{-3}}{0,387 \times 10^{-6}} = 775$$

Die Reynolds - Zahl ist  $Re=775$  bei 0,15 m/s Strömungsgeschwindigkeit.

4. Die Reynolds - Zahl  $Re=775$  ist kleiner als die kritische Reynoldszahl (2300), deswegen ist die Strömung laminar.

5. Aus der kritischen Reynolds - Zahl ist die kritische Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen:

$$\omega_{kr} = \frac{R_{ekr} \nu}{d_{gl}} \quad [60] \quad (6.6)$$

$$R_{ekr} = 2300$$

$$\omega_{kr} = \frac{2300 \times 0,387 \times 10^{-6}}{2,0 \times 10^{-3}} = 0,44 \frac{m}{s}$$

6. Aus der kritischen Strömungsgeschwindigkeit wird der kritische Wasserdurchfluss berechnet:

$$\dot{V}_{kr} = A \omega_{kr} \quad [60] \quad (6.7)$$

$$\dot{V}_{kr} = 53,0 \times 10^{-6} \times 0,44 = 23,32 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} = 0,023 \frac{l}{s} = 1,38 \frac{l}{min}$$

Die kritische Strömungsgeschwindigkeit (Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung) ist 0,44 m/s, das bedeutet einen Wasserdurchfluss von 1,38 l/min.

Aus diesen zwei Berechnungen für den Brennern Typ 511 und Typ 9W folgt, dass der Brenner Typ 511 im Innenrohr bessere Kühlbedingungen mit turbulenten Strömungen hat als der Brenner Typ 9W mit nur laminaren Strömungen bei „standartem“ Wasserdurchfluss. Damit ergibt sich schon eine Reserve zur Verbesserung der Wasserkühlung des Brenners Typ 9W.

### 6.1.2 Betrachtungen zur Gaskühlung. Modell zur Betrachtung der Gaskühlung. Aufteilung auf die einzelnen Blöcke

Für theoretische Betrachtungen zur Gaskühlung ist es sinnvoll, das System des Brenners auf die Blöcke: „Brennerkörper“, „Gaskanal im Brennerkörper“, „Gasschlauch“, „Gasversorgung“ aufzuteilen, um diese einzeln nacheinander zu beschreiben. Diese Verteilung wurde im **Bild 11**: „Modell zur Betrachtungen der Gaskühlung“ im Kapitel 3.3.2. vorgestellt. Um dieses Modell komplett zu beschreiben, sind folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Wärmemenge erhält der Brenner vom Lichtbogen?
- Welcher Anteil der eingegangenen Wärme wird durch die Brenner Elemente und Verbindungen bis zu den Gaskanälen durchgeleitet?
- Wie viel Wärme kann das Gas aus den Gaskanälen mitnehmen?

Um die Möglichkeit zu haben, die Zwangskühlung mit dem Gas weiter zu optimieren, muss man die Frage beantworten: „Wie viel Wärme könnte das Gas aus den Gaskanälen mitnehmen?“ Das wird zuerst am Beispiel des Kohlendioxyds ( $\text{CO}_2$ ) als Kühlgas untersucht.

#### **6.1.2.1 Theoretische Berechnungen der Kühlwirkung des Schutzgases. Schutzgas $\text{CO}_2$**

Die theoretischen Berechnungen haben folgende Ziele:

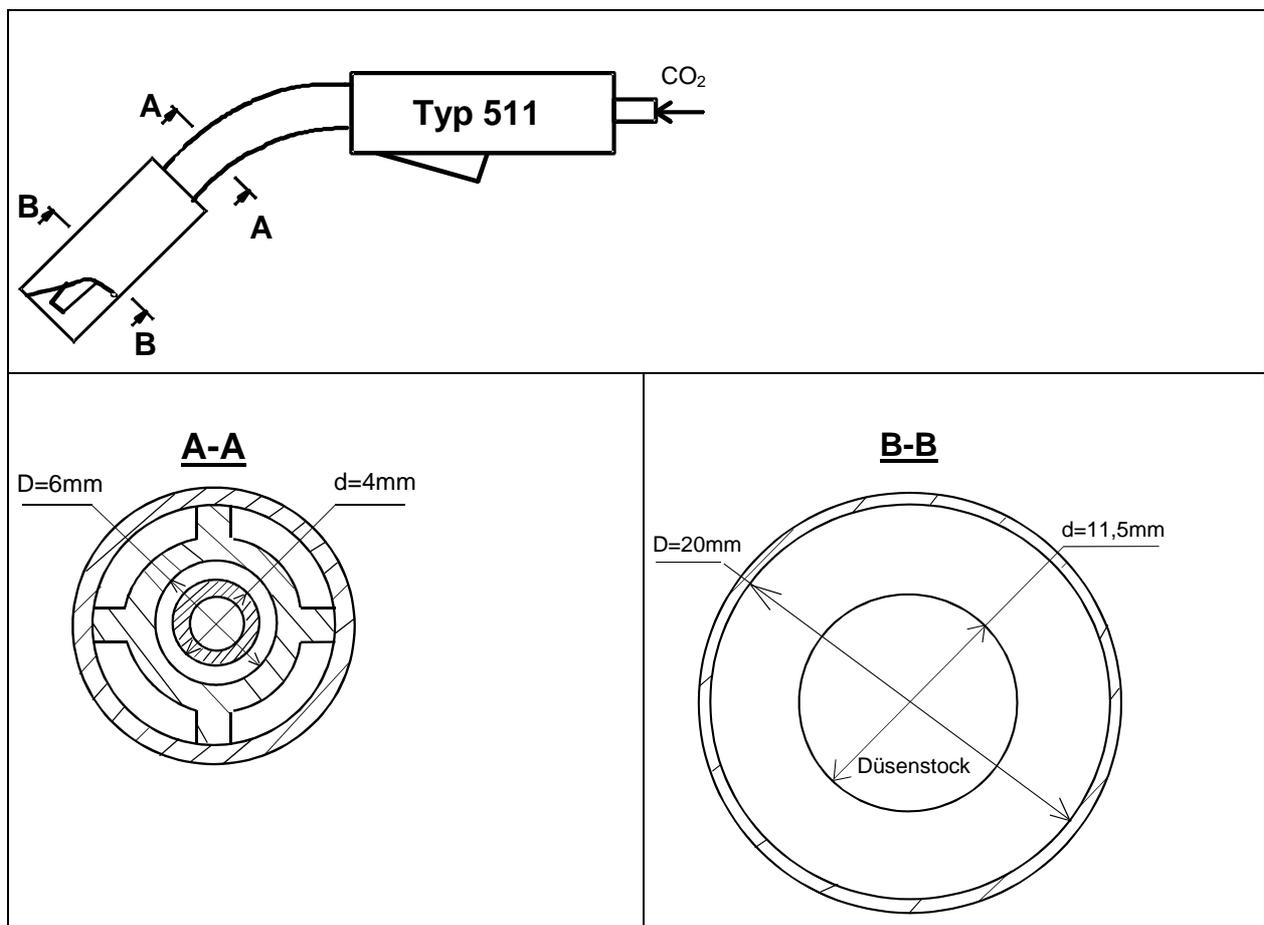
- den Charakter der Strömungen (turbulent/laminar) in den Gaskanälen bei dem vom Brennerhersteller vorgegebenen Gasdurchfluss von 10,0 l/min zu bestimmen,
- den kritischen Gasdurchfluss, wenn laminare Strömungen auf turbulente folgen, zu finden,
- den theoretisch möglichen Wärmestrom zu bestimmen.

Reinfolge der Berechnungen:

1. Aus den bekannten Abmessungen der Gaskanäle **Bild 36**: „Brenner Typ 511. Abmessungen des Innenrohrs. Abmessungen der Gasdüse“ sind der Querschnitt A und der gleichwertige Durchmesser  $d_{gl}$  zu berechnen.
2. Aus dem vom Brennerhersteller vorgegebenen Gasdurchfluss von 10,0 l/min ist die Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen.
3. Die Reynolds - Zahl  $Re$  ist zu berechnen. Die kinematische Viskosität aus der **Tabelle 26** [61] ist zu suchen.
4. Die berechnete Reynolds - Zahl  $Re$  ist mit der kritischen Reynolds - Zahl zu vergleichen und der Charakter der Strömungen zu bestimmen.
5. Aus der kritischen Reynolds – Zahl ist die kritische Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen.

6. Aus der kritischen Strömungsgeschwindigkeit ist der kritische Gasdurchfluss zu berechnen.
7. Für jede der angegebenen Reynolds – Zählen ist die Nusselt - Zahl  $Nu$  zu berechnen.
8. Aus der Nusselt- Zahl ist der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  zu finden.
9. Aus der bekannten Wandfläche  $A_{KK}$ , Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  und Temperaturunterschied ist der Wärmestrom  $Q$  zu bestimmen.

### 6.1.2.2 Berechnung für den Brenner Typ 511, als typischer Vertreter wassergekühlter Brenner



**Bild 36:** Brenner Typ 511. Abmessungen des Innenrohrs. Abmessungen der Gasdüse

Ergebnisse der Berechnung für das Innenrohr nach **Bild 36**:

1. Aus den bekannten Abmessungen von der Gaskanäle **Bild 36**: „Brenner Typ 511. Abmessungen des Innenrohrs. Abmessungen der Gasdüse“ sind der Querschnitt,  $A$  und der gleichwertige Durchmesser  $d_{gl}$  zu berechnen:

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad [60] \quad (6.8)$$

$$A = 15,7 \text{ mm}^2 = 15,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$d_{gl} = D - d \quad [60] \quad (6.9)$$

$$d_{gl} = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Der Querschnitt des Gaskanals ist  $15,7 \text{ mm}^2$ ; der gleichwertige Durchmesser ist  $2,0 \text{ mm}$ .

2. Aus dem angegebenen Gasdurchfluss ist die Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen:

$$\omega = \frac{\dot{V}}{A} \quad [60] \quad (6.4)$$

$$\dot{V} = 10,0 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 0,17 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0,17 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\omega = 10,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Die Strömungsgeschwindigkeit ist  $10,8 \text{ m/s}$  bei  $10,0 \text{ l/min}$  Gasdurchfluss.

3. Die Reynolds - Zahl  $Re$  ist zu berechnen:

$$R_e = \frac{\omega d_{gl}}{\nu} \quad [60] \quad (6.5)$$

$$\nu = 7,2 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{für eine Gastemperatur von } 20^\circ\text{C, Tabelle 26 [61]}$$

$$R_e = \frac{10,8 \times 2,0 \times 10^{-3}}{7,2 \times 10^{-6}} = 3000$$

Die Reynolds - Zahl beträgt  $Re=3000$  bei  $10,8 \text{ m/s}$  Strömungsgeschwindigkeit.

4. Die Reynolds - Zahl  $Re=3000$  ist größer als die kritische Reynoldszahl ( $2300$ ), deswegen ist die Strömung turbulent.

5. Aus der kritischen Reynolds – Zahl ist die kritische Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen:

$$\omega_{kr} = \frac{R_{ekr} \nu}{d_{gl}} \quad [60] \quad (6.6)$$

$$R_{ekr} = 2300$$

$$\omega_{kr} = \frac{2300 \times 7,2 \times 10^{-6}}{2,0 \times 10^{-3}} = 8,28 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

5. Aus der kritischen Strömungsgeschwindigkeit ist der kritische Gasdurchfluss zu berechnen:

$$\dot{V}_{kr} = A \omega_{kr} \quad [60] \quad (6.7)$$

$$\dot{V}_{kr} = 15,7 \times 10^{-6} \times 8,28 = 130,0 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} = 0,130 \frac{l}{s} = 7,8 \frac{l}{min}$$

Die kritische Strömungsgeschwindigkeit (Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung) ist 8,28 m/s, das bedeutet einen Gasdurchfluss von 7,8 l/min.

Ergebnisse der Berechnung für die Gasdüse nach **Bild 36**:

1. Aus den bekannten Abmessungen der Gaskanäle **Bild 36**: „Brenner Typ 511. Abmessungen des Innenrohrs. Abmessungen der Gasdüse“ sind der Querschnitt A und der gleichwertige Durchmesser  $d_{gl}$  zu berechnen:

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad [60] \quad (6.8)$$

$$A = 210,2 mm^2 = 210,2 \cdot 10^{-6} m^2$$

$$d_{gl} = D - d \quad [60] \quad (6.9)$$

$$d_{gl} = 8,5 \cdot 10^{-3} m$$

Der Querschnitt des Gaskanals ist 210,2 mm<sup>2</sup>; der gleichwertige Durchmesser ist 8,5 mm.

2. Aus dem angegebenen Gasdurchfluss ist die Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen:

$$\omega = \frac{\dot{V}}{A} \quad [60] \quad (6.4)$$

$$\dot{V} = 10,0 \frac{l}{min} = 0,17 \frac{l}{s} = 0,17 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

$$\omega = 0,8 \frac{m}{s}$$

Die Strömungsgeschwindigkeit ist 0,8 m/s bei 10,0 l/min Gasdurchfluss.

3. Die Reynolds - Zahl  $Re$  wird berechnet nach:

$$R_e = \frac{\omega d_{gl}}{\nu} \quad [60] \quad (6.5)$$

$$\nu = 13,2 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s} \quad \text{für eine Gastemperatur von } 100^\circ\text{C, Tabelle 26 [61]}$$

$$R_e = \frac{0,8 \times 8,5 \times 10^{-3}}{13,2 \times 10^{-6}} = 515$$

Die Reynolds - Zahl beträgt  $Re=515$  bei 0,8 m/s Strömungsgeschwindigkeit.

4. Die Reynolds - Zahl  $Re=515$  ist kleiner als die kritische Reynoldszahl (2300), deswegen ist die Strömung laminar.

5. Aus der kritischen Reynolds - Zahl ist die kritische Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen

$$\omega_{kr} = \frac{R_{ekr} \nu}{d_{gl}} \quad [60] \quad (6.6)$$

$$R_{ekr} = 2300$$

$$\omega_{kr} = \frac{2300 \times 13,2 \times 10^{-6}}{8,5 \times 10^{-3}} = 3,57 \frac{m}{s}$$

6. Aus der kritischen Strömungsgeschwindigkeit wird der kritische Gasdurchfluss berechnet:

$$\dot{V}_{kr} = A \omega_{kr} \quad [60] \quad (6.7)$$

$$\dot{V}_{kr} = 210,2 \times 10^{-6} \times 3,57 = 749,7 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} = 0,7497 \frac{l}{s} = 45,0 \frac{l}{min}$$

Die kritische Strömungsgeschwindigkeit (Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung) ist 3,57 m/s, das bedeutet einen Gasdurchfluss von 45,0 l/min.

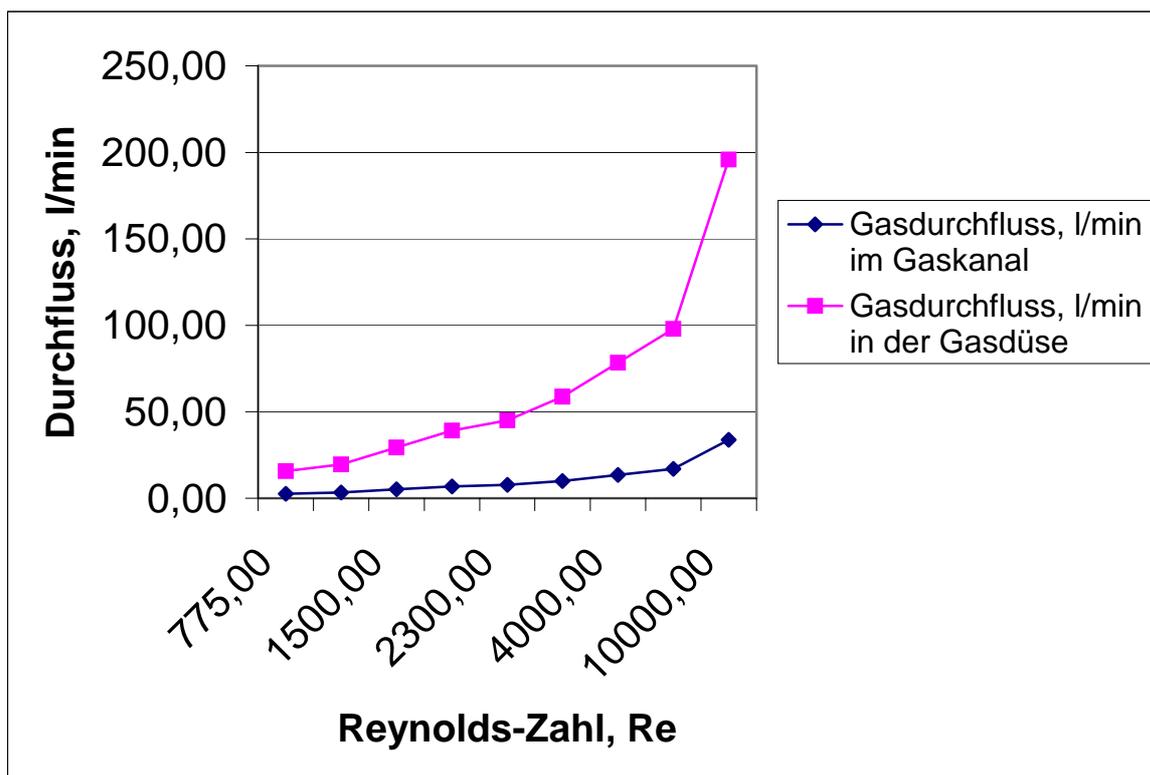
### 6.1.3 Vergleich zwischen Flüssigkeits- und Gaskühlung am Beispiel des Brenners Typ 511

Als erster Schritt werden Diagramme der Abhängigkeit der Nusselt - Zahl  $Nu$  von der Reynolds - Zahl  $Re$  für Kohlendioxyd  $CO_2$  (**Bild 38**) und Wasser  $H_2O$  (**Bild 40**) erstellt.

Um ein Diagramm für Kohlendioxyd  $CO_2$  aufzubauen (**Tabelle 15, Bild 38**), ist es notwendig, folgende Abhängigkeiten zwischen Gasdurchfluss und Reynolds - Zahl  $Re$  (**Tabelle 14, Bild 37**) zu kennen:

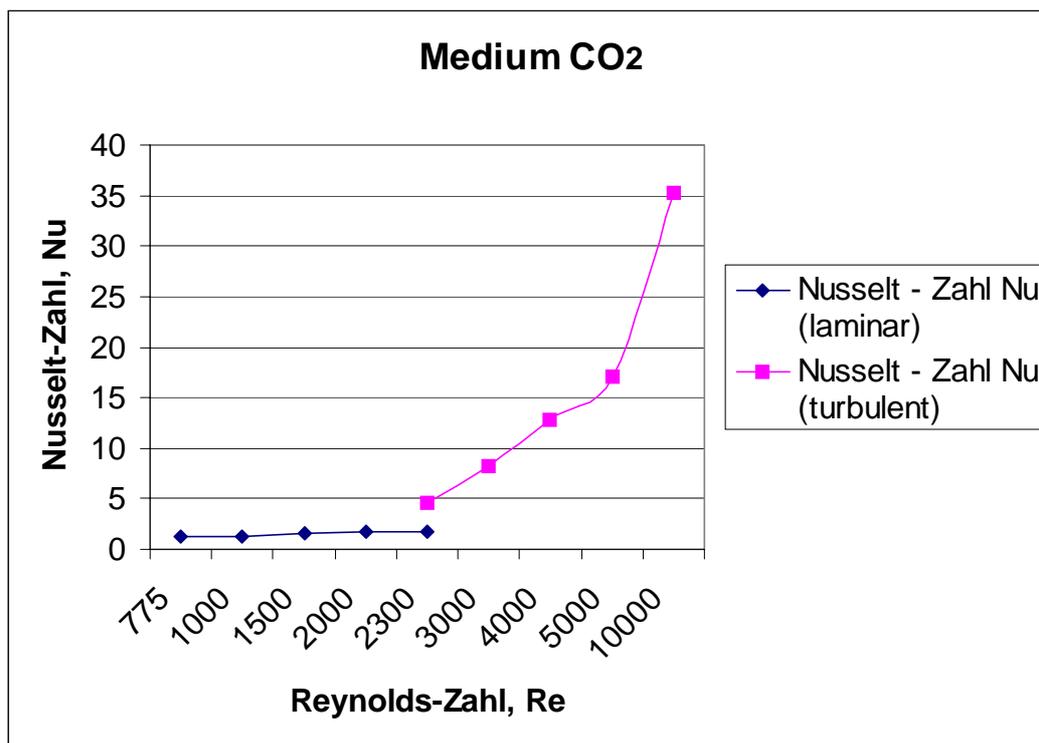
**Tabelle 14:** Berechnete Abhängigkeit zwischen Gasdurchfluss und Reynolds - Zahl Re

Reynolds - Zahl Re	Gasdurchfluss, l/min im Gaskanal	Gasdurchfluss, l/min in der Gasdüse
775	2,62	15,7
1000	3,39	19,58
1500	5,09	29,37
2000	6,78	39,16
<b>2300</b>	<b>7,80</b>	<b>45,00</b>
3000	10,00	58,74
4000	13,56	78,32
5000	16,95	97,90
10000	33,90	195,80

**Bild 37:** Diagramm der Abhängigkeit zwischen Gasdurchfluss und Reynolds - Zahl Re für Kohlendioxid CO<sub>2</sub>

**Tabelle 15:** Berechnete Abhängigkeit zwischen der Reynolds - Zahl Re und Nusselt - Zahl Nu

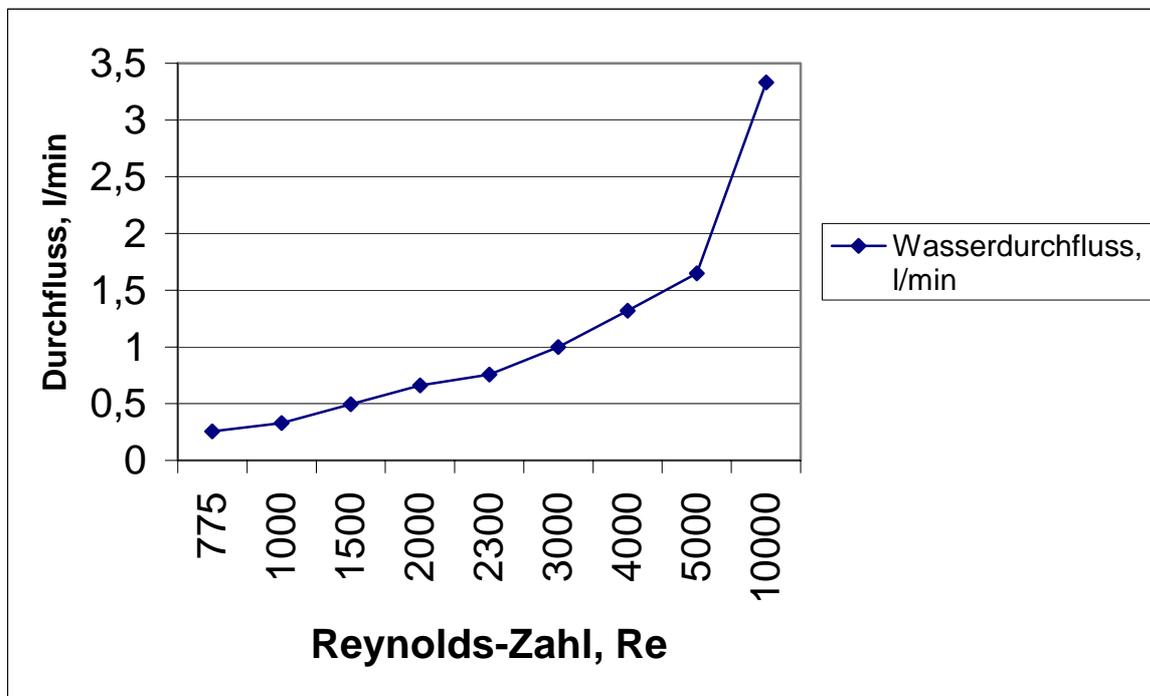
Reynolds - Zahl Re	Nusselt - Zahl Nu
775	1,23
1000	1,33
1500	1,52
2000	1,68
<b>2300 laminar</b>	<b>1,76</b>
<b>2300 turbulent</b>	<b>4,52</b>
3000	8,16
4000	12,82
5000	17,09
10000	35,20

**Bild 38:** Diagramm der Abhängigkeit der Nusselt - Zahl Nu von der Reynolds - Zahl Re für Kohlendioxyd CO<sub>2</sub>

Um das Diagramm für Wasser H<sub>2</sub>O zu erstellen (**Tabelle 17, Bild 40**), ist es notwendig, folgende Abhängigkeit zwischen Wasserdurchfluss und Reynolds - Zahl Re (**Tabelle 16, Bild 39**) zu kennen:

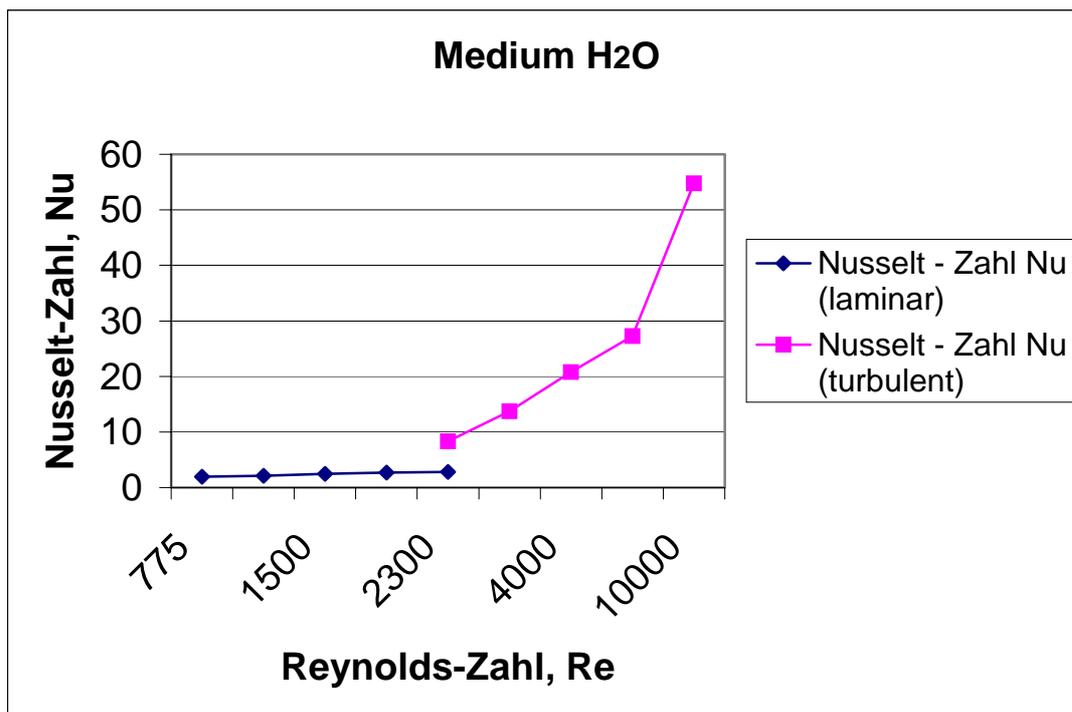
**Tabelle 16:** Berechnete Abhängigkeit zwischen Wasserdurchfluss und Reynolds - Zahl Re

Reynolds - Zahl Re	Wasserdurchfluss, l/min
775	0,255
1000	0,330
1500	0,495
2000	0,660
<b>2300</b>	<b>0,756</b>
3000	1,000
4000	1,320
5000	1,650
10000	3,330

**Bild 39:** Diagramm der Abhängigkeit zwischen Wasserdurchfluss und Reynolds - Zahl Re für Wasser H<sub>2</sub>O

**Tabelle 17:** Berechnete Abhängigkeit zwischen der Reynolds - Zahl Re und Nusselt - Zahl Nu

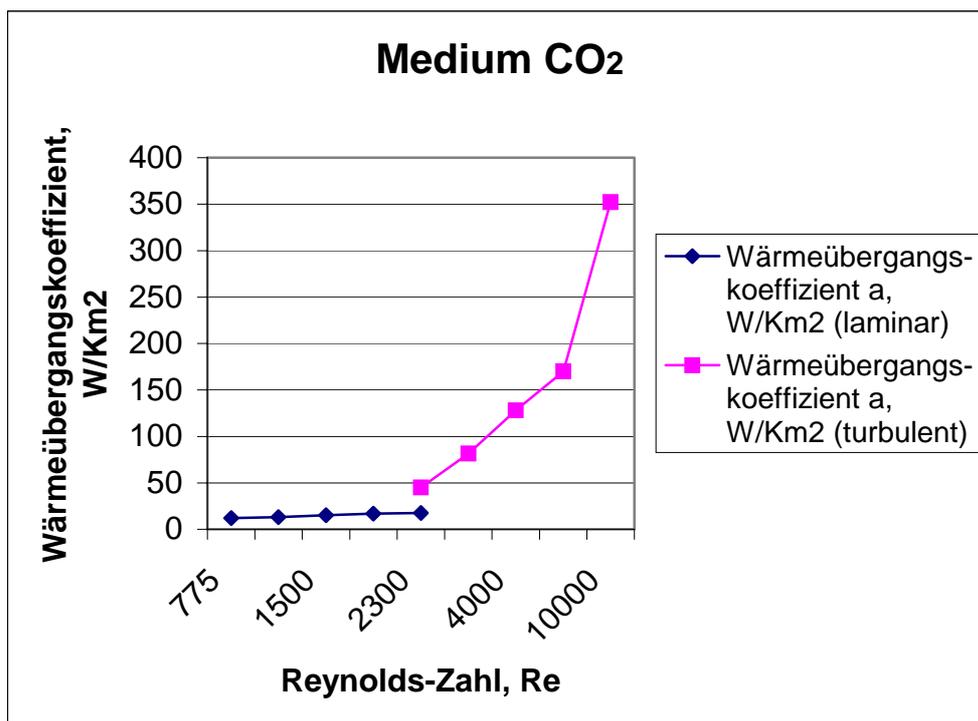
Reynolds - Zahl Re	Nusselt - Zahl Nu
775	1,98
1000	2,15
1500	2,46
2000	2,70
<b>2300 laminar</b>	<b>2,83</b>
<b>2300 turbulent</b>	<b>8,30</b>
3000	13,70
4000	20,80
5000	27,25
10000	54,80

**Bild 40:** Diagramm der Abhängigkeit der Nusselt - Zahl Nu von der Reynolds - Zahl Re für Wasser H<sub>2</sub>O

Als zweiter Schritt werden Diagramme der Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  von der Reynolds - Zahl Re für Kohlendioxyd CO<sub>2</sub> (**Bild 41**) und Wasser H<sub>2</sub>O (**Bild 42**) erstellt.

**Tabelle 18:** Berechnete Abhängigkeit zwischen Reynolds - Zahl  $Re$  und Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  für Kohlendioxyd  $CO_2$

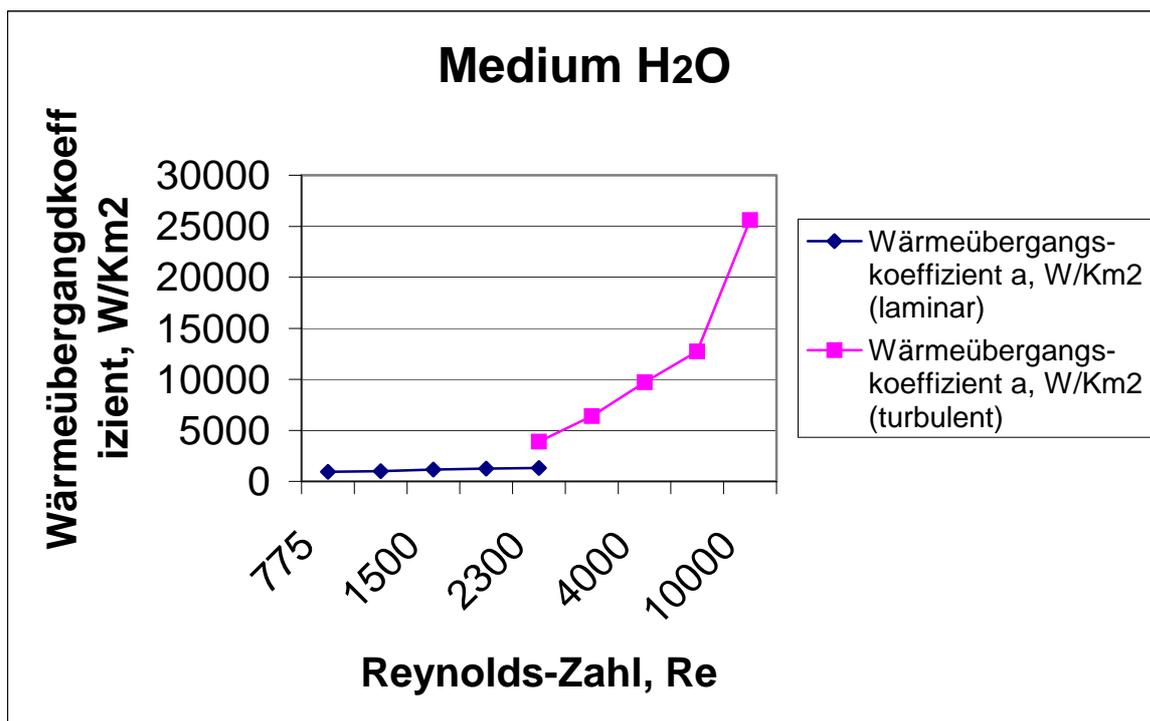
Reynolds - Zahl $Re$	Wärmeübergangskoeffizient $\alpha$ , $W/Km^2$
775	12,0
1000	13,0
1500	15,2
2000	16,8
<b>2300 laminar</b>	<b>17,6</b>
<b>2300 turbulent</b>	<b>45,2</b>
3000	81,5
4000	128,2
5000	170,0
10000	352,0



**Bild 41:** Diagramm der Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  von der Reynolds - Zahl  $Re$  für Kohlendioxyd  $CO_2$

**Tabelle 19:** Berechnete Abhängigkeit zwischen Reynolds - Zahl  $Re$  und Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  für Wasser  $H_2O$

Reynolds - Zahl $Re$	Wärmeübergangskoeffizient $\alpha$ , $W/Km^2$
775	925
1000	1004
1500	1149
2000	1261
<b>2300 laminar</b>	<b>1321</b>
<b>2300 turbulent</b>	<b>3877</b>
3000	6400
4000	9720
5000	12729
10000	25600

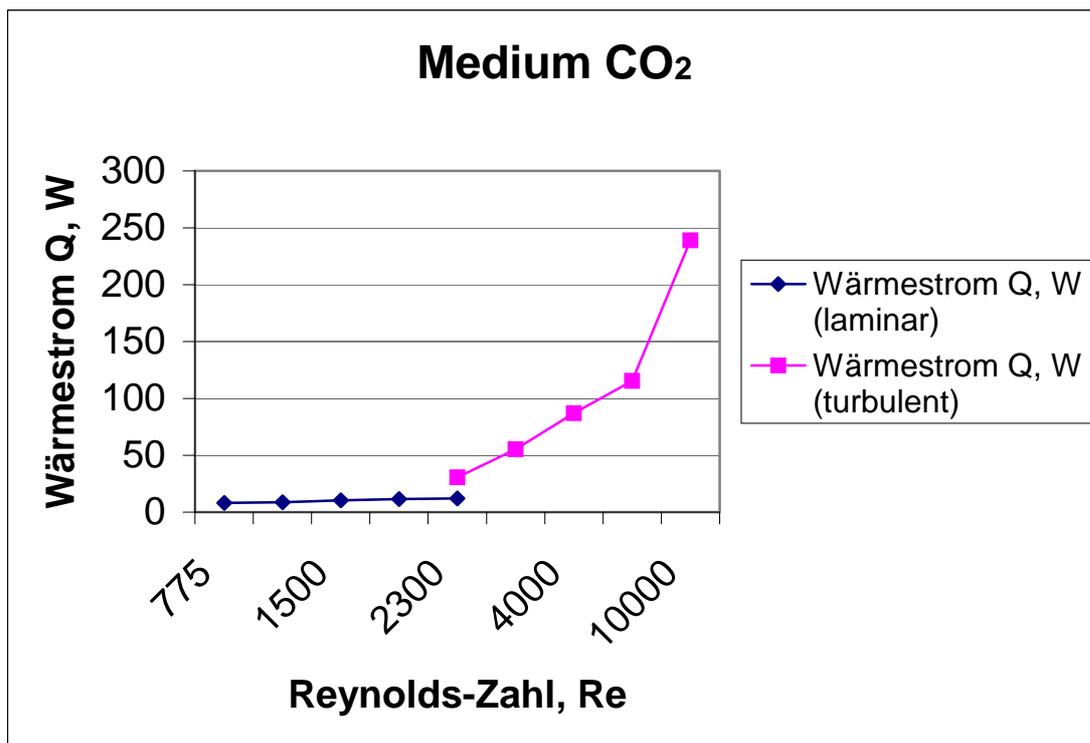


**Bild 42:** Diagramm der Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  von der Reynolds - Zahl  $Re$  für Wasser  $H_2O$

Als dritter Schritt werden Diagramme der Abhängigkeit des Wärmestroms  $Q$  von der Reynolds - Zahl  $Re$  für Kohlendioxyd  $CO_2$  (**Bild 43**) und Wasser  $H_2O$  (**Bild 44**) ermittelt.

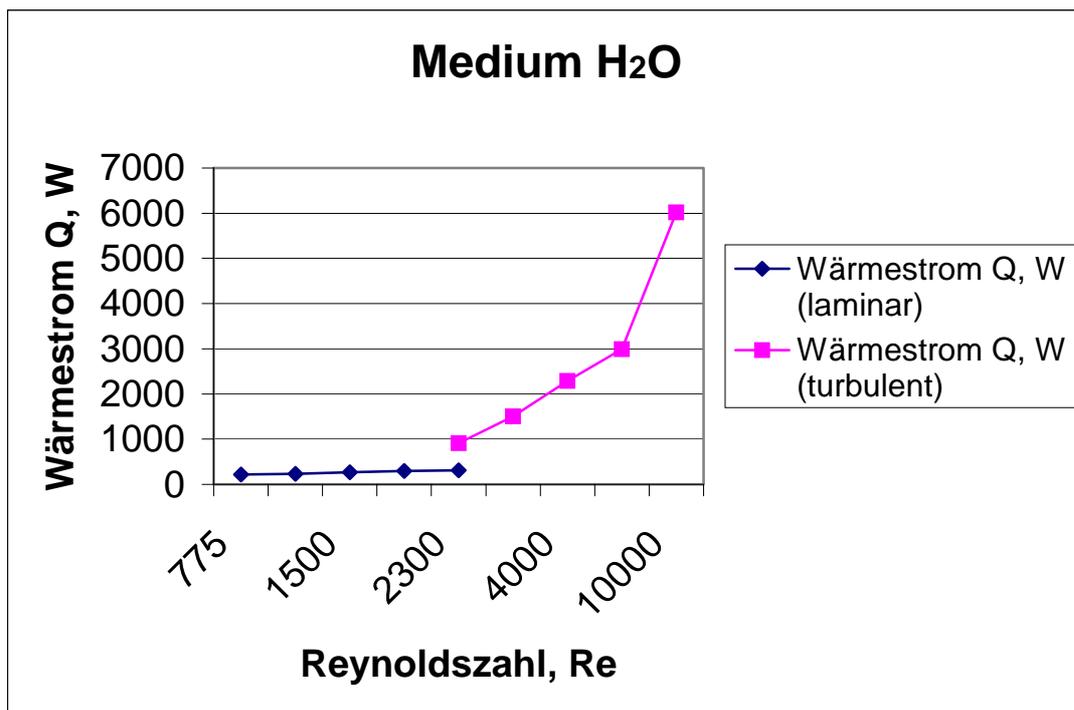
**Tabelle 20:** Berechnete Abhängigkeit zwischen Reynolds - Zahl Re und Wärmestrom Q für Kohlendioxyd CO<sub>2</sub>

Reynolds - Zahl Re	Wärmestrom Q, W
775	8,15
1000	8,83
1500	10,32
2000	11,41
<b>2300 laminar</b>	<b>11,95</b>
<b>2300 turbulent</b>	<b>30,70</b>
3000	55,35
4000	87,07
5000	115,46
10000	239,08

**Bild 43:** Diagramme der Abhängigkeit des Wärmestroms Q von der Reynolds - Zahl Re für Kohlendioxyd CO<sub>2</sub>

**Tabelle 21:** Berechnete Abhängigkeit zwischen der Reynolds - Zahl  $Re$  und dem Wärmestrom  $Q$  für Wasser  $H_2O$ 

Reynolds - Zahl $Re$	Wärmestrom $Q$ , W
775	217,49
1000	236,06
1500	269,31
2000	296,34
<b>2300 laminar</b>	<b>310,59</b>
<b>2300 turbulent</b>	<b>911,56</b>
3000	1504,80
4000	2285,37
5000	2992,84
10000	6019,07

**Bild 44:** Diagramme der Abhängigkeit des Wärmestroms  $Q$  von der Reynolds - Zahl  $Re$  für Wasser  $H_2O$

#### 6.1.4 Fragen der Effektivität der Zwangskühlung. Auswertung und Schlussfolgerungen zur weiteren Optimierung

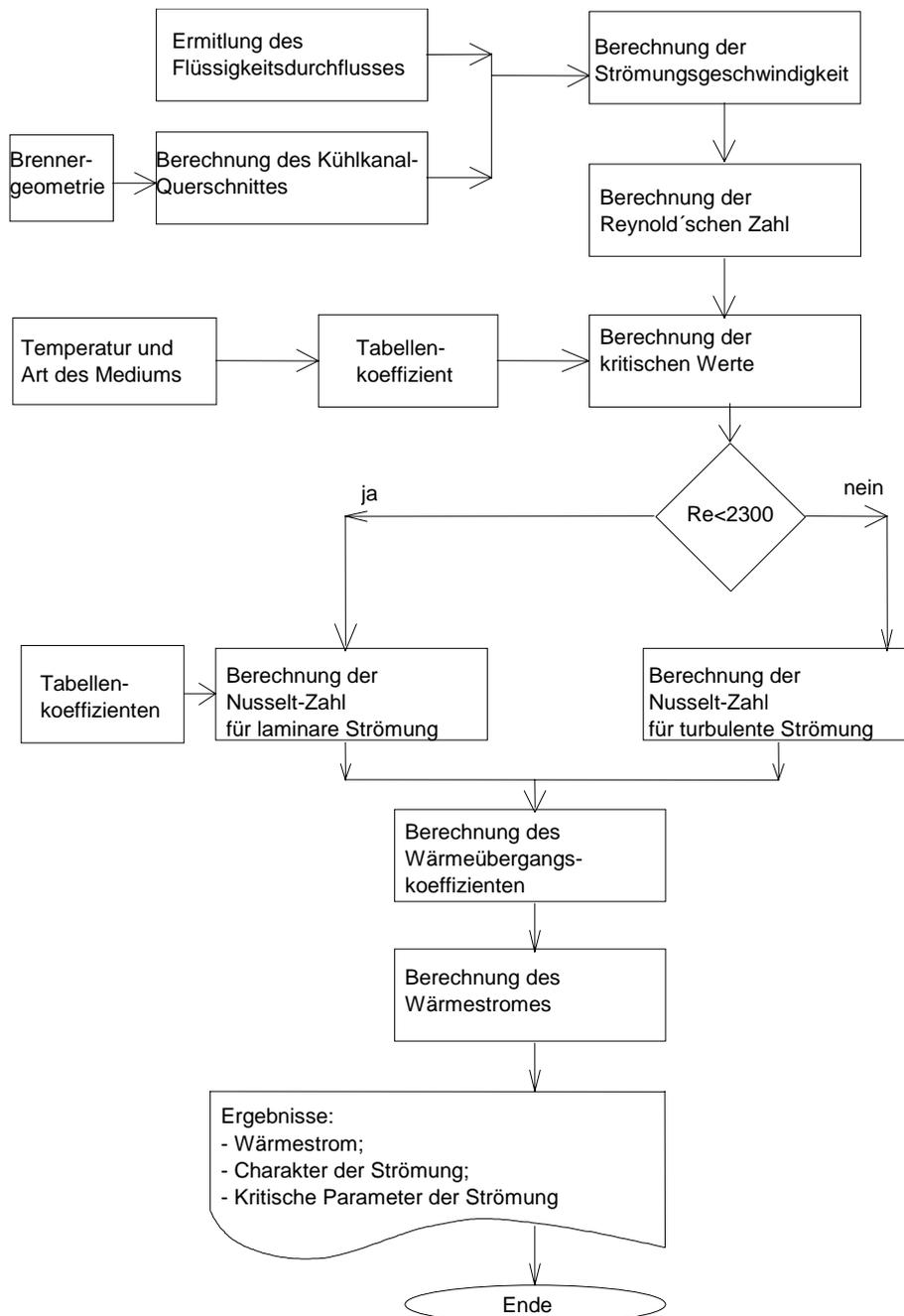
Wasser  $H_2O$  und Kohlendioxyd  $CO_2$  unterscheiden sich sehr stark als Kühlmedien. Der Grund dafür liegt in den sehr unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften und im unterschiedlichen Aggregatzustand: Flüssigkeit und Gas. Die Diagramme (**Bild 41, 42**) zeigen, wie stark sich die Wärmeübergangskoeffizienten für  $CO_2$  und  $H_2O$  unterscheiden und dass sich ein Sprung beim Übergang von laminaren zu turbulenten Strömungen ergibt. Es charakterisiert die Fähigkeit dieser Medien zur Wärmeaufnahme. Das Wasser ist in der Lage, bei gleicher Reynolds - Zahl  $Re$  mehr Wärme aufzunehmen als Kohlendioxyd. Im Diagramm (**Bild 44**) ist zu sehen, wie groß der Wärmestrom  $Q$  des Innenrohrs im Wasser ist. Der Wärmestrom im Gas (**Bild 43**) ist dagegen sehr gering. Den Wärmestrom  $Q$  des Innenrohrs im Kühlmedium, könnte man durch folgende Maßnahmen erhöhen:

- die Kühloberfläche vergrößern,
- die Anfangstemperatur des Kühlmediums senken,
- den Wärmeübergangskoeffizient durch höhere Strömungsgeschwindigkeit erhöhen.

