



Technische Universität Wien

DISSERTATION

Untersuchungen an Kirchenglocken

unter besonderer Berücksichtigung

● des Klangverhaltens, der Konstruktion und der Werkstoffeinflüsse

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Schreiner
E 164
Institut für Chemische Technologien und Analytik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
● Fakultät für Technische Chemie

von

Dipl. Ing. Jörg Wernisch
Matrikelnummer 91/26254
Obere Donastr. 3/13
1020 Wien

Wien, im September 2004

A handwritten signature in black ink, reading 'Jörg Wernisch', is written over a horizontal line.

Untersuchungen an Kirchenglocken

unter besonderer Berücksichtigung
des Klangverhaltens, der Konstruktion und der Werkstoffeinflüsse

von Jörg Wernisch

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird über eine Reihe von Messungen an Kirchenglocken des deutschsprachigen Raumes vom 10. Jh. bis in die Gegenwart berichtet. Den ersten Schwerpunkt setzen hierbei Untersuchungen hinsichtlich des Klangverhaltens, wobei hier gezielt Meßmethoden mittels EDV zum Einsatz kommen. Gemessen wurde nicht nur der Teiltonaufbau, sondern vor allem die Klangfarbe von Glocken; insbesondere wird gezeigt, wie man mittels Klanganalyse mit Hilfe des Computers, eine Methode, die in der Glockenkunde völlig unüblich ist und bis jetzt auch praktisch keine Anwendung gefunden hat, den Glockenklang auswerten und beurteilen kann. Den nächsten Schwerpunkt setzen Untersuchungen bezüglich der Konstruktionen von Glocken (Glockenrippen). Einerseits wird gezeigt, wie die Form der Glocke sich auf deren Klangverhalten auswirkt, andererseits werden hier Methoden demonstriert, mit denen man Eigenschaften von Glockenrippen bestimmen kann. Dadurch ist es nun möglich, die Entwicklung der Glockenform bzw. die Arbeitsweisen von früheren Gießern der Gotik, Renaissance und des Barocks viel tiefgründiger zu erforschen als man bis jetzt in der Lage ist. Weitere Untersuchungen beschäftigen sich mit den verschiedenen Werkstoffen, aus denen Glocken gegossen wurden. Gezeigt wird nicht nur, wie die jeweiligen Werkstoffeigenschaften sich allgemein auf das Klangverhalten von Glocken niederschlagen, sondern auch alle im Glockenguß bis jetzt verwendeten Materialien (Bronze, Sonderbronze, Messinge, Stahl, Gußeisen und Zinklegierungen) werden diskutiert. Abschließend wird noch über Armaturen (Klöppel, Joch) und deren Einfluß auf das Klangverhalten von Glocken, aber auch über Turmakustik berichtet.

Summary

In the present work a report on a series of measurements at church bells in the German speaking countries from the 10. century till the present time is given. Examinations of the acoustical behaviour by means of EDP place the first main focus. The partial construction and above all the timbre of bells was measured; especially it is shown, how one can appraise bell sound by means of sound analysis, a method that is completely unorthodox in the bell tidings and practically has not found any application. Examinations of the constructions of bells (bell shape) place the next main focus. It is shown on the one hand, how bell shapes have an effect on their acoustical behaviours, on the other hand methods, with which one can determine qualities of bell shapes, are demonstrated. These methods facilitate to explore the development of the bell shapes as well as the operations of former bell-casters of the Gothic, Renaissance and the Baroque much more profoundly than it is possible up to now. Further examinations occupy themselves with the different bell alloys. It is shown how the respective material qualities settle generally on the acoustical behaviour of bells. Additionally a discussion of all materials which have been used for bell casting (bronze, special bronze, brass, steel, casting iron and zinc alloys) takes place. Finally, bell-fittings (clappers, headstocks) and their influence on the acoustical behaviour of bells, but also aspects of tower acoustics are reported.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1. Einführendes	3
1.1. Über die Angabe von Tonhöhen	3
1.2. Klanganalysen	4
1.2.1. Meßprinzipien	4
1.2.2. Klangspektren	5
1.2.3. Amplitudendiagramme	6
1.2.4. Zeit-Frequenz-Intensitätsdiagramme (Sonagramme)	6
1.2.5. Klanguntersuchungen – Meßgeräte	7
2. Klanglehre	9
2.1. Charakteristik des Glockenklanges	9
2.2. Teiltöne – Die Grundbestandteile des Glockenklanges	9
2.2.1. Definition, Benennung	9
2.2.2. Eigenschaften	11
2.2.3. Charakteristika der wichtigsten Teiltöne	14
2.2.4. Einteilung von Teiltönen	16
2.3. Der Schlagton	18
2.3.1. Definition	18
2.3.2. Schlagtonbestimmung	22
2.3.3. Dispositionen	23
2.4. Nebenschlagttöne	24
2.4.1. Quart-Nebenschlagton	24
2.4.2. Sekundnebeschlagton	25
2.4.3. „Terzschlagton“	26

2.5. Der Glockentyp	27
2.5.1. Definition	27
2.5.2. Beschreibung des Glockentyps; Tonanalyse	30
2.5.3. Reduzierte Analysen	31
2.6. Die Tongebung	32
2.6.1. Definition	32
2.6.2. Tonfülle	33
2.6.3. „Tönigkeit“	37
2.6.4. „Tonspanne“	39
2.6.5. „Geräuschanteil“	40
2.6.6. „Anschlag“	42
2.6.7. Beschreibung der Tongebung	44
2.7. Bewertung des Glockenklanges – Die Klangqualität	45
2.7.1. Beurteilung des Glockenklanges	45
2.7.2. Angabe der Klangqualität	46
2.7.3. Angabe von Klangdaten bei Glocken	47
3. Die Glockenrippe	49
3.1. Aufbau einer Glocke – Die Glockenrippe	49
3.1.1. Definition	49
3.1.2. Glockenabmessungen – „Relativmaße“	50
3.1.3. Glockengewicht	51
3.2. Eigenschaften und Einteilung von Glockenrippen	56
3.2.1. „Bezugsglocke“	56
3.2.2. Die Rippenstärke – Der „RS-Wert“	56
3.2.3. Die Rippenschwere	59
3.2.4. Die „Dimensionierung“	62
3.2.5. Einteilung von Glockenrippen	62
3.3. Einfluß der Glockenform auf das Klangverhalten	63
3.3.1. Einfluß der Glockenform auf den Teiltonaufbau	63
3.3.2. Einfluß der Glockenform auf die Tongebung	67

3.4. Entwicklung der Glockenform – Die „charakteristischen Glockenformen“	73
3.4.1. Die Bienenkorbform	73
3.4.2. Die Zuckerhutform	74
3.4.3. Die Übergangsformen	75
3.4.4. Die Gotische Rippe	76
3.4.5. Die „Sekundären Rippen“	78
3.4.6. Die „Barockrippe“	82
3.4.7. Die „Modernen Rippen“	85

4. Glockenwerkstoffe 90

4.1. Werkstoffeigenschaften 90

4.1.1. Akustische Eigenschaften	90
4.1.2. Mechanische Eigenschaften	92
4.1.3. Korrosionsbeständigkeit	94

4.2. Einfluß des Materials auf das Klangverhalten 95

4.3. Bronze 98

4.4. Sonderbronze 106

4.5. Messing und Sondermessing 107

4.6. Stahl 110

4.6.1. Eigenschaften	110
4.6.2. Die Stahlglocke – durch Zufall entstanden	116

4.7. Gußeisen 117

4.8. Zinklegierung (Weißbronze) 119

5. Ton- und Glockenrippenberechnungen 121

5.1. Konstruieren von Glockenrippen 121

5.2. Errechnen der Tonlage einer zu gießenden Glocke 124

5.2.1. Allgemeine Grundlagen	124
5.2.2. Das Proportionalitätsgesetz	126
5.2.3. Verhältniszahlen	129
5.2.4. Nachweis der Anwendung des Proportionalitätsgesetzes	130
6. Armaturen und Turmakustik	135
6.1. Läuten	135
6.1.1. Definition	135
6.1.2. Die „Dynamik“	136
6.2. Der Klöppel	139
6.2.1. Allgemeines	139
6.2.2. Einteilung von Klöppeln	140
6.2.3. Die „Anschlagbedingung“	142
6.3. Das Joch	146
6.3.1. Allgemeines	146
6.3.2. Gerade Joche	147
6.3.3. Leicht gekröpfte Joche	147
6.3.4. Stark gekröpfte Joche	148
6.4. Einfluß der Armaturen auf das Klangverhalten	149
6.4.1. Einfluß der Armaturen auf die Tongebung	150
6.4.2. Einfluß der Armaturen auf die Dynamik	156
6.4.3. Einfluß des Jochmaterials auf das Klangverhalten	158
6.4.4. Optimieren der Armaturen bezüglich des Klangverhaltens	161
6.5. Turmakustik	166
Zusammenfassung	171
Literaturverzeichnis	174
Abbildungsverzeichnis	177
Lebenslauf	178

Einleitung

Glockenkunde (fachlich „Campanologie“), so wie sie in den aktuellen Büchern gelehrt wird, ist teilweise recht mangelhaft und enthält sogar drastische Irrtümer und Vorurteile. So ist man z.B. mit den in der Glockenkunde derzeit zur Verfügung stehenden Mitteln kaum in der Lage, den Glockenklang auch nur annähernd zu beschreiben, geschweige denn zu messen. Dies hat seine Ursache u.a. darin, daß man (zumindestens im deutschen Sprachraum) für Klangmessungen immer noch Stimmgabeln und Stoppuhren verwendet, auf moderne Meßtechnik (z.B. Klanganalyse mittels Computer) aber weitestgehend verzichtet, wobei zu dieser Haltung ideologische Gründe eine gewichtige Rolle spielen. Die Voreingenommenheit vieler Glockensachverständiger hat maßgeblich zu den in der Glockenkunde verbreiteten Irrtümern beigetragen (es sei hier nur auf die „Anti-Stahlideologie“ hingewiesen, die Stahlglocken, Stahljoche und Stahlglockenstühle von Grund auf als minderwertig bezeichnet und nur Bronzeglocken, Holzjoche und Holzglockenstühle als einzig zulässig betrachtet); sie beruhen aber auch auf dem Umstand, daß man hier einfach nicht in der Lage ist, grundlegende Eigenschaften von Glocken qualitativ und quantitativ zu bewerten, zu messen bzw. falsche Ansatzpunkte zu deren Bestimmung heran zu ziehen, was dann zu Fehlern geführt hat, die aber bis heute nicht als solche erkannt wurden (wie etwa die Bestimmung der Rippenstärke über das Glockengewicht, eine Methode, die teilweise völlig falsche Ergebnisse liefert). Der stark interdisziplinären Charakter der Glockenkunde erschwert überdies Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet, denn die für Glocken zuständigen Experten sind meist Musiker oder stammen aus geisteswissenschaftlichem Umfeld und verfügen daher in der Regel über wenig naturwissenschaftliche Kenntnis, während Naturwissenschaftler zwar in der Lage wären, das Wesen der Glocke technisch zu erfassen, aber meist nicht wissen, worauf es beim Glockenklang ankommt.

Diese Arbeit möchte diese Lücke überbrücken und zeigen, wie man mit naturwissenschaftlichen Methoden das Klangverhalten und die Eigenschaften von Glocken messen, beschreiben und bewerten kann. Bezüglich des Klangverhaltens bietet die Klanganalyse mittels Computer ungeahnte Möglichkeiten, weil hier nicht nur die Tonhöhe von Glockenteiltönen, sondern vor allem Klangfarben und sogar auch Werkstoffeigenschaften meßbar sind. Aber auch äußere Einflüsse auf den Glockenklang, wie etwa die der Turmakustik oder von Armaturen, kann man mit dieser Methode nachweisen; all dies wäre mit der herkömmlichen Methode mittels Stimmgabeln undenkbar. Es sollen in dieser Arbeit aber nicht nur völlig neu gewonnene Erkenntnisse gezeigt werden, sondern es werden auch Begriffe, die in der Glockenkunde als Selbstverständlichkeit angesehen werden, unter die Lupe genommen und auf ihre Richtigkeit überprüft (z.B. die Bestimmung des Schlagtones, die Beurteilung der Tonfülle = Resonanz mittels der Nachhalldauer oder die Bestimmung der Rippenstärke). Dasselbe gilt auch für einige verbreitete wissenschaftlich nicht bewiesene Vorurteile, die hier hinterleuchtet und richtiggestellt werden konnten (etwa der angeblich nachteilige Einfluß von Stahljochen auf den Glockenklang). Eine weitere Zielsetzung dieser Arbeit war aber auch die Entwicklung von Konzepten und Methoden, die das glockenkundliche Arbeiten erleichtern und gleichzeitig als neue, hilfreiche Werkzeuge in der Forschung (vor allem über historische Glocken) Anwendung finden sollen, wodurch u.a. Arbeitsweisen früherer Glockengießer anhand ihrer Glocken untersucht werden können, denn archivalische Unterlagen sind darüber in der Regel nicht vorhanden. Viele Begriffe und Eigenschaften, die in dieser Arbeit festgelegt bzw. entdeckt wurden, sind in der Glockenkunde völlig unbekannt. Um sie besser von den gängigen glockenkundlichen Begriffen zu unterscheiden, sind diese, zumindestens in den Abschnitten, wo sie genau erläutert und erklärt werden, unter Anführungszeichen gestellt.

