

Georg Johann Weber, BSc.

Schweißreparaturen an Glocken

Literaturstudie und Grundlagenuntersuchungen

Masterarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Advanced Materials Science

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am

.....

Unterschrift

Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Firma Grassmayr und dem Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik an der Technischen Universität Graz, wobei ein großer Dank Peter und Johannes Grassmayr für die unkomplizierte Zusammenarbeit und Beratung sowie dem großzügigen Bereitstellen von Probe- und Schweißmaterial gebührt. Ein großer Dank gilt auch meinen Betreuern Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Vallant und Dipl.-Ing. Andreas Hütter die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen Dipl.-Ing. Christopher Wiednig, Dipl.-Ing. Gerald Rath, Dipl.-Ing. Markus Stütz, Dipl.-Ing. Maximilian Stummer, Alexandra Müller sowie bei den Mitarbeitern im Technikum Leander Herbitschek, Gernot Stöfan, Kurt Kerschbaumer, Thomas Friedl, Herbert Penker und Mirjam Benetik, welche mich nicht nur bei meiner praktischen Arbeit toll unterstützt haben, sondern mit denen ich auch viel Spaß hatte und ein freundschaftliches Verhältnis aufbauen konnte.

Die größte Dankbarkeit gilt meiner Familie, meinen Eltern Helene und Johann Weber, meinen Geschwistern Caroline und Lukas Weber sowie meiner Oma Friederike Weber, welche mich in den auch schwierigen Zeiten des Studiums nicht nur finanziell sondern vor allem moralisch unterstützt haben.

Graz, im April 2017

Georg Weber

Kurzfassung

Aus denkmalamtlicher Sicht gilt es den Klang historisch wertvoller Glocken für die Nachwelt zu erhalten. Jedoch ändert sich dieser aufgrund verschiedener Verschleißmechanismen während des Einsatzes. Um Glocken aus Gussbronze (80%Cu / 20%Sn) wieder „läutbar“ zu machen sollten im Rahmen dieser Diplomarbeit verschiedene Schweißverfahren auf ihre Tauglichkeit für die Reparaturschweißung von Glocken untersucht werden. Weiters wurden dabei Untersuchungen auf Änderungen des Ausgangswerkstoffs bezüglich der Mikrostruktur, der Härte, des Spannungszustand, der chemische Zusammensetzung sowie der akustische Eigenschaften nach dem Schweißvorgang sowie der Wärmebehandlung unternommen. Die erzielten Ergebnisse aus dieser Arbeit sollten dabei der Glockengießerei Grassmayr helfen Erfahrungswerte zur Reparaturschweißung von Glocken zu gewinnen und diese in zukünftigen Reparaturschweißungen von Glocken optimal einzusetzen.

Abstract

From the monumental point of view, it is the sound of historically valuable bells for posterity to obtain. However, this varies due to different wear mechanisms during use. In order to restore the original tone quality of a cracked bell made of cast bronze (80%Cu / 20%Sn) different repair welding procedures were investigated with regard to their capability. Further investigations were performed in the heat affected zone and the weld metal, i.e. microstructure, hardness, residual stresses, chemical composition as well as the acoustic characteristic after repair welding and post weld heat treatment. The obtained results from this work should help to build up know-how in bell repair welding at the bell foundry Grassmayr and to perform the procedure themselves.

Inhalt

Eidesstattliche Erklärung	1
Danksagung	2
Kurzfassung.....	3
Abstract	3
1. Einleitung.....	7
2. Literaturstudie.....	8
2.1 Die Geschichte der Firma Grassmayr	8
2.2 Gießprozess.....	9
2.3 Traditionelle Formgebung von Glocken	10
2.4 Reparaturtechniken im Wandel der Zeit.....	11
2.5 Reparaturtechniken von heute	12
2.5.1 Vorbereitungen	12
2.5.2 Reparaturschweißungen bei Fa. Lachenmeyer	13
2.5.3 Reparaturschweißungen bei Koninklijke Eijsbouts.....	13
2.5.4 Reparaturschweißungen bei Bodet.....	14
2.6 Schadensursache von Glocken	15
2.6.1 Materialverschleiß	15
2.6.2 Dauerfestigkeit	15
2.6.3 Verschleiß an Glocken	15
2.6.4 Das Klangverhalten von Glocken bei Schäden	17
2.7 Der Werkstoff Zinnbronze	18
2.7.1 Bronze.....	18
2.7.2 Zustandsschaubild Kupfer-Zinn-Legierungen	18
2.7.3 Wärmebehandlung von Zinnbronzen	19
2.7.4 Mechanische Eigenschaften von Kupfer-Zinn-Gusslegierungen.....	20
2.7.5 Physikalische Eigenschaften von Kupfer-Zinn-Legierungen	22
2.7.6 Thermische Eigenschaften von Kupfer-Zinn-Legierungen	22
2.7.8 Kerbschlagzähigkeit von Kupfer-Zinn-Legierungen	23
2.7.9 Gitteraufbau der Phasen	24
2.7.10 Elastische Eigenschaften	24
2.7.11 Zunderung.....	25
2.8 Schweißen von Kupfer-Zinn-Gusslegierungen.....	25
2.8.1 Geeignete Schweißverfahren zur Reparaturschweißung von Glocken	26
2.8.1.1 Autogenes Schweißen (Gasschmelzschweißen)	26
2.8.1.2 Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)	27

2.8.2.1 Physikalische Vorgänge im Lichtbogen.....	28
2.8.2.2 Schutzgase	29
3 Versuchsaufbau	31
3.1 Gewähltes Temperaturprogramm beim Reparaturschweißen.....	31
3.2 Probeplatten aus Glockenbronze	32
3.3 Schweißzusatz	33
3.4 WIG-Schweißgeräte.....	33
3.5 Glühofen	34
3.6 Heizplatte und Temperaturregler	34
3.7 Temperaturmessung.....	34
3.8 Schweißparameter	35
4 Versuchsdurchführung.....	36
4.1 WIG – Schweißversuche an Probeplatten mit Argon-Schutzgas	36
4.1.1 Schweißversuch 1 an Probeplatte mit Argon-Schutzgas	36
4.1.2 Schweißversuch 2 an Probeplatte mit Argon-Schutzgas	37
4.2 Elektronenstrahlschweißung an Probeplatte.....	38
4.3 WIG – Schweißversuch an Probeplatte mit Helium-Schutzgas.....	39
4.4 Autogenschweißen an Probeplatte	40
4.5 WIG – Schweißversuche an Glocke mit Helium-Schutzgas.....	43
4.5.1 Schweißversuch 1 an Glocke mit Helium-Schutzgas	44
4.5.2 Schweißversuch 2 an Glocke mit Helium-Schutzgas	46
4.6 WIG – Schweißversuche an Probeplatten mit Argon-Helium Mischgasen.....	48
4.6.1 Schweißversuch 1 an Probeplatte mit Argon-Helium Mischgas.....	49
4.6.2 Schweißversuch 2 an Probeplatte mit Argon-Helium Mischgas.....	50
4.10 Finaler Schweißversuch – WIG – Schweißung an Glocke mit Argon-Helium Mischgas.....	52
4.10.1 Klangbestimmung	52
4.10.2 Eigenspannungsmessung.....	52
4.10.3 Schmelzbadsicherung.....	53
4.10.4 Durchführung	54
5 Ergebnisse	56
5.1 Poren- und Schmauchbildung.....	56
5.2 Ergebnisse aus den EDX Untersuchungen.....	57
5.2.1 Grundwerkstoff.....	57
5.2.2 Zunderschicht	58
5.2.3 Schlacke	59

5.2.4 Schmauch	60
5.3 Makroskopische Analyse der Porenhäufigkeit aus den Schweißversuchen....	61
5.3.1 WIG-Schweißung an Probeplatten mit Argon-Schutzgas.....	61
5.3.2 Elektronenstrahlschweißung	62
5.3.3 WIG-Schweißung an Probeplatte mit Helium-Schutzgas	63
5.3.4 Gasschmelzschweißung	63
5.3.5 WIG - Glockenschweißung mit Heliumschutzgas	64
5.3.6 WIG-Schweißung an Probeplatten mit Argon – Helium – Mischgasen	65
5.3.8 Finaler Schweißversuch.....	66
5.4 Mikroskopische Ergebnisse aus den Schweißversuchen.....	66
5.4.1 plattenförmiger Grundwerkstoff	66
5.4.2 WIG-Schweißung an Probeplatte mit Helium- Schutzgas	67
5.4.3 Glocke vor und nach der Schweißung	69
5.4.4 Zunderschichtdicke	71
5.5 Mikrohärtemessung.....	71
5.5.1 WIG-Schweißung an Probeplatte mit Helium- Schutzgas	72
5.5.2 WIG-Schweißung an Glocke mit Argon – Helium Mischgas	72
5.6 Klangbestimmung	74
5.7 Eigenspannungsmessung vor / nach der Glockenschweißung.....	76
6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung	80
7 Ausblick.....	83
8 Abbildungsverzeichnis	84
9 Tabellenverzeichnis	88
10 Gleichungsverzeichnis	88
11 Literaturverzeichnis.....	89
12 Anhang.....	92

1. Einleitung

Glocken erfahren im Laufe ihres Lebens, aufgrund des Einsatzes beim Läuten, Schädigungen welche meist in Form von Rissen und den damit verbundenen Änderungen im Klangbild auftreten. Alte Reparaturtechniken wie z.B. das partielle Ausgießen von Rissen zeigten in der Vergangenheit nur unbefriedigende Ergebnisse und auch ein Umgießen der Glocke erzeugt nur eine optische Kopie des Originals, da jeder Gussteil, bedingt durch den Gieß- und Erstarrungsvorgang, ein Unikat darstellt und somit auch das Klangspektrum einer Glocke einzigartig ist. Modernere Methoden zur Reparaturen von Glocken stellen dabei Schweißungen dar, mit denen entstandene Risse ausgebessert werden und somit der Klang erhalten bleibt.

Die Diplomarbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Glockengießerei Grassmayr aus Innsbruck, wobei verschiedene Schweißverfahren auf ihre Tauglichkeit bezüglich dem Reparaturschweißen von Glocken untersucht wurden. Dies umfasste folgende Arbeitspunkte:

- Literaturrecherche über Zinnbronzen und deren Verhalten beim Schweißen
- Recherchen zum Grundwerkstoff, dessen Eigenschaften und Legierungsbildung sowie Reparaturtechniken und Schadensursachen von Glocken
- Ermittlung des am besten geeigneten Schweißverfahrens bzw. Schweißparameter
- Schweißversuche an Probelplatten mit makroskopischer und mikroskopischer Auswertung sowie Mikrohärtemessungen zur Bestimmung eventueller Härteänderungen
- Untersuchung der auftretenden metallurgischen Effekte (Zunderung, Schlacke- sowie Schmauchbildung) durch die Schweißung von Glockenbronze mittels Elektronenmikroskopie und EDX (Energy-Dispersive-X-Ray)
- Schweißversuche an Glocken
- Untersuchung auf Änderung des Klangverhaltens sowie des Eigenspannungszustandes einer Glocke durch Schweißung und Wärmebehandlung

2. Literaturstudie

2.1 Die Geschichte der Firma Grassmayr

Als Bartlmä Grassmayr welcher nach mehrjähriger Wanderschaft zum Praktizieren, unter anderem beim Aachener Glockengiesser Joan von Treer, nach Habichen im Öztal zurückkehrte, legte er 1599 den Grundstein für das Familienunternehmen Grassmayr. In der nun schon 14. Generation wurde das Fachwissen um das Glockengießen vom Vater auf den Sohn weitergegeben. Mit dem Ausbau der Infrastruktur übersiedelte die Gießerei 1836 nach Straßfried in Innsbruck, wo sie auch noch heute anzutreffen ist. Im Laufe der Jahrhunderte entwickelte sich das Familienunternehmen mit Zweigstellen in Feldkirch und Brixen zur größten Glockengiesserei in der ehemaligen österreichisch-ungarischen Monarchie. Vor der industriellen Revolution war die Firma Grassmayr neben den Glockenguss, in der Lage Druckkessel für Feuerspitzen, Mörser, Kanonen, Bronzetafeln und Kunstguss herzustellen. Mit dem gelebten Firmenmotto „*Tradition ist nicht die Anbetung der Asche, sondern die Weitergabe des Feuers*“ [Zitat von Gustav Mahler] investiert die Glockengiesserei ständig Geld, Zeit und Mühe um die „*Stradivari unter den Glocken*“ zu generieren. So konnte z.B. in Zusammenarbeit mit dem europäischen Glockenprojekt ProBell® die Lebensdauer der Pummerin, durch die richtige Dimensionierung und Tausch des Klöppels wesentlich verlängert werden. Die heutigen Kernkompetenzen liegen nicht nur in der Glockengiesserei sondern auch im Kirchturbereich (Glockenstühle, elektronische Läutmaschinen, Glockencomputer, Kirchturmuhren), im Kunstgussbereich (Bronzetafeln, Klangschalen) sowie im, mit dem österreichischen Museumspreis und Maecenas-Preis ausgezeichneten Museum. Im Jahr 2014 beschäftigte die Glockengiesserei Grassmayr als mittelständisches Unternehmen rund 40 Personen und erwirtschaftete einen Umsatz von ca. 3,1 Millionen Euro [1].

2.2 Gießprozess

Grundsätzlich ist beim Gießprozess von Kupfer-Zinnlegierungen auf die Gasfreiheit der Schmelze zu achten, wobei Sauerstoff und Wasserstoff die Hauptrolle spielen. Der Sauerstoff wird am sichersten durch Zugabe von Phosphor entfernt, wobei gleichzeitig auch der Wasserstoff reduziert wird. In Kupfer-Zinn-Schmelzen wird Phosphor im Überschuss zugegeben um eine einwandfreie Desoxidation des Kupfers zu gewährleisten. Das dabei entstehende Reaktionsprodukt (Phosphorpentoxid) verdampft aus der Schmelze oder liegt als Schlacke vor. Um eine einwandfreie Desoxydation sicherzustellen sollte außerdem ein geringer Restanteil von mehr als 0,01 % an Phosphor in der Schmelze vorhanden bleiben. Ein zu hoher Gasgehalt in der Schmelze wirkt sich ungünstig auf die Porosität und auf das Gefüge des Werkstoffes aus, da beim Erstarren der Schmelze die Gaslöslichkeit sprunghaft abnimmt und die abscheidenden Gasbläschen im Gussstück als Poren eingeschlossen bleiben [2]. Bei der Firma Grassmayr wird als Ausgangsmaterial die Kupfer-Zinn-Legierung G-CuSn 10 (genormt in DIN 1705) mit einem Zinngehalt von 10% verwendet. Um auf die für Glocken üblichen 20% bis 22% an Zinn zu kommen werden Zinnbaren dem genormten Ausgangswerkstoff zulegiert. Die Aufschmelzung der Legierung erfolgt in einem mit Heizöl beheizten Drehofen, wobei die Gießtemperaturen je nach Größe der Glocken zwischen 1100°C und 1150°C liegen. Da es während des Aufschmelzvorgangs zu einer Verarmung an Zinn in der Schmelze kommt, werden vereinzelt Zinnbaren hinzulegiert. Die sich im Drehofen abscheidenden Gase werden mit einem Erlenstamm abgefackelt. Sobald die Legierung die richtige Temperatur aufweist wird diese zuerst in eine Gießpfanne und von dort in den Formkasten gegossen. Die Schmelze wird steigend vergossen wobei die sich ablösenden Gase am Steiger mit einer Gasflamme abgefackelt werden.



Abbildung 1: Glockenguss bei der Firma Grassmayr im August 2015, vorne: Formkasten mit Holzkohle am Steiger, hinten: Vergießen der Glockenbronze wobei brennende Gase aus dem Steiger entweichen

Das überschüssige Material im Steiger dient dazu die Schwindung (Schwindmaß 1,54 % [2]) während der Abkühlung auszugleichen. Um ein vorzeitiges Erstarren der Legierung im Steiger zu verhindern, wird Holzkohle am Austritt des Steigers platziert. Die Kohle sorgt während des Verbrennungsvorgangs für genug Wärme, um die Schmelze an dieser Stelle möglichst lange flüssig zu halten. Nach dem Abkühlvorgang

Diplomarbeit Georg Weber

wird der Guss aus dem Formkasten entnommen und die Oberfläche der Glocke sandgestrahlt.

2.3 Traditionelle Formgebung von Glocken

Zur Formgebung von Glocken wird traditionellerweise das Lehmformverfahren eingesetzt. Eine Weiterentwicklung dieses Verfahrens entwickelte die Firma Grassmayr mit dem „qualitätsorientierten Lehmformverfahren“ (© Peter und Johannes Grassmayr), basierend auf mehreren Ebenen. So wurden z.B. neue Werkzeuge, Computersimulationen, metallurgische Analysen in den Produktionsprozess integriert. Ziel dieses Entwicklungsprozess war es auch „*Den Zierlehm für die Glockenformen so zu entwickeln, dass nach dem Guss die Glocke keiner wesentlichen Nachbearbeitung, z.B. wegen vieler Gussnähte, ruppiger Oberfläche oder „Cellulite“ mehr bedarf*“ [3]. Grundlegend wird zur Glockenherstellung eine dreiteilige Form aus Lehm benötigt. Die Form besteht aus einem Kern, einer falschen Glocke sowie aus dem Mantel. Zur Formgebung von Kern und der falschen Glocke muss zunächst eine Holzschablone angefertigt werden, wobei deren genaue Berechnung vom Schlagton, Gewicht und Größe der Glocke abhängig ist. Dabei greift man noch heute auf Erfahrungswerte aus dem Mittelalter zurück. Die zur Formgebung der Rippe (Glockenwandung) gefertigte Schablone wird nun an eine Spindel geschraubt, wobei diese wiederum drehbar an einem Balkengerüst befestigt wird. Die Rippe muss genau zentriert in der Mitte des Formstandes angebracht werden.



Abbildung 2: Aufbau der Gussform nach dem traditionellen Lehmformverfahren

Anschließend wird eine Lehmschicht an dem Formstand aufgetragen und überschüssiger Lehm mittels der Schablone abgezogen. Die so erhaltene Kernform wird nun mit einem, im Sockel befindlichen, Gasbrenner getrocknet.

Als nächster Schritt folgt die Herstellung der falschen Glocke, welche die genaue Form der später gegossenen Glocke aufweisen soll. Hierzu wird die äußere Kontur in die Schablone geschnitten und diese wieder in den Formstand gesetzt. Nach dem Auftragen einer dünnen Trennschicht wird der Zwischenraum zwischen dem Kern und der Schablone mit Lehm gefüllt und geglättet.

Auf die zwischenzeitlich getrocknete und mit Talg überzogene Modellglocke werden nun die Verzierungen und Inschriften aus Wachs gesetzt. Vor dem Herstellen des Mantels wird noch die Schablone entfernt und zuerst feiner und dann grober Lehm per Hand auf die Modellglocke gestrichen. Die Manteldicke ist dabei ein Erfahrungswert und muss groß genug sein um dem äußeren Druck der während des Einstampfens der Form wirkt und dem inneren Druck (Gießdruck) während des Gießvorgangs standhalten zu können.

Zum Schluss werden die Formteile nochmals beheizt, um die Restfeuchte entweichen zu lassen, wobei gleichzeitig die Trennschichten und die dekorativen Elemente aus Wachs wegschmelzen. Nun kann der Mantel von der Modellglocke abgehoben werden, wobei diese entfernt wird um den Hohlraum für den Guss freizugeben. Die nun zweiteilige Glockenform (Kern und Mantel) wird im Gusskasten fest eingestampft [4].

2.4 Reparaturtechniken im Wandel der Zeit

Aufgrund des mangelnden technischen Verständnisses und fehlender Reparaturtechniken wurden die meisten Glocken früher einfach umgegossen. Dies erschien am einfachsten, da durch das Umgießen eine optisch sehr ähnliche Kopie des Originals entstand. Jedoch entsteht aufgrund der unterschiedlichen Gieß- und Erstarrungsvorgänge immer wieder eine neue Glocke sei sie optisch noch so ähnlich mit dem Original. Dies spiegelt sich, trotz der körperlichen Ähnlichkeit, vor allem im Klang- und Resonanzbild wieder.

Basierend auf alter Fachliteratur aus dem 19. Jahrhundert wird oftmals das Durchgießverfahren dem Schweißen von Rissen und Abtragbereichen vorgezogen. Dabei erfolgt in Sandformen eine langsame Vorwärmung der Glocke auf 300 bis 350°C und in der zweiten Stufe eine Vorwärmung zwischen 800 bis 850°C. Die Schmelze besteht dabei aus der gleichen chemischen Zusammensetzung wie die Glocke und muss mit einem neun- bis zehnfachen Volumen gegenüber des Schadensbereichs zugesetzt werden. Die Schmelze wird im Bereich von 100 bis 150°C überhitzt vergossen.

Nicht zufriedenstellend hingegen waren Versuche, Risse partiell auszugießen oder die Rissränder auszufeilen, um ein Aneinanderschlagen der Rissflächen zu verhindern. Beide Techniken wurden bereits im Mittelalter praktiziert und führten dazu, dass sich das Klangbild merklich veränderte und die Resonanzfähigkeit stark abnahm, welche für die Ausbreitung und Länge des Schalls von großer Bedeutung ist. Diese unbefriedigenden Lösungen führten dazu, dass die Gelehrten und Gießer immer wieder nach Techniken suchten, welche die Glocken wieder „läutbar“ machen konnten.

So wurden auch versucht mittels Aufbohren der Rissenden eine weitere Rissausbreitung zu verhindern oder mittels Klammern und Nieten die Risse zusammenzuhalten. Auch diese Versuche waren nicht von Erfolg gekrönt und waren meist nur eine kurzzeitige Lösung.

Bessere Ergebnisse erzielte die schmelzverschweißte Verklammerung, welche in Glocken an den Rissstellen eingegossen und verlötet wurden. Dieses Verfahren ist schon um 2000 v.Chr. in Ägypten nachweisbar angewendet worden, wobei Bronzeschmuckteile mit Lötzinn bei etwa 250°C verlötet wurden. Die Schmelzschweißung für Glockenreparaturen anzuwenden wurde erstmals im Jahre 1150 von *Theopilus* in seinem Buch „*Schedula diversarum artium*“ beschrieben. Weiters ist bekannt, dass ein gewisser *Pomponius Gauricus* um 1500 aus Florenz, als Lot Messing mit einem Zwölftel Arsen empfiehlt, was vor allem auch die gewünschte Klangannäherung an den Originalton gebracht haben dürfte. Ende des 19. Jahrhunderts nutzten die schwedischen Gießer Ohlson drei Generationen lang eine spezielle Reparaturtechnik, welche vom französischen Glockengießer Durand Chambon verbessert werden konnte. Dabei wurde die Glocke mit der Krone nach unten in die Erde eingegraben und auf 800 – 900°C erwärmt. Anschließend goss man eine auf 1300°C erwärmte Schmelze, in den durch die Vorwärmung ausgedehnten Riss. Dadurch konnten sehr feste Verbindungen erzielt werden, wobei die Gießer eine Haltbarkeit dieser Verbindung und einen Erhalt des Originalklangs von 10 Jahren garantierten [5].

2.5 Reparaturtechniken von heute

Diese sollen nach den Empfehlungen vom Beratungsausschuss für das deutsche Glockenwesen auch schon zum Einsatz kommen, wenn die Schädigung an der stärksten Stelle der Glocke, dem Schlagring, nicht mehr als 10% beträgt und wenn dabei auch noch kein hörbarer Klangverlust zu verzeichnen ist [6]. Dieses Kapitel soll einen Überblick bzw. Vergleich der von heute gängigen Reparaturschweißverfahren geben.

2.5.1 Vorbereitungen

Bevor mit der Reparaturschweißung begonnen werden kann, sollte die chemische Zusammensetzung des Glockenmaterials bestimmt werden, um einen möglichst artgleichen Schweißzusatz herstellen zu können. Dies soll dazu führen, dass die Glocke nach dem Schweißvorgang ein möglichst gleiches Klangbild wie vor der Schweißung aufweist und auch aus denkmalamtlicher Sicht dem Original in der Legierungszusammensetzung ähnelt. Weiters muss der Riss ausgeschliffen werden, wobei darauf zu achten ist das auch kleinere, verästelte Risse nicht übersehen werden. Um diese sichtbar zu machen sollte ein Farbeindringmittel verwendet werden (PT-Prüfverfahren). Wenn der Rissverlauf ein Ausschleifen durch die gesamte Wanddicke der Glocke erfordert, muss eine Hilfskonstruktion verwendet werden, um einzelne Schweißlagen aufbauen zu können und um ein Fortlaufen der Schmelze während des Schweißvorgangs zu verhindern. Dabei empfiehlt es sich geeignete Unterlagen wie Platten aus Eisen, Kupfer oder Formkohle zu verwenden [7].



Abbildung 3: Hilfskonstruktion zur Glockenreparaturschweißung [8]

2.5.2 Reparaturschweißungen bei Fa. Lachenmeyer

Das Glocken-Schweißwerk Lachenmeyer im deutschen Nördlingen schweißte 1924 mit dem Autogen-Schweißverfahren zum ersten Mal einen mit 45 cm langen Längs- und Querrissen versehenen Glockenkörper erfolgreich. Das entwickelte Spezialschweißverfahren eignete sich hierfür sehr gut, wobei die alte Klangstruktur erhalten blieb und die geschweißte Glocke noch heute genutzt werden kann. Neben dem Spezialschweißverfahren wurde zusammen mit Glockensachverständigen ein Wärmebehandlungsverfahren entwickelt, bei dem durch langsame Erwärmung der Glocke auf 400°C die vorhandenen Materialspannungen wieder abgebaut werden können. Es lassen sich körperliche und klangliche Veränderungen durch das Anschlagen des Klöppels mittels Aufschweißen des Schlagringes wieder maßgeblich kompensieren [5]. Das Verfahren zum Erneuern ausgeschlagener Glocken wurde 1953 patentiert und trägt die Patentnummer 891348 [9].

2.5.3 Reparaturschweißungen bei Koninklijke Eijsbouts

Die niederländische Firma Eijsbouts entwickelte ein Reparaturschweißverfahren wobei das Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) zum Einsatz kommt. Dieses Verfahren wurde durch eine Studie „Het lassen van Klokkenbrons. Interne Eindrapportage TH Delft“ des Instituts für Metallkunde an der TU Delft untersucht und vom Reichsdienst für Denkmalpflege in den Niederlanden (RDMZ) anerkannt, wobei empfohlen wird eine Glocke nicht Reparaturschweißen zu lassen, wenn dadurch mehr kulturhistorische Werte verloren gehen als durch die Schweißung gewonnen werden [10]. Vor dem Schweißvorgang wird die Glocke gleichmäßig vorgewärmt, da der kalte Glockenwerkstoff unter den Thermospannungen, welche beim Schweißvorgang entstehen, versagen würde. Hierbei wird die Glockenwandung mit elektrischen Heizelementen versehen und zusätzlich werden thermisch isolierende Decken angebracht, wobei die zu schweißende Stelle freigelassen wird (siehe Abbildung 4). Anschließend wird die langsame Aufwärmung gestartet, wobei die elektrischen Heizelemente computergestützt geregelt, werden um eine homogene Erwärmung der Glocke mit ihren unterschiedlichen Wandstärken zu gewährleisten. Sobald die vorgesehene Temperatur erreicht wurde, kann mit der Reparaturschweißung

begonnen werden. Nach Beendigung der Schweißung wird die Glocke noch eine vorgegebene Zeit auf Temperatur gehalten, um eventuelle Spannungen im Werkstoff abzubauen bevor eine langsame Abkühlung eingeleitet wird. Die Vorwärmtemperatur ist dabei für die Reparatur ein entscheidender Faktor. Einerseits muss die Temperatur hoch genug sein, um Schweißspannungen abbauen zu können, andererseits muss sie tief genug sein, um unerwünschte Formänderungen der Glocke zu verhindern. Ein positiver Nebeneffekt der Wärmebehandlung ist das Auflösen der durch das Anschlagen des Klöppels entstandenen Kaltverfestigung am Schlagring (*Schweißreparaturen an Glocken aus Zinnbronze bei Koninklijke Eijsbouts*) [11].



Abbildung 4: Vorwärmung bei Glockenreparatur; links: elektrische Heizelemente an Glockenwand rechts: thermisch isolierende Decken [11]

2.5.4 Reparaturschweißungen bei Bodet

Aus der Patentschrift aus dem Jahr 1994 mit der Nr. 2703615 geht hervor, dass die französische Firma Bodet beschädigte Glocken in einem Zeitraum von etwa 6 Stunden auf eine Temperatur von 600°C in einem Ofen erwärmt. Um Verformungen und innere Spannungen zu vermeiden, wird die Glocke vorher auf einen Rahmen (Stützkonstruktion) gestellt. Sobald die Temperatur erreicht ist, bedeckt man die Glocke mit einem thermisch isolierenden Mantel (z.B. Steinwolle) und lässt lediglich die zu schweißende Stelle frei. Bei dem zur Reparaturschweißung eingesetzten Verfahren handelt es sich um das MIG-Schweißen (Metall-Inertgas), wobei als Schweißzusatz ein Bronzedraht eingesetzt wird, welcher bezüglich der chemischen Zusammensetzung so nah wie möglich an der Legierung der Glocke liegt. Während der Schweißarbeiten wird die Temperatur ständig kontrolliert, sobald diese unter 450°C fällt, werden die Schweißarbeiten abgebrochen und die Glocke wiederum auf 600°C erwärmt. Sobald der Schweißvorgang beendet ist, erhitzt man die Glocke

neuerlich auf 600°C und lässt sie möglichst langsam (etwa 12 Stunden) im Ofen bis auf Raumtemperatur abkühlen, sodass ein Minimum an Eigenspannungen entsteht [12].

2.6 Schadensursache von Glocken

Die genauen werkstofflichen Mechanismen und Gründe welche zu Schäden bzw. zu Rissen bei Glocken führen, gelten als größtenteils unbekannt. Jedoch dürften die Hauptgründe der Materialverschleiß, -ermüdung, sowie falsche Klöppeldimensionierung und schlechte Lötbedingungen (zu hoher Ausholwinkel, Klöppelbefestigung) sein [13].

2.6.1 Materialverschleiß

Der dynamische Einschlag des Stahlklöppels auf die Bronzeglocke bewirkt eine elasto-plastische Deformation und Änderungen in der Mikrostruktur an der Oberfläche beider Bauteile, wobei der Oberflächenverschleiß am Schlagring der Glocke zu einer Rissbildung und zu deren Fortpflanzung führt. Zusätzlich können sich mikroverschweißte Materialpartikel ablösen und so zu einer erhöhten Oberflächenrauigkeit sowie zu einer Porenbildung an der Oberfläche führen [13].

2.6.2 Dauerfestigkeit

Der Klöppel schlägt kontinuierlich gegen zwei Stellen, wobei es zu einer Deformation des Schlagringes der Glocke kommt. Die beim Läuten erzeugten Töne mit spezifischen Frequenzen sind ein Ergebnis der elastischen Materialverformungsamplituden mit denselben Frequenzen. Somit weisen Glocken eine Materialermüdung auf, welche von den spezifischen Lötbedingungen, der Intensität der Klöppelschläge und den damit verbundenen Deformationen abhängen. Die Dämpfungseigenschaften des Materials führen zu einer Herabsetzung der Spannungsamplituden. Die Dauerfestigkeit bestimmt wie lange die Glocke den auftretenden Belastungsbedingungen ausgesetzt werden kann [13].

2.6.3 Verschleiß an Glocken

Der Verschleiß tritt an der Kontaktfläche zwischen Klöppel und dem Schlagring auf und setzt sich aus den Verschleißmechanismen Adhäsion, Abrasion und Oberflächenzerrüttung zusammen. Zusätzlich sorgt eine Kaltverfestigung für eine lokale Oberflächenversprödung an den Anschlagstellen. Das Ausmaß des Verschleißes ist abhängig vom Glockenmaterial, Klöppelmaterial, den geometrischen Kontaktbedingungen, wie der Position der Kontaktfläche an der Glocke, der Anschlagrichtung des Klöppels und der Klöppelführung, sowie der Intensität der Klöppelschläge. Durch Dauerlötversuche an Glocken, Materialproben sowie FEM-Simulationen konnte der Einfluss des Klöppelmaterials auf die elasto-plastischen Verformungen von Glocken und Klöppel aufgezeigt werden. Bei Klöppeln aus niedrigfestem Stahl ($R_m < 500$ MPa) ist die verbleibende plastische Verformung an der Glocke nach dem Anschlag deutlich geringer als bei höherfestem Stahl ($R_m > 600$ MPa). Dies gilt auch für die beim Klöppelschlag eingebrachten Eigenspannungen in die Glocke (siehe Abbildung 5 und 6).