Betrachten wir zuerst die Maßnahmen, die keine großen Konstruktionsänderungen erfordern. Die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit scheint richtig zu sein. Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit von Schutzgas führt zum unstabilen Schutz der Schweißnaht und ist deswegen sinnlos. Möglich ist nur eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit von Wasser. Dafür spricht auch, dass die Flüssigkeitskühlung nach **Bild 42** einen wesentlich größeren Anteil an der Wärmeaufnahme aus den Kühlkanälen im Schweißbrenner hat. Natürlich können nur praktische Untersuchungen die Effizienzgrenze der Flüssigkeitskühlung aufzeigen.

### 6.1.5 Erstellung eines Algorithmus zur mathematischen Berechnung und Analyse der Prozesscharakteristiken der Flüssigkeitskühlung

Für die mathematische Berechnung und Optimierung der Flüssigkeitskühlung wird ein Algorithmus vorgeschlagen, der im **Bild 45** dargestellt ist.



**Bild 45:** Algorithmus zur mathematischen Berechnung und Analyse der Prozesscharakteristiken der Flüssigkeitskühlung

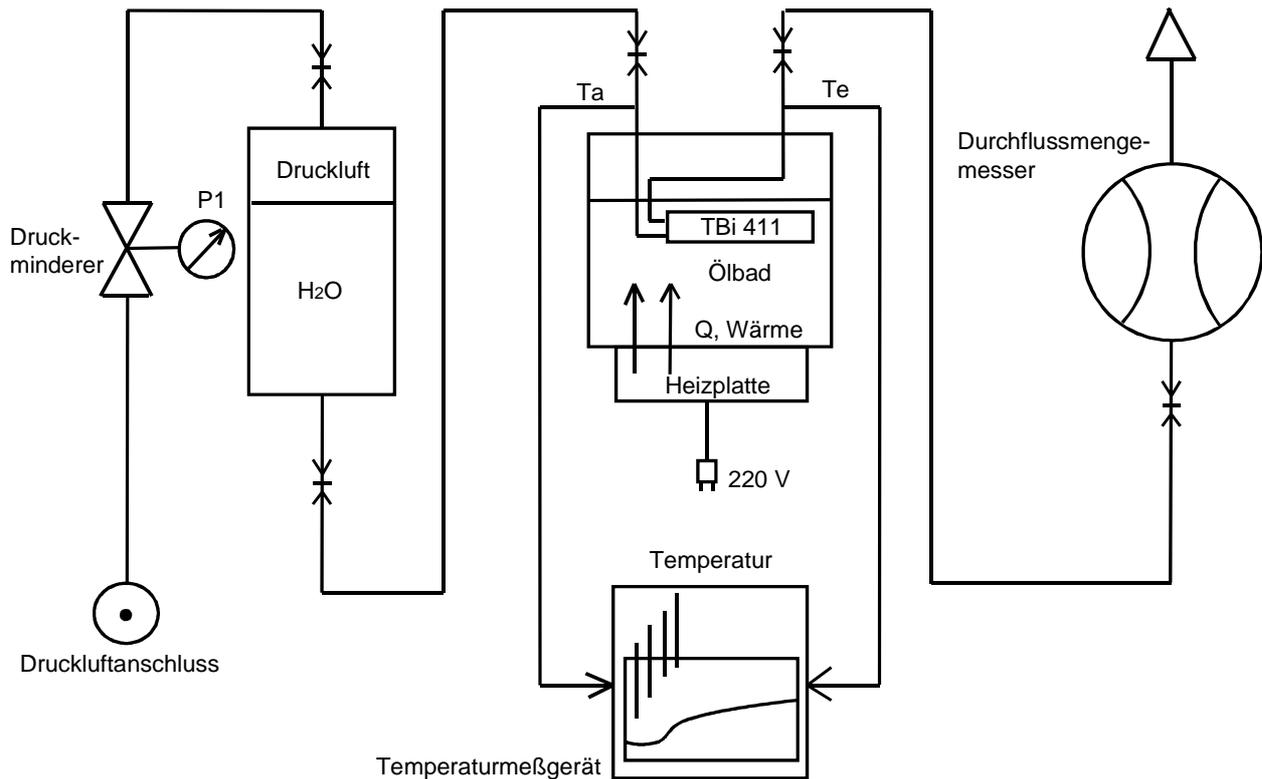
## 6.2 Experimentelle Untersuchungen zur weiteren Optimierung der Flüssigkeitskühlung

Die praktischen Untersuchungen sollen die Richtigkeit der theoretischen Betrachtungen über die Möglichkeiten der Flüssigkeitskühlung bestätigen. Wichtig ist zu der Nachweis, dass der Wärmestrom  $Q$  mit der Zunahme des Wasserdurchflusses steigt, (Steigerung der Reynolds - Zahl  $Re$ ). Weiterhin ist wichtig, wo die optimalen Parameter der Wasserkühlung liegen, (maximale Wärmeaufnahme aus den Kühlkanälen). Dazu wurden zwei Versuche durchgeführt. Der erste Versuch mit einer Simulation der Erwärmung des Innenrohrs in heißem Ölbad sollte zeigen, wie und in welcher Menge die Wärmeaufnahme erfolgt. Der zweite Versuch durch praktisches Schweißen sollte zeigen, wie die Hochleistungskühlung die Temperaturbilanz in einem Brenner beeinflusst.

### 6.2.1 Untersuchung des Einflusses von erhöhtem Wasserdurchfluss auf die Wärmeaufnahme in erwärmten Kühlkanälen des Brenners Typ 411

Für diesen Versuch wurde ein Versuchsstand (**Bilder 47 und 48**) konstruiert und nach **Bild 46**. „Schema des Versuchsstandes für die Untersuchung des Einflusses eines erhöhten Wasserdurchflusses auf die Wärmeaufnahme in erwärmten Kühlkanälen des Brenner Typ 411“ aufgebaut. Der Versuchsstand hat folgendes Funktionsprinzip: Luft mit einem durch einen Druckminderer vorgegebenen Druck drückt Wasser aus dem Druckbehälter in das Innenrohr des Brenners Typ 411. Das Innenrohr liegt in einem geschlossenen Schnellkochtopf im Ölbad (3 Liter Pflanzenöl).

Das Ölbad wird bis zu 200°C von einer Herdplatte mit Regler vorgewärmt. Das Wasser fließt durch die Kühlkanäle im Innenrohr und nimmt Wärme auf. Die Anfangstemperatur  $T_a$  und die Endtemperatur  $T_e$  werden mit einem Temperaturmessgerät registriert. Am Ausgang wird auch der Wasserdurchfluss gemessen. Aus dem Temperaturunterschied  $T_e - T_a$  und dem Wasserdurchfluss, kann man den Wärmestrom im Innenrohr bestimmen.



**Bild 46:** Schema des Versuchszustandes für die Untersuchung des Einflusses von erhöhtem Wasserdurchfluss auf die Wärmeaufnahme in erwärmten Kühlkanälen des Brenners Typ 411



**Bild 47:** Untersuchung des Einflusses eines erhöhten Wasserdurchflusses auf die Wärmeaufnahme im erwärmten Kühlkanal des Brenners Typ 411

Versuchsbedingungen:



**Bild 48:** Innenrohr des Brenners Typ 411

Der Wasserdurchfluss wurde von 0,3 bis zu 4,0 l/min variiert. Die Temperatur des Ölbad im Schnellkochtopf wurde mit 200°C konstant gehalten. Die Anfangstemperatur des Wassers betrug den jeweiligen Wasserleitungstemperatur. Insgesamt wurden drei Versuche mit drei Messungen für jeden der folgenden Werte der Durchflussmenge: 0,3; 0,5; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,5; 4,0 l/min durchgeführt.

Die Versuchsergebnisse sind in den folgenden **Tabellen 22, 23, 24, 25** dargestellt:

**Tabelle 22:** Versuch 1

Wasserdurchfluss		Messungen der Temperatur des Kühlwassers, °C									
		Messreihe 1			Messreihe 2			Messreihe 3			
l/min	l/h	T <sub>a</sub>	T <sub>e</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>e</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>e</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>m1</sub>
0,3	20	15,8	39,6	<b>23,8</b>	15,9	39,8	<b>23,9</b>	15,9	39,8	<b>23,9</b>	<b>23,87</b>
0,5	30	11,9	33,2	<b>21,3</b>	11,9	32,8	<b>20,9</b>	11,9	33,4	<b>21,5</b>	<b>21,23</b>
0,6	40	13,8	31,6	<b>17,8</b>	13,5	31,9	<b>18,4</b>	13,4	31,0	<b>17,6</b>	<b>17,93</b>
1,0	60	12,0	25,8	<b>13,8</b>	12,1	26,3	<b>14,2</b>	12,1	26,3	<b>14,2</b>	<b>14,07</b>
1,5	90	13,7	25,1	<b>11,4</b>	13,8	25,2	<b>11,4</b>	13,9	25,3	<b>11,4</b>	<b>11,40</b>
2,0	120	12,5	24,0	<b>11,5</b>	12,2	23,8	<b>11,6</b>	12,2	23,8	<b>11,6</b>	<b>11,57</b>
2,5	150	12,3	22,4	<b>10,1</b>	12,1	22,0	<b>9,9</b>	12,1	22,0	<b>9,9</b>	<b>9,97</b>
3,5	200	12,0	21,5	<b>9,5</b>	12,0	21,5	<b>9,5</b>	12,0	21,5	<b>9,5</b>	<b>9,50</b>
4,0	240	14,0	20,7	<b>6,7</b>	14,0	20,7	<b>6,7</b>	14,0	20,8	<b>6,8</b>	<b>6,73</b>

**Tabelle 23:** Versuch 2

Wasserdurchfluss		Messungen der Temperatur des Kühlwassers, °C									
		Messreihe 1			Messreihe 2			Messreihe 3			
l/min	l/h	T <sub>a</sub>	T <sub>e</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>e</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>e</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>m2</sub>
0,3	20	11,8	38,9	<b>27,1</b>	11,6	37,5	<b>25,9</b>	11,3	37,5	<b>26,2</b>	<b>26,40</b>
0,5	30	13,6	34,5	<b>20,9</b>	13,6	35,1	<b>21,5</b>	13,6	34,5	<b>20,9</b>	<b>21,10</b>
0,6	40	14,3	33,2	<b>18,9</b>	14,4	33,1	<b>18,7</b>	14,4	33,1	<b>18,7</b>	<b>18,77</b>
1,0	60	12,8	27,8	<b>15,0</b>	12,7	27,2	<b>14,5</b>	12,7	27,0	<b>14,3</b>	<b>14,60</b>
1,5	90	12,2	24,2	<b>12,0</b>	12,2	24,1	<b>11,9</b>	12,2	24,1	<b>11,9</b>	<b>11,93</b>
2,0	120	13,7	24,7	<b>11,0</b>	13,6	24,6	<b>11,0</b>	13,6	24,6	<b>11,0</b>	<b>11,00</b>
2,5	150	13,1	24,5	<b>11,4</b>	13,4	23,4	<b>10,0</b>	13,4	23,3	<b>9,9</b>	<b>10,43</b>
3,5	200	12,5	22,0	<b>9,5</b>	12,5	22,0	<b>9,5</b>	12,5	22,0	<b>9,5</b>	<b>9,50</b>
4,0	240	13,6	22,0	<b>8,4</b>	13,6	21,8	<b>8,2</b>	13,6	21,7	<b>8,1</b>	<b>8,23</b>

**Tabelle 24:** Versuch 3

Wasserdurchfluß		Messungen der Temperatur des Kühlwassers, °C									
		Messreihe 1			Messreihe 2			Messreihe 3			
l/min	l/h	T <sub>a</sub>	T <sub>e</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>e</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>e</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>m3</sub>
0,3	20	12,5	39,2	<b>26,7</b>	12,4	39,2	<b>26,8</b>	12,4	39,2	<b>26,8</b>	<b>26,77</b>
0,5	30	14,7	34,5	<b>19,8</b>	14,7	35,0	<b>20,3</b>	14,7	35,0	<b>20,3</b>	<b>20,13</b>
0,6	40	15,4	33,6	<b>18,2</b>	15,3	33,6	<b>18,3</b>	15,3	33,6	<b>18,3</b>	<b>18,27</b>
1,0	60	13,9	28,4	<b>14,5</b>	13,7	28,3	<b>14,6</b>	13,9	28,0	<b>14,1</b>	<b>14,40</b>
1,5	90	12,2	24,2	<b>12,0</b>	12,2	24,2	<b>12,0</b>	12,2	24,2	<b>12,0</b>	<b>12,00</b>
2,0	120	12,1	22,1	<b>10,0</b>	12,0	21,9	<b>9,9</b>	12,0	21,9	<b>9,9</b>	<b>9,93</b>
2,5	150	12,9	23,1	<b>10,2</b>	12,9	23,2	<b>10,3</b>	13,1	23,0	<b>9,9</b>	<b>10,13</b>
3,5	200	13,2	22,4	<b>9,2</b>	13,1	22,4	<b>9,3</b>	13,1	22,4	<b>9,3</b>	<b>9,27</b>
4,0	240	16,0	24,0	<b>8,0</b>	16,0	23,5	<b>7,5</b>	16,0	23,6	<b>7,6</b>	<b>7,70</b>

**Tabelle 25:** Auswertung der drei Versuche. Mittelwert des Temperaturunterschieds

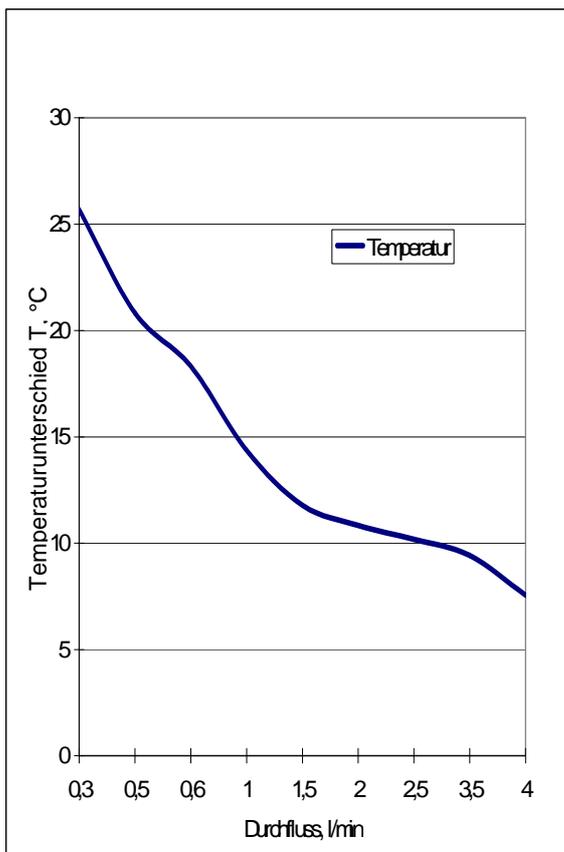
Wasserdurchfluss		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Mittelwert	Kühlleistung
l/min	l/h	T <sub>m1</sub> , °C	T <sub>m2</sub> , °C	T <sub>m3</sub> , °C	T <sub>m</sub> , °C	Q, W
0,3	20	23,87	26,40	26,77	<b>25,68</b>	<b>596,8</b>
0,5	30	21,23	21,10	20,13	<b>20,82</b>	<b>725,8</b>
0,6	40	17,93	18,77	18,27	<b>18,32</b>	<b>851,5</b>
1,0	60	14,07	14,60	14,40	<b>14,36</b>	<b>1001,1</b>
1,5	90	11,40	11,93	12,00	<b>11,78</b>	<b>1231,9</b>
2,0	120	11,57	11,00	9,93	<b>10,83</b>	<b>1510,1</b>
2,5	150	9,97	10,43	10,13	<b>10,18</b>	<b>1774,3</b>
3,5	200	9,50	9,50	9,27	<b>9,42</b>	<b>2189,1</b>
4,0	240	6,73	8,23	7,70	<b>7,55</b>	<b>2105,4</b>

Dabei ist:  $T_i = T_{ei} - T_{ai}$  - Temperaturunterschied in eine Messreihe;  $T_{mi}$  - Mittelwert des Temperaturunterschieds in einem Versuch;  $T_m$  - Mittelwert des Temperaturunterschieds.

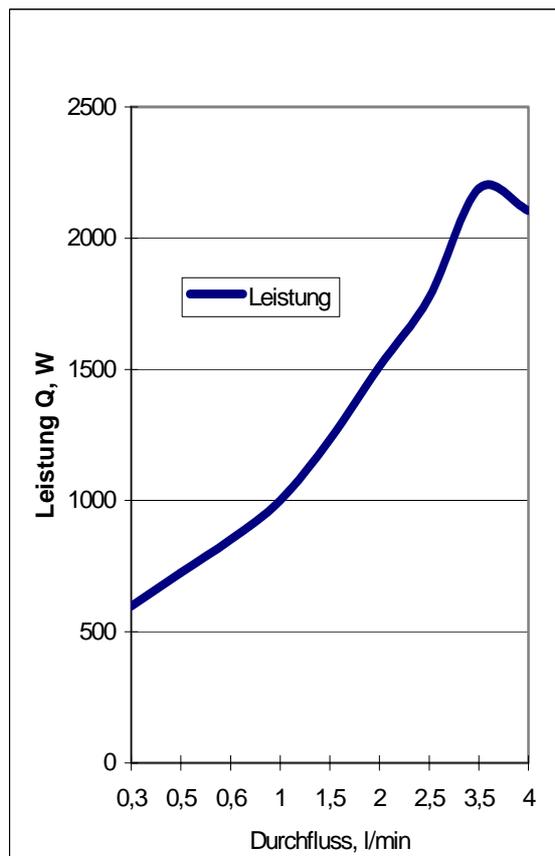
Die Versuchsergebnisse sind im „Diagramm der Temperaturunterschiede in Abhängigkeit von der Durchflussmenge der Kühlflüssigkeit“ (**Bild 49**) und im „Diagramm der Wärmeaufnahme in Abhängigkeit von der Durchflussmenge der Kühlflüssigkeit“ (**Bild 50**) dargestellt.

Es wurde ein Optimum des Wasserdurchflusses für den Brenner Typ 411 gefunden, der bei 3,5 l/min liegt. In der Praxis wird dieser nur mit einer Durchflussmenge von 1,5 l/min

gekühlt. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, den Wirkungsgrad sowie die Effizienz der Flüssigkeitskühlung zu erhöhen.



**Bild 49:** Diagramm der Temperaturunterschiede in Abhängigkeit von der Durchflussmenge der Kühlflüssigkeit

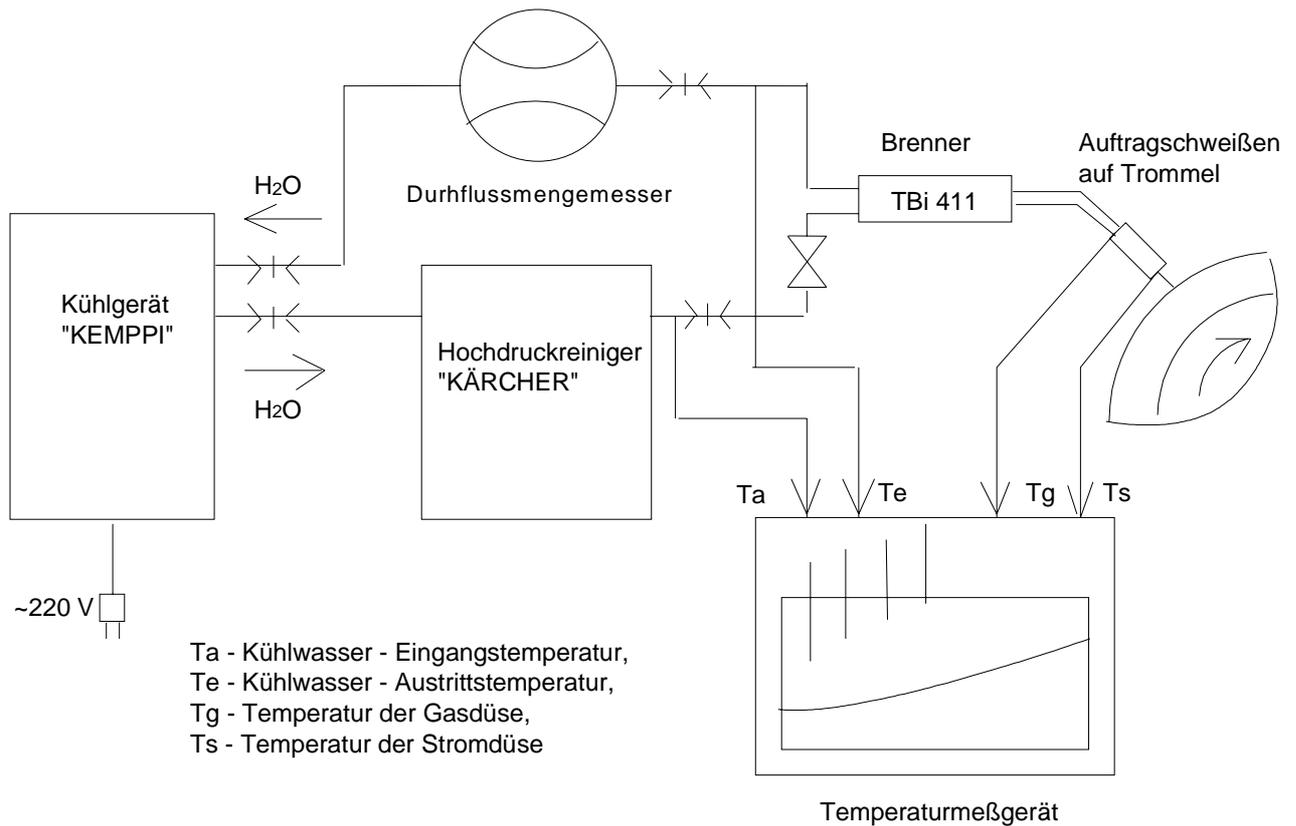


**Bild 50:** Diagramm der Wärmeaufnahme in Abhängigkeit von der Durchflussmenge der Kühlflüssigkeit

## 6.2.2 Untersuchung des Brenners Typ 411 mit Hochleistungskühlung

Um den Einfluss der Hochleistungskühlung auf die Temperaturbilanz in einem Brenner beim praktischen Schweißen zu untersuchen, wurde ein Versuchsstand entsprechend dem „Schema der Versuchseinrichtung für die Untersuchung des Brenners Typ 411 mit Hochleistungskühlung“ (**Bild 51**), aufgebaut.

Mit dem Brenner Typ 411 wurde das Auftragsschweißen auf der Trommel zunächst mit  $I=270$  A,  $U=30$  V und dann mit  $I=320$  A,  $U=34$  V durchgeführt. Der Wasserdurchfluss 100, 200, 300 l/h wurde durch einen „KÄRCHER“ Hochdruckreiniger erzeugt. Als Ergebnis der Kühlung wurde die Temperatur an der Strom- und an der Gasdüse während des Schweißens gemessen.



**Bild 51:** Schema der Versuchseinrichtung für die Untersuchung des Brenners Typ 411 mit Hochleistungskühlung

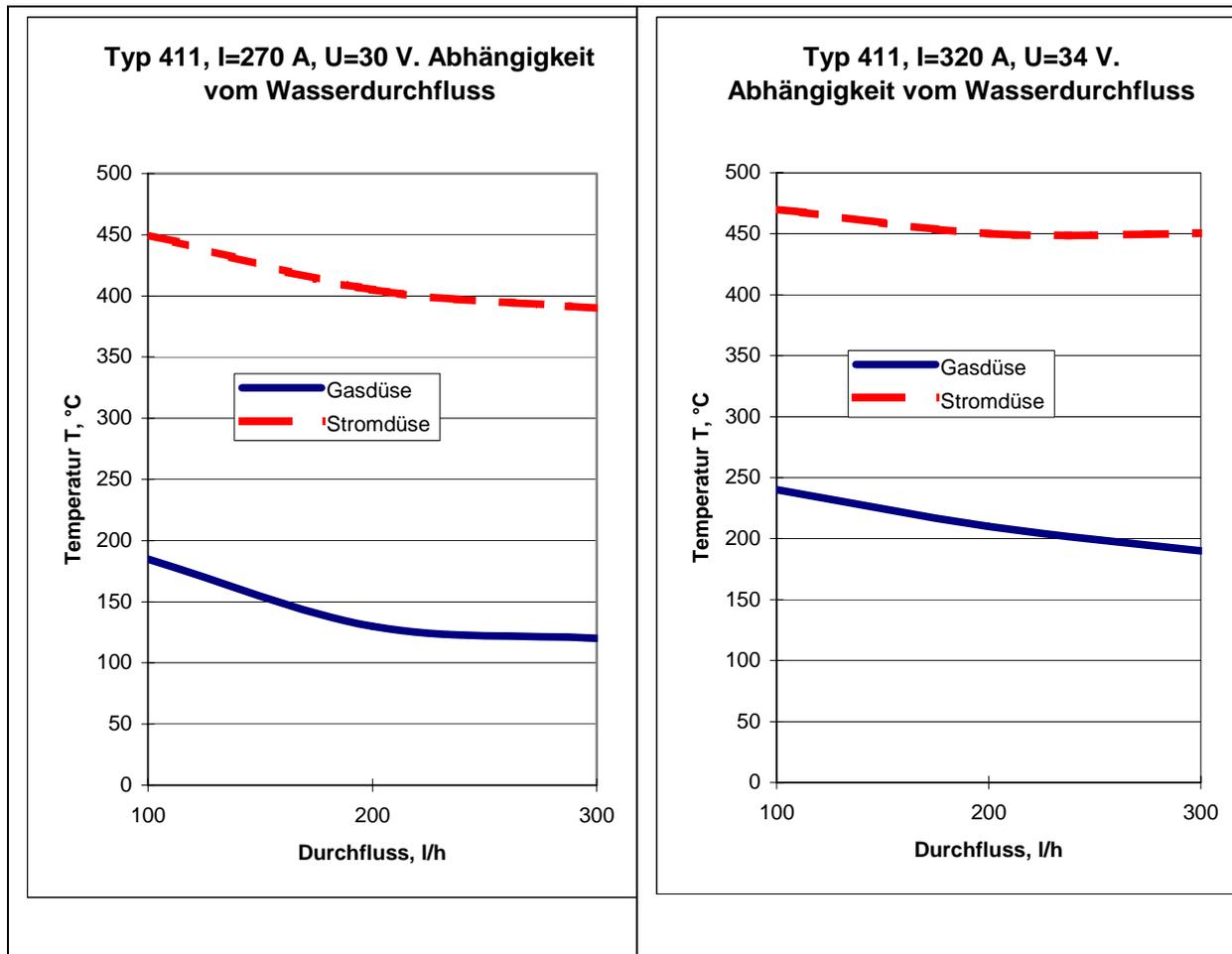
Diese Messergebnisse sind in der Anlage in den Tabellen und Diagrammen dargestellt. Die resultierenden Ergebnisse, die die Abhängigkeit der maximalen Werte der Temperatur der Strom- und Gasdüse des Brenners Typ 411 vom Wasserdurchfluss zeigen, sind in den **Tabellen 26, 27** und in **Bild 52** zu sehen.

**Tabelle 26:** Temperatur im Brenner Typ 411,  $I=270$  A,  $U=30$  V

Wasserdurchfluss, l/h	T°C Gasdüse	T°C Stromdüse
100	185	450
200	130	405
300	120	390

**Tabelle 27:** Temperatur im Brenner Typ 411,  $I=320$  A,  $U=34$  V

Wasserdurchfluss, l/h	T°C Gasdüse	T°C Stromdüse
100	240	470
200	210	450
300	190	450



**Bild 52:** Temperatur im Brenner Typ 411, I=270 A, U=30 V, in Abhängigkeit vom Wasserdurchfluss. Temperatur im Brenner Typ 411, I=320 A, U=34 V, in Abhängigkeit vom Wasserdurchfluss.

### 6.3 Entwicklung eines Gerätes zur Verstärkung der Kühlwirkung in den flüssigkeitsgekühlten Brennern

Nach den Versuchsergebnissen wurde entschieden, ein Hochleistungskühlgerät (**Bild 53**) zu entwickeln und aufzubauen. Der Entwicklung wurde folgendes Konzept zu Grunde gelegt: das Gerät soll eine Zwischenstation zwischen dem Wasserkühlgerät und einem oder mehreren wassergekühlten Brenner sein. Das Gerät muss universell sein, also zur jeder Schweißmaschine und an jeden Schweißbrenner passen (**Bild 54**). Das Hochleistungskühlgerät soll folgende Funktionen ausführen:

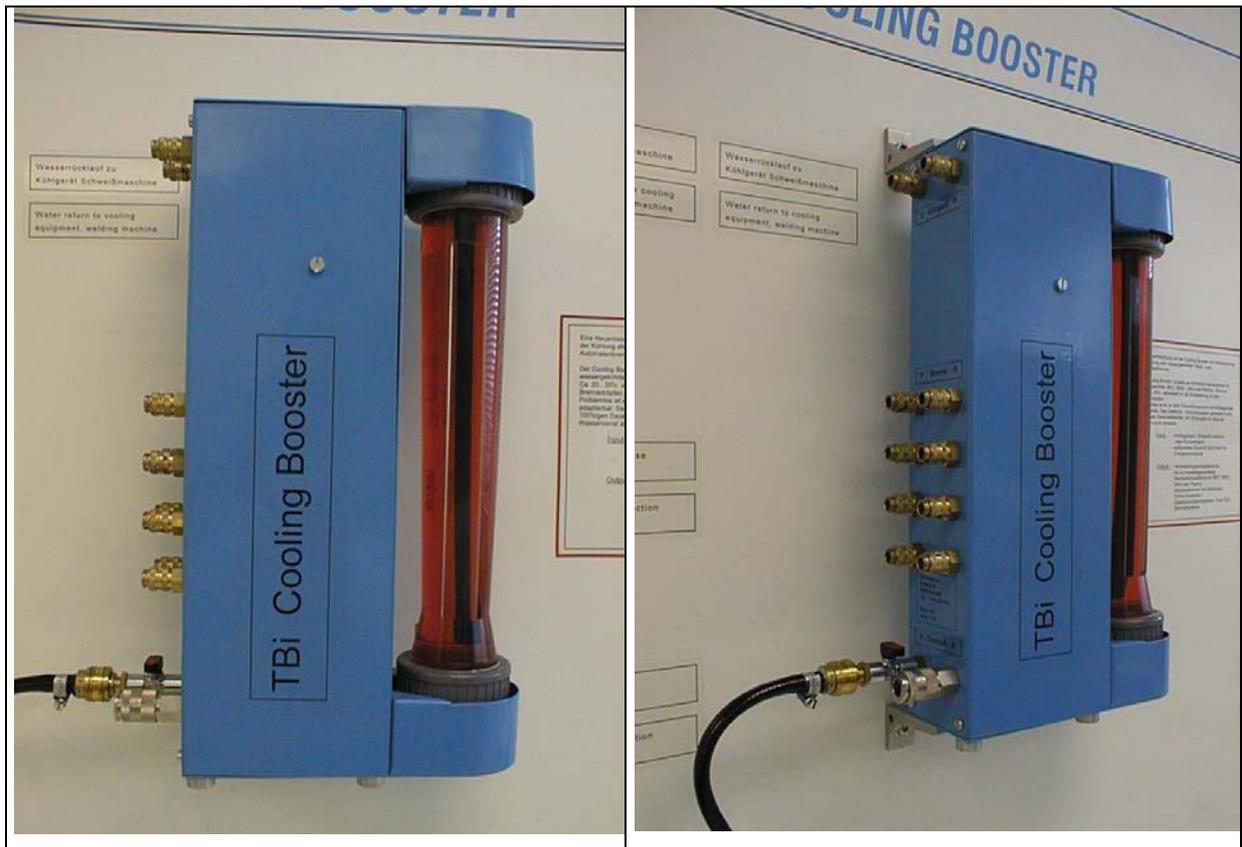
- mit hohem Druck und Durchfluss Wasser in den Brenner schicken,
- erwärmtes Wasser aus dem Brenner mit kaltem Wasser aus dem Kühlgerät miteinander mischen, um Wärme auszutauschen.

Das Gerät besteht aus folgenden Blöcke: Wasserpumpe, Antriebsmotor, Tauschbehälter. Die Pumpe erhöht den Wasserdurchfluss durch die Kühlkanäle im Brenner. Bei konstant bleibendem Querschnitt der Kühlkanäle erhöhen sich Reibung und Turbulenz des Wassers und als Folge die Wärmeabnahme aus dem Schweißbrenner. Der notwendige nominale Wasserdruck beträgt 10 bar, der Wasserdurchfluss 200 l/h. Das Gerät muss geringe Abmessungen und möglichst leicht sein und sehr einfach in der Bedienung sein.

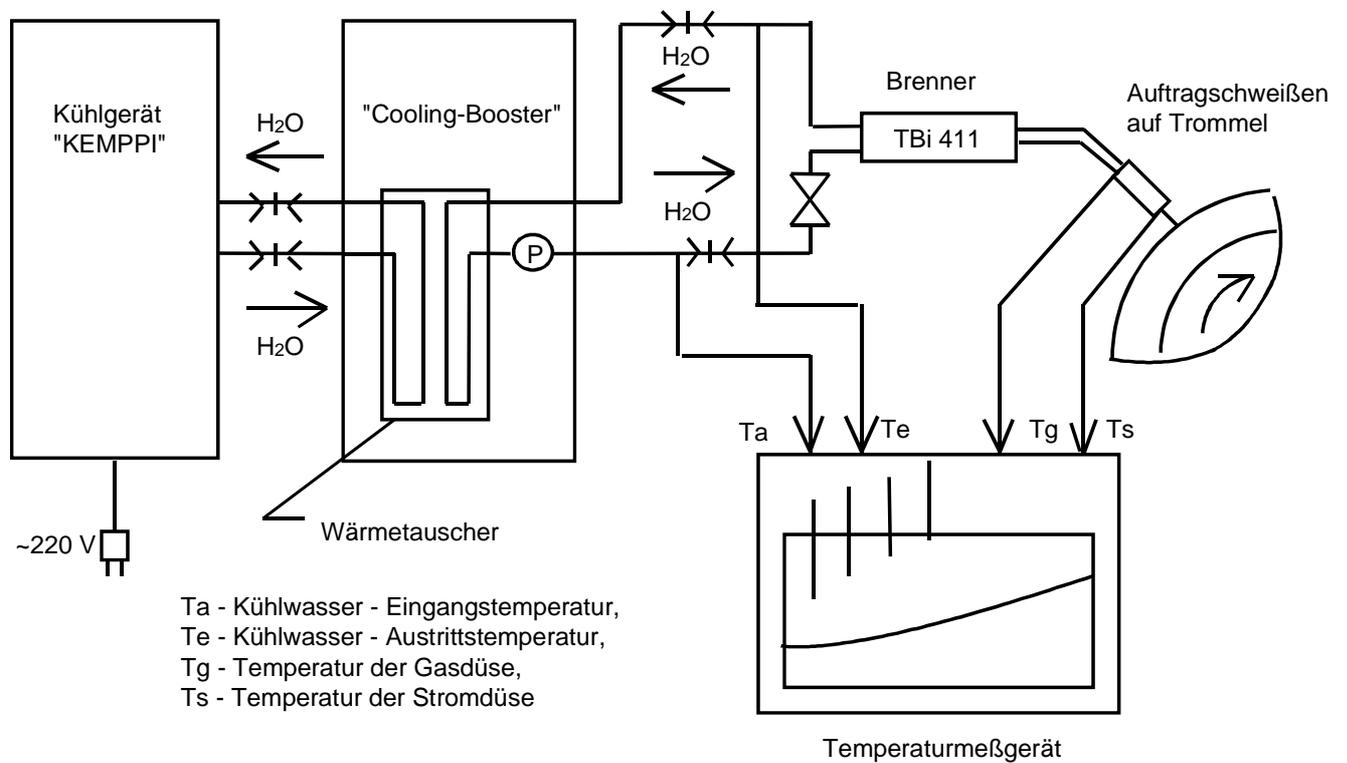
Anwendungsbereiche von „Cooling - Booster“:

- mit einem Standardbrenner mit Wasserkühlung:
  - MIG - MAG Brenner,
  - WIG Brenner,
  - Plasmabrenner.
- mit mehreren (Gruppe bis 4 Stück) Standardbrennern:
  - 4 MIG - MAG Brenner,
  - 4 WIG Brenner,
  - 4 Plasmabrenner.
- mit Brennern, die ein längeres Schlauchpaket haben:
  - Push - Pull Brenner bis zu 30m,
  - WIG Brenner auf die Montage,
  - bei Verwendung eines Verlängerungsschlauchpaketes.

Als Wasserpumpe wurde eine Flügelzellenpumpe der Fa. „Speck Pumpen“ ausgewählt. Für den Antrieb wurde ein Lamellendruckluftmotor eingesetzt. Danach wurden die innere Ausstattung, der Schaltplan und das äußere Design entwickelt. Der „Cooling - Booster“ hat folgende Abmessungen 310\*100\*470 mm.



**Bild 53:** Gerät zur Verstärkung der Kühlwirkung in flüssigkeitsgekühlten Brennern



**Bild 54:** Schema des Anschlusses des Gerätes „Cooling-Boosters“ zur Verstärkung der Kühlwirkung in flüssigkeitsgekühlten Brennern

## 7 **Ausblick. Ideale Brenner**

Alle flüssigkeitsgekühlten MSG-Schweißbrenner haben eine Besonderheit. Der Brennerhals ist konstruktiv sehr komplex aufgebaut, weil dort viele Elemente ihren Platz finden müssen. Diese Komplexität erhält der Hals flüssigkeitsgekühlter Brenner gerade dadurch, weil die Kühlkanäle dort eingebaut sind. Dies führt zu beträchtlichen geometrischen Abmessungen der Gesamtkonstruktion im Vergleich zu den selbstgekühlten Brennern.

Als Folge wird dadurch die Zugänglichkeit des Brenners zur Schweißstelle sehr negativ beeinflusst, das Gewicht des Brenners steigt und das Handling wird schwieriger.

Man versucht das Problem zu umgehen, indem man die Querschnitte der Elemente des Brennerhalses und insbesondere des Innenrohrs verringert. Die Wände der Kühlkanäle werden dünner gestaltet und die Kanäle selbst schmaler. Das ist leider keine optimale Vorgehensweise und diese Lösung führt zu einem neuen Problem. Durch die Verringerung des Querschnittes der Wände wird auch der Wärmefluss vom vorderen Teil des Brenners, wo eigentlich die meiste Wärme vom Lichtbogen in den Brenner aufgenommen wird, nach hinten schwächer und die Wärmeleitung durch die gesamte Länge des Kühlkörpers schwieriger. Durch Verringerung des Querschnittes des Kühlkanals verringert sich der Durchfluss der Kühlflüssigkeit und als direkte Folge die Menge der von der Kühlflüssigkeit aufgenommenen Wärme. Durch das Zusammenspiel dieser zwei o.g. Faktoren wird die Effizienz der Flüssigkeitskühlung von Lichtbogenschweißbrennern stark verringert und u. U. geht der Effekt gegen Null.

Auch der technologische Aspekt der Brennerherstellung muss beachtet werden. Innenrohre mit Kühlkanälen werden in der Produktion gelötet und bei ganz kleinen Querschnitten entsteht der Gefahr, dass sie durch Lote bzw. Flussmittel zugesetzt werden können.

Unter Beachtung aller dieser Überlegungen erscheint eine Brennerkonstruktion sinnvoll, die bei einem sehr geringen Durchmesser des Brennerhalses und die dadurch erreichte gute Zugänglichkeit zur Schweißstelle die vorn aufgenommene Wärme schnell zum Kühlkörper leitet. Dort wird sie durch eine sehr effektive Flüssigkeitskühlung aufgenommen und aus dem Brenner zum äußeren Kühlgerät mit dem Wärmetaucher abtransportiert und in die Umgebung abgegeben.

Ein Konzept der idealen flüssigkeitsgekühlten Lichtbogenschweißbrenner könnte wie folgt aussehen: Statt eines Innenrohrs mit integrierten Kühlkanälen und durchströmendem Fluid wird ein schmales aber extrem wärmeleitendes Innenrohr benötigt, das die gesamte Wärmemenge zu einem großdimensionierten Wärmetaucher führt, in welchem die Kühlflüssigkeit in turbulenter Strömung durch die Kühlkanäle mit sehr große Kühlfläche und ausreichendem Querschnitt mit hohem Durchsatz strömt. Es erscheint sinnvoll, den

Wärmetauscher in der Griffschale zu platzieren, da die Brennergriffschale wegen ihrer konstruktiven Gestaltung und geometrischen Abmessungen, die nach der Ergonomie der menschlichen Hand festgelegt sind, ausreichend Platz für eine solche konstruktive Lösung bietet.

Als eine der technischen Lösungen für das Innenrohr mit extrem hohem Wärmeleitkoeffizient könnte das Prinzip des Wärmerohrs verwendet werden. Dieses Prinzip ist dadurch gekennzeichnet, dass in einem geschlossenen Rohr, das von einem Ende erwärmt wird, sich das Fluid mit niedrigem Siedepunkt befindet. Es beginnt am heißen Ende des Rohrs zu verdampfen, steigt bis zum kalten Ende, kühlt sich ab und verwandelt sich wieder in die Flüssigkeit. Durch die erfolgte Phasenänderung wird eine größere Wärmemenge aufgenommen und durch das Innenrohr transportiert als bei der konventionellen Methode durch die Wärmeleitung fester Körper.

Die zweite mögliche Lösungsvariante für die Verwirklichung eines schnelleren Wärmeflusses durch den Brennerhals besteht in der Nutzung von Flüssigkeiten mit hohem atomarem Gewicht und großer Wärmekapazität für die Kühlung, z.B. flüssige Metalle.

Für die Kühlung großdimensionierter Wärmetauscher in der Griffschale erscheint das im Rahmen der vorgelegten Dissertation entwickelte Gerät „Cooling-Booster“ wegen seiner Charakteristik (Druck/Durchflussmenge) optimal geeignet. Dank der Kompatibilität dieses Gerätes mit allen gängigen Typen von Brennerkühlgeräten ist er ohne konstruktive Änderungen für dieses Konzept einsetzbar.

Auch unter dem technologischen Aspekt der Brennerherstellung in Großserien lässt sich der Brenner nach dem vorgeschlagenen Konzept einfacher als sein Vorgänger mit schmalen Querschnitten montieren. Dadurch kann die Wiederholbarkeit der Qualität bewahrt werden und Produktionsfehler sind auszuschließen.

## 8 Zusammenfassung

Vorrangiges Ziel der Arbeit war die Untersuchung wissenschaftlicher Grundlagen zu den Vorgängen in Lichtbogenschweiß- und Schneidbrennern. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden brennerartübergreifende Prinzipien und Methoden der Projektierung von kompletten Brennern, seinen Komponenten, Baugruppen und Teilsystemen ermittelt, untersucht und in Form eines Modells zur Entwicklung und Optimierung von Lichtbogenschweiß- und Schneidbrennern erfasst.

Das Modell soll den Konstrukteur beim Prozess der Entwicklung und Optimierung von Lichtbogenschweiß- und Schneidbrenner hinsichtlich der beanspruchungsgerechten Dimensionierung der gesamten Brennerkonstruktion sowie einzelner Baugruppen, bzw. Bauteile des Brenners unterstützen.

Die Nutzung mathematischer Modelle für die Berechnung der wichtigsten Funktionen von Lichtbogenschweiß- und Schneidbrennern für die Erarbeitung und Analyse neuer Lösungen auf der Funktions- und Konstruktionsebene soll die Grundlage für die Weiterentwicklung und Optimierung von technologischen Werkzeugen mit Lichtbogennutzung bilden.

Die Entwicklung und Konstruktion von Lichtbogenschweißbrennern erfolgt bisher auf der Basis praktischer Erfahrungen. Bis heute werden bei der Brennerentwicklung und beanspruchungsgerechten Dimensionierung keine umfassenden Berechnungen eingesetzt. Es fehlen auch die Grundlagen, um die Gestaltung und Ausführung der Brennerkonstruktion komplett zu berechnen. Häufig haben die Maßnahmen verschiedener Hersteller zur Verbesserung der Eigenschaften des Brenners überwiegend empirischen Charakter. Es wird, je nach Bedarf des Marktes, nur das Koaxialkabel oder die Griffschale bzw. der Knickschutz des Brenners verbessert. Oft gilt dabei als Kriterium der persönliche Geschmack des Konstrukteurs und nicht die wissenschaftliche Betrachtung des Objektes anhand seiner Einsatzbedingungen und Besonderheiten das von ihm ausgeführten technologischen Prozesses.

Es wurde festgestellt, dass die thermische Beanspruchung bei Brennern jeder Art die Hauptbelastung ist und diese im wesentlichen die Lebensdauer und den Erfolg des praktischen Einsatzes jeder Brennerkonstruktion bestimmt.

Die thermische Belastung wird hauptsächlich durch das Brennen des elektrischen Lichtbogens verursacht, indem der Brenner die Wärme durch Strahlung, Konvektion und elektrischen Widerstand der stromleitenden Teile aufnimmt. Um die thermische Belastung auf einem zulässigen Niveau zu halten, müssen Maßnahmen für die Abfuhr der unnötigen Wärme bei jeder Brennerart realisiert werden. Diese beziehen sich auf die Selbstkühlung und auf die Zwangskühlung.

Zwei Hauptfaktoren, die diese Prozesse beeinflussen, die konstruktive Ausstattung und die Parameter der Zwangskühlung wurden im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen und theoretischen Untersuchungen hinsichtlich ihrer Einwirkung auf das Niveau der thermischen Belastung der Brennerkonstruktion anhand der ausgewählten typischen Vertretern der MSG-Lichtbogenschweißbrenner betrachtet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen liefern die Informations- und Beweisbasis für das zu erarbeitende Modell und erlauben es, den Prozess der experimentellen Entwicklung und Optimierung von Lichtbogenschweiß- und Schneidbrennern auf den Weg der wissenschaftlichen Betrachtungen umzustellen.

