

1 Einleitung

Glocken sind Musikinstrumente mit einer über 5000-jährigen Geschichte, die seit der Antike auch in Europa bekannt sind. Im frühen Mittelalter entwickelten sich aus kleinen Handschellen die aus Bronze gegossenen Kirchenglocken, die seit dem Spätmittelalter bis in die heutige Zeit ohne nennenswerte Veränderungen in der Konstruktion und im Klंगाufbau hergestellt werden. Glockenklang prägt daher die Menschen in Europa seit über 1000 Jahren und stellt ein einzigartiges auditives Zeugnis europäischer Geschichte dar.

Zur Klangerzeugung hat sich in weiten Teilen Europas das Läuten durchgesetzt, bei dem die Glocke schwingend gelagert an einem Joch aufgehängt ist und in Pendelbewegung gebracht wird, so dass der in ihr installierte Klöppel die Glocke anschlägt. Durch diesen Klöppelanschlag können Glocken jedoch sehr hart beansprucht werden, so dass starker Verschleiß an den Anschlagstellen oder Risse im Klangkörper auftreten. Als vorbeugende Maßnahme wurden daher in der Vergangenheit vielfach Glocken gedreht, um die Dauerbelastungen des Klöppelanschlags über den Glockenumfang zu verteilen. Eine Reparatur gerissener Glocken war abgesehen von einigen ambitionierten Versuchen (beispielsweise durch Verklammern des Risses an der Ulmer Schwörglocke) bis Anfang des 20. Jahrhunderts nicht möglich, ehe sich das Schweißen als Reparaturverfahren etablieren konnte. [1] Da Schweißen aufgrund der notwendigen thermischen Behandlung der gesamten Glocke jedoch mit einem großen Aufwand und mit Risiken für die Weiterverwendung der Glocke verbunden ist, wird gegenwärtig verstärkt nach alternativen Reparaturmethoden geforscht. Die Sanierung der Johannesglocke des Meißner Doms [2] [3] erfolgte unter diesem Gesichtspunkt und stellt aufgrund der bei diesem Projekt geknüpften Kontakte zwischen den beteiligten Institutionen, dem Gießerei-Institut der TU Bergakademie Freiberg sowie dem Europäischen Kompetenzzentrum für Glocken ECC-ProBell der Hochschule Kempten, gewissermaßen auch die Grundlage für die vorliegende Arbeit dar.

Die Ursachen für Risse an Glocken wurden in der Vergangenheit häufig auf den Materialabtrag durch Schlagverschleiß und damit auf die Schwächung der Glockenwandung zurückgeführt. Erst mit den Untersuchungen des Fraunhofer-Instituts in Darmstadt (LBF) in den 1990er Jahren [4] sowie den darauf aufbauenden Forschungen des Europäischen Forschungsprojekts „Maintenance and protection of bells“ von 2005 bis 2008 [5] wurden die Beanspruchungsmechanismen läutender Glocken systematisch untersucht. Als entscheidende Einflussgröße wurde die Anschlagsintensität des Klöppels identifiziert, die im Wesentlichen durch die Anfluggeschwindigkeit und die wirksame Masse des Klöppels sowie die Steifigkeit des Schlagrings der Glocke bestimmt wird. Die erarbeiteten Erkenntnisse und Daten erlauben eine zuverlässige Einschätzung des Risikos für Ermüdungsschäden an Glocken unter den gegebenen Läutebedingungen bei gleichzeitiger Bewertung ihres Klangs. Die in diesem Zusammenhang entwickelten Verfahren zur Ermittlung der Läutebeanspruchungen erlauben jedoch keine Beurteilung, ob die Glocke bereits geschädigt ist, insbesondere ob erste Ermüdungsriss entstanden sind.