Es erschien als sinnvoll, vorliegende Arbeit so aufzugliedern, daß einem bestimmten glockenkundlichen Aspekt (Klang, Form, Metall etc.) ein ebensolcher Abschnitt gewidmet ist. Demnach gliedert sich die Arbeit wie folgt:

Der e r s t e Abschnitt enthält die Grundlagen über Tonhöhenangaben in der Glockenkunde sowie über die mit dem Computer durchführbaren und hier verwendeten Klangmeßmethoden (Klangspektren, Amplitudendiagramme, Sonagramme).

Der z w e i t e Abschnitt beinhaltet die Klanglehre der Glocke, wo deren Klangeigenschaften bzw. deren Klangverhalten beschrieben und untersucht werden. Hier wird auch gezeigt, wie man durch die Klanganalyse mittels Computer den Glockenklang auswertet.

Der d r i t t e Abschnitt widmet sich der Glockenrippe (= Form bzw. Konstruktion der Glocke). Hier wird nicht nur der Aufbau der Glockenrippe und deren Eigenschaften untersucht, sondern auch deren Auswirkungen auf den Glockenklang und die Entwicklung der Glockenrippen von den Anfängen im 10. Jh. bis heute.

Der v i e r t e Abschnitt ist hauptsächlich werkstoffkundlicher Natur; hier werden nicht nur allgemeine Werkstoffeigenschaften bzw. deren Auswirkungen auf den Glockenklang diskutiert, sondern auch alle im Glockenguß verwendeten Metalle (Bronze, Sonderbronze, Sondermessing, Stahl, Gußeisen und Zinklegierungen) genauer betrachtet.

Der f ü n f t e Abschnitt zeigt, wie man Glockenrippen konstruiert, von welchen Parametern die Tonlage einer Glocke abhängt und wie man diese berechnet. Er enthält auch einige Methoden, um Arbeitsweisen früherer Gießer zu ermitteln bzw. zu untersuchen.

Der s e c h s t e und letzte Abschnitt hat die Armaturen (Klöppel, Joch) sowie die Turmakustik zum Inhalt. Neben grundlegendem Aspekten wird hier vor allem deren Einfluß auf das Klangverhalten von Glocken beleuchtet.

1. Einführendes

Über die Angabe von Tonhöhen

1.1

Die Tonlage einer Glocke (Schlagton, Nebenschlagtöne), aber auch die Teiltöne werden in der Glockenkunde in den Tönen der temperierten Tonleiter angegeben (c, cis = des, d, dis = es, e, f, fis = ges, g, gis = as, a, b, h, c, . . .), wobei die jeweilige Oktave mit einem Index (°, ', '', '''. . .) angezeigt wird, z.B. h°, fis', g'''. . . Die absolute Tonhöhe ist (im deutschen Sprachraum) mit a' = 435 Hz festgelegt^{1) 2)}. Oft entsprechen die Tonhöhen bei Glocken jedoch nicht der exakten Stimmung, sondern weichen mehr oder weniger davon ab: Eine Feineinteilung der temperierten Tonleiter ist notwendig. Ähnlich, wie man 1 Meter in 100 Zentimeter aufteilt, so unterteilt man den temperierten Ganzton in 16 Untereinheiten auf (G a n z t o n s e c h s z e h n t e l genannt, kurz Gt/16), welche als Abweichung zur exakten Stimmung angegeben werden. Gt/16 sind sozusagen die „Zentimeter“ in der Tonhöhenmessung. Dazu einige Beispiele:

c'±0 . . . bedeutet reines c', es gibt keine Abweichung

c'+2 . . . etwas höher als c' (2 entspricht einer Abweichung von einem Achtelton)

c'+4 . . . liegt genau zwischen c' und cis' (4 entspricht einem Viertelton), kann auch als cis'-4 geschrieben werden

c'+6 . . . stark erhöhtes c', fast cis' (6 gibt einen Dreiviertelton an), was auch als cis'-2 wiedergegeben werden kann

c'+8 = cis'±0 (8 entspricht einem Halbton).

Teiltöne sind, weil sie gerätetechnisch erfaßbar sind, sehr exakt meßbar und werden in der Glockenkunde normalerweise bis 0,5 Ganztonsechszehntel genau angegeben. Bei Schlagtönen ist das eigentlich nicht möglich, weil diese nur gehörmäßig bestimmbar sind (d. h. auf 1-2 Ganztonsechszehntel genau; Grenze ist die Hörfähigkeit des Menschen); unter Anwendung bestimmter Regeln ist aber bei Schlagtönen dennoch eine genauere Angabe erzielbar.

Hier soll gleich auch ein Problem der Tonhöhenangabe erläutert werden – denn diese ist leider von Land zu Land unterschiedlich. Während in Österreich die (formalistisch richtigen) Ganztonsechszehntel üblich sind¹⁾ (diese werden in dieser Arbeit durchwegs angewandt), so verwendet man hingegen in Deutschland²⁾ Halbtonsechszehntel (1 Halbton = 16 Halbtonsechszehntel, kurz Ht/16); in anderen Ländern, wie z.B. in England oder in den Niederlanden sind wiederum cents üblich (1 Halbton = 100 cents). Die Angabe von Tonhöhen in Hertz ist in der Glockenkunde ungebräuchlich.

Aber auch die Festlegung der absoluten Tonhöhe differiert. Während im deutschen Sprachraum in der Glockenkunde noch der alte Kammerton a' = 435 Hz verwendet wird, so ist in den übrigen Ländern die heutige Normalstimmung a' = 440 Hz üblich³⁾.

1.2.1 Meßprinzipien

Eine genaue Erfassung des Glockenklanges erfolgt im Rahmen einer sogenannten **K l a n g a n a l y s e**. Als Meßgeräte werden in der Glockenkunde üblicherweise spezielle **S t i m m g a b e l n** mit verstellbaren Gewichten verwendet^{2) 4)}. Das Meßprinzip beruht hierbei auf der Resonanz; sobald die auf die Glocke aufgesetzte Stimmgabel dieselbe Frequenz aufweist wie ein Teilton der Glocke, so beginnt diese zu ertönen. Die Genauigkeit der Messung ist über die Schwebung (entstehend durch Teilton der Glocke – Ton der Stimmgabel) einstellbar (diese verschwindet bei völliger Deckungsgleichheit beider Töne). Hierbei ist jedoch Übung und ein entsprechendes Gehör vonnöten. Mit der Stimmgabelmethode läßt sich einzig die Tonhöhe der Teiltöne einer Glocke feststellen; ev. ist mittels einer Stoppuhr noch die Abklingdauer der drei tiefsten und am längsten klingenden Teiltöne (Unterton, Prim, Terz) meßbar.

Moderne Technologie ermöglicht es nun aber, den Glockenklang auch elektronisch mit Hilfe des **C o m p u t e r** auszuwerten, wobei dieser hierbei durch unterschiedliche Verfahren untersucht werden kann. Dabei kann der Glockenklang direkt am Standort aufgenommen werden, oder man zieht Tonaufnahmen der jeweils zu untersuchenden Glocke heran (am besten Digitalaufnahmen; bei Analogaufnahmen können systematische Fehler in der absoluten Tonhöhe aufgrund geringfügiger Unterschiede in der Aufnahme- / Abspielgeschwindigkeit auftreten; aus diesem Grund empfiehlt es sich, bei Analogaufnahmen immer einen Referenzton mit aufzunehmen). Aufgrund der großen Möglichkeiten, welche dieses Verfahren bietet, besitzt die Auswertung des Glockenklanges mittels Computer gegenüber der herkömmlichen Methode durch Stimmgabeln erhebliche Vorteile:

- Man kann die Messung direkt an der läutenden Glocke durchführen und damit den Glockenklang so erfassen, wie er vom Turm erklingt. Die Stimmgabelanalyse ist nur an der ruhenden Glocke durchführbar, eine Erfassung des Klangverhaltens während des Läutens ist unmöglich.
- Während mit Stimmgabeln nur der Bereich bis 2400 Hz (d''''') erfaßt werden kann, ist es nun möglich, Frequenzen bis 20 000 Hz zu erfassen. Dadurch können auch sehr kleine Glocken (Durchmesser < 40 cm) vollständig ausgewertet werden.
- Die Intensität und das Abklingverhalten der Teiltöne und damit auch die Tongebung (Klangfarbe) der Glocke sind meßbar; mit der Stimmgabel geht das hingegen nicht.
- Es werden alle Teiltöne, die durch den Klöppelanschlag erregt werden, in ihrer Lage und Intensität simultan erfaßt. Mit der Stimmgabel müssen dagegen die einzelnen Teiltöne selektiv herausgesucht werden, d. h. man muß schon vorher wissen, wo diese ungefähr liegen; hierbei besteht besonders bei Glocken mit Unregelmäßigkeiten im Teiltonaufbau (wie bei Bienenkorb- und Zuckerhutglocken) die Gefahr des „Übersehens“ des einen oder anderen Teiltones beziehungsweise deren falsche Zuordnung und Bezeichnung (gespaltene Teiltöne).
- Es können auch sehr schwer bzw. unzugängliche Glocken (Dachreiter) analysiert werden, da ein direkter Kontakt mit der Glocke nicht erforderlich ist.
- Die Analyse kann, wenn der Glockenklang gespeichert ist (als Tonaufnahme oder direkt auf der Festplatte) jederzeit am Computer wiederholt werden. Bei Stimmgabelanalysen muß man stets die zu untersuchende Glocke aufsuchen.
- Das Analysenverfahren selbst ist im Prinzip objektiv, Fehler durch unterschiedliche Hörfähigkeit (die Qualität einer Stimmgabelanalyse ist erheblich davon abhängig) oder gar Voreingenommenheit sind daher ausgeschlossen.

Für die Untersuchung des Glockenklanges wurden in dieser Arbeit folgende drei Auswertungsverfahren herangezogen: Klangspektren, Amplitudendiagramme und Zeit-Frequenz-Intensitätsdiagramme (sog. Sonagramme). Die Grundlagen dieser Auswertungsverfahren bzw. die dazu verwendeten technischen Geräte werden in den nun nachfolgenden Kapiteln näher erläutert.

1.2.2 Klangspektren

Die Teiltöne einer Glocke können mittels Fourieranalyse graphisch in einem sogenannten Klangspektrum gemessen und dargestellt werden. Hierbei werden auf der X-Achse die Frequenz (Tonhöhe) in Hertz aufgetragen, während die Y-Achse die Intensität (Dezibel) angibt. Die Frequenzskala (X-Achse) trägt man am günstigsten im logarithmischen Maßstab auf, da hier gleiche Abstände auch gleiche Intervalle in allen Tonlagen bedeuten (entspricht den Intervallen in der Musik). Ein Teilton äußert sich im Klangspektrum durch eine „Spitze“ oder „Linie“ (fachlich Peak genannt); je höher sie ist, desto lauter ist der Teilton. Klangspektren werden entweder zu einem Zeitpunkt oder aber über eine (wählbare) Zeitspanne aufgezeichnet; bei letzterem sind die Intensitäten der Teiltöne die über diesem Zeitraum gemittelten Werte. Bei Glockenklangspektren (Abb. 1) lassen sich folgende grundlegende Beobachtungen feststellen:

- Die intensitätsmäßig stärksten Teiltöne findet man bei niedrigen Frequenzen.
- Mit steigender Tonhöhe („rechts“ im Spektrum) nimmt deren Intensität stetig ab, bis sie nicht mehr meßbar sind.
- Die Abstände (Intervalle) zwischen zwei benachbarten Teiltönen werden mit zunehmender Tonhöhe (nach „rechts“) immer kleiner.
- Die wichtigsten Teiltöne der Glocke, die sog. „Lauttöner“ wie Unterton, Prim, Terz, Oberoktave etc. treten in der Regel intensitätsmäßig stark hervor und sind daher leicht zu erkennen.