Es wurde beschlossen, das Hauptaugenmerk bei der Betrachtung der Prozesse der Wärmeabfuhr in den Lichtbogenschweiß- und Schneidbrennern auf die MSG-Brenner zu legen. Das erlaubte nicht nur, diese Brennerart und einen ausgewählten Prozess der Wärmeabfuhr, der beim Betrieb der schweißtechnischen Werkzeuge verläuft, sehr detailliert zu beschreiben, sondern die gesamte Methodik der wissenschaftlichen Betrachtung einer ganzen Klasse technologischer Werkzeuge mit Lichtbogennutzung zu erarbeiten, praktisch einzusetzen und auf ihre Richtigkeit zu prüfen.

Anhand der Analyse des funktionellen und konstruktiven Aufbaus von MSG-, WIG-Schweißbrennern konnte man feststellen, dass neben den Unterschieden zwischen o.g. Konstruktionen, auch viele Ähnlichkeiten auf Funktions- und Konstruktionsebene existieren. Alle drei analysierten Brennerarten haben Ähnlichkeiten in Funktionen, die von folgenden Bauelementen bzw. Baugruppen ausgeführt werden: Brennerhals (Brennerkörper), Gasdüse, Griffschale, Knickschutz, Schlauchpaket und Stromquellenanschluss.

Eines der entscheidenden Ähnlichkeitsmerkmale besteht darin, dass bei allen verglichenen Brennerarten Elemente vorhanden sind, die elektrische Energie zum Lichtbogen leiten und auch Elemente, deren Funktion das Abführen überflüssige Wärme von thermisch belasteten Gebieten des Brenners ist.

Wenn man die konstruktive Gestaltung dieser Bauelemente bzw. Baugruppe betrachtet, findet man außerdem auch hier viele Ähnlichkeitsmerkmale, insbesondere was Form, Geometrie und eingesetzte Werkstoffe betrifft.

Solche Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Vergleichsanalysen auf Funktions- und Konstruktionsebene erlauben es, sich bei den detaillierten praktischen und theoretischen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit auf die MSG-Brennerart zu konzentrieren und die erreichten Ergebnisse der Beschreibung der Zusammenhänge sowie die Gestaltungsprinzipien, Methodiken der Projektierung mit der Berücksichtigung der Besonderheiten anderer Schweiß- bzw. Schneidprozesse mit elektrischen Lichtbogen und der Unterschiede zu ihnen gehörigen Werkzeuge auf andere Brennerarten zu übertragen.

Die im Rahmen der vorgelegten Arbeit geplanten und durchgeführten Untersuchungen haben dazu beigetragen, den Einflussmechanismus der beschriebenen zwei Faktoren -Konstruktive Gestaltung des Brenners und Parameter der Zwangskühlung - auf das Niveau der thermischen Belastung des Brenners zu erörtern und anhand der Zusammenhänge, die aus diesen Untersuchungen ermittelt werden sollten, zu beschreiben.

Die erste Untersuchungsreihe beinhaltet die Analyse möglicher sinnvoller Varianten der konstruktiven Ausstattung des Brenners und praktische Experimente mit entsprechenden Baumustern bei realen Schweißprozessen, um den quantitativen Einfluss der vorgenommenen Änderungen der Bauteile, bzw. Baugruppen des Brenners auf seine thermische Belastung anhand der gemessenen Temperaturen zu ermitteln.

Die Ergebnisse der praktischen Experimente in den angefügten ausführlichen Tabellen stellen die Zusammenhänge zwischen der Konstruktionsart einzelner Brennelemente und dem Niveau der Temperatur dar. Diese Ergebnisse sollen dem Brennerkonstrukteur bei den Entscheidungen über das Gesamtkonzept der zu projektierenden Lichtbogenschweißwerkzeuge als Vorlage dienen.

Die zweite Reihe der in der vorgelegten Arbeit durchgeführten Untersuchungen beinhaltet die Untersuchungen des Einflusses der Parameter der Zwangskühlung auf die Brenner Temperatur. Für die Untersuchung des Einflusses der Parameter der Zwangskühlung auf die Brenner Temperatur wurde eine andere Vorgehensweise als bei der Untersuchung des Einflusses der konstruktiven Gestaltung realisiert. Hier werden zunächst theoretische Überlegungen und mathematische Berechnungen durchgeführt, um eine Zielrichtung bei der Optimierung der Zwangskühlung zu bestimmen und diese Ergebnisse dann anhand der praktischen Experimente zuerst mit einem Brennermodell und danach mit einem realen Brenner zu überprüfen.

Die mathematische Betrachtung der Einflüsse von Funktionsparametern der Zwangskühlung auf das Niveau der thermischen Belastung hat die Möglichkeit gegeben, anhand der entworfenen mathematischen Modelle den Prozess des Wärmeabtransports aus dem Brenner zu quantifizieren und ihn auch wissenschaftlich begründet zu beurteilen und zu optimieren. Die im Rahmen der vorgelegten Promotionsarbeit aufgebauten mathematischen Modelle dienen zur Beschreibung der in den Kühl-, bzw. Gaskanälen der zwangsgekühlten Brenner verlaufenden physikalischen Prozesse des Wärmeabtransports durch strömende Flüssigkeit, bzw. Schutzgas. Dank dieses Vorgehens war es erst möglich, qualitativ den Unterschied der Effizienz zwischen der so genannten Gaskühlung und der Flüssigkeitskühlung zu ermitteln. Nach der Analyse der durch diese mathematische Betrachtung erzielten Ergebnisse wurde festgestellt, dass der Optimierung der Zwangskühlung durch strömende Flüssigkeit ein Vorrang gegenüber der Gaskühlung wegen des sehr geringen Beitrag der Letzteren zum gesamten Wärmeabtransport eingeräumt wird.

Bei der Optimierung des Wärmeabtransports durch die Flüssigkeit wurden zunächst unter Verwendung der aufgebauten mathematischen Modelle die günstigen Parameter berechnet und dann die entsprechenden praktischen Untersuchungen durchgeführt.

Das aufgebaute praktische Experiment mit dem Brennermodell bestätigte die theoretischen Vermutungen über den Einfluss der Parameter der Zwangskühlung auf die vom Kühlmedium aus dem Brenner aufgenommene Wärmemenge. Es wurde ein Optimum des Wasserdurchflusses für das Innenrohr eines typischen Vertreters der flüssiggekühlten MSG-Lichtbogenschweißbrenner des Brennertyps TBi 411 gefunden, der bei 3,5 l/min liegt. In der Praxis wird dieser nur mit einer Durchflussmenge von 1,5 l/min gekühlt; deshalb existiert die Möglichkeit, den Wirkungsgrad sowie die Effizienz der Flüssigkeitskühlung zu erhöhen.

Die Versuchsreihen mit dem realen flüssigkeitsgekühlten MSG-Lichtbogenschweißbrenner haben gezeigt, wie groß der Einfluss der Parameter der Zwangskühlung auf die gesamte Temperaturbilanz des Brenners bei realen Schweißbedingungen ist und die Steigung der Effizienz der Flüssigkeitskühlung durch eine Erhöhung des Durchsatzes der Kühlflüssigkeit wurde bestätigt.

Die Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen anhand der mathematischen Modelle zur Beschreibung der physikalischen Prozesse der Wärmeabfuhr durch Zwangskühlung und eines vorgeschlagenen logischen Algorithmus bieten das Werkzeug für die Berechnung und Optimierung der Parameter der Flüssigkeitskühlung.

Das vorgeschlagene Modell zur Entwicklung und Optimierung von Lichtbogenschweiß- und Schneidbrennern wurde im Rahmen der vorgelegten Arbeit an realen MSG-Brennerobjekten angewendet und brachte sehr zufriedenstellende Ergebnisse, die in Form eines Gerätes „Cooling-Booster“ zur Verstärkung des Kühleffektes in den Kühlkanälen von Lichtbogenschweiß-, bzw. Schneidbrennern verschiedener Art mit Flüssigkeitskühlung realisiert wurden. Die erreichten Ergebnisse lassen perspektivisch das Konzept für einen idealen MSG-Lichtbogenschweißbrenner realisierbar erscheinen.

**Literaturverzeichnis**

- [1] Empfänger-Befragung zum Thema Schweißen. metallbau+ALUMINIUM-KURIER.
- [2] L. Schnabl, Düsseldorf: Wassergekühlter Sonderbrenner zum Metall-Aktivgasschweißen. Der Praktiker 5/97, S. 196-197.
- [3] M. Wohlgenannt: Kombiniertes Plasma- und WIG-Schweißen: In einem Zug durch. SMM Schweizer Maschinenmarkt, 9403 Goldach Nr. 37/1991, S. 24-29.
- [4] H. Hackl: MIG-Löten von verzinkten Dünoblechen und Profilen. Schweißen und Schneiden 50 (1998) Heft 6, S. 351-354.
- [5] H. Herold, M. Streitenberger, H. Zwickert: MIG-Lötverbindungen – Besonderheiten und Eigenschaften. DVS-Bericht 204, S. 173-182.
- [6] H. Krohn, S. Singh: Schweißen von Magnesiumlegierungen für den Automobilbau. DVS-Bericht 204, S. 197-201.
- [7] W. Lutz: Aluminiumschweißen für den schnellen ICE 3. Der Praktiker (1999) 4; S. 138-142. DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [8] H. Cramer, L. Baum, P. Limley, A.W.E. Nentwig: Schweißen von Magnesiumstrukturen. DVS-Bericht 204, S. 208-213.
- [9] H. Herold, S. Zahariev, H. Wolfahrt, S. Jüttner: Aktuelle Untersuchungen zur Weiterentwicklung und Anwendung des WIG- und des WPL-Schweißens von Magnesiumlegierungen im Automobilbau. DVS-Bericht 204, S. 202-207.
- [10] U. Krüger, H-J. Winkel: Metall-Inertgasschweißen von Reintitan und Titanlegierungen. Schweißen und Schneiden 50 (1998) Heft 10, S. 628-635.
- [11] K. Grunzelmann, W. Schenk, E. Vojta: Der Mikro-Lichtbogen als Werkzeug zum Schweißen und Löten von elektromechanischen Komponenten. DVS-Bericht 204, S. 137-142.
- [12] IR. Lahnsteiner: T.I.M.E. Prozess - Ein neues MAG-Hochleistungsschweißverfahren. Industrie-Anzeiger 35/1991, S. 12-13.
- [13] Dr.-Ing. H. Matzner, Höllriegelskreuth: Grundlagen und Anwendungshinweise zum Metall-Schutzgasschweißen mit hohen Drahtfördegeschwindigkeiten. Der Praktiker (1993) 7, S. 386-391.
- [14] P. Gerster, J. Halbitter, D. Dzelnitzki: Einführung des MAG-Hochleistungsschweißens. Der Praktiker (1998) 2; S. 60-63. DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [15] E. Miklos: Aktuelle Prozessvarianten des MAG-HL-Schweißens. Vortragsmanuskripte des Kolloquiums „Neue Entwicklungen beim Schutzgasschweißen“ in Aachen am 31. Januar 2002
- [16] DVS-Merkblatt 0909-1, September 2000, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf

- [17] A.W.E. Nentwig, R. Knoch, L. Baum: Metall-Schutzgasschweißen mit mehreren Drahtelektroden. Der Praktiker (2000) 1; S. 18-21. DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [18] U. Dilthey, U. Reisgen, H. Bachem: MSG-Zweidrahtschweißen als zukunftsweisende Fügetechnik für Stahl- und Al-Werkstoffe. DVS-Bericht 204, S. 161-166.
- [19] E. Miklos, R. Bettinger, P. Boxler : Vollmechanisches MAG-Hochleistungsschweißen. DVS-Bericht 204, S.30-37.
- [20] J. Gollnick: Lichtbogensensorik mit rotierendem Brenner. Vortragsmanuskripte des Kolloquiums „Neue Entwicklungen beim Schutzgasschweißen“ in Aachen am 31. Januar 2002
- [21] D. Dzelnitzki: MIG-Flachdrahtschweißen von Aluminiumlegierungen. Vortragsmanuskripte des Kolloquiums „Neue Entwicklungen beim Schutzgasschweißen“ in Aachen am 31. Januar 2002
- [22] M. Martin: Für das Schutzgasschweißen von großen Einzelwerkstücken. Der Praktiker (2001) 6; S. 230-234. DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [23] Kollege Roboter. Der Praktiker (2001) 10; S. 412. DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [24] V. A. Timchenko, V. N. Bernadskij: Roboter in den modernen Fertigung von Schweißkonstruktionen. Gegenwärtigen Stand und Perspektiven. Avtomatitscheskaja Svarka. 542 (1998) 5; S. 55-63.
- [25] K.T. Buschhaus: Roboter unverzichtbar für die Automobilindustrie und deren Zulieferbetriebe. Der Praktiker (2001) 5; S. 186-192. DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [26] Aus Unternehmen: Automatisierter Brennerwechsel beim Schweißen im Leichtbau. Schweißen und Schneiden 53 (2001) Heft 1, S. 5-6.
- [27] T. Wiegand: Das Problem der Schweißraucherfassung. DVS-Bericht 220, S. 274-276.
- [28] M. Ifland, O. Gräfe, G. Hamm, C. P. Maschmeier: Schweißen von hochlegierten Stählen – Erkenntnisse und Schlussfolgerungen für den Gesundheitsschutz. DVS-Bericht 220, S. 277-281.
- [29] B. Paton, A. Mazur, V. Metlitzkij, J. Kundiev, L. Gorban: Ökologische und ökonomische Aspekte des Schmelzschweißens. Avtomatitscheskaja Svarka. 506 (1995) 5; S. 40-44.
- [30] M. Ifland: Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz beim Schweißen hochlegierter Werkstoffe – gesetzliche Anforderungen und Praxis in Unternehmen des Territoriums. 12. Schweißtechnische Fachtagung 2002. 16. Mai 2002. Tagungsband.
- [31] M. Könning und T. Franken: Absaugen und Filtern. Sonderdruck aus „Maschinenmarkt“, Nr. 24/1993 und 28/1993, Vogel Verlag und Druck KG.
- [32] K. Schröder, D. Bruhns: Anwendung von Schutzgasschweißbrennern mit integraler Rauchgasabsaugung. Schweißtechnik, Berlin 39 (1989) 9, S. 390-392.

- [33] H. Stauffer: Schweißrauchabsaugung am Schweißbrenner. Der Praktiker (2001) 4; S. 142-144. DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [34] H. Stauffer: Eiserne Saubermänner. Der Praktiker 49 (1997) 1; S. 9-11. DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [35] O. Onorin, A. Hanov. Filtergerät für die Bereinigung von Gasemissionen bei der Schweißfertigung. Svarochnoje Proizvodstvo. (1998) 10, c. 37-38.
- [36] A. Ennan, A. Butwin, I. Prokopjev, O. Levtschenko, V. Metlitzkij: Lichtbogenschweißbrennern mit integrierten Absaugsystem. Avtomatitscheskaja Svarka. 545 (1998) 8; S. 39-43.
- [37] Schweißrauchabsaugen. Industrie-Mitteilungen. Technica 1-2/2002.
- [38] M. Schellhase: Der Schweißlichtbogen – ein technologisches Werkzeug. VEB Verlag Technik, Berlin, 1985
- [39] U. Lampert: Prinziplösungen für Schweißbrenner mit zuverlässiger Stromübertragung. Diplomarbeit TU Magdeburg, 1987, unveröffentlicht
- [40] Euro- BLECH 96 VERANSTALTUNGEN. Schweißen & Schneiden 49 (1997) Heft 1, S. 47.
- [41] Craig Srba: Multiple Torch Selector Expands Equipment Versffility. Welding Journal 11/91, S. 65-67.
- [42] V. Tammi: Temperaturmessungen zur optimalen Gestaltung von Schweißbrennern. Sonderdruck aus der Zeitschrift „Werkstatt und Betrieb“ 109. Jahrgang 1976, Heft 12, Seite 709-714. Carl Hanser Verlag, München 86.
- [43] Tragende Rolle im Automobilbau. Flexible Automation 4/92, S. 23-25.
- [44] Schweißen und Schneiden auf der EuroBLECH 2002 – Aussteller kündigen an. Schweißen und Schneiden 54 (2002) Heft 10, S. 576-604.
- [45] G. Neubert, R. von Lindes: Maßnahmen gegen die Verschmutzung von MAG-Schweißbrennern. Schweißtechnik 34 (1984) Heft 8, S. 345-347.
- [46] F. Hartung: Spritzerarmes MAG-Schweißen mit Zweigasbrenner. Schweißtechnik 34 (1984) Heft 8, S. 351-353.
- [47] U. Tatter, J. Schmidt: Schweißsprays und Schweißspritzer. Der Praktiker (1998) 1, S. 20-22.
- [48] G. Hauck: Qualitätsanforderungen an Drahtelektroden beim Schutzgasschweißen mit Robotern. DVS-Bericht 118, S.71-76.
- [49] W. Möhler, H.-U. Menzel: Stromkontaktrohre mit verbesserten Eigenschaften – hergestellt aus stranggepressten Werkstoffverbunden. Schweißen und Schneiden 53 (2001) Heft 9, S. 616-619.
- [50] N. Pache: Zielgerichtet muss die Drahtelektrode beim Metall-Aktivgasschweißen sein! Der Praktiker (1991) 10; S. 526-528. DVS-Verlag, Düsseldorf.

- [51] K. Schröder: Brennerintegrale Schadstofffassung beim Schutzgasschweißen. Dissertation der Fachhochschule Wismar für Technik, Wirtschaft und Gestaltung (1991).
- [52] T. Wiegand: Das Problem der mobilen Schweißrauchfassung. Der Praktiker. (2001) 4; S. 156-161. DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [53] Improved welding gun with built-in fume-extractor. English version of IVF-skrift 85808, Institutet för Verkstadtsteknisk Forskning (IVF), Schweden.
- [54] Prospekte über Absaugschweißbrenner von folgenden Firmen:  
Migatronik Schweißmaschinen GmbH“  
„Oerlicon Schweißtechnik GmbH“  
„Fronius Schweißmaschinen KG Austria“  
„Kurt Haufe“  
„Dinse Schweißwerkzeuge GmbH“  
„Tbi Industries GmbH & Co. KG“  
„Carl Cloos Schweißtechnik GmbH“
- [55] DIN EN 60974-7 „Lichtbogenschweißeinrichtungen. Teil 7: Brenner“.
- [56] Werbematerial von folgenden Firmen:
1. „Thermadune Industries GmbH“
  2. „Migatronik Schweißmaschinen GmbH“
  3. „Oerlicon Schweißtechnik GmbH“
  4. „Profax“
  5. „Iskra“
  6. „Messer Griesheim“
  7. „Fronius Schweißmaschinen KG Austria“
  8. „Kurt Haufe“
  9. „D/F Maschine Specialties Inc.“
  10. „Dinse Schweißwerkzeuge GmbH“
  11. „Merkle“
  12. „Weber Schweißtechnik“
  13. „OHI - Long Life Group“
  14. „Tweco“
  15. „OCIM“
  16. „Parweld Limited“
  17. „Goematec GmbH“
  18. „Hulftegger + co/ag“
  19. „MWM“
  20. „Bernard“

21. „Alexander Binzel Schweißtechnik“
  22. „Dalex Niepenberg & Co. GmbH“
  23. „Carl Cloos Schweißtechnik GmbH“
  24. „Trafimet spa“
  25. „Tip Works“
  26. „Tregaskies“
  27. „Tbi Industries GmbH & Co. KG“
- [57] G. Aichele: Wachsende Intelligenz der Schweißgeräte. M&T Metallhandwerk (1999) 5; S. 36-40.
- [58] A. Hillgers: WIG Schutzgas-Schweißbrenner. Gestern und Heute. Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH & Co. KG, Sonderdruck
- [59] Taschenbuch für den Maschinenbau. Dubbel. Herausgegeben von W. Beitz und K.-H. Grote, 20., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Springer, 2001
- [60] W. Kalide: Einführung in die technische Strömungslehre, 7., durchgesehene Auflage, München; Wien: Hanser, 1990
- [61] Grundwissen des Ingenieurs. Berlin

## Verzeichnis der Bilder und Tabellen

### Verzeichnis der Bilder

**Bild 1:** Zusammenstellung von Energieanteilen im Schweißlichtbogen [38]

**Bild 2:** Vorgänge bei der thermischen Belastung des Brenners

**Bild 3:** Schema des MSG-Schweißprozesses

**Bild 4:** Schema des WIG-Schweißprozesses

**Bild 5:** Schema der Klassifizierung der Funktionen des Schweißbrenners

**Bild 6:** Schema des kompletten MSG-Brenners mit Schlauchpaket

**Bild 7:** Schema des kompletten WIG-Brenners mit Schlauchpaket

**Bild 8:** Modell zur Betrachtung der Selbstkühlung

**Bild 9:** Modell zur Betrachtung der Gaskühlung

**Bild 10:** Modell zu Betrachtung der Flüssigkeitskühlung

**Bild 11:** Schema der Wärmeströme in den Hauptelementen eines MSG-Brenners

**Bild 12:** Schema der Wärmeströme in den Hauptelementen eines WIG-Brenners

**Bild 13:** Schema der Versuchseinrichtung für die Temperaturmessungen am Brenner entsprechend den Anforderungen in DIN EN 60974-7

**Bild 14:** Versuchseinrichtung für die Temperaturmessungen am Brenner nach Anforderungen DIN EN 60974-7

**Bild 15:** Befestigung der Thermolemente am Brenner

**Bild 16:** Vergleich der Erwärmungsdynamik zwischen dem Brennerhals Typ 150 aus Messing und dem Brennerhals Typ 150 aus Stahl

**Bild 17:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Messing und im Brennerhals Typ 150 aus Stahl

**Bild 18:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 360 mit einem Außenrohr aus Messing und im Brenner Typ 360 mit einem Außenrohr aus Stahl

**Bild 19:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 360 mit einem Außenrohr aus Messing und im Brenner Typ 360 mit einem Außenrohr aus Stahl

**Bild 20:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 6L mit einem Außenrohr aus Messing und im Brenner Typ 6L mit einem Außenrohr aus Stahl

**Bild 21:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 6L mit einem Außenrohr aus Messing und im Brenner Typ 6L mit einem Außenrohr aus Stahl

**Bild 22:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Kupfer, im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Messing und im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M10 aus Messing

**Bild 23:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Kupfer, im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M8 aus Messing und im Brenner Typ 6L mit dem Düsenstock M10 aus Messing

**Bild 24:** Brenner Typ 5W und Typ „Everest“. Gestaltungsvarianten

**Bild 25:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 5W und im Brenner Typ „Everest“

**Bild 26:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 5W und im Brenner Typ „Everest“

**Bild 27:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 7W unter unterschiedlicher Belastung: Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm

**Bild 28:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 7W unter unterschiedlicher Belastung: Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm

**Bild 29:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 9W unter unterschiedlicher Belastung: Schweißstrom variabel: 300 A; 400 A, Spannung variabel: 30 V; 40 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm

**Bild 30:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 9W unter unterschiedlicher Belastung: Schweißstrom variabel: 300 A; 400 A, Spannung variabel: 30 V; 40 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25

**Bild 31:** Brenner Typ 9W Rob. Gestaltungsvarianten

**Bild 32:** Vergleich der Erwärmungsdynamik im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsensträger aus Kupfer, im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsensträgeraufsatz aus Messing und im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsensträger aus Messing

**Bild 33:** Vergleich der Temperaturverteilung im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsensträger aus Kupfer, im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsensträgeraufsatz aus Messing und im Brenner Typ 9W Rob mit dem Düsensträger aus Messing

**Bild 34:** Brenner Typ 511. Abmessungen des Innenrohrs

**Bild 35:** Brenner Typ 9W. Abmessungen des Innenrohrs. Abmessungen der Gasdüse

**Bild 36:** Brenner Typ 511. Abmessungen des Innenrohrs. Abmessungen der Gasdüse

**Bild 37:** Diagramm der Abhängigkeit zwischen Gasdurchfluss und Reynolds - Zahl  $Re$  für Kohlendioxid  $CO_2$

**Bild 38:** Diagramm der Abhängigkeit der Nusselt - Zahl  $Nu$  von der Reynolds - Zahl  $Re$  für Kohlendioxid  $CO_2$

**Bild 39:** Diagramm der Abhängigkeit zwischen Wasserdurchfluss und Reynolds - Zahl  $Re$  für Wasser  $H_2O$

**Bild 40** Diagramm der Abhängigkeit der Nusselt - Zahl  $Nu$  von der Reynolds - Zahl  $Re$  für Wasser  $H_2O$

**Bild 41:** Diagramm der Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  von der Reynolds - Zahl  $Re$  für Kohlendioxyd  $CO_2$

**Bild 42:** Diagramm der Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  von der Reynolds - Zahl  $Re$  für Wasser  $H_2O$

**Bild 43:** Diagramme der Abhängigkeit des Wärmestroms  $Q$  von der Reynolds - Zahl  $Re$  für Kohlendioxyd  $CO_2$

**Bild 44:** Diagramme der Abhängigkeit des Wärmestroms  $Q$  von der Reynolds - Zahl  $Re$  für Wasser  $H_2O$

**Bild 45:** Algorithmus zur mathematischen Berechnung und Analyse der Prozesscharakteristiken der Flüssigkeitskühlung

**Bild 46:** Schema des Versuchesstandes für die Untersuchung des Einflusses von erhöhtem Wasserdurchfluss auf die Wärmeaufnahme in erwärmten Kühlkanälen des Brenners Typ 411

**Bild 47:** Untersuchung des Einflusses eines erhöhten Wasserdurchflusses auf die Wärmeaufnahme im erwärmten Kühlkanal des Brenners Typ 411

**Bild 48:** Innenrohr des Brenners Typ 411

**Bild 49:** Diagramm der Temperaturunterschiede in Abhängigkeit von der Durchflussmenge der Kühlflüssigkeit

**Bild 50:** Diagramm der Wärmeaufnahme in Abhängigkeit von der Durchflussmenge der Kühlflüssigkeit

**Bild 51:** Schema der Versuchseinrichtung für die Untersuchung des Brenners Typ 411 mit Hochleistungskühlung

**Bild 52:** Temperatur im Brenner Typ 411,  $I=270$  A,  $U=30$  V, in Abhängigkeit vom Wasserdurchfluss. Temperatur im Brenner Typ 411,  $I=320$  A,  $U=34$  V, in Abhängigkeit vom Wasserdurchfluss.

**Bild 53:** Gerät zur Verstärkung der Kühlwirkung in flüssigkeitsgekühlten Brennern

**Bild 54:** Schema des Anschlusses des Gerätes „Cooling-Boosters“ zur Verstärkung der Kühlwirkung in flüssigkeitsgekühlten Brennern

### Verzeichnis der Tabellen

**Tabelle 1:** In Deutschland eingesetzte Industrie-Roboter

**Tabelle 2:** Gesamte Lichtbogenenergie für verschiedene MSG-Brennertypen bei der maximalen Belastung

**Tabelle 3:** Funktionen einzelner Bauelemente bzw. Bauteile des MSG-Schweißbrenners

**Tabelle 4:** Funktionen einzelner Bauelemente bzw. Baugruppen des WIG-

Schweißbrenners

**Tabelle 5:** Widerstände, Leitwerte und Temperaturkoeffizienten für einige stromleitende Werkstoffe

**Tabelle 6:** Luftgekühlte Brenner. Geometrische Abmessungen, Querschnitte und Werkstoffarten der stromleitenden Brennerbauteile

**Tabelle 7:** Wassergekühlte Brenner. Geometrische Abmessungen, Querschnitte und Werkstoffarten der stromleitenden Brennerbauteile

**Tabelle 8:** Freigesetzte Wärmeleistung in dem Schlauchpaket, Länge 3 m

**Tabelle 9:** Verschiedene Varianten der konstruktiven Gestaltung der Kühlkanäle in komplexen Brennern (Brennersysteme) mit Flüssigkeitskühlung

**Tabelle 10:** Typische Vertreter von selbstgekühlten MSG-Schweißbrenner

**Tabelle 11:** Gestaltungsvarianten typischer Vertreter der selbstgekühlten MSG-Schweißbrenner

**Tabelle 12:** Typische Vertreter zwangsgekühlter Brenner

**Tabelle 13:** Gestaltungsvarianten typischen Vertreter der zwangsgekühlten Brenner

**Tabelle 14:** Berechnete Abhängigkeit zwischen Gasdurchfluss und Reynolds - Zahl  $Re$

**Tabelle 15:** Berechnete Abhängigkeit zwischen der Reynolds - Zahl  $Re$  und Nusselt - Zahl  $Nu$

**Tabelle 16:** Berechnete Abhängigkeit zwischen Wasserdurchfluss und Reynolds - Zahl  $Re$

**Tabelle 17:** Berechnete Abhängigkeit zwischen der Reynolds - Zahl  $Re$  und Nusselt - Zahl  $Nu$

**Tabelle 18:** Berechnete Abhängigkeit zwischen Reynolds - Zahl  $Re$  und Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  für Kohlendioxyd  $CO_2$

**Tabelle 19:** Berechnete Abhängigkeit zwischen Reynolds - Zahl  $Re$  und Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  für Wasser  $H_2O$

**Tabelle 20:** Berechnete Abhängigkeit zwischen Reynolds - Zahl  $Re$  und Wärmestrom  $Q$  für Kohlendioxyd  $CO_2$

**Tabelle 21:** Berechnete Abhängigkeit zwischen der Reynolds - Zahl  $Re$  und dem Wärmestrom  $Q$  für Wasser  $H_2O$

**Tabelle 22:** Versuch 1

**Tabelle 23:** Versuch 2

**Tabelle 24:** Versuch 3

**Tabelle 25:** Auswertung der drei Versuche. Mittelwert des Temperaturunterschieds

**Tabelle 26:** Temperatur im Brenner Typ 411,  $I=270$  A,  $U=30$  V

**Tabelle 27:** Temperatur im Brenner Typ 411,  $I=320$  A,  $U=34$  V

# Anhang

## Verzeichnis der Bilder und Tabellen

### Verzeichnis der Bilder

**Bild A 1.** Brenner Typ 150, luftgekühlt

**Bild A 2.** Schema der Messpunkte

**Bild A 3.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Messing, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 30%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 4.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Messing. Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 30%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 5.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Messing, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 60%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 6.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Messing. Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 60%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 7.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Messing, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 8.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Messing. Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 9.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Messing, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 10.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Messing. Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 11.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Stahl, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 30%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 12.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Stahl.

Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 30%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 13.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Stahl, Schweißstrom

150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 60%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 14.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Stahl.

Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 60%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 15.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Stahl, Schweißstrom

150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 16.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Stahl.

Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 17.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Stahl, Schweißstrom

150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 18.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Stahl.

Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 19.** Brenner Typ 360, luftgekühlt

**Bild A 20.** Schema der Messpunkte

**Bild A 21.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 360 mit Außenrohr aus

Messing, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 22.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 360 mit Außenrohr aus

Messing, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 23.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 360 mit Außenrohr aus Stahl, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 24.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 360 mit Außenrohr aus Stahl, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 25.** Brenner Typ 6L, luftgekühlt

**Bild A 26.** Schema der Messpunkte

**Bild A 27.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 6L mit Außenrohr aus Messing, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 28.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 6L mit Außenrohr aus Messing, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 29.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 6L mit Außenrohr aus Stahl, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 30.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 6L mit Außenrohr aus Stahl, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 31.** Brenner Typ 6L, luftgekühlt

**Bild A 32.** Schema der Messpunkte

**Bild A 33.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 6L, Düsenstock M8 aus Kupfer, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 34.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 6L, Düsenstock M8 aus Kupfer, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 35.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 6L, Düsenstock M8 aus Messing, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 36.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 6L, Düsenstock M8 aus Messing, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 37.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 6L, Düsenstock M10 aus Messing, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 38.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 6L, Düsenstock M10 aus Messing, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 39.** Brenner Typ „Everest“, Brenner Typ 5W, flüssiggekühlt

**Bild A 40.** Schema der Messpunkte

**Bild A 41.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ „Everest“, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 42.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ „Everest“, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 43.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 5W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 44.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 5W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 45.** Brenner Typ 7W, flüssiggekühlt

**Bild A 46.** Schema der Messpunkte

**Bild A 47.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 7W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 48.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 7W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 49.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 7W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 50.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 7W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 51.** Brenner Typ 9W, flüssiggekühlt

**Bild A 52.** Schema der Messpunkte

**Bild A 53.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 9W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 54.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 9W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 55.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 9W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 56.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 9W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 57.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 9W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 58.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 9W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 59.** Brenner Typ 9W Rob, flüssigkeitsgekühlt

**Bild A 60.** Schema der Messpunkte

**Bild A 61.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 9W Rob, Düsenträger aus Kupfer. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 62.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 9W Rob, Düsen­träger aus Kupfer. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschalt­dauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Draht­elektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 63.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 9W Rob, Düsen­trägeraufsatz aus Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschalt­dauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Draht­elektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 64.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 9W Rob, Düsen­trägeraufsatz aus Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschalt­dauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Draht­elektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 65.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 9W Rob, Düsen­träger aus Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschalt­dauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Draht­elektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 66.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 9W Rob, Düsen­träger aus Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschalt­dauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Draht­elektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 67.** Brenner Typ 411, flüssigkeitsgekühlt

**Bild A 68.** Schema der Messpunkte

**Bild A 69.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschalt­dauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Draht­elektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 70.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschalt­dauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Draht­elektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 71.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 411. Wasserdurchfluss 200 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschalt­dauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Draht­elektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 72.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 411. Wasserdurchfluss 200 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschalt­dauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Draht­elektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Bild A 73.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 411. Wasserdurchfluss 300 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Bild A 74.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 411. Wasserdurchfluss 300 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Bild A 75.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Bild A 76.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Bild A 77.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 411. Wasserdurchfluss 200 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Bild A 78.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 411. Wasserdurchfluss 200 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Bild A 79.** Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Bild A 80.** Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 411. Wasserdurchfluss 300 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

## Verzeichnis der Tabellen

**Tabelle A 1.** Übersicht der geplanten Versuche

**Tabelle A 2.** Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Messing . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 30%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Tabelle A 3.** Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Messing . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 60%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Tabelle A 4.** Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Messing . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Tabelle A 5.** Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Messing . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Tabelle A 6.** Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Stahl . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 30%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Tabelle A 7.** Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Stahl . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 60%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Tabelle A 8.** Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Stahl . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Tabelle A 9.** Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Stahl . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Tabelle A 10.** Übersicht der geplanten Versuche

**Tabelle A 11.** Temperaturmessung im Brenner Typ 360 mit Außenrohr aus Messing . Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Tabelle A 12.** Temperaturmessung im Brenner Typ 360 mit Außenrohr aus Stahl .  
Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum  
Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 13.** Übersicht der geplanten Versuche

**Tabelle A 14.** Temperaturmessung im Brenner Typ 6L mit Außenrohr aus Messing .  
Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum  
Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 15.** Temperaturmessung im Brenner Typ 6L mit Außenrohr aus Stahl.  
Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum  
Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 16.** Übersicht der geplanten Versuche

**Tabelle A 17.** Temperaturmessung im Brenner Typ 6L, Düsenstock M8 aus Kupfer.  
Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum  
Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 18.** Temperaturmessung im Brenner Typ 6L, Düsenstock M8 aus Messing.  
Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum  
Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 19.** Temperaturmessung im Brenner Typ 6L, Düsenstock M10 aus  
Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum  
Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 20.** Übersicht der geplanten Versuche

**Tabelle A 21.** Temperaturmessung im Brenner Typ „Everest“. Schweißstrom 300 A,  
Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm,  
Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 22.** Temperaturmessung im Brenner Typ 5W. Schweißstrom 300 A,  
Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm,  
Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 23.** Übersicht der geplanten Versuche

**Tabelle A 24.** Temperaturmessung im Brenner Typ 7W. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 25.** Temperaturmessung im Brenner Typ 7W. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 26.** Übersicht der geplanten Versuche

**Tabelle A 27.** Temperaturmessung im Brenner Typ 9W. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 28.** Temperaturmessung im Brenner Typ 9W. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 29.** Temperaturmessung im Brenner Typ 9W. Schweißstrom 400 A, Spannung 40 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 30.** Übersicht der geplanten Versuche

**Tabelle A 31.** Temperaturmessung im Brenner Typ 9W Rob, Düsenträger aus Kupfer. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 32.** Temperaturmessung im Brenner Typ 9W Rob, Düsenträgeraufsatz aus Kupfer. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 33.** Temperaturmessung im Brenner Typ 9W Rob, Düsenträger aus Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 34.** Übersicht der geplanten Versuche

**Tabelle A 35.** Temperaturmessung im Brenner Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 36.** Temperaturmessung im Brenner Typ 411. Wasserdurchfluss 200 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 37.** Temperaturmessung im Brenner Typ 411. Wasserdurchfluss 300 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 38.** Temperaturmessung im Brenner Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 39.** Temperaturmessung im Brenner Typ 411. Wasserdurchfluss 200 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Tabelle A 40.** Temperaturmessung im Brenner Typ 411. Wasserdurchfluss 300 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Versuchsreihe-Nr.:** 1**Titel:**

Vergleich der Brenner vom Typ 150 mit dem Brennerhals aus Stahl und aus Messing

**Ziel:**

Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Werkstoffe (Messing, Stahl) für die Gestaltung des Brennerhalses von luftgekühlten Brennern Typ 150 auf die Erwärmungsdynamik und die Temperaturverteilung im Brennerhals

**Prüfobjekt:**

Bild A 1. Brenner Typ 150, luftgekühlt

**Versuchsplanung:**

Tabelle A 1. Übersicht der geplanten Versuche

	Typ 150 Messing	Typ 150 Stahl
30% ED	X	X
60% ED	X	X
80% ED	X	X
100% ED	X	X

Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Abstand zum Werkstück 12 mm,  
Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Bild A 2. Schema der Messpunkte

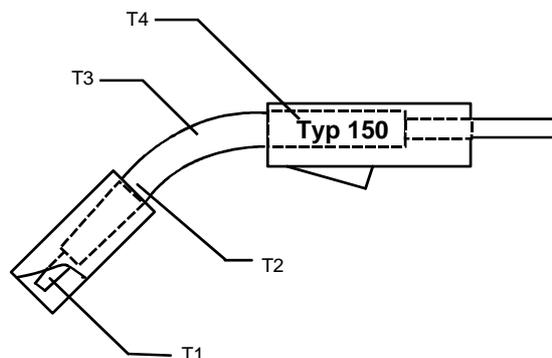


Tabelle A 2. Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Messing . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 30%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

ED 30%		Temperatur, °C			
Messpunkt	Messung	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	Zyklus 4
<b>1</b>	1	70,50	71,50	116,80	125,60
	2	77,30	81,50	142,70	148,90
	3	64,10	88,00	130,50	132,50
	<b>Mittelwert</b>	<b>70,63</b>	<b>80,33</b>	<b>130,00</b>	<b>135,67</b>
	Mittelabw	4,44	5,89	8,80	8,82
<b>2</b>	1	80,10	120,40	139,20	149,30
	2	74,50	128,00	161,40	168,90
	3	71,00	111,90	151,00	162,10
	<b>Mittelwert</b>	<b>75,20</b>	<b>120,10</b>	<b>150,53</b>	<b>160,10</b>
	Mittelabw	3,27	5,47	7,56	7,20
<b>3</b>	1	83,10	107,40	111,60	115,10
	2	71,50	120,40	126,50	134,80
	3	72,80	118,70	122,00	127,30
	<b>Mittelwert</b>	<b>75,80</b>	<b>115,50</b>	<b>120,03</b>	<b>125,73</b>
	Mittelabw	4,87	5,40	5,62	7,09
<b>4</b>	1	59,50	78,00	91,00	97,00
	2	69,70	87,00	79,00	87,20
	3	72,10	75,00	85,60	86,40
	<b>Mittelwert</b>	<b>67,10</b>	<b>80,00</b>	<b>85,20</b>	<b>90,20</b>
	Mittelabw	5,07	4,67	4,13	4,53

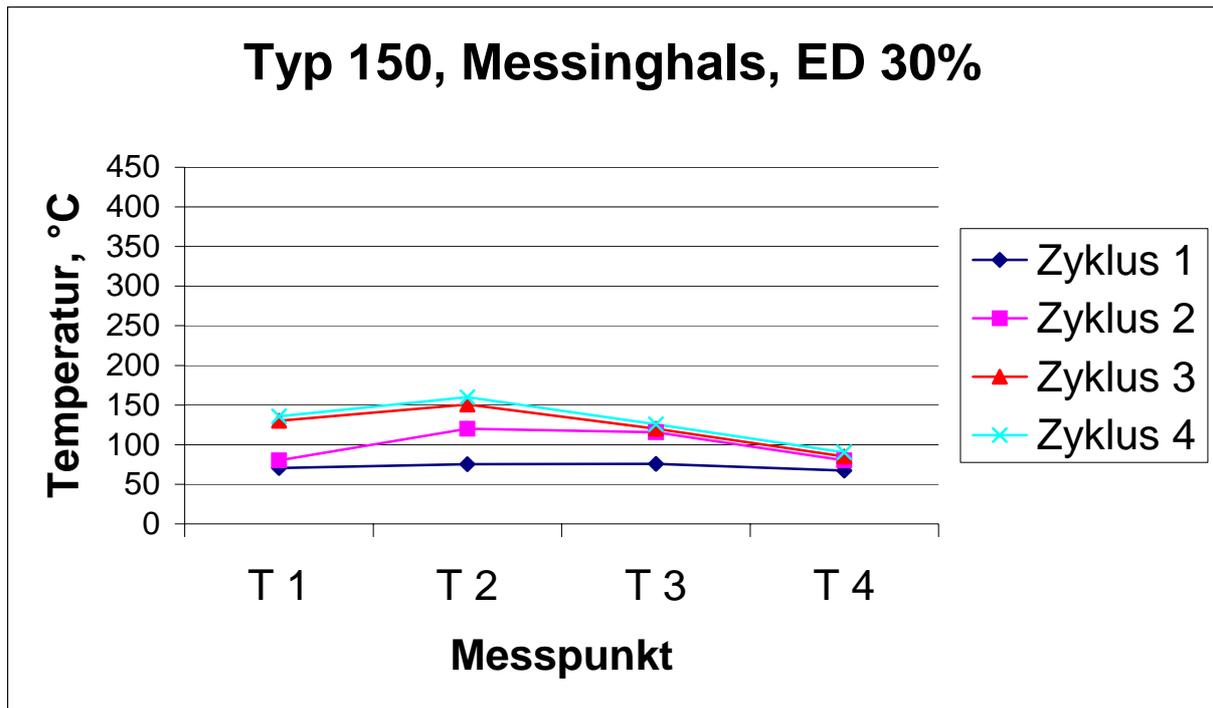


Bild A 3. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Messing, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 30%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

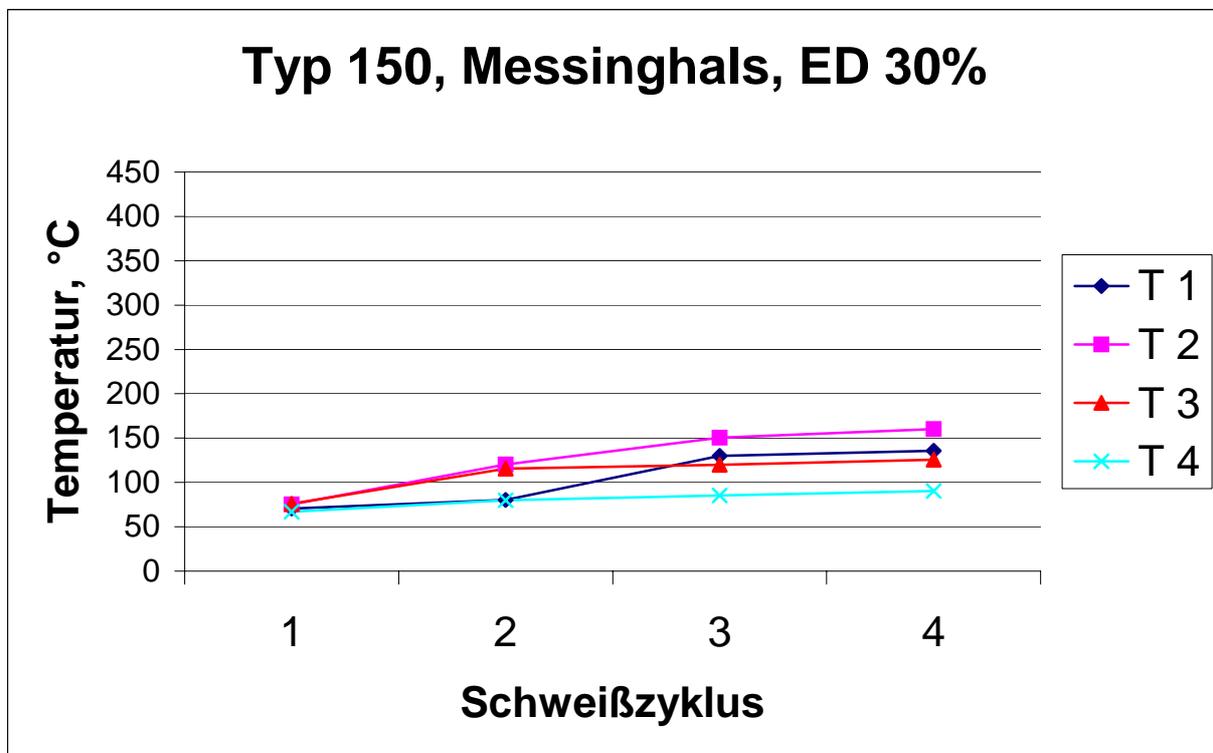


Bild A 4. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Messing. Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 30%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 3. Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Messing . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 60%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