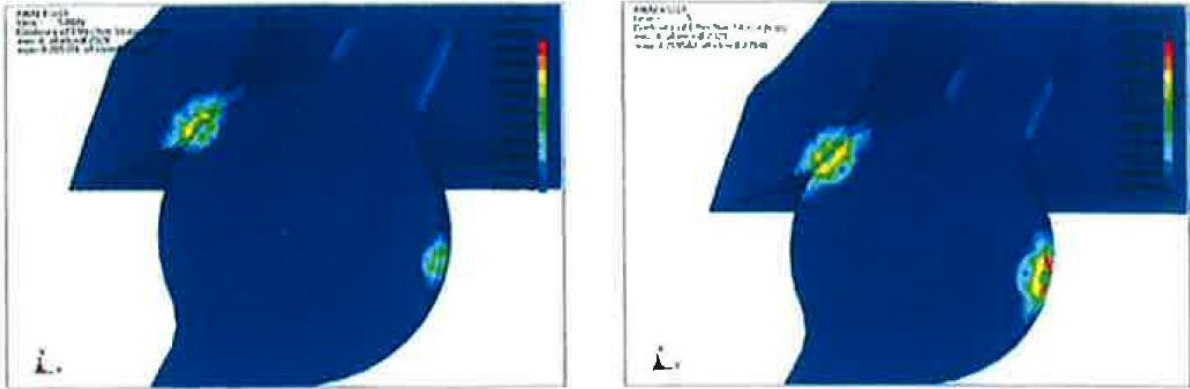


Abbildung 5: FEM-Analyse zeigt verbleibende Eigenspannungen in Wechselwirkungsflächen nach dem 10.Schlag, höher-fester / niedrig-fester Stahl als Klöppelwerkstoff [14]

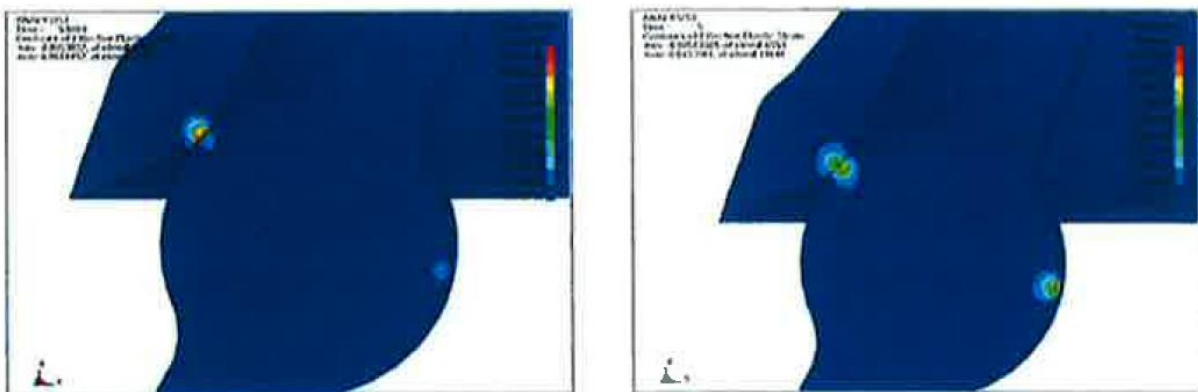


Abbildung 6: FEM-Analyse zeigt effektive plastische Verformung an Wechselwirkungsflächen nach dem 10.Schlag, höher-fester / niedrig-fester Stahl als Klöppelwerkstoff [14]

Das bedeutet also, der niedrigfestere Klöppel passt sich der Kontur der Glocke an, während der höherfestere sich in die Glockenkontur eingräbt. Nachteil des niedrigeren Klöppels ist jedoch die deutlich höhere Anschlagfläche welche zu klatschenden Anschlaggeräuschen und somit zu einer Minderung der Klangqualität führt. Bei Glocken mit hohem Verschleiß sieht man oft, dass entweder der Klöppel seitlich schlecht geführt ist oder die Klöppellänge der Glocke nicht optimal angepasst wurde. Die Ursache des erhöhten Verschleißes ist dabei der Reibvorgang, welcher während des Anschlags auf die Schlagringoberfläche stattfindet. Aufgrund der fehlenden seitlichen Führung kann der Klöppel bei jedem nicht-zentralen Stoß über die Glockenoberfläche rutschen. Durch einen zu lang dimensionierten Klöppel ist die Stoßrichtung nicht senkrecht zur Oberfläche, wodurch zusätzliche Reibung auftritt (Abbildung 7) [14].

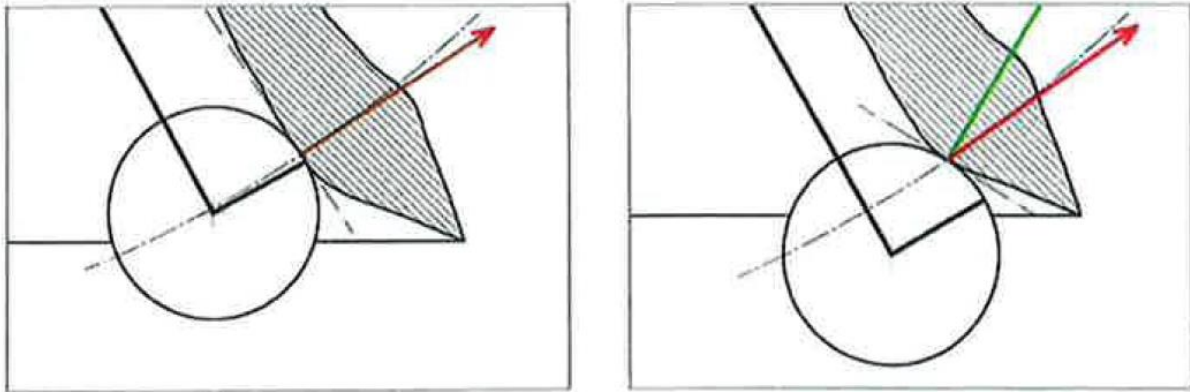


Abbildung 7: unterschiedliche Klöppelanschläge; links: optimale Klöppellänge – Stoßrichtung senkrecht zur Oberfläche; rechts: Klöppel zu lang – erhöht Verschleiß [14]

2.6.4 Das Klangverhalten von Glocken bei Schäden

Durch die seit dem Mittelalter gängigen Glockenformen bedingt, besitzen diese sehr ähnliche Klangbilder, so dass die Eigenformen dieser nahezu identisch sind. Jede Eigenform (innere dynamische Eigenschaft einer frei schwingenden Struktur [15]) bewirkt beim Klöppelschlag eine charakteristische Verformung der Glocke, wobei jede Eigenfrequenz nur an bestimmten Stellen optimal erregt werden kann. Um dies zu gewährleisten, sollte der Klöppel nicht nur an der optimalen Stelle (am Schlagring), sondern auch mit einer Intensität auftreffen, welche die niederfrequenten Teiltöne mit ausreichend hoher Energie anregt.

Man unterscheidet allgemein bei der Veränderung des Glockenklangs zwischen äußeren und inneren Ursachen:

- Die äußeren Ursachen sind dabei die Installation eines neuen Klöppels, die Änderung des Lätewinkels, das Drehen der Glocke etc.
- Die inneren Ursachen hingegen beziehen sich auf die Parameter, welche das schwingfähige mechanische System beeinflussen: die Masse, die Federsteifigkeit und die Dämpfung. Auf die Glocke angewandt sind dies Risse, starker Verschleiß und Materialveränderungen aufgrund von Reparaturschweißungen.

Die äußeren Ursachen beeinflussen die Anregung des Systems und bewirken vor allem, dass die verschiedenen Eigenfrequenzen mit veränderter Intensität zu schwingen angeregt werden und sich somit das Lautstärkenverhältnis zwischen den Teiltönen der Glocke verschiebt, jedoch nicht die Tonhöhe der Teiltöne. Die inneren Ursachen führen dagegen zu nachhaltigen und teilweise irreversiblen Schädigungen des Klangverhaltens, wie etwa der Verschiebung, der Aufteilung und dem Verschwinden einzelner oder mehrerer Eigenfrequenzen und der Zunahme der Dämpfung des gesamten Systems oder einzelner Frequenzen. Dies konnte an Glocken mit Rissen beobachtet werden und ist in Abbildung 8 exemplarisch durch einen Dauerläuttest einer Glocke bis zum Riss dargestellt [14].

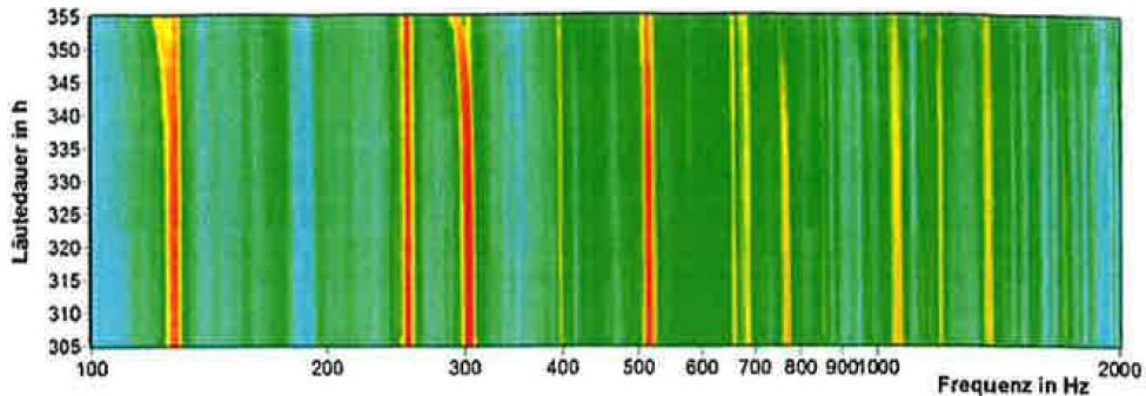


Abbildung 8: Wasserfalldiagramm des Frequenzspektrums einer Glocke während des Dauerläuttests bis zum Ermüdungsris (Verschiebung, Aufteilung und Dämpfung einzelner Frequenzen ab 345 Std.)

Ordinate: Läutedauer in h, Abszisse: Frequenz in Hz [14]

2.7 Der Werkstoff Zinnbronze

2.7.1 Bronze

„ Als Bronze bezeichnet man Kupferlegierungen mit mehr als 60% Kupfer, die Zusätze von einem oder mehreren Elementen enthalten, von denen das wichtigste nicht Zink sein darf “ [16]

2.7.2 Zustandsschaubild Kupfer-Zinn-Legierungen

Kupfer-Zinn-Legierungen weisen einen großen Erstarrungsbereich auf und neigen daher zu Seigerungen. Außerdem verläuft die Einstellung des Phasengleichgewichts äußerst träge, sodass eine in der Technik übliche Wärmebehandlung kaum zur Ausbildung des Gleichgewichts führt. Weiters erweist sich eine metallografische Identifizierung der einzelnen Phasen aufgrund ihrer Ähnlichkeit als schwierig.

Die α -Mischkristalle im kupferreichen Bereich des Zustandsschaubilds (siehe Abbildung 9, linke Seite) zeigen eine beschränkte Löslichkeit des Zinns, wobei diese stark temperaturabhängig ist. Dies führt zu einer Ausscheidungsfähigkeit der Kupfer-Zinn-Legierung. In der Technik wird dies jedoch nicht genutzt da aufgrund der Diffusionsträgheit starke Kaltverformungen und mehrtägige Glühbehandlungen notwendig sind. Im anwendungstechnischen Bereich bis etwa 22% Zinn findet bei 798°C eine peritektische ($S+\alpha$ in $\alpha+\beta$) und bei 586°C eine eutektoid ($\alpha+\beta$ in $\alpha+\gamma$) Umwandlung statt. Der γ -Kristall zerfällt bei 520°C eutektoid in $\alpha + \delta$ und die δ -Phase wandelt sich ihrerseits bei 350°C wiederum eutektoid in $\alpha + \epsilon$ um. Diese Umwandlungen verlaufen äußerst träge, sodass technische Legierungen selbst bei langsamer Abkühlung im Endzustand ein $\alpha + \delta$ – Eutektoid aufweisen [2].

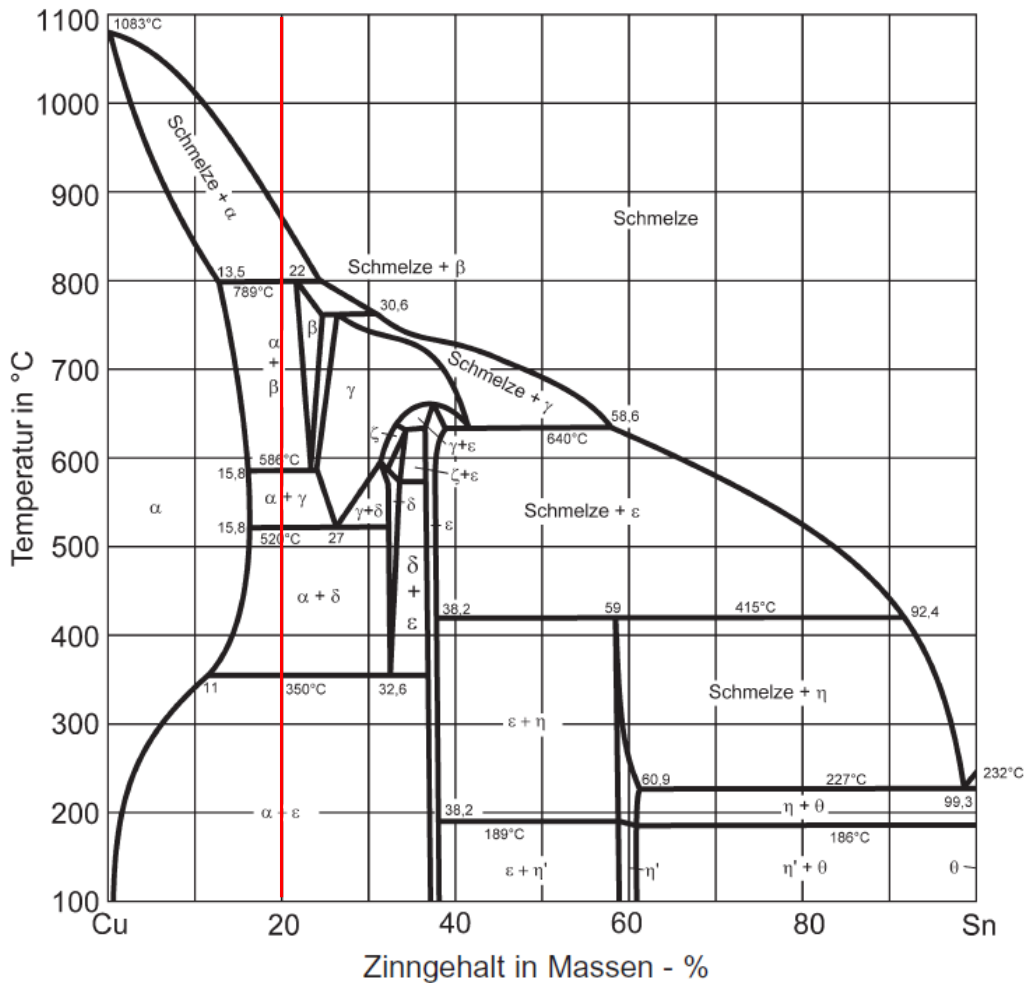


Abbildung 9: Zustandsschaubild des Systems Kupfer-Zinn, rote Linie zeigt die Legierungsbildung von Glockenbronze (80% Cu – 20% Sn) während der Abkühlung [17]

2.7.3 Wärmebehandlung von Zinnbronzen

Aufgrund der geringen Diffusionsgeschwindigkeit des Zinns im Kupfer und der relativ niedrigen Temperaturen, bei der Phasenumwandlungen stattfinden, stellen sich Gleichgewichte technischer Kupfer-Zinn-Legierungen bei Wärmebehandlungen, entsprechend dem Zustandsdiagramm, nicht oder nur unvollständig ein. So löst sich der α -Mischkristall für Zinn unter 520°C nur nach langen Glühzeiten und bei starker Kaltverformung. Auch der eutektoide Zerfall der δ -Phase ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$) bei circa 350°C in α -Mischkristall und ϵ -Phase (Cu_3Sn) erfolgt sehr träge. Für technische Belange gilt daher die δ -Phase bis zur Raumtemperatur als stabil. α -Mischkristalle sind verformungsfähig, während die δ -Phase dagegen als hart, spröde und schlecht mechanisch bearbeitbar gilt (Konzentrationsausgleich unter Umständen durch Diffusionsglühen).

Bei zweiphasigen warmgewalzten oder im Gusszustand vorliegenden Legierungen mit mehr als 8% Sn finden Kristallseigerungen statt. Die mechanischen Eigenschaften der Schweißnähte entsprechen denen des Grundwerkstoffs im Gusszustand. Bei Zinngehalt über 12% und größeren Wanddicken werden Schweißnähte unter Umständen gehämmert, um durch Kornverfeinerung und Abbau von Zugeigenspannungen (entstehen durch die Schrumpfung beim Erstarren des Schweißbades) rissfreie Nähte mit ausreichend großer Umformbarkeit zu erzielen.

Kupfer-Zinn-Legierungen haben nur geringe Warmfestigkeit und ab 200°C fallen Zugfestigkeit, Härte und Dehnung stark ab (vergleiche mit [37]). Das muss bei höheren Betriebstemperaturen sowie beim Glühen, Schweißen und Löten berücksichtigt werden.

Oberhalb von 300°C gelten Knet- und Gusswerkstoffe praktisch als unbrauchbar. Bei Zinnbronze angewendete Wärmebehandlungen dienen dem Entspannen oder Weichglühen, vor allem bei vorausgegangener Kaltumformung. Vor dem Kaltumformen beseitigt mehrstündiges Homogenisierungsglühen bei ungefähr 700°C den ursprünglich inhomogenen Gusszustand der Knetwerkstoffe. Bei Gusslegierungen mit Zinngehalten von ungefähr 20% besteht durch Abschrecken von 650°C und Anlassen auf 300°C die Möglichkeit einer Ausscheidungshärtung [19].

Die Wärmebehandlung bei Zinnbronzen mit einem einphasigen α -Gefüge bewirkt nur geringe Eigenschaftsänderungen des Werkstoffs. Bildet sich hingegen ein $\alpha+\delta$ -Eutektoid in der Legierung aus, kann man durch Glühen den δ -Anteil auflösen. Dadurch kann man die Dehnung bzw. die Zugfestigkeit bei Gusslegierungen steigern (Glühtemperatur 650°C). Dagegen ist ein Auflösen der δ -Phase bei Gusswerkstoffen, welche einen hohen Verschleißwiderstand aufweisen sollen, unerwünscht, da dieser auf dem verschleißfesten $\alpha+\delta$ -Eutektoid beruht. In der Technik findet eine Wärmebehandlung von Kupfer-Zinn-Legierungen selten Anwendung. Eine Ausnahme bildet hier das Spannungsarmglühen, um vorhandene Spannungsspitzen abzubauen. Dies findet in der Regel in einem Temperaturbereich von 200°C bis 450°C statt (vorzugsweise bei 260°C) [17]. So wird in der Literatur für das Spannungsarmglühen bei Bronze-Gusswerkstoffen ein Temperaturbereich zwischen 200°C – 400°C und bei großen Bauteilen eine Glühdauer von 1-3 Stunden empfohlen [22] (vergleiche Kapitel 3.1 Gewähltes Temperaturprogramm beim Reparaturschweißen).

2.7.4 Mechanische Eigenschaften von Kupfer-Zinn-Gusslegierungen

Diese sind sehr stark von den Erstarrungs- und Abkühlgeschwindigkeit und dem damit verbundenen Gießprozess abhängig. Dies kann man damit erklären, dass Kupfer-Zinn-Gusslegierungen während der Erstarrung bei unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten dazu tendieren in metastabile Phasen überzugehen und diese beizubehalten. Der Verlauf der Abkühlgeschwindigkeit und damit der Gießprozess, ist hier der ausschlaggebende Faktor zur Ausbildung des Gefügeanteils des ($\alpha + \delta$) – Eutektoids (siehe Abbildung 10).

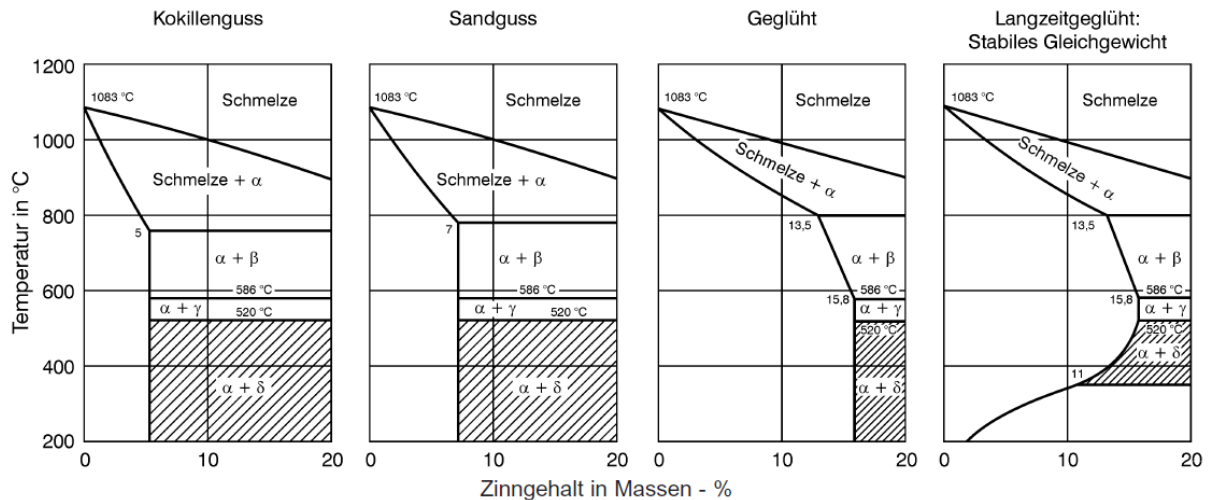


Abbildung 10: Zustandsschaubilder einer Kupfer-Zinn-Legierung abhängig vom Gießverfahren und den Abkühlbedingungen [17]

Im Zusammenhang mit dem Gefügeanteil und dem Zinngehalt stehen die mechanischen Eigenschaften, wie die Zugfestigkeit R_m , 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$, Härte sowie die Bruchdehnung (siehe Abbildung 11).

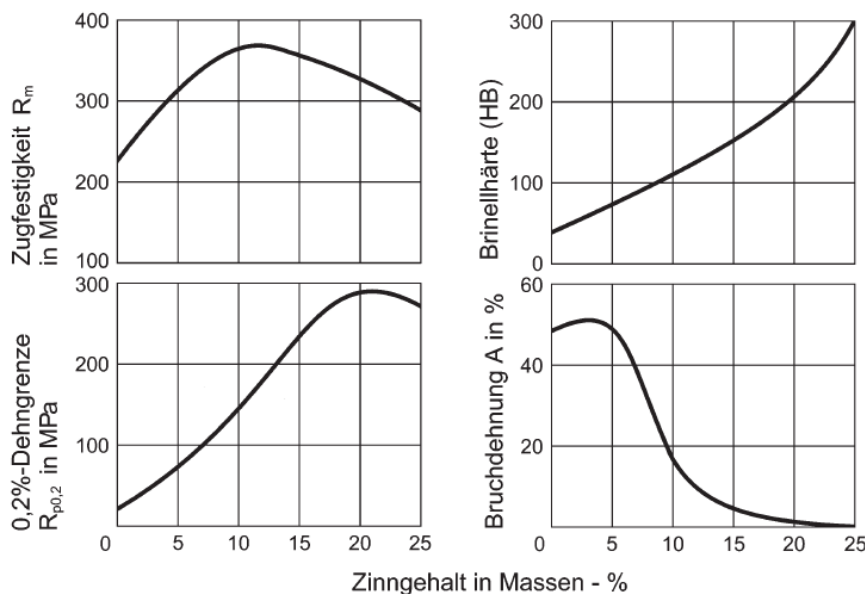


Abbildung 11: Zugfestigkeit, Dehngrenze, Härte sowie Bruchdehnung von Kupfer-Zinn-Legierungen bei Raumtemperatur (Kokillenguss) [17]

Die besten Festigkeitseigenschaften weisen hierbei Kupfer-Zinn-Legierungen auf die in Kokillen vergossen wurden und einen Zinnanteil von 9-13% aufweisen (siehe Abbildung 11 - Zugfestigkeit). Die Härte steigt mit zunehmenden Zinnanteil kontinuierlich an und die 0,2%-Dehngrenze erreicht ihr Maximum bei 20%.

Die Bruchdehnung steigt zunächst mit dem Gehalt an Zinn leicht an, sinkt jedoch auf Grund des δ -Anteils (entspricht der intermetallischen Phase $Cu_{31}Sn_8$) wieder mit steigendem Zinnanteil [17]. Die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften eines untersuchten Glockenmaterials sind in Tabelle 1 bzw. Tabelle 2 dargestellt.

Chemische Zusammensetzung			
Cu [w%]	Sn [w%]	Ni [w%]	Pb [w%]
78,4	20,6	0,11	0,22

Tabelle 1: chemische Zusammensetzung eines untersuchten Glockenmaterials [13]

Mechanische Eigenschaften				
Dichte ρ [kg/dm ³]	E-Modul E [MPa]	Zugfestigkeit R_m [MPa]	Mikro-Härte [HV10]	
			α	$\alpha + \delta$
8,4	98600 \pm 720	126 \pm 18	107 \pm 3,6	321 \pm 46

Tabelle 2: mechanische Eigenschaften eines untersuchten Glockenmaterials [13]

2.7.5 Physikalische Eigenschaften von Kupfer-Zinn-Legierungen

Die rötliche Farbe des Kupfers ändert sich mit zunehmenden Zinngehalt von braunroten, gelbroten bis hin zu gelben und grünlichgelben Farbtönen. Bei Glockenbronze - also bei ca. 20% Sn im Bereich der ϵ -Phase - weist der Werkstoff eine silberweiße Farbe auf und hat im polierten Zustand ein hohes Reflektionsvermögen. Bei binären Kupfer-Zinnlegierungen wird die Dichte durch Zinnzugabe nur geringfügig geändert, ebenso verhält es sich bei der Zugabe von Zink. Durch Bleizusätze erhöht sich die Dichte entsprechend dem spezifischen Gewicht des Bleis. Mit zunehmendem Gefügeanteil der δ -Phase nimmt das Dämpfungsverhalten der Zinnbronze ab. So haben Glockenbronzen bewusst nur eine sehr geringe Dämpfung [17].

2.7.6 Thermische Eigenschaften von Kupfer-Zinn-Legierungen

Mit zunehmendem Zinngehalt nimmt die thermische Leitfähigkeit von binären Kupfer-Zinn-Gusslegierungen stark ab. Bei nur 2% Zinn ist die Wärmeleitfähigkeit gegenüber reinem Kupfer nur mehr zirka halb so groß. Die Abhängigkeit der thermischen Leitfähigkeit vom Zinngehalt bei 20°C bzw. 200°C ist in Abbildung 12 dargestellt.

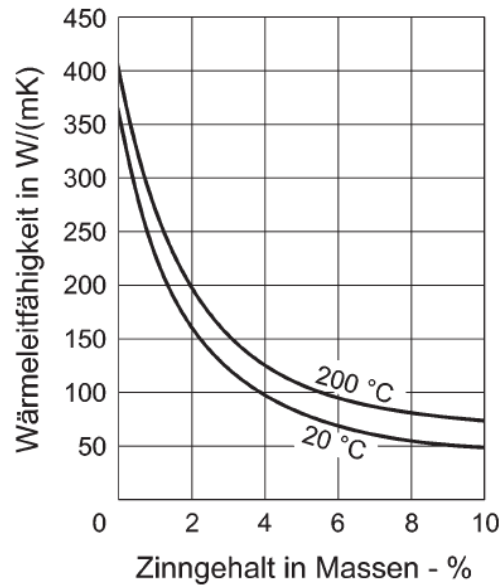


Abbildung 12: Wärmeleitfähigkeit von binären Kupfer-Zinn-Legierungen in Abhängigkeit vom Zinngehalt [17]

Bei reinem Kupfer ist die thermische Wärmeleitfähigkeit nahezu unabhängig von der Temperatur. Wohingegen die Leitfähigkeit von Kupfer-Zinn-Gusslegierungen mit zunehmender Temperatur steigt. Der Wärmeausdehnungskoeffizient α nimmt mit dem Zinngehalt ebenfalls zu (reines Kupfer $\alpha=17 \cdot 10^{-6}/K$ / Kupfer-Zinn-Legierungen $\alpha=18,5 \cdot 10^{-6}/K$). Die benötigte Wärmeenergie zum Schmelzen von zinnhaltigen Kupfer-Gusslegierungen beträgt in etwa 284 Joule/Gramm und die Wärmekapazität liegt bei 0,377 Joule/Gramm*Kelvin [17].

2.7.8 Kerbschlagzähigkeit von Kupfer-Zinn-Legierungen

Da es sich bei Zinnbronzen um Metalle mit kubisch-flächenzentrierten Raumgitter handelt ist die Prüfung der Kerbschlagzähigkeit über die Temperatur irrelevant. Jedoch hat der Zinngehalt in diesen Gusslegierungen einen großen Einfluss auf die Kerbschlagzähigkeit (siehe Abbildung 13).

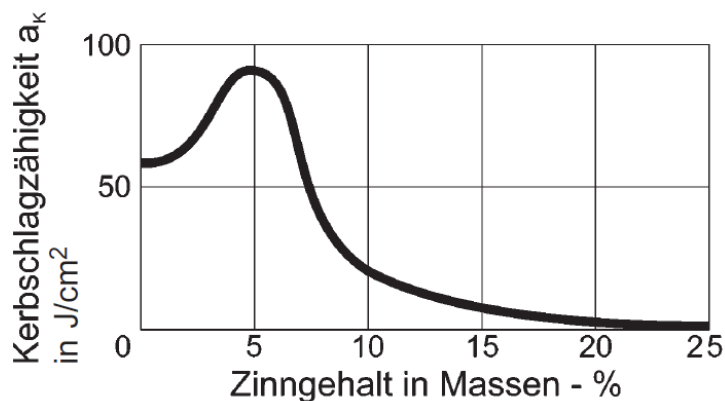


Abbildung 13: Abhängigkeit der Kerbschlagzähigkeit vom Zinngehalt (Izodproben-Kokillenguss) [17]

Zunächst steigt die Kerbschlagzähigkeit mit zunehmenden Zinngehalt (bis etwa 5%) stark an und nimmt anschließend wiederum stark ab. Auch die Abkühlbedingungen haben großen Einfluss auf die Kerbschlagzähigkeit. So kann eine langsame Abkühlung das Bronzegussgefüge soweit homogenisieren, dass dieses eine drei- bis vierfach höhere Kerbschlagzähigkeit aufweist als ein Gefüge welches unter Kokillenguss zustande kommt [17].

2.7.9 Gitteraufbau der Phasen

Die α -Mischkristalle weisen ein kubisch-flächenzentriertes Gitter auf, wobei sich durch den Einbau von Zinnatomen die Gitterkonstante ändert. Die β - und γ -Phasen sind kubisch-raumzentriert und gehören zum Strukturtyp A2, wobei sich die beiden dadurch unterscheiden, dass sich im β -Kristall die Brillouin-Zonen überlappen. Der δ -Kristall weist eine γ -Messingstruktur auf und gehört zum Typ D 8₂. Dies entspricht der intermetallischen Verbindung $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ mit 416 Atomen in der Elementarzelle. Einen orthorhombischen Gitteraufbau besitzt die ε -Phase (Cu_3Sn) mit 64 Atomen in der Elementarzelle, welche nach der hexagonal-dichtesten Kugelpackung angeordnet sind [2].

2.7.10 Elastische Eigenschaften

Der Elastizitätsmodul von Zinnbronze ist sehr stark vom Gefüge abhängig, wobei im Bereich der α -Mischkristalle der E-Modul mit zunehmenden Zinngehalt sehr stark abnimmt. Hingegen weist die δ -Phase mit rund. 135 000 MPa ein Maximum auf (siehe Abbildung 14).

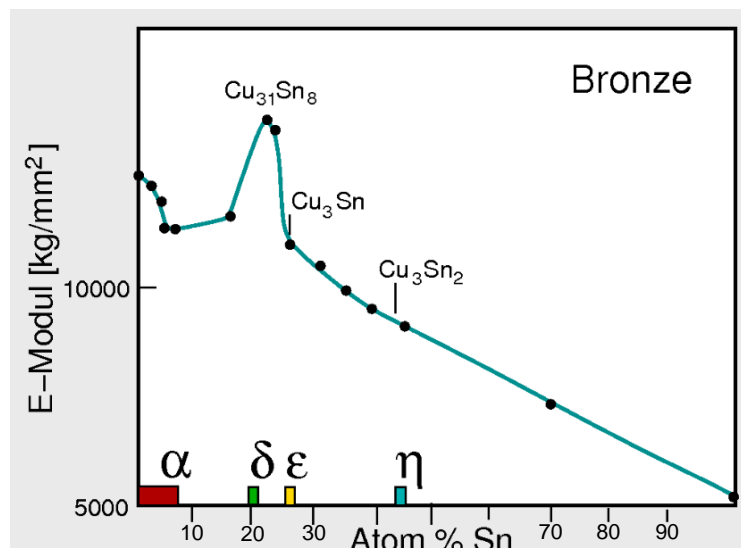


Abbildung 14: E-Modul in Abhängigkeit vom Zinngehalt [18]

Je nach Mengenanteil der δ -Phase kann dieses System sehr unterschiedliche Werte annehmen. Die Dämpfungseigenschaften nehmen bei Kupfer-Zinn-Legierungen im Bereich der α -Phase mit zunehmender Kaltverfestigung (z.B. durch Klöppelschläge) sowie mit steigendem δ -Phasenanteil ab. Legierungen im Bereich zwischen 20-25 % an Zinn (Glockenbronze) weisen hierbei ein Dämpfungsminimum auf. Dabei wird das Klangbild einer Glocke durch die Frequenz, die Dämpfung und die Amplitude der

Diplomarbeit Georg Weber

Teiltöne, die in großer Anzahl beim Schwingen der Glocke auftreten, bestimmt. Der Wohlklang des Glockentones hängt entscheidend von der Dämpfung der Teiltöne und damit von der Größe der Glocke und den elastischen Eigenschaften des Metalls ab [2].

