

**SCHWEISSREPARATUREN AN GLOCKEN
AUS ZINNBRONZE
BEI KONINKLIJKE EIJSBOUTS**



Ursachen für Rissbildung in Glocken und verwendeter Glockenwerkstoff

Ursachen der Rißbildung

In der Praxis kann es in Glocken bei deren Benutzung zu Rissbildung kommen. Rissbildung führt zur Schwingungsdämpfung in der Glocke und negativen Beeinflussung der Resonanz. Beim Läuten schlägt der Klöppel am Schlagring der Glocke an. Dies führt zur lokalen Verformung und zur Kaltverfestigung des Schlagringes. Vielfaches Schlagen auf die gleiche Stelle bewirkt eine Aushärtung und Versprödung der Anschlagstelle. Die auftretenden inneren Spannungen können sich aufgrund der bleibenden Verformung nicht mehr im Werkstoff verteilen. Es kommt zu lokalen Spannungsspitzen die zur Rissbildung führen. Sobald ein Riss initiiert wurde, wird dieser sich durch die Kerbwirkung bei weiterhin eingeleiteten Materialspannungen ausbreiten. Materialspannungen, die Infolge von Korrosionsbildung an Klöppelhängeisen oder Aufhängebolzen entstehen, können ebenfalls zu Rissbildung im Glockenwerkstoff führen.



In dieser Broschüre wird das Verfahren beschrieben, wie Eijsbouts Risse in Glocken schweißt, und wie dieses Reparaturverfahren entwickelt wurde.

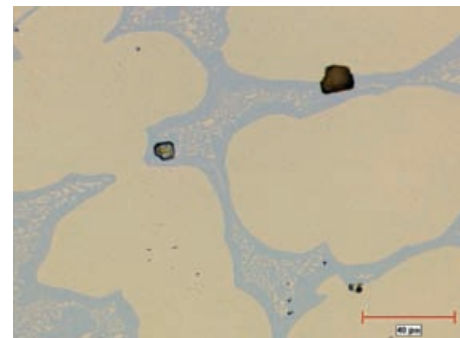
Glockenwerkstoff

Glocken werden aus einer Zinnbronze (ca. 80% Cu, 20% Sn) hergestellt. Der Werkstoff wird erschmolzen und in einer Gießform vergossen. In der flüssigen Glockenbronze sind beachtliche Wasserstoffgehalte lösbar. Der, während der Erstarrung der Schmelze ausgeschiedene Wasserstoff, führt zu einer Porosität im Glockenwerkstoff. Schad und Warlimont ¹⁾ haben die Auswirkungen der Wasserstoffporosität auf die Schwingungsdämpfung im Glockenwerkstoff bestimmt. Eijsbouts hat festgestellt, dass die Porosität einen großen Einfluss auf die Klangfarbe und Resonanz einer Glocke hat. Dieses Phänomen ist altbekannt: Die Glockengießer sind seit jeher bestrebt, die geringste Porosität zu erzielen, indem sie unter schwach oxidierender Atmosphäre schmelzen, um so die Wasserstoffaufnahme der Schmelze zu minimieren. Gegen Ende des Schmelzprozesses wird der Schmelze Phosphor zugesetzt. Der in der Schmelze gelöste Sauerstoff verbindet sich mit dem Phosphor und verdampft als Phosphoroxid. Das Schweißverfahren, das bei einer Glockenreparatur zur Anwendung kommt, muss daher so gewählt werden, dass es die Wasserstoffaufnahme unterbindet und Porositätsbildung im erstarrten Schweißgefüge ausschließt. Die Reparatur historischer Glocken erfordert die Berücksichtigung der Werkstoffverunreinigung durch andere Metalle mangels Verfügbarkeit von hochreinem Kupfer und Zinn zur Zeit des Gusses der Glocke. Somit ist es unumgänglich, vor Beginn einer Schweißreparatur die genaue Zusammensetzung des Glockenwerkstoffes zu analysieren. Eine Probenahme des Werkstoffes ist in der Regel denkmalpflegerisch vertretbar und ohne zusätzliche Schaden möglich, da sie geringfügig bleibt und in Schadensbereich vorgenommen wird.