ED 60%		Temperatur, °C			
Messpunkt	Messung	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	Zyklus 4
<b>1</b>	1	116,30	118,00	129,70	137,30
	2	101,50	103,00	149,00	164,50
	3	112,00	110,00	141,50	148,40
	<b>Mittelwert</b>	<b>109,93</b>	<b>110,33</b>	<b>140,07</b>	<b>150,07</b>
	Mittelabw	5,62	5,11	6,91	9,62
<b>2</b>	1	107,00	124,00	137,20	167,50
	2	125,00	139,80	161,00	194,00
	3	114,10	127,60	153,00	178,90
	<b>Mittelwert</b>	<b>115,37</b>	<b>130,47</b>	<b>150,40</b>	<b>180,13</b>
	Mittelabw	6,42	6,22	8,80	9,24
<b>3</b>	1	119,00	117,70	110,40	129,60
	2	104,50	129,90	131,00	155,40
	3	107,70	114,00	121,30	148,90
	<b>Mittelwert</b>	<b>110,40</b>	<b>120,53</b>	<b>120,90</b>	<b>144,63</b>
	Mittelabw	5,73	6,24	7,00	10,02
<b>4</b>	1	109,00	123,90	91,00	97,00
	2	92,80	108,50	94,80	110,40
	3	101,80	102,90	85,20	92,90
	<b>Mittelwert</b>	<b>101,20</b>	<b>111,77</b>	<b>90,33</b>	<b>100,10</b>
	Mittelabw	5,60	8,09	3,42	6,87

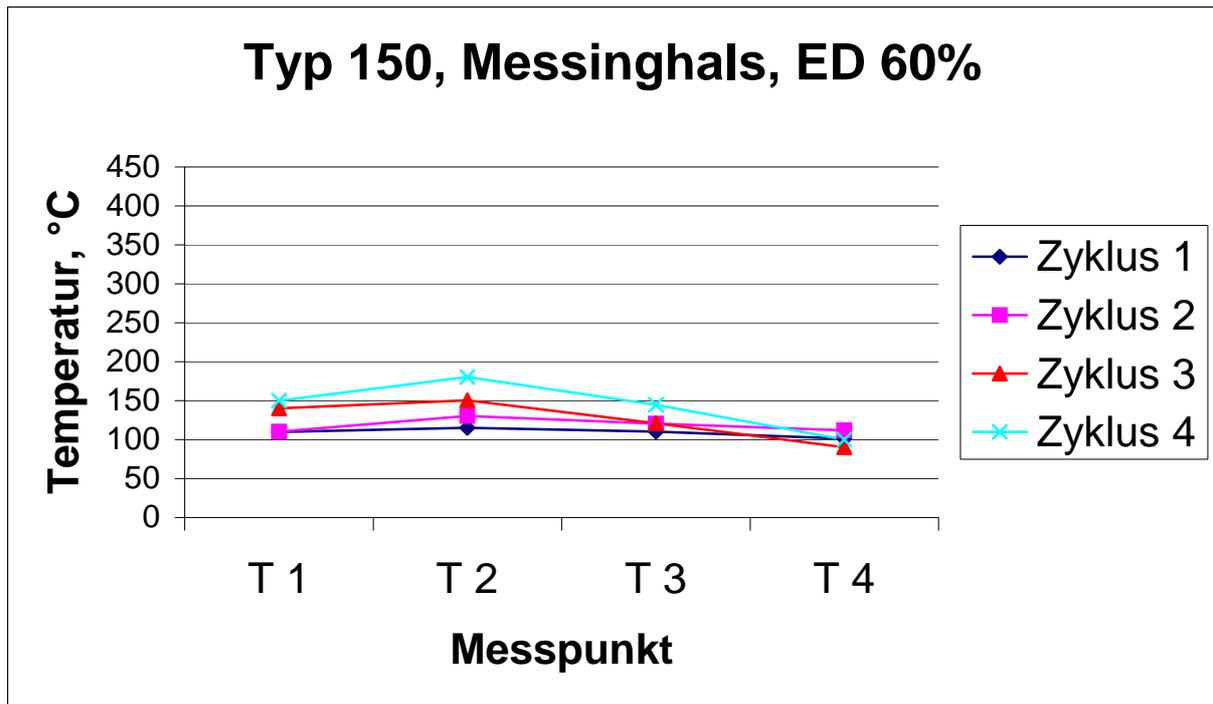


Bild A 5. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Messing, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 60%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

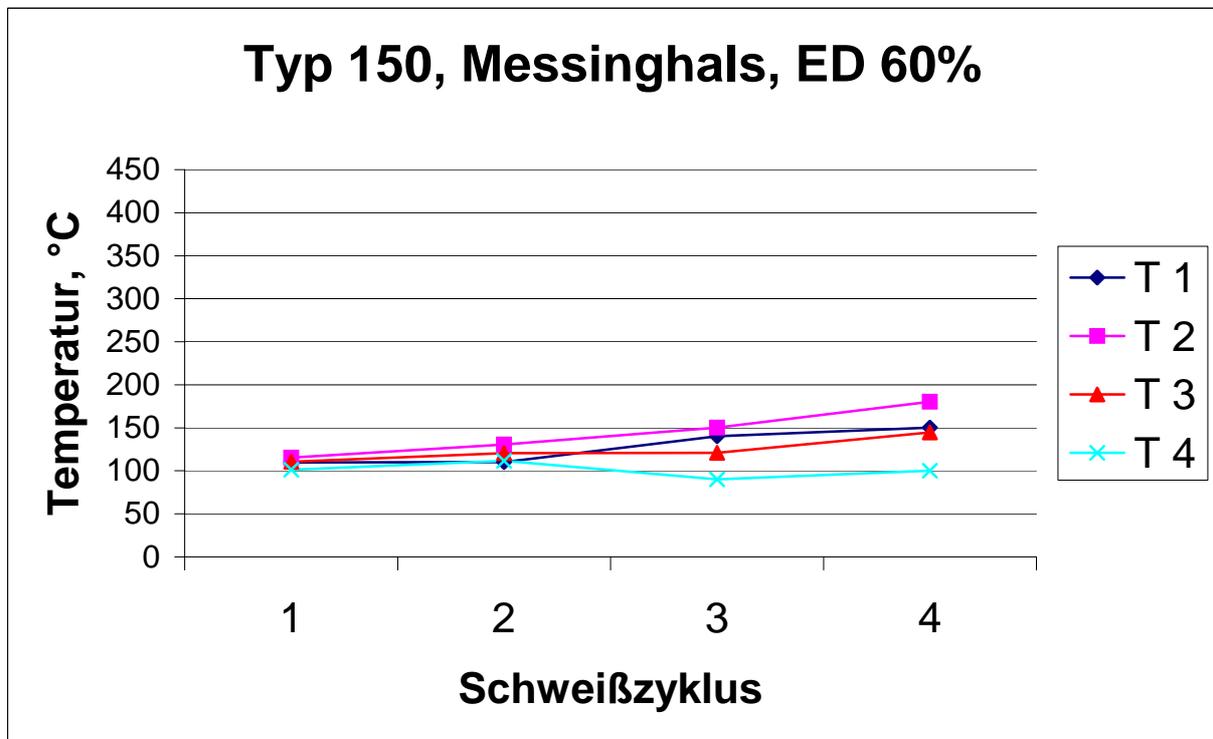


Bild A 6. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Messing. Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 60%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 4. Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Messing . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

ED 80%		Temperatur, °C			
Messpunkt	Messung	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	Zyklus 4
<b>1</b>	1	140,70	184,50	284,00	307,00
	2	151,00	215,00	325,00	344,00
	3	131,00	201,00	285,00	340,00
	<b>Mittelwert</b>	<b>140,90</b>	<b>200,17</b>	<b>298,00</b>	<b>330,33</b>
	Mittelabw	6,73	10,44	18,00	15,56
<b>2</b>	1	151,00	161,00	194,10	217,70
	2	169,00	178,00	179,40	199,30
	3	154,00	157,80	175,00	188,00
	<b>Mittelwert</b>	<b>158,00</b>	<b>165,60</b>	<b>182,83</b>	<b>201,67</b>
	Mittelabw	7,33	8,27	7,51	10,69
<b>3</b>	1	92,40	123,70	127,70	130,60
	2	112,00	111,80	108,60	147,60
	3	98,00	113,90	125,60	144,70
	<b>Mittelwert</b>	<b>100,80</b>	<b>116,47</b>	<b>120,63</b>	<b>140,97</b>
	Mittelabw	7,47	4,82	8,02	6,91
<b>4</b>	1	73,50	99,50	105,40	111,30
	2	96,10	105,45	95,80	97,00
	3	102,80	85,00	91,70	92,90
	<b>Mittelwert</b>	<b>90,80</b>	<b>96,65</b>	<b>97,63</b>	<b>100,40</b>
	Mittelabw	11,53	7,77	5,18	7,27

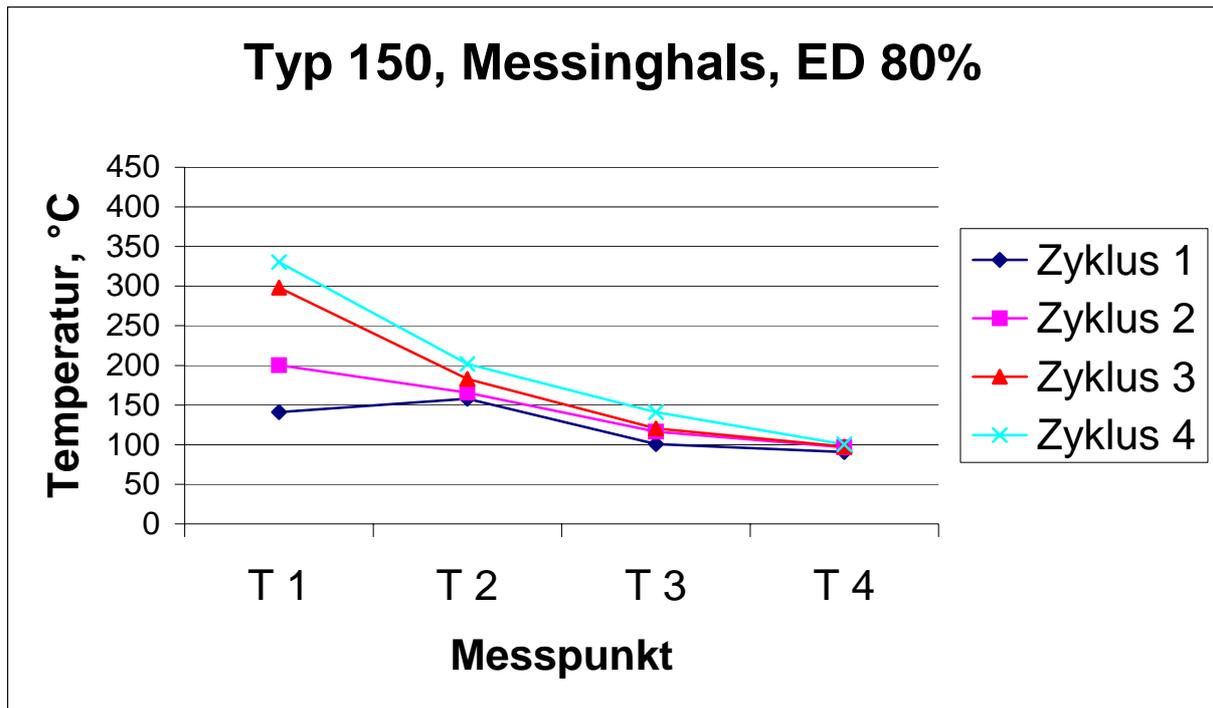


Bild A 7. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Messing, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

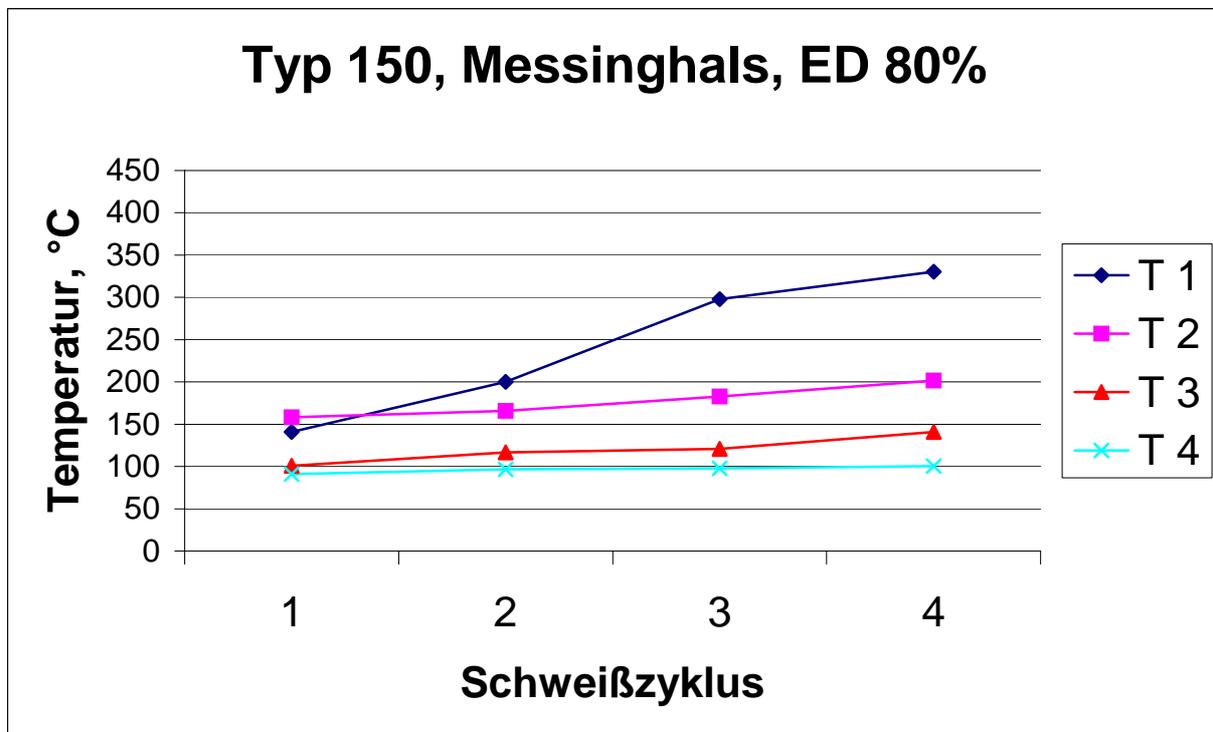


Bild A 8. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Messing. Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 5. Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Messing . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

<b>ED 100%</b>		<b>Temperatur, °C</b>			
Messpunkt	Messung	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	Zyklus 4
<b>1</b>	1	380,00	389,00	382,00	397,00
	2	346,00	349,00	354,00	347,00
	3	360,00	361,00	361,00	358,00
	<b>Mittelwert</b>	<b>362,00</b>	<b>366,33</b>	<b>365,67</b>	<b>367,33</b>
	Mittelabw	12,00	15,11	10,89	19,78
<b>2</b>	1	165,00	205,00	188,70	201,00
	2	179,40	189,00	215,00	219,00
	3	165,70	207,00	197,00	189,00
	<b>Mittelwert</b>	<b>170,03</b>	<b>200,33</b>	<b>200,23</b>	<b>203,00</b>
	Mittelabw	6,24	7,56	9,84	10,67
<b>3</b>	1	100,80	132,30	135,40	130,60
	2	123,00	128,90	129,00	142,70
	3	118,70	114,30	128,00	129,90
	<b>Mittelwert</b>	<b>114,17</b>	<b>125,17</b>	<b>130,80</b>	<b>134,40</b>
	Mittelabw	8,91	7,24	3,07	5,53
<b>4</b>	1	88,40	100,90	107,20	104,00
	2	97,20	98,90	98,90	99,00
	3	83,90	115,10	116,00	118,00
	<b>Mittelwert</b>	<b>89,83</b>	<b>104,97</b>	<b>107,37</b>	<b>107,00</b>
	Mittelabw	4,91	6,76	5,76	7,33

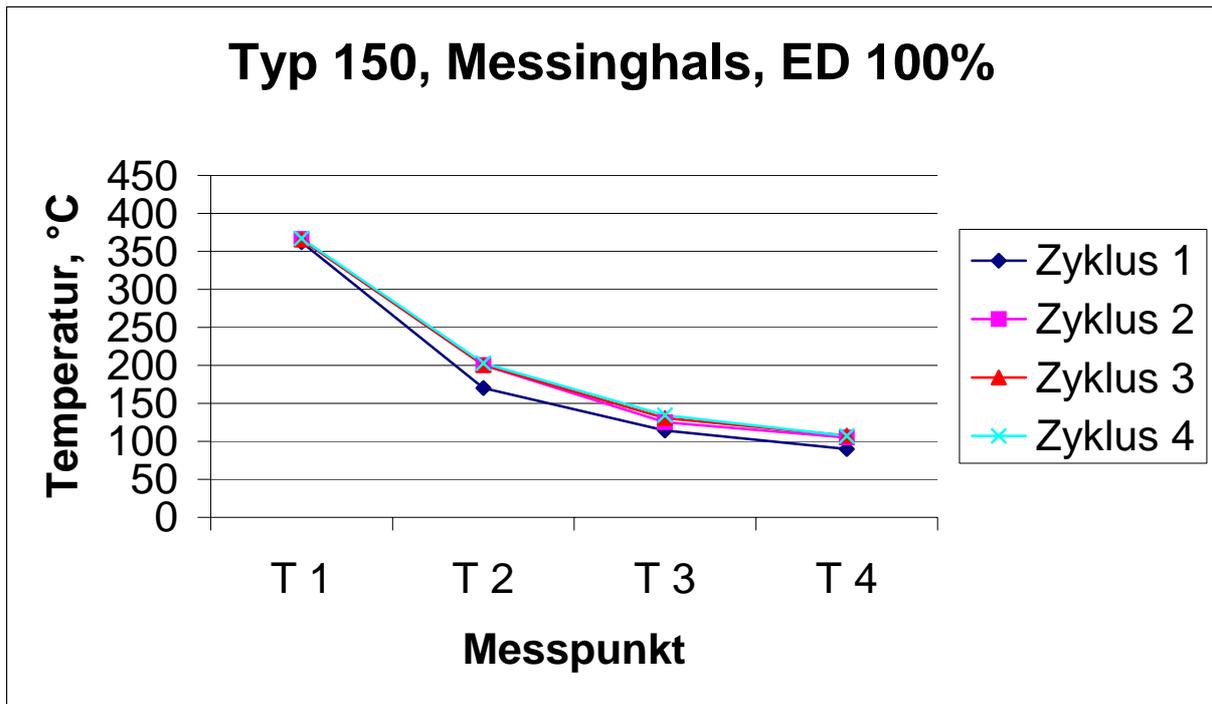


Bild A 9. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Messing, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

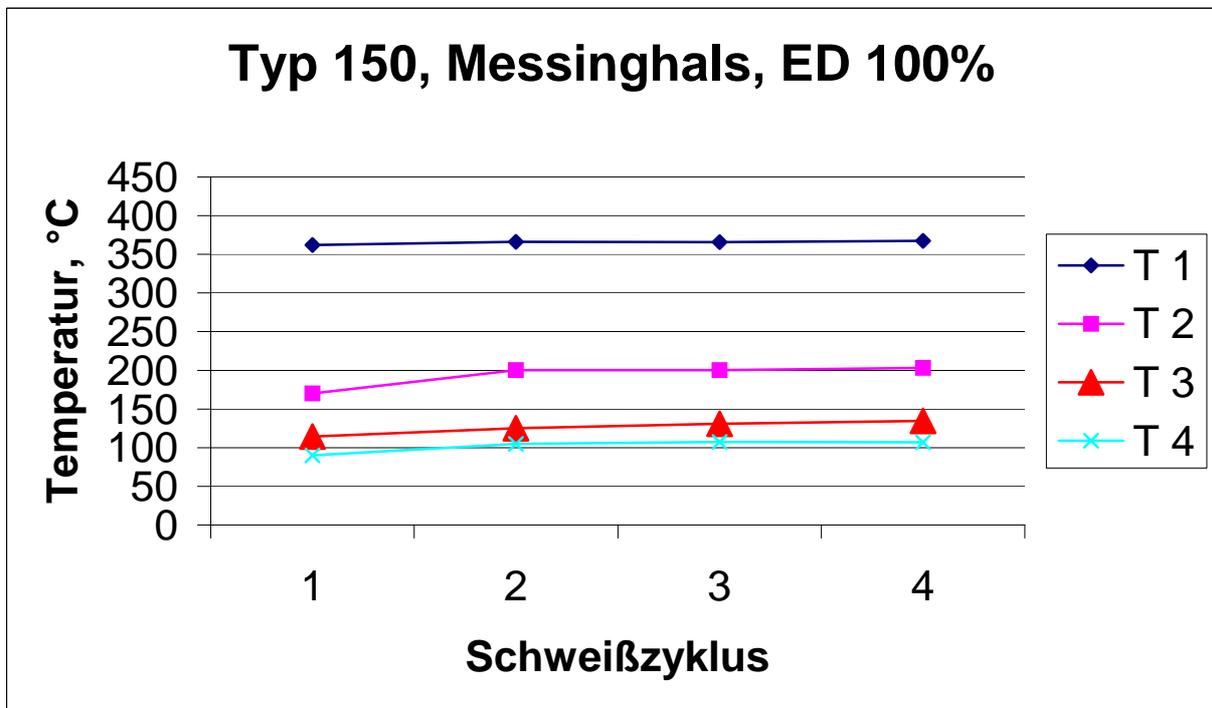


Bild A 10. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Messing. Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 6. Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Stahl . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 30%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

ED 30%		Temperatur, °C			
Messpunkt	Messung	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	Zyklus 4
<b>1</b>	1	82,50	124,10	178,80	199,90
	2	74,70	88,50	137,90	167,40
	3	85,00	109,80	164,00	181,10
	<b>Mittelwert</b>	<b>80,73</b>	<b>107,47</b>	<b>160,23</b>	<b>182,80</b>
	Mittelabw	4,02	12,64	14,89	11,40
<b>2</b>	1	90,50	99,80	137,50	146,70
	2	98,30	91,70	103,70	117,80
	3	81,70	83,60	121,30	126,90
	<b>Mittelwert</b>	<b>90,17</b>	<b>91,70</b>	<b>120,83</b>	<b>130,47</b>
	Mittelabw	5,64	5,40	11,42	10,82
<b>3</b>	1	83,90	88,00	100,50	110,90
	2	96,70	109,00	125,80	98,90
	3	89,70	104,50	105,70	121,00
	<b>Mittelwert</b>	<b>90,10</b>	<b>100,50</b>	<b>110,67</b>	<b>110,27</b>
	Mittelabw	4,40	8,33	10,09	7,58
<b>4</b>	1	76,90	79,50	88,10	91,50
	2	65,50	68,90	72,40	75,50
	3	69,40	65,30	82,00	76,10
	<b>Mittelwert</b>	<b>70,60</b>	<b>71,23</b>	<b>80,83</b>	<b>81,03</b>
	Mittelabw	4,20	5,51	5,62	6,98

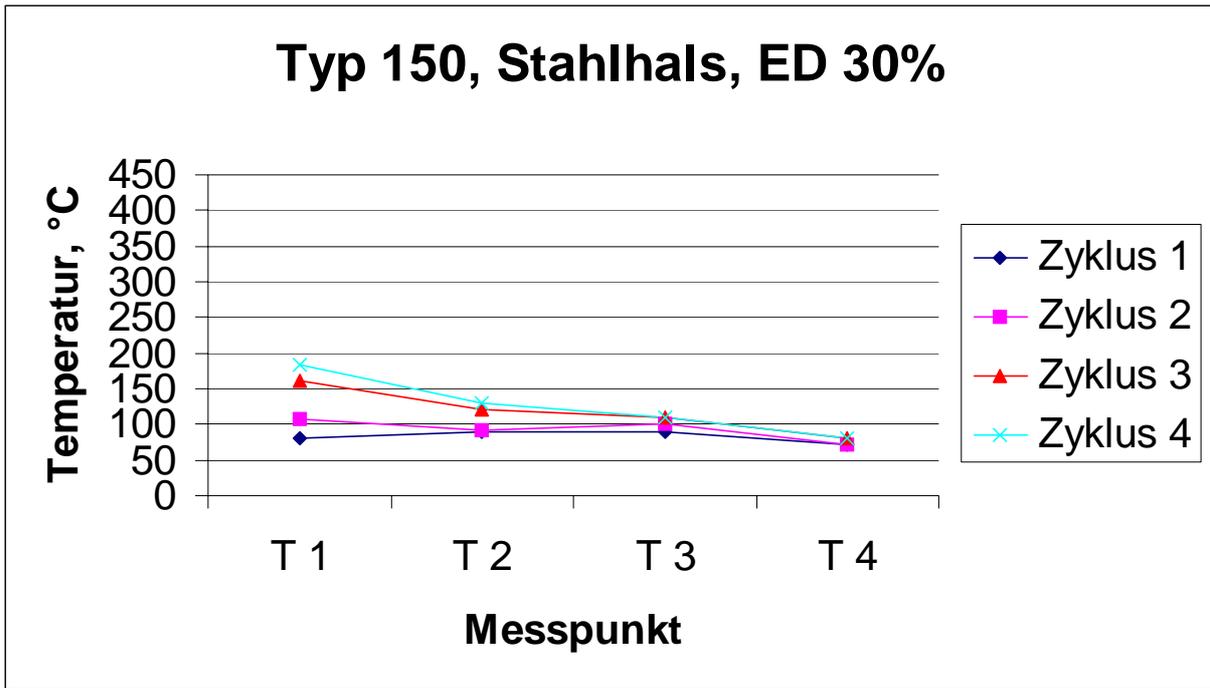


Bild A 11. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Stahl, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 30%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

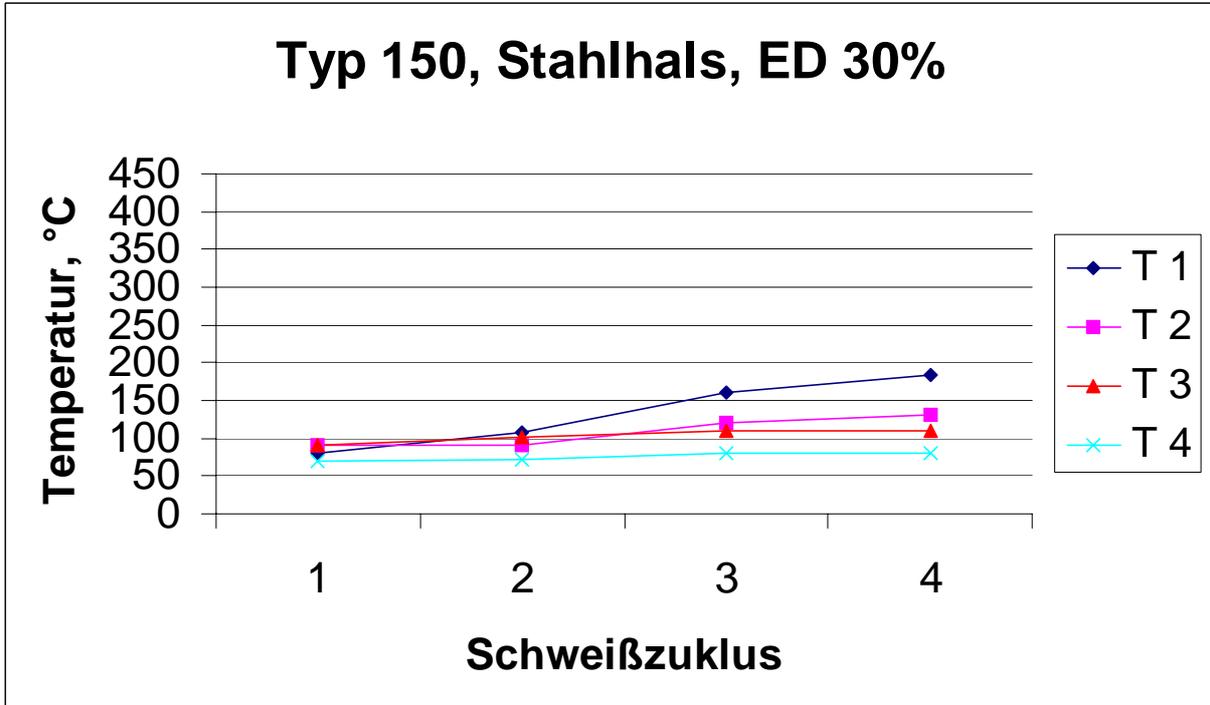


Bild A 12. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Stahl. Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 30%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 7. Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Stahl . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 60%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

ED 60%		Temperatur, °C			
Messpunkt	Messung	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	Zyklus 4
<b>1</b>	1	131,50	171,60	221,40	277,10
	2	144,00	194,00	191,70	241,40
	3	150,00	181,00	187,00	250,70
	<b>Mittelwert</b>	<b>141,83</b>	<b>182,20</b>	<b>200,03</b>	<b>256,40</b>
	Mittelabw	6,89	7,87	14,24	13,80
<b>2</b>	1	107,80	154,00	177,30	201,80
	2	93,50	128,90	161,10	213,40
	3	99,00	141,10	183,10	189,00
	<b>Mittelwert</b>	<b>100,10</b>	<b>141,33</b>	<b>173,83</b>	<b>201,40</b>
	Mittelabw	5,13	8,44	8,49	8,27
<b>3</b>	1	95,50	117,70	140,90	167,00
	2	110,00	132,60	135,60	141,00
	3	100,10	109,90	121,50	149,00
	<b>Mittelwert</b>	<b>101,87</b>	<b>120,07</b>	<b>132,67</b>	<b>152,33</b>
	Mittelabw	5,42	8,36	7,44	9,78
<b>4</b>	1	94,00	114,50	110,50	108,00
	2	81,50	95,80	90,60	89,40
	3	79,80	89,90	99,00	76,10
	<b>Mittelwert</b>	<b>85,10</b>	<b>100,07</b>	<b>100,03</b>	<b>91,17</b>
	Mittelabw	5,93	9,62	6,98	11,22

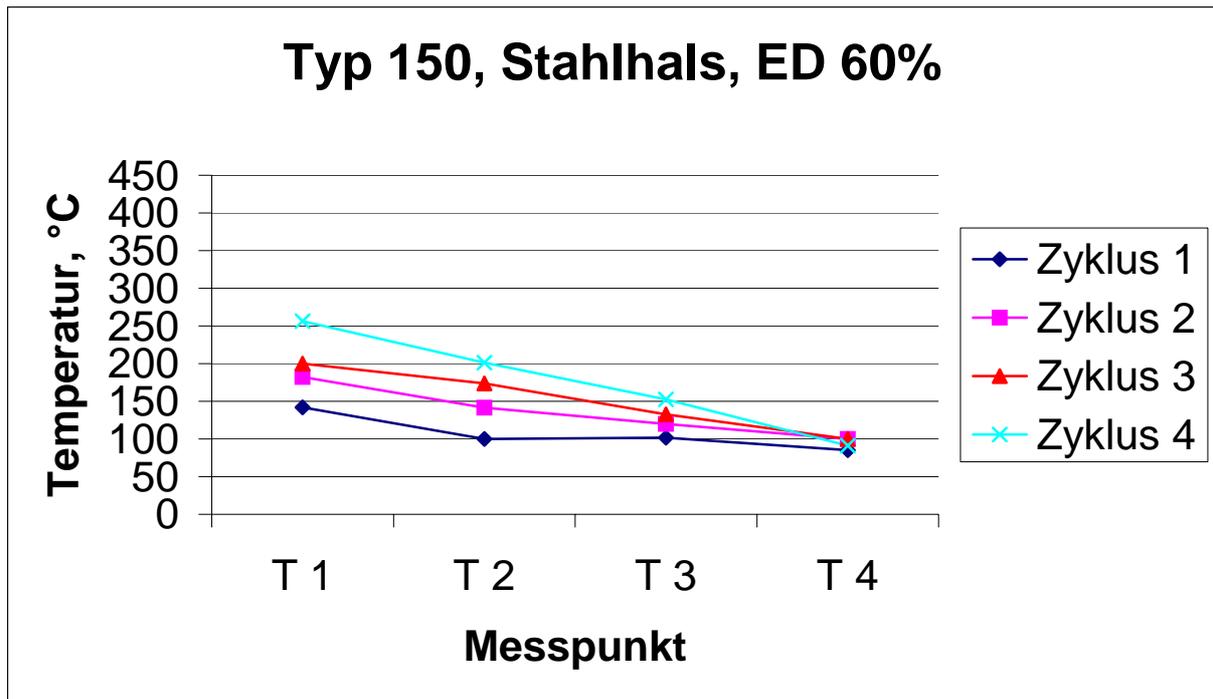


Bild A 13. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Stahl, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 60%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

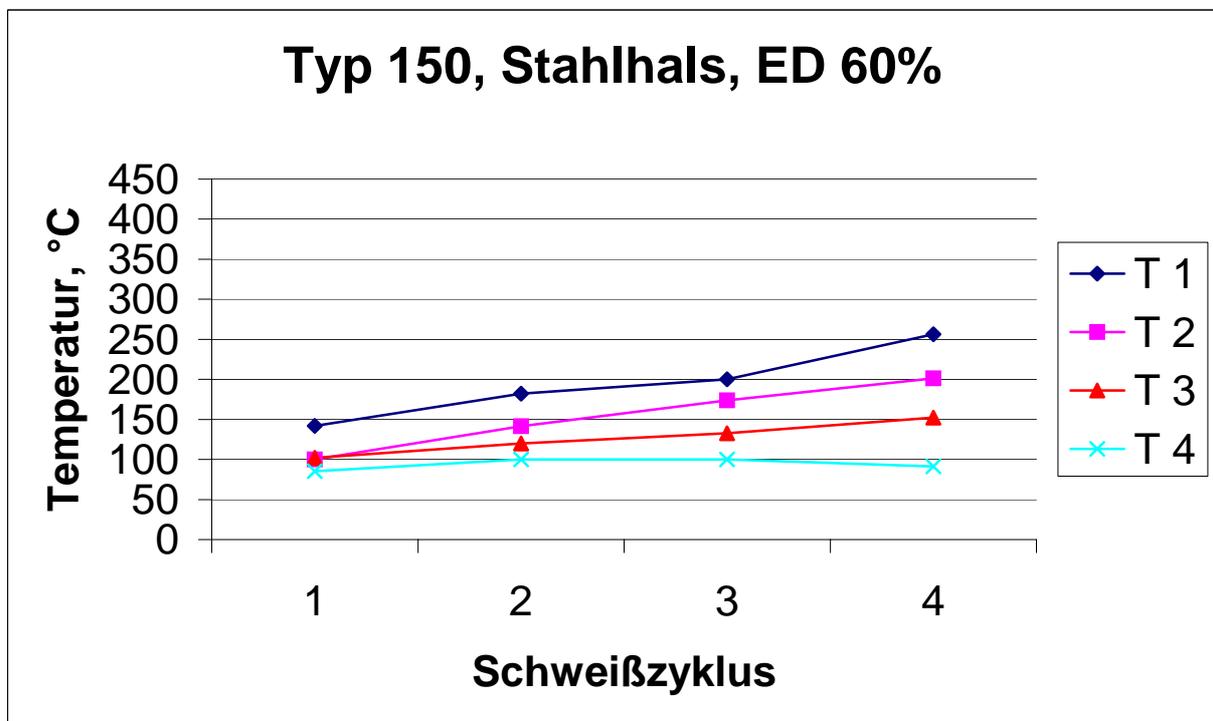


Bild A 14. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Stahl. Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 60%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 8. Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Stahl . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

ED 80%		Temperatur, °C			
Messpunkt	Messung	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	Zyklus 4
<b>1</b>	1	329,00	339,50	349,30	356,40
	2	354,30	368,10	384,10	391,80
	3	312,10	351,00	368,00	371,50
	<b>Mittelwert</b>	<b>331,80</b>	<b>352,87</b>	<b>367,13</b>	<b>373,23</b>
	Mittelabw	15,00	10,16	11,89	12,38
<b>2</b>	1	208,70	217,80	209,00	227,10
	2	221,50	249,40	244,80	256,00
	3	201,80	235,00	239,00	264,00
	<b>Mittelwert</b>	<b>210,67</b>	<b>234,07</b>	<b>230,93</b>	<b>249,03</b>
	Mittelabw	7,22	10,84	14,62	14,62
<b>3</b>	1	96,70	118,10	131,90	144,10
	2	123,00	144,00	143,80	150,20
	3	109,40	105,00	111,40	132,50
	<b>Mittelwert</b>	<b>109,70</b>	<b>122,37</b>	<b>129,03</b>	<b>142,27</b>
	Mittelabw	8,87	14,42	11,76	6,51
<b>4</b>	1	90,40	114,50	110,50	100,70
	2	85,90	95,80	90,60	109,20
	3	96,70	89,90	99,00	96,00
	<b>Mittelwert</b>	<b>91,00</b>	<b>100,07</b>	<b>100,03</b>	<b>101,97</b>
	Mittelabw	3,80	9,62	6,98	4,82

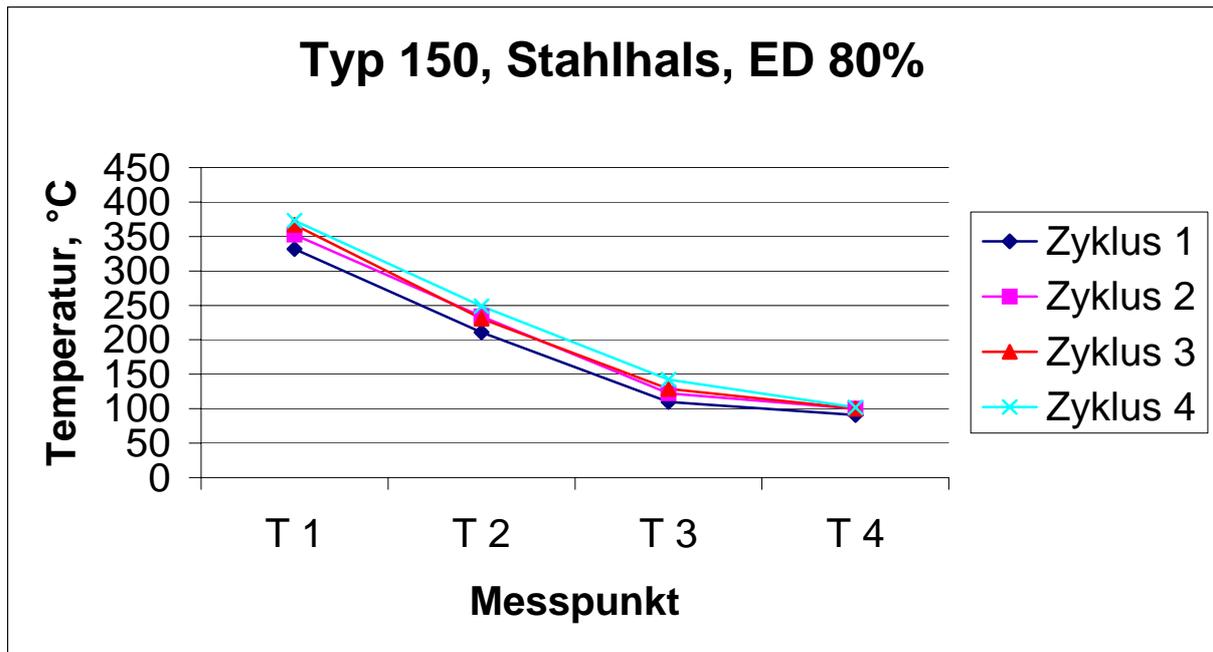


Bild A 15. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Stahl, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

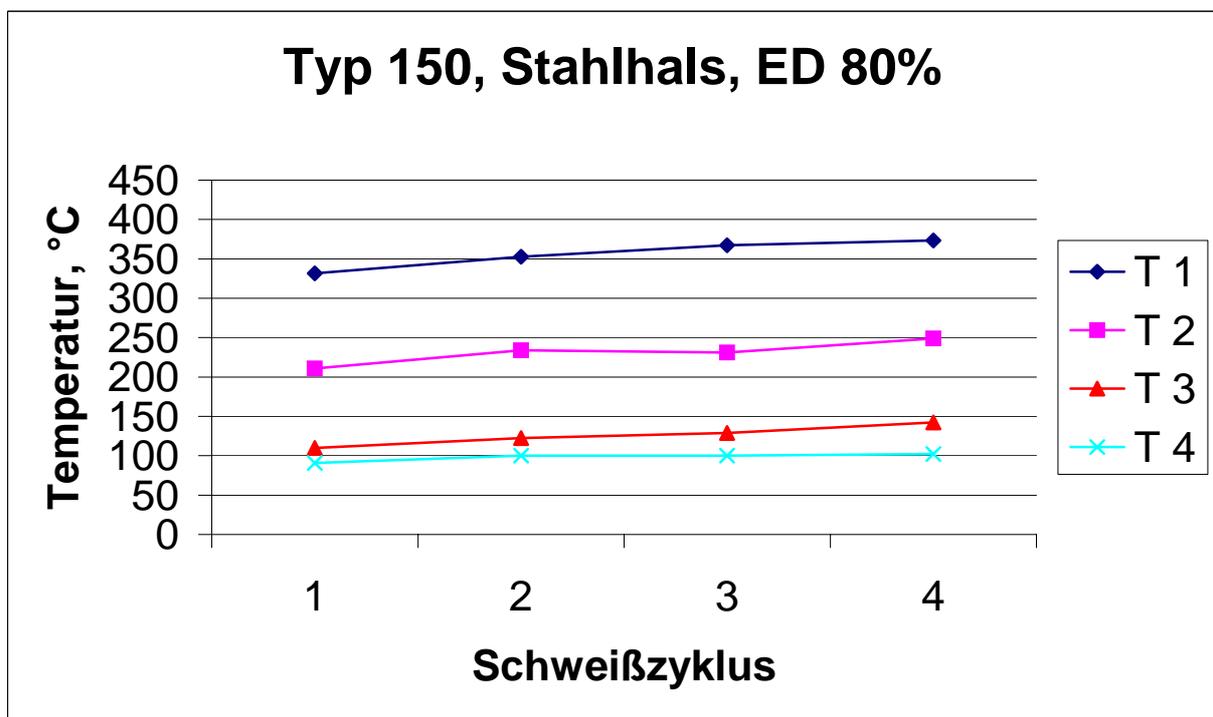


Bild A 16. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Stahl. Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 80%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 9. Temperaturmessung im Brenner Typ 150 aus Stahl . Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

ED 100%		Temperatur, °C			
Messpunkt	Messung	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	Zyklus 4
<b>1</b>	1	378,50	398,70	417,00	409,00
	2	399,40	454,70	457,00	477,80
	3	375,50	425,00	421,00	427,00
	<b>Mittelwert</b>	<b>384,47</b>	<b>426,13</b>	<b>431,67</b>	<b>437,93</b>
	Mittelabw	9,96	19,04	16,89	26,58
<b>2</b>	1	211,80	201,00	209,70	236,70
	2	224,60	228,70	254,00	273,90
	3	229,00	203,70	245,70	269,90
	<b>Mittelwert</b>	<b>221,80</b>	<b>211,13</b>	<b>236,47</b>	<b>260,17</b>
	Mittelabw	6,67	11,71	17,84	15,64
<b>3</b>	1	132,00	147,80	154,50	160,00
	2	117,40	139,70	162,70	158,70
	3	121,70	131,80	135,00	131,90
	<b>Mittelwert</b>	<b>123,70</b>	<b>139,77</b>	<b>150,73</b>	<b>150,20</b>
	Mittelabw	5,53	5,36	10,49	12,20
<b>4</b>	1	87,10	89,70	93,10	97,60
	2	99,10	114,00	109,90	119,00
	3	85,00	107,00	101,00	118,00
	<b>Mittelwert</b>	<b>90,40</b>	<b>103,57</b>	<b>101,33</b>	<b>111,53</b>
	Mittelabw	5,80	9,24	5,71	9,29

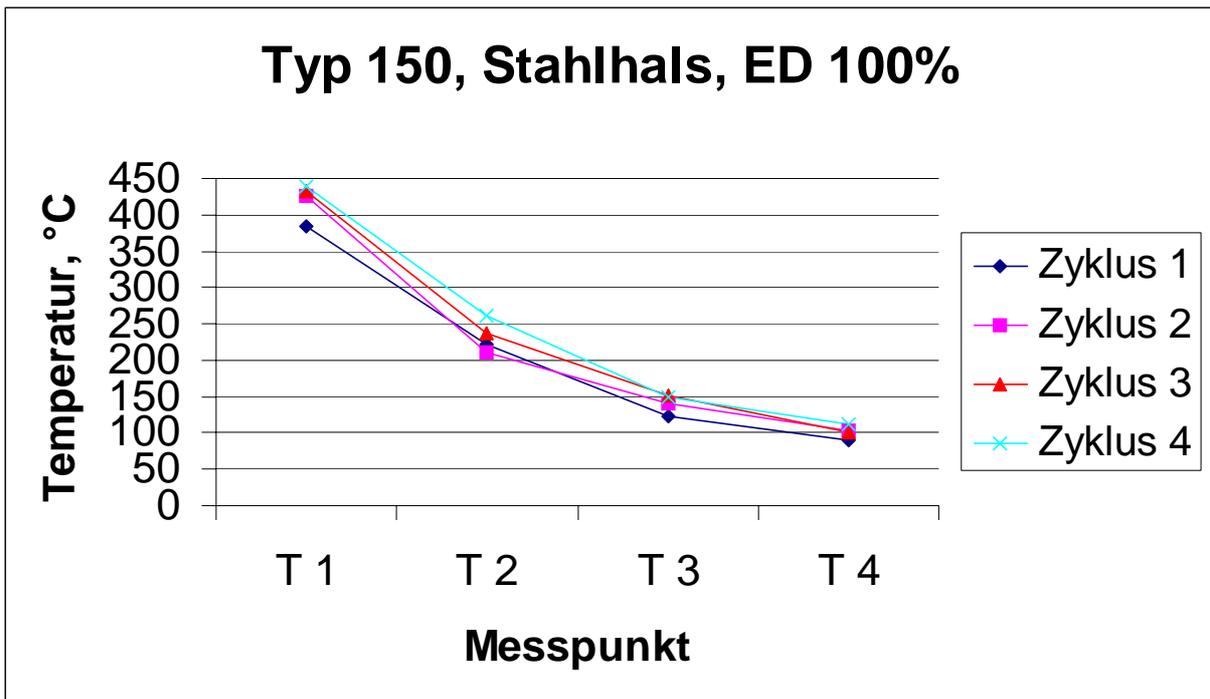


Bild A 17. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 150 aus Stahl, Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