2.7.11 Zunderung

Durch den Einfluss heißer Gase, z.B. Luft, kommt es bei Legierungen mit niedrigem Zinngehalt zur Ausbildung einer Zunderschicht, wobei diese etwas stärker ausgeprägt ist als bei reinem Kupfer. Oberhalb von 350°C setzt bereits starke Zunderbildung ein [19].

Bei höheren Zinngehalt wird vor allem die δ -Phase vom Sauerstoff angegriffen, wobei sich die gebildete Oxidschicht besonders stark mit Zinn anreichert, welches als Zinndioxid vorliegt. Die darunter liegende Mischkristallschicht verarmt dabei an Zinn, da der diffundierende Sauerstoff das Zinn gleichfalls in Form von Zinndioxid bindet (innere Oxidationsschicht) [2].

2.8 Schweißen von Kupfer-Zinn-Gusslegierungen

Beim Schweißen von Kupfer-Zinn-Legierungen kommt hauptsächlich das Lichtbogenschweißen zum Einsatz. Das Gasschmelzschweißen (Autogenschweißen) hat sich nicht durchgesetzt, da die Schweißnähte aufgrund von Gasaufnahme porös werden. Kann eine solche jedoch nicht umgangen werden, so sollte die Gasflamme leicht oxidierend eingestellt werden, um eine zusätzliche Wasserstoffaufnahme zu vermeiden.

Durch Hämmern der Schweißnaht bei Raumtemperatur kann ein dichteres Gefüge und eine Beseitigung von Zugeigenspannungen erzielt werden.

Bei der Reparaturschweißung von Bronzegussteilen bzw. Glockenbronze müssen die Werkstücke vorgewärmt werden, wobei jedoch zu beachten ist, dass die Festigkeitseigenschaften von Kupfer-Zinn-Legierungen bei Temperaturen über 300°C sehr stark abnehmen und deshalb bei der Anwendung von höheren Vorwärmtemperaturen die zu verschweißenden Bauteile gut abgestützt werden müssen, da sich sonst leicht Risse aufgrund des Eigengewichts bilden können (vergleiche mit [37]). Aufgrund der hohen Temperaturen im Lichtbogen und der geringen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer-Zinn-Legierungen müssen Werkstücke mit Wanddicken unter 10 mm nicht unbedingt vorgewärmt werden [2].

Bleihaltige Kupfer-Zinn-Legierungen lassen sich nur sehr schlecht verschweißen, da Blei bereits oberhalb des Schmelzpunktes einen nennenswerten Dampfdruck aufweist und dadurch poröse Schweißnähte entstehen.

Für die Schweißung größerer Teile hat sich hauptsächlich das Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG) durchgesetzt. Dabei sollte mit Gleichstrom gearbeitet werden, wobei die Stromstärke nicht zu hoch eingestellt werden soll und der Lichtbogen kurz gehalten werden muss.

2.8.1 Geeignete Schweißverfahren zur Reparaturschweißung von Glocken

Bronzegusslegierungen mit einem Anteil von mehr als 2% Blei gelten nur als bedingt schweißbar. Reparaturschweißungen sind prinzipiell möglich, wenn Vorkehrungen zur Vermeidung von Überhitzung und der Minimierung von Eigenspannungen getroffen werden. Aus der Literatur [17] bzw. aus der Praxis werden folgende Schweißverfahren zur Reparaturschweißung von Glocken beschrieben, wobei aus akustischer und aus denkmalamtlicher Sicht gilt, einen möglichst artgleichen Schweißzusatzwerkstoff (Glockenbronze – 80%Cu / 20%Sn) zu verwenden:

- Gasschmelzschweißen (Autogenschweißen) mit artgleichen Zusatzwerkstoff.
- Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) mit artgleichen Schweißstäben.
Eine Vorwärmung von plattenförmigen Werkstücken mit einer Wandstärke von unter 10 mm ist nicht erforderlich. Bei größeren Wandstärken sollte eine Vorwärmung durchgeführt werden, es kann aber trotzdem noch zu großen Schwierigkeiten (Rissen) kommen.
- Metall-Inertgasschweißen (MIG), wobei die Möglichkeit einen artgleichen Schweißdraht zu verwenden ausfällt, da man hierfür nur einen genormten Werkstoff verwenden kann, der sich auf eine Drahtspule aufwickeln lässt. Ein genormter Werkstoff, welcher dem artgleichen von der chemischen Zusammensetzung am nächsten kommt wäre CuSn12P (Werkstoffnummer 2.1056 – 88%Cu / 12%Sn).

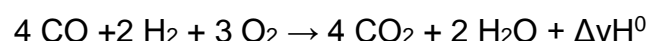
2.8.1.1 Autogenes Schweißen (Gasschmelzschweißen)

Beim autogenen Schweißen wird die thermische Wirkenergie durch Verbrennung aus chemisch gebundener Energie freigesetzt. Das wichtigste Brenngas in der Autogentechnik ist dabei Acetylen (C_2H_2). Dieses reagiert bei einer unvollständigen Verbrennung mit Sauerstoff (O_2) zu Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2) (siehe Gleichung 1).



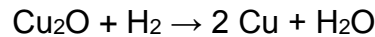
Gleichung 1: Verbrennung von Acetylen mit Sauerstoff in der ersten Verbrennungsstufe [20]

In der zweiten Verbrennungsstufe werden die Reaktionsprodukte aus der ersten Stufe vollständig zu Kohlendioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O) oxidiert (siehe Gleichung 2).



Gleichung 2: Vollständige Verbrennung der Reaktionsprodukte aus Gleichung 1 [20]

Wie im Kapitel 2.8 Schweißen von Kupfer-Zinn-Gusslegierungen erwähnt, sollte beim Autogenschweißen dieser Legierungen die Flamme auf leicht oxidierend eingestellt werden (Reaktionsgleichung 2), da Kupferlegierungen zur Wasserstoffkrankheit neigen. Dabei reagiert atomarer Wasserstoff (H_2) mit Kupfer(II)-oxid (Cu_2O) welches in ungelöster Form in der Legierung enthalten ist.



Gleichung 3: Reaktionsverlauf der Wasserstoffkrankheit [20]

Der dabei entstehende Wasserdampf (H_2O) ist im Kupfer nicht löslich und nimmt erhebliches Volumen ein, wobei es an den Reaktionsstellen infolge der hohen Gasdrücke zu Gefügetrennungen, meist an den Korngrenzen, kommt [2].

Beim Autogenschweißen mit leicht oxidierender Flamme kann es wiederum zur verstärkten Bildung von Poren und Oxideinschlüssen kommen, wobei Letztere die Verformungsfähigkeit der Schweißverbindung und deren Verhalten bei Schwingbeanspruchung oder schlagartiger Beanspruchung negativ beeinflussen. Jedoch kann mit einem gezielten Sauerstoffüberschuss bei Kupfer- Zink-Legierungen (Messing) geschweißt werden. Dabei wirkt der Sauerstoffanteil der Porenbildung entgegen, da das Ausdampfen von Zink aus dem Grundwerkstoff verhindert wird [20].

2.8.1.2 Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)

„Das Wolfram-Inertgasschweißen ist ein Schmelzschweißverfahren mit frei brennendem Lichtbogen zwischen einer nicht abschmelzenden Elektrode und dem Werkstück. Die Wärme des Lichtbogens wird zum Aufschmelzen des Grund- und Zusatzwerkstoffs genutzt. Zusätzlich wird dem Schweißprozess ständig Schutzgas zugeführt. Es kann mit oder ohne Zusatzwerkstoff gearbeitet werden“ [20]

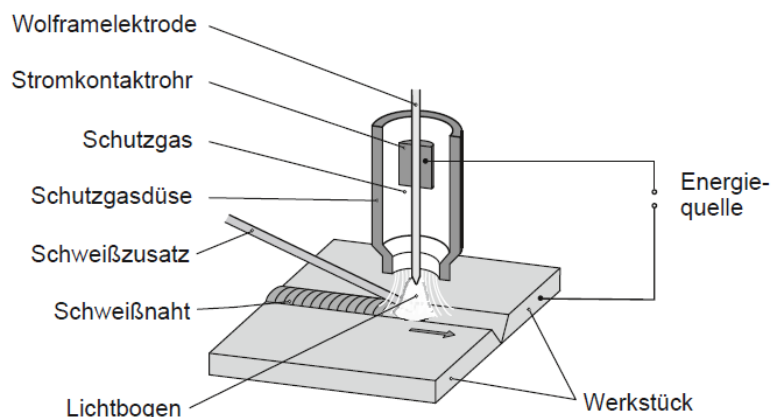


Abbildung 15: Grundsätzlicher Aufbau des WIG-Schweißverfahrens [20]

Zusatzwerkstoff und Lichtbogen werden bei diesem Verfahren dem Prozess getrennt zugeführt. Die Elektrode weist die Form eines runden Stabs mit einer kegelig angeschliffenen Spitze auf und besteht zum Großteil aus dem hochschmelzenden Metall Wolfram, welches mit verschiedenen Zusatzelementen dotiert ist [20].

Dieses Schweißverfahren wird bei Kupferwerkstoffen meist unter Verwendung von Gleichstrom und negativ gepolter Elektrode eingesetzt. Der Zündvorgang beim WIG-Schweißen wird mittels einer Hochspannungsanregung eingeleitet, da ein Aufsetzen der Elektrode zu deren Verunreinigung und damit zu einer verschlechterten Lichtbogenzündung führen würde [21].

2.8.2.1 Physikalische Vorgänge im Lichtbogen

Der beim WIG-Schweißen entstehende Lichtbogen ist eine spezielle Form der Gasentladung, wobei zwischen zwei Elektroden elektrischer Strom über ein gasförmiges Medium fließt. Voraussetzung zur Entladung ist die Anwesenheit einer ausreichenden Dichte freier Ladungsträger im Gas sowie eine Potentialdifferenz zwischen den Elektroden. Bei Raumtemperatur liegen Gase im molekularen bzw. Inertgase im atomaren Zustand vor. Um eine elektrische Leitfähigkeit der Gase zu gewinnen, muss so viel Energie zugeführt werden, dass die Valenzelektronen den Atomverbund verlassen können. Aufgrund des Verlusts von Elektronen wird das Atom positiv geladen und liegt als Ion vor (siehe Abbildung 16).

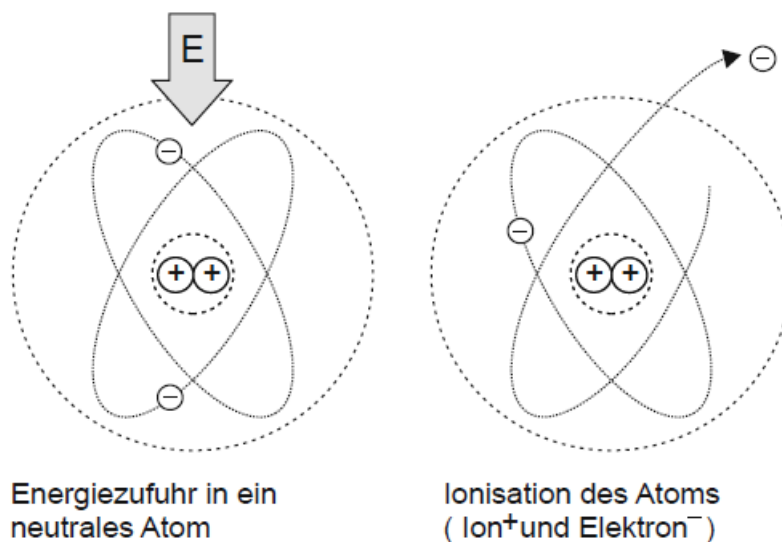


Abbildung 16: Ionisationsvorgang eines Heliumatoms [20]

Die zur Dissoziation von Molekülen bzw. zur Ionisation von Atomen notwendige Energie ist eine stoffspezifische Größe (siehe Tabelle 3). Bei Schweißlichtbögen wird die nötige Energiemenge hauptsächlich durch hohe Temperaturen aufgebracht und wird deshalb auch als thermisches Plasma bezeichnet. Beim WIG-Schweißen können dabei mittlere Lichtbogentemperaturen zwischen 4000 bis 10000 Kelvin entstehen [20]. Im elektrischen Feld werden die freien Ladungsträger zwischen den Elektroden beschleunigt. Die Elektronen in Richtung Anode und die Ionen in Richtung Kathode, wobei für den Strom nahezu ausschließlich die Elektronen, aufgrund ihrer geringeren Masse und damit höheren Geschwindigkeit, verantwortlich sind. Auf ihren Weg zur Anode stoßen die freien Ladungsträger dabei mit weiteren Gasatomen zusammen, wobei durch die Aufprallenergie weitere Elektronen lawinenartig freigesetzt werden. Dieser Vorgang wird als Stoßionisation bezeichnet [20].

Element	Dissoziationsenergie [eV]	Ionisationsenergie [eV]
CO ₂	4,30	14,40
O ₂	5,14	13,62
H ₂	4,52	13,60
N ₂	9,78	14,53
Ar		15,76
He		24,59

Tabelle 3: Dissoziationsenergien und Ionisationsenergien verschiedener Gase [20]

2.8.2.2 Schutzgase

Schutzgase erfüllen im Wesentlichen zwei Funktionen:

1. Sie dienen als Trägergas für die Ionisationsvorgänge im Lichtbogen
2. Sollen die Elektrode und das Schmelzbad vor der Umgebungsatmosphäre und vor unerwünschten chemischen Reaktionen schützen

Dabei lassen sich durch die gezielte Auswahl von Schutzgasen die Lichtbogen- und Prozesseigenschaften gezielt beeinflussen sowie bestimmte chemische Reaktionen mit dem Schmelzbad erzielen [20].

Die Wahl des Schutzgases für die schweißtechnische Verarbeitung spielt also eine große Rolle. Helium weist im Vergleich mit Argon eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit auf und benötigt eine höhere Lichtbogenspannung für die notwendige Ionisierungsenergie. Es entsteht daher beim Schweißen mit Helium, im Vergleich zu reinem Argon, ein heißeres Schmelzbad mit geringerer Viskosität und einem tieferen, gleichmäßigeren Einbrand (vergleiche mit Abbildung 17). Aufgrund der veränderten Schmelzbadbewegung und der geringeren Viskosität wird eine bessere Entgasung im Schmelzbad erzielt, wodurch porenärmere Schweißnähte entstehen. Durch das Verwenden von Helium kann außerdem die Vorwärmung reduziert sowie die Schweißgeschwindigkeit erhöht werden. Großer Nachteil des Helium-Inertgases ist jedoch der deutlich höhere Preis, wonach meist Argon-Helium-Mischgase eingesetzt werden [21].

Ar Ar + 50 % He He Ar + 5 % H₂

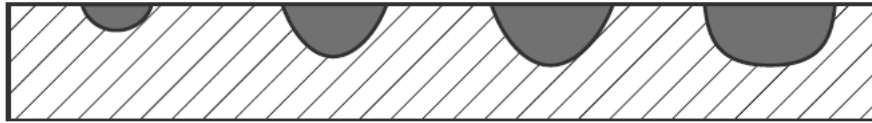


Abbildung 17: Einfluss verschiedener Schutzgase auf die Einbrandgeometrie beim WIG-Schweißen [20]

Die physikalischen Eigenschaften von Schutzgasen beeinflussen die Lichtbogenzündung, die Stabilität des Lichtbogens sowie die Wärmeeinwirkung auf das Werkstück und damit verbunden die Einbrandgeometrie. Dabei sind vor allem die Ionisationsenergie, die Wärmeleitfähigkeit sowie die elektrische Leitfähigkeit der Gase von Bedeutung. Die Ionisationsenergie nimmt mit der Anzahl der Elektronenschalen um den Atomkern ab, da mit größeren Abstand der Elektronen vom Atomkern auch die Bindungsenergie abnimmt. Das bedeutet, dass bei gleichem Ionisationsgrad als Äquivalent zur elektrischen Leitfähigkeit ein Helium-Lichtbogen deutlich höhere Temperaturen erreicht als ein Argon-Lichtbogen [20] (siehe Abbildung 18).

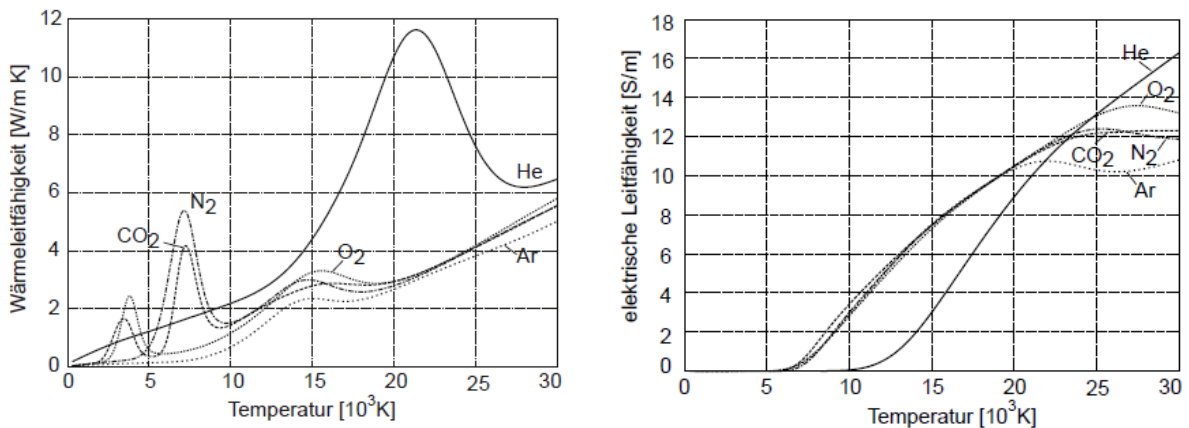


Abbildung 18: links: Wärmeleitfähigkeit von Gasen in Abhängigkeit von Temperatur
rechts: elektrische Leitfähigkeit von Gasen in Abhängigkeit von Temperatur [20]

3 Versuchsaufbau

Um das grundlegende Verhalten beim Schweißen von Glockenbronze und die dabei auftretenden Effekte zu untersuchen, wurden Probeplatten und stabförmiger Schweißzusatz (WIG-Schweißstäbe) von der Glockengießerei Grassmayr zur Verfügung gestellt. Die chemische Zusammensetzung der Probeplatten und einer Glocke mittels Röntgenfluoreszenzanalyse, konnte aufgrund stark streuender Einzelwerte, leider nur unzureichend bestimmt werden. Jedoch zeigt eine, von der Firma Grassmayr übermittelte chemische Analyse einer gegossenen Glocke folgende Zusammensetzung:

Chemische Zusammensetzung							
Cu [w%]	Sn [w%]	Pb [w%]	Zn [w%]	Ni [w%]	Sb [w%]	Fe [w%]	P [w%]
78,86	20,21	0,45	0,32	0,11	0,00	0,02	0,03

Tabelle 4: chemische Zusammensetzung einer gegossenen Glocke vom 12.09.2014

Dabei wird, wie im Kapitel 2.2 Gießprozess erwähnt, der genormte Werkstoff G-CuSn 10 (ca.10% Zinn) verwendet und mit Zinnbarren auf etwa 20 – 22% Sn auflegiert. Bei den gegossenen Probeplatten bzw. dem artgleichen Schweißzusatz dürften die Legierungselemente und Konzentrationen dieselben, wie in Tabelle 4 dargestellt, sein.

3.1 Gewähltes Temperaturprogramm beim Reparaturschweißen

Das Temperaturprogramm zu den Schweißungen an Probeplatten sowie an Glocken wurde wie folgt gewählt:

- Vorwärmung auf 400°C zur Rissvermeidung während der Schweißung (siehe Abbildung 19 – Bereiche 1 und 2). Aufgrund der eingebrachten thermischen Energie während des Schweißens kommt es zur Ausdehnung des Werkstoffes bzw. zur Schrumpfung bei der darauffolgenden Abkühlung. Werden die lokalen Dehnungen bzw. Schrumpfungen im Bereich der Schweißnaht behindert, kommt es zum Aufbau von Eigenspannungen. Die Vorwärmung soll dabei das Niveau der Eigenspannungen verringern und somit einer Rissbildung vorbeugen. Im Fall der Glockenbronze diese höchstwahrscheinlich als Eigenspannungen 2. Art (erstrecken sich über Kornbereiche) auf [24], da dieser Werkstoff über eine duktilere, weichere α -Phase und eine härtere, sprödere δ -Phase verfügt und damit auch ein unterschiedliches Verhalten bezüglich der Wärmeausdehnung auftreten. Bei entsprechend großen Temperaturgradienten ΔT und im Fall der Schrumpfbehinderung während der Abkühlung können die Wärmespannungen die Streck- oder Stauchgrenze und sogar die Zugfestigkeit übersteigen, wobei Wärmespannungsrisse (Thermoschockrisse) auftreten können [25]. Neben einen hohen Temperaturgradienten begünstigt auch relativ hoher Wärmeausdehnungskoeffizient der Glockenbronze $\alpha=18 \cdot 10^{-6}/K$ [2], die Thermospannungen.

- Spannungsarmglühen mit anschließender langsamer Abkühlung (siehe Abbildung 19 – Bereiche 3 und 4). Diese Schritte wurden unternommen um die nach dem Schweißen vorhandene Eigenspannungen abzubauen (Spannungsarmglühen) bzw. den Aufbau neuer Eigenspannungen zu vermeiden (langsame Abkühlung).

Temperaturprogramm

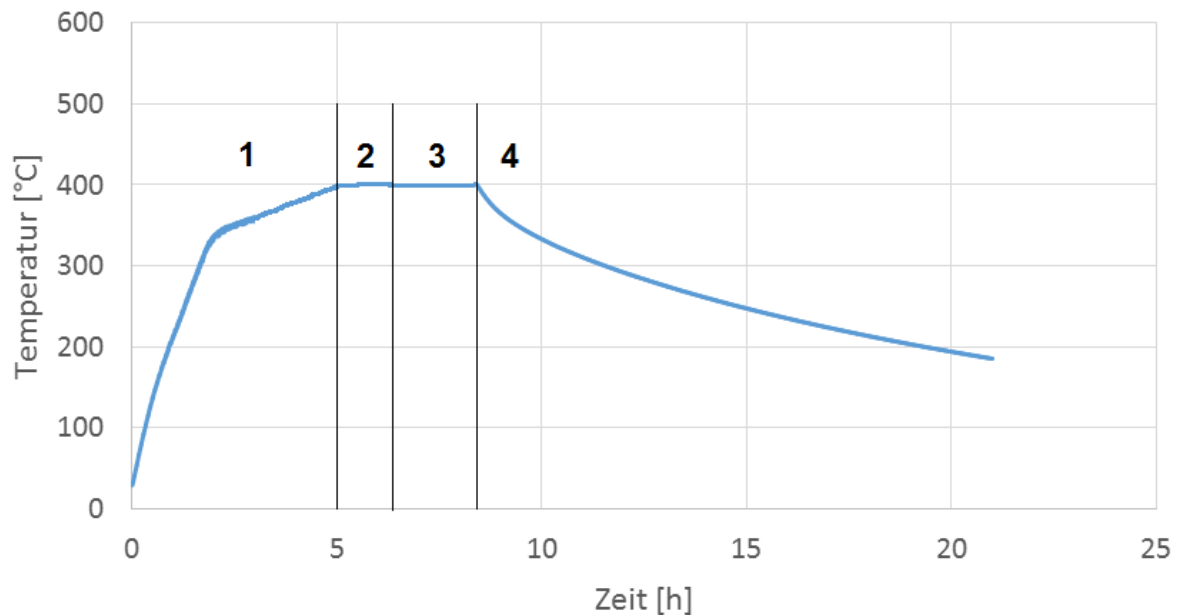


Abbildung 19: prinzipieller Verlauf des gewählten Temperaturprogramms: 1..Vorwärmung, 2..Schweißung, 3..Spannungsarmglühen, 4..langsame Abkühlung

3.2 Probepplatten aus Glockenbronze

Diese wurden ursprünglich in der Dimension 500 mm x 270 mm x 19 mm (Länge x Breite x Höhe) geliefert und anschließend, mittels Bandsäge, auf die Dimension 270 mm x 160 mm x 19 mm zugeschnitten. Die Schweißarbeiten sollten dabei an einer V-förmigen Fuge durchgeführt werden, um diese aufzufüllen.

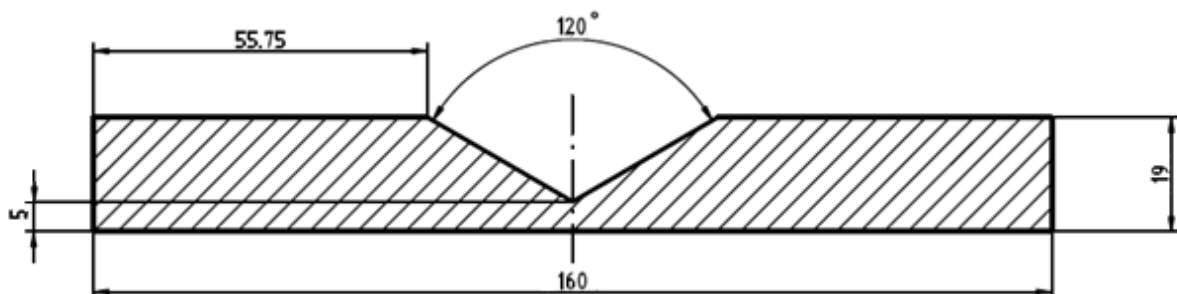


Abbildung 20: Vorderansicht einer Probepplatte, die Länge beträgt 270 mm

Die V-Fuge wurde am Institut für Fertigungstechnik an der TU Graz gefräst. Wenn Bronze als Grundwerkstoff vorliegt wird ab einer Wandstärke von 3 mm bei V-förmigen Fugen ein Winkel von 60° empfohlen [23]. Jedoch wurde aufgrund:

- der fertigungstechnischen Möglichkeiten (für 60° spezieller Formfräser nötig, konventionelle Fräsung erst ab 90° möglich) und
- des zu untersuchenden Probevolumens (eventuelle Zugversuche, eventuelle makroskopische Härtemessung)

ein Fugenwinkel von 120° gewählt.

3.3 Schweißzusatz

Der Schweißzusatz sollte aus denkmalamtlicher Sicht sowie zur Erhaltung der ursprünglichen Eigenschaften wie Klangverhalten, Härte, Dämpfungseigenschaften etc. in der chemischen Zusammensetzung dem Grundwerkstoff möglichst nahe kommen. Der Zusatz wurde daher artgleich und aus fertigungstechnischen Gründen mit einem, für das WIG-Schweißen eher großen Durchmesser von 4 bzw. 5 mm und einer Länge von 300 mm aus derselben Glockenbronze gegossen.

3.4 WIG-Schweißgeräte

Beim WIG-Schweißen von Kupferlegierungen sollte mit Gleichstrom und negativ gepolter Elektrode gearbeitet werden [21]. Aufgrund des großen Durchmessers des Schweißzusatzes und der relativ hohen benötigten Wärmeenergie zum Schmelzen von zinnhaltigen Kupfer-Gusslegierungen von 284 J/g (vergleiche Kapitel 2.7.5), wurde ein WIG – Gleichstromschweißgerät mit einer maximalen Stromstärke von 300 Ampere verwendet. Dabei handelte es sich um das Modell Fronius Magic Wave 3000 JOB. Da bei späteren Schweißversuchen eine hohe Aufschmelzleistung nicht mehr benötigt wurde, kam das WIG-Schweißgerät Fronius Magic Wave 2000 Fuzzy (200 Ampere Maximalstromstärke) zum Einsatz.



Abbildung 21: links: Fronius Magic Wave 3000 JOB [26]
rechts: Fronius Magic Wave 2000 Fuzzy [27]

3.5 Glühofen

Das gewählte Temperaturprogramm wurde im Glühofen durchgeführt. Dabei konnten die Vorwärm- bzw. Abkühlrate der Probeplatten und Glocken nicht gezielt gesteuert werden. Dies wäre nur mit speziellen Wärmebehandlungsanlagen (Glühgenerator und induktive Keramikplatten) möglich gewesen. Diese Möglichkeit fiel jedoch (nach mehreren Anfragen bei Händlern für Schweißzubehör) aufgrund der großen Dimensionierung (ca. 400 kg, 65 Ampere – elektrische Absicherung nötig) und hohen Leasingkosten aus.

3.6 Heizplatte und Temperaturregler

Um die Probeplatten während der Schweißung auf einer Temperatur von etwa 400°C halten zu können, wurden diese auf ein Hezelement mit entsprechendem Temperaturregler gelegt (siehe Abbildung 22).

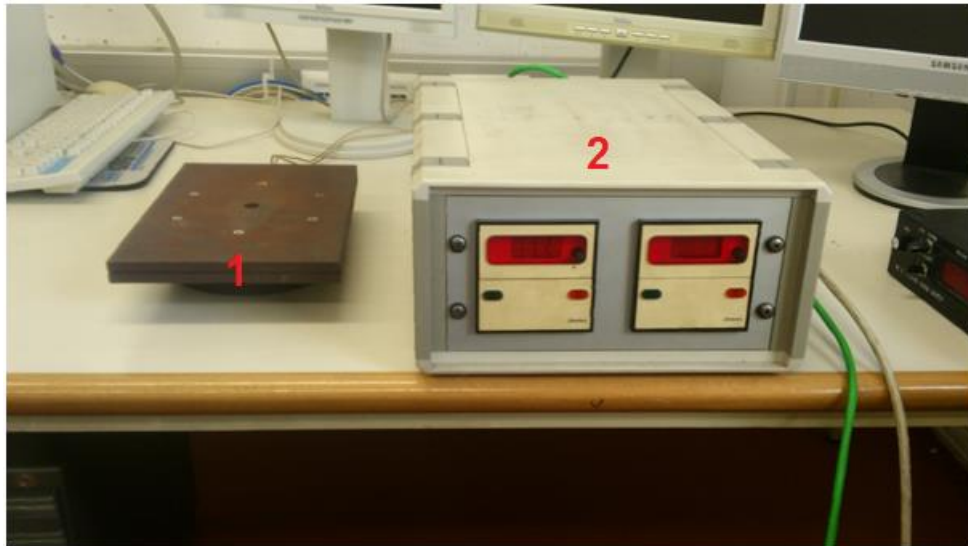


Abbildung 22: links: Heizplatte (1), rechts: Temperaturregler Joens (2)

Die Regelung der Temperatur von etwa 350°C (Maximaltemperatur) wurde dabei durch K-Thermoelemente bewerkstelligt, welche an der Heizplatte angebracht waren. Die benötigte Restwärme wurde über die Schweißenergie eingebracht.

3.7 Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung während der Vorwärmung, des Schweißvorgangs, des Spannungsarmglühens und der Abkühlung der Probeplatten, kam ein Messsystem bestehend aus folgenden Komponenten zum Einsatz:

- Thermoelemente des Typs K (Cr-NiCr), welche an den Probeplatten angebracht wurden
- National Instruments NI 9211 Thermoelement – Signaleingang, dieser verbindet K- Thermoelemente mit Messadapter
- National Instruments NI cDAQ 9172 Messadapter, ist die Schnittstelle zwischen Signaleingang und dem Messrechner (Notebook)

- HP 6730b Messrechner
- Lab-View-Signal-Express 2011, Software zur Temperaturaufzeichnung
- BBC Goerz Metrawatt M4052 Temperatur Multimeter, wurde als Bypass während der Vorwärmphase und des Schweißprozesses geschaltet, um die Temperatur zu kontrollieren

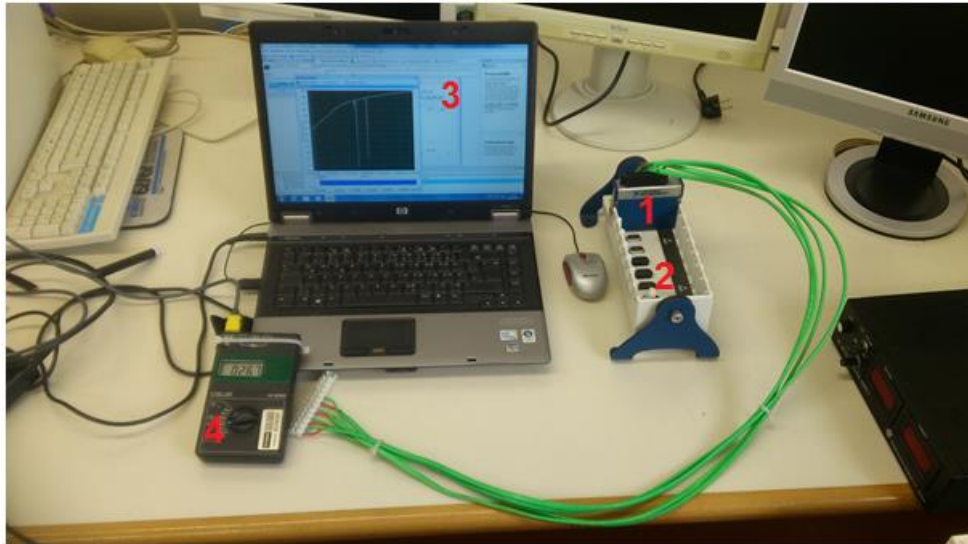


Abbildung 23: Temperaturmesssystem: Thermoelement – Signaleingang (1), Messadapter (2) Messrechner mit Software (3), Temperatur-Multimeter (4)

3.8 Schweißparameter

Die beiden Parameter Streckenenergie und Wärmeeinbringung konnten wie folgt berechnet werden:

$$E = \frac{I_{s,eff} * U_{s,eff}}{v_s}$$

Gleichung 4: Streckenenergie E [J/mm], $I_{s,eff}$..effektive Schweißstrom [A], $U_{s,eff}$..effektive Schweißspannung [V], v_s ..Schweißgeschwindigkeit [mm/s] [20]

$$Q = E * \eta$$

Gleichung 5: Wärmeeinbringung Q [J/mm], E.. Streckenenergie [J/mm], η ..thermischer Wirkungsgrad [20]

Wobei die relativen thermischen Wirkungsgrade η in folgender Tabelle gegeben sind:

Schweißverfahren – Schutzgas	thermischer Wirkungsgrad η
WIG - Argon	0,6
WIG – Helium	0,7
WIG – Argon/Helium – 50/50	0,65*
WIG – Argon/Helium – 80/20	0,62*

Tabelle 5: Wirkungsgrad η beim WIG-Schweißen mit verschiedenen Schutzgasen bzw. Zusammensetzungen [20], *Annahmen, wurden über Gewichtungsfaktor ermittelt

4 Versuchsdurchführung

4.1 WIG – Schweißversuche an Probestplatten mit Argon-Schutzgas

Die schweißtechnischen Parameter der ersten beiden Schweißversuche sind in Tabelle 6 dargestellt.