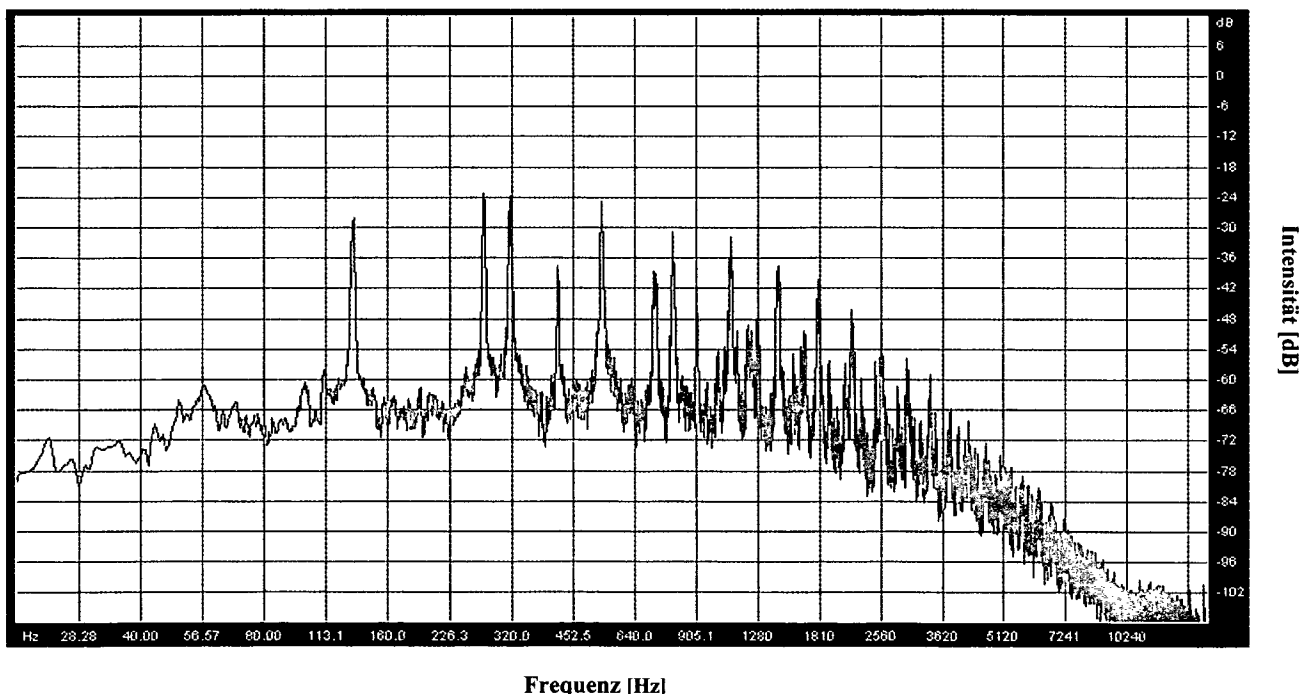


Abb. 1: Klangspektrum einer läutenden Glocke (gemittelte Intensität über 4 Anschläge)

Die Auflösung bzw. Ablesegenauigkeit von Klangspektren hängt vom jeweils verwendeten Auswerteprogramm ab; in der Regel ist eine Mindestablesegenauigkeit von 0,5 bis 1 Gt/16 ausreichend.

1.2.3 Amplitudendiagramme

Bei Amplitudendiagrammen (Abb. 2) wird die Intensität (Schalldruckamplitude) eines Klangereignisses über der Zeit aufgetragen, womit der Verlauf der Lautstärke des Glockenklanges über einen (wählbaren) Zeitraum graphisch dargestellt werden kann. Amplitudendiagramme eignen sich sehr gut, das Abklingverhalten einer Glocke zu studieren, wobei Amplitudendiagramme nicht nur vom Gesamtklang, sondern auch von Teiltongruppen oder sogar nur von einzelnen Teiltönen darstellbar sind, sofern die jeweilige Software über spezielle Filterprogramme verfügt. Amplitudendiagramme von Glocken ähneln in ihrem Aussehen dem Verlauf von gedämpften Schwingungen, wobei aber der Abklingvorgang meist relativ „unruhig“ verläuft (typisch die vielen „zackenartigen“ Ausschläge im Abklingverlauf), was in der Dynamik (siehe Kapitel 6.1.2) bzw. in der sog. Kopplung (siehe Kapitel 2.2.2) seinen hauptsächlichlichen Grund hat. Mittels Amplitudendiagrammen läßt sich auch die Materialdämpfung (das ist eine Werkstoffeigenschaft des Metalls, aus dem die Glocke gegossen ist) sehr gut bestimmen. Dieses Verfahren wurde in der Diplomarbeit⁵⁾ des Verfassers beschrieben und ist dort nachzulesen.

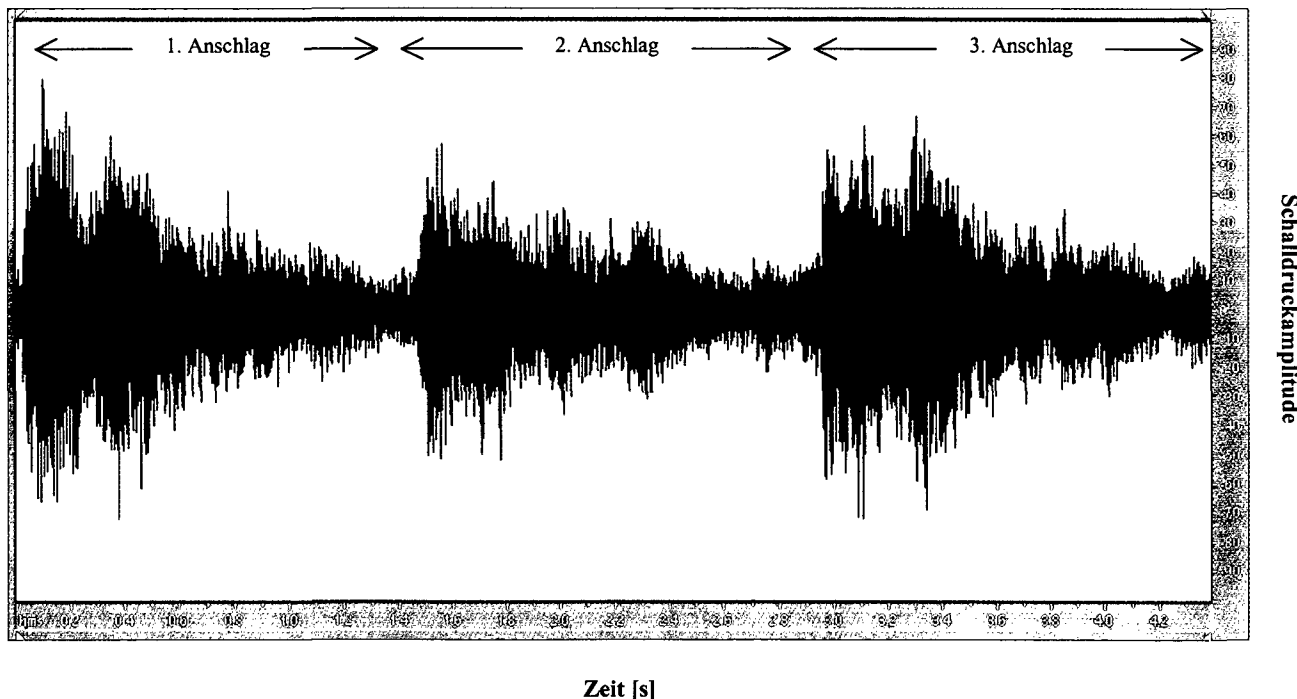


Abb. 2: Amplitudendiagramm einer läutenden Glocke (Vollklang; 3 Anschläge)

1.2.4 Zeit-Frequenz-Intensitätsdiagramme (Sonagramme)

Sonagramme (Abb. 3) sind 3-dimensionale Diagramme, bei denen der zeitliche Verlauf der Intensitäten von verschiedenen Frequenzen dargestellt wird. Sonagramme werden folgendermaßen „gelesen“: Zeit auf der X-Achse, Frequenz auf der Y-Achse; Intensität wird durch den Farbton ausgedrückt (je heller, desto stärker). Intensitäten können im linearen (= Schalldruck) oder aber

auch im logarithmischen (= Dezibel) Maßstab angezeigt werden. Im linearen Maßstab werden eher nur die Frequenzen mit den stärksten Intensitäten hervorgehoben, während im logarithmischen Maßstab Details von Frequenzen mit geringen Intensitäten mehr zum Ausdruck kommen. Mit Hilfe von Sonagrammen ist es möglich, Intensitäten bzw. Abklingdauer von Glockenteiltönen miteinander zu vergleichen, wodurch man wertvolle Hinweise über die Struktur des Glockenklangs erhält; Sonagramme sind daher für die Messung der Klangfarbe (Tongebung) besonders wichtig. Das typische Sonagramm einer Glocke zeigt zahlreiche parallele „Linien“ (= Glockenteiltöne), die nach oben hin (zu höheren Frequenzen) immer schwächer und kürzer werden, wodurch sich charakteristische Dreiecksformen bilden. Ferner nimmt die Intensität (Stärke = Farbton der „Linien“) auch von links nach rechts ab, bei den hohen Teiltönen rascher als bei den tiefen.

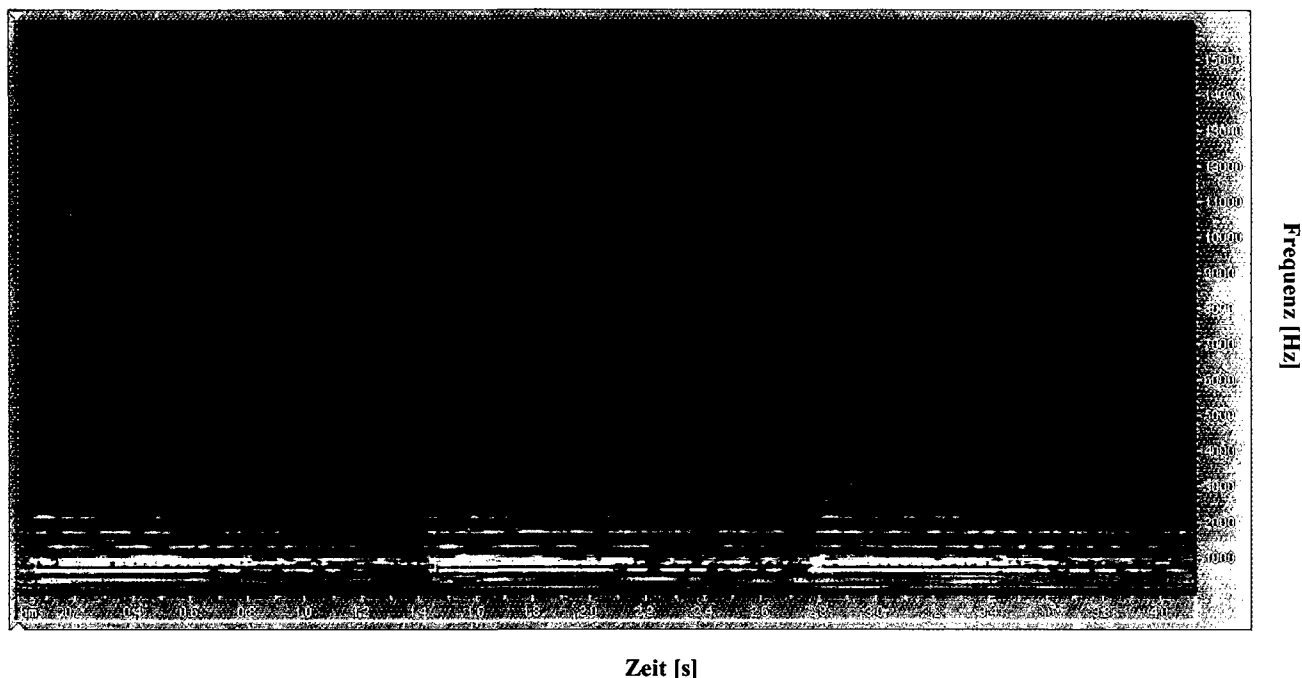


Abb. 3: Sonagramm einer Glocke (3 Anschläge)

1.2.5 Verwendete Meßgeräte

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Klanguntersuchungen wurden Tonbandaufnahmen verschiedener Herkunft verwendet, die im Computer als Wave-Datei gespeichert wurden. Die Aufnahmen sind zum größten Teil vom Verfasser selbst ab ca. 1990 gefertigt worden; als Aufnahmegeräte wurden verwendet:

- Sony Professional Walkman WM-D6C mit Sony Electret Condenser Microphone ECM-959A
- Sony Stereo Cassette-Corder TCS-430

Eine Tonbandaufnahme stammt vom ORF, welche dieser für die wissenschaftliche Auswertung freundlicherweise zur Verfügung stellte.