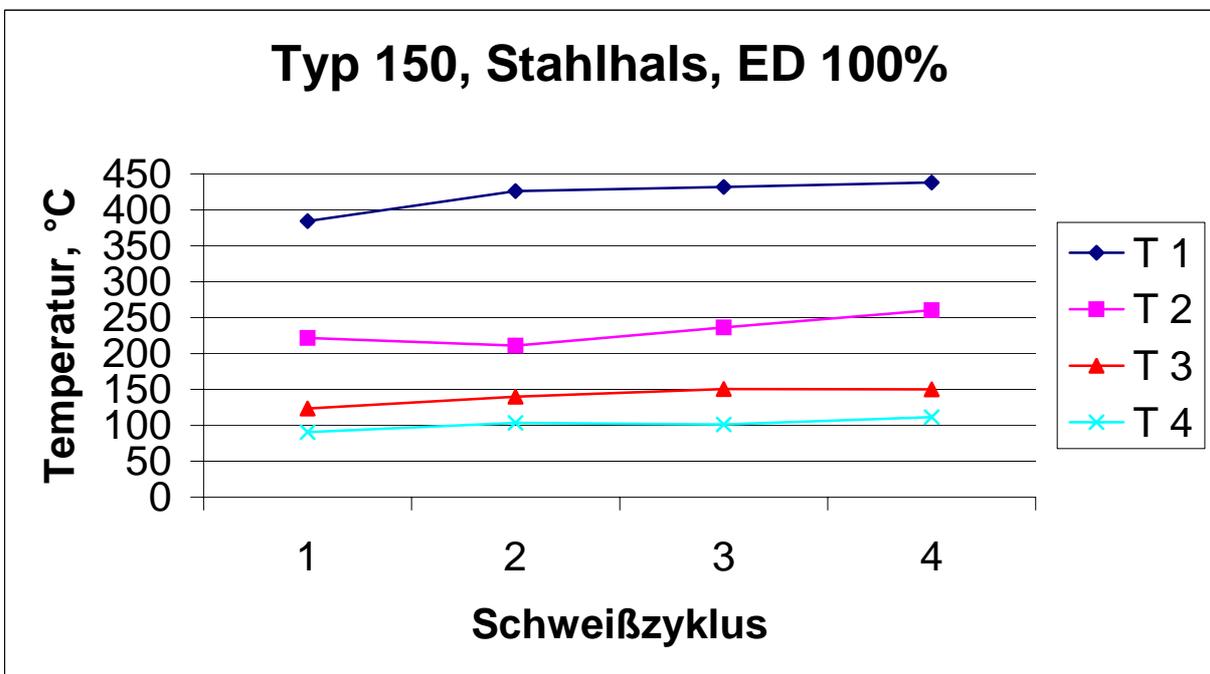


Bild A 18. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 150 aus Stahl. Schweißstrom 150 A, Spannung 28 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 12 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Versuchsreihe-Nr.: 2****Titel:**

Vergleich der Brenner vom Typ 360 mit Außenrohr aus Stahl und aus Messing

**Ziel:**

Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Werkstoffe (Messing, Stahl) für die Gestaltung des Außenrohrs des luftgekühlten Brenners Typ 360 auf die Erwärmungsdynamik und die Temperaturverteilung im Brenner

**Prüfobjekt:**

Bild A 19. Brenner Typ 360, luftgekühlt

**Versuchsplanung:**

Tabelle A 10. Übersicht der geplanten Versuche

	Typ 360 Messing	Typ 360 Stahl
100% ED	<b>X</b>	<b>X</b>

Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Bild A 20. Schema der Messpunkte

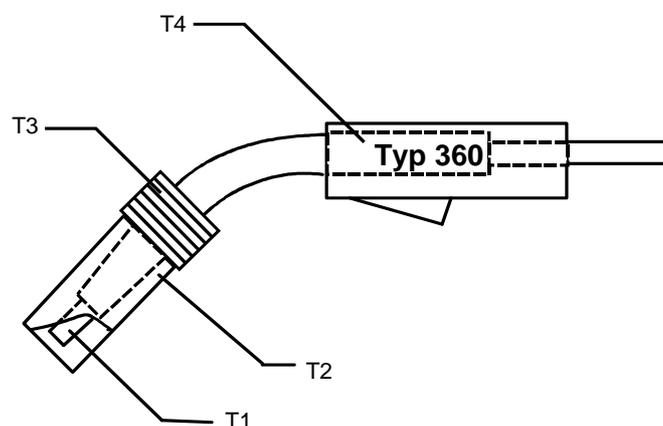


Tabelle A 11. Temperaturmessung im Brenner Typ 360 mit Außenrohr aus Messing . Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit											
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	
1	1	22	244	261	298	300	311	318	312	300	301	310	
	2	22	230	271	320	325	327	320	324	318	334	324	
	3	22	295	320	378	387	399	404	413	409	421	420	
	4	22	355	395	400	412	409	419	415	425	410	409	
	5	22	331	383	429	432	429	419	421	408	417	426	
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>22</b>	<b>291</b>	<b>326</b>	<b>365</b>	<b>371,2</b>	<b>375</b>	<b>376</b>	<b>377</b>	<b>372</b>	<b>376,6</b>	<b>377,8</b>	
	Mittelabw	0	43,2	50,4	44,8	46,96	44,8	45,6	47,2	50,4	47,28	48,64	
2	1	22	120	156	186	220	260	272	290	300	300	297	
	2	22	137	162	182	212	251	269	270	286	290	284	
	3	22	160	167	247	269	315	332	344	346	341	352	
	4	22	144	156	241	273	299	308	298	301	298	305	
	5	22	170	201	287	337	369	377	359	364	357	360	
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>22</b>	<b>146,2</b>	<b>168,4</b>	<b>228,6</b>	<b>262,2</b>	<b>298,8</b>	<b>311,6</b>	<b>312,2</b>	<b>319,4</b>	<b>317,2</b>	<b>319,6</b>	
	Mittelabw	0	15,04	13,04	35,68	36,96	34,64	34,32	31,44	28,48	25,44	29,12	
3	1	22	80	147	180	224	245	260	286	290	287	280	
	2	22	65	132	154	208	255	247	256	265	270	269	
	3	22	100	123	200	279	298	309	299	290	280	286	
	4	22	106	150	207	282	342	349	345	338	342	346	
	5	22	96	195	215	318	350	345	344	340	348	347	
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>22</b>	<b>89,4</b>	<b>149,4</b>	<b>191,2</b>	<b>262,2</b>	<b>298</b>	<b>302</b>	<b>306</b>	<b>304,6</b>	<b>305,4</b>	<b>305,6</b>	
	Mittelabw	0	13,52	18,48	19,36	36,96	38,4	38,8	30,8	27,52	31,68	32,72	
4	1	22	30	44	59	77	88	108	126	136	124	120	
	2	22	30	49	56	69	89	99	112	127	129	133	
	3	22	30	47	62	83	112	134	144	141	138	128	
	4	22	46	57	78	89	121	139	148	159	162	166	
	5	22	34	41	67	93	129	137	139	129	130	137	
<b>T4</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>22</b>	<b>34</b>	<b>47,6</b>	<b>64,4</b>	<b>82,2</b>	<b>107,8</b>	<b>123,4</b>	<b>133,8</b>	<b>138,4</b>	<b>136,6</b>	<b>136,8</b>	
	Mittelabw	0	4,8	4,32	6,48	7,36	15,44	15,92	11,84	9,28	10,72	11,76	

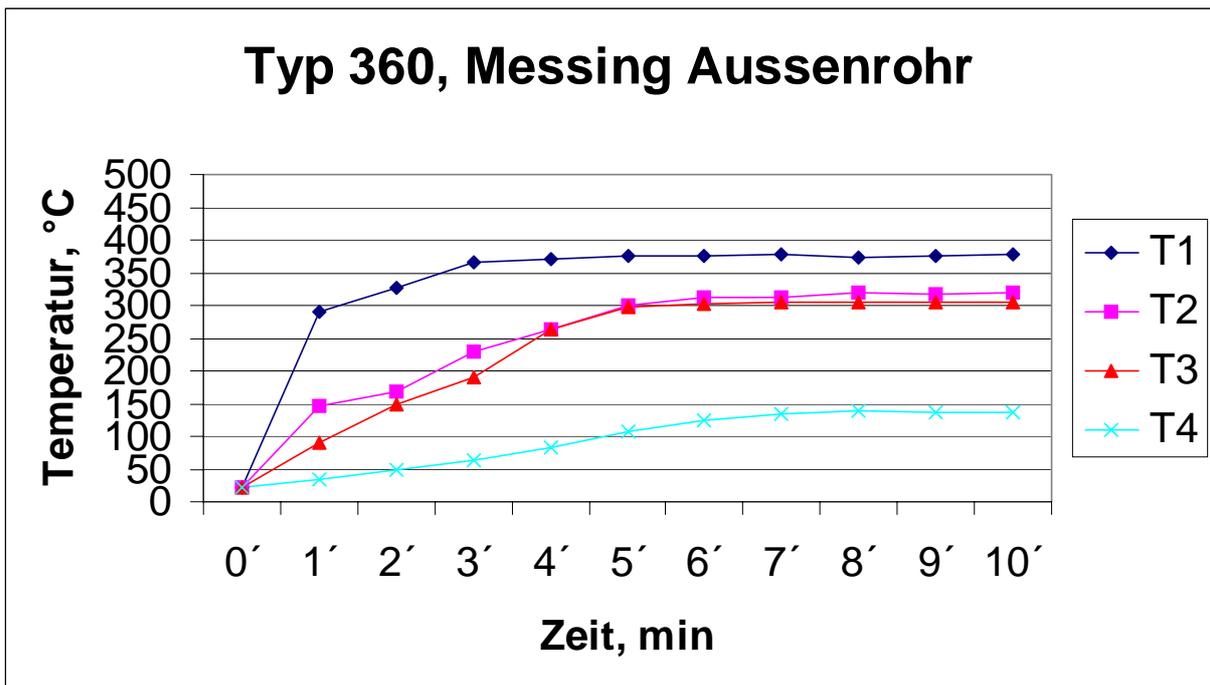


Bild A 21. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 360 mit Außenrohr aus Messing, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

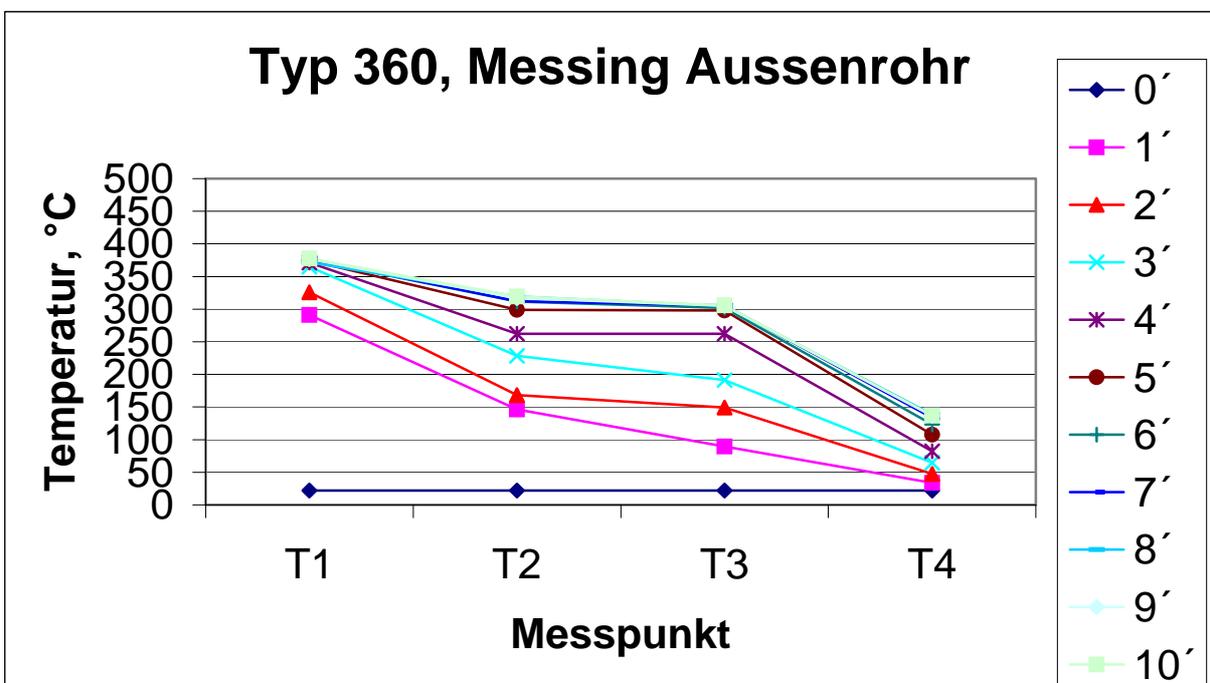


Bild A 22. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 360 mit Außenrohr aus Messing, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 12. Temperaturmessung im Brenner Typ 360 mit Außenrohr aus Stahl . Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	22	451	505	547	595	584	559	543	555	548	551
	2	22	382	443	437	492	522	520	511	517	512	509
	3	22	350	390	401	430	442	452	447	442	469	471
	4	22	330	361	382	394	409	420	416	417	424	438
	5	22	331	381	397	420	424	440	435	429	422	430
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>22</b>	<b>368,8</b>	<b>416</b>	<b>432,8</b>	<b>466,2</b>	<b>476,2</b>	<b>478,2</b>	<b>470,4</b>	<b>472</b>	<b>475</b>	<b>479,8</b>
	Mittelabw	0	38,16	46,4	47,36	61,84	61,44	49,04	45,28	51,2	44	40,16
2	1	22	203	333	359	425	427	433	428	420	429	431
	2	22	214	264	294	346	378	367	372	358	362	365
	3	22	180	210	256	278	213	237	259	300	319	336
	4	22	159	254	270	320	386	397	401	434	400	399
	5	22	160	220	231	273	331	300	311	317	306	303
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>22</b>	<b>183,2</b>	<b>256,2</b>	<b>282</b>	<b>328,4</b>	<b>347</b>	<b>346,8</b>	<b>354,2</b>	<b>365,8</b>	<b>363,2</b>	<b>366,8</b>
	Mittelabw	0	20,24	33,84	35,6	45,68	60	62,64	55,36	48,96	41,04	38,56
3	1	22	140	255	300	320	364	370	365	368	361	366
	2	22	134	220	254	297	321	328	332	330	334	329
	3	22	125	136	234	250	266	259	249	251	247	251
	4	22	103	203	231	250	336	340	339	341	347	338
	5	22	107	157	195	227	234	241	244	237	240	239
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>22</b>	<b>121,8</b>	<b>194,2</b>	<b>242,8</b>	<b>268,8</b>	<b>304,2</b>	<b>307,6</b>	<b>305,8</b>	<b>305,4</b>	<b>305,8</b>	<b>304,6</b>
	Mittelabw	0	13,44	38,16	27,36	31,76	43,36	46,08	47,44	49,12	49,84	47,68
4	1	22	45	68	92	108	116	114	112	115	111	116
	2	22	40	60	90	107	109	112	110	109	107	106
	3	22	30	49	80	94	105	103	107	105	106	110
	4	22	30	43	78	81	80	82	86	84	82	84
	5	22	30	46	60	75	79	81	80	83	80	80
<b>T4</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>22</b>	<b>35</b>	<b>53,2</b>	<b>80</b>	<b>93</b>	<b>97,8</b>	<b>98,4</b>	<b>99</b>	<b>99,2</b>	<b>97,2</b>	<b>99,2</b>
	Mittelabw	0	6	8,64	8,8	12	14,64	13,52	12,8	12,56	12,96	13,76

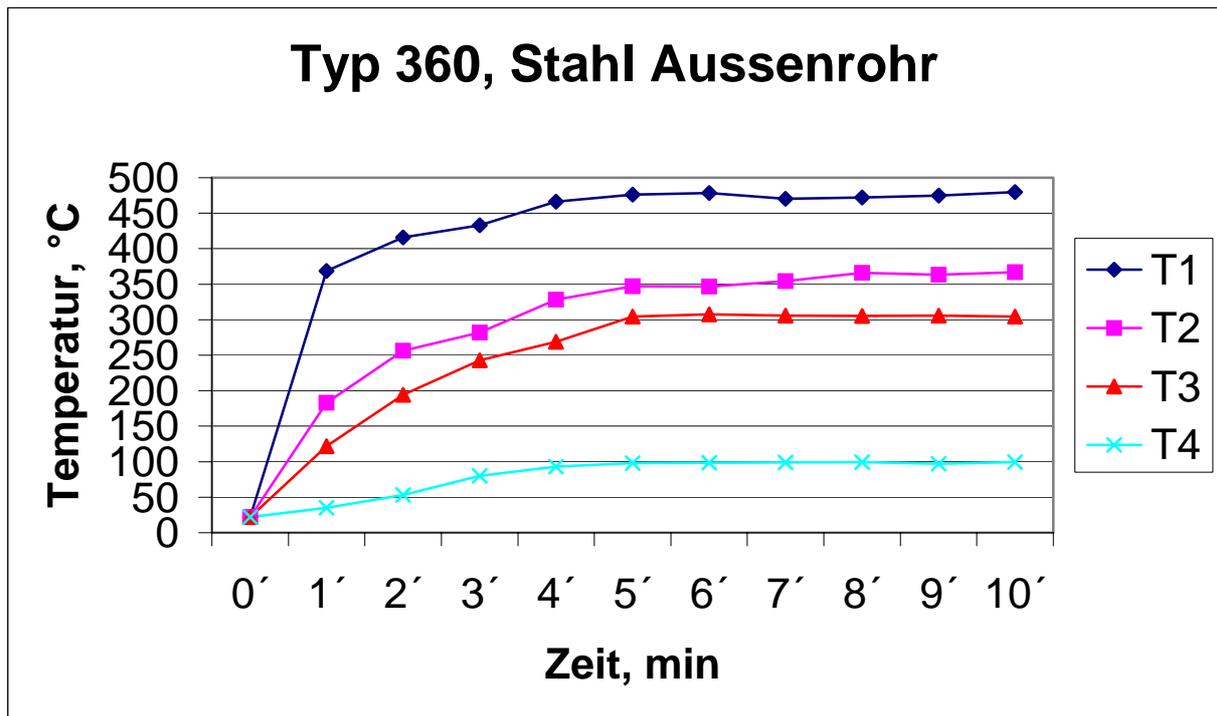


Bild A 23. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 360 mit Außenrohr aus Stahl, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

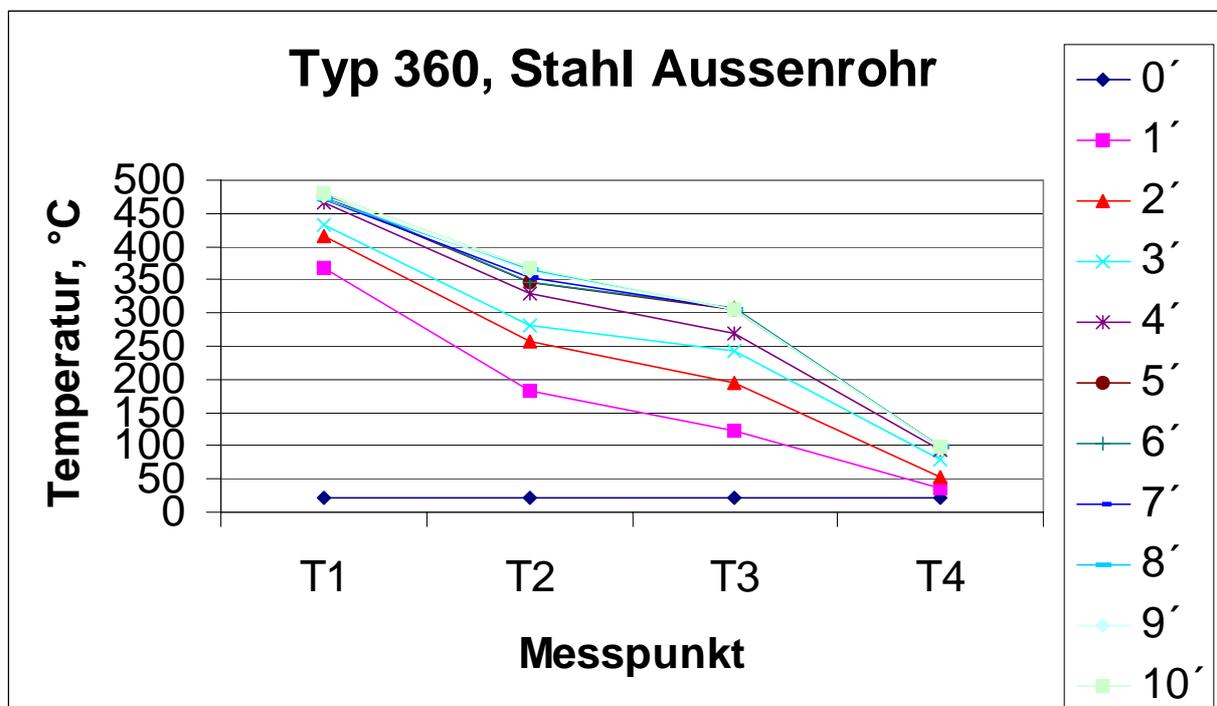


Bild A 24. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 360 mit Außenrohr aus Stahl, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

**Versuchsreihe-Nr.:** 3**Titel:**

Vergleich der Brenner von Typ 6L mit dem Außenrohr aus Stahl und aus Messing

**Ziel:**

Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Werkstoffe (Messing, Stahl) für die Gestaltung des Außenrohrs von luftgekühlten Brennern Typ 6L auf die Erwärmungsdynamik und die Temperaturverteilung im Brenner

**Prüfobjekt:**

Bild A 25. Brenner Typ 6L, luftgekühlt

**Versuchsplanung:**

Tabelle A 13. Übersicht der geplanten Versuche

	Typ 6 L Messing	Typ 6L Stahl
100% ED	<b>X</b>	<b>X</b>

Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Bild A 26. Schema der Messpunkte

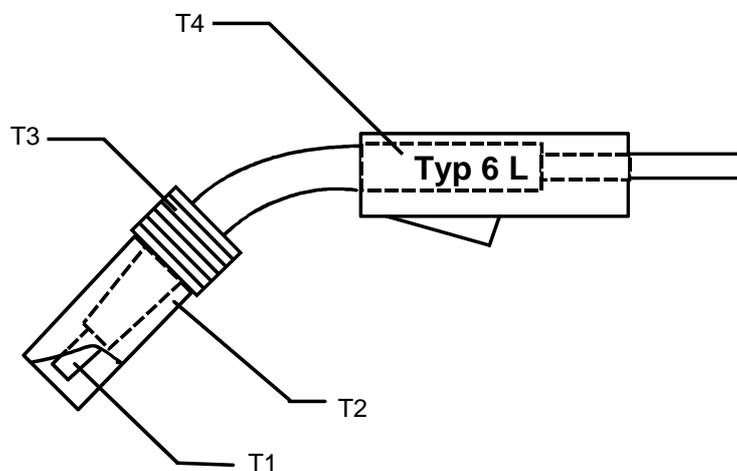


Tabelle A 14. Temperaturmessung im Brenner Typ 6L mit Außenrohr aus Messing . Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	258	300	312	361	390	398	404	400	401	405
	2	20	220	231	270	281	308	318	310	317	325	328
	3	20	305	328	365	414	420	421	417	422	415	427
	4	20	209	255	270	298	300	299	289	294	290	297
	5	20	305	340	360	388	379	381	385	380	377	382
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>259,4</b>	<b>290,8</b>	<b>315,4</b>	<b>348,4</b>	<b>359,4</b>	<b>363,4</b>	<b>361</b>	<b>362,6</b>	<b>361,6</b>	<b>367,8</b>
	Mittelabw	0	36,48	38,24	37,68	47,12	44,32	43,92	49,2	45,68	43,28	44,24
2	1	20	129	155	210	279	358	352	381	386	379	384
	2	20	100	176	232	256	321	334	342	339	344	340
	3	20	133	175	225	288	319	310	351	382	381	378
	4	20	127	176	240	280	321	334	350	351	349	356
	5	20	133	200	230	288	318	333	340	351	355	350
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>124,4</b>	<b>176,4</b>	<b>227,4</b>	<b>278,2</b>	<b>327,4</b>	<b>332,6</b>	<b>352,8</b>	<b>361,8</b>	<b>361,6</b>	<b>361,6</b>
	Mittelabw	0	9,76	9,44	7,92	8,88	12,24	9,04	11,28	17,76	14,72	15,52
3	1	20	103	135	168	200	236	265	304	325	337	365
	2	20	80	122	178	206	251	270	291	303	321	333
	3	20	63	110	160	212	245	266	280	305	326	317
	4	20	70	122	178	206	254	270	291	300	321	333
	5	20	63	120	180	212	245	270	292	316	326	317
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>75,8</b>	<b>121,8</b>	<b>172,8</b>	<b>207,2</b>	<b>246,2</b>	<b>268,2</b>	<b>291,6</b>	<b>309,8</b>	<b>326,2</b>	<b>333</b>
	Mittelabw	0	12,56	5,44	7,04	3,84	5,04	2,16	5,12	8,56	4,32	12,8
4	1	20	43	51	56	64	75	81	93	99	110	120
	2	20	30	34	44	52	70	77	88	98	100	117
	3	20	30	40	50	62	73	84	100	112	126	132
	4	20	30	37	44	52	68	77	88	99	107	117
	5	20	25	32	45	62	73	84	101	112	120	130
<b>T4</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>31,6</b>	<b>38,8</b>	<b>47,8</b>	<b>58,4</b>	<b>71,8</b>	<b>80,6</b>	<b>94</b>	<b>104</b>	<b>112,6</b>	<b>123,2</b>
	Mittelabw	0	4,56	5,36	4,16	5,12	2,24	2,88	5,2	6,4	8,32	6,24

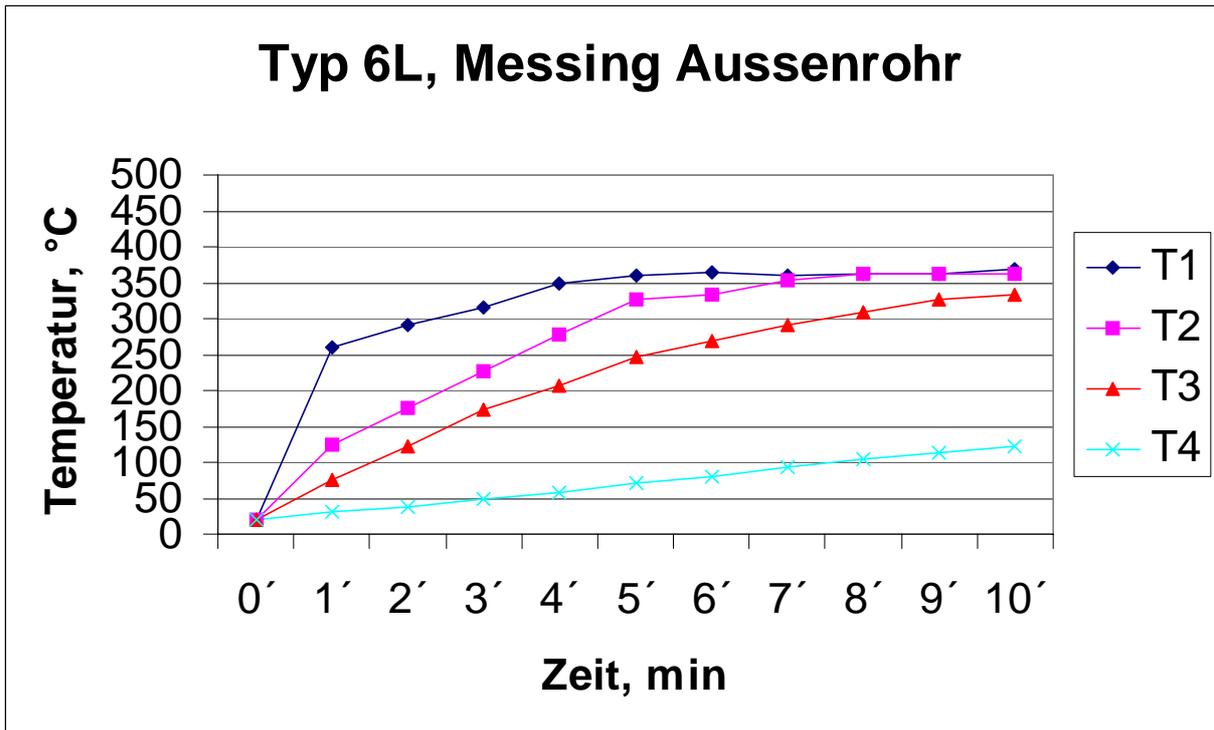


Bild A 27. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 6L mit Außenrohr aus Messing, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

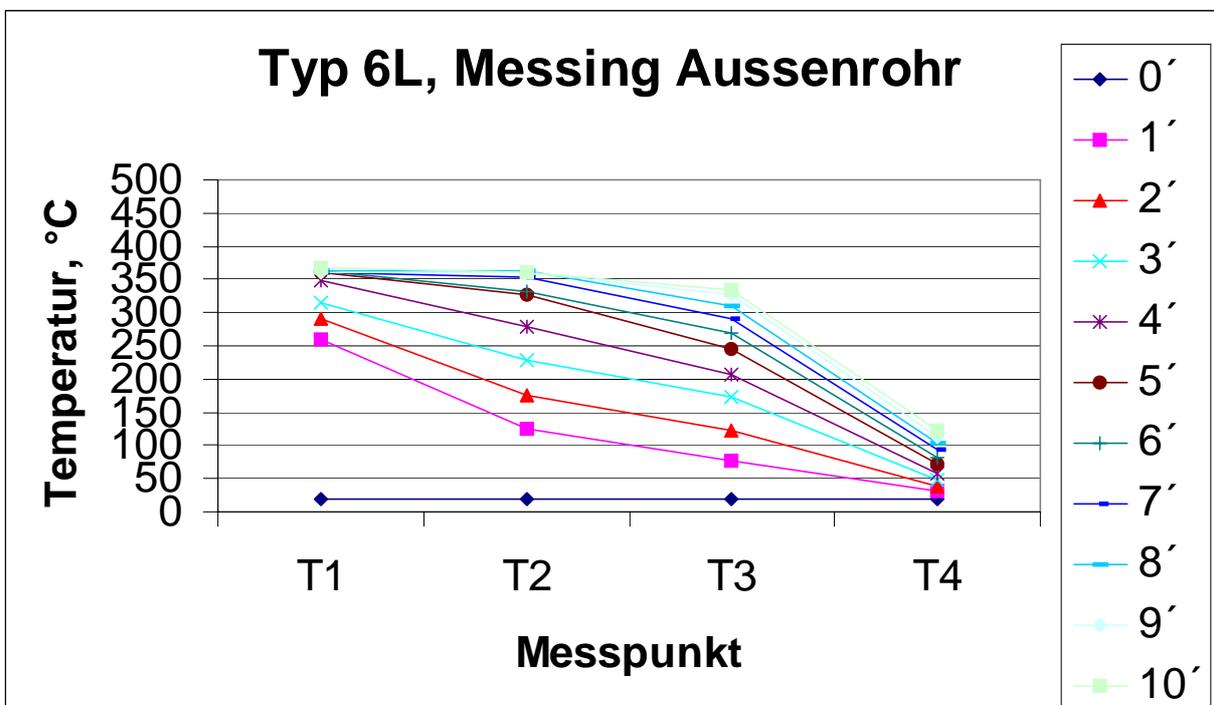


Bild A 28. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 6L mit Außenrohr aus Messing, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

Tabelle A 15. Temperaturmessung im Brenner Typ 6L mit Außenrohr aus Stahl. Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Messpunkt	Messung	Zeit											
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	
1	1	20	280	294	355	408	415	420	440	440	456	460	
	2	20	200	273	280	299	311	340	343	350	306	318	
	3	20	250	307	319	327	326	412	415	394	387	391	
	4	20	249	288	320	360	355	368	370	366	371	378	
	5	20	220	240	278	317	320	334	327	332	329	344	
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>239,8</b>	<b>280,4</b>	<b>310,4</b>	<b>342,2</b>	<b>345,4</b>	<b>374,8</b>	<b>379</b>	<b>376,4</b>	<b>369,8</b>	<b>378,2</b>	
	Mittelabw	0	23,84	19,12	25,12	33,44	31,68	32,96	38,8	32,48	41,84	37,84	
2	1	20	100	120	179	230	288	315	334	329	330	330	
	2	20	80	130	160	200	295	370	270	265	269	300	
	3	20	91	124	204	281	325	397	440	431	415	416	
	4	20	120	145	199	238	301	350	355	363	370	363	
	5	20	112	156	214	256	356	401	422	437	449	459	
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>100,6</b>	<b>135</b>	<b>191,2</b>	<b>241</b>	<b>313</b>	<b>366,6</b>	<b>364,2</b>	<b>365</b>	<b>366,6</b>	<b>373,6</b>	
	Mittelabw	0	12,32	12,4	17,36	22	22	27,28	53,44	55,2	53,68	51,12	
3	1	20	71	124	150	185	225	269	297	301	299	306	
	2	20	80	140	145	150	200	235	245	260	269	276	
	3	20	50	99	197	209	280	316	387	367	373	371	
	4	20	37	69	149	167	170	254	279	280	279	284	
	5	20	80	112	190	198	257	295	345	339	348	337	
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>63,6</b>	<b>108,8</b>	<b>166,2</b>	<b>181,8</b>	<b>226,4</b>	<b>273,8</b>	<b>310,6</b>	<b>309,4</b>	<b>313,6</b>	<b>314,8</b>	
	Mittelabw	0	16,08	19,84	21,84	18,64	33,68	25,36	44,32	34,88	37,52	31,36	
4	1	20	25	27	31	37	43	48	61	70	76	80	
	2	20	24	27	30	37	45	48	55	61	72	80	
	3	20	23	26	27	30	35	42	51	58	69	77	
	4	20	28	32	33	34	42	40	46	53	55	59	
	5	20	31	36	40	39	47	54	59	66	79	80	
<b>T4</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>26,2</b>	<b>29,6</b>	<b>32,2</b>	<b>35,4</b>	<b>42,4</b>	<b>46,4</b>	<b>54,4</b>	<b>61,6</b>	<b>70,2</b>	<b>75,2</b>	
	Mittelabw	0	2,64	3,52	3,44	2,72	3,12	4,32	4,72	5,12	6,56	6,48	

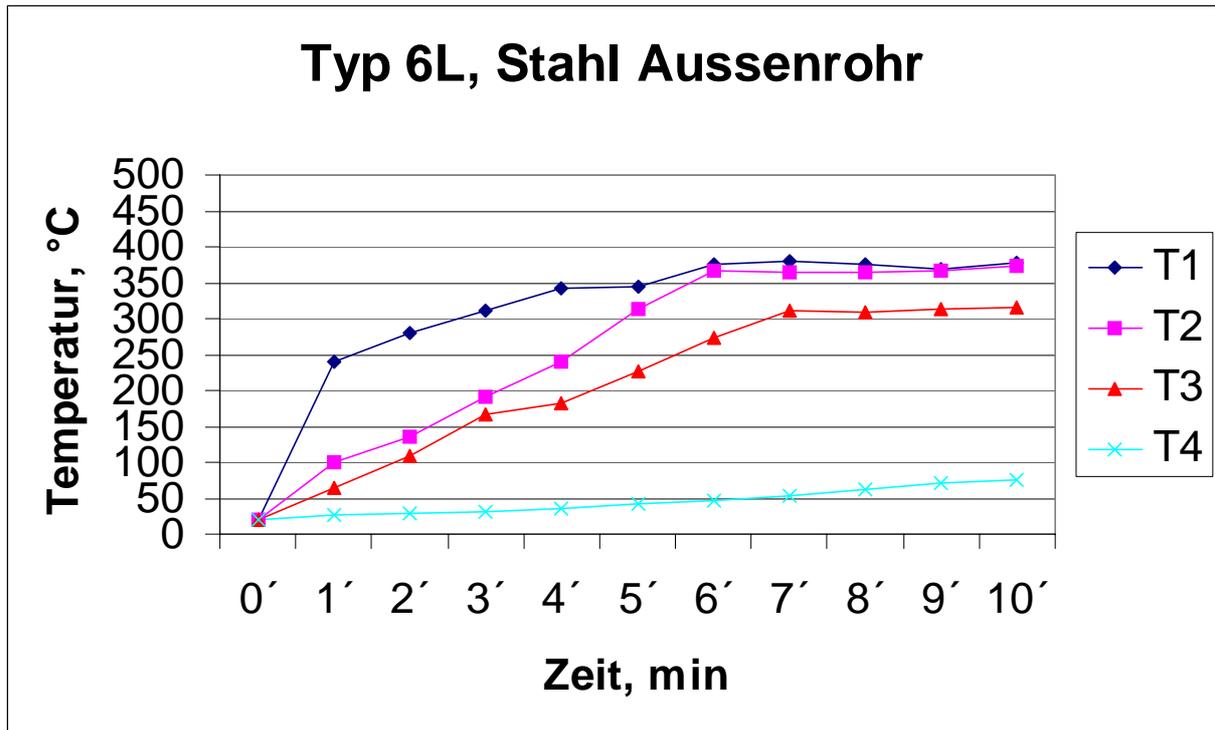


Bild A 29. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 6L mit Außenrohr aus Stahl, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

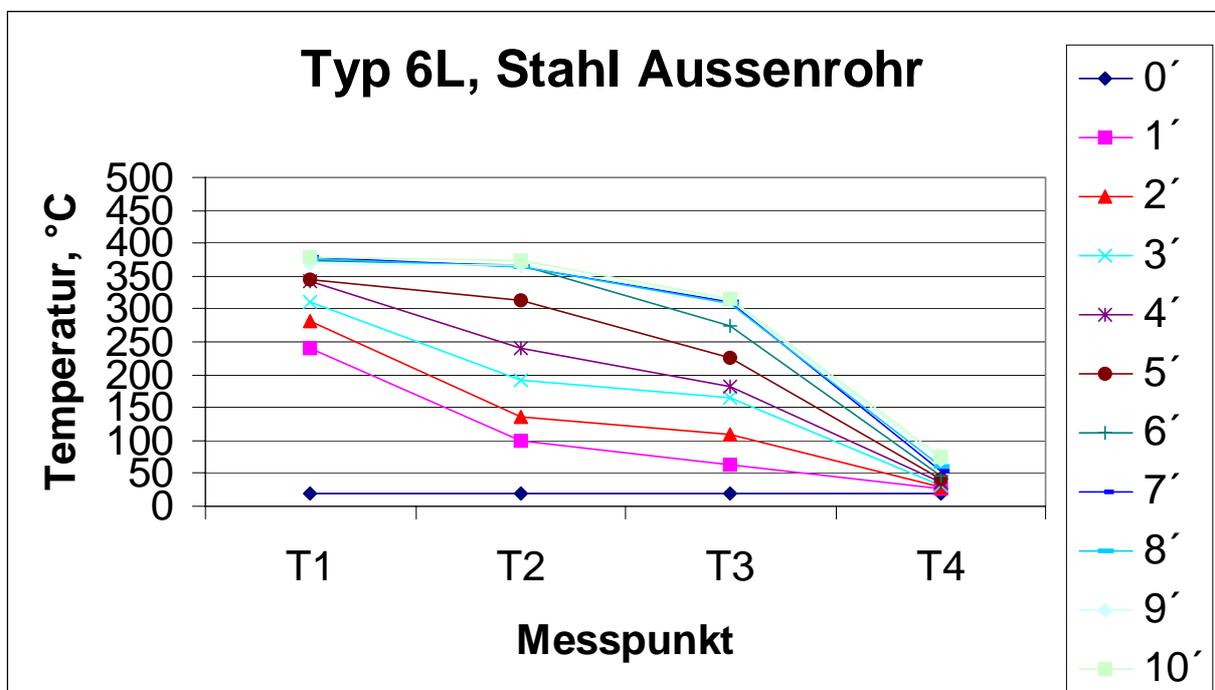


Bild A 30. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 6L mit Außenrohr aus Stahl, Schweißstrom 250 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

**Versuchsreihe-Nr.:** 4**Titel:**

Vergleich der Brenner vom Typ 6L mit Düsenstock aus Kupfer und aus Messing

**Ziel:**

Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Werkstoffe (Messing, Kupfer) und geometrische Parametern für die Gestaltung des Düsenstockes des luftgekühlten Brenners Typ 6L auf die Erwärmungsdynamik und die Temperaturverteilung im Brenner

**Prüfobjekt:**

Bild A 31. Brenner Typ 6L, luftgekühlt

**Versuchsplanung:**

Tabelle A 16. Übersicht der geplanten Versuche

	Typ 6L, Düsenstock M8, Kupfer	Typ 6L, Düsenstock M8, Messing	Typ 6L, Düsenstock M10, Messing
100% ED	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

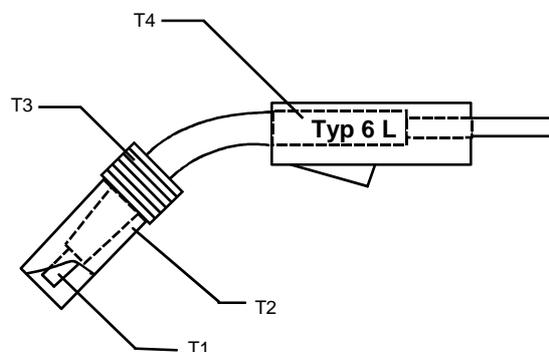
**Bild A 32. Schema der Messpunkte**

Tabelle A 17. Temperaturmessung im Brenner Typ 6L, Düsenstock M8 aus Kupfer. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Messpunkt	Messung	Zeit											
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	
1	1	20	310	380	420	430	483	490	500	495	500	502	
	2	20	275	320	340	400	440	500	530	500	505	501	
	3	20	330	410	410	420	450	450	430	450	430	450	
	4	20	260	300	334	397	412	450	447	456	450	462	
	5	20	340	420	442	450	478	514	520	518	520	511	
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>303</b>	<b>366</b>	<b>389,2</b>	<b>419,4</b>	<b>452,6</b>	<b>480,8</b>	<b>485,4</b>	<b>483,8</b>	<b>481</b>	<b>485,2</b>	
	Mittelabw	0	28,4	44,8	41,76	16,72	22,32	24,64	37,52	24,64	32,8	23,36	
2	1	20	155	235	285	312	340	360	370	370	370	368	
	2	20	112	190	200	225	285	340	358	360	365	370	
	3	20	105	210	280	345	360	400	390	400	390	370	
	4	20	108	217	265	315	359	384	405	415	410	417	
	5	20	97	187	199	256	300	347	378	369	370	378	
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>115,4</b>	<b>207,8</b>	<b>245,8</b>	<b>290,6</b>	<b>328,8</b>	<b>366,2</b>	<b>380,2</b>	<b>382,8</b>	<b>381</b>	<b>380,6</b>	
	Mittelabw	0	15,84	15,44	37,04	40,08	29,04	20,64	13,84	19,76	15,2	14,56	
3	1	20	130	200	240	275	300	320	325	321	320	327	
	2	20	72	140	167	200	240	295	300	300	307	300	
	3	20	80	180	240	300	320	336	350	356	337	348	
	4	20	137	207	247	282	307	312	317	328	327	334	
	5	20	73	173	233	293	313	329	320	327	330	328	
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>98,4</b>	<b>180</b>	<b>225,4</b>	<b>270</b>	<b>296</b>	<b>318,4</b>	<b>322,4</b>	<b>326,4</b>	<b>324,2</b>	<b>327,4</b>	
	Mittelabw	0	28,08	18,8	23,36	28	22,4	11,92	12,08	12,72	8,56	11,12	
4	1	20	37	56	70	77	84	84	80	104	115	120	
	2	20	25	38	49	52	56	57	65	70	80	96	
	3	20	25	39	47	56	60	68	77	85	90	100	
	4	20	35	45	55	65	67	75	86	100	110	109	
	5	20	44	54	64	74	78	87	98	112	122	124	
<b>T4</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>33,2</b>	<b>46,4</b>	<b>57</b>	<b>64,8</b>	<b>69</b>	<b>74,2</b>	<b>81,2</b>	<b>94,2</b>	<b>103,4</b>	<b>109,8</b>	
	Mittelabw	0	6,56	6,88	8	8,64	9,6	9,36	8,64	13,36	14,72	9,76	

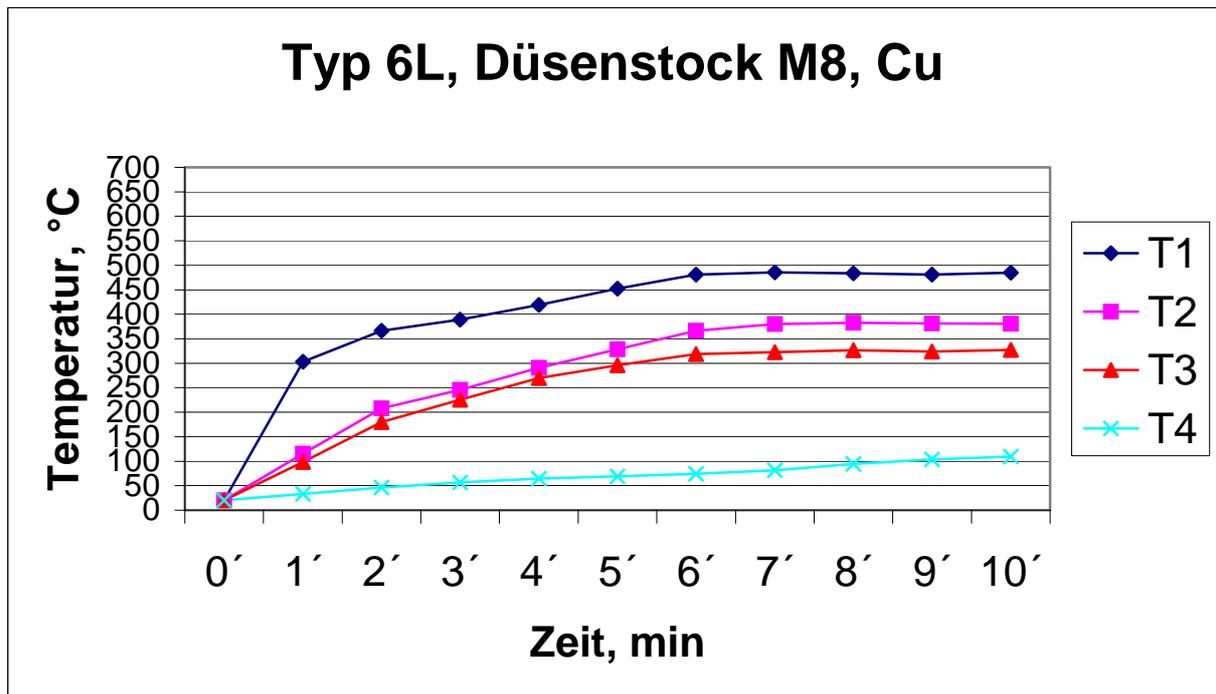


Bild A 33. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 6L, Düsenstock M8 aus Kupfer, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