Die Praxis des Drehens von Glocken zur Verteilung der Läutebeanspruchungen über den Umfang der Glocke wurde ebenfalls wissenschaftlich untersucht. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme konnte durch die For-



sungen des LBF bestätigt werden, jedoch mit der Maßgabe, dass zu berücksichtigen ist, wo sich Bereiche hoher und niedriger Belastungen beim Läuten einer Glocke befinden.

Ziel dieser Arbeit ist es, Methoden aufzuzeigen, wie Ermüdungsrisse an Glocken derart früh erkannt werden können, dass noch keine deutlich hörbaren klanglichen Einbußen feststellbar sind, die eine Reparatur oder einen Austausch der Glocke notwendig machen. Vielmehr soll mithilfe geeigneter Maßnahmen erreicht werden, dass ein weiteres Läuten solcher Glocken bei guter Klangqualität gewährleistet ist.

Hierzu wird zunächst der Klang der Glocke im Hinblick auf die zugrundeliegenden mechanischen Schwingungen systematisch untersucht. Mit Simulationsmodellen werden die Auswirkungen von Fehlstellen, Ungängen, Glockenzier und Schäden auf das Schwingverhalten der Glocke ermittelt und deren spezifischer Einfluss auf die einzelnen Töne der Glocke schematisch dargestellt.

Anhand von Klangaufnahmen an Glocken mit unterschiedlichen Ausprägungen von Fehlstellen und Schäden werden die tatsächlichen Veränderungen im Klang analysiert und den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Auf Basis der dabei festgestellten Übereinstimmungen und aufbauend auf dem Verständnis des komplexen Schwinggeschehens der Glocke werden Methoden entwickelt, die eine eindeutige Identifikation von Schäden sowohl ihrer Art als auch ihrer Lage nach ermöglichen. Im Hinblick auf eine zuverlässige Schadenserkennung unter den Umgebungsbedingungen im Turm werden zur Absicherung dieser Methoden zusätzliche Messungen und Analysen herangezogen.

Abschließend wird dargestellt, wie mit den vorgeschlagenen Methoden eine Überwachung von Glocken im Kirchturm vorgenommen werden kann, um Ermüdungsrisse in einem sehr frühen Stadium zuverlässig erkennen und lokalisieren zu können.

2 Die Glocke – Form und Material

2.1 Geschichte der Glocke

Die Glocke blickt auf eine über 5000-jährige Geschichte zurück, die im fernen Osten, in Asien, begann. Ausgehend von einfachen Schalen und Vasen des alltäglichen Gebrauchs haben sich vermutlich kleine Glöckchen zur Klangerzeugung entwickelt, die zunächst aus Ton bestanden. [6] Ab ca. 1000 vor Christus sind in China vermutlich Glocken und Klangschalen aus Metall hergestellt worden. Die Grundlagen dafür lagen in einer bereits damals weit entwickelten Gusstechnik von Bronze, einem umfangreichen Wissen über stilistische Formgebung und einem fortgeschrittenen akustischen Verständnis. So wurde bei Ausgrabungen in der Provinz Hubei in Südchina ein Glockenspiel aus 65 Glocken aus dem 5. Jh. vor Christus gefunden, das bereits akustisch aufeinander abgestimmt war und damit ein Wissen voraussetzt, das in Europa erst in der Neuzeit vorhanden war. Die Form der antiken chinesischen Glocken ist jedoch nicht rotationssymmetrisch, sondern oval; ihr Klang zeichnet sich dadurch aus, dass an zwei gekennzeichneten Anschlagstellen unterschiedliche Töne angeregt werden. [7] (Abb. 2.1) Diese Glocken dienten nicht nur der Klangerzeugung, sondern wurden auch als Maßbecher verwendet. Die Tonhöhe der einzelnen Glocken stellte damit auch ein Äquivalent für ein bestimmtes Volumen bzw. eine bestimmte Masse dar. [8]



Abb. 2.1: Chinesische Bronzeglocken 475 v.Chr. (©Tomo.Yun (www.yunphoto.net/de/))

Die Glocke gelangte über die Handelswege und durch die Völkerwanderung ab dem 7. Jahrhundert nach Vorderasien und Nordafrika und von dort auch nach Europa. Hier wurden sie überwiegend als Signalgeber und zur Vertreibung böser Geister eingesetzt. Der Größe nach waren es Handglocken, die unseren heutigen Kuhglocken bzw. Schellen sehr ähnlich waren – aus Blech gefertigt oder als dünnwandige Schalen gegossen und mit einem im Inneren befestigten Klöppel.