Schweißverfahren	Wolfram-Inertgas	
Schweißmaschine	Fronius MagicWave 3000 JOB	
Elektrode	Wolfram mit 2% Ceroxid(grau)	
Elektrodenabmessung	Durchmesser 2,4 mm x Länge 175 mm	
Polung	negativ auf Elektrode	
Schutzgas / Durchsatz	Argon / 14 l/min	
Schweißzusatz	Artgleich mit Grundwerkstoff	
Schweißzusatzabmessungen	Durchmesser 4 mm x Länge 300 mm	
Stromart	Gleichstrom	
Vorwärm / Zwischenlagen-Temperatur	ca. 400 °C	
Schweißversuch	1 (4.1.1)	2 (4.1.2)
Stromstärke	300 Ampere	250 Ampere
Spannung	ca. 27 Volt	ca. 19 Volt
Anzahl der Schweißraupen / -lagen	18 / 7	19 / 8
Schweißnahtlänge	ca. 250 mm	ca. 250 mm
Schweißdauer pro Raupe	ca. 25 s	ca. 42 s
Gesamtschweißdauer	1h 15min	1h 20min
Schweißgeschwindigkeit	ca. 10 mm/s	ca. 6 mm/s
thermischer Wirkungsgrad η	0,6	0,6
Streckenenergie E	810 J/mm	792 J/mm
Wärmeeinbringung Q	486 J/mm	475 J/mm

Tabelle 6: Schweißtechnische Parameter der Schweißversuche 1 und 2 an Probestplatten

4.1.1 Schweißversuch 1 an Probestplatte mit Argon-Schutzgas

Aufgrund des wechselnden Abstandes zwischen der WIG-Nadel und dem Probekörper während der Schweißung, variierte die Spannung. Die eingebrachten 300 Ampere an Stromstärke zeigten sich als zu hoch gewählt, da es während der Schweißung zu einer Schmelzbadüberhitzung kam. Dies zeigte sich durch die starke Hitzeentwicklung welche das Schweißbad zum plötzlichen Fließen in der V-Fuge und die Keramikdüse, welche die Wolframelektrode ummantelt, zum Glühen brachte.

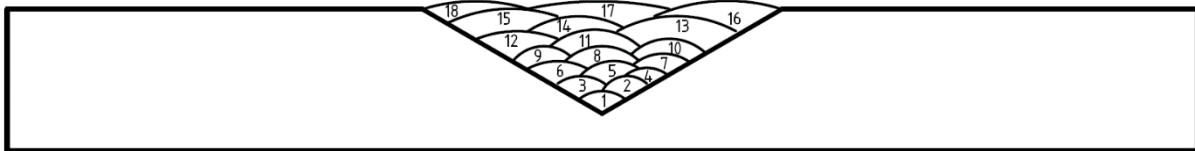


Abbildung 24: Aufbau der Schweißlagen - Schweißversuch 1 an Probepatte

Während der Schweißung kam es auch zu einer punktuellen Schlackebildung sowie zur Ausbildung einer gelblichen Schmauchschicht auf den einzelnen Lagen.

Aufgrund von technischen Problemen während der Temperaturmessung (Absturz der Computersoftware) konnte kein Temperaturprofil aufgezeichnet werden. Die Probepatte wurde gleichmäßig in einem elektrischen Widerstandsofen (Glühofen) erwärmt, welcher auf 430°C eingestellt wurde. Diese Temperatur wurde nach etwa 80 Minuten erreicht, was einer durchschnittlichen Heizrate von 5,4 °C/min entspricht. Nach einer Durchwärmzeit der Probepatte von 20 Minuten wurde diese aus dem Ofen genommen, wobei eine Verzunderung der Probepatte festgestellt wurde. Anschließend wurde die Probe auf eine Heizplatte gestellt, wo versucht wurde die Temperatur von 400°C während der Schweißarbeiten zu halten. Anschließend wurde die Probe wieder in den Ofen gestellt und eine Stunde, bei 430 °C Ofentemperatur, spannungsarmgeglüht. Nach dem Glühen wurde der Ofen ausgeschaltet und die Ofentür geschlossen gehalten um eine möglichst geringe Abkühlgeschwindigkeit zu erreichen und damit die Schrumpfspannungen im Gefüge möglichst gering zu halten.

4.1.2 Schweißversuch 2 an Probepatte mit Argon-Schutzgas

Wegen der Schmelzbadüberhitzung während des ersten Versuchs und der erheblichen Porenbildung in der Schweißbad bzw. Schmelzzone, welche mit der Überhitzung in Zusammenhang gebracht wurde, wurde die Stromstärke auf 250 Ampere reduziert und der Durchmesser des Schweißzusatzes (WIG-Schweißstab) von 4 mm auf 5 mm erhöht. Dadurch änderten sich die mittlere elektrische Spannung und aufgrund der geringeren eingebrachten Energie auch die Schweißdauer pro Lage und die Schweißgeschwindigkeit. Als weitere Maßnahmen zur Verringerung der Porosität wurden sowohl die V-förmig Fuge der Versuchsplatte sowie der stabförmige Schweißzusatz vor der Schweißung mit Alkohol gereinigt. Die Schmelzbadkonsistenz zeigte sich mit den gewählten Parametern als genau richtig. Während der Schweißung kam es wiederum zur Ausbildung einer gelblichen Schmauchschicht sowie zu einer punktuellen Schlackenbildung auf der Schweißnahtoberfläche. Diese wurden mit einer Kupferdrahtbürste, vor Beginn der nächsten Schweißlage, entfernt. Da es durch die Wärmeeinbringung immer wieder zur kurzzeitigen Überhitzung der Probepatte kam, wurde die Schweißung auch immer wieder kurzzeitig unterbrochen um die Platte auf etwa 420°C abkühlen zu lassen.

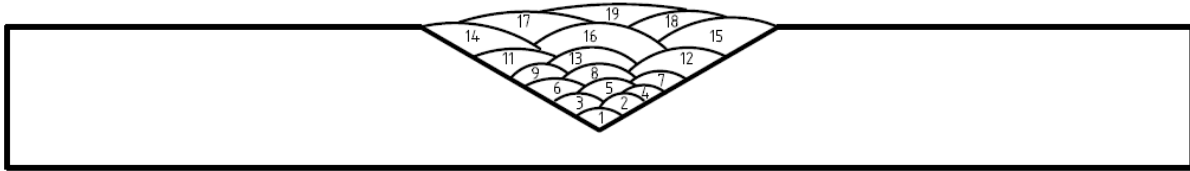


Abbildung 25: Aufbau der Schweißlagen - Schweißversuch 2 an Probepatte

4.2 Elektronenstrahlschweißung an Probepatte

Da nach den ersten beiden Schweißversuchen, neben der erwähnten Schmauch- und Schlackenbildung sowie Zunderung der Plattenoberfläche, eine erhebliche Porosität (bis zu 4 mm Durchmesser) in der Schmelzzone stattgefunden hat, wurde im dritten Schweißversuch der Einfluss der Atmosphäre auf die Porenbildung in der Schmelzzone untersucht. Dies wurde mittels der institutseigenen Elektronen-Strahl-Schweißanlage (EBW – Electron Beam Welding) bewerkstelligt. Damit sollte der atmosphärische Einfluss auf die Porenbildung ausgeschlossen werden, da diese Anlage unter Vakuum ($\sim 10^{-7}$ bar) arbeitet. Dabei wurde eine Probepatte mit den Abmessungen 100 mm x 50 mm x 19 mm (Länge x Breite x Höhe) herausgearbeitet und mit der Elektronen-Strahl-Anlage Blindnähte geschweißt.



Abbildung 26: links: EBW-Anlage der TU Graz, rechts: geschweißte Probepatte

Bei diesem Versuch kam es ebenfalls zur Schlackenbildung in der Schmelzzone, sowie zu einer Porenbildung - jedoch größtenteils in der Wärmeeinflusszone (WEZ). Eine Schmauchbildung sowie eine Zunderung der Oberfläche (aufgrund des fehlenden Sauerstoffs in der Vakuumkammer) konnten nicht festgestellt werden. Da es trotz des Vakuums zur Porenbildung gekommen ist, beweist, dass die Legierungselemente während des Schweißvorgangs ausdampften und somit für die Porenbildung in der Schmelzzone verantwortlich sind.

4.3 WIG – Schweißversuch an Probeplatte mit Helium-Schutzgas

Die Erkenntnisse aus dem vorangegangenen Versuch sowie Literaturrecherchen (vergleiche mit 2.8.2.2) führten dazu, das Schutzgas beim WIG-Schweißen von Argon auf Helium zu wechseln. Dieses sollte beim Schweißen für ein heißeres Schmelzbad mit geringerer Viskosität und einem tieferen, gleichmäßigeren Einbrand und somit für eine bessere Entgasung bzw. porenärmere Schweißnähte sorgen. Die Schweißparameter bei diesem Versuch waren wie folgt – siehe Tabelle 7.

Schweißverfahren	Wolfram-Inertgas
Schweißmaschine	Fronius MagicWave 3000 JOB
Elektrode	Wolfram mit 2% Ceroxid(grau)
Elektrodenabmessung	Durchmesser 2,4 mm x Länge 175 mm
Polung	negativ auf Elektrode
Schutzgas / Durchsatz	Helium / 18 l/min
Schweißzusatz	Artgleich mit Grundwerkstoff
Schweißzusatzabmessungen	Durchmesser 5 mm x Länge 300 mm
Stromstärke / Art	200 Ampere / Gleichstrom
Mittlere Spannung	ca. 22 Volt
Anzahl der Schweißraupen / -lagen	17 / 7
Schweißnahtlänge	ca. 250 mm
Schweißdauer pro Raupe	ca. 55 s
Gesamtschweißdauer	1h 30min
Schweißgeschwindigkeit	ca. 4,5 mm/s
Relativer therm. Wirkungsgrad η	0,7
Streckenenergie E	978 J/mm
Wärmeeintrag Q	684 J/mm
Vorwärm / Zwischenlagen-Temperatur	ca. 400 °C

Tabelle 7: Schweißtechnische Parameter WIG – Schweißversuch an Probeplatte mit Helium-Schutzgas

Beim WIG-Schweißen mit Helium als Schutzgas sollte der Durchsatz (im Vergleich zu Argon) etwas erhöht werden um einen stabilen Schutzgaskegel zu gewährleisten, da dieses eine sehr geringe Dichte aufweist. Da ein Helium-Lichtbogen bei gleicher elektrischer Leitfähigkeit höhere Temperaturen erreicht als ein Argon-Lichtbogen (siehe Abbildung 18 - rechts) wurde die Stromstärke auf 200 Ampere reduziert. Auffällig war der rötliche Lichtbogen (bei Argon-Lichtbogen bläulich) während der Schweißung. Dies deutet darauf hin, dass das emittierte Licht des Lichtbogens nahe am infraroten Bereich lag. Die Schmauch- und Schlackenbildung während des Schweißens war, im Vergleich zu den vorherigen Versuchen mit Argon als Schutzgas, Diplomarbeit Georg Weber

wesentlich höher. Im Schmelzbad konnte Schlacke beobachtet werden, welche auf den gebildeten Schweißlagen erstarrte. Aufgrund der starken Wärmeeinwirkung des Helium-Lichtbogens auf die Probeplatte bis zu 470°C wurden die Schweißarbeiten zeitweise unterbrochen, um diese auf die gewünschte Zwischenlagentemperatur von 400 °C abkühlen zu lassen. Diese Zeit wurde genutzt um die gebildete Schmauchschicht, welche sich neben den Raupen bildete, mittels Drahtbürste zu entfernen. Die erstarrten Schlackenpunkte auf den Schweißlagen wurden mittels Schlackenhammer abgetragen. Da nach den ersten Schweißversuchen die Temperaturmessung versagte, wurden die zur Messung benötigte Software sowie der Messrechner erneuert. Die Temperaturmessung misslang trotz dieser Maßnahmen abermals. Jedoch wurde diesmal eine Fehlermeldung von der aktualisierten Software angezeigt. Die Meldung trat genau während des Lichtbogen-Zündvorgangs auf. Der Zündvorgang basiert dabei auf Spannungsimpulse mit einer Frequenz von bis zu 500 Hz und Amplituden zwischen 6000 V bis 8000 V [20]. Dieser hochfrequente Spannungsimpuls dürfte das Messsignal an den Thermoelementen gestört haben wodurch es zum Ausfall des Messsystems kam. Versuche die Thermoelemente durch ein Kupfergeflecht von den Spannungsimpulsen zu isolieren blieben ebenfalls erfolglos. Auch ein Umschalten des WIG – Schweißgeräts auf Kurzschlusszündung brachte keine Lösung, da durch den geschlossenen Stromkreis ein Teil des elektrischen Stroms über die Thermoelemente floss es und somit es zu falsch gemessenen Werten kam.

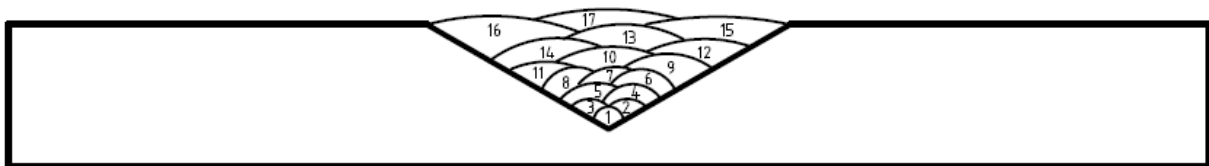


Abbildung 27: Aufbau der Schweißlagen - WIG – Schweißversuch an Probeplatte mit Helium-Schutzgas

Das makroskopische Ergebnis dieses Schweißversuches zeigte einen minimalen Porenanteil verglichen mit den vorangegangenen Versuchen.

4.4 Autogenschweißen an Probeplatte

Wie in der Literatur angeführt (siehe 2.8.1 bzw. 2.8.1.1) ist das Gasschmelzschweißen prinzipiell zur Schweißung von Kupfer-Zinn-Legierungen geeignet, wenn auch vor porösen Schweißnähten aufgrund der erhöhten Gasaufnahme dieser Legierung gewarnt wird. Um diese Möglichkeit zu überprüfen, wurde mit diesem Verfahren eine Probeplatte geschweißt.

Schweißverfahren	Gasschmelzschweißen (Autogenschweißen)
Brenngas	Acetylen - Sauerstoff
Flammeinstellung	leicht oxidierend
Schweißzusatz	Artgleich mit Grundwerkstoff
Schweißzusatzabmessungen	Durchmesser 5 mm x Länge 300 mm
Anzahl der Schweißraupen / -lagen	9 / 5
Schweißnahtlänge	ca. 250 mm
Schweißdauer pro Raupe	ca. 260 s
Gesamtschweißdauer	1h 45min
Schweißgeschwindigkeit	ca. 1 mm/s
Vorwärm- / Zwischenlagen-Temperatur	ca. 380 °C

Tabelle 8: Schweißtechnische Parameter - Autogenschweißen an Probeplatte

Um die Wasserstoffkrankheit der Kupferlegierung zu vermeiden (siehe Kapitel 2.8.1.1), wurde das Acetylen – Sauerstoffgemisch mit einem leichten Sauerstoffüberschuss (oxidierende Flamme) gewählt. Auffällig bei der Schweißung waren neben der langsamen Schweißgeschwindigkeit (aufgrund der niedrigen Energiedichte dieses Verfahrens) auch die geringere Anzahl sowie die größere Breite der Schweißraupen, die sich aufgrund des niedrigen Schweißvorschubs und der Pendelbewegung während des Schweißens gebildet haben. Auf den Schweißraupen ist es in geringem Umfang zur Schlackebildung gekommen. Eine Schmauchbildung an den Schweißlagen bzw. an der Plattenoberfläche blieb dieses mal aus.



Abbildung 28: links: Dipl.Ing. Markus Stütz beim autogenen Schweißen, rechts: Probeplatte mit breiten Schweißraupen und Zunderung a.d. Oberfläche auf Grund der Vorwärmung, Pfeil markiert die Schweißrichtung

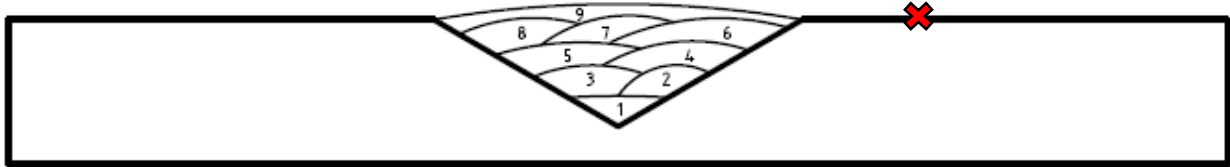


Abbildung 29: Aufbau der Schweißlagen - Autogenschweißen an Probepatte, auffällig hierbei die geringere Anzahl der Schweißraupen bzw. -lagen im Vergleich zum WIG-Schweißen, rote Markierung zeigt Position der Temperaturmessung am Ende der Schweißraupen

Da beim autogenen Schweißen ein Brenngas anstatt eines Lichtbogens zum Aufschmelzen des Schweißzusatzes bzw. Grundwerkstoffs zum Einsatz kam, blieben auch die messtechnischen Probleme bei der Temperaturaufzeichnung aus (vergleiche mit 4.3). Daher konnte ein vollständiges Temperaturprofil aufgezeichnet werden.

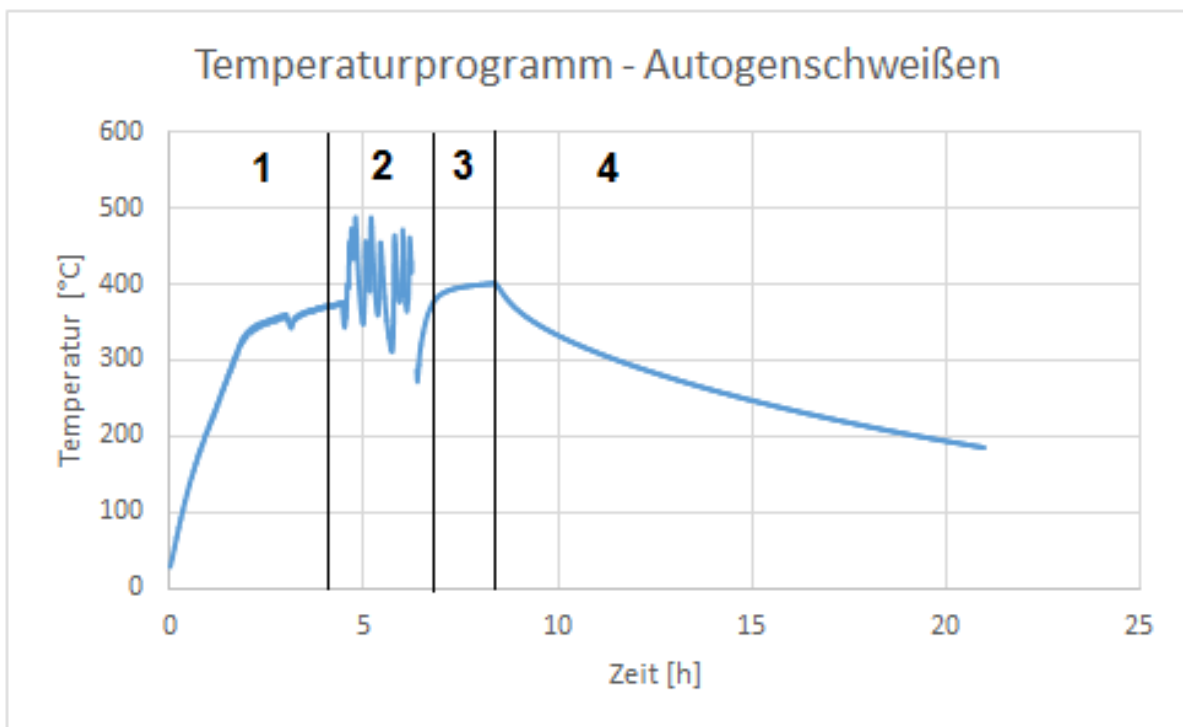


Abbildung 30: Temperaturprofil – Autogenschweißen, 1..Vorwärmung, 2..Temperaturverlauf der Probepatte während der Schweißung, 3..Spannungsarmglühen, 4..langsame Abkühlung der Probepatte

Bis etwa 350°C konnte die Probepatte mit nahezu linearem Temperaturverlauf erwärmt werden (Abbildung 30 – Bereich 1), ab ungefähr 350°C zeigt sich ein flacherer Verlauf bei der Vorwärmung. Bereich 2 zeigt am Beginn einen kleinen Temperaturabfall, da die Probepatte aus dem Glühofen genommen wurde und während des Transports zur Heizplatte (siehe Abbildung 22 – links) abkühlte. Anschließend erfolgte die Schweißung wobei sich die Probepatte dabei auf bis zu ca. 500°C erwärmte und zwischen der Schweißung der Fülllagen auf Temperaturen von ca. 300°C abkühlte. Der stärkere Temperaturabfall auf ca. 280°C erfolgte aufgrund der schnellen Abkühlung während des Transports der Schweißplatte von der Heizplatte in den Glühofen. Dabei kam es kurzzeitig zu einem Ausfall der Temperaturmessung. Anschließend kam es zur erneuten Erwärmung der Schweißplatte im Ofen auf etwa

400°C (siehe Übergang 2 auf 3 in Abbildung 30) bzw. zum etwa 1-stündigen Spannungsarmglühen im Bereich 3. Bereich 4 zeigt den langsamen Abkühlvorgang der Probeplatte im Glühofen, um Schrumpfeigenspannungen während dieses Vorgangs zu minimieren (vergleiche Kapitel 3.1). Das Ergebnis aus diesem Schweißversuch ergab ebenfalls einen sehr hohen Porenanteil in der Schmelzzone.

4.5 WIG – Schweißversuche an Glocke mit Helium-Schutzgas

Aufgrund der Zwischenergebnisse aus den vorherigen Schweißversuchen wurde als vielversprechendstes Verfahren das WIG – Schweißen mit Helium als Schutzgas (besonders geringe Porenbildung) für die weiteren Schweißversuche an Glocken gewählt. Als Vorbereitung wurde ein M16-Gewinde in die Oberplatte der Glocke gebohrt (siehe Abbildung 31 – Bohrung mit 14 mm Durchmesser) und eine Ringschraube angebracht. Dies hatte den Sinn die vorgewärmte Glocke mittels Kran vom Glühofen auf die Heizplatte und nach der Schweißung wieder zurück zu transportieren. Weiters wurden Fugen mit den Abmessungen 100 mm x 50 mm x 15 mm (Länge x Breite x Tiefe) in die Glockenwandung geschnitten, wobei die Fugen nicht durch die ganze Glockenwandung verlief. Die Fugen sollten dabei ausgeschliffene Risse darstellen die es durch die Schweißung zu füllen bzw. zu reparieren galt.

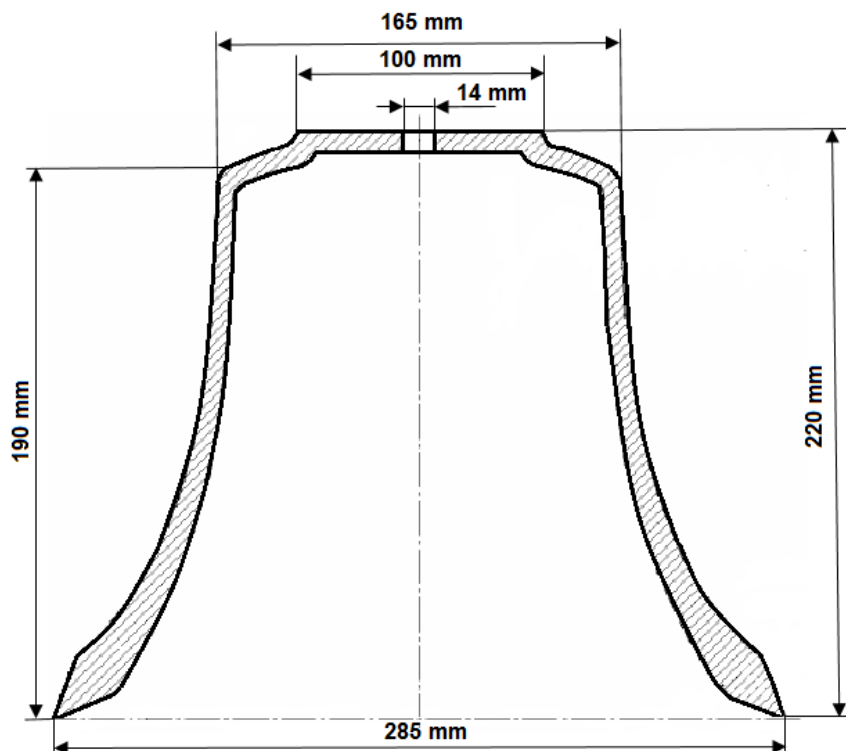


Abbildung 31: Querschnitt und Abmessungen der Glocke aus den Schweißversuchen 1 und 2 an Glocke mit Helium-Schutzgas

Schweißverfahren	Wolfram-Inertgas	
Schweißmaschine	Fronius MagicWave 3000 JOB	
Elektrode	Wolfram mit 2% Ceroxid(grau)	
Elektrodenabmessung	Durchmesser 2,4 mm x Länge 175 mm	
Polung	negativ auf Elektrode	
Schutzgas / Durchsatz	Helium / 18 l/min	
Schweißzusatz	Artgleich mit Grundwerkstoff	
Schweißzusatzabmessungen	Durchmesser 5 mm x Länge 300 mm	
Schweißposition	Wannenposition (PA)	
Stromart	Gleichstrom	
Schweißversuch	1 (4.5.1)	2 (4.5.2)
Stromstärke	120 Ampere	150 – 80 Ampere
Anzahl der Schweißraupen / -lagen	31 / 6	29 / 6
Vorwärmtemperatur	ca. 350 °C	ca. 450 °C

Tabelle 9: Schweißtechnische Parameter aus den Schweißversuchen 1 und 2 an Glocken mit Helium-Schutzgas

4.5.1 Schweißversuch 1 an Glocke mit Helium-Schutzgas

Während der Schweißung kam es zur Ausbildung eines Risses welcher sich durch die gesamte Glockenwandung sowie über die Schmelzzone (SZ) und die Wärmeeinflusszone (WEZ) erstreckte (siehe Abbildung 32). Grund für diese dürfte die zu geringe Vorwärmtemperatur bzw. die zu schnelle Abkühlung der Glocke während der Schweißung sein (Glocke hatte während der Rissbildung nur mehr eine Temperatur von 265°C). Der Temperaturgradient zwischen der eingebrachten thermischen Energie beim Schweißen und der Glocke war dabei wahrscheinlich zu hoch, wobei die bei der Abkühlung auftretende Schrumpfspannung die Zugfestigkeit des Materials überstieg und somit zu einem Wärmespannungsrisse geführt hat (vergleiche Kapitel 3.1). Anmerkung: Vor der Glockenschweißung wurden die Eigenspannungen gemessen, wobei eine Messung nach der Schweißung zum Vergleich nicht zielführend gewesen wäre, da sich die Eigenspannungen durch die Rissbildung abbauen bzw. stark verändern.



Abbildung 32: geschweißte Glocke in Wannenlage, die einzelnen Schweißlagen verlaufen quer zur Fuge, bei der Steigung in Richtung Schlagring ist ein Abfließen der Schmelze erkennbar, rot markierter Bereich zeigt Riss welcher während der Schweißung entstand

Die Schweißung in Steigposition (PF-Position) zeigte sich insofern als schwierig, da niedrigviskose Schmelze entlang der ausgeschnittenen Fuge nach unten floss. Aus diesem Grund wurde die Glocke gekippt, um sie in Wannenposition (PA-Position) zu schweißen. Dabei kam es beim Schweißen längs der Fuge (vor allem bei der Steigung in Richtung Schlagring) wiederum zu einem Herabfließen der Schmelze. Um diesen Effekt etwas zu mindern wurden die einzelnen Schweißlagen quer zur Fuge gesetzt (siehe Abbildung 32). Während der Schweißung kam es wiederum zur Schmauch- und Schlackenbildung, wobei diese Effekte mittels Kupferdrahtbürste und Schlackenhammer entfernt wurden.

Abbildung 33 zeigt leider nur eine unvollständige Temperaturaufzeichnung des Schweißversuches. Dabei sollte die Glocke ursprünglich auf 400°C vorgewärmt werden, wobei die Schweißung ebenfalls bei dieser Temperatur erfolgen sollte. Anschließend sollte ein 3-stündiges Spannungsarmglühen (siehe Abbildung 33 – Bereich 3) wiederum bei 400°C erfolgen, gefolgt von einem langsamen Abkühlungsprozess (siehe Abbildung 33 – Bereich 4) im Glühofen. Aufgrund der langsamen Erwärmung der Glocke und aus Zeitmangel, wurde diese schon bei 350°C aus den Glühofen genommen (siehe Abbildung 33 – Bereich 1) und mittels Kran zum Schweißtisch (auf die Heizplatte) transportiert. Auf diesem wurde die Glocke mittels Dämmmaterial thermisch isoliert.

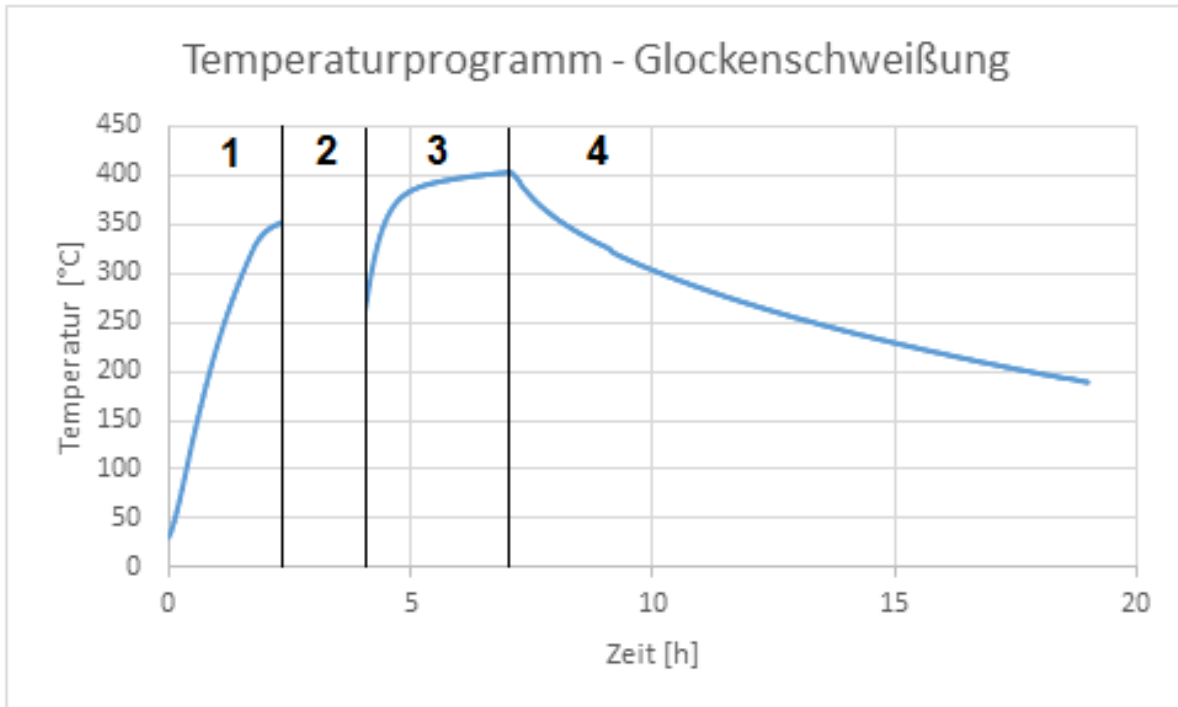


Abbildung 33: Temperaturprofil – Schweißversuch 1 an Glocke, 1..Vorwärmung, 2..Temperaturverlauf der Glocke während der Schweißung (konnte nicht aufgezeichnet werden – Begründung: vergleiche Kapitel 4.3), 3..3 –stündiges Spannungsarmglühen, 4..langsame Abkühlung der Glocke

4.5.2 Schweißversuch 2 an Glocke mit Helium-Schutzgas

Da beim vorangegangenen Versuch die Glocke bei der Vorwärmung ihre Zieltemperatur von 400°C nicht erreichte und diese während des Transports vom Glühofen zum Schweißstisch schnell abkühlte, wurden Maßnahmen getroffen um die Glockentemperatur während der Schweißung hoch genug zu halten und somit Rissbildung zu vermeiden. Zunächst wurde eine Vorwärmtemperatur von 450°C gewählt und des Weiteren eine Ummantelung aus Steinwolle gefertigt, welche der Glocke gleich nach der Vorwärmung übergezogen wurde.