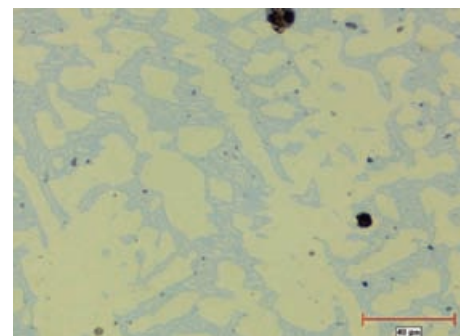
Reparaturverfahren

Prinzipiell kommen für eine Reparatur gerissener oder verschlissener Glocken folgende Verfahren in Frage:

- a) Hartlötverfahren: Bei diesem Verfahren wird eine Lötlegierung mit einer Schmelztemperatur verwendet die unterhalb der Schmelztemperatur der Glockenbronze liegt. In der Praxis zeigt sich, dass mit diesem Verfahren keine akzeptablen Reparaturergebnisse erzielt werden können da sich die Werkstoffeigenschaften der Lötlegierung zu stark von denen der Glockenbronze unterscheiden.
- b) Autogen-Schweißverfahren: Bei diesem Verfahren wird unter einer Azetylen/Sauerstoff-Flamme ein Stab mit identischer Werkstoffzusammensetzung der Glocke im Schweißbad unter Ausbildung einer Schweißraupe aufgeschmolzen. Beim korrekten Azetylen/Sauerstoff-Verhältnis werden relativ hohe Flammtemperaturen von ca. 3200°C erreicht. Die Temperatur ist sicher ausreichend hoch für diese Anwendung (die Schmelztemperatur der Glockenbronze liegt bei etwa 900°C). Die Schweißflamme kann oxidierend eingestellt werden, was aber zur Oxidation der Bronze an der Schweißbadoberfläche führen wird. Die entstehenden Oxidschichten schwächen die Schweißnaht erheblich. Zwingend erforderlich ist es daher eine leicht reduzierend Schweißflamme ein zu stellen. Dies wird aber wiederum zur Wasserstoffaufnahme des Schweißbades (aus dem Azetylen) und demzufolge zur Wasserstoffporosität in der Schweißnaht führen. Im Absatz „Glockenwerkstoff“ wurde bereits erläutert, dass dies möglichst ausgeschlossen werden muss. Wegen der unvermeidbaren Wasserstoffaufnahme und der damit einher gehenden Porosität lehnt Eijsbouts dieses Verfahren zur Reparatur von Glocken grundsätzlich ab.
- c) WIG-Schweißverfahren: Bei dem Wolfram-Inert-Gas-Schweißverfahren wird ein elektrischer Lichtbogen zwischen einer Wolframelektrode und dem Schweißgut aufgespannt. Ein Stab aus Bronze von gleicher Zusammensetzung wie die der zu reparierenden Glocke wird auch bei diesem Verfahren verwendet. Das ionisierte Argongas umhüllt und stabilisiert den Lichtbogen. Die Inertgaszufuhr (Argon) bewirkt dass Luftsauerstoff von der Schweißbadoberfläche verdrängt wird. Der Schub des ionisierten Gases sorgt dafür, dass vereinzelt sich bildende Oxide von der Schweißbadoberfläche entfernt werden. Sobald die Spitze des Bronzestabes die Schmelztemperatur erreicht, schmilzt ein Tropfen ab und fällt in das Schweißbad. Eine Überhitzung des Schmelzbades wird nicht stattfinden, da die Wärmeabfuhr in das feste Muttermaterial ausreichend gegeben ist. Auch eine Wasserstoffaufnahme des Schweißbades ist wegen der Verwendung des Schutzgases bei diesem Verfahren



Glockengefüge



Schweißgefüge

ausgeschlossen. Der Broschüre “Metaalkundige aspecten bij het lassen van klokken”²⁾ [Metallkundliche Aspekte beim Schweißen von Glocken] ist zu entnehmen, dass die Schweißgefüge Zusammensetzung den eingeschweissten Materials mit der des Glockenwerkstoffs genau übereinstimmt. Sogar der Phosphorgehalt der Glockengefüge (auf ca. 0,15% beim Schweißen zulegiert) hat sich kaum verändert. Dieses ist nur möglich wenn keine Überhitzung des Schweißbades stattgefunden hat. Auf den nebenstehenden Abbildungen sind das Gefüge des gegossenen Muttermaterials der Glocke sowie das Gefüge der Schweißnaht dargestellt. Das Gefüge besteht in beiden Fällen aus zwei Phasen, die sowohl im Muttermaterial wie auch in der Schweißnaht exakt gleiche Zusammensetzung haben. Die Porosität im Muttermaterial wie auch in der Schweißnaht ist gering jedoch auch anteilmäßig gleich. Das Gefüge der Schweißnaht hat in Folge der Erstarrungsbedingungen wie zu erwarten eine feinere Kristallstruktur als das Muttermaterial.