In die abendländisch-christliche Tradition hielten die Glocken vor allem durch die irischen Wandermönche Einzug, und seit dem 9. Jh. sind erstmals gegossene Kirchenglocken schriftlich belegt. Diese verdrängten



mehr und mehr die aus Blech geschmiedeten und vernieteten Schellen, und es entwickelte sich die Kunst des Glockengießens. [9]

Die ersten gegossenen Glocken hatten eine Bienenkorbform mit sehr dünnwandigem Profil, also einer den vorhandenen Schellen sehr ähnlichen Form. Diese war vermutlich nicht besonders langlebig, so dass im Laufe des 11. Jh. der untere Bereich der Glocke, an dem der Klöppel anschlägt, dicker ausgeführt wurde, um die Glocken haltbarer zu machen. Diese Glocken wurden mit dem Wachsausschmelzverfahren hergestellt, das vergleichsweise aufwendig und teuer war. Um größere Glocken gießen zu können und das Verfahren günstiger und effizienter zu gestalten, entwickelte sich das Lehmformverfahren im 12. Jahrhundert. Gleichzeitig änderte sich die Form der Glocke in eine zuckerhutähnliche Form, möglicherweise aufgrund der Notwendigkeit, dass am Ende des Lehmformprozesses der Mantel abgehoben werden musste, um die falsche Glocke zu entfernen. Dafür war jedoch die gerade Wandung der Bienenkorbform ungeeignet. Das neue Formverfahren hatte großen Einfluss auf die Verbreitung von Glocken, da diese nun deutlich schneller und auch größer hergestellt werden konnten. (Abb. 2.2)

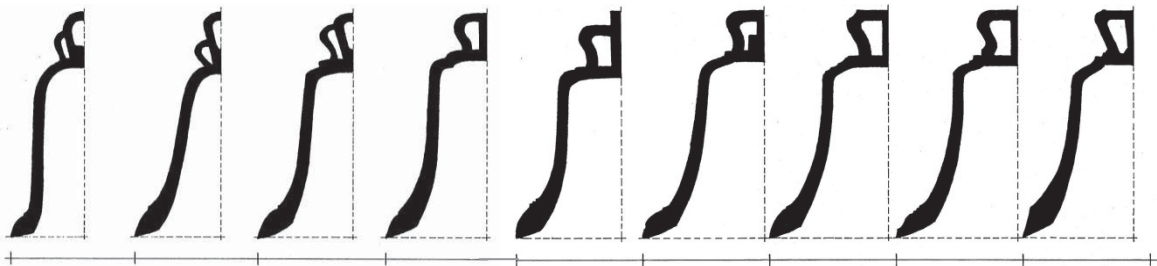


Abb. 2.2: Entwicklung der Glockenrippe vom 12. bis zum 20. Jh. etwa in Jahrhundertabständen [10]