Bei der geschweißten Glocke handelte sich um dieselbe wie aus dem vorangegangenen Versuch (4.5.1), wobei sich die Fugenposition um 180° versetzt zur vorangegangenen befand. Die Fugenabmessungen blieben ebenfalls gleich. Geschweißt wurde wiederum in Wannenposition (PA-Position) wobei die Schweißnähte quer zur Fuge gesetzt wurden.

Aus Tabelle 9 ist die Verringerung der Stromstärke von 150 Ampere auf 80 Ampere ersichtlich. Dabei wurde an den flacheren Stellen der Glockenwandung mit 150 Ampere begonnen die Schweißlagen zu setzen und beim Anstieg in Richtung Schlagring wurde die Stromstärke reduziert. Aufgrund der wechselnden Bedingungen konnte die mittlere Spannung nicht bestimmt werden.



Abbildung 34: Schweißlagenaufbau – Schweißversuch 2 an Glocke, rot markierte Bereiche zeigen Schlackenbildung, gut erkennbar die gelblich-weiße Schmauchschrift neben bzw. an den Schweißraupen

Auch war das Schweißbad auf Grund der geringen Viskosität im steigenden Bereich zum Schlagring kaum beherrschbar. Es ist wiederum eine starke Schmauch- und Schlackenbildung aus Abbildung 34 ersichtlich.

Der Temperaturverlauf konnte während der Schweißung leider nicht aufgezeichnet werden, jedoch betrug die Glockentemperatur am Ende der Schweißung noch rund 350°C (vergleiche Abbildung 35 – Übergang von Bereich 2 auf 3) und war damit hoch genug um einer Rissbildung vorzubeugen. Eine konstante Temperatur während des Spannungsarmglühens wurde nicht erreicht, da es zu einem kurzzeitigen Ausfall des Glühofens kam (siehe Abbildung 35 - Bereich 3).

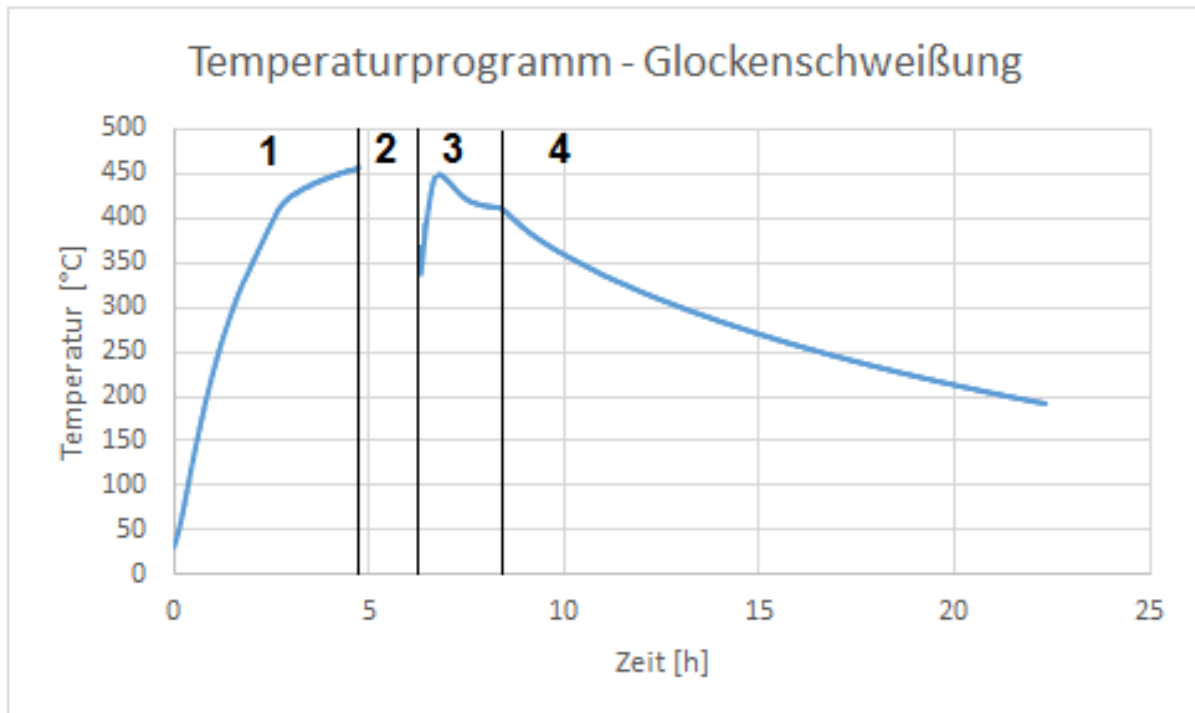


Abbildung 35: Temperaturprofil – Schweißversuch 2 an Glocke, 1..Vorwärmung, 2..Temperaturverlauf der Glocke während der Schweißung (konnte nicht aufgezeichnet werden – Begründung: vergleiche Kapitel 4.3), 3..3-stündiges Spannungsarmglühen, 4..langsame Abkühlung der Glocke

4.6 WIG – Schweißversuche an Probeplatten mit Argon-Helium Mischgasen

Der Vorteil beim Schweißen mit Helium ist der geringe Porenanteil in der Schmelzzone, jedoch zeigte sich beim Schweißen in Steigposition als auch in Wannenlage aufgrund der geringe Viskosität des Schmelzbades als Nachteil, da die Schmelze nach unten fließt und somit einen Aufbau von Schweißlagen, zum Füllen von Fugen, erschwert. Um einen Kompromiss zwischen einer geringen Porosität und einer höheren Viskosität zu treffen wurde bei diesen Versuchen an Probeplatten Argon – Helium Mischgase in den Verhältnissen von 50/50 bzw. 80/20 verwendet. Die schweißtechnischen Parameter dieser Versuche sind in Tabelle 12 dargestellt.

Schweißverfahren	Wolfram-Inertgas	
Schweißmaschine	Fronius MagicWave 2000 Fuzzy	
Elektrode	Wolfram mit 2% Ceroxid(grau)	
Elektrodenabmessung	Durchmesser 2,4 mm x Länge 175 mm	
Polung	negativ auf Elektrode	
Schweißzusatz	Artgleich mit Grundwerkstoff	
Schweißzusatzabmessungen	Durchmesser 5 mm x Länge 300 mm	
Schweißversuch	1 (4.6.1)	2 (4.6.2)
Mischgas / Durchsatz	Ar-He 50-50 / 15 l/min	Ar-He 80-20 / 15 l/min
Stromstärke / Art	120 Ampere / Gleichstrom	150 Ampere / Gleichstrom
Mittlere Spannung	ca. 16 Volt	ca. 16 Volt
Anzahl der Schweißraupen / - lagen	18 / 6	19 / 6
Schweißnahtlänge	ca. 250 mm	ca. 250 mm
Schweißdauer pro Raupe	ca. 60 s	ca. 70 s
Gesamtschweißdauer	1h 30min	1h 30min
Schweißgeschwindigkeit	ca. 4,2 mm/sek	ca. 3,6 mm/s
Relativer therm. Wirkungsgrad η	0,65	0,62
Streckenenergie E	457 J/mm	667 J/mm
Wärmeeintrag Q	297 J/mm	413 J/mm
Vorwärmtemperatur	ca. 360 °C	ca. 370 °C

Tabelle 10: Schweißtechnische Parameter aus den Schweißversuchen 1 und 2 an Probenplatten mit Argon-Helium Mischgasen

4.6.1 Schweißversuch 1 an Probeplatte mit Argon-Helium Mischgas

Da bei diesem Schweißversuch ein Ar-He-Mischgas mit dem Verhältnis 50/50 verwendet wurde, welches eine durchschnittlich höhere Ionisationsenergie (im Vergleich zu reinem Argon) aufweist, konnte mit einem leistungsschwächeren WIG-Schweißgerät gearbeitet werden (siehe Tabelle 12 – Schweißmaschine). Nachteilig zeigte sich jedoch der zeitweilige Ausfall des Schweißgerätes durch die Überstromsicherung, da dieses zum einen mit einer maximalen Leistung von 200 A bei einem 230V Netzanschluss betrieben wurde und daher regelmäßig überhitzte.

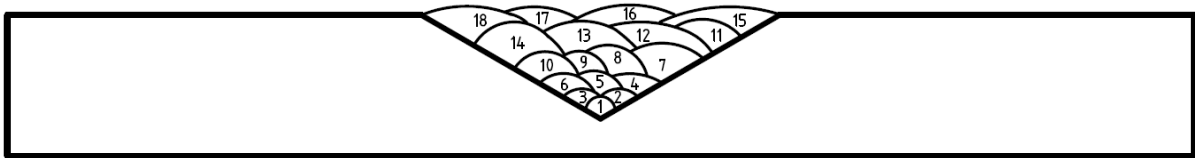


Abbildung 36: Aufbau der Schweißlagen - Schweißversuch 1 an Probeplatte mit Argon-Helium Mischgas

Auffällig bei der Schweißung war wiederum der etwas rötliche Lichtbogen aufgrund des Heliumanteils im Mischgas, sowie die Schlacke im Schmelzbad und die Schmauchbildung an den Schweißlagen. Die Schmelzbadviskosität war gegenüber reinem Helium höher und lag in einem optimalen Bereich, wodurch das Schweißbad gut beherrschbar war.

Die Vorwärmung der Probeplatte erfolgte auf etwa 360°C, wobei die Temperaturmessung während der Schweißung wiederum nicht aufgezeichnet werden konnte. Anschließend folgte ein etwa 2- stündiges Spannungsarmglühen bei ca. 400°C und eine, verglichen mit den vorangegangenen Schweißversuchen, relativ schnelle Abkühlung (Ofentür wurde offen gelassen).

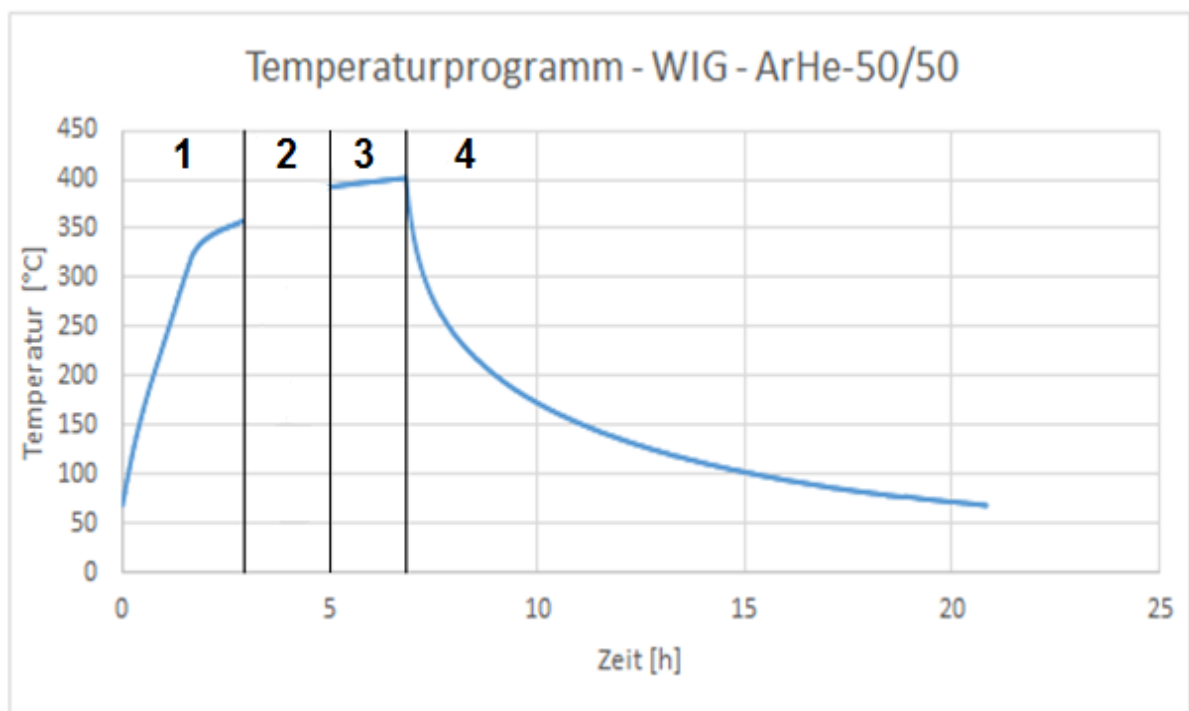


Abbildung 37: Temperaturprofil – WIG-Schweißung ArHe 50/50, 1..Vorwärmung, 2..Temperaturverlauf der Glocke während der Schweißung (konnte nicht aufgezeichnet werden – Begründung: vergleiche Kapitel 4.3) 3..2 –stündiges Spannungsarmglühen, 4..langsame Abkühlung der Platte

4.6.2 Schweißversuch 2 an Probeplatte mit Argon-Helium Mischgas

Neben dem Mischungsverhältnis Argon – Helium 50/50 wurde bei diesem Versuch das Verhältnis 80/20 eingesetzt, um die Auswirkung des Heliumanteils auf die Porosität in der Schmelzzone zu untersuchen. Aufgrund des niedrigeren Heliumanteils und der damit verbundenen geringeren Schmelzleistung wurde eine Stromstärke von 150 Ampere gewählt.

Bei der Schweißung zeigte sich ein viskoseres Schmelzbad sowie eine wesentlich geringere Schmauch- und Schlackenbildung als bei dem vorangegangenen Schweißversuch (Argon-Helium 50/50). Dies wurde wiederum mit dem geringeren Heliumanteil im Schutzgas in Zusammenhang gebracht.

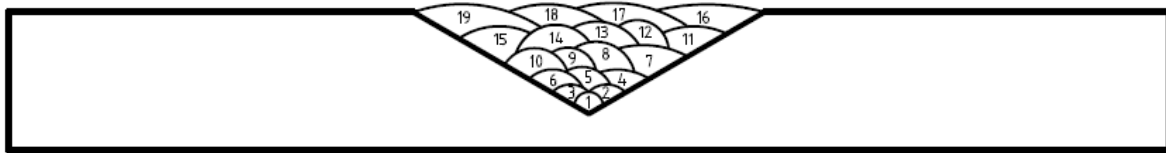


Abbildung 38: Aufbau der Schweißlagen - Schweißversuch 2 an Probeplatte mit Argon-Helium Mischgas

Die Vorwärmung der Probeplatte erfolgte auf etwa 370°C (kontrolliert mittels Temperaturmultimeter), wobei die Temperaturverläufe während der Vorwärmung und der Schweißung nicht aufgezeichnet werden konnte (vergleiche mit Abbildung 39 – Bereiche 1 und 2). Anschließend folgte ein etwa 2,5- stündiges Spannungsarmglühen bei ca. 380°C und eine ebenfalls relativ schnelle Abkühlung (Ofentür wurde wiederum offen gelassen).

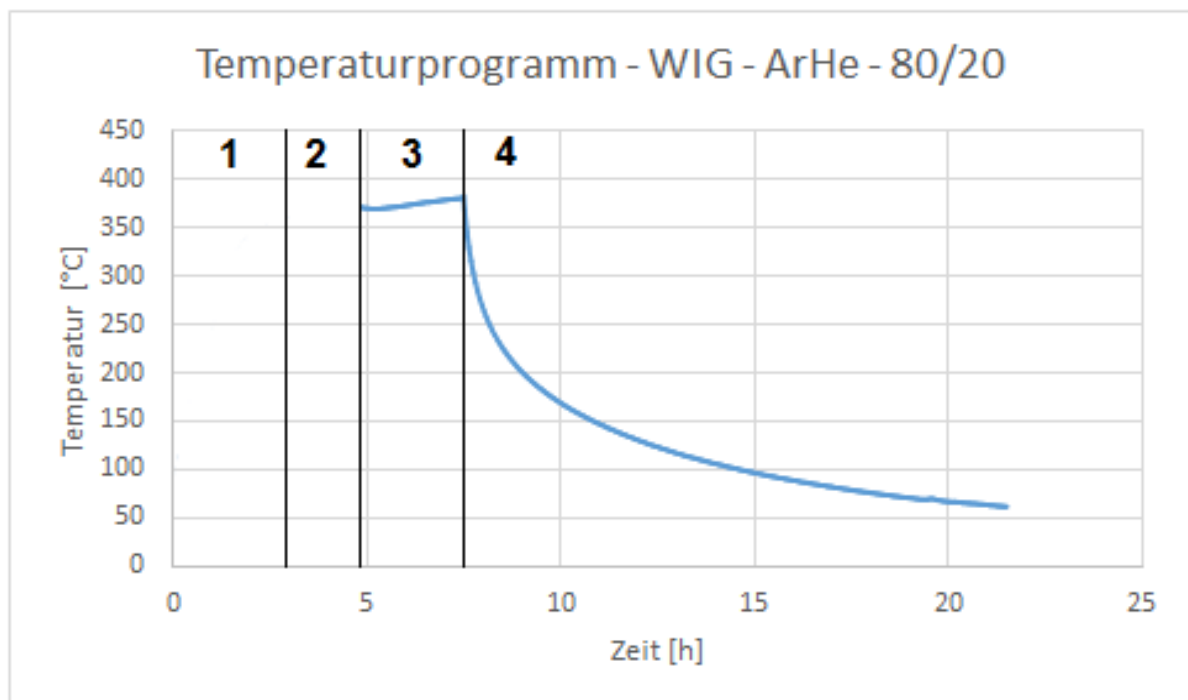


Abbildung 39: Temperaturprofil – WIG-Schweißung ArHe 80/20, 1..Vorwärmung (konnte nicht aufgezeichnet werden), 2..Temperaturverlauf der Glocke während der Schweißung (konnte nicht aufgezeichnet werden – Begründung: vergleiche Kapitel 4.3), 3..3 –stündiges Spannungsarmglühen, 4..langsame Abkühlung der Platte

4.10 Finaler Schweißversuch – WIG – Schweißung an Glocke mit Argon-Helium Mischgas

Aufgrund der geringeren Porosität aus dem Schweißversuch 1 an Probeplatte mit Argon-Helium Mischgas (vergleiche mit 4.6.1) und der erhofften besseren Schweißbarkeit (höhere Viskosität des Schmelzbades beim Schweißen in steigender Position) wurde das Argon – Helium Mischgas 50/50 verwendet. Weiters wurde dieses mal eine Fuge durch die komplette Glockenwandung geschnitten (Länge 115 mm – Breite 15 mm). Dies sollte einen ausgeschliffenen Riss simulieren bei dem es aufgrund des Rissverlaufes erforderlich war einen Teil der Glockenwandung zu entfernen.

Bei diesem finalen Versuch wurden auch Untersuchungen zur Bestimmung der Änderung des Verhaltens von Klang und Eigenspannungen einer Glocke durch Schweißarbeiten unternommen.

4.10.1 Klangbestimmung

Um eine eventuelle Änderung des Klangspektrums durch die Schweißung festzustellen, wurde dieses vor und nach der Schweißung aufgenommen. Dazu wurde die Glocke mittels eines Kunststoffhammers am Schlagring mechanisch angeregt und das sich ergebende Spektrum aufgenommen. Die Auswertung des Klangspektrums erfolgte durch die Firma Grassmayr.

4.10.2 Eigenspannungsmessung

Diese wurde durch die Bohrlochmethode ebenfalls vor und nach der Schweißung durchgeführt, um die Eigenspannungszustände zu vergleichen. Bei dieser Methode wurde eine Dehnmessrosette auf der Glockenoberfläche angeklebt und anschließend in deren Mitte ein zylindrisches Loch mit 1,5 mm Tiefe und 1,6 mm Durchmesser mittels eines pneumatisch angetriebenen Fräasers in 20 Schritten gebohrt. Während des Bohrvorgangs wurde dabei nach jedem Bohrschritt die Dehnungsänderung gemessen und daraus die Eigenspannungen berechnet.

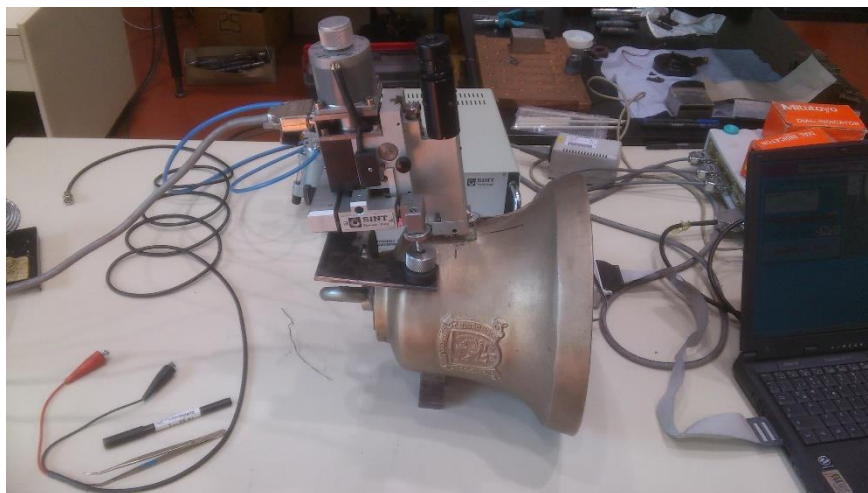


Abbildung 40: Eigenspannungsmessung mittels Bohrlochmethode an der Glocke aus finalem Schweißversuch

4.10.3 Schmelzbadsicherung

Der Fugeneinschnitt an der Glocke erforderte eine Schmelzbadsicherung, um die einzelnen Schweißlagen aufbauen zu können. Dabei werden, wie im Kapitel 2.5.1 erwähnt, oft plattenförmige Unterlagen aus Eisen, Kupfer oder Formkohle verwendet. Aufgrund der Verfügbarkeit und um das Schmelzbad vor dem Einfluss von Fremdmaterial zu schützen, wurde jedoch eine Konstruktion aus Keramikplatten gefertigt.



Abbildung 41: Schmelzbadsicherung aus finalem Schweißversuch, Bilder von links nach rechts:
1. Positionierung der Keramik-Kupferverbindung an der Glockeninnenseite, 2. Anheften der Kupferplatte an der Glockeninnenseite mittels MAG-Schweißverfahren, 3. Reihe an angehefteten Kupferplatten, 4. Keramikplatten mit Flüssiggas-gefüllten Bohrlochsenkungen

Dabei wurden die Keramikplatten gebohrt (Bohrlochdurchmesser 4 mm), gesenkt und mit Senkkopfschrauben an 1 mm dicke Kupferplatten fixiert. Anschließend wurde diese Konstruktion mittels MAG - Verfahren (Metall-Aktivgas) an die Glocke geheftet, wobei es aufgrund der hohen benötigten Schmelzleistung der Glockenbronze kaum zu einer Beeinträchtigung der Glockenoberfläche kam. Um ein Aufschmelzen der Senkkopfschrauben während der Glockenschweißung zu verhindern, wurden die Senkungen in den Keramikplatten mit Flüssiggas gefüllt.

4.10.4 Durchführung

Schweißverfahren	Wolfram-Inertgas
Schweißmaschine	Fronius MagicWave 2000 Fuzzy
Elektrode	Wolfram mit 2% Ceroxid(grau)
Elektrodenabmessung	Durchmesser 2,4 mm x Länge 175 mm
Polung	negativ auf Elektrode
Schutzgas / Durchsatz	Argon-Helium Mischgas 50-50 / 15 l/min
Schweißzusatz	Artgleich mit Grundwerkstoff
Schweißzusatzabmessungen	Durchmesser 5 mm x Länge 300 mm
Stromstärke / Art	130 - 100 Ampere / Gleichstrom
Anzahl der Schweißraupen / -lagen	16 / 6
Schweißposition	Wannenlage (PA)
Gesamtschweißdauer	1h 05 min

Tabelle 11: Schweißtechnische Parameter aus finalem Schweißversuch

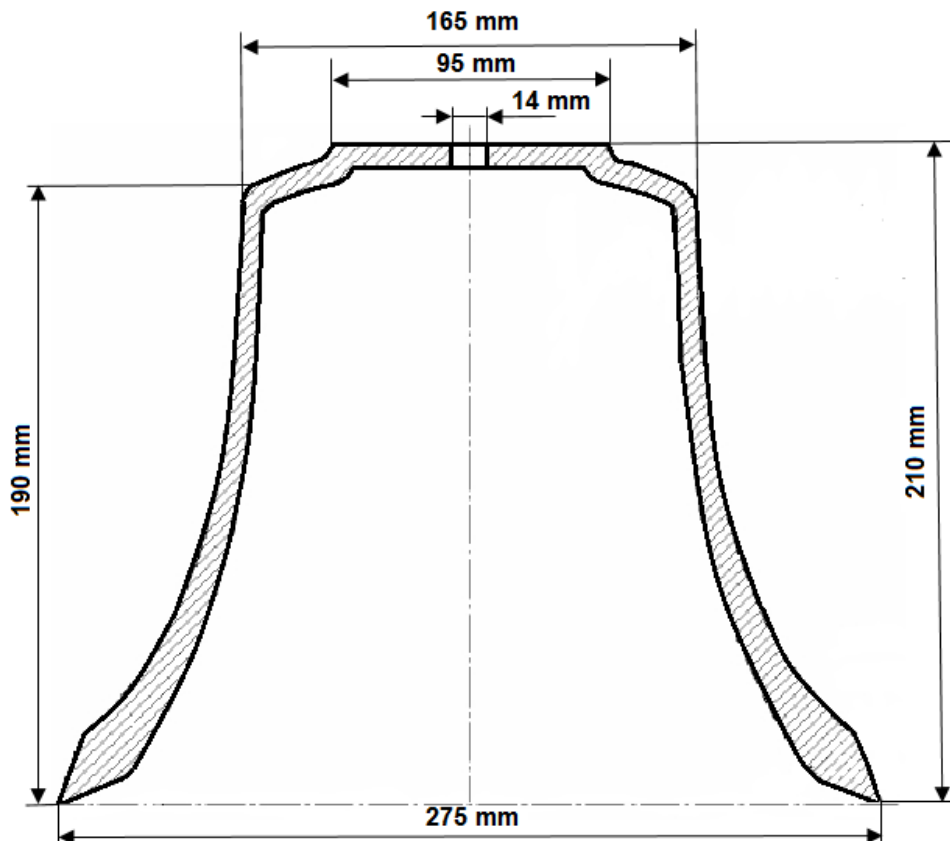


Abbildung 42: Querschnitt und Abmessungen der geschweißten Glocke aus finalem Schweißversuch

Bei der Schweißung wurde eine neue Glocke mit, im Vergleich zu den beiden WIG – Schweißversuchen an Glocke mit Helium-Schutzgas, geringfügigen Unterschieden im Querschnitt bzw. der Glockenrippe verwendet. Geschweißt wurde abermals in Wannenposition (PA), da die geringe Viskosität des Schmelzbades keinen Aufbau der Schweißlagen in Steigposition (PF) zuließ.



Abbildung 43: links: Schweißung der Glocke; rechts: thermisch isolierte Glocke, dunkle Verfärbung der Oberfläche aufgrund der Zunderung

Die einzelnen Schweißlagen wurden entlang der Fuge (bei den Versuchen 6 und 7 erfolgten diese quer zur Fuge), gestützt durch die Schmelzbadsicherung, gesetzt. Ein Temperaturverlauf konnte aufgrund technischer Probleme (Absturz der Software zur Temperatureaufzeichnung) während der Vorwärmung nicht aufgezeichnet werden. Auch während des Spannungsarmglühens und der Abkühlung im Glühofen war dies nicht möglich, da die Thermoelemente während der Schweißung durch das flüssige Schweißbad durchgeschmolzen wurden. Jedoch dürfte der Temperaturverlauf dem aus Schweißversuch 2 an Glocke mit Helium-Schutzgas (vergleiche mit Abbildung 35) sehr ähnlich sein. Die Vorwärmung erfolgte wiederum innerhalb von 5 Stunden auf ca. 460 °C. Nach der 1-stündigen Schweißung wurde bei der gleichen Temperatur (460°C) 3 Stunden spannungsarmgeglüht (gemessen mit Temperatur- Multimeter). Lediglich der Abkühlvorgang hat wesentlich länger gedauert (144 Stunden), da die thermische Isolierung während der Abkühlung im Glühofen nicht entfernt wurde. Nach dem Spannungsarmglühen sollte die Abkühlung möglichst langsam erfolgen, um die Eigenspannungen während dieses Vorgangs auf ein Minimum zu halten.

5 Ergebnisse

5.1 Poren- und Schmauchbildung

Hauptverantwortlich für die Porenbildung ist der hohe Sättigungsdampfdruck des Bleis oberhalb des Schmelzpunktes (vergleiche Kapitel 2.8) aufgrund der hohen Temperaturen, die während des Schweißvorganges entstehen. Blei befindet sich als „Verunreinigung“ in der Kupfer-Zinnlegierung (siehe 5.2.1).



Abbildung 44: links: Blei-Verunreinigungen in Glockenbronze, Aufnahmen am Lichtmikroskop Zeiss Z1m Observer; rechts: Pb-Ausdampfung im festen Zustand im Zugversuch bei 350 °C [37]

Wenn sich aus einer flüssigen oder festen Phase austretende (verdampfende oder sublimierende) Teilchen mit denen aus einer gasförmigen Phase auftreffenden (kondensierenden oder resublimierenden) Teilchen im stationären Gleichgewicht befinden, wird dies als Sättigungszustand bezeichnet. Der im Sättigungszustand vorherherrschende Druck ist dabei der Sättigungsdampfdruck, welcher vom chemischen Element bzw. der Verbindung und der Temperatur abhängig ist (siehe Abbildung 45). Sobald der umgebende Druck niedriger als der Sättigungsdampfdruck ist, verdampft bzw. sublimiert das chemische Element bzw. die Verbindung [28].

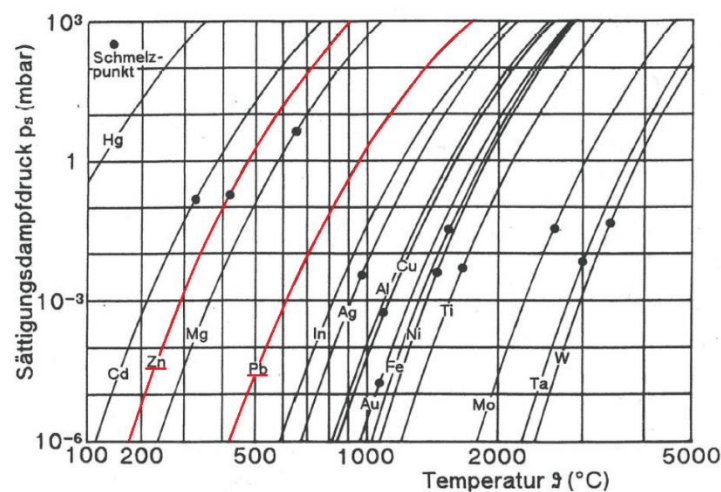


Abbildung 45: Sättigungsdampfdruck p_s verschiedener Metalle in Abhängigkeit der Temperatur ϑ , Rot markiert die in der Glockenbronze befindlichen Elemente Zink (Zn) und Blei (Pb) [28]

Während des Aufschmelzens beim Schweißen der Glockenbronze versuchen dabei die Elemente Zink und Blei vom festen über den flüssigen in den gasförmigen Zustand zu gelangen, wobei es vor allem bei Blei zu einer starken Volumenausdehnung kommt. Die Entgasungsbedingungen sind dabei stark von der Schmelzbadviskosität abhängig, wobei die Entgasung beim Einsatz von Helium aufgrund der Bildung eines heißen Schmelzbades mit geringer Viskosität besonders gut funktioniert und somit für porenärmere Schweißnähte sorgt (siehe 2.8.2.2). Die beschriebene Schmauchbildung ist damit zu erklären, dass sich die ausgasenden Elemente mit Sauerstoff aus der Atmosphäre verbinden und die gebildeten Oxide an den Schweißlagen resublimieren.

5.2 Ergebnisse aus den EDX Untersuchungen

Beim Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) der Probepplatten und Glocken, mit Argon, Helium sowie Argon-Helium-Mischgase, kam es zur Ausbildung einer Zunderschicht sowie zur punktuellen Schlackebildung auf der Schweißnaht. Weiters bildete sich eine weiß-gelbliche Schmauchschiicht neben der Naht. Um eine chemische Analyse dieser Reaktionsprodukte zu erhalten, wurden Proben genommen. Anschließend wurden diese im institutseigenen Rasterelektronenmikroskop (REM), vom Typ LEO Zeiss 1450 VP mit X-Flash Detektor von Bruker für die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX), untersucht.

5.2.1 Grundwerkstoff

Neben den Reaktionsprodukten während des Schweißprozesses (Zunderschicht, Schlacke und Schmauch) wurde auch der plattenförmige Grundwerkstoff untersucht (siehe Schweißversuche 4.1.1 bis 4.4 sowie 4.6.1 und 4.6.2).