Der Einfluß des jeweiligen Aufnahmegerätes auf die Klangfarbe ist vernachlässigbar, wenn man stets dasselbe Aufnahmegerät verwendet; in diesem Fall resultiert höchstens ein gerätebedingter, systematischer Fehler (= Abweichung des aufgenommenen Klanges vom Originalklang), der bei modernen Tonbandgeräten als sehr gering aufzufassen ist. Tonbandaufnahmen von älteren Geräten

können hingegen problematischer sein, da hier gerätebedingte Abweichungen bisweilen stärker in Erscheinung treten (alte Aufnahmen klingen z.B. oft dumpf). Aus diesem Grund sind vergleichende Messungen von Tonbandaufnahmen unterschiedlicher Herkunft teilweise nur bedingt möglich; solche Untersuchungen sollte man daher nur mit Aufnahmen vom selben Gerät durchführen. Bei vergleichenden Messungen wurden in dieser Arbeit bis auf eine Ausnahme (dies ist im Text extra vermerkt) stets Aufnahmen vom selben Gerät herangezogen. Wenn man jedoch eine gewisse Klangeigenschaft nur exemplarisch darstellen möchte (z.B. scheppriger Ton), ist die Herkunft der Aufnahme von nebensächlicher Bedeutung. Für die Beurteilung des Glockenklanges generell wäre es jedoch günstig, eine Norm bezüglich des Aufnahmeverfahrens festzulegen, die es aber derzeit überhaupt nicht gibt (in der Glockenkunde werden Messungen nur mit Stimmgabeln durchgeführt!).

Die Klangauswertung selbst erfolgte durch ein Digital Audio Editor-Programm, mit dem Klang- und Musikdateien (Wave-Dateien) bearbeitet werden können. Herangezogen wurde in vorliegender Arbeit das Programm „Cool Edit 96“, das sich für Klanguntersuchungen von Glocken als besonders gut erwiesen hat. Mit diesem sind die meisten Klangspektren sowie sämtliche Amplitudendiagramme und Sonagramme erstellt worden. Bei Sonagrammen wurde für die Intensitätangabe stets der logarithmische Maßstab verwendet; anderes ist vermerkt.

Ferner ist noch das Programm „Wavanal“ herangezogen worden, eine spezielle, für Glockenklanganalysen entwickelte Software, mit der man besonders hochauflösende Klangspektren erhält. Es bietet aber bei weitem nicht die Möglichkeiten, durch welche sich „Cool Edit 96“ auszeichnet.

2. Klanglehre

Charakteristik des Glockenklanges

2.1

Wenn man eine Glocke mit dem Klöppel anschlägt, hört man einen Klang, der sich scheinbar aus zwei grundlegend verschiedenen Bestandteilen zusammensetzt:

- einen kräftigen, aber kurzen Ton mit metallischer Klangfarbe, der sogenannte *Schlagton*, der den Gesamteindruck des Glockenklanges beherrscht und die Tonhöhe der Glocke angibt. Bei manchen Glocken sind neben diesem Hauptschlagton noch weitere Töne mit kurzem, metallischen Charakter wahrnehmbar, die als Nebenschlagtöne bezeichnet werden.
- einen langgezogenen, weich klingenden „*Nachhall*“, bestehend aus mehreren Summtönen in deutlich wahrnehmbaren, unterschiedlichen Tonhöhen, die eine geringere Lautstärke als der Schlagton besitzen. Der Nachhall ist eine Art Akkord, der den Schlagton begleitet und ihn dadurch musikalisch untermalt.

Das Wesen des Glockenklanges wird besonders deutlich, wenn man versucht, eine Glocke nachzuahmen; dann würde man den Schlagton mit einem kurzen Laut, etwa „bim“ oder „ding“ wiedergeben, den Nachhall hingegen mit einem langgezogenem „mmmmh“. Glockenklang ist in seiner Grundstruktur daher nicht einstimmig, sondern mehrstimmig (aus mehreren Tönen bestehend). Der gehörmäßig wahrgenommene Glockenklang, aus Nachhall und Schlagton zusammengesetzt, ist eine Tonempfindung, die erst im menschlichen Gehirn entsteht. Wenn man den Glockenklang nämlich physikalisch, d.h. mit technischen Meßinstrumenten untersucht, erfährt man ein Klangbild, das sich aus einer großen Anzahl von verschiedenen Einzeltönen, den sogenannten *Teiltönen* zusammensetzt. Erst das Gehör verarbeitet diese Teiltöne zum typischen, aus Schlagton und Nachhall bestehenden Glockenklang.

Teiltöne – Die Grundbestandteile des Glockenklanges

2.2

2.2.1 Definition, Benennung

Die *Teiltöne* einer Glocke, aus denen sich der Glockenklang zusammensetzt, entstehen durch Vibrationen (Schwingungen) in der Glocke, die durch den Klöppelanschlag ausgelöst werden (der Physiker nennt diese Vibrationen Eigenschwingungen; es handelt sich hier streng genommen eigentlich um stehende Wellen). Diese Schwingungen (Vibrationen) erfolgen nicht planlos, sondern zeigen bestimmte Muster: Jeder Teilton (Eigenschwingung) besitzt eine charakteristische, den gesamten Glockenkörper umfassende Form mit Bereichen, die besonders stark vibrieren („Bäuche“) und solchen, die in Ruhe sind („Knoten“). Diese besondere Gestalt der Schwingung mit Bäuchen und Knoten wird *Schwingungsform* genannt^{5) 6) 7)}.

Bei den Schwingungsknoten unterscheidet man bei einer Glocke zwischen *Kreisknoten* (ringförmig um die Glocke) und *Meridianknoten* (längs zur Glocke). Die Schwingungsform einer Glocke kann man daher durch die Anzahl der Kreisknoten *k* und der

Meridianknoten m mittels einer Matrix (k, m) beschreiben, wobei die Kreisnoten k zusätzlich indiziert werden, um deren Lage im Glockenkörper zu kennzeichnen (Tab.1 im Kapitel 2.2.4). Die unterschiedlichen Schwingungsformen können durch sog. **Klangfiguren** sichtbar dargestellt werden (Abb. 4). Beim Klöppelanschlag werden die Schwingungsformen aller Teiltöne gleichzeitig angeregt, wobei diese sich überlagern und durchdringen: Teiltöne besitzen daher keine bestimmte „Lage“ in der Glocke. Bei selektiver Anregung (z.B. mit einer Stimmgabel) bildet sich nur die Schwingungsform des angeregten Tones aus.

Die Frequenz einer Eigenschwingung und damit die Tonhöhe des jeweiligen Teiltones hängen in erster Linie von der Größe der Glocke (je größer desto tiefer), deren Material (und zwar von dessen „Inneren Tonhöhe“, einer Werkstoffeigenschaft; siehe Kapitel 4.1.1) und von der Art der Schwingungsform ab. Allgemein gilt, daß die Frequenz um so höher wird, je komplizierter die Schwingungsform aufgebaut ist (d.h. je mehr Meridian- bzw. Kreisknoten vorhanden sind; vergl. dazu Tab.1 im Kapitel 2.2.4).

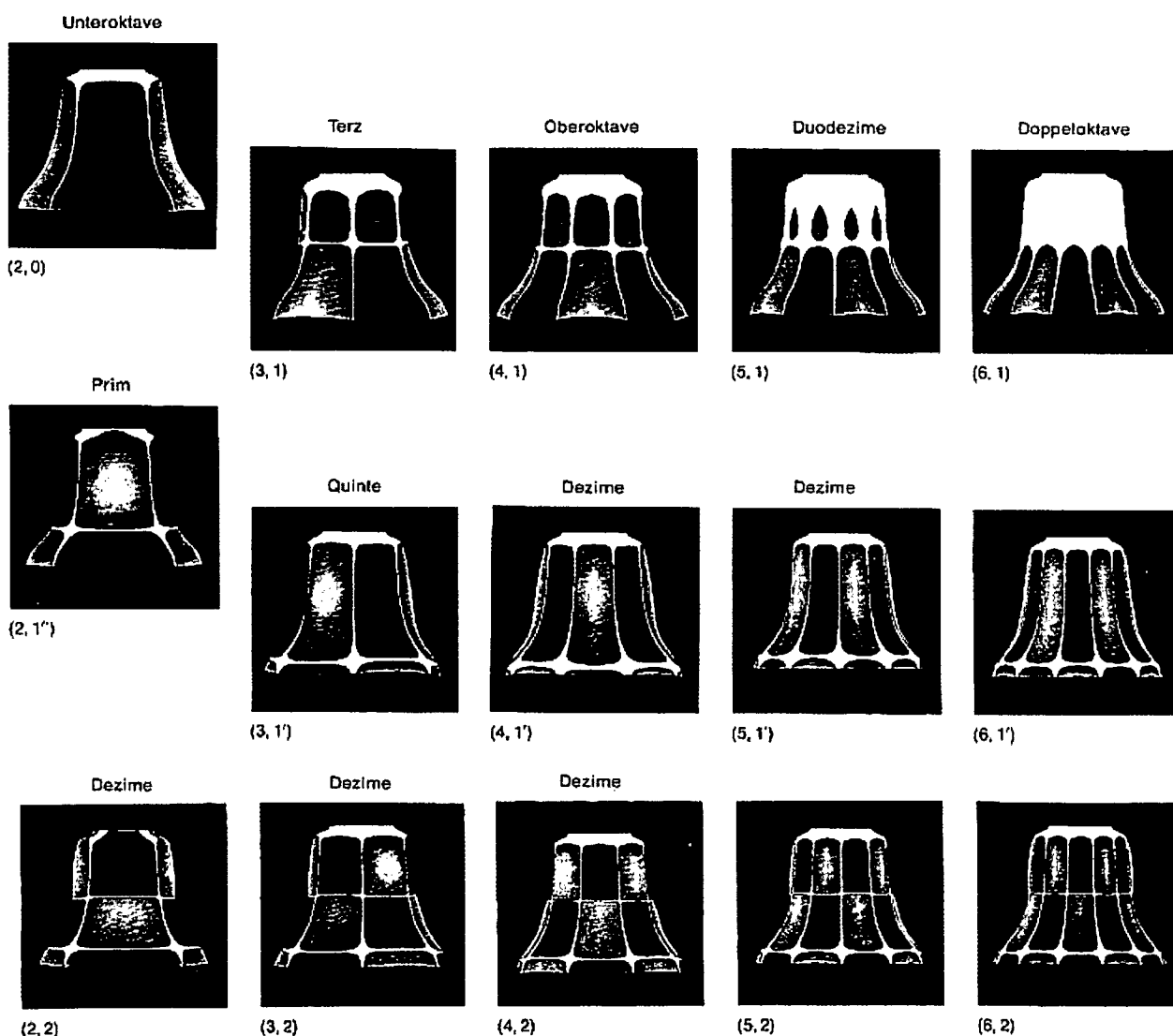


Abb. 4: Klangfiguren einiger Schwingungsformen von Glockenteiltönen nach *Schad & Frik*⁶⁾, geordnet nach Anzahl und Lage der Kreisknoten (k) und Meridianknoten (m). Schwingungsformen können mittels der Matrix (m, k) charakterisiert werden. Bei einfachem Kreisknoten wird dessen Lage noch zusätzlich indiziert (' = Schlagring, '' = unteres Glockendrittel, ohne Index = Glockenmitte). Die Bereiche mit geringer Amplitude (Knoten) sind hell, die mit großer Amplitude (Schwingungsbäuche) sind dunkel hervorgehoben.