Aufgrund dieser Tatsachen hat sich Koninklijke Eijsbouts zur Reparatur von Glocken für das WIG-Schweißverfahren entscheiden, das auch in allen industriellen Bereichen, in denen hochwertige homogene Schweißverbindungen sehr strengen Qualitätsanforderungen genügen müssen, verwendet wird.



Beschreibung des Schweißverfahrens in der Anwendung

Bevor eine gerissene Glocke geschweißt wird, werden Umfang und Verlauf des Risses mittels einer sogenannten Rissprüfung (in erster Instanz mit Farbeindringverfahren) sichtbar gemacht. Nach eindeutiger Bestimmung des Start- und Endpunktes des Risses wird der Riss über den gesamten Verlauf V-förmig ausgeschliffen, um ihn auch über die gesamte Risstiefe in der Glockenwand für den Lichtbogen des Schweißgeräts zugänglich zu machen. Das beim Schleifen abgetragene Material wird sorgfältig erfasst: Zum einen dient es als Probematerial zur Analyse der Zusammensetzung des Glockenmaterials, zum anderen wird es verwendet zur Herstellung der Schweißstäbe, die bei der anschließenden WIG-Schweißreparatur dem Schweißbad zugeführt werden. Die Glocke kann mit überwiegend „eigenem“ Material, ergänzt mit exakt gleich legierter Glockenbronze, repariert werden. Die Ergebnisse der Analyse der Ur-Bronze der Glocke können Anlass dazu geben, Schweißzuschläge, die den Schweißprozess begünstigen, zuzusetzen. Bevor die eigentliche Schweißreparatur starten kann, muss die Glocke gleichmäßig vorgewärmt werden, da der kalte Glockenwerkstoff unter den beim Schweißprozess entstehenden Thermospannungen versagen würde. Hierzu werden auf der Glockenwand elektrische Heizelemente angebracht. Außerdem wird die Glocke mit thermisch isolierenden Decken sorgfältig abgedeckt. Die langsame Aufwärmung der Glocke kann gestartet werden. Die Leistungen der elektrischen Heizelemente werden dazu individuell über einen Computer geregelt, so dass eine homogene Erwärmung des Glockenkörpers mit seinen unterschiedlichen Wandstärken gewährleistet ist. Wenn der Glockenkörper die erforderliche Temperatur erreicht hat, kann die Schweißarbeit beginnen. Der Schweißer wird die Bronze tropfenweise zuführen. Sie verschmilzt in dem zu schweißenden Gebiet so lange bis die beiden Seiten des Risses wieder homogen und über die gesamte Risstiefe in der Glockenwand verbunden sind. Wenn der Schweißer seine präzise Arbeit vollendet hat, wird der Glockenkörper noch eine vorgegebene Zeit auf Temperatur gehalten, um Spannungen im Werkstoff abzubauen bevor die Abkühlkurve eingeleitet wird. Es kann Tage dauern bis die Glocke wieder kontrolliert auf Umgebungstemperatur heruntergekühlt ist. Die Abkühlkurve wird für jede reparierte Glocke individuell eingestellt.



Die gewählte Vorwärmtemperatur ist entscheidend für die Güte der Reparatur: Einerseits muss sie ausreichend hoch sein, so dass sich die Schweißspannungen abbauen können, andererseits muss sie tief genug sein, um unerwünschte Formänderungen des Glockenkörpers zu verhindern. Eine Begleiterscheinung der Wärmebehandlung der Glocke ist, dass sich die Kaltverfestigung des Schlagringes der Glocke, entstanden durch die vielen Glockenschläge, aufhebt. Nun kann die Glocke im WIG-Schweißverfahren repariert werden. Die nebenstehende Abbildung zeigt eine frisch geschweißte Glocke. Die Schweißbraupe wird im nächsten Bearbeitungsschritt oberflächlich angeschliffen und gegebenenfalls ziseliert.