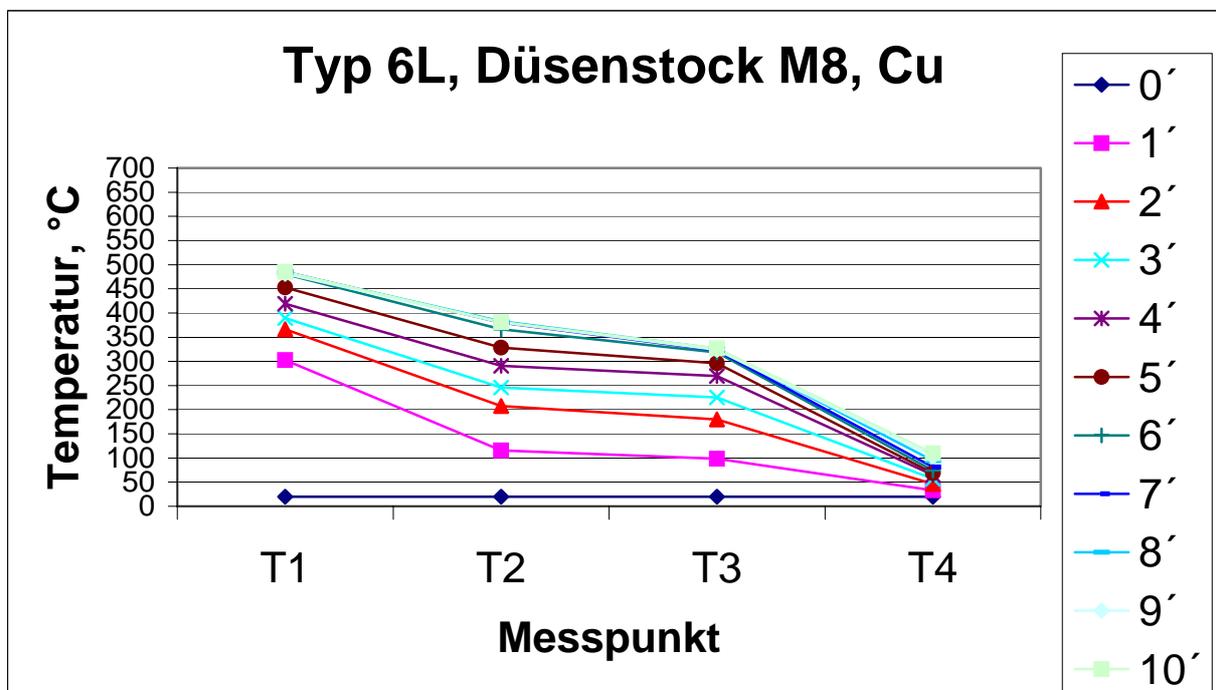


Bild A 34. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 6L, Düsenstock M8 aus Kupfer, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

Tabelle A 18. Temperaturmessung im Brenner Typ 6L, Düsenstock M8 aus Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Messpunkt	Messung	Zeit											
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	
1	1	20	380	460	525	523	514	532	550	620	654	650	
	2	20	470	450	485	590	600	599	634	650	687	658	
	3	20	329	350	410	530	609	586	631	670	680	678	
	4	20	450	475	527	600	627	628	631	697	720	729	
	5	20	346	371	423	496	523	530	529	573	600	598	
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>395</b>	<b>421,2</b>	<b>474</b>	<b>547,8</b>	<b>574,6</b>	<b>575</b>	<b>595</b>	<b>642</b>	<b>668,2</b>	<b>662,6</b>	
	Mittelabw	0	52	48,56	46	37,76	44,88	35,2	44,4	36,4	32,96	32,72	
2	1	20	160	285	360	405	439	461	475	478	480	482	
	2	20	170	250	310	400	450	460	480	487	500	505	
	3	20	100	240	270	360	438	469	518	520	521	519	
	4	20	140	265	340	385	419	441	455	458	460	462	
	5	20	120	260	290	380	458	489	538	540	541	539	
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>138</b>	<b>260</b>	<b>314</b>	<b>386</b>	<b>440,8</b>	<b>464</b>	<b>493,2</b>	<b>496,6</b>	<b>500,4</b>	<b>501,4</b>	
	Mittelabw	0	22,4	12	28,8	13,2	10,56	12	27,84	26,72	24,48	23,52	
3	1	20	90	200	220	335	321	400	400	399	405	401	
	2	20	80	120	230	305	375	395	405	426	440	443	
	3	20	55	190	240	320	380	430	465	480	476	478	
	4	20	70	180	200	315	301	380	380	379	385	381	
	5	20	75	210	260	340	400	450	485	500	496	498	
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>74</b>	<b>180</b>	<b>230</b>	<b>323</b>	<b>355,4</b>	<b>411</b>	<b>427</b>	<b>436,8</b>	<b>440,4</b>	<b>440,2</b>	
	Mittelabw	0	9,2	24	16	11,6	35,52	23,2	38,4	42,56	36,48	39,36	
4	1	20	27	30	35	50	62	73	80	83	88	95	
	2	20	27	30	35	50	65	75	85	100	105	113	
	3	20	27	31	40	50	60	78	90	100	105	107	
	4	20	41	44	49	64	76	87	94	97	102	109	
	5	20	35	38	43	58	70	81	88	91	96	103	
<b>T4</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>31,4</b>	<b>34,6</b>	<b>40,4</b>	<b>54,4</b>	<b>66,6</b>	<b>78,8</b>	<b>87,4</b>	<b>94,2</b>	<b>99,2</b>	<b>105,4</b>	
	Mittelabw	0	5,28	5,12	4,48	5,28	5,12	4,16	3,92	5,76	5,76	5,12	

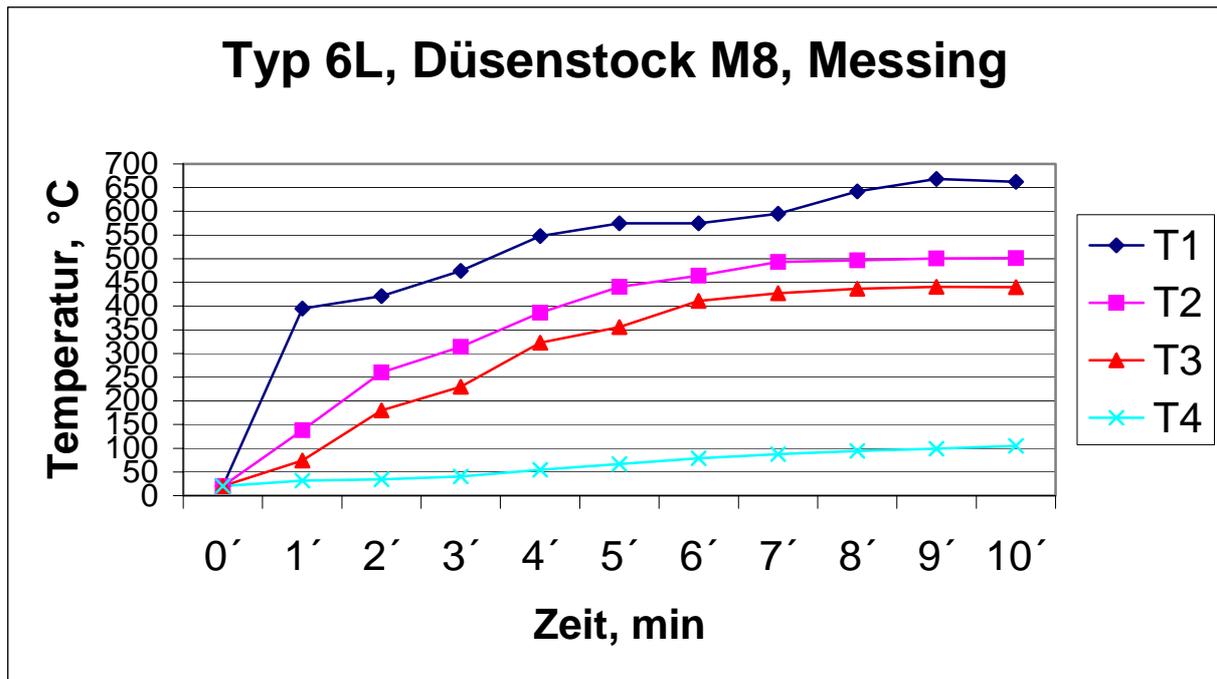


Bild A 35. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 6L, Düsenstock M8 aus Messing, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

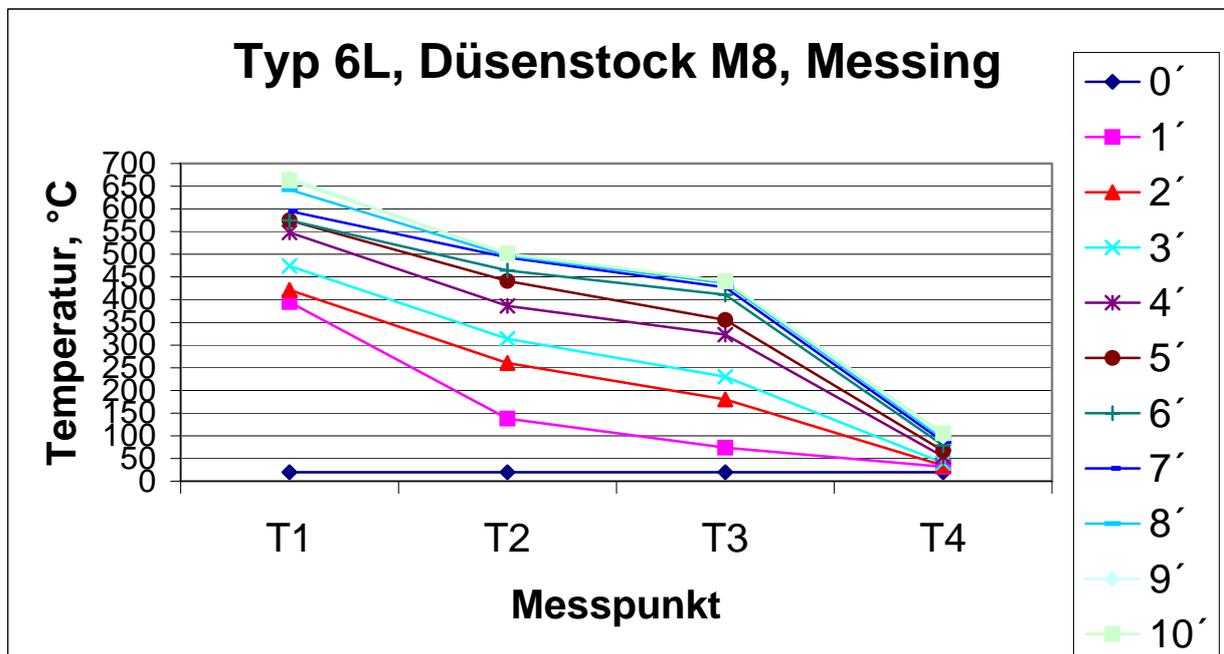


Bild A 36. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 6L, Düsenstock M8 aus Messing, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 19. Temperaturmessung im Brenner Typ 6L, Düsenstock M10 aus Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	285	347	390	450	450	420	460	447	450	454
	2	20	346	423	448	452	489	517	530	529	534	540
	3	20	257	302	337	400	420	460	464	469	470	475
	4	20	277	319	343	398	441	502	529	524	536	544
	5	20	327	412	415	423	448	453	434	457	436	451
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>298,4</b>	<b>360,6</b>	<b>386,6</b>	<b>424,6</b>	<b>449,6</b>	<b>470,4</b>	<b>483,4</b>	<b>485,2</b>	<b>485,2</b>	<b>492,8</b>
	Mittelabw	0	30,48	45,52	37,28	21,12	15,92	31,28	36,88	33,04	39,84	39,36
2	1	20	80	150	209	290	340	360	400	392	400	395
	2	20	108	214	286	347	359	399	412	400	397	371
	3	20	100	227	265	316	358	387	407	414	411	415
	4	20	110	192	200	227	290	338	355	363	367	369
	5	20	99	183	198	274	321	354	381	373	380	402
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>99,4</b>	<b>193,2</b>	<b>231,6</b>	<b>290,8</b>	<b>333,6</b>	<b>367,6</b>	<b>391</b>	<b>388,4</b>	<b>391</b>	<b>390,4</b>
	Mittelabw	0	7,92	21,84	35,12	32,56	22,48	20,32	18,4	16,32	14	16,32
3	1	20	60	130	180	240	285	305	340	350	351	349
	2	20	130	204	239	280	310	314	319	326	330	335
	3	20	75	177	231	290	310	330	323	322	329	320
	4	20	72	140	167	200	240	295	300	300	307	300
	5	20	80	180	240	300	320	336	350	356	337	348
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>83,4</b>	<b>166,2</b>	<b>211,4</b>	<b>262</b>	<b>293</b>	<b>316</b>	<b>326,4</b>	<b>330,8</b>	<b>330,8</b>	<b>330,4</b>
	Mittelabw	0	18,64	24,96	30,32	33,6	24,4	13,6	14,88	17,76	10,56	16,32
4	1	20	25	41	45	53	60	64	75	85	90	100
	2	20	35	46	51	60	65	70	82	90	100	109
	3	20	43	58	70	75	78	89	99	119	124	127
	4	20	27	30	35	50	65	75	85	100	105	113
	5	20	27	31	40	50	60	78	90	100	105	107
<b>T4</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>31,4</b>	<b>41,2</b>	<b>48,2</b>	<b>57,6</b>	<b>65,6</b>	<b>75,2</b>	<b>86,2</b>	<b>98,8</b>	<b>104,8</b>	<b>111,2</b>
	Mittelabw	0	6,08	8,64	9,84	7,92	4,96	6,64	6,64	9,04	7,84	7,04

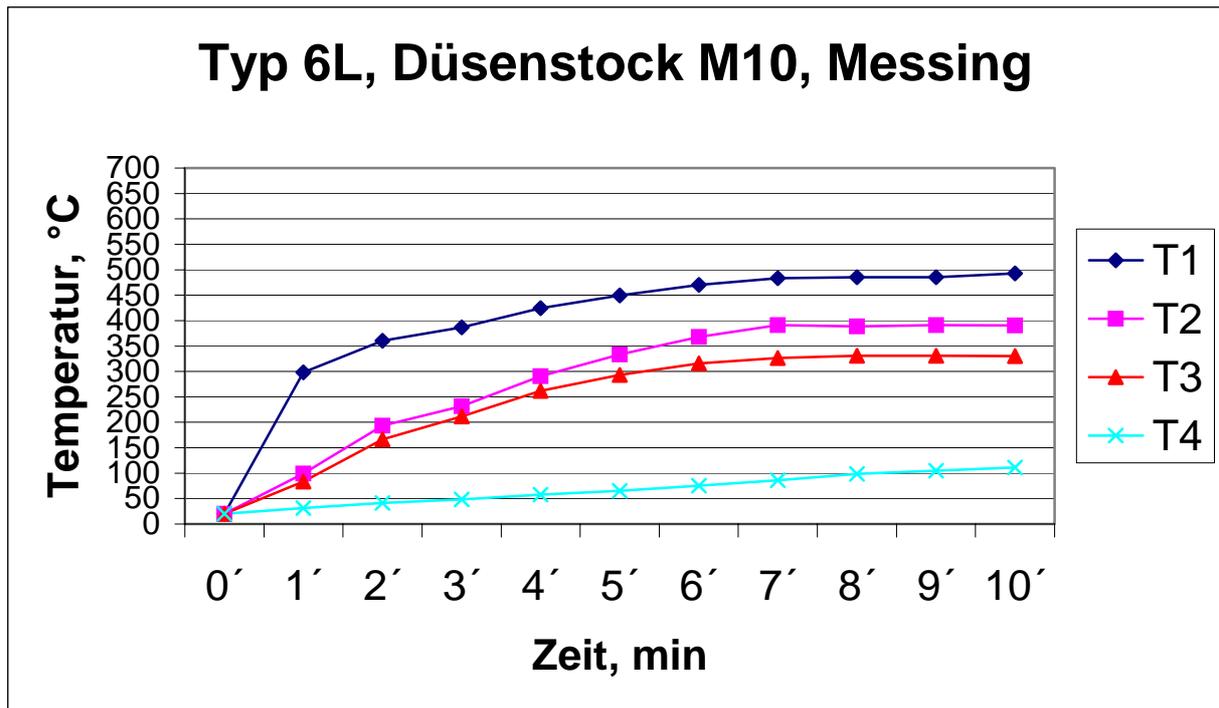


Bild A 37. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 6L, Düsenstock M10 aus Messing, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

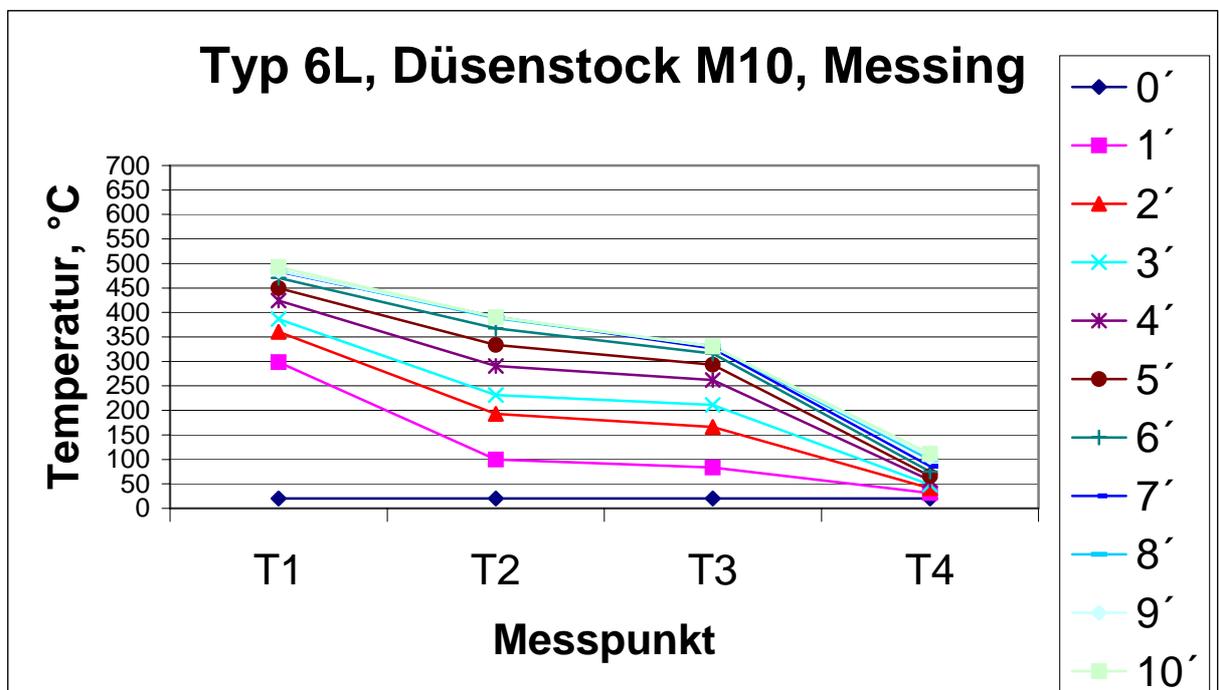


Bild A 38. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 6L, Düsenstock M10 aus Messing, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Versuchsreihe-Nr.: 5****Titel:**

Vergleich der Brenner von Typ „Everest“ und Typ 5W

**Ziel:**

Untersuchung des Einflusses der konstruktiven Gestaltung der flüssiggekühlten Brenner Typ „Everest“ und Typ 5W auf die Erwärmungsdynamik und die Temperaturverteilung im Brenner

**Prüfobjekt:**

Bild A 39. Brenner Typ „Everest“, Brenner Typ 5W, flüssiggekühlt

**Versuchsplanung:**

Tabelle A 20. Übersicht der geplanten Versuche

	Typ „Everest“	Typ 5W
100% ED	<b>X</b>	<b>X</b>

Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Bild A 40. Schema der Messpunkte

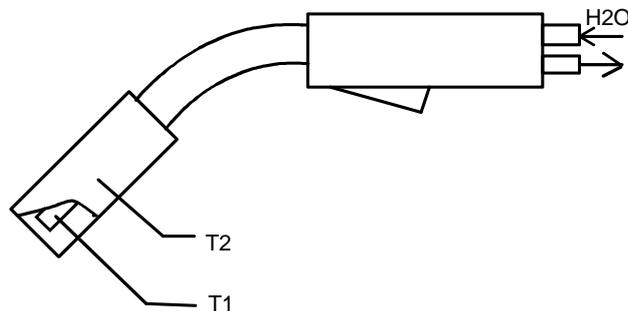


Tabelle A 21. Temperaturmessung im Brenner Typ „Everest“. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	212	219	234	256	249	260	251	249	242	240
	2	20	238	232	242	241	245	250	239	237	240	240
	3	20	204	230	242	231	243	239	242	239	241	240
	4	20	229	272	250	261	246	260	245	254	280	240
	5	20	231	220	250	300	264	220	210	226	225	267
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>222,8</b>	<b>234,6</b>	<b>243,6</b>	<b>257,8</b>	<b>249,4</b>	<b>245,8</b>	<b>237,4</b>	<b>241</b>	<b>245,6</b>	<b>245,4</b>
	Mittelabw	0	11,84	14,96	5,12	18,16	5,84	13,04	10,96	8,4	13,76	8,64
2	1	20	127	150	160	162	167	168	170	167	161	164
	2	20	149	171	171	171	167	164	157	168	172	168
	3	20	100	150	175	190	177	178	184	181	180	179
	4	20	88	146	150	141	130	120	140	140	146	145
	5	20	142	133	127	147	147	120	95	100	110	99
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>121,2</b>	<b>150</b>	<b>156,6</b>	<b>162,2</b>	<b>157,6</b>	<b>150</b>	<b>149,2</b>	<b>151,2</b>	<b>153,8</b>	<b>151</b>
	Mittelabw	0	21,76	8,4	14,48	14,64	15,28	24	25,36	24,96	20,64	23,2

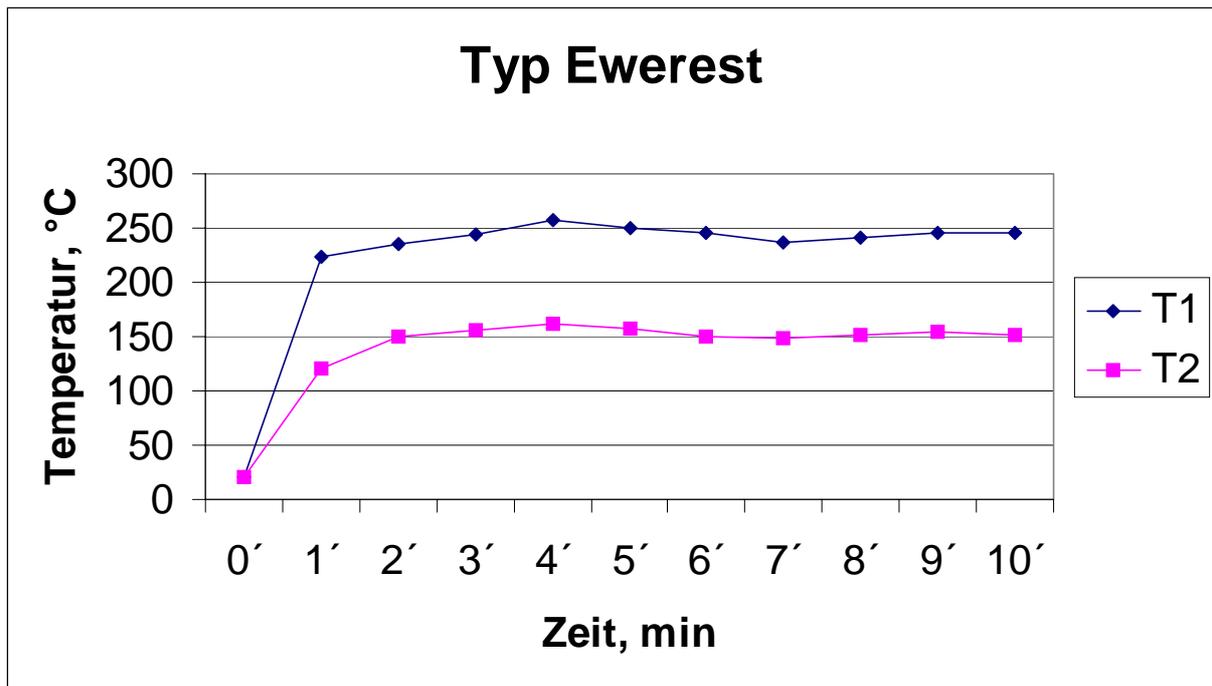


Bild A 41. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ „Everest“, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

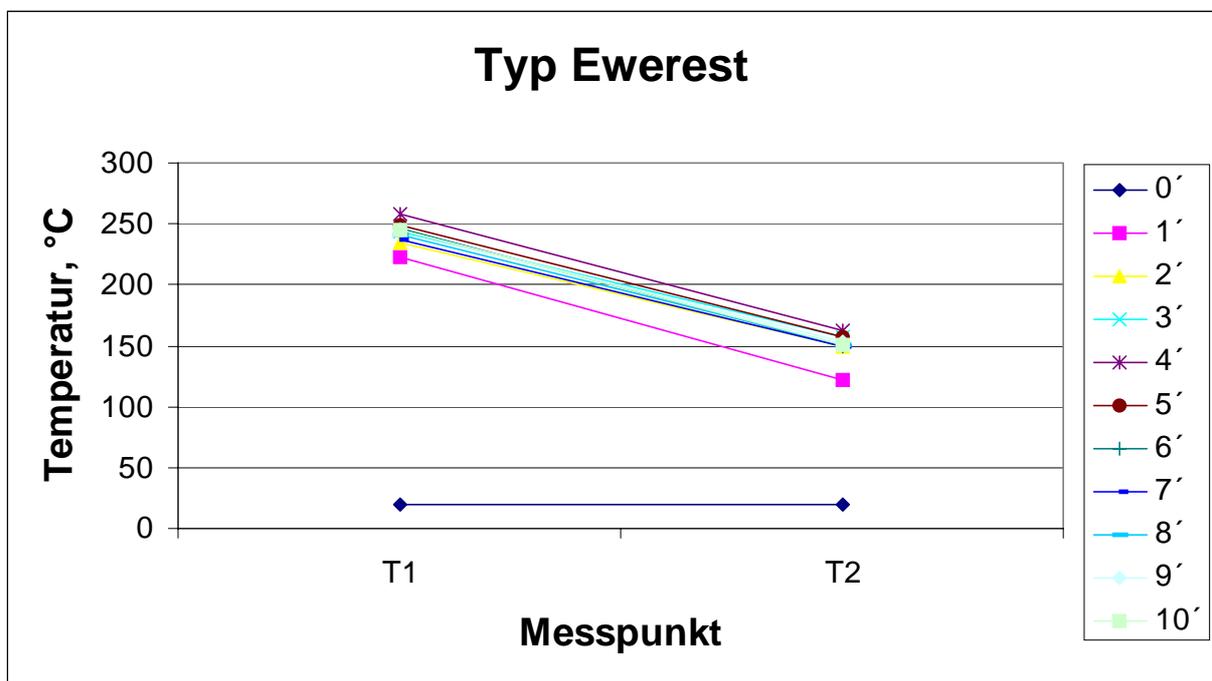


Bild A 42. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ „Everest“, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

Tabelle A 22. Temperaturmessung im Brenner Typ 5W. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	210	225	220	200	210	212	220	210	200	200
	2	20	170	200	200	180	190	200	200	200	205	200
	3	20	220	220	220	220	230	208	220	170	180	180
	4	20	170	210	200	200	170	205	205	180	200	200
	5	20	190	227	264	202	221	228	265	230	196	200
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>192</b>	<b>216,4</b>	<b>220,8</b>	<b>200,4</b>	<b>204,2</b>	<b>210,6</b>	<b>222</b>	<b>198</b>	<b>196,2</b>	<b>196</b>
	Mittelabw	0	18,4	9,12	17,28	8,48	19,36	7,52	17,2	18,4	6,56	6,4
2	1	20	260	302	260	260	268	267	250	260	270	260
	2	20	130	220	220	220	229	240	247	250	240	240
	3	20	100	140	150	140	170	147	150	170	180	220
	4	20	100	116	175	200	170	172	195	165	130	160
	5	20	100	185	123	173	150	229	230	180	170	175
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>138</b>	<b>192,6</b>	<b>185,6</b>	<b>198,6</b>	<b>197,4</b>	<b>211</b>	<b>214,4</b>	<b>205</b>	<b>198</b>	<b>211</b>
	Mittelabw	0	48,8	54,72	43,52	33,68	40,88	41,2	33,52	40	45,6	34,8

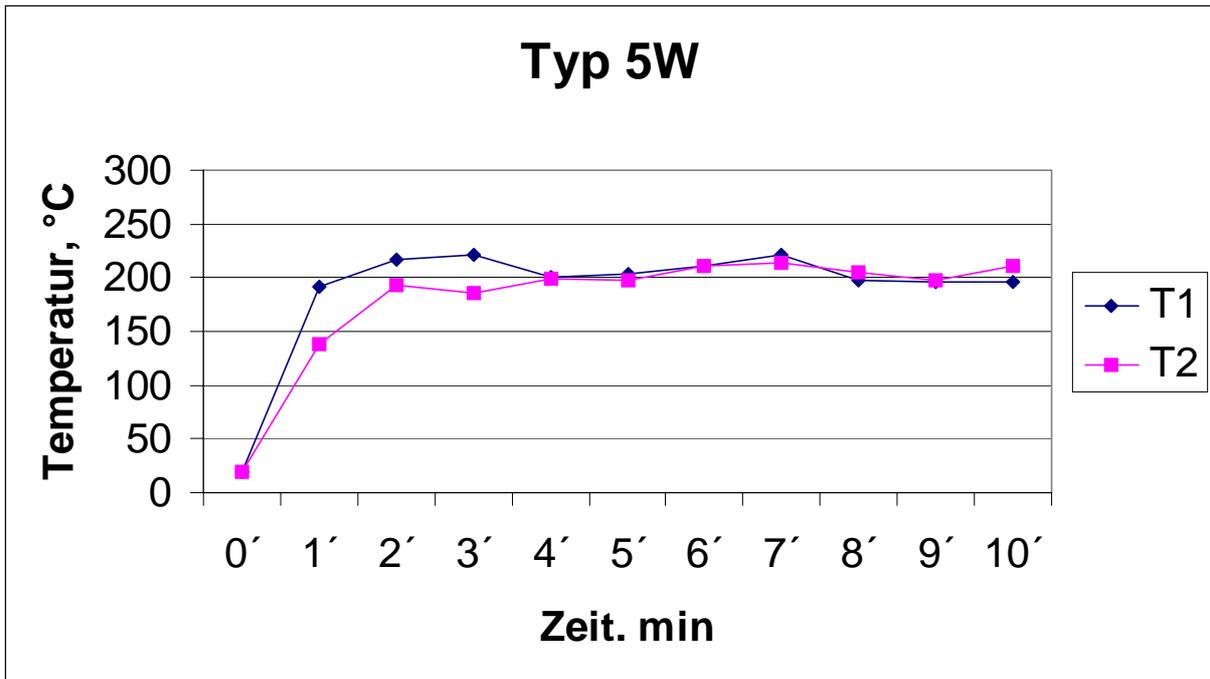


Bild A 43. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 5W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

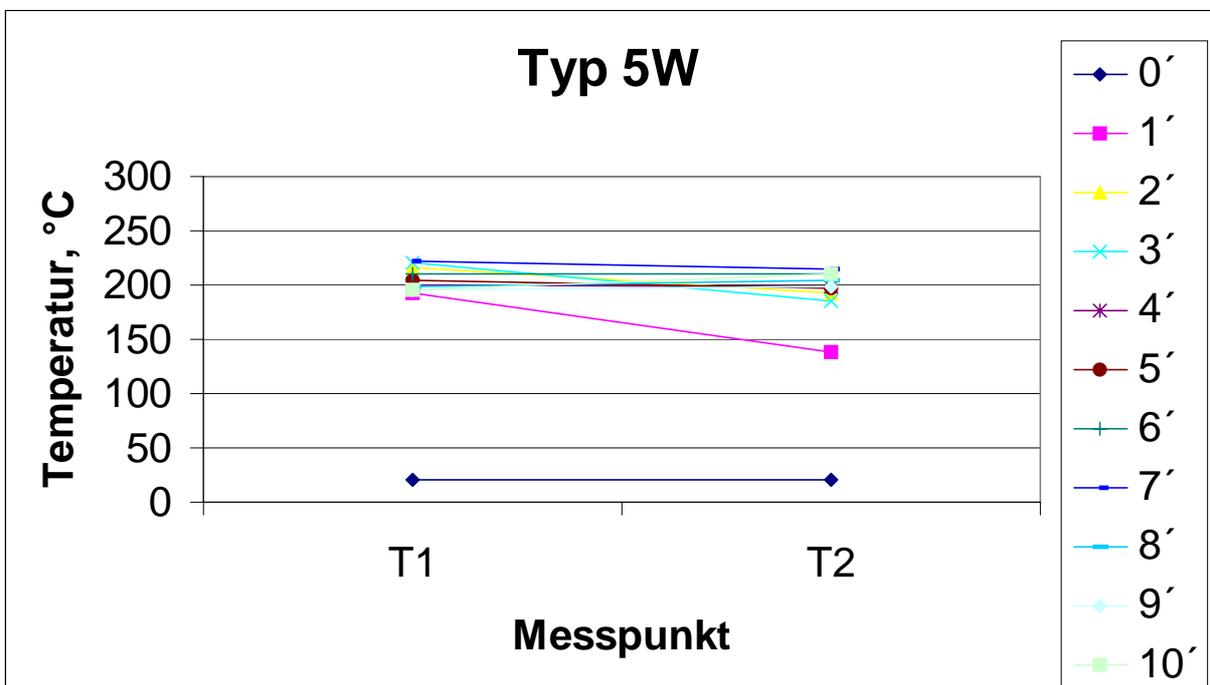


Bild A 44. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 5W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Versuchsreihe-Nr.:** 6**Titel:**

Test des Brenners vom Typ 7W unter unterschiedlicher Belastung

**Ziel:**

Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Belastung auf die Erwärmungsdynamik und die Temperaturverteilung in dem Brenner Typ 7W

**Prüfobjekt:**

Bild A 45. Brenner Typ 7W, flüssiggekühlt

**Versuchsplanung:**

Tabelle A 23. Übersicht der geplanten Versuche

	I=300 A, U=30 V, Abstand 25 mm	I=300 A, U=30 V, Abstand 20 mm
Brenner Typ 7W	<b>X</b>	<b>X</b>

Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Bild A 46. Schema der Messpunkte

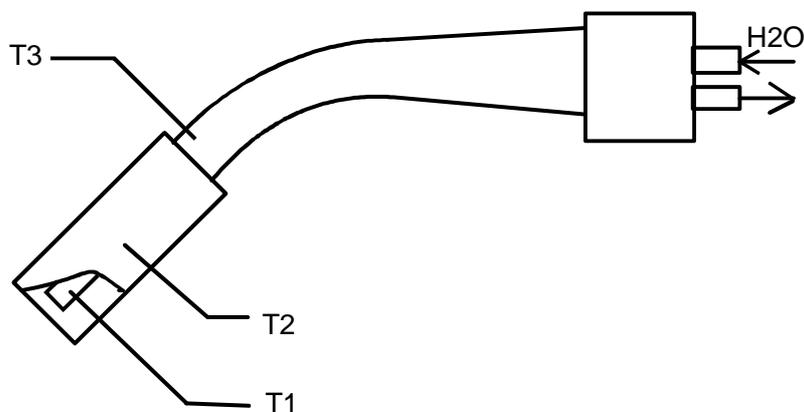


Tabelle A 24. Temperaturmessung im Brenner Typ 7W. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Messpunkt	Messung	Zeit											
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	
1	1	20	145	139	150	170	164	170	160	174	180	183	
	2	20	186	208	195	230	240	220	227	230	217	225	
	3	20	157	194	213	165	180	190	186	192	200	194	
	4	20	153	159	160	169	185	178	181	170	174	180	
	5	20	199	200	206	215	225	220	208	211	200	203	
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>168</b>	<b>180</b>	<b>184,8</b>	<b>189,8</b>	<b>198,8</b>	<b>195,6</b>	<b>192,4</b>	<b>195,4</b>	<b>194,2</b>	<b>197</b>	
	Mittelabw	0	19,6	24,8	23,84	26,16	26,96	19,52	20,08	20,08	13,76	13,6	
2	1	20	125	148	180	230	211	238	224	230	237	232	
	2	20	180	224	262	302	293	299	307	315	320	310	
	3	20	182	232	256	228	212	240	252	240	256	238	
	4	20	98	169	175	200	206	197	191	208	216	210	
	5	20	220	275	302	296	312	288	280	276	284	280	
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>161</b>	<b>209,6</b>	<b>235</b>	<b>251,2</b>	<b>246,8</b>	<b>252,4</b>	<b>250,8</b>	<b>253,8</b>	<b>262,6</b>	<b>254</b>	
	Mittelabw	0	39,6	40,88	46	38,24	44,56	32,88	34,64	33,36	31,52	32,8	
3	1	20	74	135	127	142	172	180	170	179	185	190	
	2	20	80	166	181	209	175	226	199	211	208	200	
	3	20	87	152	193	200	212	210	215	220	224	216	
	4	20	97	131	131	157	163	159	162	170	178	180	
	5	20	150	174	218	180	191	189	196	200	205	208	
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>97,6</b>	<b>151,6</b>	<b>170</b>	<b>177,6</b>	<b>182,6</b>	<b>192,8</b>	<b>188,4</b>	<b>196</b>	<b>200</b>	<b>198,8</b>	
	Mittelabw	0	20,96	14,88	32,8	22,48	15,12	20,16	17,92	17,2	14,8	11,04	

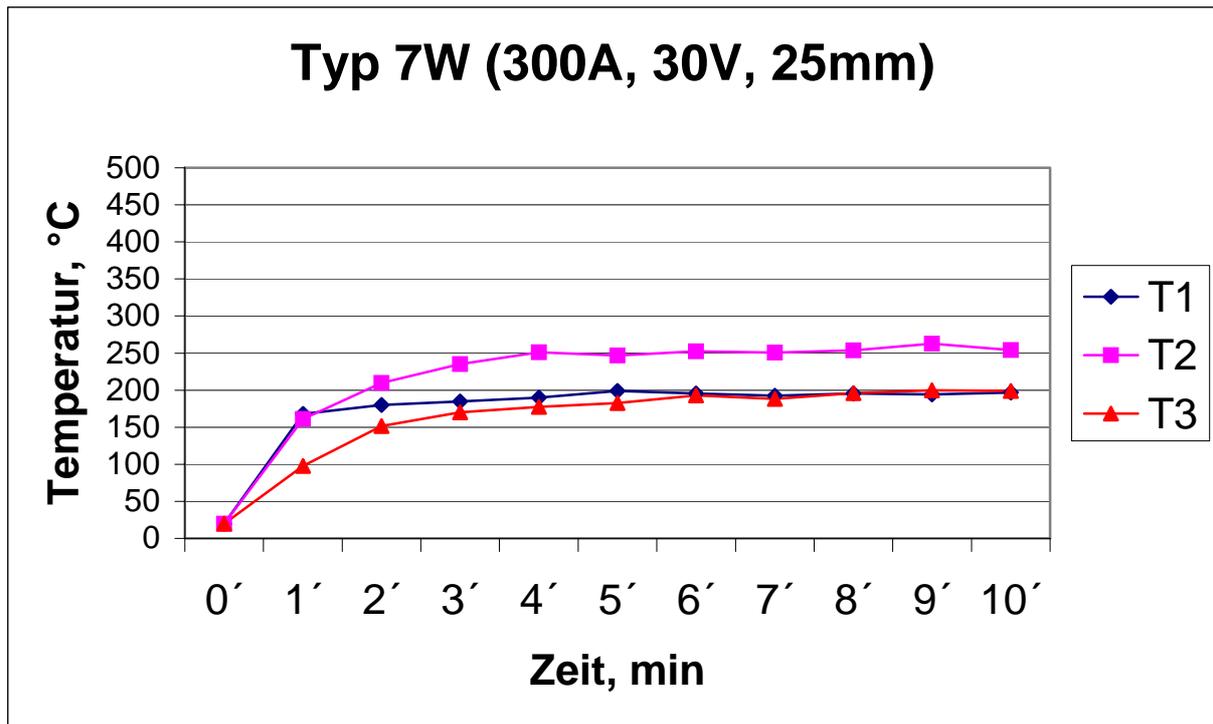


Bild A 47. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 7W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

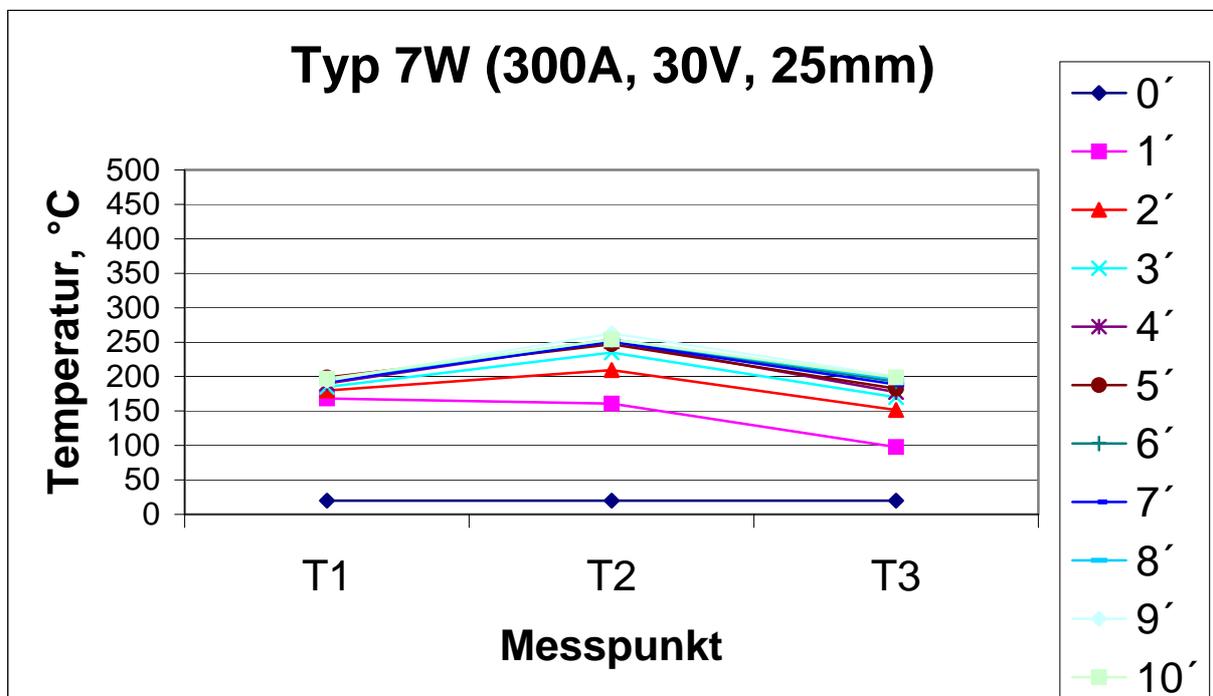


Bild A 48. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 7W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 25. Temperaturmessung im Brenner Typ 7W. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	421	403	402	457	410	447	445	438	440	448
	2	20	430	470	346	472	441	500	489	490	500	497
	3	20	391	396	329	317	510	525	500	511	507	520
	4	20	355	391	396	414	387	370	439	389	400	397
	5	20	390	405	464	484	468	438	449	450	443	452
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>397,4</b>	<b>413</b>	<b>387,4</b>	<b>428,8</b>	<b>443,2</b>	<b>456</b>	<b>464,4</b>	<b>455,6</b>	<b>458</b>	<b>462,8</b>
	Mittelabw	0	22,48	22,8	39,92	50,64	36,64	45,2	24,08	35,92	36,4	36,56
2	1	20	238	313	352	411	412	400	407	412	400	410
	2	20	299	352	310	311	324	321	330	326	320	331
	3	20	240	325	330	346	346	364	398	402	389	395
	4	20	179	267	258	320	331	350	342	359	364	370
	5	20	212	298	323	352	364	358	360	369	373	362
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>233,6</b>	<b>311</b>	<b>314,6</b>	<b>348</b>	<b>355,4</b>	<b>358,6</b>	<b>367,4</b>	<b>373,6</b>	<b>369,2</b>	<b>373,6</b>
	Mittelabw	0	30,48	22,8	24,48	26,8	26,08	18,72	28,08	26,72	21,76	23,12
3	1	20	102	176	229	289	357	340	351	338	344	352
	2	20	90	162	210	220	225	233	230	228	234	226
	3	20	86	160	204	253	252	261	270	267	274	270
	4	20	80	130	156	195	215	220	237	240	229	243
	5	20	80	150	212	233	255	252	257	260	251	256
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>87,6</b>	<b>155,6</b>	<b>202,2</b>	<b>238</b>	<b>260,8</b>	<b>261,2</b>	<b>269</b>	<b>266,6</b>	<b>266,4</b>	<b>269,4</b>
	Mittelabw	0	6,72	12,48	18,48	26,4	38,48	31,52	33,2	28,72	34,08	33,28