Die wichtigsten Teiltöne einer Glocke (das sind in der Regel die tieferen) besitzen schon seit alters her Namen; allerdings gibt es in der Glockenkunde bei der Benennung der Teiltöne keine international gültigen Regeln. Die Benennung erfolgt, falls nicht schon Trivialnamen vorhanden sind (die 5 tiefsten Teiltöne werden meist Unterton, Prim, Terz, Quinte und Oberoktave genannt), meist nach dem Intervall Schlagton-Teilton⁸⁾ (hier oft nach den Sollintervallen, und nicht nach den realen). Diese uneinheitliche Nomenklatur kann beim Vergleichen von Teiltonaufbauten unterschiedlicher Glocken zu Verwechslung führen (besonders der hohen Teiltöne bzw. bei Glocken mit unregelmäßigem Teiltonaufbau oder gespaltenen Teiltönen). Ideal wäre die Benennung anhand der jeweiligen Schwingungsform (dadurch wird auch gleichzeitig auf die Eigenschaften der Teiltöne Rücksicht genommen), was aber teilweise nur schwer durchführbar ist. In vorliegender Arbeit wird folgender Modus für die Benennung von Teiltönen verwendet (ein Kompromiß aus oben genannten Benennungsarten):

- Die Lauttöner (Definition siehe Kapitel 2.2.2) werden nach ihrer Reihenfolge in der Tonhöhe bezeichnet:
 1. **Unterton** 2. **Prim** 3. **Terz** 4. **Oberoktave** 5. **Duodecime** 6. **Doppeloktave** 7. **Quarte**
 8. **Sexte** 9. **Tripeloktave**.
 Die noch höheren Lauttöner, sofern nachweisbar, werden nach ihrer Reihenfolge in der Tonhöhe folgendermaßen bezeichnet: **L1, L2, L3, L4** ... („L“ wie Lauttöner)
- Der (schwache) Teilton zwischen Terz und Oberoktave (in der Regel der 4. Teilton im Klangspektrum) heißt **Quinte**.
- Die (schwachen) Teiltöne zwischen Oberoktave, Duodecime und Doppeloktave heißen „**Decimen**“ und werden nach ihrer Tonhöhe geordnet durchnummeriert: 1. Decime, 2. Decime, etc.
- Sind Lauttöner oder die Quinte gespalten, werden sie numeriert: z. B. 1. Terz, 2. Terz. Bei den anderen Teiltönen wird eine Spaltung nicht berücksichtigt.
- Alle übrigen Teiltöne erhalten aufgrund ihrer geringen Bedeutung für den Glockenklang keine eigene Bezeichnung

Diese Nomenklatur ist vor allem bei der Verwendung von Klangspektren für die Teiltonmessung leicht durchführbar, führt bei Vergleichen zumindestens bei den wichtigsten Teiltönen (Lauttöner) zu keinen Verwechslungen und berücksichtigt auch die Eigenschaften der einzelnen Teiltöne. Im Allgemeinen sieht der Teiltonaufbau einer Glocke im klanglich relevanten Bereich (d.h. Unterton – Tripeloktave) folgendermaßen aus (Teiltöne geordnet nach Tonhöhe):

Unterton / Prim / Terz / Quinte / Oberoktave / 1., 2. und 3. Decime / Duodecime / 4. und 5. Decime / Doppeloktave / mehrere schwache Teiltöne ohne eigene Bezeichnung / Quarte / mehrere schwache Teiltöne ohne eigene Bezeichnung / Sexte / mehrere schwache Teiltöne ohne eigene Bezeichnung / Tripeloktave

2.2.2 Eigenschaften

Die **I n t e n s i t ä t** der Teiltöne ist stark unterschiedlich und abhängig von der jeweiligen Schwingungsform. Ganz allgemein gilt, daß die Intensität mit steigender Tonhöhe abnimmt. Die Teiltöne, welche im Schlagringbereich (wo der Klöppel anschlägt) einen Schwingungsbauch besitzen und daher besonders stark angeregt werden, zeigen aus diesem Grund die größten Intensitäten im Glockenklang. Diese Teiltöne werden unter den Begriff **L a u t t ö n e r** (Abb. 5)

zusammengefaßt. Die bedeutendsten Vertreter der Lautttöner, geordnet nach Tonhöhe, sind: **Unterton**, **Prim**, **Terz**, **Oberoktave**, **Duodezime**, **Doppeloktave**, **Quarte**, **Sexte** und **Tripeloktave**. Aufgrund ihrer hohen Intensität besitzen die Lautttöner für die Bildung des Glockenklanges (Schlagton, Nachhall) größte Bedeutung. Alle anderen Teiltöne weisen im Schlagringbereich einen Kreisknoten auf und werden daher nur schwach angeregt. Sie haben wegen ihrer daraus folgenden deutlich geringen Intensität nur eine untergeordnete Bedeutung. Zu dieser Gruppe von Teiltönen gehören u.a. die **Quinte** und die **Decimen**.

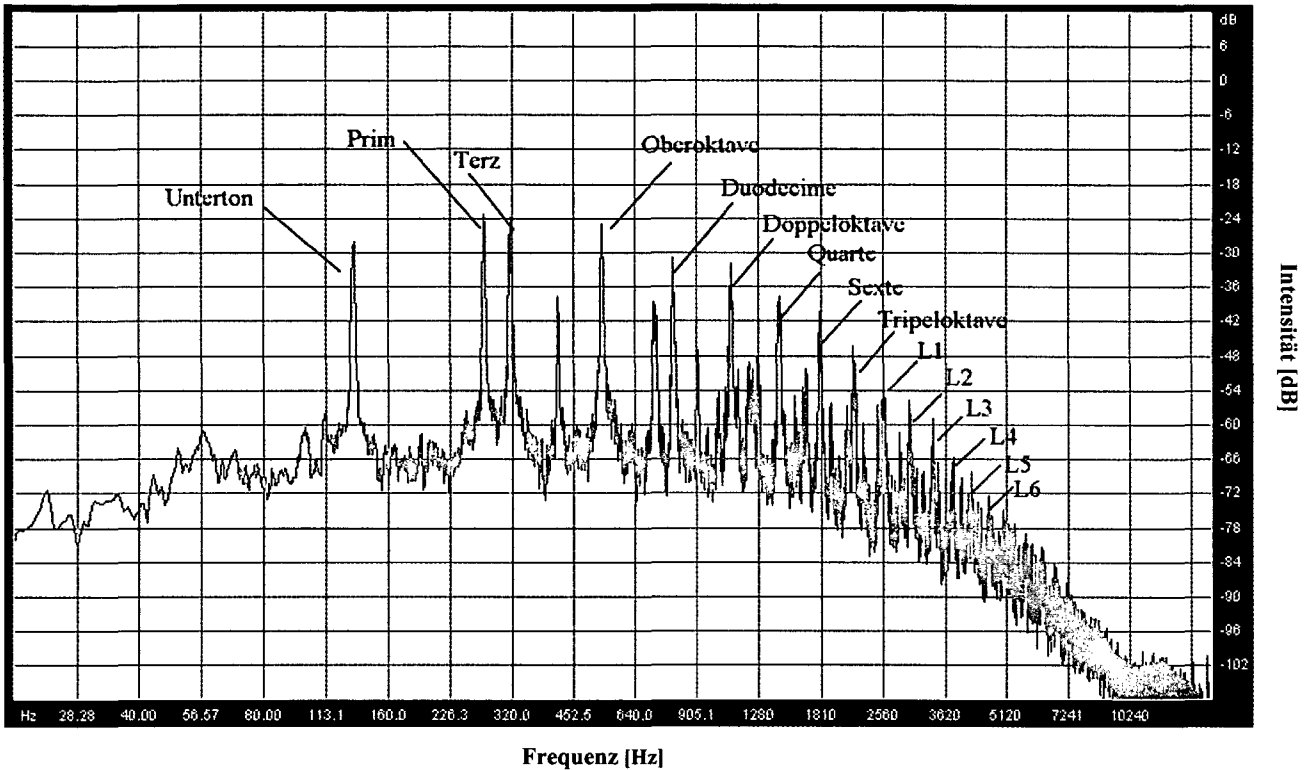


Abb. 5: Lautttöner im Klangspektrum einer läutenden Glocke (gemittelte Intensitäten über 4 Anschläge)

Die **Abklingdauer** der Teiltöne ist ebenfalls sehr verschieden (Abb. 6). Sie hängt einerseits von der Tonhöhe (Frequenz f) ab (die Abklingdauer ist proportional zu $1/f$, d.h. tiefe Teiltöne besitzen längere Abklingzeiten wie hohe), und andererseits von der Dämpfung; je höher die Dämpfung, desto geringer wird die Abklingdauer. Unter Dämpfung, sie wird mittels des logarithmischen Dekrementes δ angegeben, versteht man allgemein den Energieverlust mechanischer Schwingungen. Die Dämpfung eines Teiltones setzt sich aus drei Anteilen zusammen^{9) 10)}. Neben der **Materialdämpfung** (innere Reibung im Werkstoff) tritt noch die sog. **Strahlungsdämpfung** (Energieentzug infolge der abgestrahlten Schallwellen) und die **Reibungsdämpfung** (Reibung der Glockenoberfläche an der Luft) auf, d.h.:

$$\delta_{\text{Gesamt}} = \delta_{\text{Material}} + \delta_{\text{Strahlung}} + \delta_{\text{Reibung}} \quad \text{Glg. 1}$$

Die **Materialdämpfung** ist eine Werkstoffeigenschaft und hängt daher nur vom Metall ab, aus dem die Glocke gegossen worden ist; ihr Anteil an der Gesamtdämpfung ist innerhalb einer Glocke für alle Teiltöne gleich groß und sollte möglichst klein gehalten werden (Näheres siehe im Kapitel 4.1.1). Dagegen ist der Anteil der **Strahlungsdämpfung** bei den jeweiligen Teiltönen unterschiedlich. Am geringsten wirkt sie sich auf die tiefsten Teiltöne wie Unterton und Prim aus, am stärksten aber auf die höheren, schlagtonbildenden Teiltöne (vor allem auf die Oberoktave). Die Größe der **Strahlungsdämpfung** wird darüber hinaus noch sowohl von der Gestaltung der Glockenrippe als auch von der „Inneren Tonhöhe“ des Glockenwerkstoffes beeinflusst (siehe dazu auch Kapitel 3.3.2 und 4.2). Der Anteil der **Reibungsdämpfung** hingegen kann in etwa als konstant

betrachtet werden, da sie in erster Linie durch das umgebende Medium (Luft) geprägt wird. Die mit Abstand größte Abklingdauer besitzen demnach **Unterton**, **Prim** und **Terz**, die bis zu mehreren Minuten betragen kann. Es sind diese Teiltöne, welche als Summtöne den langgezogenen Nachhall der Glocke bilden. Alle übrigen Teiltöne besitzen dagegen eine sehr geringe Abklingdauer, die maximal nur einige Sekunden umfaßt. Diese kurz klingenden Teiltöne sind mit Ausnahme der Quinte, die formalistisch zum Nachhall gezählt wird, für die Schlagtonbildung verantwortlich.

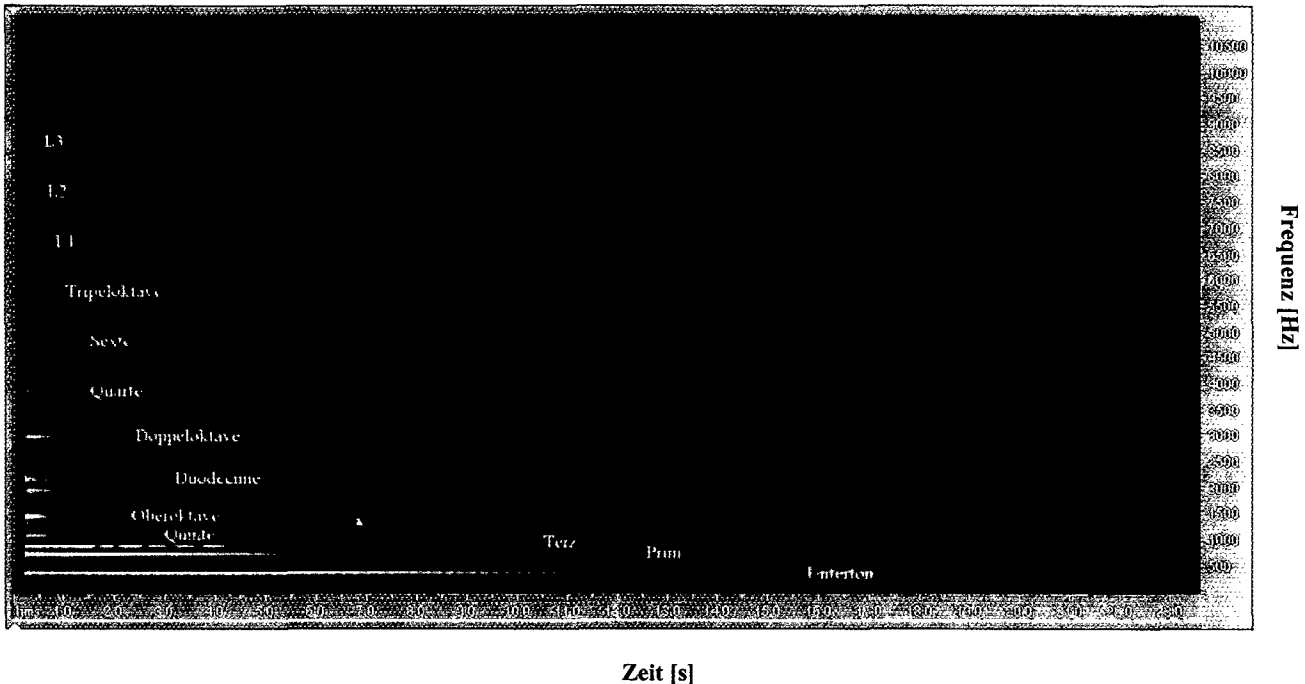


Abb. 6: Abklingdauer von Teiltönen (Sonagramm)