Das Klangverhalten der Bienenkorb- und frühen Zuckerhutglocken ist von einem Teiltonaufbau geprägt, bei dem keine aufeinander abgestimmten Tonintervalle erkennbar sind, so dass auch kein eindeutiger Schlagton bestimmt werden kann. Das erschwert auch die Ermittlung der Tonhöhe solcher Glocken. Spätere Zuckerhutglocken, insbesondere aus dem 13. Jahrhundert, besitzen jedoch bereits erkennbare Tonintervalle, so dass zu vermuten ist, dass in dieser Zeit gezielt die Form der Glocke verändert wurde, um bestimmte Harmonien im Klang zu erreichen. Bereits Glocken ab Mitte des 13. Jh. besitzen einen dreiklangähnlichen Tonaufbau, der sich weitestgehend bis in die Gegenwart fortgesetzt hat und bis heute den Glockenklang prägt. Diese Form der Glocke, auch gotische Rippe genannt, ist im Wesentlichen bis heute erhalten geblieben und wurde nur noch in Nuancen geändert und verfeinert, um die Intervalle zwischen den Teiltönen zu optimieren bzw. andere Innenharmonien zu erhalten. [11]

Aufgrund des nunmehr weitgehend gleichbleibenden Klangbildes aller Glocken ist eine vergleichende Betrachtung von Glocken hinsichtlich ihres Schwingverhaltens möglich.



2.2 Aufbau und Material der Glocke

Die Glocke besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen, dem rotationssymmetrischen Klangkörper und der Krone, die der Aufhängung der Glocke dient. (Abb. 2.3) Bei Carillonglocken wird häufig auf die Krone verzichtet, um Kosten zu sparen. Das Profil des Klangkörpers wird Glockenrippe genannt.

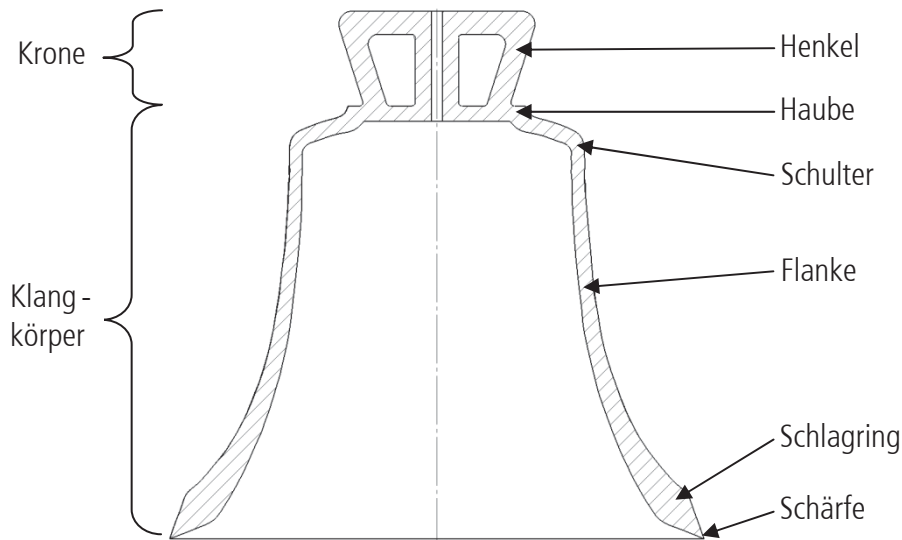


Abb. 2.3: Aufbau einer Glocke

Glocken werden fast ausschließlich aus Zinn-Bronze gegossen. Die in Deutschland geltenden Limburger Richtlinien von 1951 [12] schreiben eine Legierungszusammensetzung von 78% Kupfer und 22% Zinn mit maximal 2% Fremdbestandteilen vor. Besonders wird darauf hingewiesen, dass Blei nur mit einem Anteil von maximal 1% enthalten sein darf.

Vorteile dieser Legierungszusammensetzung sind nicht nur günstige Klangeigenschaften, wie eine geringe Materialdämpfung und eine vergleichsweise niedrige Schallgeschwindigkeit, sondern auch eine ausreichende Härte und Festigkeit sowie eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit.