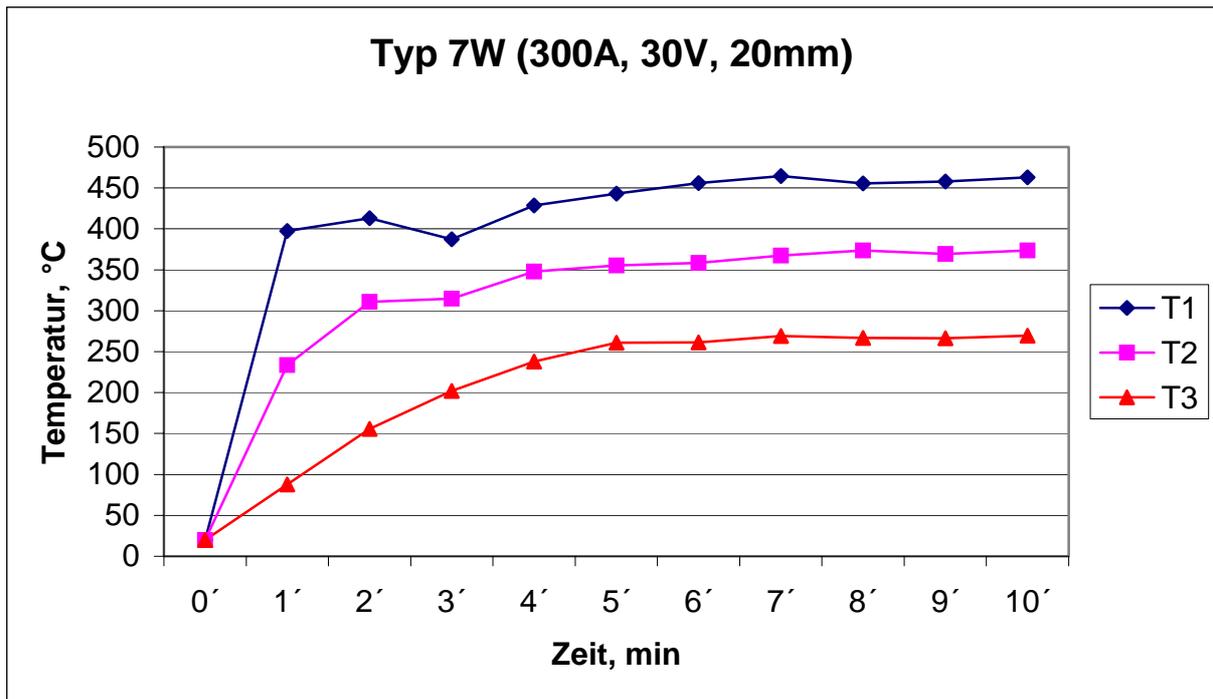


Bild A 49. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 7W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

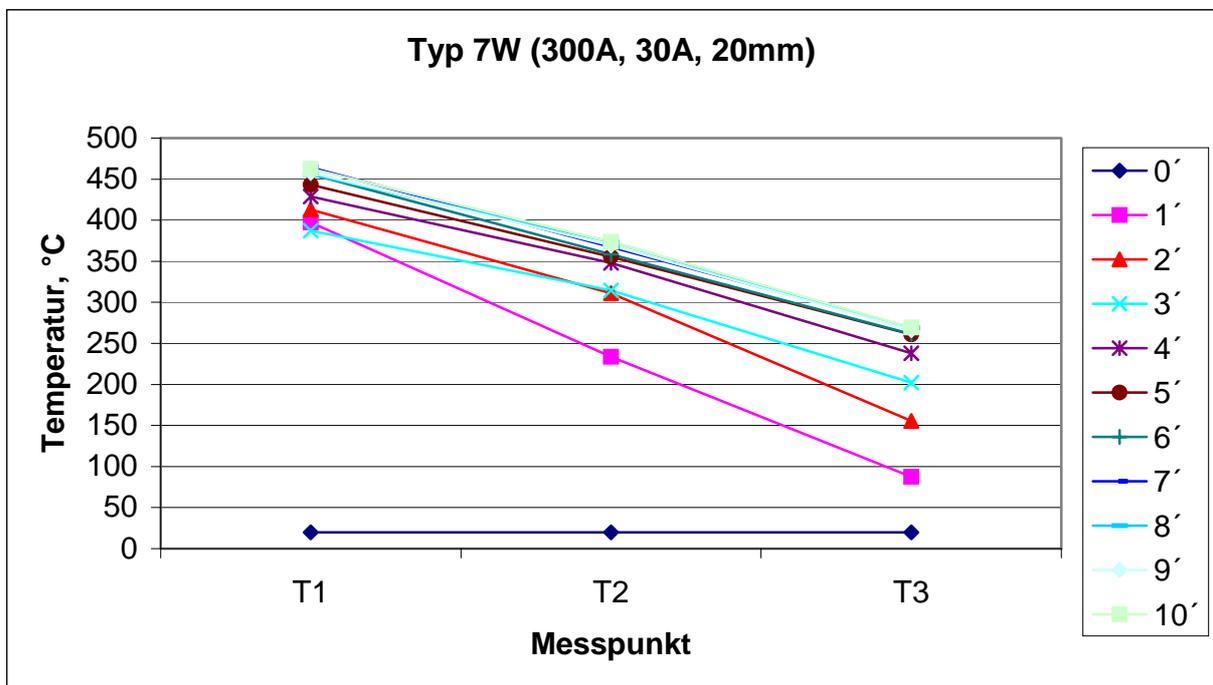


Bild A 50. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 7W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

**Versuchsreihe-Nr.:** 7**Titel:**

Test des Brenners vom Typ 9W unter unterschiedlicher Belastung

**Ziel:**

Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Belastung auf die Erwärmungsdynamik und die Temperaturverteilung im Brenner Typ 7W

**Prüfobjekt:**

Bild A 51. Brenner Typ 9W, flüssiggekühlt

**Versuchsplanung:**

Tabelle A 26. Übersicht der geplanten Versuche

	I=300 A, U=30 V, Abstand 25 mm	I=300 A, U=30 V, Abstand 20 mm	I=400 A, U=40 V, Abstand 20 mm
Brenner Typ 9W	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

Schweißstrom variabel: 300 A; 400 A, Spannung variabel: 30 V; 40 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Bild A 52. Schema der Messpunkte

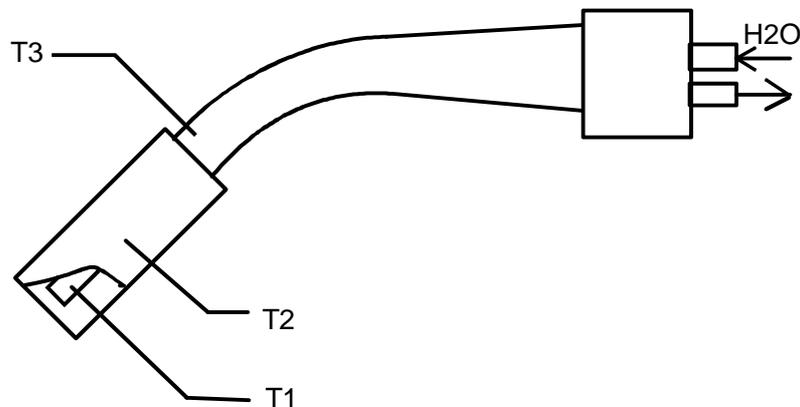


Tabelle A 27. Temperaturmessung im Brenner Typ 9W. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	162	171	167	169	180	170	175	170	178	180
	2	20	134	170	175	176	171	167	160	158	162	159
	3	20	155	160	165	170	172	180	187	190	184	190
	4	20	170	180	192	190	199	201	204	200	199	201
	5	20	130	145	150	152	150	148	146	150	153	151
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>150,2</b>	<b>165,2</b>	<b>169,8</b>	<b>171,4</b>	<b>174,4</b>	<b>173,2</b>	<b>174,4</b>	<b>173,6</b>	<b>175,2</b>	<b>176,2</b>
	Mittelabw	0	14,56	10,16	10,96	9,28	12,08	13,84	17,12	17,12	14,16	16,96
2	1	20	115	141	138	142	135	130	137	140	145	140
	2	20	90	106	105	129	130	126	120	134	128	120
	3	20	95	125	100	143	145	150	149	151	156	150
	4	20	86	102	101	125	126	122	116	130	124	116
	5	20	125	151	148	152	145	140	147	150	155	150
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>102,2</b>	<b>125</b>	<b>118,4</b>	<b>138,2</b>	<b>136,2</b>	<b>133,6</b>	<b>133,8</b>	<b>141</b>	<b>141,6</b>	<b>135,2</b>
	Mittelabw	0	14,24	16,8	19,68	8,96	7,04	9,12	12,64	7,6	12,48	13,76
3	1	20	47	49	50	57	57	60	64	60	59	60
	2	20	45	46	50	52	55	50	51	49	53	51
	3	20	42	46	50	55	60	55	57	50	62	57
	4	20	38	42	46	51	56	51	53	46	58	53
	5	20	50	52	53	60	60	63	67	63	62	63
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>44,4</b>	<b>47</b>	<b>49,8</b>	<b>55</b>	<b>57,6</b>	<b>55,8</b>	<b>58,4</b>	<b>53,6</b>	<b>58,8</b>	<b>56,8</b>
	Mittelabw	0	3,52	2,8	1,52	2,8	1,92	4,56	5,68	6,32	2,64	3,84

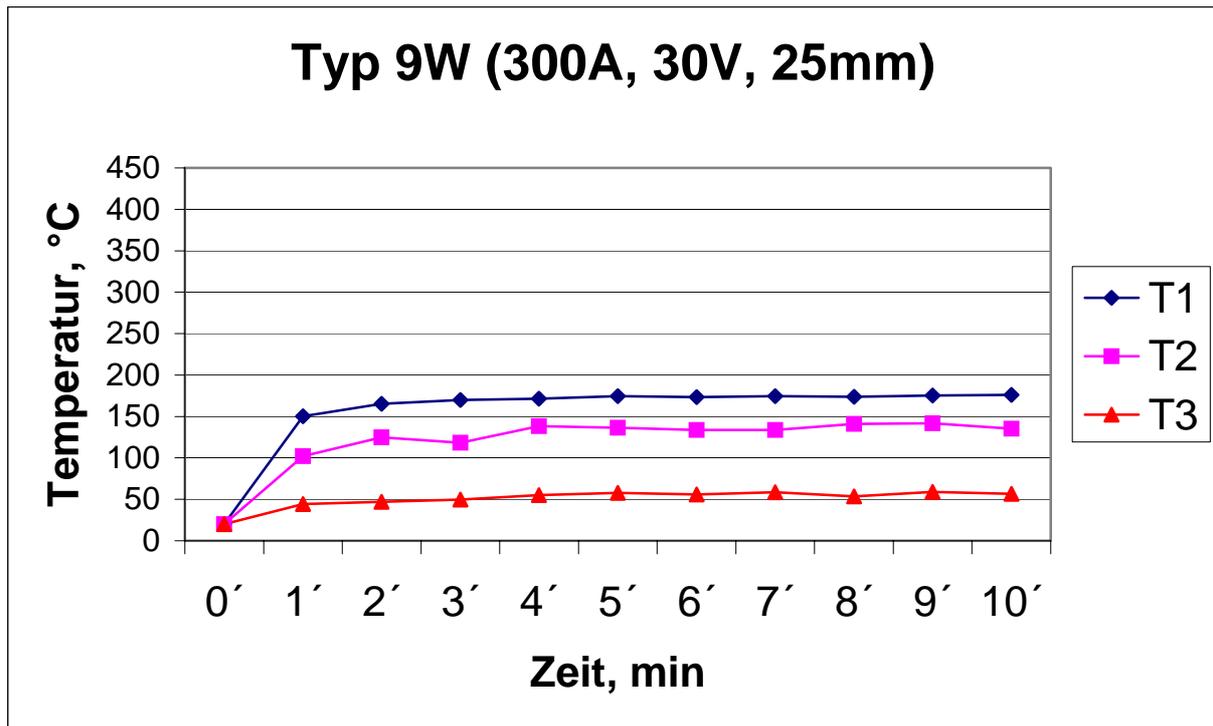


Bild A 53. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 9W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

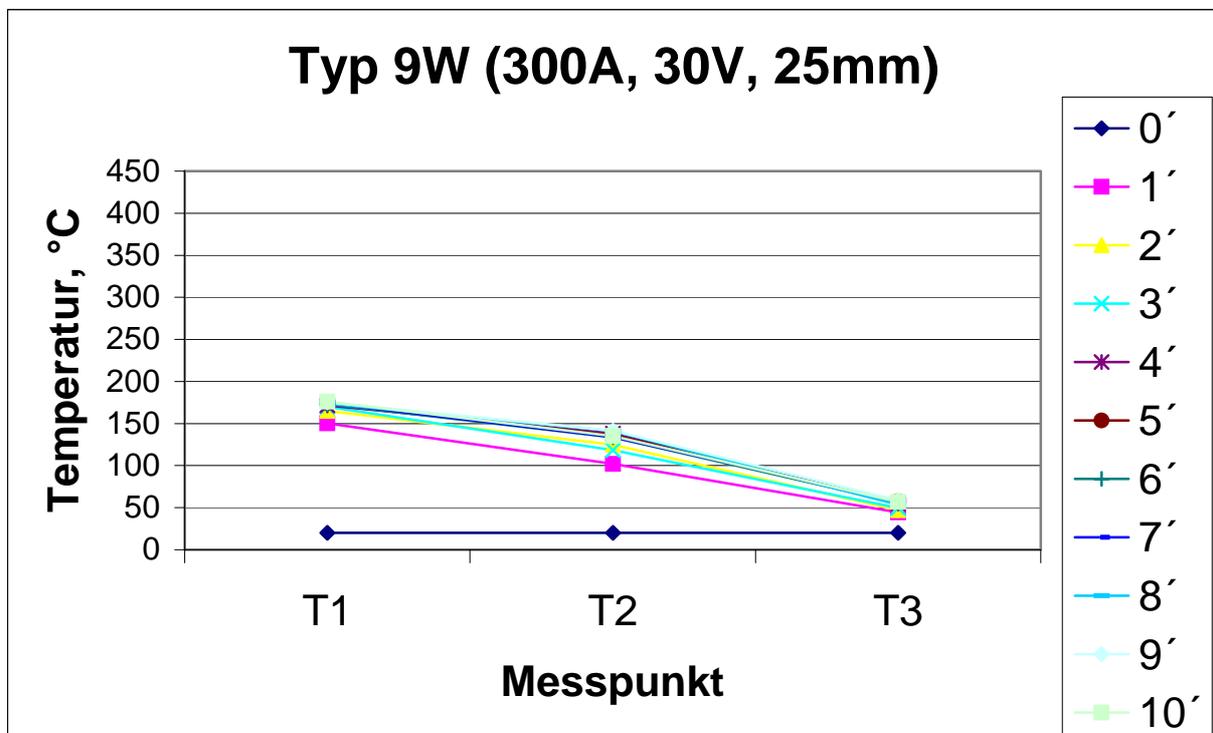


Bild A 54. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 9W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 28. Temperaturmessung im Brenner Typ 9W. Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	180	180	175	192	181	189	194	187	176	190
	2	20	165	152	150	151	160	156	168	176	162	160
	3	20	191	173	158	195	200	187	190	189	200	199
	4	20	154	144	146	148	152	143	150	149	147	150
	5	20	200	193	201	207	210	212	220	219	216	222
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>178</b>	<b>168,4</b>	<b>166</b>	<b>178,6</b>	<b>180,6</b>	<b>177,4</b>	<b>184,4</b>	<b>184</b>	<b>180,2</b>	<b>184,2</b>
	Mittelabw	0	14,8	16,32	17,6	23,28	19,68	22,32	20,32	17,2	22,24	23,36
2	1	20	120	176	162	182	178	189	180	181	176	185
	2	20	117	132	140	145	150	156	148	150	160	158
	3	20	95	115	127	143	147	150	156	140	144	152
	4	20	124	143	148	170	171	176	171	174	176	182
	5	20	90	138	140	154	156	162	148	142	145	146
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>109,2</b>	<b>140,8</b>	<b>143,4</b>	<b>158,8</b>	<b>160,4</b>	<b>166,6</b>	<b>160,6</b>	<b>157,4</b>	<b>160,2</b>	<b>164,6</b>
	Mittelabw	0	13,36	14,96	9,28	13,76	11,28	12,72	11,92	16,08	12,64	15,12
3	1	20	43	53	51	60	56	61	58	64	60	62
	2	20	50	54	50	51	54	49	50	51	55	50
	3	20	45	52	51	54	65	55	68	70	71	70
	4	20	40	48	50	52	51	52	50	51	50	54
	5	20	52	64	69	71	70	68	70	72	74	72
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>46</b>	<b>54,2</b>	<b>54,2</b>	<b>57,6</b>	<b>59,2</b>	<b>57</b>	<b>59,2</b>	<b>61,6</b>	<b>62</b>	<b>61,6</b>
	Mittelabw	0	4	3,92	5,92	6,32	6,64	6	7,84	8,48	8,4	7,68

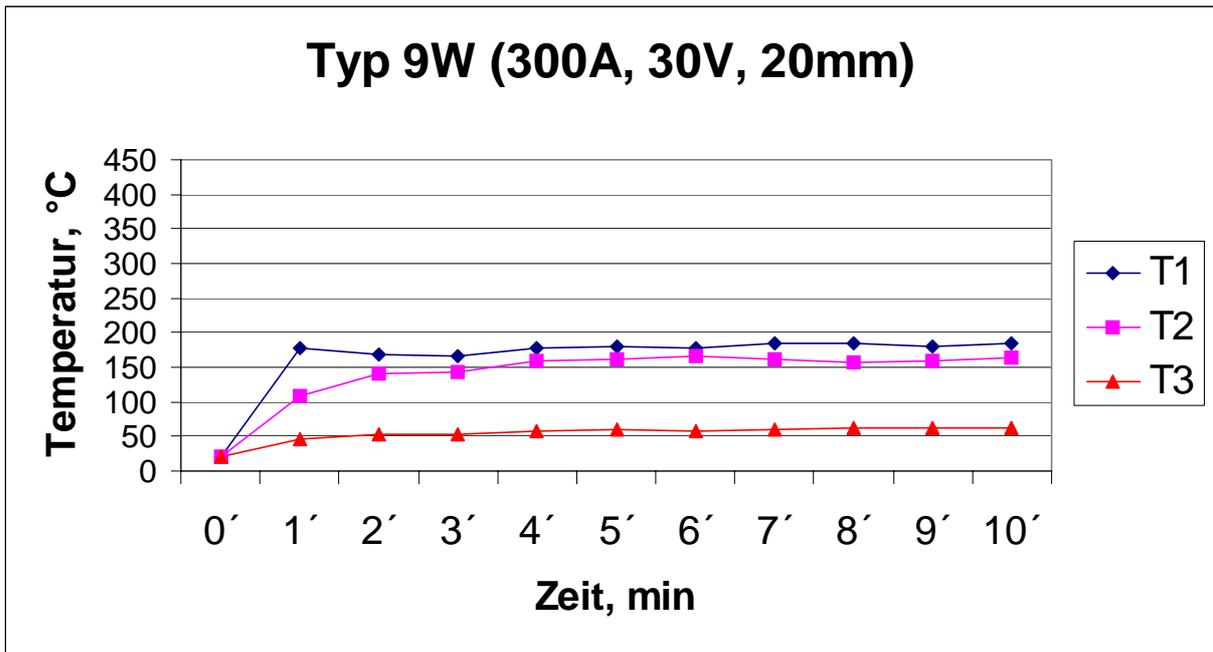


Bild A 55. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 9W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

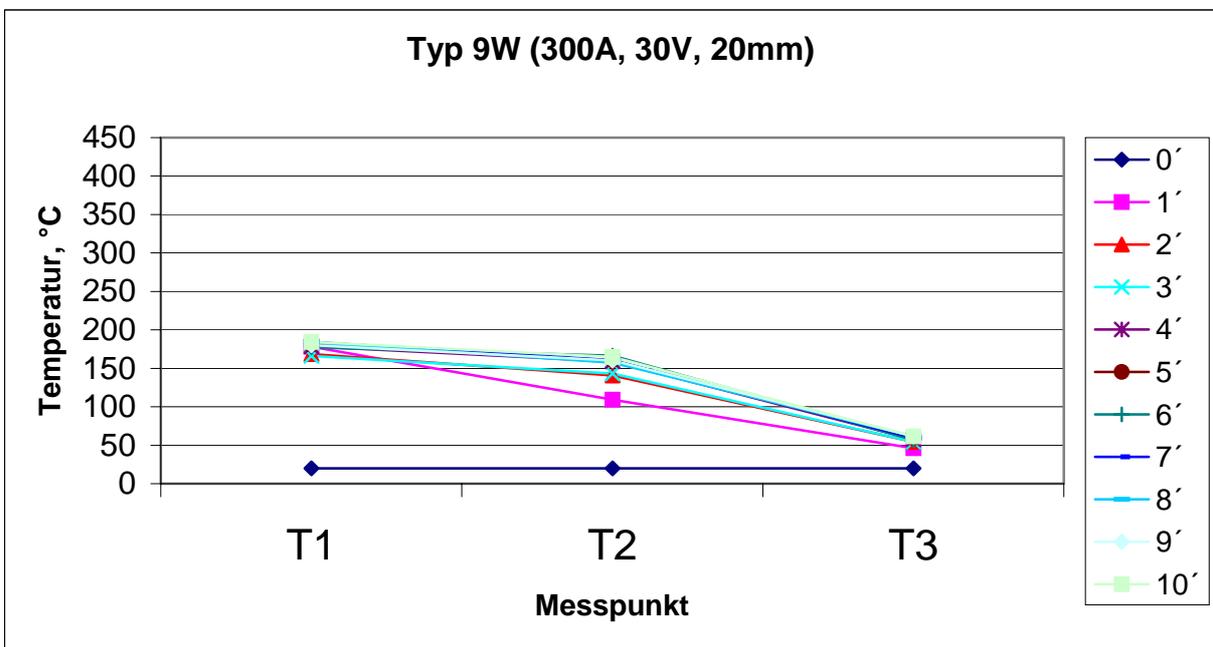


Bild A 56. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 9W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 29. Temperaturmessung im Brenner Typ 9W. Schweißstrom 400 A, Spannung 40 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	180	285	277	290	284	280	271	290	284	281
	2	20	150	350	274	257	216	250	246	260	256	249
	3	20	160	279	280	289	279	291	289	275	280	283
	4	20	110	280	260	257	262	259	255	250	257	256
	5	20	170	328	311	308	304	300	299	301	295	300
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>154,00</b>	<b>304,40</b>	<b>280,40</b>	<b>280,20</b>	<b>269,00</b>	<b>276,00</b>	<b>272,00</b>	<b>275,20</b>	<b>274,40</b>	<b>273,80</b>
	Mittelabw	0	19,20	27,68	12,24	18,56	24,00	17,20	17,60	16,24	14,32	17,04
2	1	20	182	428	440	422	412	424	417	430	420	427
	2	20	158	435	352	334	370	330	367	370	390	394
	3	20	173	410	410	422	424	430	438	427	430	432
	4	20	160	370	360	370	378	380	378	388	390	389
	5	20	180	441	409	412	420	415	427	430	432	429
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>170,60</b>	<b>416,80</b>	<b>394,20</b>	<b>392,00</b>	<b>400,80</b>	<b>395,80</b>	<b>405,40</b>	<b>409,00</b>	<b>412,40</b>	<b>414,20</b>
	Mittelabw	0	9,28	21,44	30,56	32,00	21,44	32,64	26,32	24,00	17,92	18,16
3	1	20	31	48	56	59	64	68	70	76	89	90
	2	20	35	58	66	70	71	80	80	79	70	69
	3	20	29	45	50	64	70	73	78	87	81	74
	4	20	40	60	71	78	82	86	90	94	92	88
	5	20	28	44	49	56	60	64	66	70	70	70
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>32,60</b>	<b>51,00</b>	<b>58,40</b>	<b>65,40</b>	<b>69,40</b>	<b>74,20</b>	<b>76,80</b>	<b>81,20</b>	<b>80,40</b>	<b>78,20</b>
	Mittelabw	0	3,92	6,40	8,08	6,88	5,92	7,04	7,04	7,44	8,32	8,64

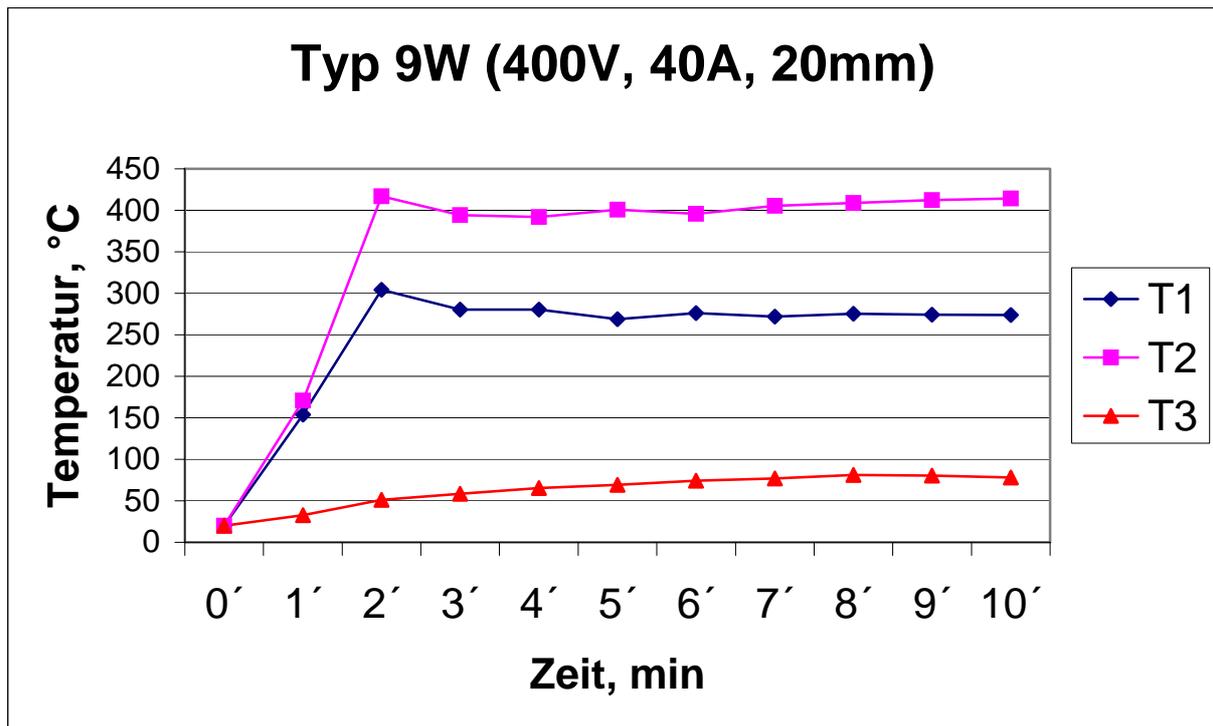


Bild A 57. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 9W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

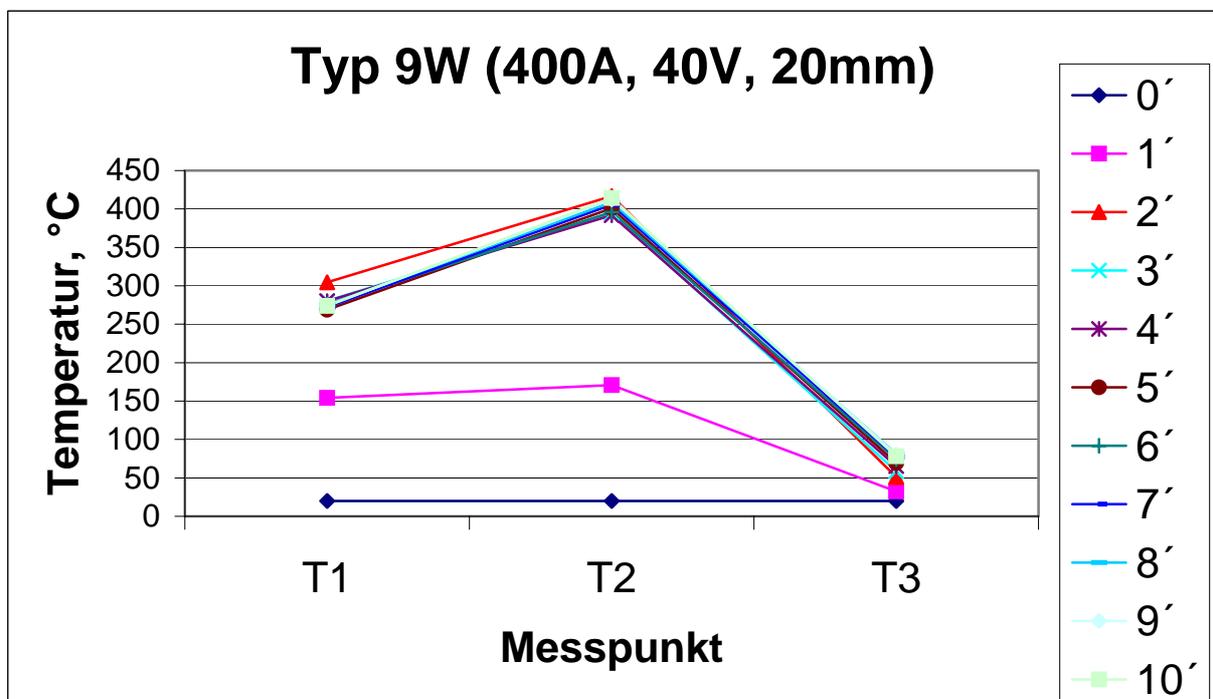


Bild A 58. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 9W, Schweißstrom 300 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

**Versuchsreihe-Nr.:** 8**Titel:**

Test des Brenners vom Typ 9W Rob in verschiedener Ausführung

**Ziel:**

Untersuchung des Einflusses der konstruktiven Gestaltung der verschiedenen Ausführungen von flüssiggekühlten Brennern Typ 9w Rob auf die Erwärmungsdynamik und die Temperaturverteilung im Brenner

**Prüfobjekt:**

Bild A 59. Brenner Typ 9W Rob, flüssigkeitsgekühlt

**Versuchsplanung:**

Tabelle A 30. Übersicht der geplanten Versuche

	Typ 9w Rob, Düsenträger aus Kupfer	Typ 9w Rob, Düsenträgeraufsatz aus Messing	Typ 9w Rob, Düsenträger aus Messing
100% ED	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Bild A 60. Schema der Messpunkte

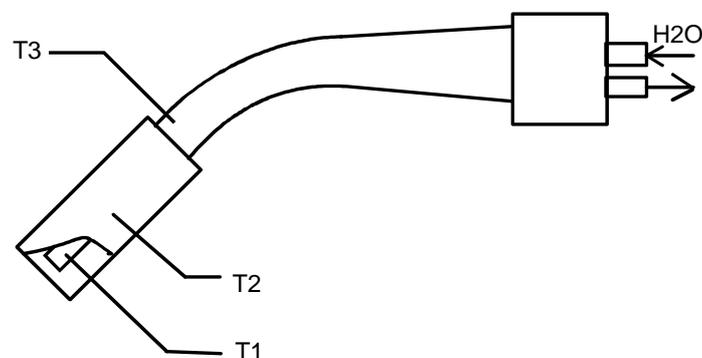


Tabelle A 31. Temperaturmessung im Brenner Typ 9W Rob, Düsenträger aus Kupfer. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	172	178	170	183	173	181	179	187	193	185
	2	20	174	200	159	187	169	179	189	204	205	203
	3	20	174	201	160	160	170	163	199	181	194	185
	4	20	212	254	241	250	247	243	251	256	247	258
	5	20	180	210	230	237	230	227	238	244	239	245
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>182,4</b>	<b>208,6</b>	<b>192</b>	<b>203,4</b>	<b>197,8</b>	<b>198,6</b>	<b>211,2</b>	<b>214,4</b>	<b>215,6</b>	<b>215,2</b>
	Mittelabw	0	11,84	18,72	34,8	32,08	32,56	29,12	26,64	28,48	21,92	29,04
2	1	20	160	179	161	191	180	176	189	195	181	198
	2	20	174	201	181	174	190	198	185	200	196	191
	3	20	172	210	171	175	190	189	197	200	207	219
	4	20	119	194	189	197	207	217	209	212	200	211
	5	20	158	165	188	198	184	188	180	198	188	197
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>156,6</b>	<b>189,8</b>	<b>178</b>	<b>187</b>	<b>190,2</b>	<b>193,6</b>	<b>192</b>	<b>201</b>	<b>194,4</b>	<b>203,2</b>
	Mittelabw	0	15,04	14,24	9,6	10	6,72	11,12	8,8	4,4	7,92	9,44
3	1	20	41	49	50	51	50	53	51	52	53	51
	2	20	46	48	50	52	54	53	54	54	54	50
	3	20	52,5	54	55,8	53	54	52	55	56	54	56
	4	20	10	44	46	49	58	58	59	59	56	55
	5	20	41	49	55	55,5	57	59	58	57	58	57
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>38,1</b>	<b>48,8</b>	<b>51,36</b>	<b>52,1</b>	<b>54,6</b>	<b>55</b>	<b>55,4</b>	<b>55,6</b>	<b>55</b>	<b>53,8</b>
	Mittelabw	0	11,24	2,24	3,232	1,72	2,32	2,8	2,48	2,08	1,6	2,64



Tabelle A 32. Temperaturmessung im Brenner Typ 9W Rob, Düsenträgeraufsatz aus Kupfer. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	424	431	440	436	384	346	377	380	387	390
	2	20	360	357	342	332	307	300	375	336	349	357
	3	20	454	427	551	503	582	562	573	547	558	560
	4	20	484	515	505	504	531	525	546	529	534	541
	5	20	380	350	420	406	438	431	440	437	430	428
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>420,4</b>	<b>416</b>	<b>451,6</b>	<b>436,2</b>	<b>448,4</b>	<b>432,8</b>	<b>462,2</b>	<b>445,8</b>	<b>451,6</b>	<b>455,2</b>
	Mittelabw	0	40,32	50	61,12	53,84	86,48	88,56	77,84	73,76	75,52	76,24
2	1	20	212	266	270	293	286	285	280	291	289	295
	2	20	219	294	312	298	263	251	320	287	300	304
	3	20	156	228	264	280	294	301	289	297	283	290
	4	20	171	259	295	340	369	359	347	353	362	341
	5	20	184	246	307	309	344	336	320	327	340	339
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>188,4</b>	<b>258,6</b>	<b>289,6</b>	<b>304</b>	<b>311,2</b>	<b>306,4</b>	<b>311,2</b>	<b>311</b>	<b>314,8</b>	<b>313,8</b>
	Mittelabw	0	21,68	17,28	18,08	16,4	36,24	32,88	21,36	23,2	28,96	20,96
3	1	20	90	119	122	132	129	129	131	137	128	132
	2	20	95	133	141	133	121	115	142	128	134	130
	3	20	65	102	130	140	146	142	148	139	145	151
	4	20	70	131	152	169	179	174	168	172	177	180
	5	20	89	121	151	166	171	161	173	169	175	166
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>81,8</b>	<b>121,2</b>	<b>139,2</b>	<b>148</b>	<b>149,2</b>	<b>144,2</b>	<b>152,4</b>	<b>149</b>	<b>151,8</b>	<b>151,8</b>
	Mittelabw	0	11,44	8,64	10,56	15,6	20,64	18,64	14,48	17,2	19,36	16,96

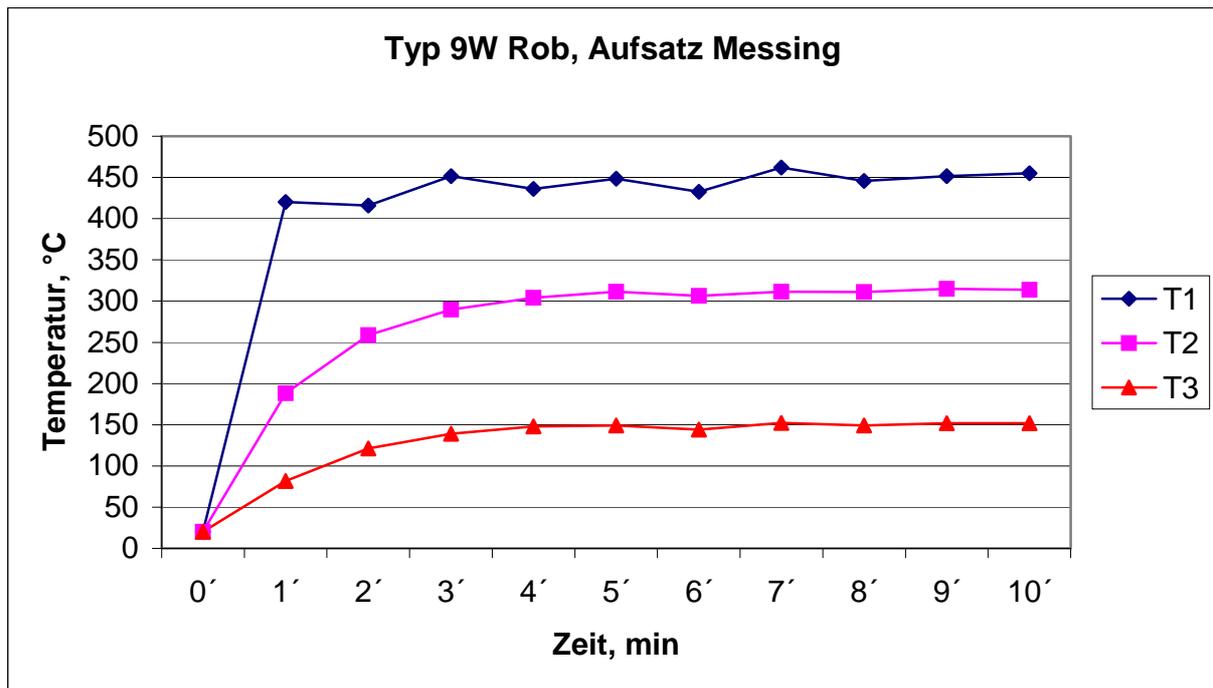


Bild A 63. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 9W Rob, Düsenträgeraufsatz aus Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

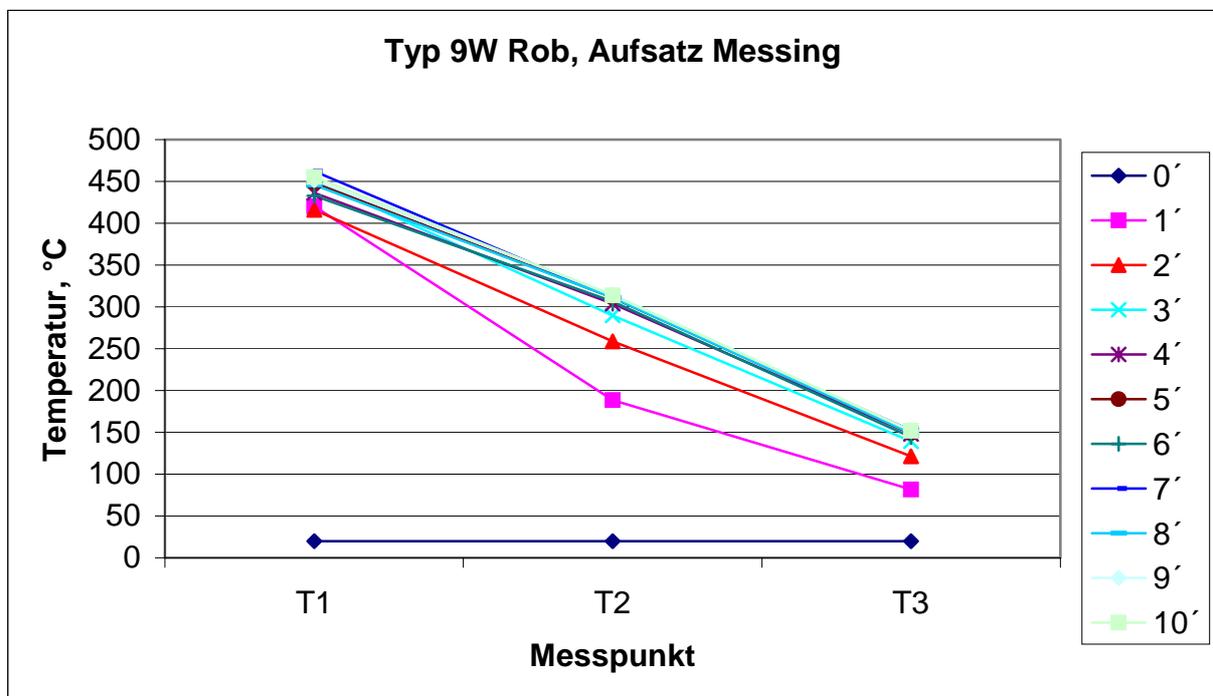


Bild A 64. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 9W Rob, Düsenträgeraufsatz aus Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

Tabelle A 33. Temperaturmessung im Brenner Typ 9W Rob, Düsenträger aus Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	190	221	221	240	212	213	215	200	210	212
	2	20	214	238	241	240	230	238	231	230	237	248
	3	20	198	209	222	244	235	240	234	230	241	244
	4	20	240	270	190	243	222	231	227	242	237	240
	5	20	230	237	219	220	222	223	220	218	222	230
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>214,4</b>	<b>235</b>	<b>218,6</b>	<b>237,4</b>	<b>224,2</b>	<b>229</b>	<b>225,4</b>	<b>224</b>	<b>229,4</b>	<b>234,8</b>
	Mittelabw	0	16,48	16	11,44	6,96	6,64	8,8	6,32	12	10,72	11,04
2	1	20	181	218	219	241	198	223	206	208	227	230
	2	20	217	236	240	235	246	221	224	217	211	208
	3	20	145	160	184	236	217	223	220	228	230	225
	4	20	0	206	185	237	209	211	208	206	197	190
	5	20	150	219	200	201	193	186	192	200	189	203
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>138,6</b>	<b>207,8</b>	<b>205,6</b>	<b>230</b>	<b>212,6</b>	<b>212,8</b>	<b>210</b>	<b>211,8</b>	<b>210,8</b>	<b>211,2</b>
	Mittelabw	0	55,44	19,84	19,12	11,6	15,12	11,44	9,6	8,56	14,24	13,04
3	1	20	31	39	40	41	40	43	41	42	43	41
	2	20	36	38	40	42	44	43	44	44	44	40
	3	20	42,5	44	45,8	43	44	42	45	46	44	46
	4	20	0	34	36	39	48	48	49	49	46	45
	5	20	31	39	45	45,5	47	49	48	47	48	47
<b>T3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>28,1</b>	<b>38,8</b>	<b>41,36</b>	<b>42,1</b>	<b>44,6</b>	<b>45</b>	<b>45,4</b>	<b>45,6</b>	<b>45</b>	<b>43,8</b>
	Mittelabw	0	11,24	2,24	3,232	1,72	2,32	2,8	2,48	2,08	1,6	2,64

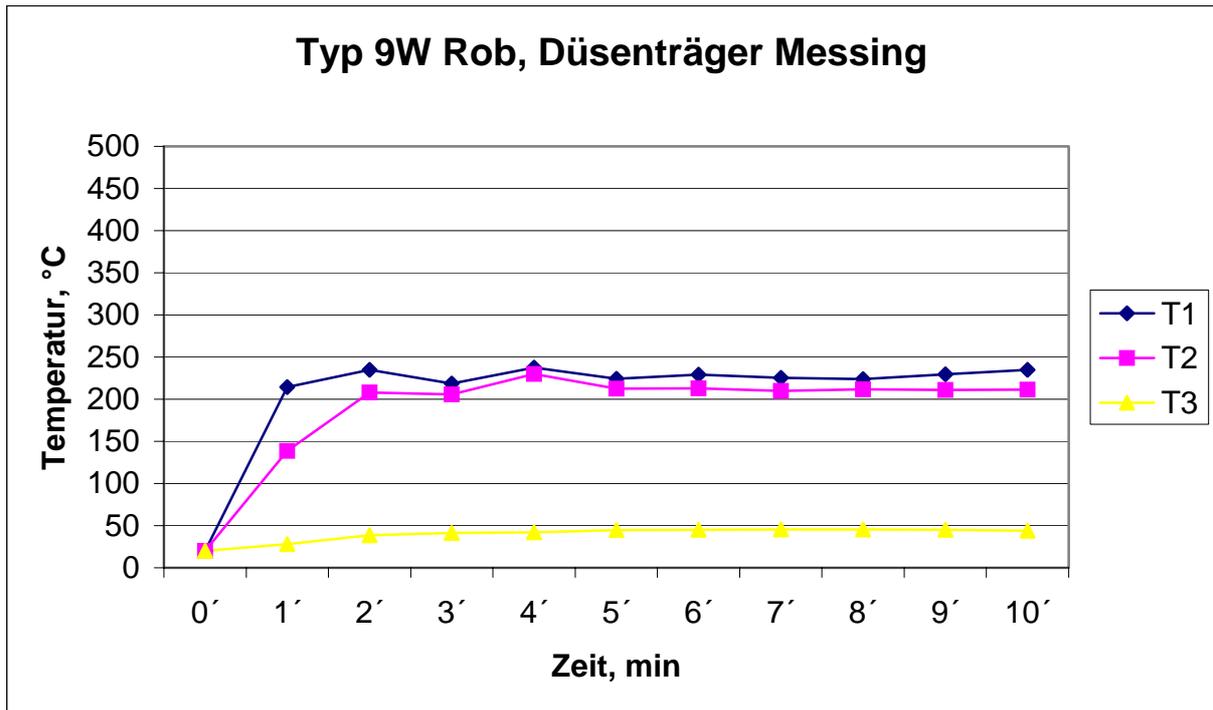


Bild A 65. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 9W Rob, Düsenträger aus Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