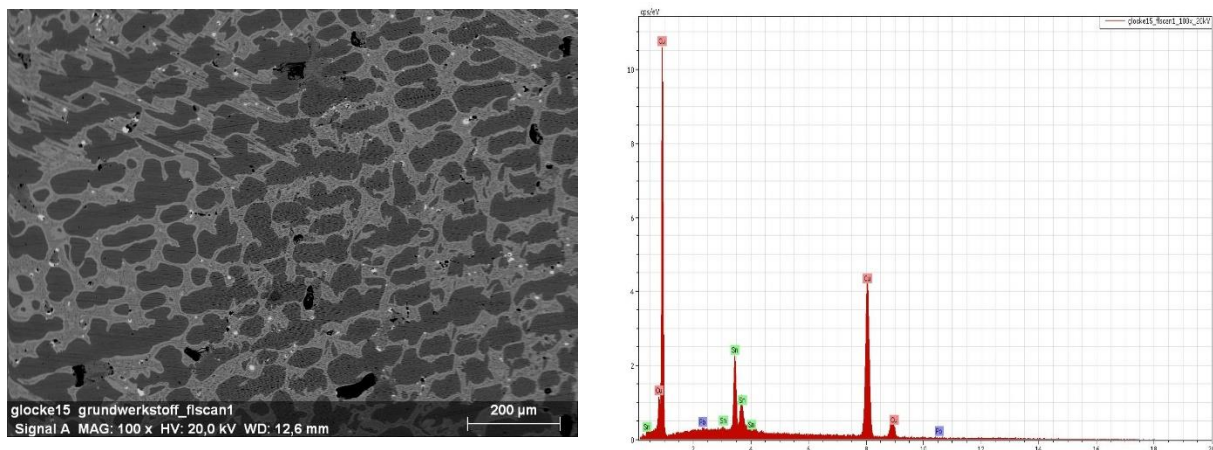


Abbildung 46: EDX-Flächenscan des Grundwerkstoffs

Im Gegensatz zu den anderen EDX-Untersuchungen (5.2.2 bis 5.2.4) wurde hier ein EDX-Flächenscan (Abbildung 46 - links) durchgeführt, um die chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffes zu ermitteln. Die Quantifizierung gelang aufgrund der inhomogenen Phasenverteilung und der Poren (schwarze Stellen) im Werkstoff jedoch nur bedingt. Das Spektrum ergab Kupfer (Cu) und Zinn (Sn) als Hauptelemente, sowie Spuren von Blei (Pb). Blei ist im festen Kupfer nicht löslich [2] und liegt im Gefüge als Einschluss vor. In Abbildung 46 sind die Bleieinschlüsse im Gefüge aufgrund des Z-Kontrasts im BSE (Back-Scattered-Electrons)-Detektors gut

als weiße Punkte erkennbar. Zur Detektion der vermuteten Begleitelemente (Phosphor, Eisen, Aluminium, Silizium, Zink etc.) in geringer Konzentration ist diese Analysemethode ungeeignet.

5.2.2 Zunderschicht

Wie in der Literatur (vergleiche mit Kapitel 2.7.11) angeführt, gelten Kupfer-Zinn-Legierungen bis in etwa 350°C als zunderungsbeständig. Da bereits bei der Vorwärmung höhere Temperaturen erreicht wurden, kam es auch zur Zunderung aus den Versuchen der Probestplatten bzw. der Glockenoberflächen (vergleiche mit Abbildungen 28 bzw. 43).

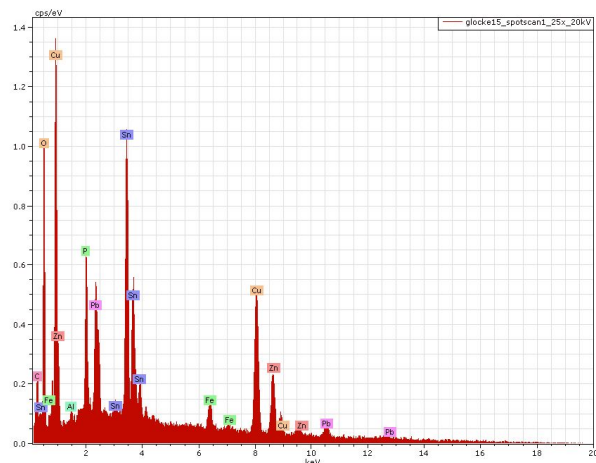


Abbildung 47: Bild der abgeplatzen Zunderschicht aus Schweißversuch 4.3 mit dem zugehörigen EDX-Spotscan, das orange Kreuz markiert dabei die analysierte Stelle

Die EDX Analyse der entnommenen Zunderschicht in Abbildung 47 ergab eine hohe Konzentration an Kupfer (Cu), Zinn (Sn), Sauerstoff (O), Phosphor (P) sowie Blei (Pb). In geringeren Mengen sind die Elemente Eisen (Fe), Aluminium (Al), Zink (Zn) und Kohlenstoff (C) vorhanden. Eine genaue Bestimmung der stöchiometrischen Zusammensetzung der chemischen Verbindungen ist mit der EDX- Analysemethode nicht bzw. nur bedingt möglich. Jedoch kann man aufgrund der Zunderungsreaktion von Kupfer(I)-Oxid bzw. Kupfer(II)-Oxid (CuO) als Hauptbestandteil ausgehen, wie in Literatur [2] angegeben. Weiters wird in der Literatur [2] eine besonders starke Zinnanreicherung der Oxidschicht beschrieben, welche als Zinndioxid (SnO₂) vorliegt. Der Vergleich mit dem EDX-Spektrum (Abbildung 47 - rechts) legt nahe, dass eine solche Zinnanreicherung auch hier stattgefunden hat.

5.2.3 Schlacke

Dabei wurde die erwähnte punktförmige Schlacke (vergleiche mit Abbildung 34) untersucht, welche sich vereinzelt auf den Schweißraupen bildete.

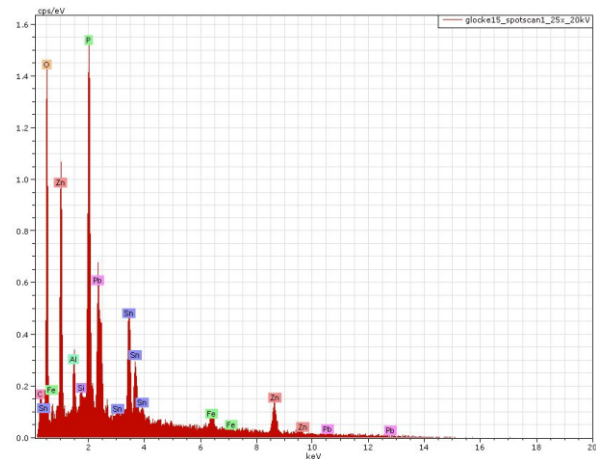
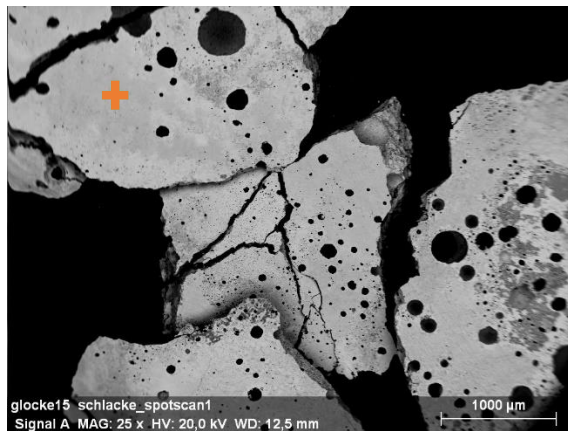


Abbildung 48: Spotscan 1 Schlacke

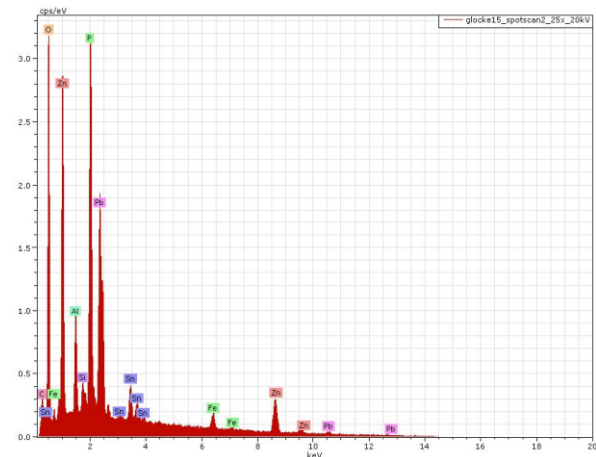
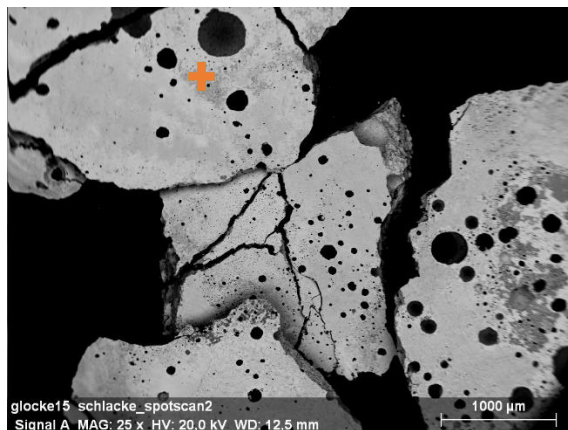


Abbildung 49: Spotscan 2 Schlacke

Im Spotscan 1 (Abbildung 48) wurde die helle Phase und im Spotscan 2 (Abbildung 49) die dunklere Phase untersucht. Der unterschiedliche Kontrast der beiden Stellen ergibt sich aufgrund der verschiedenen chemischen Zusammensetzung. Das Spektrum von Spotscan 2 weist dabei höhere Konzentrationen an Sauerstoff (O), Zink (Zn), Phosphor (P), Blei (Pb) sowie Aluminium (Al) als jenes von Spotscan 1 auf. Der Zinngehalt ist jedoch geringer als bei Spotscan 1. Aus der EDX-Untersuchung geht hervor, dass der Hauptbestandteil der Schlacke Phosphorpentoxid (P_4O_{10}) sein dürfte. In Kupfer-Zinn-Schmelzen wird Phosphor im Überschuss zugegeben um den Sauerstoff in der Schmelze zu reduzieren. Das dabei entstehende Reaktionsprodukt ist Phosphorpentoxid welches aus der Schmelze verdampft oder als Schlacke vorliegt. Während des Schweißvorgangs dürfte sich entweder Restphosphor mit Sauerstoff in der Schmelzzone zu Phosphorpentoxid verbunden haben oder es lag noch Restschlacke aus dem vorangegangenen Gießprozess im Schweißzusatz oder im Grundwerkstoff vor.

5.2.4 Schmauch

Während der Abkühlung der Schweißraupen bildete sich eine weiß-gelbliche Schmauchschicht an den Raupen und am Übergang zwischen den Raupen und dem Grundwerkstoff aus. Der Schmauch wurde mit einem Graphitband abgezogen und im REM untersucht (siehe Abbildung 50 – links).

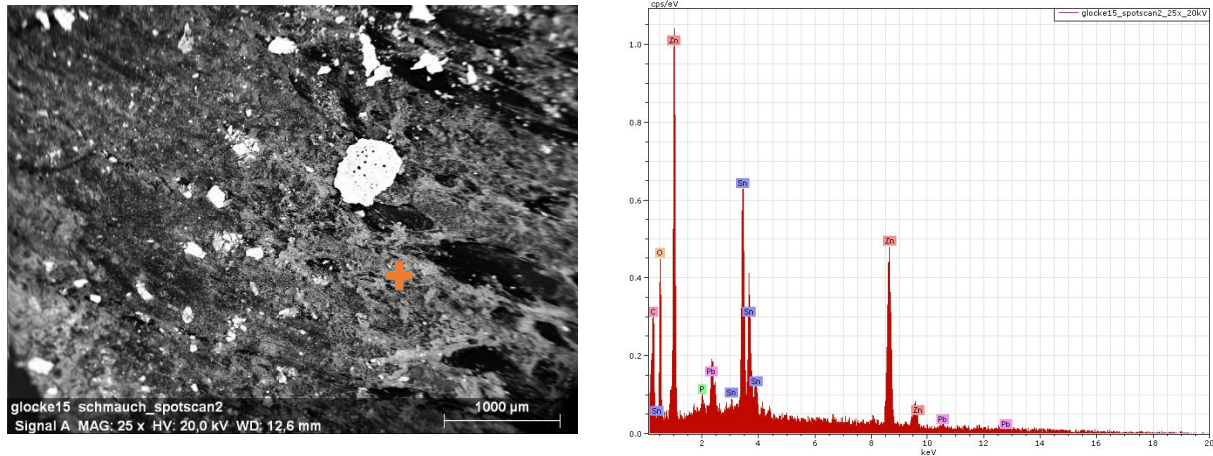


Abbildung 50: untersuchte Schmauchschicht, bei den weißen Partikeln handelt es sich um Schlacke

Das EDX Spektrum in Abbildung 50 - rechts zeigt auffällig hohe Zinn- und Zinkgehalte. Die Blei-, Sauerstoff- und Phosphorkonzentrationen sind, verglichen mit Zunder und Schlacke, hingegen relativ niedrig. Der hohe Anteil an Kohlenstoff lässt sich damit erklären, dass sich die dünne Schmauchprobe auf einem Graphitband befand, wobei auch die spezifische Energie der emittierten Röntgenstrahlung von Kohlenstoff (Graphitband) detektiert wurde. Der hohe Zinkgehalt sowie der weißliche Farbanteil des Schmauchs lässt den Schluss zu, dass es sich beim Hauptbestandteil des Schmauchs um Zinkoxid (ZnO) handelt, wobei frisch gebildeter Zinkoxid-Rauch (z.B. beim Schweißen) die Atemwege reizen und zum „Zinkfieber“ führen kann [29]. Zinn und Blei liegen wahrscheinlich ebenfalls als Oxide vor; und zwar als Zinndioxid (SnO_2) - wie in Kapitel 5.2.2 bereits erwähnt – das ebenfalls als weißliches Pulver vorliegen kann [30] sowie Blei(II)-oxid (PbO), welches in der Modifikation Massicot als gelbliches Pulver vorliegt [31].

5.3 Makroskopische Analyse der Porenhäufigkeit aus den Schweißversuchen

Die makroskopischen Untersuchungen betreffen das Schweißgut der Platten und der Glocken aus den durchgeführten Versuchen, um den Einfluss der Schweißverfahren bzw. der Schweißparameter auf die Porosität zu ermitteln.

5.3.1 WIG-Schweißung an Probepplatten mit Argon-Schutzgas

Abbildung 51 zeigt erhebliche Porenbildung (bis ca. 4 mm Durchmesser) im Schweißgut und damit nur ein unbefriedigendes Ergebnis. Während der Schweißung kam es zu einer gelblich/weißen Schmauchbildung an bzw. neben den Schweißraupen. Der Schmauch wurde später im Rasterelektronenmikroskop untersucht, wobei ein hoher Anteil an Zink- und Bleioxid festgestellt wurde (siehe Kapitel 5.2.4). Dies deutet darauf hin, dass es während der Schweißung zur Entgasung von Zink und Blei gekommen ist und damit Poren in der Schmelzzone verursacht wurden. Beide Elemente weisen einen hohen Sättigungsdampfdruck bei relativ niedrigen Temperaturen auf (siehe Abbildung 45).

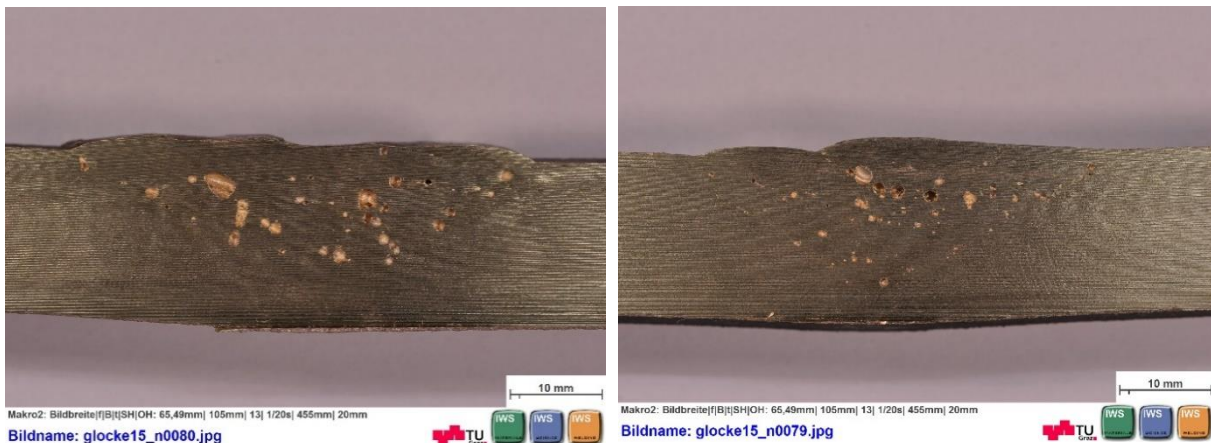


Abbildung 51: Poren im Querschnitt der Schweißgüter bei 100%Ar,
links: mit 300 Ampere , rechts: mit 250 Ampere

5.3.2 Elektronenstrahlschweißung

Wie in Kapitel 4.3 Schweißversuch 3 erwähnt, war der Mechanismus welcher in den ersten beiden Schweißversuchen zur Porenbildung führte noch unbekannt. Um jedoch den Einfluss der Atmosphäre auszuschließen, wurde unter Vakuum in der Elektronenstrahlanlage geschweißt.



Abbildung 52: makroskopische Untersuchung der Schmelzzonen nach der EBW-Schweißung

Die Querschnitte aus Abbildung 52 zeigen viele kleinere Poren in der Wärmebeeinflussten Zone (WEZ) bzw. größere Poren an der Schmelzlinie. Somit kann ein atmosphärischer Einfluss auf die Porenbildung ausgeschlossen werden und ein Verdampfen oder Sublimieren von Legierungselementen gilt als wahrscheinliche Ursache der Poren. Das Schweißbad selbst ist nahezu porenfrei. Dies ist damit zu erklären, dass das Schmelzbad während des Schweißprozesses lange genug niedrigviskos bzw. dünnflüssig bleibt um eine Entgasung der Elemente zu ermöglichen, wobei dieser Prozess durch das umgebende Vakuum noch begünstigt wurde. In der WEZ bzw. an der Schmelzlinie war dies nicht möglich, da durch den Wärmebeeinfluss die Legierungselemente zwar verdampften aber durch den festen Aggregatzustand die gasförmigen Elemente nicht entweichen konnten und somit Poren bildeten.

5.3.3 WIG-Schweißung an Probeplatte mit Helium-Schutzgas

Die starke Porenbildung beim WIG Schweißen mit Argon (Schweißversuche 4.1.1 und 4.1.2) führten dazu das Schutzgas auf Helium zu wechseln, um einen tieferen Einbrand und ein höherenergetisches, thermisches Plasma zu erhalten und somit für eine bessere Schmelzbadentgasung zu sorgen.



Abbildung 53: Geringfügiger Porenanteil im Querschnitt des Schweißgutes bei 100% He

Aus Abbildung 53 ist ein wesentlich geringerer Porenanteil im Schweißgut verglichen mit Abbildung 51 erkennbar. Dies ist damit zu erklären, dass das Schweißbad beim Einsatz von Helium als Schutzgas bzw. als thermisches Plasma, eine niedrigere Viskosität aufweist und Blei bzw. Zink länger Zeit haben zu entweichen bevor das Schmelzbad wieder erstarrt.

5.3.4 Gasschmelzschweißung

Bei diesem Verfahren wird Acetylen mit Sauerstoff verbrannt und sorgt so für die nötige Schmelzwärme (siehe Kapitel 2.8.1.1). Das makroskopische Ergebnis zu diesem Versuch liefert Abbildung 54.

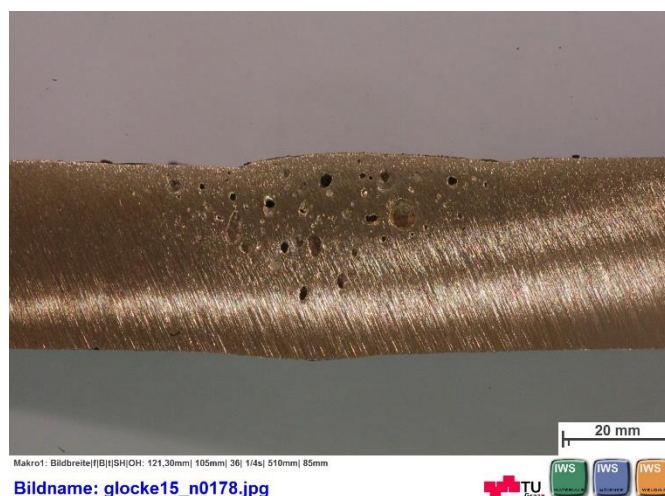


Abbildung 54: Starke Porenbildung im Querschnitt des autogenen Schweißbades

Das Ergebnis aus diesem Versuch zeigt einen hohen Porenanteil, wahrscheinlich aufgrund der Affinität von Bronzelegierungen zur erhöhten Sauerstoffaufnahme während der Schweißung.

5.3.5 WIG - Glockenschweißung mit Heliumschutzgas

Die überstehenden Schweißlagen wurden nach dem Schweißen abgeschliffen und der Glockenkontur angepasst. In Abbildung 55 ist dabei der rund 50 mm lange Riss erkennbar, welcher aufgrund der zu geringen Vorwärmtemperatur der Glocke und der hohen eingebrachten Energie während der Schweißung entstand (Thermospannungen). Der Rissverlauf erstreckte sich dabei durch die gesamte Glockenwandung. Mikroskopische Untersuchungen der Bruchflächen von Glockenbronze zeigten, dass Risse vor allem durch die δ -Phase verlaufen (vergleiche mit [37]). Bezüglich der Porosität weist die geschweißte Glocke einen sehr geringen Anteil auf (siehe Abbildung 55).



Abbildung 55: makroskopische Untersuchung der Glockenoberfläche nach der WIG-Schweißung mit 100%He / Rissbildung (roter Kreis) durch zu geringe Vorwärmtemperatur

Bei der zweiten WIG-Glockenschweißung mit Heliumschutzgas konnte durch die höhere Vorwärmtemperatur und durch die verbesserte thermische Isolierung die Glockentemperatur (siehe Kapitel 4.7) während der Schweißung auf dem erforderlichen Niveau gehalten werden. Dadurch konnte eine Rissbildung während der Schweißung verhindert werden. Auch bei diesem Versuch zeigte sich der Einsatz des Heliumschutzgases bezüglich der geringen Porenanteils als vorteilhaft (siehe Abbildung 56).



Abbildung 56: makroskopische Untersuchung der Glockenoberfläche nach der WIG-Schweißung mit 100%He / ohne Riss

5.3.6 WIG-Schweißung an Probestplatten mit Argon – Helium – Mischgasen

Abbildung 57 links zeigt auf Grund des höheren He-Anteiles von 50% einen etwas geringeren Porenanteil im Plattenquerschnitt als Abbildung 57 rechts, bei dem mit 20% He-Anteil geschweißt wurde.

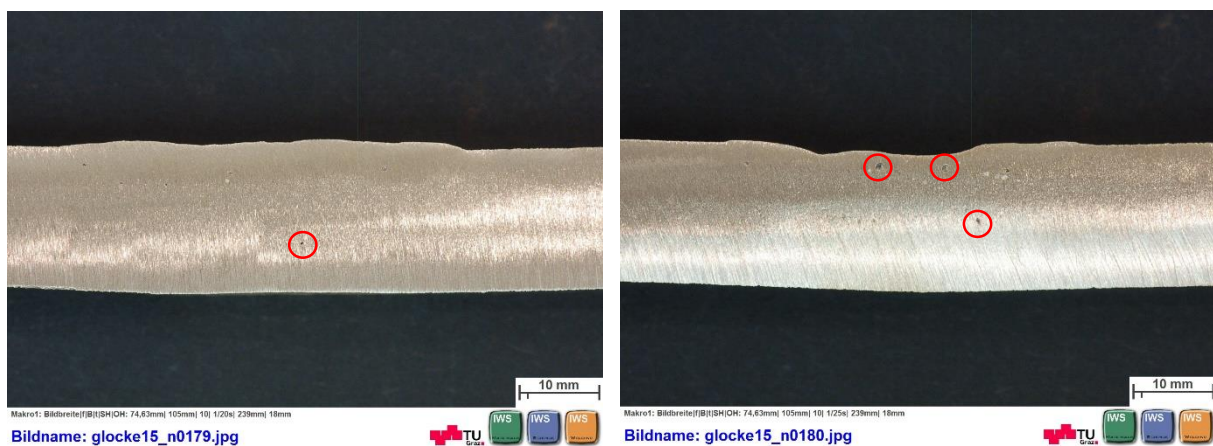


Abbildung 57: makroskopische Untersuchung des Querschnitts in der Schmelzzone
links: Ar-He 50/50, rechts: Ar-He 80/20

5.3.8 Finaler Schweißversuch

Das makroskopische Ergebnis aus diesen Versuch weist einen hohen Porenanteil im Schweißgut auf. Die starke Porenbildung verlief gegen die Erwartungen aus dem makroskopischen Ergebnis der WIG-geschweißten Probeplatte mit Argon-Helium-Mischgas (siehe Abbildung 57-links).

Dies könnte aufgrund schlechterer „Entgasungsbedingungen“ der Zink- und Bleidämpfe bei der Glockenschweißung im Vergleich zur Plattenschweißungen geschehen sein. Eine andere Erklärung wäre ein höherer Zink- bzw. Bleigehalt der Glocke verglichen mit der Probeplatte. Wie in Kapitel 3 beschrieben, wurde zwar versucht die chemische Zusammensetzung zu bestimmen, jedoch war die Streuung der einzelnen Konzentrationswerte zu groß, um diese zuverlässig zu ermitteln.



Abbildung 58: makroskopische Untersuchung der Glockenoberfläche nach der WIG-Schweißung mit 50%He / 50%Ar - unerwartet starke Porenbildung

5.4 Mikroskopische Ergebnisse aus den Schweißversuchen

In den folgenden Kapiteln werden auf Grund der metallographischen Ähnlichkeiten der Mikrostruktur nicht alle Ergebnisse aus den einzelnen Schweißversuchen wiedergegeben.

5.4.1 plattenförmiger Grundwerkstoff

Bei einem Gießprozess von Glockenbronze entstehen im erstarrten Zustand laut Literatur (Kapitel 2.7.2) ein α -Mischkristall und eine intermetallische δ -Phase ($\alpha+\delta$ Eutektoid). Um diese voneinander unterscheiden zu können wurde eine Farbätzung nach Klemm-III durchgeführt und mit der Fachliteratur [32] verglichen.



Abbildung 59: links: Farbätzung von Grundwerkstoff nach Klemm III, rechts: Grundwerkstoff nach OPS-Politur, Bereiche 1..dendritische α -Phase, Bereiche 2.. $\alpha+\delta$ -Eutektoid, blaue Kreise markieren Pb-Einschlüsse

Aus Abbildung 59 – links geht hervor, dass es sich bei den rötlich-gefärbten Bereichen um den α -Mischkristall und den weißen Bereichen um die δ -Phase handelt. Abbildung 59 – rechts zeigt den α -Mischkristall als goldfarbige Phase und die δ -Phase als grau-bläulichen Phase mit goldfarbigen α -Mischkristallen ($\alpha+\delta$ – Eutektoid).

Da bei der metallographischen Probenaufbereitung mit einer OPS-Politur (Oxidierende-Politur-Suspension) gearbeitet wurde und damit ein chemischer Angriff auf die Probenschleife stattfand, konnten auf weitere Farbätzungen nach Klemm III zur Phasenidentifizierung verzichtet werden (vergleiche Abbildung 59 links mit rechts).

Abbildung 59 – Bereiche 2 zeigen längsorientierte α -Mischkristalle sowie die δ -Phase ($\alpha+\delta$ – Eutektoid), welche aus der eutektoiden Phasenumwandlung $\gamma \rightarrow \alpha+\delta$ entstanden (vergleiche Kapitel 2.7.2). Die blauen Kreise markieren Pb-Einschlüsse, welche in der Gußbronze nicht löslich sind. Die Phasenanteile werden auf ca. 90% des α -Mischkristalls (primär und eutektoid) und auf 10% der intermetallischen δ -Phase ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$) geschätzt.

5.4.2 WIG-Schweißung an Probeplatte mit Helium- Schutzgas

Dabei wurden das Schweißgut (SG), die Wärmeeinflusszone (WEZ) sowie der Grundwerkstoff (GW) metallografisch untersucht (siehe Abbildung 60).

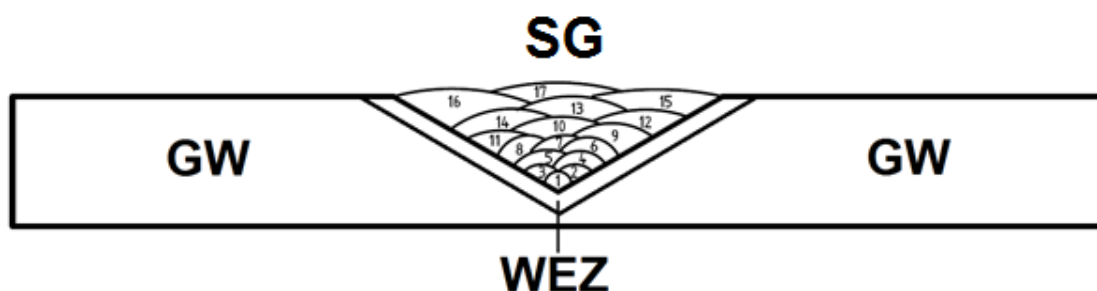


Abbildung 60: metallografisch untersuchte Bereiche aus WIG-Schweißung mit Helium Schutzgas

Aus Abbildung 61 - links ersichtlich ist der Übergang zwischen der Schweißgut (SG) und der Wärmeeinflusszone (WEZ), auch als Schmelzlinie bezeichnet. Abbildung 61 - links zeigt die Schmelzzone mit dendritischer Struktur der α -Phase (länglich-goldfarbig, relativ kleine Dendriten aufgrund der schnellen Aufschmelzung und Abkühlung während des Schweißvorgangs) und die δ -Phase (grau-blau - $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$). Der rote kreisförmig umrandete Bereich zeigt eine auffällige Stelle an der die Konzentration an α -MK-Dendriten verglichen mit der Umgebung sehr gering ist. Abbildung 61 - rechts zeigt die WEZ mit größeren Dendriten aufgrund des langsameren Abkühlvorgangs nach dem Gießprozess. Beide Bereiche, sowohl SG als WEZ, zeigen poröse Stellen (schwarze Bereiche – Abbildung 61) die sich durch das Verdampfen von Pb und dem sich dabei gebildeten Druck während des Schweißprozesses gebildet haben.

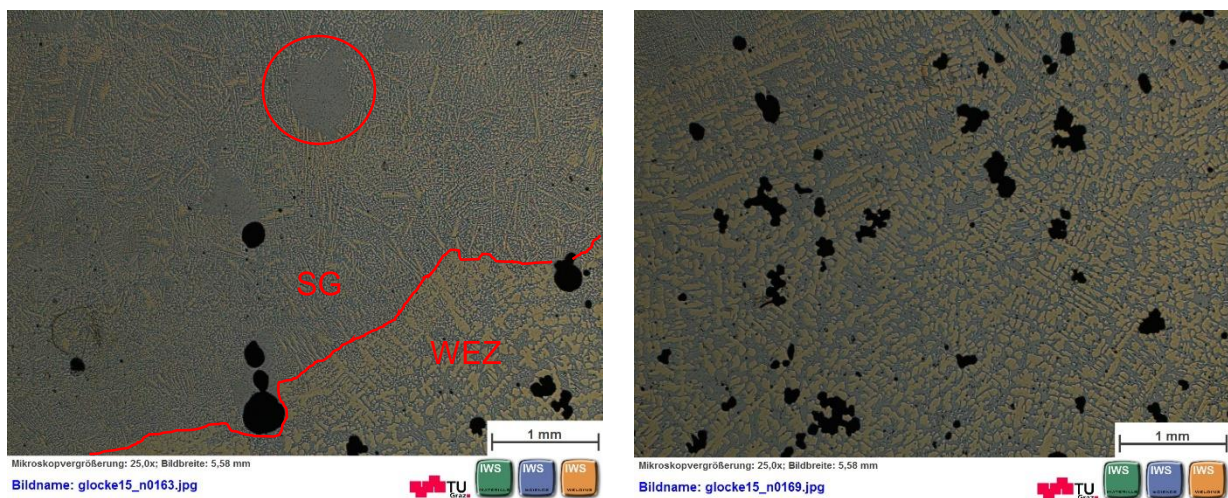


Abbildung 61: Mikrostruktur der WIG-100%He-Schweißung nach OPS-Politur
links: SG und WEZ getrennt durch Schmelzlinie, rechts: WEZ

Abbildung 62 – links zeigt nochmals vergrößert den roten kreisförmig umrandete Bereich aus Abbildung 61 mit einer Verarmung an α - Mischkristallen und somit eine Anreicherung der δ -Phase. Solche Stellen sind vor allem in der Nähe größerer Poren anzutreffen. Dies lässt vermuten, dass ein Ausdampfen der Legierungselemente Blei und Zink der Dendritenbildung der α -Mischkristalle beim Abkühlen der Schmelze entgegenwirkt. Abbildung 62 – rechts zeigt den Grundwerkstoff wobei eine eher geringere Porosität verglichen mit dem SG und der WEZ vorhanden ist.



Abbildung 62: Mikrostruktur der WIG-100%He-Schweißung nach OPS-Politur
links: Detailaufnahme Schweißgut SG mit Verarmung an alpha-Mischkristallen, rechts: GW

5.4.3 Glocke vor und nach der Schweißung

Abbildung 63 zeigt den dendritischen Grundwerkstoff (GW) der Glocke, wobei dieser eine Grundporosität sowie Bleiausscheidungen aufweist. Im Vergleich zur Probestplatte (siehe Abbildung 62 – rechts) hat die Glocke einen höheren Anteil an $(\alpha+\delta)$ - Eutektoid.