Durch SCHAD [13] wurden die Werkstoffeinflüsse auf den Glockenklang unter besonderer Berücksichtigung der Legierungszusammensetzung sowie der Porosität untersucht. Nach seinen Analysen bietet die von den Limburger Richtlinien vorgeschriebene Legierungszusammensetzung sehr gute klangliche Eigenschaften, erst bei größeren Abweichungen des Zinnanteils von der vorgeschriebenen Legierung (Sn-Anteil <18%) sind klangliche Einbußen hinzunehmen, bei sehr hohen Zinnkonzentrationen (>24%) nimmt die Sprödigkeit des Materials deutlich zu. Auch der Einfluss weiterer Legierungsbestandteile wurde untersucht. Besonders ungünstig wirken sich bereits geringe Mengen von Phosphor, Magnesium, Aluminium und Wismut aus, da sie eine deutliche Zunahme der Materialdämpfung bewirken. Beimengungen von Blei und Silber, die insbesondere bei historischen Glocken mehrere Volumen-% betragen können, führen hingegen erst ab 3% bei Blei und 5% bei Silber zu schlechterer Klangqualität. Eine Zunahme der Materialdämpfung tritt auch bei hoher Materialporosität auf, die vor allem durch den Formprozess, den Gießvorgang sowie durch die Erstarrung beeinflusst wird.



2.3 Herstellung von Glocken

Nicht nur die Legierungszusammensetzung, auch das Materialgefüge und die Glockenform haben Einfluss auf die Klangqualität und die Lebensdauer von Glocken. Da Glocken generell durch Gießen hergestellt werden, stehen für diese Parameter die Fertigungsprozesse bei der Formgebung und beim eigentlichen Gießen im besonderen Fokus.

Während das Materialgefüge vor allem durch die Erstarrungs- und Abkühlprozesse beeinflusst wird, ist die Qualität der Glockenform vom verwendeten Formmaterial und der Wahl des Formverfahrens abhängig.

Seit dem frühen Mittelalter werden Glocken ausschließlich im Sandgussverfahren mit verlorenen Formen hergestellt. Zur Herstellung der Gussform kamen und kommen verschiedene Herstellungsverfahren zum Einsatz:

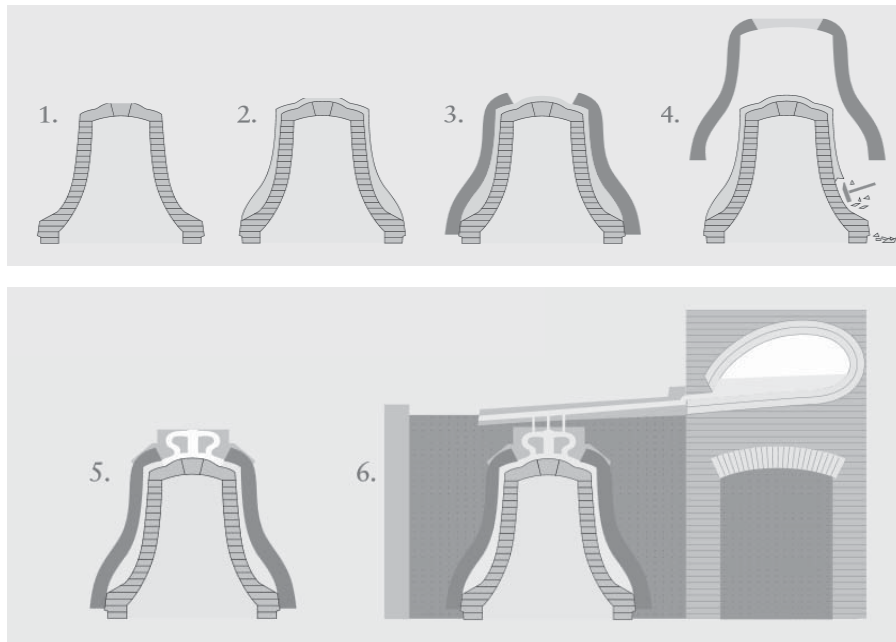
- Wachsausschmelzverfahren
- Lehmformverfahren
- Sandformverfahren