Abschließend wird die reparierte Glocke geputzt und in den meisten Fällen gewachst. Als Beispiel zeigt das nebenstehende Bild eine reparierte Glocke (Raumland, 14. Jahrhundert), die zur Auslieferung freigegeben worden ist. Als weiteres, aufgrund der Glockengröße herausragendes Beispiel für das von Eijsbouts praktizierte Reparaturverfahren soll hier die 1660 von Hemony gegossene größte Glocke des Glockenspiels im Belfort von Gent (Belgien), der sog. Roland, angeführt werden. 1913 zeigte sich, dass die etwa 6000 kg schwere Glocke gerissen war und ihre Klangfähigkeit verloren hatte. 2002 wurde die Glocke bei Eijsbouts im WIG-Schweißverfahren repariert. Ihre aus dem übrigen erhaltenen Glockenbestand im Genter Belfort herzuleitenden Klangmerkmale wurden durch die Reparatur ohne weitere Eingriffe wieder hörbar, die ursprüngliche Klangfähigkeit der Glocke so wiedergewonnen.



Häufig konstatieren Kunden, dass eine geschweißte Glocke sich in Klangfarbe und Resonanz verändert habe, insbesondere die Nachhalldauer länger sei. Dies läßt sich dadurch erklären, dass der Schaden bereits vor langer Zeit begann, und sich der Riss im Laufe der Zeit weiter ausgebreitet hat. Klangveränderungen wurden erst wahrgenommen, als der Riss durch die ganze Glockenwandung reichte und die Klangfähigkeit der Glocke ganz zerstört hatte. Im Vergleich zum leicht beschädigten Zustand wird bei der wiederhergestellten Glocke eine deutliche Veränderung im Klang bemerkt.

Das beschriebene Schweißverfahren wird von Eijsbouts auch zum Aufschweißen von ausgeschlissenen Schlagringbereichen und bei der Wiederherstellung beschädigter Kronen und Kronenbügel angewendet.



Denkmalrechtliche Genehmigung des Verfahrens in den Niederlanden

Bevor der Reichsdienst für Denkmalpflege in den Niederlanden einem Verfahren zur Restaurierung offiziell zustimmt, ist es üblich, dieses Verfahren einer wissenschaftlichen Prüfung zu unterziehen. Vor diesem Hintergrund hat der Reichsdienst für Denkmalpflege die damalige Technische Universität „TU Delft“ beauftragt das von Eijsbouts entwickelte Schweißverfahren zu untersuchen und zu beurteilen. Das Institut für Metallkunde der TU Delft hat eine Studie über das Schweißverfahren erstellt. Im Rahmen dieser Studie wurden zahlreiche Untersuchungen an Proben durchgeführt, bevor und nachdem sie von der Koninklijke Eijsbouts geschweißt wurden. Die Schlussfolgerungen aus diesen Untersuchungen wurden in einem Rapport³⁾ aufgezeichnet und dem Reichsdienst für Denkmalpflege in den Niederlanden sowie der Koninklijke Eijsbouts übergeben. Diese Schlussfolgerungen der Studie führten dazu, dass das beschriebene Schweißverfahren vom Reichsdienst für Denkmalpflege in den Niederlanden ohne jegliche Einschränkung anerkannt wurde. Dieser Beschluss wurde in dem Bekanntmachungsschreiben 2001-4⁴⁾ näher erläutert.

- 1) Vgl.: Dr.-ing C.R. Schad und Dr. re. nat.habil. H. Warlimont. Metall Heft1 26. Jahrgang 1972 Seite 10-21.
- 2) Vgl.: A.A. Aldenkamp, Metaalkundige aspecten bij het lassen van klokken, Son, 2001.
- 3) Het lassen van Klokkenbrons. Interne Eindrapportage TH Delft M.J.M. Hermans en N.F.H. Kerstens
- 4) Vgl.: Rijksdienst voor de Monumentenzorg. Nieuwsbrief 2001-4





Gent, Belgien, Belfort, Glocke Roland (Hemony 1660)