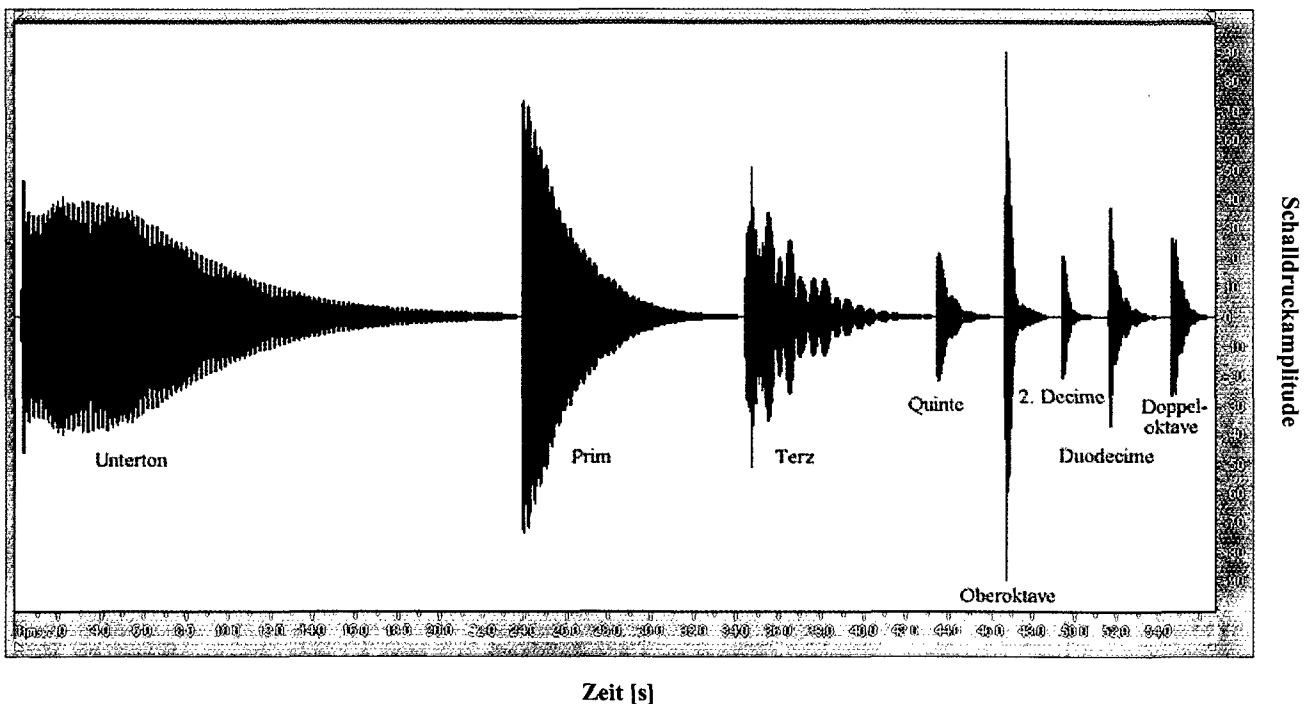


Abb. 7: Amplitudendiagramme verschiedener Teiltöne einer Glocke; die Intensitäten der Teiltöne entsprechen ihrem Verhältnis im Gesamtglockenklang

Das **A b k l i n g v e r h a l t e n** der Teiltöne innerhalb des Gesamtglockenklanges verhält sich keineswegs wie der Idealfall einer gedämpften Schwingung. Dies hat seine Ursache in der sog. „Kopplung“¹¹⁾. Darunter versteht man die Wechselwirkung der Schwingungsformen der einzelnen Teiltöne, bei der Schwingungsenergie zwischen den verschiedenen Schwingungsformen hin- und herpendelt. Dieser Prozeß erfolgt regellos und ruft dadurch ungleichförmiges Abklingverhalten der Teiltöne hervor. Wenn eine Glocke nicht in Ruhelage, sondern geläutet (d.h. hin- und hergeschwungen) wird, treten noch zusätzlich ungleichförmige Schwebungen infolge der hierbei auftretenden „Dynamik“ (Kapitel 7.6.2) auf, welche das Abklingverhalten dementsprechend beeinflussen. Nur wenn ein Teilton völlig alleine erklingt (z.B. durch selektive Anregung) und die Glocke in Ruhe ist, verhält er sich wie eine ideale gedämpfte Schwingung. Innerhalb des Glockenklanges zeigt nur der Unterton dieses Verhalten, wenn er zum Schluß aufgrund der Tatsache, daß er von allen Teiltönen die höchste Abklingdauer besitzt, völlig alleine erklingt (Abb. 7).

Die **A n o r d n u n g** der Teiltöne (d. h. die Lage bzw. Intervalle der Teiltöne untereinander) hängt nur von der Form der Glocke ab, und nicht vom Metall, aus dem die Glocke gegossen ist¹²⁾ (der Zusammenhang zwischen Glockenform und Teiltonaufbau wird im Kapitel 3.3.1 näher erläutert). Man kann hierbei ebenfalls zwei Gruppen von Teiltönen unterscheiden: Nämlich jene, deren Lage zueinander von der Glockenform praktisch unbeeinflusst ist, und solche, die von der Gestalt der Glocke stark beeinflußt werden. Zur ersten Gruppe gehören die Lauttöne ab der Terz (d.h. **Terz, Oberoktave, Duodecime, Quarte, Sexte, Tripeloktave**, etc. . .). Sie bilden eine charakteristische Intervallfolge mit von links nach rechts (d.h. mit zunehmender Frequenz) immer kleiner werdenden Intervallen (vergl. Abb. 5). Da dieser spezielle Klंगाufbau von der Glockenform praktisch keine Abhängigkeit zeigt - die Unterschiede sind bei den verschiedenen Glockenrippen vergleichsweise minimal - stehen diese Teiltöne bei jeder Glocke immer im selben Frequenzverhältnis von etwa $1,2 : 2 : 3 : 4 : 5,3 : 6,5 : 8$ etc. . . zueinander. Aufgrund dieses im Prinzip konstanten Frequenzverhältnisses kann man diese Teiltongruppe als die „**K l a n g k o n s t a n t e**“ der Glocke betrachten; sie hat für die Schlagtonbildung höchste Bedeutung. Die geringfügigen Schwankungen innerhalb der Klangkonstante, die bei den verschiedenen Glockenrippen auftreten, zeigen Gesetzmäßigkeiten, die im Kapitel 3.3.1 genauer erläutert werden. Die Lage der übrigen Teiltöne dagegen, sowohl zueinander als auch bezüglich zur Klangkonstante (vor allem von **Unterton, Prim** und **Quinte**), hängt dagegen stark von der jeweiligen Glockenrippe ab und ist von Glocke zu Glocke teilweise höchst unterschiedlich, was auch den Grund für die Existenz unterschiedlicher Glockentypen darstellt (Kapitel 2.5.1). Diese Teiltöne reagieren auch auf kleine Formänderungen (z.B. beim Abschleifen von Metall an der Glockenwand) teilweise ziemlich empfindlich, was man sich beim Stimmen von Glocken zunutze macht. Das Verhalten der Teiltöne bezüglich ihrer Anordnung zueinander ist auch den Diagrammen 2 (in Kapitel 2.5.3) und 3 (in Kapitel 3.3.1) zu entnehmen.

2.2.3 Charakteristika der wichtigsten Teiltöne

1. Der **U n t e r t o n** ist der tiefste Teilton einer Glocke und besitzt von allen Teiltönen die längste Abklingdauer. Sein voluminöser, voller Ton gibt dem Glockenklang Fülle und ein kräftiges Klangfundament. Weiters prägt er entscheidend den musikalischen Charakter einer Glocke, das Intervall Unterton - Schlagton ist das Hauptkriterium für die Benennung des Glockentyps. Bei den meisten Glocken findet man den Unterton im Bereich zwischen Sexte und None unterhalb des Schlagtones.
2. Die **P r i m**, der zweittiefste Ton im Glockenklang, ist ebenfalls laut und lange nachklingend. Wie der Unterton trägt sie sowohl zum Volumen des Glockenklanges als auch zum Glockentyp bei. Die Lage der Prim ist ebenfalls je nach Glocke stark schwankend und kann bis zu einer Quinte unterhalb und bis zur Terz oberhalb des Schlagtones betragen.

3. Als dritter Teilton folgt die *T e r z*, ein laut klingender Ton mit relativ langer Abklingdauer. Sie trägt besonders zum musikalischen Erscheinungsbild bei und verleiht dem Glockenklang den leicht elegischen Charakter. Die Terz liegt immer eine Terz über dem Schlagton, in der Regel eine Mollterz, seltener eine Durterz. Nur in ganz wenigen Fällen ist sie geringfügig tiefer als eine Mollterz (wenige Gt / 16).

Die Teiltöne Unterton, Prim und Terz können als einzige Teiltöne auch vom ungeübten Zuhörer deutlich voneinander unterschieden und selektiv aus dem Glockenklang herausgehört werden; sie stellen eine Art den Schlagton begleitenden Akkord dar und bilden aufgrund ihrer besonders langen Abklingdauer den „Nachhall“ der Glocke. Aufgrund ihres Charakters nennt man diese 3 Teiltöne auch *S u m m t ö n e* (weil man sie sehr gut „nachsummen“ kann).

Alle Teiltöne über der Terz besitzen sehr kurze Abklingzeiten und können aufgrund ihres impulsartigen Charakters daher als „*I m p u l s t ö n e*“ bezeichnet werden.

4. Die *Q u i n t e* klingt normalerweise nur schwach, besitzt eine kurze Abklingzeit und hat keinen nennenswerten Einfluß auf den Glockenklang. Die Quinte liegt im Bereich zwischen Quarte und Septime über dem Schlagton. Sie ist weder eindeutig nachhall- noch schlagtonbildend; in dieser Arbeit wird sie jedoch formell zum Nachhall dazugezählt.

Die nun folgenden höheren Teiltöne sind für die Bildung des Schlagtones verantwortlich und können daher als „*S c h l a g t o n k o m p l e x*“ zusammengefaßt werden.

5. Die *O b e r o k t a v e* ist intensitätsmäßig sehr stark und trägt entscheidend zur Bildung der Tonhöhe des Schlagtones bei (Residuum). Sie liegt bei den allermeisten Glocken in der Regel genau eine Oktave über dem Schlagton.

6. Nach der Oberoktave folgt eine Gruppe von meist drei, manchmal auch vier, relativ dicht benachbarten Teiltönen von mittlerer Intensität, die *D e c i m e n*. Manchmal liegen diese Teiltöne so dicht nebeneinander, daß man im Klangspektrum nur einen breiten Peak sieht. Sie besitzen nur klangfärbende Wirkung und haben, wie manchmal behauptet wird¹³⁾, keinen Einfluß auf die Bildung eines (Quart-) Nebenschlagtones.

7. Die *D u o d e c i m e* besitzt wie die Oberoktave ebenfalls eine sehr große Intensität und trägt zur Bildung der Tonhöhe des Schlagtones bei (Residuum). Sie liegt immer eine Quinte über der Oberoktave. Wegen ihrer Lautstärke kann sie manchmal (wenn man darin Übung besitzt) als hoher Pfeifton selektiv aus dem Glockenklang herausgehört werden. Durch Oktaventäuschung wird sie dann als Quinte über dem Schlagton empfunden und mit dem Teilton gleichen Namens, der intensitätsmäßig nur schwach ist, verwechselt.

8. Zwischen Duodecime und dem nächsten Lauttöner (Doppeloktave) liegen zwei, manchmal drei Teiltöne mit mäßiger Intensität, ebenfalls *D e c i m e n*. Zur Unterscheidung zu den Decimen unterhalb der Duodecime kann man sie als die „oberen“ Decimen bezeichnen. Diese Teiltöne wirken nur klangfärbend und sind wie die „unteren“ Decimen für den Glockenklang von untergeordneter Bedeutung.

9. Die *D o p p e l o k t a v e* ist der nach der Duodecime nächste Lauttöner. Sie besitzt wie die Oberoktave und die Duodecime eine sehr starke Intensität. Bei Glocken tiefer g° hat sie den Hauptanteil an der Bildung der Tonhöhe des Schlagtones (Residuum). Sie liegt eine Oktave über der Oberoktave, ist aber meist leicht erhöht (bis zu einem Viertelton).