Das Wachsausschmelzverfahren ist das älteste Gießverfahren, mit dem Glocken hergestellt wurden. Die Bienenkorbglocken des frühen Mittelalters wurden im Ganzen als Wachsmo- dell hergestellt und in einer Form aus Lehm gegossen. Die Kosten für die Herstellung größerer Glocken waren enorm, da die Gewinnung von Wachs im frühen Mittelalter sehr aufwendig war. Bis heute findet das Wachsausschmelzverfahren in den Gießereien Verwendung. Häufig werden die Krone und die Zier der Glocke aus Wachsmo- dellen hergestellt und auf die Sand- bzw. Lehmformen aufgebracht. Die Herstellung kleiner Glocken, wie Hand-, Tisch- oder Hausglocken, wird ebenfalls überwiegend mit dem Wachsausschmelzverfahren durchgeführt.

2.3.1 Das Lehmformverfahren

Das Lehmformverfahren wird bis heute vor allem im deutschen Sprachraum verwendet. Es ist verglichen mit modernen Formverfahren sehr zeit- und kostenintensiv, wird aber vor allem deshalb bevorzugt, weil eine sehr feine Gussoberfläche erreicht wird und es den traditionellen und handwerklichen Charakter der Glockengießerkunst unterstreicht.

Beschrieben wird dieses Verfahren unter anderem von RINCKER [10] und AUDY ET. AL. [14].



**Abb. 2.4: Arbeitsschritte bei der Herstellung einer Glocke im traditionellen Lehmformverfahren
(©H. Rüetschi AG Aarau)**

Die Form wird in mehreren aufeinander folgenden Arbeitsschritten aufgebaut. (Abb. 2.4) Zuerst wird ein innerer Kern aus Stein gemauert, der innen hohl bleibt, um darin eine Wärmequelle zur Trocknung der Form zu positionieren. (1) Darauf kommen mehrere Lagen Lehm, die mit einer rotierenden Schablone abgezogen werden, um das innere Profil der Glocke auszuformen. Der Lehm ist mit Gerstengrannen oder Hanf und mit Tierhaaren vermengt, um die Rissbildung der Form beim Trocknen zu vermeiden. Auf die innere Kontur der Glocke wird eine Trennschicht aus Talg aufgetragen, um später die Modellglocke der Form, die sogenannte „falsche Glocke“, entnehmen zu können. Mit der Schablone des äußeren Profils der Glocke wird daraufhin die Modellglocke geformt. (2) Auf die getrocknete und ausgehärtete Modellglocke werden die Inschriften und die Glockenzier mit Wachsformen aufgesetzt und eine weitere Trennschicht aus Talg aufgetragen, um auch die äußere Gussform von der „falschen Glocke“ lösen zu können. Die äußere Form wird wiederum mit Lehm ausgeformt und getrocknet. (3) Nach der Trocknung wird die Modellglocke entnommen und zerschlagen. (4) Die Formen der Krone, des Angusses sowie der Speiser und Windpfeifen, die als Wachsmodele hergestellt werden, werden auf die äußere Form aufgesetzt und so die gesamte Gussform in der Gussgrube in Erde eingegraben. (5+6) Das Gießsystem ist ein fallender Guss, wobei über die Glockenkrone sowohl eingegossen als auch gespeist wird.

Das Schmelzgut ist eine zinnärmere Bronze als Glockenbronze mit etwa 6% bis 10% Zinnanteil, da aufgrund seines niedrigen Schmelzpunktes Zinn beim Schmelzen verbrennt. Im Allgemeinen kommen brennstoffbeheizte Schmelzöfen zum Einsatz. Während des Erhitzens und Schmelzens des Materials nimmt die Schmelze Sauerstoff auf, so dass vor dem eigentlichen Gießen ein reduzierender Prozess notwendig ist. Dieser wird durch eine reduzierende Brennflamme oder durch Verwendung von Kupferphosphor erreicht. Kupferphosphor wird auch bei größeren Öfen und Schmelzbädern verwendet, um die Schmelze abzudecken. Vor dem Gießen wird der Zinngehalt der Schmelze durch Zugabe von reinem Zinn auf 22% erhöht.