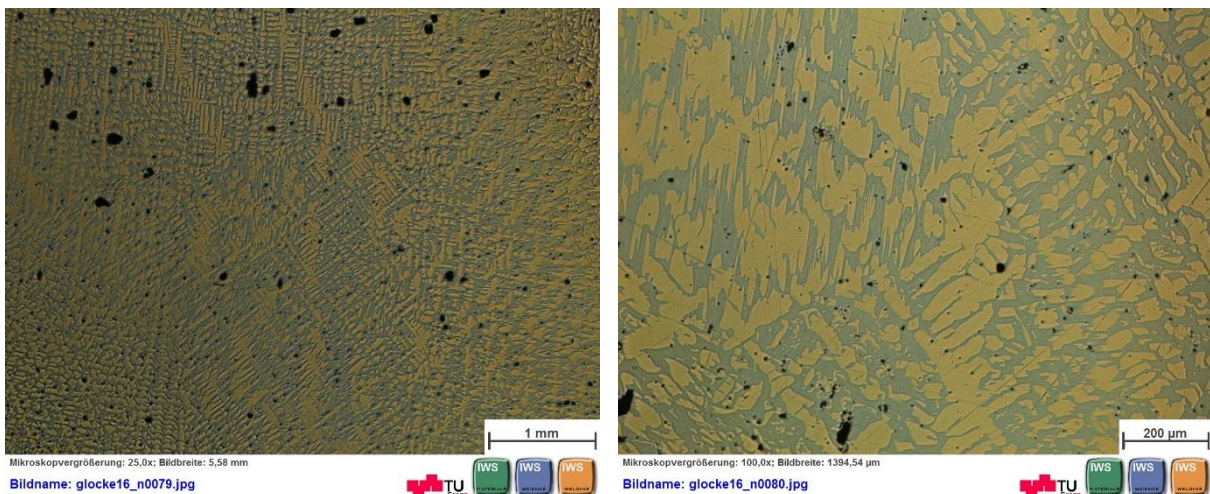


Abbildung 63: Mikrostruktur des Glocken- Grundwerkstoffes vor der Schweißung (OPS-Politur)

Die mikroskopischen Ergebnisse des Glocken – GW vor und nach der Schweißung bzw. nach der Wärmebehandlung (Vorwärmung, Spannungsarmglühen, Abkühlung) zeigen im Wesentlichen keine morphologischen Unterschiede (vergleiche Abbildung 63 mit Abbildung 64). Das untersuchte Schweißgut (SG) aus dem finalen Schweißversuch (Abbildung 65) weist eine hohe Porosität auf. Besonders auffällig sind wiederum jene markierten Bereiche aus Abbildung 65 – links, welche in Porennähe eine „Verarmung“ der α -Phase aufweisen (vergleiche mit Abbildung 62 – links). Weiters zeigt Abbildung 65 – rechts bzw. Abbildung 66 einen Bindefehler innerhalb des SG. Für die Entstehung des Bindefehlers könnte eine zu geringe

Aufschmelzleistung zwischen den Lagen bzw. Schweißraupen während des Schweißens gewesen sein.

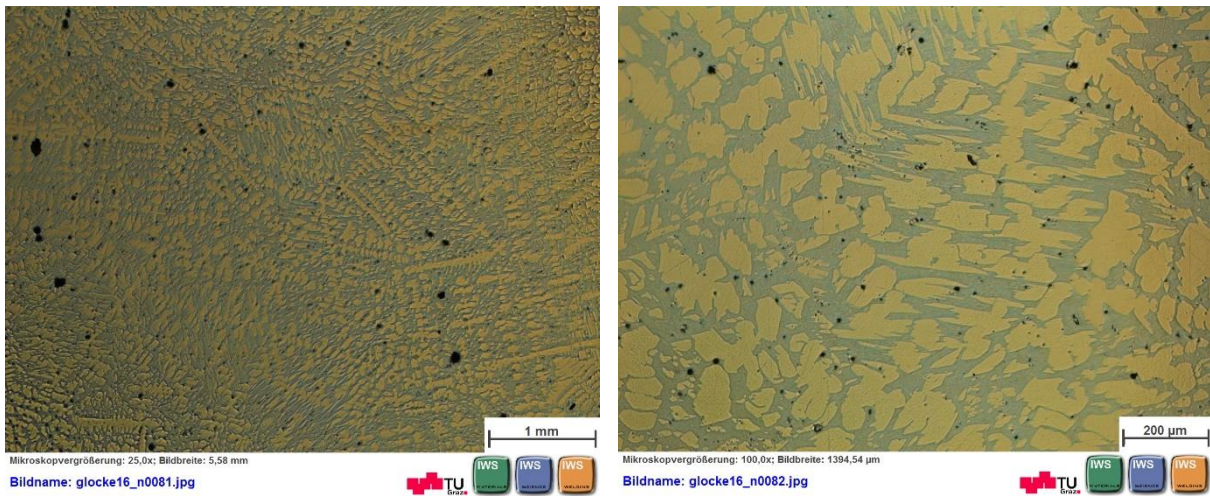


Abbildung 64: Mikrostruktur des Glocken- Grundwerkstoffes nach der WIG-Schweißung mit 50Ar/50He (OPS-Politur)

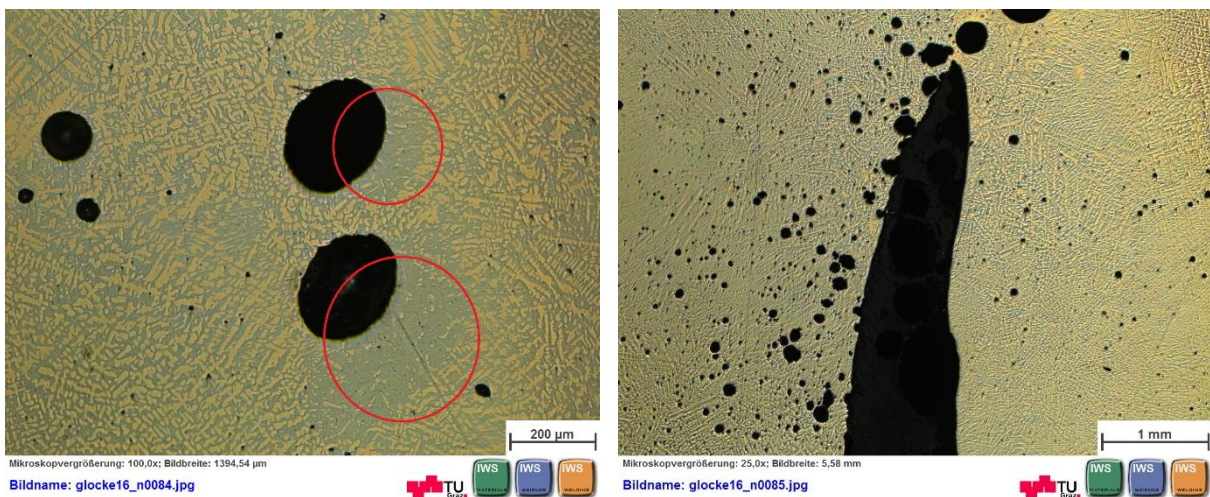


Abbildung 65: Mikrostruktur des WIG- 50Ar/50He Schweißgutes SG (OPS-Politur)
links: markierte Bereiche zeigen Verarmung der α -Phase in Porennähe, rechts: Bindefehler innerhalb des SG



Abbildung 66: überbelichtete Detailaufnahme des Bindefehlers mit darunterliegenden Poren

5.4.4 Zunderschichtdicke

Die akustischen Eigenschaften einer Glocke werden maßgeblich durch die Glockenwanddicke bzw. der Glockenkontur bestimmt [33]. Die Zunderungsreaktion durch den Luftsauerstoff der Glockenoberfläche beim Vorwärmen erfordert ein Abschleifen der Zunderschicht nach der Reparaturschweißung, wobei auch die Glockenwanddicke reduziert wird. Um den Einfluss der reduzierten Glockenwandung auf die Akustik abschätzen zu können wurde die Zunderschichtdicke bestimmt.

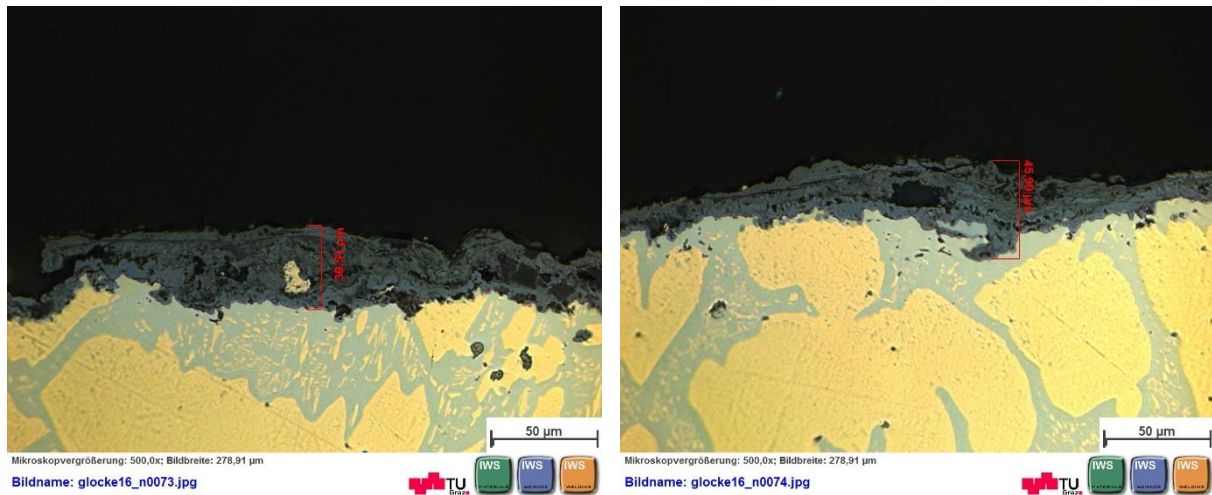


Abbildung 67: Vermessung der Zunderschicht im Schweißgut

Die Vermessung der Zunderschicht nach einer Vorwärmtemperatur von 450°C und einer Gesamtschweißdauer von 1h 30min unter 100% He (siehe Kapitel 4.5.2 sowie Tabelle 9), zeigt eine Dicke im Bereich von etwa 40 – 50 µm, wobei die Zunderung an der Glockenaußenseite sowie an der Innenseite stattfindet und man somit mit einem Wanddickenverlust von 80 – 100 µm rechnen muss.

5.5 Mikrohärtemessung

Bei dieser Untersuchung sollte festgestellt werden, ob während des Schweißprozesses (schnelle Aufschmelzung und schnelle anschließende Abkühlung des Schweißgutes) eine Härteänderung stattfindet. Dazu wurden Mikrohärtemessungen der Glockenbronze (α -Phase und δ -Phase) vor der Schweißung im Grundwerkstoff und nach der Schweißung im Schweißgut durchgeführt und anschließend verglichen.

In Abbildung 68 ist die Mikrohärtemessung der α - sowie der δ -Phase exemplarisch dargestellt.



Abbildung 68: links: Mikrohärtemessung der α -Phase, rechts: Mikrohärtemessung der δ -Phase

5.5.1 WIG-Schweißung an Probeplatte mit Helium- Schutzgas

Die Ergebnisse zeigen, dass die Vickershärte (HV 0,01) der α -Phase nach der Schweißung im Schweißgut etwas höher liegt, verglichen mit der Messung des Grundwerkstoffs vor der Schweißung. Bezüglich der δ -Phase zeigt sich dass diese im Mittel an Härte verloren hat, jedoch ist aufgrund des relativ großen 95%-Konfidenzintervalls eine zuverlässige Aussage über eine Härteabnahme nicht möglich. Dabei beschreibt das 95%-Konfidenzintervall, dass der wahre Wert mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit mit einem \pm Intervall um den Mittelwert liegt. Im Fall der Mikrohärtemessung der δ -Phase aus Tabelle 12 überschneiden sich dabei die Konfidenzintervalle, so dass eine zuverlässige Aussage über eine Härteänderung vor und nach der Schweißung nicht möglich ist.

Mikrohärtemessung HV 0,01 - Probeplatte				
vor Schweißung im GW				
Phase	Messung 1	Messung 2	Messung 3	MW \pm Konf.Int.(95%)
α	144	141	138	141 \pm 3
δ	397	371	281	350 \pm 50
nach Schweißung im SG				
Phase	Messung 1	Messung 2	Messung 3	MW \pm Konf.Int.(95%)
α	165	179	168	171 \pm 7
δ	321	354	285	320 \pm 34

Tabelle 12: Ergebnisse der Mikrohärtemessung an Probeplatte vor und nach der Schweißung

5.5.2 WIG-Schweißung an Glocke mit Argon – Helium Mischgas

Aus den Ergebnissen resultiert ein ähnliches Verhalten bezüglich der Härteänderung wie bei dem vorangegangenen Versuch (Kapitel 5.5.1). Dabei zeigt der Vergleich, vor und nach der Schweißung, dass die Mikrohärte der α -Phasen ansteigt und die der δ -Phase abnimmt (siehe Tabelle 13).

Mikrohärtemessung HV 0,01 - Glocke				
vor Schweißung im GW				
Phase	Messung 1	Messung 2	Messung 3	MW ± Konf.Int.(95%)
α	160	152	158	157 ± 4
δ	464	468	438	457 ± 15
nach Schweißung im SG				
Phase	Messung 1	Messung 2	Messung 3	MW ± Konf.Int.(95%)
α	167	181	178	175 ± 7
δ	372	333	351	352 ± 18

Tabelle 13: Ergebnisse der Mikrohärtemessung an Glocke vor und nach der Schweißung

Eine Zusammenfassung bzw. einen Vergleich der Ergebnisse aus den Mikrohärtemessungen liefert Abbildung 69.

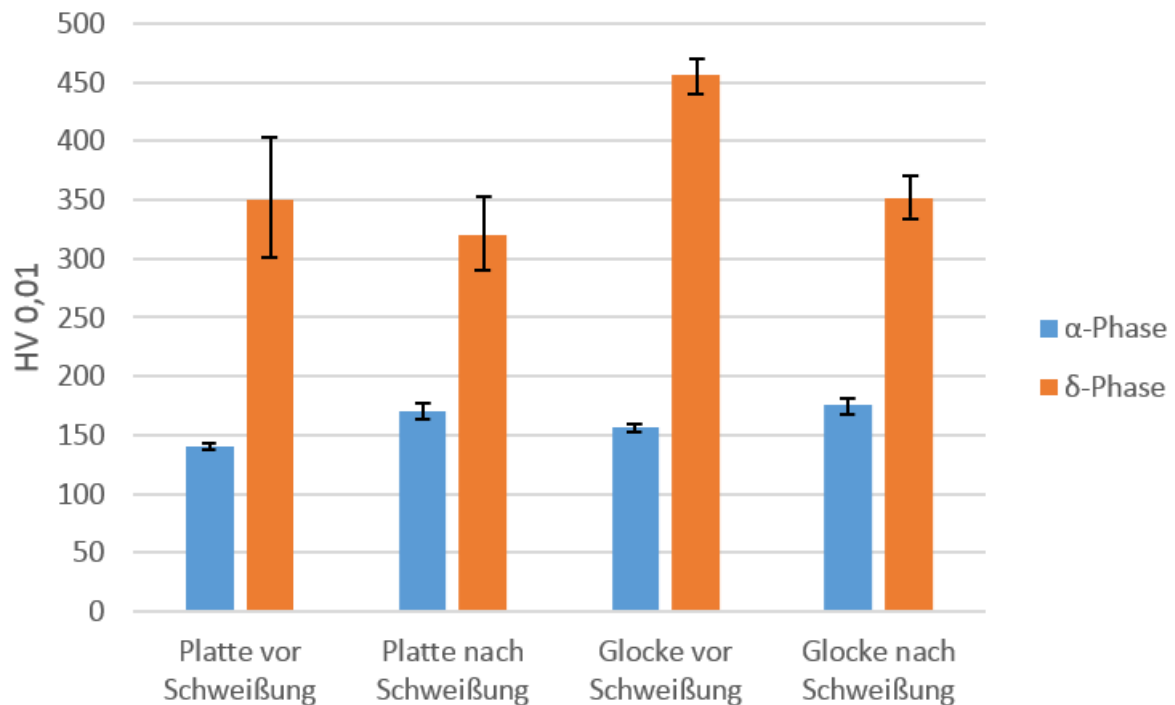


Abbildung 69: Zusammenfassung der Mikrohärtemessungen, die schwarzen Balken stellen das 95%-Konfidenzintervall um den Mittelwert dar

5.6 Klangbestimmung

Die Auswertung des Klangspektrums der Glocke aus dem finalen Versuch vor und nach der WIG-Schweißung mit 50Ar/50He Mischgas (4.10) wurde freundlicherweise von der Firma Grassmayr übernommen und zeigt folgende Ergebnisse.

Frequenz	Cents	Partial	Noten
1090	-2422,8	Unteroktav	Db(3) -29
1105	-2399,2	2. Unteroktav	Db(3) -5
2226,5	-1186,3	Prim	Db(4) +7
2621	-903,9	Terz	E(4) -10
4418	0	Oberoktav	Db(5) -6

Tabelle 14: Ergebnisse aus der Klangbestimmung vor der Schweißung

Frequenz	Cents	Partial	Noten
1083,5	-2417,2	Oberoktav	Db(3) -39
1101,5	-2388,7		Db(3) -11
2201	-1190,3	Prim	Db(4) -12
2213,5	-1180,5		Db(4) -3
2617	-890,6	Terz	E(4) -13
4377,5	0	Oberoktav	Db(5) -22
6095	573		G(5) -49
6400	657,5	Duodezim	G(5) +34

Tabelle 15: Ergebnisse aus der Klangbestimmung nach der Schweißung

Dabei sind Cents (siehe Tabellen 14 und 15) ein Tonhöhenintervall, wobei 1200 Cents einer Oktave entsprechen. Eine Oktave wiederum besteht aus zwölf Halbtönen (12 Intervalle von Prim (1) bis zur Duodezim (12), siehe Partial - Tabelle 19 und 20). Daraus folgt, dass einem Halbtonschritt (z.B. von Prim auf Sekund), 100 Cents entsprechen [34].

Beim Vergleich der Klangspektren vor und nach der Schweißung zeigt sich, dass es zu einer Verschiebung der einzelnen Frequenzen gekommen ist. Die erste Klangaufnahme vor der Schweißung war von der Intensität (Qualität) zu gering, so dass die Duodezim nicht detektiert werden konnte. Bei der Messung nach der Schweißung war die Schwebung (Überlagerung zweier Schwingungen mit annähernd gleicher Frequenz [35]) der Prim und der Unteroktav stärker als vor der Schweißung. Die Schwebung entstand höchstwahrscheinlich durch den Anschlag an zwei verschiedenen Stellen (Klangbestimmung vor und nach der Schweißung) am Schlagring der Glocke.

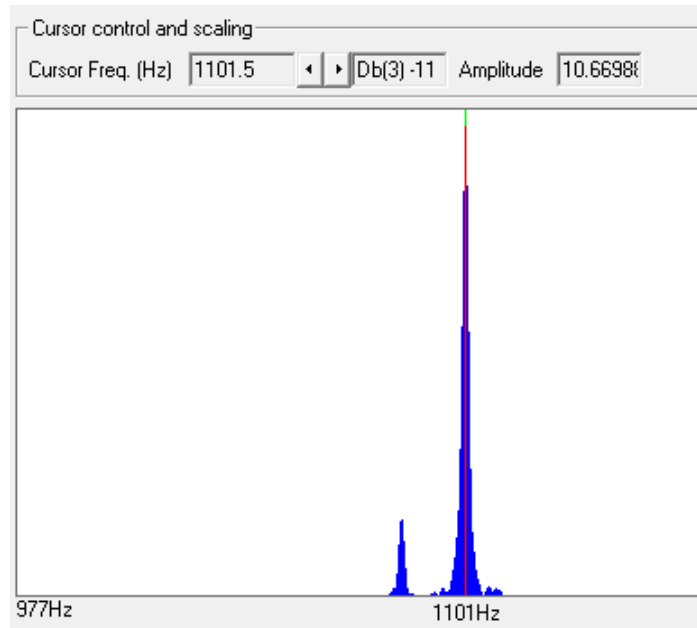


Abbildung 70: Detailfilterung des Klangspektrums mittels der Software Belltuner 1.3a nach der Schweißung im Bereich um 1100 Hz

Weiters zeigt die Detailfilterung des Klangspektrums zwei Unteroktaven (Abbildung 70 – blaue Peaks) welche aus der porösen Schweißung oder auch auf eine Unrundheit der Glocke (auch schon vor der Schweißung möglich) resultieren könnte.

Grundsätzlich lässt sich aus der Klangbestimmung sagen, dass der Glockenklang tiefer wurde. Dies dürfte folgende Ursachen haben:

- Grundwerkstoff sowie Schweißgut sind aufgrund der Zunderung bzw. der Schmauchbildung während der Schweißung an Zinn verarmt und damit der Klang tiefer. Ergebnisse aus der EDX-Untersuchung der Zunderschicht und des Schmauchs legen dies nahe (siehe Kapitel 5.2.2 und 5.2.4). Dabei könnte ein Auflegieren des Schweißzusatzes mit Zinn Abhilfe schaffen.
- Beim Verschleifen der Schweißnaht zur Anpassung an die Glockenkontur und beim Abschleifen der Zunderschicht von der Glocke wurde zu viel Material abgetragen
- Schweißlagen sind poren- bzw. gashaltig
- Raumtemperatur war während der Klangbestimmung nach der Schweißung wärmer

5.7 Eigenspannungsmessung vor / nach der Glockenschweißung

Diese sollen Aufschluss über den Eigenspannungszustand der Glocke vor und nach der Schweißung bzw. nach der Wärmebehandlung geben (vergleiche mit 4.10.2) Vorwärmung ca. in 5h auf 460°C / 1h Schweißen / 3h halten bzw. Spannungsarmglühen / 144h Abkühlung).

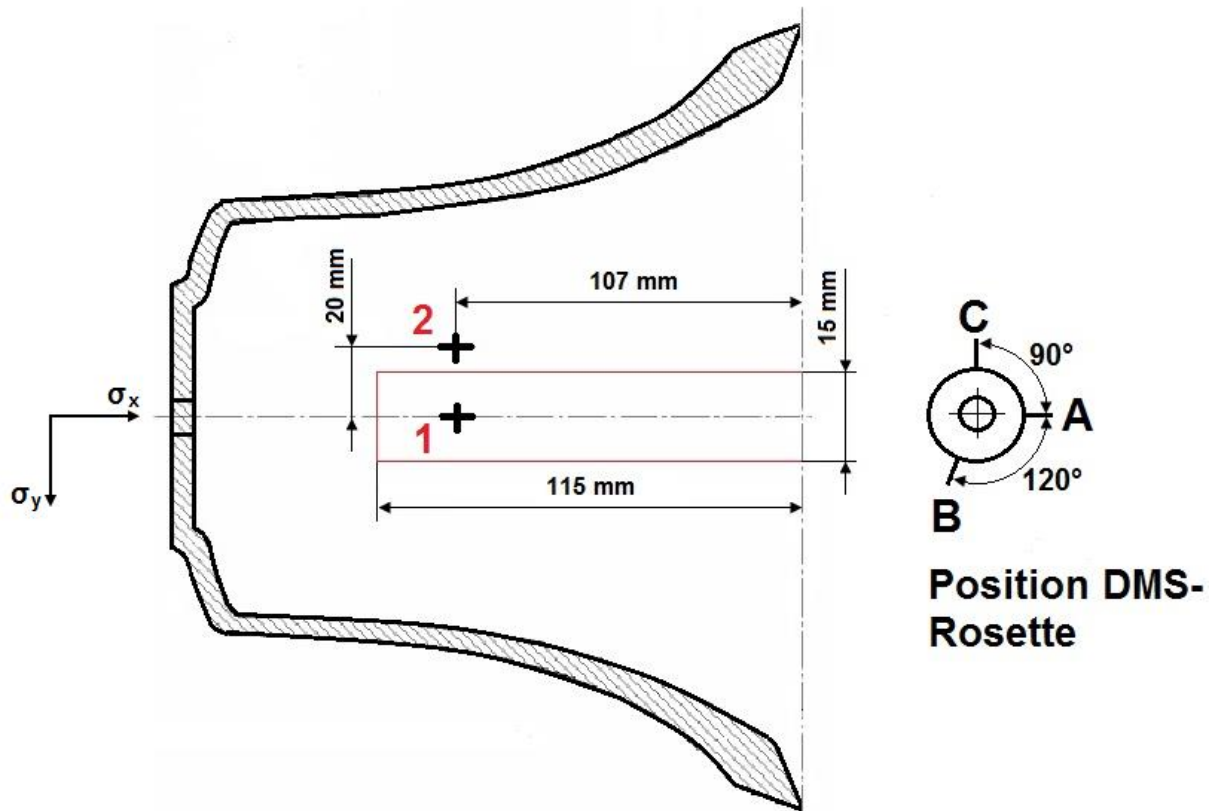


Abbildung 71: Schematische Darstellung der Messpositionen der ESM an der Glocke sowie Ausrichtung der DMS-Rosette zur Glockenoberfläche, 1... ESM vor der Schweißung, 2... ESM nach der Schweißung, rotes Rechteck...geschweißte Fuge, σ_x ...Spannung längs zur Schweißnaht, σ_y ...Spannung quer zur Schweißnaht

Dabei wurden an der Messposition 1 die Eigenspannungen vor dem Schweißen der Glocke gemessen und durch eine weitere Messung an der Messposition 2 mit dem Eigenspannungszustand nach der Schweißung verglichen.

Die Eigenspannungen einer Glocke nach dem Läuteinsatz dürften aufgrund der mit den Klöppelschlägen verbundenen oberflächlichen plastischen Verformungen bzw. Kaltverfestigung an diesen Stellen höher liegen (höhere Druckeigenspannungen). Messposition 2 wurde aufgrund der hohen Porosität des SG nach der Schweißung (vergleiche mit Abbildung 58) sowie des hohen erwarteten Eigenspannungsniveaus in der WEZ zwischen SG und GW etwa 20 mm versetzt zur Messposition 1 gewählt. Bei der Umrechnung der elastischen Verformungen beim Bohrvorgang in Spannungen wurde ein E-Modul von 97000 MPa [2] verwendet.

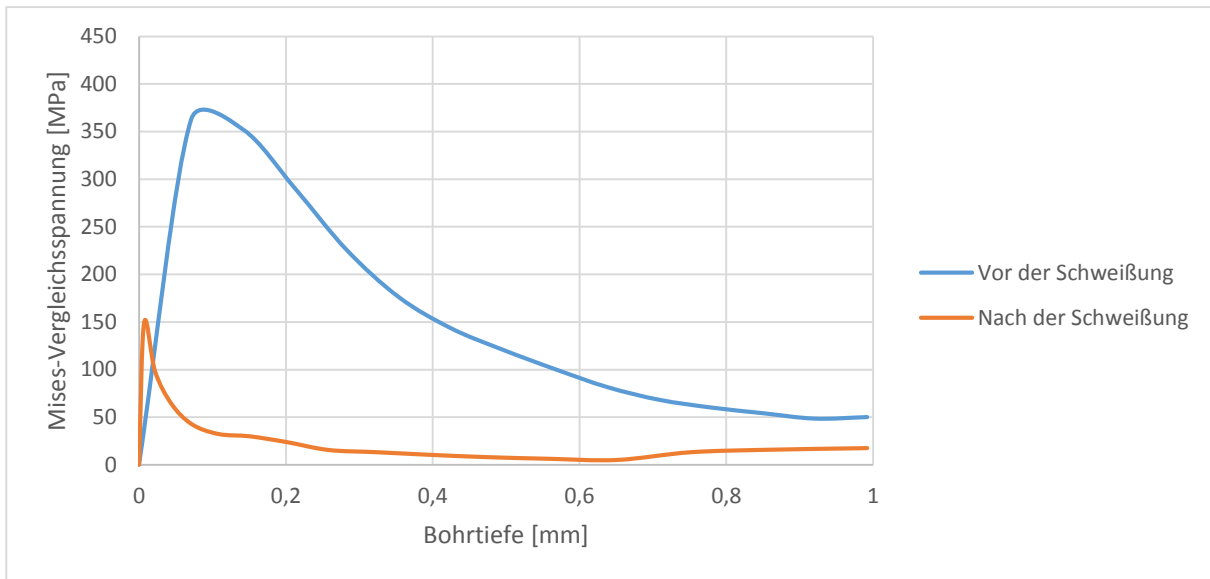


Abbildung 72: Mises-Vergleichsspannung vor und nach der Schweißung bzw. nach der WBH über die Bohrtiefe

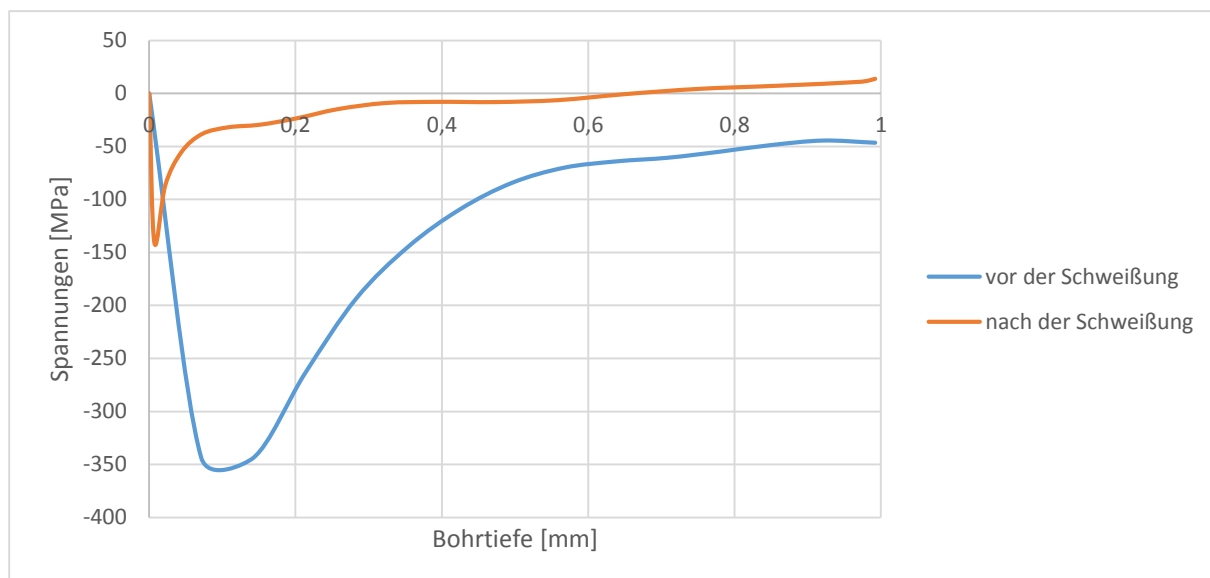


Abbildung 73: Längsspannungsverlauf σ_x (vergleiche mit Abbildung 70) vor und nach der Schweißung bzw. nach der WBH über die Bohrtiefe

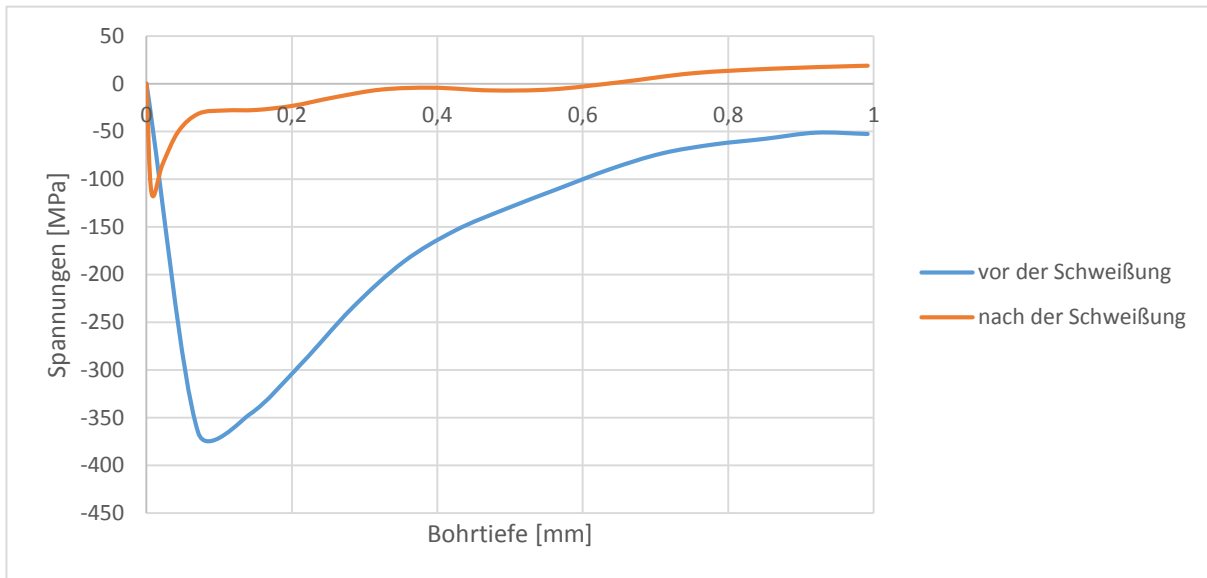


Abbildung 74: Querspannungsverlauf σ_y (vergleiche mit Abbildung 70) vor und nach der Schweißung und nach der WBH über die Bohrtiefe

Die Ergebnisse aus der ESM zeigen, dass es zu einem Abbau der Druckeigenspannungen durch das Spannungsarmglühen und der anschließenden langsamen Abkühlung nach der Schweißung kommt. Auffällig jedoch ist das hohe Eigenspannungsniveau an der Glockenoberfläche vor der Schweißung, welche die Zugfestigkeit (gemessen bei ca. 230 MPa und Raumtemperatur [37]) des Werkstoffes übersteigen.