Ab der Doppeloktave sind nur noch die intensitätsstärksten Teiltöne des Klangspektrums (d.h. die Lauttöner) von Bedeutung. Die übrigen, schwächeren Teiltöne haben nur eine mehr oder weniger klangfärbende Wirkung und können daher vernachlässigt werden.

10. Der nächste Lauttöner über der Doppeloktave ist die sogenannte **Q u a r t e**, die ebenfalls eine starke Intensität besitzt. Sie ist verantwortlich für die Bildung (Residuum) des Quart-Nebenschlagtones. Sie liegt in der Regel eine Quarte über der Doppeloktave, kann aber bis zu einer Durterz über dieser herabsinken. In diesem Fall hört man statt eines Quart- einen sogenannten Durnebensschlagton (berühmtes Klangbeispiel: Wiener Pummerin). Sie wirkt aber auch klangfärbend (u.a. Nebenschlagtongeräusche).
11. Nach der Quarte folgt als nächster Lauttöner die **S e x t e**. Sie wirkt in erster Linie klangfärbend. Man findet sie im Bereich von der Quinte bis zur Sexte über der Doppeloktave.
12. Die **T r i p e l o k t a v e** liegt eine Oktave über der Doppeloktave, ist aber oft leicht erniedrigt (bis zu einem Halbton). Sie trägt hauptsächlich an der Bildung (Residuum) des (Quart-) Nebenschlagtones bei, ist aber auch klangfärbend.

Nach der Tripeloktave folgen noch einige weitere Lauttöner mit immer enger liegenden Intervallen (kurz bezeichnet nach der Reihenfolge ihrer Frequenz als L1, L2, L3, . . .). Diese sehr hohen Teiltöne tragen besonders zur Ausbildung der Klangfarbe (insbesondere des metallischen Klangcharakters einer Glocke) und daneben auch zur Bildung des Quart-Nebenschlagtones bei (in der Regel der L2).

2.2.4 Einteilung von Teiltönen

Teiltöne kann man aufgrund ihren verschiedenen Eigenschaften bzw. Funktion im Glockenklang in unterschiedliche Gruppen unterteilen und zusammenfassen. Eine Einteilung kann erfolgen nach:

- Schwingungsform / Intensität

L a u t t ö n e r :

Darunter faßt man alle Teiltöne zusammen, die im Schlagringbereich einen Schwingungsbauch besitzen und daher große Intensitäten besitzen. Zu diesen gehören: **Unterton, Prim, Terz, Oberoktave, Doppeloktave, Quarte, Sexte, Tripeloktave, L1, L2, . .**

„S c h w a c h t ö n e r“:

Dieser Begriff bezeichnet alle übrigen Teiltöne; diese besitzen im Schlagringbereich einen Kreisknoten, ihre Intensität ist daher gering. Die wichtigsten Vertreter dieser Gruppe sind die **Quinte** und die **Decimen**.

- Abklingverhalten

S u m m t ö n e :

In diese Gruppe fallen die Teiltöne **Unterton, Prim** und **Terz**, welche sich durch ihre äußerst langen Abklingzeiten vor allen übrigen Teiltönen auszeichnen.

„Impulstöne“:

Diese Bezeichnung faßt sämtliche Teiltöne über der Terz zusammen. Diese besitzen alle sehr kurze Abklingzeiten.

- Funktion im Glockenklang

„Nachhall“:

Der Nachhall beinhaltet die Teiltöne, die hauptsächlich für die Bildung des Nachhalles verantwortlich sind. Ihm gehören an: **Unterton, Prim, Terz** (= Summtöne) und die **Quinte** (diese besitzt eine Sonderstellung, da sie weder eindeutig nachhall- noch schlagtonbildend ist. Sie ist eine Art „Übergangston“ zwischen Nachhall und Schlagtonkomplex. Aufgrund ihres eher weichen Toncharakters würde sie eher zum Nachhall „passen“, zu welchem Bereich sie in dieser Einteilung der Teiltöne formal zugeteilt wird).

„Schlagtonkomplex“:

Im Schlagtonkomplex werden die Teiltöne zusammengefaßt, die hauptsächlich für die Bildung des Schlagtones verantwortlich sind. Zu dieser Teiltongruppe gehören alle Teiltöne ab der Oberoktave (diese miteingeschlossen). Für eine Feinunterteilung kann man den Schlagtonkomplex noch unterteilen in:

- „Tonlagenbereich“: Bereich von der Oberoktave bis einschließlich zur Doppeloktave. In erster Linie verantwortlich für die Bildung (Residuums) des Schlagtones, aber auch für die Tongebung (vor allem Tonfülle).
- „Nebenschlagton- & Geräuschbereich“: Bereich über der Doppeloktave. Verantwortlich für die Bildung (Residuum) des Quart-Nebenschlagtones und der Tongebung (vor allem Geräuschanteil, Anschlag).

- Abhängigkeit von der Form (Rippe) der Glocke

„Klangkonstante“:

Die Klangkonstante umschließt diejenigen Teiltöne, deren Intervalle zueinander von der Glockenform praktisch unabhängig sind und daher mehr oder weniger in gleichbleibenden Intervallverhältnissen zueinander stehen. Zur Klangkonstante gehören diejenigen Teiltöne, die in der Mitte des Glockenkörpers einen Kreisknoten besitzen (d. h. alle Lauttöne oberhalb der Prim: **Terz, Oberoktave, Duodecime, Doppeloktave, Quarte, Sexte, Tripeloktave, L1, L2, . . .**).

„variable Teiltöne“:

Variable Teiltöne sind solche, die zueinander bzw. bezüglich der Klangkonstante mehr oder weniger stark schwankende Intervalle zeigen, abhängig von der Gestalt der Glocke. Zu diesen gehören u.a. der **Unterton**, die **Prim** und die **Quinte**, aber auch die **Decimen**.

In der herkömmlichen Glockenkunde ist nur die Einteilung der Teiltöne in den **Prinzipal-** und den **Mixturbereich** bekannt. Dem ersteren gehören die Teiltöne **Unterton, Prim, Terz, Quinte** und **Oberoktave** an, der letztere beinhaltet alle Teiltöne über der Oberoktave. Diese rein willkürliche Einteilung, die scheinbar aus dem Orgelbau stammt, ist aber nicht sinnvoll, da sie die unterschiedlichen Funktionen bzw. Eigenschaften der Teiltöne in keinster Weise berücksichtigt und sollte daher nicht verwendet werden.

In Tab. 1 sind nochmals die Eigenschaften der wichtigsten Teiltöne einer Glocke zusammengefaßt.

Teilton	(k,m)	Intensität	Abklingzeit [%] (Bezugspkt. = U)	reduzierte Analyse (Bezugspkt. O = c'' ± 0)	Verhältniszahlen (Bezugspkt. O = 2)	hauptsächlich verantwortlich für
Unterton	(0, 4)	stark	100	Gis - g°	0,397 - 0,794	Nachhall, Glockentyp
Prim	(1', 4)	stark	30 - 60	g° - e'	0,794 - 1,26	Nachhall, Glockentyp
Terz	(1, 6)	stark	15 - 30	(dis' + 4) ± 4	1,23 ± 0,04	Nachhall, Glockentyp
Quinte	(1'', 6)	schwach bis mäßig stark	1-3	fis' - h'	1,41 - 1,89	wirkt klangfärbend
Oberoktave	(1, 8)	sehr stark	3 - 5	c'' ± 0	2	Tonhöhe des Schlagtones (Residuum)
1. Decime 2. Decime 3. Decime	(1'', 8) (2, 4) (2, 6)	mäßig stark bis schwach	2	im Bereich von d'' - fis''	im Bereich von 2,24 - 2,83	wirken klangfärbend
Duodecime	(1, 10)	sehr stark	5	g'' ± 1	3 ± 0,02	Tonhöhe des Schlagtones (Residuum)
4. Decime 5. Decime	(1'', 10) (2, 8)	schwach bis mittelmäßig	2	im Bereich von gis'' - h''	Im Bereich von 3,17 - 3,78	wirken klangfärbend
Doppeloktave	(1, 12)	sehr stark	3	(c''' + 3) ± 4	4,08 ± 0,1	Tonhöhe des Schlagtones (Residuum)
Quarte	(1, 14)	stark	3	(e''' + 6) ± 6	5,27 ± 0,23	Tonhöhe des Quart-Nebenschlagtones (Residuum)
Sexte	(1, 16)	stark	2	(gis''' + 3) ± 7	6,5 ± 0,3	wirkt klangfärbend
Tripeloktave	(1, 18)	stark bis mäßig stark	2	(c'''') ± 8	8,0 ± 0,4	Tonhöhe des Quart-Nebenschlagtones (Residuum)

Tabelle 1: Eigenschaften von Teiltönen. Die Schwingungsform wird durch die Matrix (k, m) beschrieben, wobei k = Anzahl der Kreisknotenlinien und m = Anzahl der Meridianknotenlinien ist. Bei Schwingungsformen mit nur einem Kreisknoten gilt weiters: Ohne Index: Kreisknoten in der Mitte der Glocke; mit ' : Kreisknoten im unteren Drittel der Glocke; mit '' : Kreisknoten im Schlagring der Glocke. Die für den Glockenklang wichtigsten und signifikantesten Teiltöne sind **fett** hervorgehoben. Die Abklingdauer wird in Prozent derjenigen des Untertones (U) angegeben. Die Schwankungsbreite der Teiltöne erfolgt sowohl in musikalischen Einheiten als auch in Verhältniszahlen, wobei als fixer Bezugspunkt die Oberoktave (O) dient (= reduzierte Analyse; siehe dazu Kapitel 2.5.3).

Der Schlagton

2.3

2.3.1. Definition

Der **Schlagton** ist der intensitätsmäßig stärkste „Ton“ im Klangbild der Glocke und hat einen kräftigen, metallischen Klangcharakter, jedoch mit nur kurzer Lebensdauer (nur wenige Sekunden, in der Regel etwa 1-5 s.). Die Tonhöhe des Schlagtones gibt die **Tonlage** der Glocke an. Im Gegensatz zu den Teiltönen wie z. B. die Summtöne des Nachhalles ist ein Schlagton kein physikalisch realer Ton, der durch Schwingungen der Glockenform entsteht, sondern eine **subjektive Tonempfindung**⁸⁾: Denn die kurz klingenden hohen Teiltöne ab der Oberoktave werden nicht als Tongemisch oder Akkord, sondern als ein einziger „Ton“, den sog. Schlagton, wahrgenommen. Dieses Phänomen entsteht in der Zentralen Wahrnehmung des menschlichen

Gehirnes und ist in der Akustik als *R e s i d u u m* bekannt. Über die Existenz des Schlagtones ist man sich erst seit ca. 90 Jahren bewußt. Seine Entstehung ist in vielen Arbeiten untersucht worden und wurde bis jetzt am besten durch die Residualtheorie von *J. F. Schouten*^{1) 10)} erklärt. Zum besseren Verständnis des Begriffes Residuum sei hier ein kurzer Überblick über die Tonlagenempfindung angeführt:

T o n

Als Ton bezeichnet man in der Physik eine reine harmonische Schwingung (Sinus- bzw. Cosinusschwingung) mit der Frequenz f („Sinuston“). Der Ton wird charakterisiert durch die Tonhöhe (Frequenz) und durch die Tonstärke (Intensität). Glockenteiltöne sind physikalisch betrachtet ebenfalls „Sinustöne“.

K l a n g

Ein Gemisch zusammengesetzt aus mehreren Tönen („Sinustönen“), deren Frequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen (d. h. $1 : 2 : 3 : 4 : 5 \dots$), nennt man eine *N a t u r t o n r e i h e*. Der erste Ton dieser Reihe heißt *G r u n d t o n*, die übrigen, höheren Töne nennt man *O b e r t ö n e*. Die Obertöne ohne den Grundton werden unter dem Begriff *O b e r t o n r e i h e* zusammengefaßt. Töne einer Obertonreihe stehen daher im Verhältnis $2 : 3 : 4 : 5 \dots$. Das menschliche Ohr empfindet eine Naturtonreihe nicht als Akkord oder Klanggemisch, sondern als einen *e i n z i g e n s c h a r f e n T o n* mit der Frequenz f' , welcher derjenigen des Grundtones entspricht. Dieses Gemisch reiner (Sinus-) Töne, welches den Eindruck eines einzigen „Tones“ erzeugt, wird in der Physik als *K l a n g* bezeichnet, im Volksmund aber ebenfalls „Ton“ genannt. So stellen physikalisch betrachtet z. B. die „Töne“ von Musikinstrumenten (Violine, Klavier, Flöte etc.) Klänge, aber keine Töne dar. Der Klang zeichnet sich neben der Tonhöhe und der Intensität noch durch die Klangfarbe (Tongebung) aus, die durch unterschiedliche Intensitätsverhältnisse von Grundton und Obertöne entstehen.