Danach wird die Schmelze mit einem Holzstamm umgerührt, um eine Umwälzung des Schmelzbades zu bewirken und eine Desoxidierung der Schmelze nochmals zu unterstützen. Die Gießtemperatur der Bronzelegierung beträgt etwa 1100°C.

Traditionell erfolgt der Guss nach dem Abstich des Ofens über Rinnen, die die Schmelze vom Ofen bis zur eingegrabenen Gussform fließen lassen.

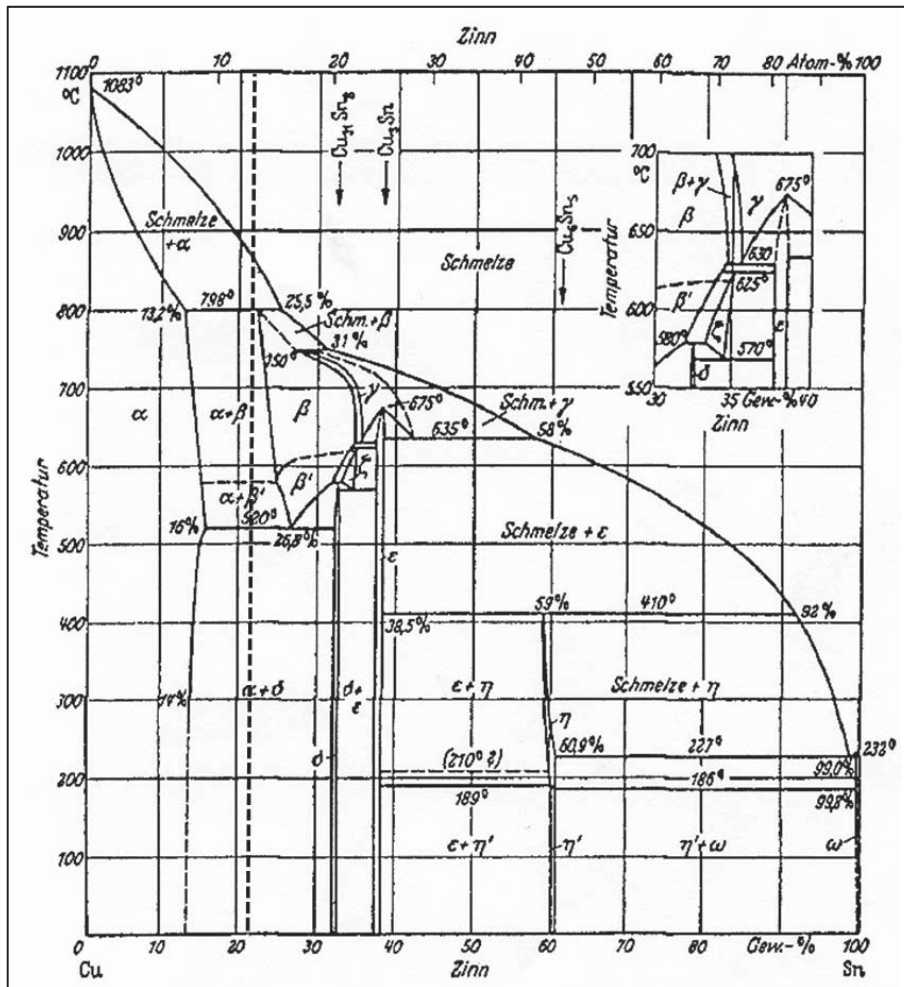


Abb. 2.5: Phasendiagramm von Zinn-Bronze (nach [15])
(Die gestrichelte Linie entspricht in etwa der Glockenbronze)