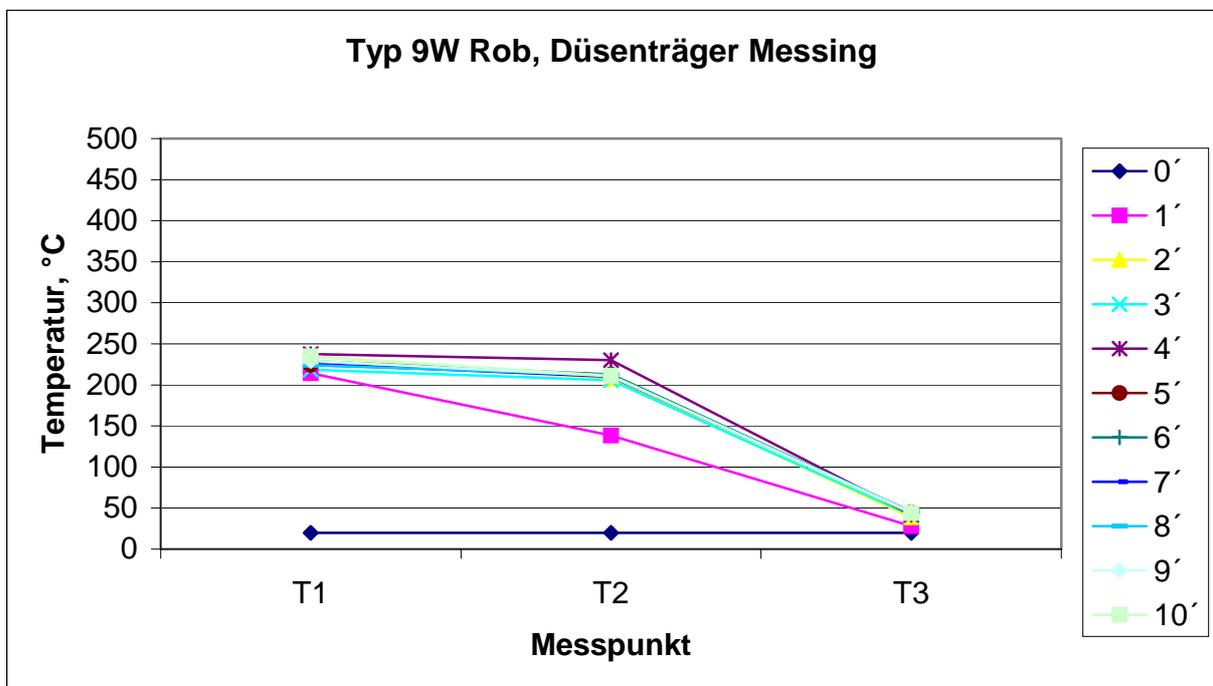


Bild A 66. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 9W Rob, Düsenträger aus Messing. Schweißstrom 300 A, Spannung 33 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

**Versuchsreihe-Nr.:** 9**Titel:**

Test des Brenners vom Typ 411 unter variablen Parametern der Flüssigkeitskühlung

**Ziel:**

Untersuchung des Einflusses der Parameter der Flüssigkeitskühlung auf die Erwärmungsdynamik und die Temperaturverteilung im Brenner Typ 411 bei variabler Belastung

**Prüfobjekt:**

Bild A 67. Brenner Typ 411, flüssigkeitsgekühlt

**Versuchsplanung:**

Tabelle A 34. Übersicht der geplanten Versuche

	Wasserdurchfluss 100 l/min	Wasserdurchfluss 200 l/min	Wasserdurchfluss 300 l/min
I=270 A, U=30 V, 100% ED	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
I=270 A, U=30 V, 100% ED	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

Schweißstrom variabel: 270 A; 320 A, Spannung variabel: 30 V; 34 V, Wasserdurchfluss variabel: 100 l/min; 200 l/min; 300 l/min, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück variabel: 20 mm, 25 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

Bild A 68. Schema der Messpunkte

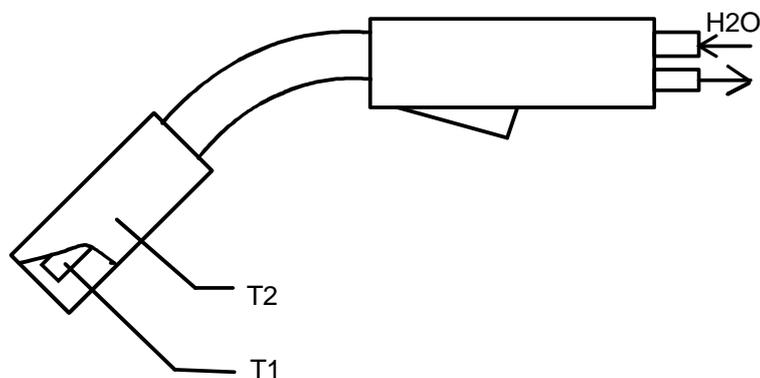


Tabelle A 35. Temperaturmessung im Brenner Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	404	431	440	436	444	438	440	437	429	438
	2	20	360	357	380	386	382	376	375	380	378	384
	3	20	396	427	501	508	505	500	506	502	504	508
	4	20	457	515	519	527	531	525	530	529	534	528
	5	20	380	380	414	416	410	412	420	413	407	409
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>399,4</b>	<b>422</b>	<b>450,8</b>	<b>454,6</b>	<b>454,4</b>	<b>450,2</b>	<b>454,2</b>	<b>452,2</b>	<b>450,4</b>	<b>453,4</b>
	Mittelabw	0	24,88	42,8	47,36	50,32	50,88	49,84	51,04	50,64	54,88	51,68
2	1	20	134	152	150	168	181	189	194	187	189	190
	2	20	156	173	180	195	160	165	168	176	170	165
	3	20	145	154	158	200	200	203	190	189	200	199
	4	20	154	144	146	148	152	149	150	149	147	150
	5	20	200	193	201	207	210	212	220	219	220	222
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>157,8</b>	<b>163,2</b>	<b>167</b>	<b>183,6</b>	<b>180,6</b>	<b>183,6</b>	<b>184,4</b>	<b>184</b>	<b>185,2</b>	<b>185,2</b>
	Mittelabw	0	16,88	15,84	18,8	20,48	19,68	21,28	20,32	17,2	21,36	22,16

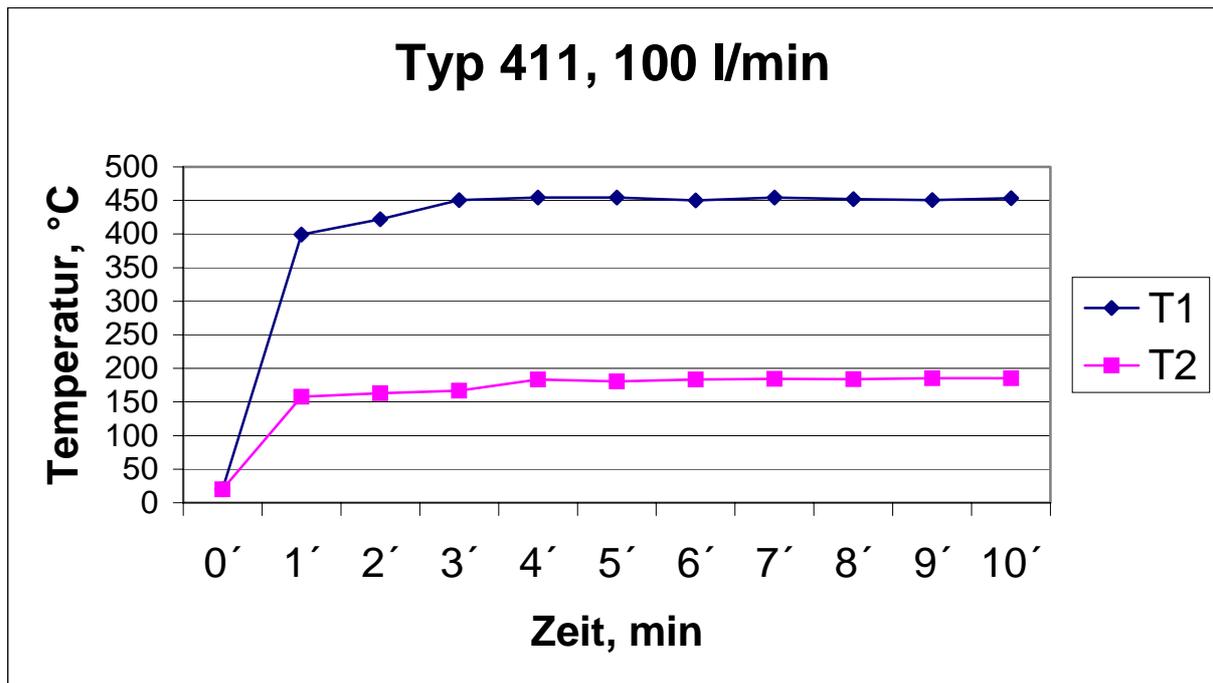


Bild A 69. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

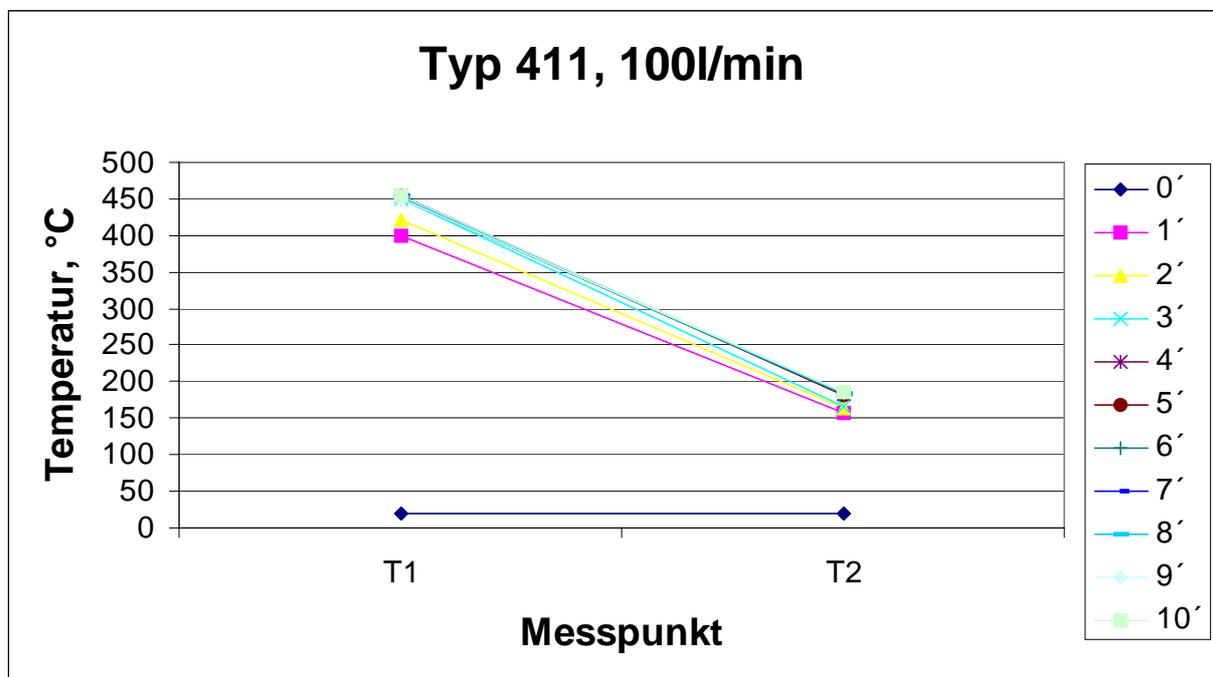


Bild A 70. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 36. Temperaturmessung im Brenner Typ 411. Wasserdurchfluss 200 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	182	390	440	438	441	439	417	430	420	427
	2	20	158	307	352	367	370	369	367	370	372	361
	3	20	173	389	410	422	420	430	438	427	430	425
	4	20	160	320	360	370	378	380	378	388	390	389
	5	20	180	345	409	412	418	415	427	420	432	429
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>170,60</b>	<b>350,20</b>	<b>394,20</b>	<b>401,80</b>	<b>405,40</b>	<b>406,60</b>	<b>405,40</b>	<b>407,00</b>	<b>408,80</b>	<b>406,20</b>
	Mittelabw	0	9,28	31,44	30,56	26,64	25,12	25,68	26,32	22,4	22,24	24,96
2	1	20	115	141	138	142	135	130	137	132	129	131
	2	20	90	101	105	109	112	110	114	109	103	120
	3	20	95	125	100	133	145	150	149	151	148	150
	4	20	86	102	101	108	126	122	116	130	124	116
	5	20	125	151	148	152	145	140	147	150	155	150
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>102,2</b>	<b>124</b>	<b>118,4</b>	<b>128,8</b>	<b>132,6</b>	<b>130,4</b>	<b>132,6</b>	<b>134,4</b>	<b>131,8</b>	<b>133,4</b>
	Mittelabw	0	14,24	18	19,68	16,24	10,88	11,68	14,08	12,88	15,76	13,28

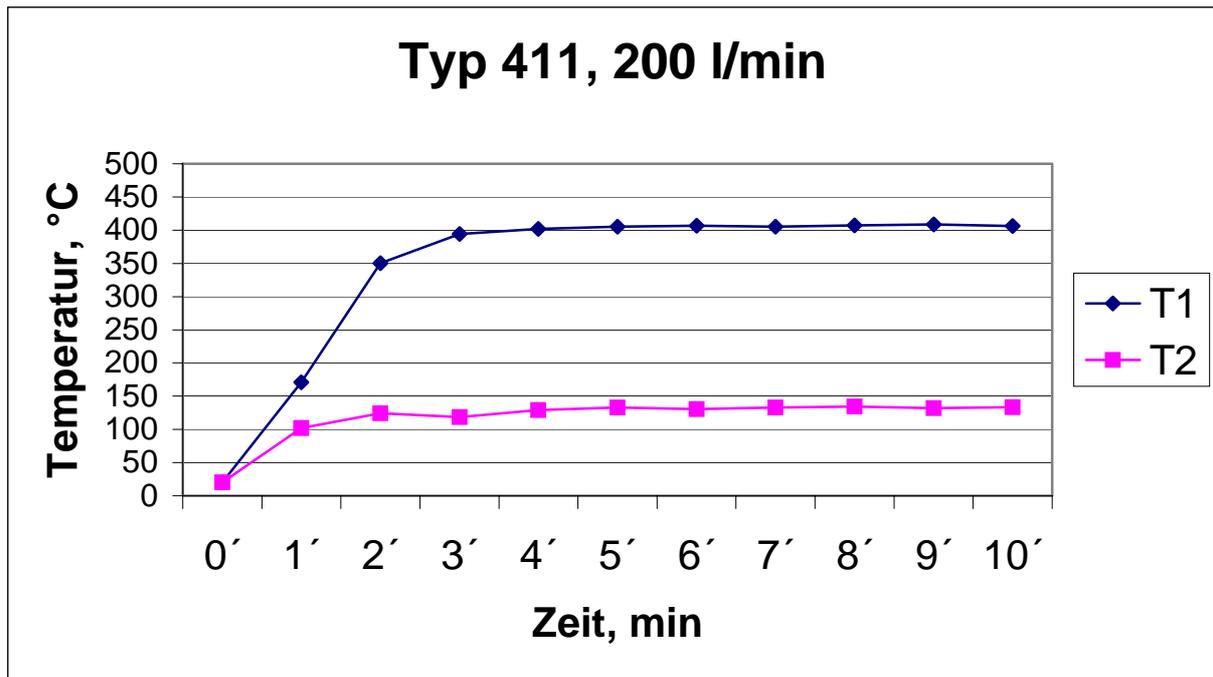


Bild A 71. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 411. Wasserdurchfluss 200 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

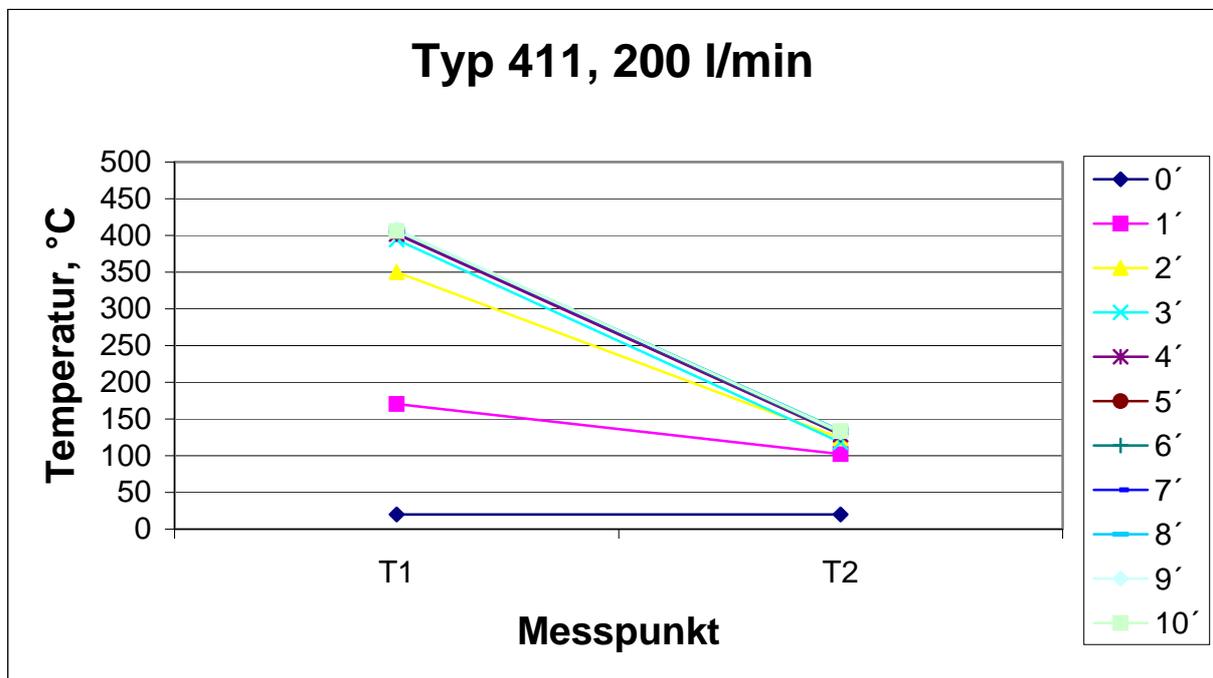


Bild A 72. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 411. Wasserdurchfluss 200 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

Tabelle A 37. Temperaturmessung im Brenner Typ 411. Wasserdurchfluss 300 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	150	290	360	380	402	392	400	399	400	395
	2	20	214	347	399	404	398	400	412	400	397	371
	3	20	227	316	387	398	400	404	407	414	411	415
	4	20	192	227	338	363	363	363	355	363	367	369
	5	20	183	274	354	373	386	389	381	379	380	402
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>193,2</b>	<b>290,8</b>	<b>367,6</b>	<b>383,6</b>	<b>389,8</b>	<b>389,6</b>	<b>391</b>	<b>391</b>	<b>391</b>	<b>390,4</b>
	Mittelabw	0	21,84	32,56	20,32	13,92	12,24	10,88	18,4	16	14	16,32
2	1	20	107	120	130	132	137	138	135	137	134	138
	2	20	129	134	141	142	138	134	139	140	141	139
	3	20	80	120	123	121	120	118	120	119	117	119
	4	20	88	98	100	102	107	105	108	110	109	107
	5	20	122	103	107	106	103	102	100	101	104	99
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>105,2</b>	<b>115</b>	<b>120,2</b>	<b>120,6</b>	<b>121</b>	<b>119,4</b>	<b>120,4</b>	<b>121,4</b>	<b>121</b>	<b>120,4</b>
	Mittelabw	0	16,96	11,6	13,36	13,28	13,2	13,28	13,28	13,68	13,2	14,48

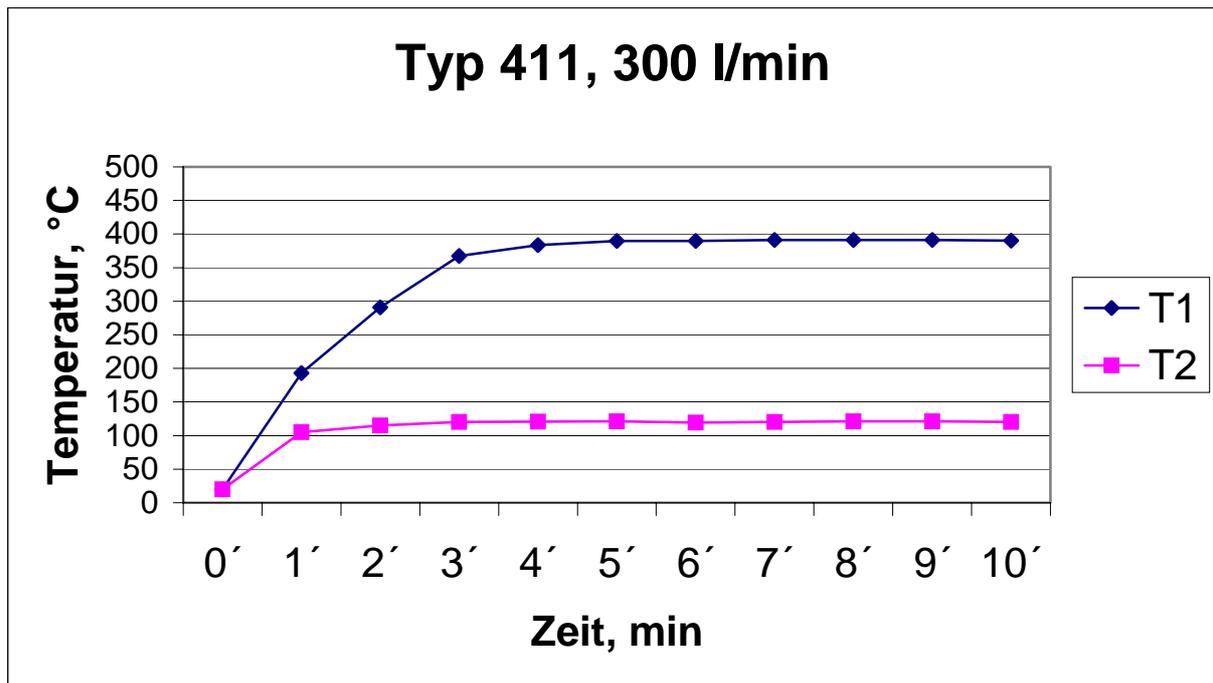


Bild A 73. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 411. Wasserdurchfluss 300 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

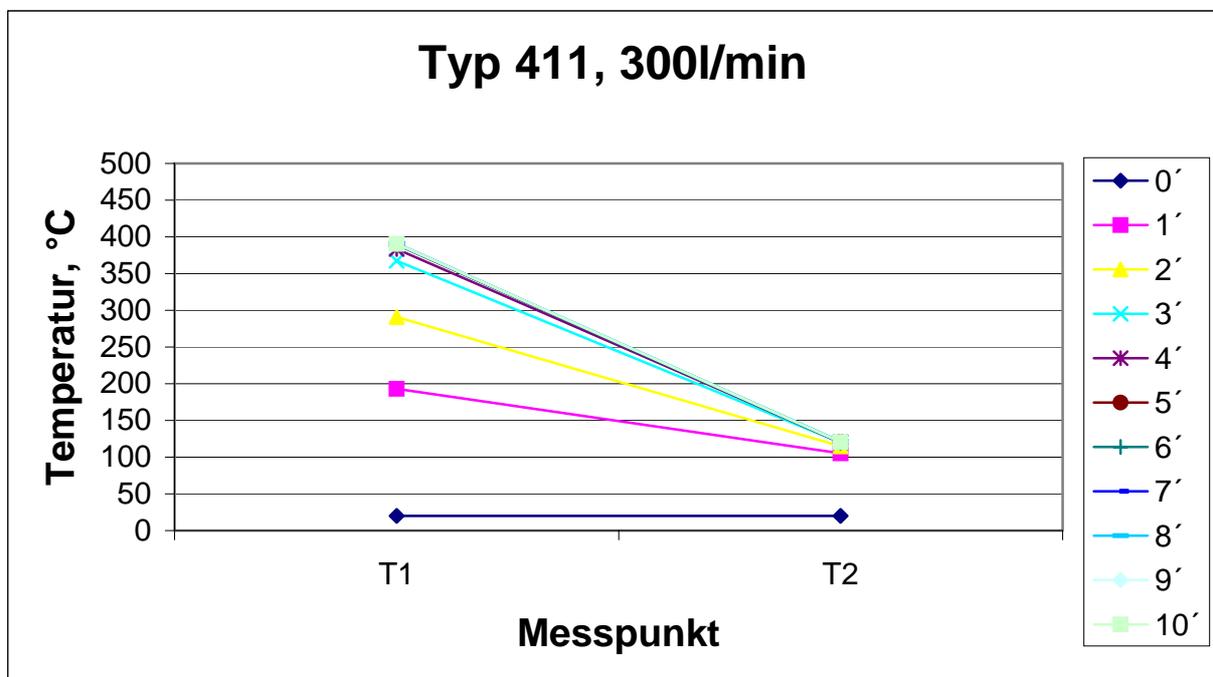


Bild A 74. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 411. Wasserdurchfluss 300 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 38. Temperaturmessung im Brenner Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	451	505	547	550	554	552	543	546	548	551
	2	20	382	443	437	492	502	510	511	517	512	509
	3	20	350	390	401	430	442	445	447	442	450	453
	4	20	330	361	382	394	409	415	416	417	420	426
	5	20	331	381	397	420	424	431	435	429	422	417
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>368,8</b>	<b>416</b>	<b>432,8</b>	<b>457,2</b>	<b>466,2</b>	<b>470,6</b>	<b>470,4</b>	<b>470,2</b>	<b>470,4</b>	<b>471,2</b>
	Mittelabw	0	38,16	46,4	47,36	51,04	49,44	48,32	45,28	49,04	47,68	47,04
2	1	20	212	219	234	256	249	260	251	249	242	240
	2	20	238	232	242	241	245	246	239	237	240	240
	3	20	204	230	242	231	243	239	242	239	241	240
	4	20	229	272	269	261	246	247	245	254	280	265
	5	20	198	207	217	221	220	220	215	205	209	221
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>216,2</b>	<b>232</b>	<b>240,8</b>	<b>242</b>	<b>240,6</b>	<b>242,4</b>	<b>238,4</b>	<b>236,8</b>	<b>242,4</b>	<b>241,2</b>
	Mittelabw	0	13,84	16	12,24	13,2	8,24	10,32	9,36	12,72	15,04	9,52

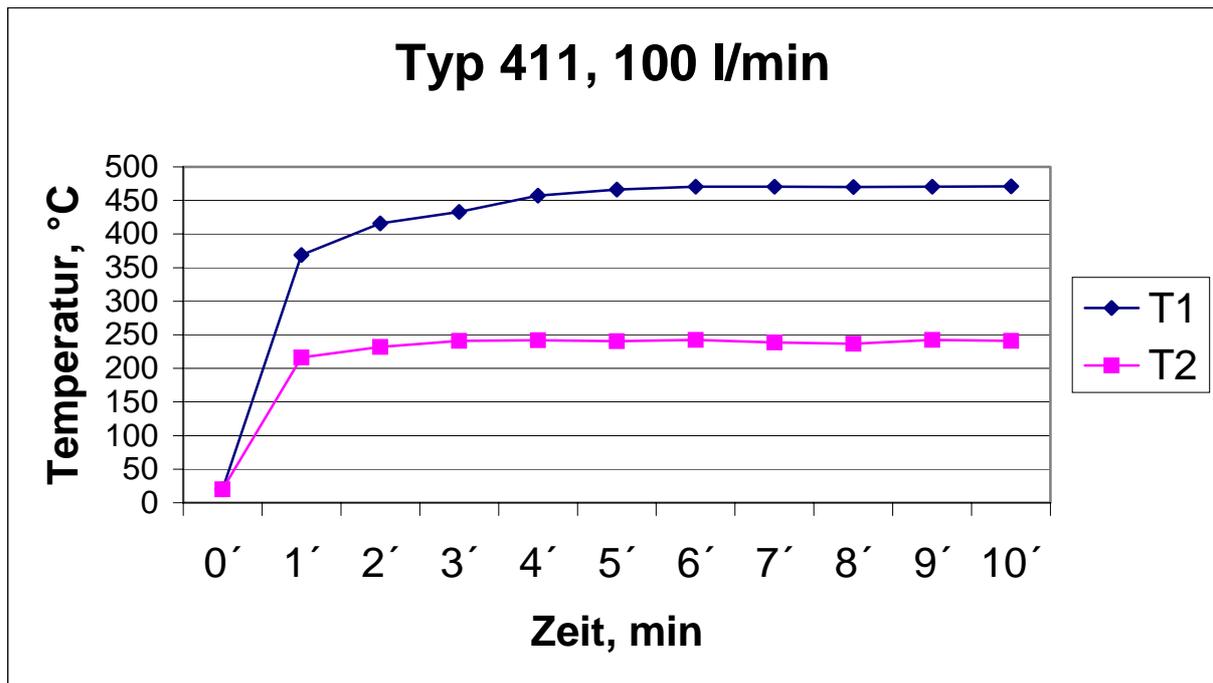


Bild A 75. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

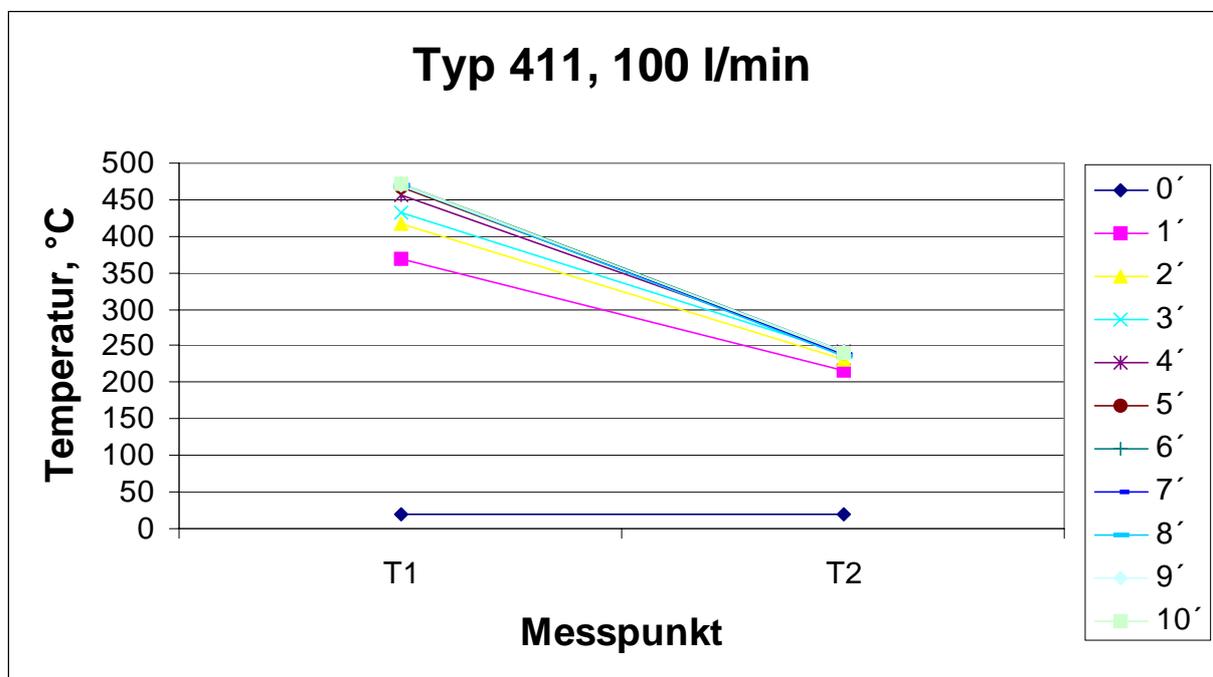


Bild A 76. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 39. Temperaturmessung im Brenner Typ 411. Wasserdurchfluss 200 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	380	403	422	457	410	447	445	438	440	448
	2	20	430	470	469	472	441	470	489	490	500	497
	3	20	355	396	329	317	510	525	500	511	507	508
	4	20	355	391	396	414	387	370	387	379	383	380
	5	20	346	405	464	484	468	438	442	439	443	436
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>373,2</b>	<b>413</b>	<b>416</b>	<b>428,8</b>	<b>443,2</b>	<b>450</b>	<b>452,6</b>	<b>451,4</b>	<b>454,6</b>	<b>453,8</b>
	Mittelabw	0	25,44	22,8	42,8	50,64	36,64	38	33,52	39,28	39,12	38,96
2	1	20	172	178	170	183	173	181	179	187	193	185
	2	20	174	200	159	187	169	179	189	204	205	203
	3	20	174	201	160	160	170	163	199	181	194	185
	4	20	212	254	241	250	247	243	251	256	247	258
	5	20	180	210	230	237	230	227	238	244	239	245
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>182,4</b>	<b>208,6</b>	<b>192</b>	<b>203,4</b>	<b>197,8</b>	<b>198,6</b>	<b>211,2</b>	<b>214,4</b>	<b>215,6</b>	<b>215,2</b>
	Mittelabw	0	11,84	18,72	34,8	32,08	32,56	29,12	26,64	28,48	21,92	29,04

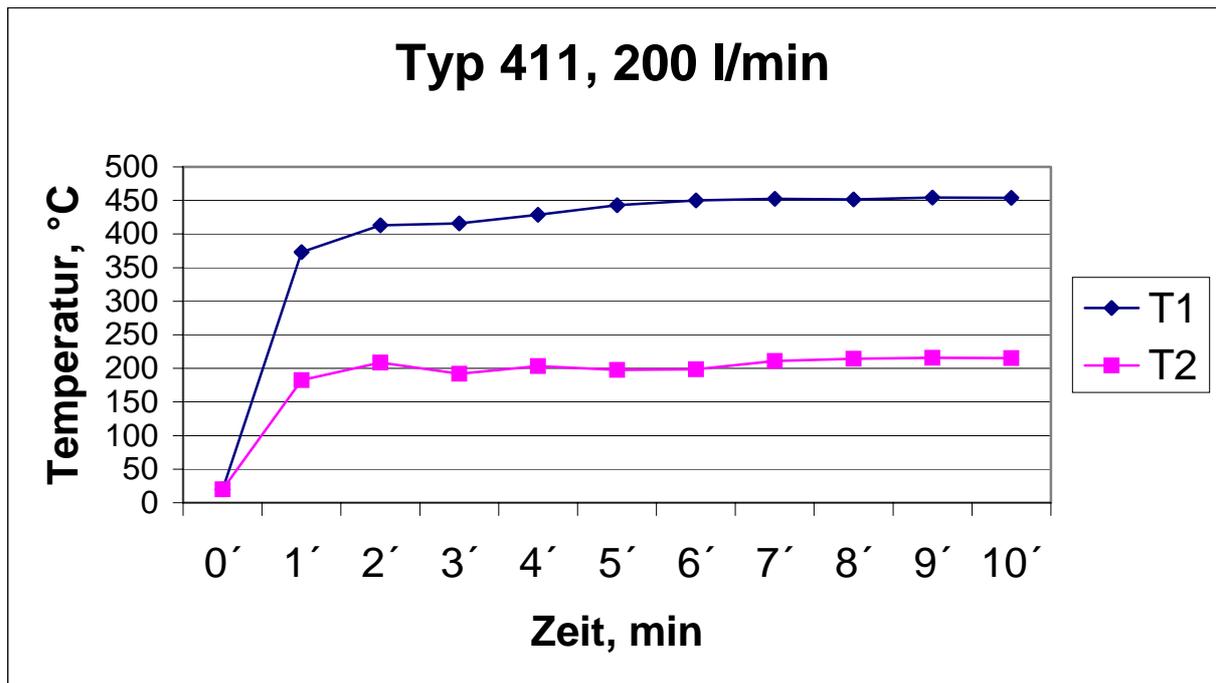


Bild A 77. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 411. Wasserdurchfluss 200 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

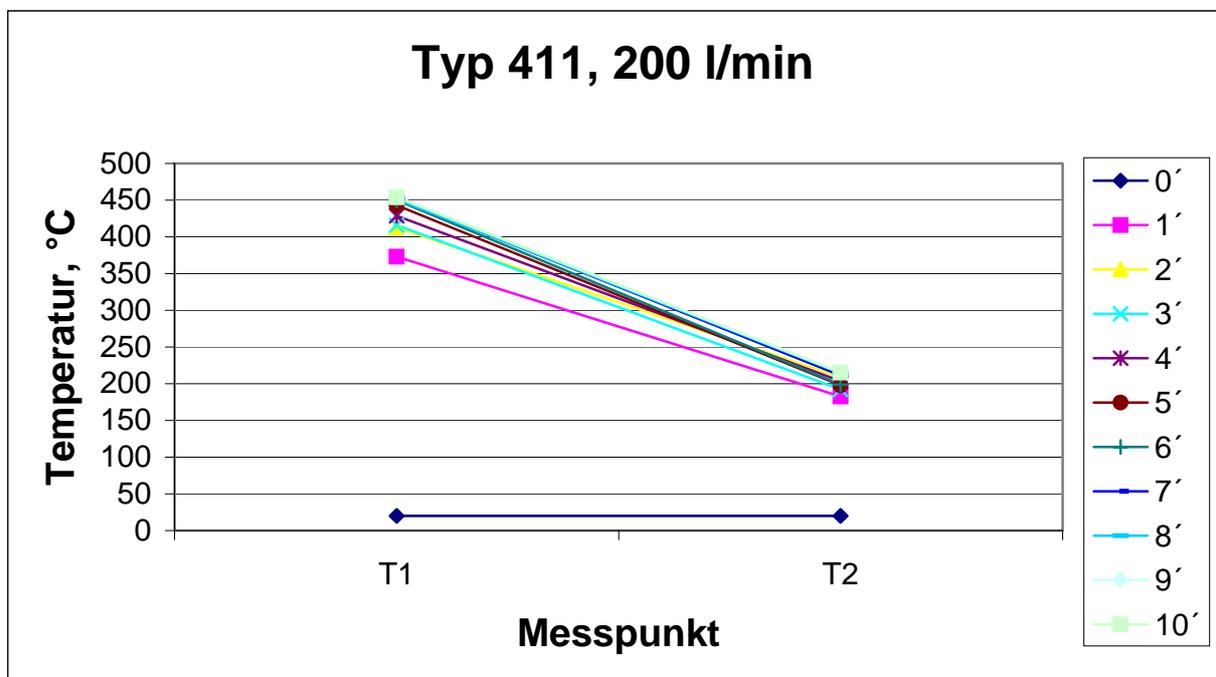


Bild A 78. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 411. Wasserdurchfluss 200 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing 1,2$  mm

Tabelle A 40. Temperaturmessung im Brenner Typ 411. Wasserdurchfluss 300 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1, Ø1,2 mm

Messpunkt	Messung	Zeit										
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
1	1	20	383	431	440	436	384	393	386	380	387	390
	2	20	310	323	389	400	405	403	399	407	409	412
	3	20	400	427	487	503	510	513	509	502	508	500
	4	20	434	490	505	504	514	525	531	529	534	541
	5	20	320	400	420	406	438	431	440	437	430	428
<b>T1</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>369,4</b>	<b>414,2</b>	<b>448,2</b>	<b>449,8</b>	<b>450,2</b>	<b>453</b>	<b>453</b>	<b>451</b>	<b>453,6</b>	<b>454,2</b>
	Mittelabw	0	43,52	42,16	38,24	42,96	49,44	52,8	53,6	51,6	53,92	53,04
2	1	20	160	179	161	191	180	176	189	195	181	198
	2	20	174	201	181	174	190	198	185	200	196	191
	3	20	172	210	171	175	190	189	197	200	207	219
	4	20	119	194	189	197	207	217	209	212	200	211
	5	20	158	165	188	198	184	188	180	198	188	197
<b>T2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	<b>156,6</b>	<b>189,8</b>	<b>178</b>	<b>187</b>	<b>190,2</b>	<b>193,6</b>	<b>192</b>	<b>201</b>	<b>194,4</b>	<b>203,2</b>
	Mittelabw	0	15,04	14,24	9,6	10	6,72	11,12	8,8	4,4	7,92	9,44

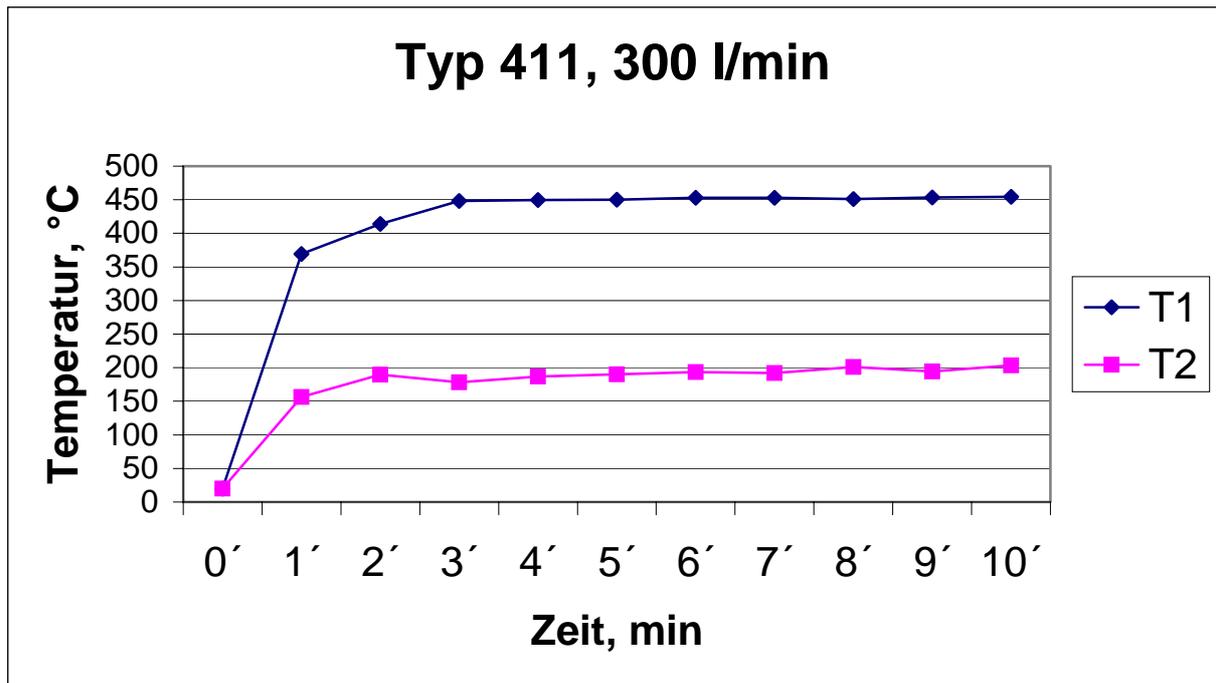


Bild A 79. Erwärmungsdynamik des Brennerhalses Typ 411. Wasserdurchfluss 100 l/min, Schweißstrom 270 A, Spannung 30 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm

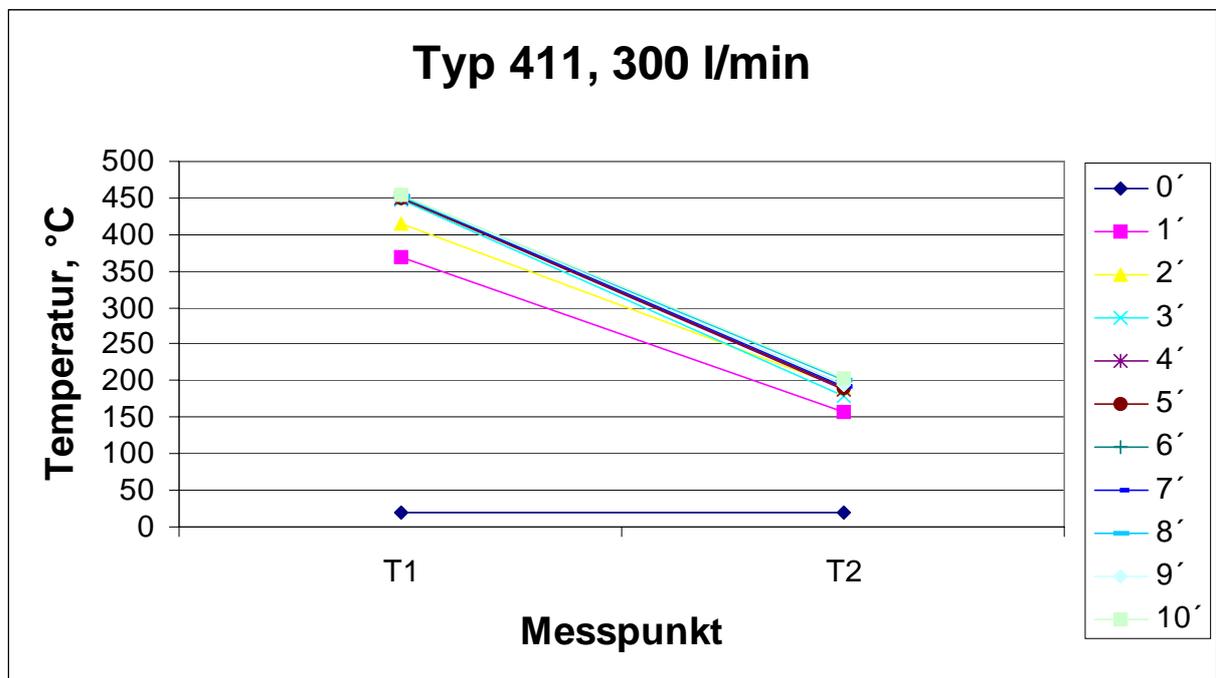


Bild A 80. Temperaturverteilung im Brennerhals Typ 411. Wasserdurchfluss 300 l/min, Schweißstrom 320 A, Spannung 34 V, Einschaltdauer 100%, Abstand zum Werkstück 20 mm, Drahtelektrode G3 Si1,  $\varnothing$ 1,2 mm