Die Druckeigenspannungen an der Oberfläche vor der Schweißung sind damit zu erklären, dass die Glocke nach dem Gießprozess sandgestrahlt und damit oberflächlich kaltverfestigt wurde. Der Einfluss dieser Kaltverfestigung reicht beim Sandstrahlen bis etwa 0,5 mm (ca. -100 MPa), wobei die maximale Eigenspannung bei einer Tiefe von etwa 0,1 mm (Längs- bzw. Querspannungen von -350 bis -370 MPa) auftrat.

Das hohe Niveau der Eigenspannungen kam durch eine Überschätzung dieser bei der Messung zustande. Dabei werden die Vergleichsspannungen, aufgrund der Kerbwirkung am Grund des gebohrten Loches und der daraus resultierenden plastischen Verformung, bei etwa 70% der Fließspannung des gemessenen Werkstoffes überschritten. Mit Hilfe von Abbildung 75 kann die Überschätzung der gemessenen Eigenspannungen für verschiedene Werkstoffe abgeschätzt werden.

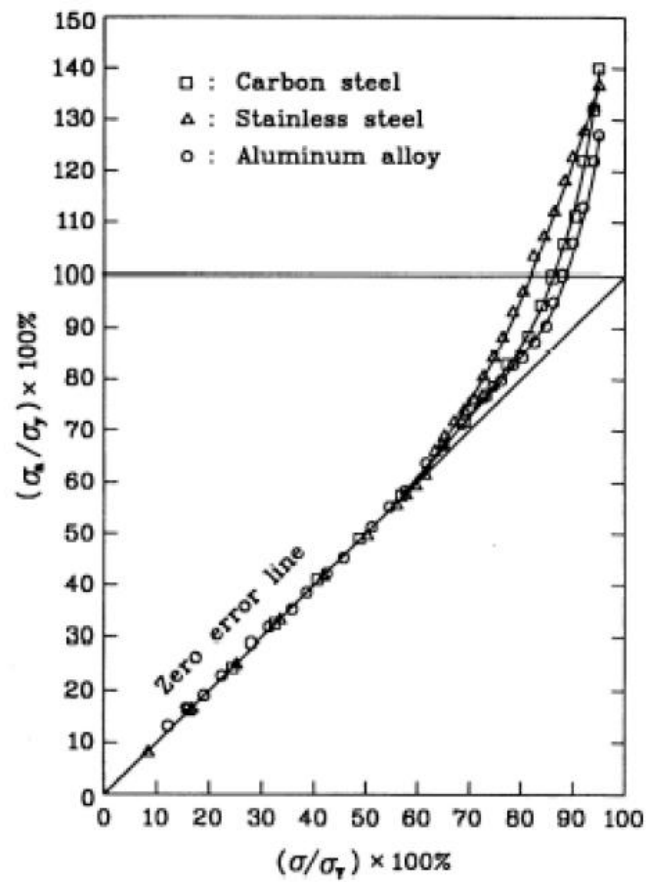


Abbildung 75: Überschätzung von Eigenspannungen verschiedener Werkstoffe [36]

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Um bei den Reparaturschweißungen von Glocken ausgeschliffene Risse mit Schweißzusatz füllen zu können, müssen diese in Wannenlage gebracht werden, da bei der WIG-Schweißung mit Helium die geringe Schmelzbadviskosität eine Bildung von Schweißlagen in Steigposition sehr schwierig macht.
- Beim WIG-Schweißen von Glockenbronze mit artgleichem Zusatz (gegossene Schweißstäbe) sollte mit Gleichstrom und negativ gepolter Elektrode gearbeitet werden.
- Der Einsatz von Argon, Helium und deren Mischgase beim WIG-Schweißen führte zu folgenden Effekten bzw. Ergebnissen:
 - Argon als Schutzgas führte zur Ausbildung einer Schmauchschiicht, punktueller Schlacke und zu porösen Schweißnähten.
 - Die Schweißversuche mit Helium-Schutzgas sorgten für die stärkste Schmauchbildung und für die geringsten Porenanteile sowohl an Probestplatte als auch an der Glocke. Grund für die geringe Porosität ist die Entstehung eines heißeren Schmelzbades mit geringerer Viskosität und tieferen, gleichmäßigeren Einbrand. Die veränderte Schmelzbadbewegung sorgt für eine bessere Entgasung im Schmelzbad und somit für porenärmere Schweißnähte.
 - Der Heliumeinsatz zeigte sich jedoch beim Schweißen in Steigposition (PF-Position) als sehr problematisch, da die geringe Schmelzbadviskosität einen Aufbau von Lagen in dieser Position fast unmöglich macht (Schmelze fließt hinunter). Somit ist eine Glockenschweißung mit Helium nur in Wannenlage möglich (PA-Position).
 - Argon-Helium-Mischgase führte zur Ausbildung einer Schmauchschiicht und zu einer deutlich geringeren Porosität bei den geschweißten Probestplatten, jedoch sorgte wahrscheinlich die niedrigere Wärmeleitfähigkeit des Mischgases (verglichen mit reinem Helium) für schlechtere Entgasungsbedingungen des Schweißbades und damit für einen hohen Porenanteil bei der Glockenschweißung.

- Das autogene Schweißen zeigte eine hohe Porosität aufgrund der Sauerstoffaufnahme des Schmelzbades während der Schweißung. Eine Schmauchbildung trat nicht auf. Dies kann damit erklärt werden dass durch die leicht oxidierende Flamme der Sauerstoffüberschuss das Ausdampfen von Zink aus dem Grundwerkstoff verhinderte. Weiters sorgt die geringe Schmelzleistung beim Autogenschweißen für ein höherviskoses Schmelzbad, sodass ein Lagenaufbau in Steigposition (PF) möglich ist (wird beim Glockenschweißwerk Lachenmeyer praktiziert).
- Bei der Temperaturaufzeichnung kam es durch die Hochfrequenzzündung des WIG-Lichtbogens sowie bei der Kontaktzündung zu Störungen des Messsystems. Bei Reparaturschweißungen von Glocken sollte dies berücksichtigt werden. Die Störungen lassen sich eventuell durch eine Ausgleichsleitung an den Thermoelementen beheben.
- Die Schweißbadsicherung mit dem Verbund aus Keramik-und Kupferplatten kann ohne wesentliche Beeinflussung der Glockenoberfläche mittels MAG bzw. MIG-Schweißverfahren angeheftet werden. Bei Schweißversuch 10 wurde ein MAG-Schweißdraht für Baustähle verwendet. Um einen möglichst mit dem Grundwerkstoff artgleichen Schweißzusatz für das Anheften zu verwenden, könnte der Werkstoff CuSn12P (Werkstoffnummer 2.1056 – 88%Cu / 12%Sn) verwendet werden.
- Aus denkmalamtlicher Sicht sollte der Schweißzusatz möglichst artgleich mit dem Glockenwerkstoff sein. Da die Elemente Blei und Zink für die Porenbildung im Schmelzbad verantwortlich sind, sollte man bei der Herstellung des Zusatzes auf eine möglichst geringe Konzentration dieser Elemente, d.h. nach Möglichkeit reinere Legierungen verwenden.
- Eine Zunderungsreaktion findet bei einer Temperatur von etwa 350 °C statt. Dabei kommt es zu einer Ausbildung einer Zunderschicht (80 bis 100 µm) hauptsächlich bestehend aus Kupfer(I)-Oxid (Cu_2O) bzw. Kupfer(II)-Oxid (CuO). Dabei kommt es auch zu einer Verarmung der darunterliegenden Mischkristalle an Zinn. Die damit verbundene Anreicherung an Zinn liegt als Zinndioxid (SnO_2) in der Zunderschicht vor. Sowohl die Zinnverarmung als auch das Abtragen der Zunderschicht an der Glockenoberfläche wirken sich auf den Klang aus. Zinnverarmung sowie ein übermäßiger Materialabtrag der Zunderschicht nach der Schweißung bzw. Wärmebehandlung führen zu einem tieferen Glockenton bzw. wird das Spektrum zu tieferen Tönen verschoben (im Vergleich zu einer unbehandelten Glocke). Eine Abhilfe zur Zinnverarmung in der Schmelzzone bzw. im Schweißgut könnte eine Überlegierung an Zinn des Schweißzusatzes liefern.

- Bei dem gebildeten Schmauch handelt es sich hauptsächlich um Zinkoxid (ZnO) sowie um Blei(II)-oxid (PbO). Dieser kann mittels Drahtbürste von den Schweißlagen entfernt werden, wobei aber ein Atemschutz verwendet werden sollte da diese Verbindungen toxisch auf den menschlichen Körper wirken. Ein weiterer Bestandteil des Schmauchs ist Zinndioxid (SnO_2), welches wiederum zur „Entzinnung“ der Glocke beiträgt um sich somit negativ auf das Klangspektrum bzw. auf die Klangfarbe auswirkt.
- Die Mikrostruktur im Lichtmikroskop zeigt kleinere Dendriten im Schweißgut, aufgrund der Aufschmelzung und raschen Abkühlung während der Schweißung, verglichen mit dem Grundwerkstoff. Weiters wurden im Schweißgut Bereiche mit geringen Anteil an α -Mischkristall-Dendriten vor allem in Porennähe festgestellt. Dies deutet darauf hin, dass ein Ausdampfen von Blei die Dendritenbildung während der Schmelzbadabkühlung behindert.
- Die Wärmeeinflusszone weist poröse Stellen auf, welche durch das Ausdampfen von Bleiverunreinigungen während der Schweißung entstanden sein dürften. Jedoch ist die Porengröße relativ gering sodass diese im makroskopischen Maßstab vernachlässigt werden kann. Bezüglich der Porenbildung im Grundwerkstoff, außerhalb der WEZ, gibt es vor und nach der Schweißung keine wesentlichen Unterschiede.
- Die Mikrohärtmessungen zeigen im Vergleich vor und nach der Schweißung eine leichte Härtezunahme der α -Phase und eine Härteabnahme der δ -Phase im Schweißgut. Jedoch ist eine Aussage bezüglich der Härteabnahme der δ -Phase aufgrund der großen Konfidenzintervalle und den schwierigen Messbedingungen (kaum Platz zur Messung der reinen δ -Phase) relativ unzuverlässig.
- Beim Verschleifen der Schweißnaht und der Zunderschicht wurde wahrscheinlich zu viel Material abgetragen bzw. die Glockenkontur nicht optimal getroffen, was zu einer gewissen „Unrundheit“ der Glocke (vor allem am Schlagring) führte und somit das Klangspektrum negativ beeinflusste.
- Die Eigenspannungsmessungen ergaben eine signifikante Abnahme der Druckeigenspannungen im oberflächennahen Bereich durch die Reparaturschweißung bzw. dem anschließenden Spannungsarmglühen und der langsamen Abkühlung. Dabei könnte die Glocke nach der Schweißung bzw. Wärmebehandlung sandgestrahlt werden (erzeugt Druckeigenspannungen an der Glockenoberfläche) um den Einfluss der Druckeigenspannungen auf den Klang zu überprüfen.

7 Ausblick

Aufgrund der nötigen Vorwärmung und der damit verbundenen Festigkeitsabnahme des Glockenwerkstoffs, besteht die Gefahr, dass Glocken unter Einwirkung ihres Eigengewichts Risse bekommen. Die Wannenlage sorgt zusätzlich für ungünstige Spannungszustände, welche ein Materialversagen begünstigen könnten. Mit dem Verhalten von Glockenwerkstoffen bei verschiedenen Vorwärmtemperaturen und mechanischer Beanspruchung beschäftigte sich Herr Lukas Seewald in seiner Bachelorarbeit „Ermittlung der temperaturabhängigen Festigkeit von Glockenbronze 80Cu/20Sn im Zugversuch“. Dabei sollten thermomechanische Kennwerte gewonnen und mittels computergestützter Finite-Elemente Methode abgeschätzt werden wie weit man Glocken in verschiedenen Größen vorwärmen kann, ohne dass es zu einem Materialversagen kommt.

In weiterer Zusammenarbeit mit der Firma Grassmayr sollen auch noch Fragen zur optimalen Vorwärmtemperatur und Wärmebehandlung in Abhängigkeit der Glockengröße (Glockengewicht) geklärt werden. Des Weiteren stellt sich die Frage ob eine lokale Vorwärmung bzw. Wärmebehandlung (könnte zu ungünstigen Spannungszuständen führen) der zu reparierenden Stelle an der Glocke genügt oder ob die ganze Glocke vorgewärmt und wärmebehandelt werden muss.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Glockenguss bei der Firma Grassmayr im August 2015.....	9
Abbildung 2: Aufbau der Gussform nach dem traditionellen Lehmformverfahren.....	10
Abbildung 3: Hilfskonstruktion zur Glockenreparaturschweißung.....	13
Abbildung 4: Vorwärmung bei Glockenreparatur.....	14
Abbildung 5: FEM-Analyse zeigt verbleibende Eigenspannungen in Wechselwirkungsflächen nach dem 10.Schlag	16
Abbildung 6: FEM-Analyse zeigt effektive plastische Verformung an Wechselwirkungsflächen nach dem 10.Schlag.....	16
Abbildung 7: unterschiedliche Klöppelanschläge.....	17
Abbildung 8: Wasserfalldiagramm des Frequenzspektrums einer Glocke während des Dauerläuttests bis zum Ermüdungsriß.....	18
Abbildung 9: Zustandsschaubild des Systems Kupfer-Zinn.....	19
Abbildung 10: Zustandsschaubilder einer Kupfer-Zinn-Legierung abhängig vom Gießverfahren und den Abkühlbedingungen.....	21
Abbildung 11: Zugfestigkeit, Dehngrenze, Härte sowie Bruchdehnung von Kupfer-Zinn-Legierungen bei Raumtemperatur (Kokillenguss).....	21
Abbildung 12: Wärmeleitfähigkeit von binären Kupfer-Zinn-Legierungen in Abhängigkeit vom Zinngehalt.....	23
Abbildung 13: Abhängigkeit der Kerbschlagzähigkeit vom Zinngehalt (Izodproben-Kokillenguss).....	23
Abbildung 14: E-Modul in Abhängigkeit vom Zinngehalt.....	24
Abbildung 15: Grundsätzlicher Aufbau des WIG-Schweißverfahrens.....	27
Abbildung 16: Ionisationsvorgang eines Heliumatoms.....	28
Abbildung 17: Einfluss verschiedener Schutzgase auf die Einbrandgeometrie beim WIG-Schweißen.....	30
Abbildung 18: <u>links</u> : Wärmeleitfähigkeit von Gasen in Abhängigkeit von Temperatur <u>rechts</u> : elektrische Leitfähigkeit von Gasen in Abhängigkeit von Temperatur.....	30
Abbildung 19: prinzipieller Verlauf des gewählten Temperaturprogramms.....	32
Abbildung 20: Vorderansicht einer Probestplatte.....	32
Abbildung 21: <u>links</u> : Fronius Magic Wave 3000 JOB, <u>rechts</u> : Fronius Magic Wave 2000 Fuzzy	33
Abbildung 22: <u>links</u> : Heizplatte (1), <u>rechts</u> : Temperaturregler Joens (2).....	34
Abbildung 23: Temperaturmesssystem: Thermoelement – Signaleingang (1), Messadapter (2) Messrechner mit Software (3), Temperatur-Multimeter (4).....	35
Abbildung 24: Aufbau der Schweißlagen - Schweißversuch 1 an Probestplatte.....	37

Abbildung 25: Aufbau der Schweißlagen - Schweißversuch 1 an Probeplatte	38
Abbildung 26: <u>links</u> : EBW-Anlage der TU-Graz, <u>rechts</u> : geschweißte Probeplatte....	38
Abbildung 27: Aufbau der Schweißlagen – WIG – Schweißversuch an Probeplatte mit Helium-Schutzgas.....	40
Abbildung 28: <u>links</u> : Dipl.Ing. Markus Stütz beim autogenen Schweißen , <u>rechts</u> : Probeplatte mit breiten Schweißraupen und Zunderung a.d. Oberfläche auf Grund der Vorwärmung.....	41
Abbildung 29: Aufbau der Schweißlagen – Autogenschweißen an Probeplatte	42
Abbildung 30: Temperaturprofil – Autogenschweißen	42
Abbildung 31: Querschnitt und Abmessungen der geschweißten Glocke aus den Schweißversuchen 1 und 2 an Glocke mit Helium – Schutzgas.....	43
Abbildung 32: geschweißte Glocke in Wannelage.....	45
Abbildung 33: Temperaturprofil – Schweißversuch 1 an Glocke.....	46
Abbildung 34: Schweißlagenaufbau – Schweißversuch 2 an Glocke.....	47
Abbildung 35: Temperaturprofil – Schweißversuch 1 an Probeplatte mit Argon – Helium Mischgas.....	48
Abbildung 36: Aufbau der Schweißlagen – Schweißversuch 1 an Probeplatte mit Argon – Helium Mischgas	50
Abbildung 37: Temperaturprofil – WIG-Schweißung ArHe 50/50.....	50
Abbildung 38: Aufbau der Schweißlagen – Schweißversuch 2 an Probeplatte mit Argon – Helium Mischgas.....	51
Abbildung 39: Temperaturprofil – WIG-Schweißung ArHe 80/20.....	51
Abbildung 40: Eigenspannungsmessung mittels Bohrlochmethode an der Glocke aus finalem Schweißversuch.....	52
Abbildung 41: Schmelzbadsicherung aus finalem Schweißversuch.....	53
Abbildung 42: Querschnitt und Abmessungen der geschweißten Glocke aus finalem Schweißversuch.....	54
Abbildung 43: <u>links</u> : Schweißung der Glocke; <u>rechts</u> : thermisch isolierte Glocke, dunkle Verfärbung der Oberfläche aufgrund der Zunderung.....	55
Abbildung 44: <u>links</u> : Blei-Verunreinigungen in Glockenbronze, Aufnahmen am Lichtmikroskop Zeiss Z1m Observer; <u>rechts</u> : Pb-Ausdampfung im festen Zustand im Zugversuch bei 350 °C.....	56
Abbildung 45: Sättigungsdampfdruck p_s verschiedener Metalle in Abhängigkeit der Temperatur ϑ	56
Abbildung 46: EDX-Flächenscan des Grundwerkstoffs.....	57

Abbildung 47: Bild der abgeplatzten Zunderschicht aus Schweißversuch 4.3 mit dem zugehörigen EDX-Spotscan.....	58
Abbildung 48: Spotscan 1 Schlacke.....	59
Abbildung 49: Spotscan 2 Schlacke.....	59
Abbildung 50: untersuchte Schmauchschicht.....	60
Abbildung 51: Poren im Querschnitt der Schweißgüter bei 100%Ar	61
Abbildung 52: makroskopische Untersuchung der Schmelzzonen nach der EBW-Schweißung.....	62
Abbildung 53: Geringfügiger Porenanteil im Querschnitt des Schweißgutes bei 100% He.....	63
Abbildung 54: Starke Porenbildung im Querschnitt des autogenen Schweißbades.....	63
Abbildung 55: makroskopische Untersuchung der Glockenoberfläche nach der WIG-Schweißung mit 100%He	64
Abbildung 56: makroskopische Untersuchung der Glockenoberfläche nach der Schweißung mit 100 % He	65
Abbildung 57 makroskopische Untersuchung des Querschnitts in der Schmelzzone.....	65
Abbildung 58: makroskopische Untersuchung der Glockenoberfläche nach der WIG-Schweißung mit 50%He / 50%Ar	66
Abbildung 59: <u>links</u> : Farbätzung von Grundwerkstoff nach Klemm III <u>rechts</u> : Grundwerkstoff nach OPS-Politur.....	67
Abbildung 60: metallografisch untersuchte Bereiche aus WIG – Schweißung mit Helium Schutzgas.....	67
Abbildung 61: Mikrostruktur der WIG-100%He-Schweißung nach OPS-Politur.....	68
Abbildung 62: Mikrostruktur der WIG-100%He-Schweißung nach OPS-Politur	69
Abbildung 63 Mikrostruktur des Glocken- Grundwerkstoffes vor der Schweißung (OPS-Politur).....	69
Abbildung 64: Mikrostruktur des Glocken- Grundwerkstoffes nach der WIG-Schweißung mit 50Ar/50He	70
Abbildung 65: Mikrostruktur des WIG- 50Ar/50He Schweißgutes SG (OPS-Politur).....	70
Abbildung 66: überbelichtete Detailaufnahme des Binderfehlers mit darunterliegenden Poren	70

Abbildung 67: Vermessung der Zunderschicht im Schweißgut	71
Abbildung 68: <u>links</u> : Mikrohärtmessung der α -Phase, <u>rechts</u> : Mikrohärtmessung der δ -Phase.....	72
Abbildung 69: Zusammenfassung der Mikrohärtmessung.....	73
Abbildung 70: Detailfilterung des Klangspektrums mittels der Software Belltuner 1.3a nach der Schweißung im Bereich um 1100 Hz.....	75
Abbildung 71: Schematische Darstellung der Messpositionen der ESM an der Glocke sowie Ausrichtung der DMS-Rosette zur Glockenoberfläche	76
Abbildung 72: Mises-Vergleichsspannung vor und nach der Schweißung bzw. nach der WBH über die Bohrtiefe.....	77
Abbildung 73: Längsspannungsverlauf σ_x vor und nach der Schweißung bzw. nach der WBH über die Bohrtiefe.....	77
Abbildung 74: Querspannungsverlauf σ_y vor und nach der Schweißung und nach der WBH über die Bohrtiefe.....	78
Abbildung 75: Überschätzung von Eigenspannungen verschiedener Werkstoffe.....	79

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: chemische Zusammensetzung eines untersuchten Glockenmaterials.....	22
Tabelle 2: mechanische Eigenschaften eines untersuchten Glockenmaterials.....	22
Tabelle 3: Dissoziationsenergien und Ionisationsenergien verschiedener Gase.....	29
Tabelle 4: chemische Zusammensetzung einer gegossenen Glocke vom 12.09.2014.....	31
Tabelle 5: Wirkungsgrad η beim WIG-Schweißen mit verschiedenen Schutzgasen bzw. Zusammensetzungen.....	35
Tabelle 6: Schweißtechnische Parameter der Schweißversuche 1 und 2 an Probplatten.....	36
Tabelle 7: Schweißtechnische Parameter WIG – Schweißversuch an Probplatte mit Helium-Schutzgas.....	39
Tabelle 8: Schweißtechnische Parameter - Autogenschweißen an Probplatte.....	41
Tabelle 9: Schweißtechnische Parameter aus den Schweißversuchen 1 und 2 an Glocken mit Helium-Schutzgas.....	44
Tabelle 10: Schweißtechnische Parameter aus den Schweißversuchen 1 und 2 an Probplatten mit Argon-Helium Mischgasen.....	49
Tabelle 11: Schweißtechnische Parameter aus finalelem Schweißversuch.....	54
Tabelle 12: Ergebnisse der Mikrohärtmessung an Probplatte vor und nach der Schweißung.....	72
Tabelle 13: Ergebnisse der Mikrohärtmessung an Glocke vor und nach der Schweißung.....	73
Tabelle 14: Ergebnisse aus der Klangbestimmung vor der Schweißung.....	74
Tabelle 15: Ergebnisse aus der Klangbestimmung nach der Schweißung.....	74

10 Gleichungsverzeichnis

Gleichung 1: Verbrennung von Acetylen mit Sauerstoff in der ersten Verbrennungsstufe.....	26
Gleichung 2: Vollständige Verbrennung der Reaktionsprodukte aus Gleichung 1.....	26
Gleichung 3: Reaktionsverlauf der Wasserstoffkrankheit.....	27
Gleichung 4: Streckenenergie E	35
Gleichung 5: Wärmeeinbringung Q	35

11 Literaturverzeichnis

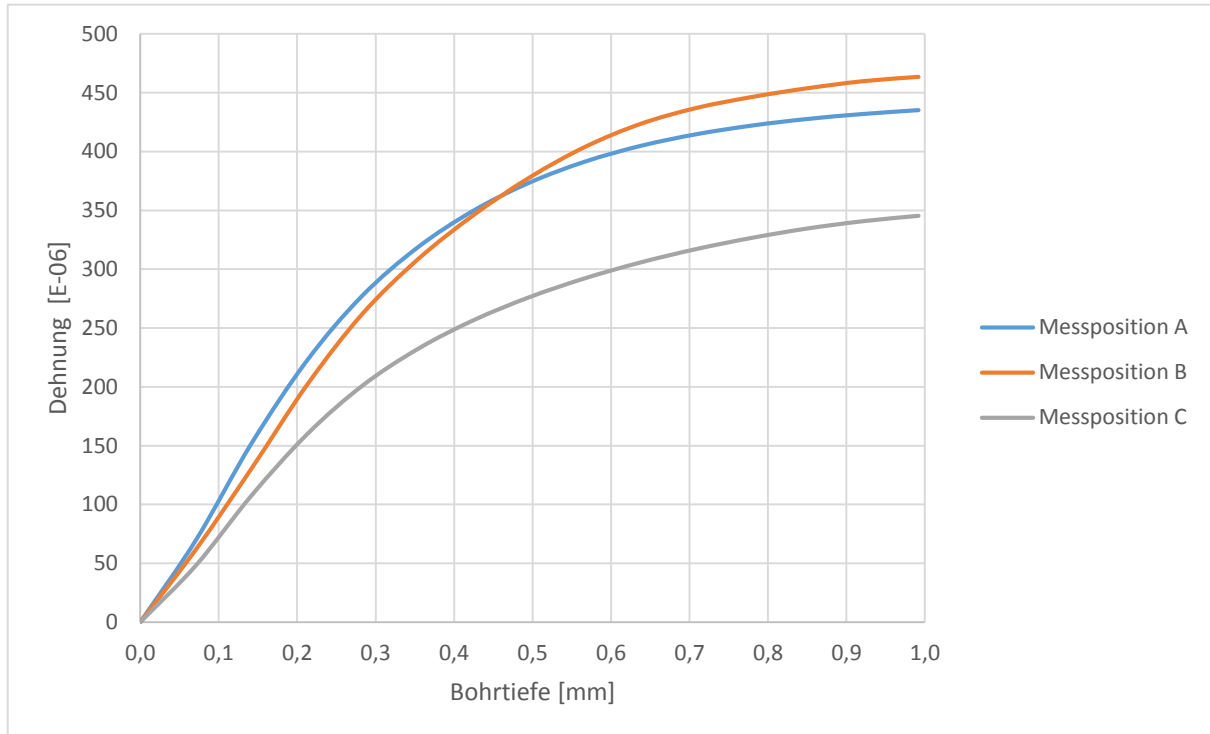
- [1]..Glockengießerei Grassmayr (2011): Unternehmensgeschichte [online]
http://www.grassmayr.at/fileadmin/bilder-inhalt/pdfs/Grassmayr_Unternehmensgeschichte_2011.pdf [27.07.2015]
- [2]..Dies, Kurt (1967): *Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik*, Berlin – Heidelberg: Springer Verlag
- [3]..Glockengießerei Grassmayr (2011): Medien, [online]
www.grassmayr.at/fileadmin/layout/Medien/GRASSMAYR_Glocken-Qualitaet-Herstellung_-_Qualitaetsorientiertes_Lehmformverfahren_2011.pdf [16.07.2015]
- [4].. Beratungsausschuss für das Deutsche Glockenwesen [online]
<http://www.glocken-online.de/glockenkultur/formguss.php> [16.07.2015]
- [5]..o. V. (2002): Techniken zum Reparieren von Glocken, in Ulrich Franke (Hrsg.), *Guss im Wandel der Zeit, Band 7, Heft 1*, Chemnitz: Eigenverlag Gießerei online, S. 19-21.
- [6]..Restaurierung von Glocken. Herausgeber: Beratungsausschuss für das deutsche Glockenwesen, Goslar 7.Mai 1990.
- [7]..Schimpke, Paul, Horn, Hans A. (1945): *Praktisches Handbuch der gesamten Schweißtechnik - Elektrische Schweißtechnik, 2. Band*, Berlin-Heidelberg: Springer Verlag
- [8]..Präsentation: Reparaturschweißen von Glocken, Monika Dunst, FH-Kärnten
- [9]..Beratungsausschuss für das Deutsche Glockenwesen [online]
<http://www.glocken-online.de/glockenschweissen/text/restaurieren> [02.09.2015]
- [10]..Rijksdienst voor de Monumentenzorg. Nieuwsbrief 2001-4
- [11]..OTTO-BUER Glocken- Uhrentechnik (o. J.): Glockenschweißen [online]
<http://www.ottobuer.de/userfiles/file/Glockenreparatur.pdf> [02.09.2015]
- [12]..Patentschrift *Procédé pour souder des cloches*, deutsche Übersetzung *Verfahren zum Schweißen von Glocken*, Patent-Nr.2703615, Veröffentlichungsdatum 14.10.1994
- [13]..Rupp Andreas (2006): Ringing Bells - State of the Art in the Durability Evaluation of Church Bells, [online]
http://www.beratungsausschussfuerdasdeutsgeglockenwesen.de/bibliothek/probell/Ringing_Bells-LAVEK_Colloquium030306.pdf [20.04.2015]
- [14]..Hartmann, Dierk, Michael Plitzner und Andreas Rupp (2012): Die Glocke aus ingenieurmäßiger Sicht, in *Gießerei Praxis, Heft 4, 04/2012*, Berlin: Fachverlag Schiele & Schön, S. 113-118
- [15]..RTE Akustik + Prüftechnik GmbH (2011): Messung Eigenfrequenzen [online]
<http://www.rte.de/wp-content/uploads/2015/02/RTE-ARTIK-EF-Messung-Eigenfrequenzen-Fertigung-Labor-D-120727.pdf> [31.08.2016]

- [16]..Keller, Hans; Eickhoff, Klaus (1955): *Kupfer und Kupferlegierungen, 3.Auflage*, Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer Verlag
- [17]..Deutsches Kupferinstitut (2005): Kupfer-Zinn- und Kupfer-Zinn-Zink-Gusslegierungen (Zinnbronzen), [online]
[https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/SShop/Verlag/Downloads/Werkstoffe/i025.pdf](https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/Shop/Verlag/Downloads/Werkstoffe/i025.pdf) [13.06.2015]
- [18]..Universität Freiburg: Vorlesung Intermetallische Phasen, [online]
http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/intermetallische_4_4.html [21.12.2015]
- [19]..Anik, Salahaddini; Dorn, Lutz (1987), Metallphysikalische Vorgänge beim Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen – Werkstoffliche Grundlagen. *Schweißen und Schneiden, Band 39, Heft 12, S 617- 623*
- [20]..Matthes, Klaus-Jürgen (2012): *Schweißtechnik-Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen, 5.Auflage*, München: Carl-Hanser-Verlag
- [21]..Deutsches Kupferinstitut (2005): Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen, [online]
https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/SShop/Verlag/Downloads/Verarbeitung/i012.pdf [13.06.2015]
- [22].. Deutsches Kupferinstitut (2015): Wärmebehandlung [online]
www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/verarbeitung/waermebehandlung.html
[21.12.2015]
- [23]..Wuttke, Felix (1968): *Die Lichtbogenschweißung. In Fragen und Antworten. 5.Auflage*, Wiesbaden: Springer Verlag
- [24]..Enzinger, Norbert (2014): *Skriptum zur Vorlesung Fügetechnik*, Graz, Technische Universität S. (213 - 225)
- [25]..http://bilder.buecher.de/zusatz/15/15084/15084824_lese_1.pdf [17.03.2016]
- [26]..Zultner Metall GmbH (2016): Lieferprogramme [online]
<http://www.zultner.at/lieferprogramme/wig.pdf> [17.03.2016]
- [27]..Bildersuche zu Fronius Magic Wave 2000 Fuzzy [online]
<http://www.benad24.de/documents/image/12/1234573984/IMG-0801.JPG>
[17.03.2017]
- [28]..Jousten, Karl (2013): *Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 11.Auflage*,Vieweg & Teubner Verlag, S. 76 – 79
- [29]..Römpp Lexikon Chemie (2015) [online]
<https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-26-00386> [30.07.2015]

- [30].. Römpp Lexikon Chemie (2015) [online]
<https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-26-00442> [30.07.2015]
- [31].. Römpp Lexikon Chemie (2015) [online]
<https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-02-01945> [30.07.2015]
- [32]..Weck, Erika, Leistner, Elisabeth: *Metallische Anleitung zum Farbätzen nach dem Tauchverfahren*, S 54
- [33]..Glockengießerei Grassmayr (2015): Geheimnis der Glocke [online]
http://www.grassmayr.at/fileadmin/bilder-inhalt/pdfs/Geheimnis_der_Glocke_Seite_1.pdf [16.07.2015]
- [34]..Pierce, John R. (1999): *Klang. Musik mit den Ohren der Physik*, Heidelberg: Spektrum – Akademischer Verlag
- [35]..Meschede, Dieter (2005): *Gerthsen Physik. 23., vollst. Neubearb. Auflage*, Berlin-Heidelberg: Springer Verlag
- [36]..Lin Y.C., Chou C.P. (1995): Error induced by local yielding around hole in hole drilling method for measuring residual stress of material. *Material Science and Technology*, 11, June, S.600 – 604
- [37]..Seewald, Lukas (2016): *Ermittlung der temperaturabhängigen Festigkeit von Glockenbronze 80Cu/20Sn im Zugversuch, Metallographische Bruchanalyse und FEM Berechnung der Belastung der Glocken beim Reparaturschweißen*, Graz, Technische Universität

12 Anhang

- gemessene Dehnungen an der DMS-Rosette über die Bohrtiefe vor der Schweißung, Messpositionen A, B, C sind Positionen auf der DMS-Rosette an denen die Dehnungen gemessen wurden (vergleiche mit Abbildung 70)



- gemessene Dehnungen an der DMS-Rosette über die Bohrtiefe nach der Schweißung, Messpositionen A, B, C sind Positionen auf der DMS-Rosette an denen die Dehnungen gemessen wurden (vergleiche mit Abbildung 70)