Die Erstarrung der Schmelze in der Form setzt bei ca. 900°C ein und verläuft in Lehmformen verhältnismäßig langsam. Während der Erstarrung wird α -Phase in Form von Dendriten gebildet, die einen Zinnanteil von etwa 14% aufweist, das entspricht der maximalen Lösbarkeit von Zinn in Kupfer. (Abb. 2.5) An den Korngrenzen erstarrt bei etwa 800°C exotherm die restliche zinnreiche Schmelze als α/β -Eutektoid. Bei etwa 520°C wandelt sich das α/β -Eutektoid exotherm in ein α/δ -Eutektoid um.

Nach dieser Gefügeumwandlung findet eine gleichmäßige Abkühlung statt. Glocken verbleiben im Allgemeinen bis zu einer Abkühltemperatur von 50°C bis 100°C in der Gussform. Nach dem Ausgraben werden Form und Schlacke entfernt, die Oberfläche gereinigt sowie die Zier und Inschriften nachzisiert. [16]

Etliche Glockengießer haben das Lehmformverfahren partiell verändert, um die Gussqualität zu verbessern und die Kosten und Herstellzeiten zu reduzieren. Um die Schmelze beim Einguss zu beruhigen, werden Filter verwendet oder das Gießsystem als steigender Guss ausgeführt. Um die Porosität zu verringern, wird unter anderem in Frankreich die Glockenform mit der Krone nach unten in die Gussform eingesetzt. Mithilfe eines steigenden Gießsystems und mehreren Speisern am Schlagring soll der beim Läuten hochbeanspruchte Bereich dadurch ein möglichst dichtes Gefüge erhalten.

Die Herstellung der Form wird in vielen Glockengießereien mittlerweile nicht mehr mit einer verlorenen Holzschablone, sondern mit Dauerschablonen aus Metall durchgeführt. Auch das aufwendige Eingraben in Erde innerhalb der Gussgrube wird durch die Verwendung von Formkästen vereinfacht und die Schmelze wird häufig über Pfannen in die Form gefüllt.

2.3.2 Das Sandformverfahren

Seit einigen Jahrzehnten werden beim Glockenguss auch Sandformverfahren verwendet. Als Bindemittel für den Formsand kommen Furanharz oder Wasserglas zum Einsatz. Vorteile sind die deutlich kürzere Herstellzeit der Form, geringere Gefahr für Formrisse, höhere Formfestigkeit beim Gießen, kaltes Aushärten der Form sowie eine längere Lagerfähigkeit der Form. Zudem wurde durch AUDY ET. AL. [17] festgestellt, dass die veränderten Abkühlbedingungen durch Formsand zu einer besseren Keimbildung in der Schmelze und zu einem gleichmäßigeren Kornwachstum bei der Gefügebildung führen. Nachteil des reinen Sandformverfahrens ist vor allem die deutlich schlechtere Gussoberfläche.

Bei der Verwendung des Sandformverfahrens kommen grundsätzlich Formkästen zum Einsatz und für die Herstellung der Gussform werden im Allgemeinen Dauerschablonen oder Dauermodelle der Glocke verwendet. Zur Verbesserung der Gussoberfläche werden Sandformverfahren häufig mit einem abgewandelten Lehmformverfahren kombiniert, um die Vorteile beider Verfahren miteinander kombinieren zu können. Dazu wird auf das Glockenmodell eine dünne Lehmschicht aufgetragen, bevor die äußere Form mit Formsand aufgefüllt wird.

Nach dem Guss werden die Oberflächen durch Schleifen oder Sandstrahlen bearbeitet. Vor allem wird das Sandformverfahren bei Carillonglocken angewandt, die grundsätzlich an den Oberflächen nachbearbeitet werden, um optimale Klangeigenschaften zu erreichen.