R e s i d u u m

Der Effekt, welcher eine Naturtonreihe als eindeutige Tonlage empfinden läßt (= Klang), tritt auch dann auf, wenn der Grundton bzw. noch weitere Teiltöne der Naturtonreihe fehlen (vor allem die mit ungeraden Verhältniszahlen), wenn es sich also um Obertonreihen bzw. um unvollständige Natur- oder Obertonreihen handelt (z. B. die Reihe $2 : 4 : 6 : 7 : 8$ etc.). Dieses Phänomen, ebenfalls ein Klang, wird nach dem Physiker *J. F. Schouten* (beschrieben bei Pfundner-Weißbäck¹⁾) als *R e s i d u u m* bezeichnet. Wie beim Klang entspricht die empfundene Tonlage des Residuums derjenigen des (hier nicht vorhandenen) Grundtones. Auch besitzt das Residuum die gleichen Eigenschaften (Tonhöhe, Intensität, Klangfarbe) wie der Klang. Ein Residuum bildet sich auch dann, wenn die Stimmung der Töne nicht ganz rein ist (geringfügige Abweichungen vom ganzzahligen Verhältnis im $Gt/16$ -Bereich). Ein Residuum kann mit physikalischen Mitteln nur indirekt bestimmt werden (Nachweis der Teiltöne, die das Residuum bilden). Die Tonhöhenbestimmung erfolgt nur durch Hörvergleich. Unter dem Begriff Residuum fällt auch der Schlagton von Glocken. Die Tonlage des Schlagtones ist die gleichzeitige Wahrnehmung von Teiltönen, die eine unvollständige, leicht verstimmte Obertonreihe bilden, die als scharfer, eindeutiger „Ton“ empfunden wird.

Allerdings werden in der Residualtheorie von Schouten nicht die unterschiedliche Intensität der verschiedenen Teiltöne noch deren absolute Tonhöhe und daraus folgend deren Anteil an der Schlagtonentwicklung berücksichtigt. Ebensowenig geht sie darauf ein, welche Teiltöne nun konkret für die Bildung eines Schlagtones hauptverantwortlich sind. Angeregt durch das Tonbandexperiment von *M. Grützmacher* (beschrieben bei Pfundner-Weißbäck¹⁾) aus dem Jahre 1956 wurden im Rahmen dieser Arbeit weiter Tonexperimente durchgeführt, die auf die oben genannten Punkte näher eingegangen sind und deren Ergebnisse als Ergänzung zur Residualtheorie

nun genannt werden sollen. Demnach gilt für die Bildung eines Schlagtones (sowohl Hauptschlagton als auch Nebenschlagöne) allgemein:

- Schlagtonbildner sind ausschließlich die **L a u t t ö n e r** und hier in erster Linie die schnell verklingenden Lauttöner im Schlagtonkomplex. Diese Teiltöne weisen sehr große Intensitäten auf und stehen mit Ausnahme von Unterton und Prim bei jeder Glocke intervallmäßig in fast konstanten Verhältnissen (Klangkonstante - aus diesem Grund besitzen Glocken überhaupt einen Schlagton!). Alle anderen Teiltöne einer Glocke (das sind solche, die einen Kreisknoten im Schlagringbereich aufweisen) tragen aufgrund ihrer geringen Intensität nicht zur Bildung der Tonlage des Schlagtones bei.
- Für die Schlagtonbildung sind mindestens 2 Teiltöne im Oktavintervall notwendig (Verhältnis 1 : 2). Teiltöne in Oktavintervallen sind besonders günstig für die Schlagtonbildung (Verhältnisse 1 : 2 : 4 : 8 . . .). Je mehr Teiltöne im ganzzahligen Verhältnissen vorhanden sind, desto intensiver wird der Schlagton empfunden.
- Der optimale Frequenzbereich für die Bildung eines Schlagtones (Residuums) liegt zwischen ca. 500 bis 2500 Hz (musikalisch ausgedrückt: c'' bis dis'''). In diesem Bereich ist der Residuumeffekt am stärksten, außerhalb davon ist er schwächer. Je weiter sich die schlagtonbildenden Teiltöne sich von diesem Frequenzbereich entfernen, desto schwächer fällt die Intensität des Schlagtones aus. Denn ab Frequenzen unter etwa 500 Hz nimmt die Lautstärkeempfindlichkeit des Ohres beträchtlich ab (diese Tatsache ist aus dem bekannten Diagramm von Fletcher & Munson, beschrieben bei Pfundner-Weißenbäck¹⁾ zu entnehmen, siehe Diagramm 1), und Frequenzen über 2500 Hz sind schon zu hoch, um sie musikalisch als Tonlage zu empfinden bzw. zu bewerten.

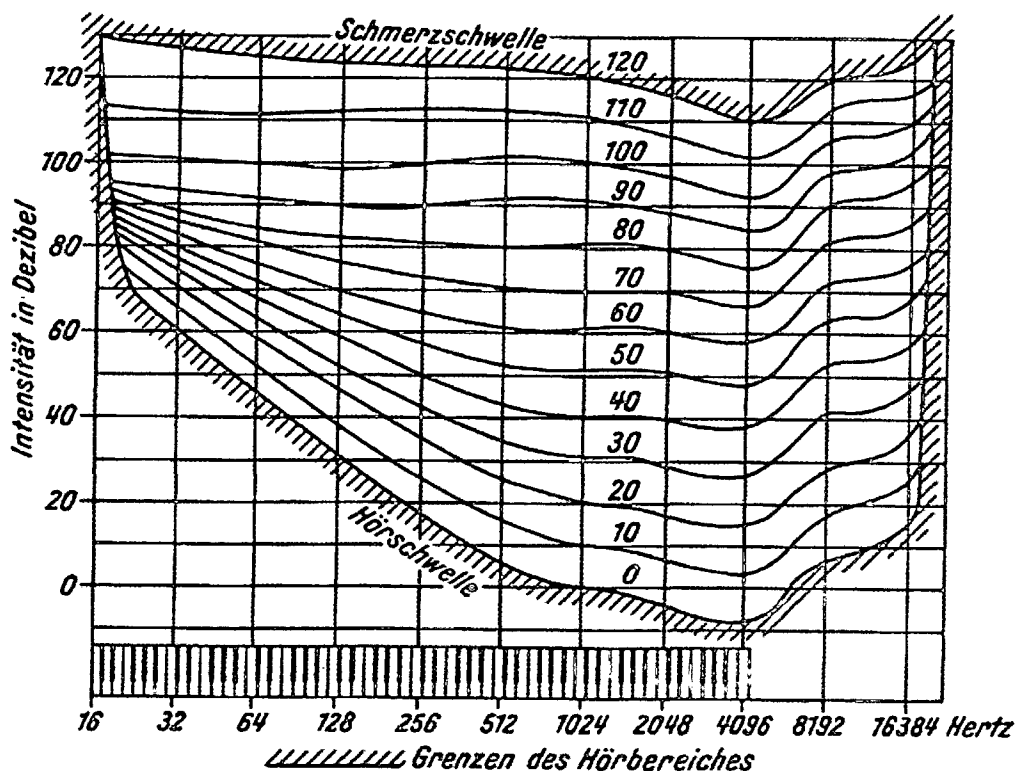


Diagramm 1: Hörbereich und Kurven gleicher Lautstärke für 0 - 120 Phon, bestimmt nach Fletcher & Munson.

Für den (Haupt-) Schlagton bedeutet dies im Konkreten:

In erster Linie sind für die Bildung des Schlagton-Residuums die im Schlagtonkomplex befindlichen Lauttöne **Oberoktave**, **Duodezime** und **Doppeloktave** verantwortlich. Diese Teiltöne, welche Bestandteil der Klangkonstante sind, stehen bei jeder Glocke im ganzzahligen Verhältnis von 2 : 3 : 4 (= Obertonreihe), mit je nach Bauart der Glocke geringfügigen Abweichungen. Der Schlagton liegt mit guter Näherung immer eine Oktave unter der Oberoktave, der Frequenz der fiktiven, hier nicht vorhandenen Grundschwingung (Abb. 8). Oberoktave, Duodezime und Doppeloktave besitzen zum Zeitpunkt des Klöppelanschlages in der Regel von allen Teiltönen die höchsten Intensitäten, weshalb der Schlagton auch besonders intensiv in Erscheinung tritt. Da die Schlagtonbildner nur sehr kurze Abklingzeiten besitzen, erklärt sich daraus die kurze Lebensdauer des Schlagtones.

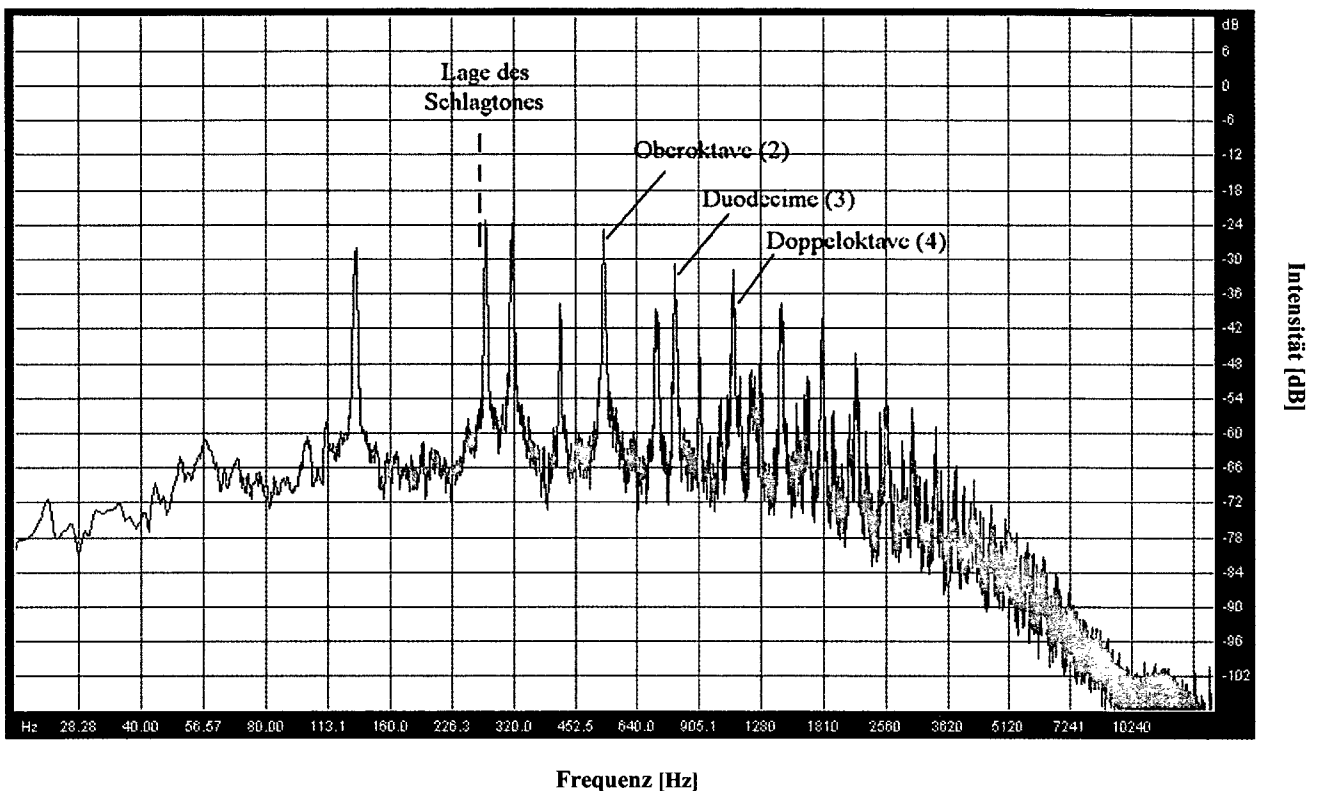


Abb. 8: Residuum des Hauptschlagtones

Der Einfluß von **Unterton** und **Prim** auf die Schlagtonbildung ist in normalen und tiefen Tonlagen (etwa c° bis e^{\prime}) vernachlässigbar gering, nicht mehr aber in hohen Tonlagen. Bei Tonlagen von kleinen Glocken ab etwa $e^{\prime\prime}$ aufwärts besitzen Prim und Unterton schon einen deutlichen Einfluß auf die Schlagtonbildung, da Doppeloktave und Duodezime schon zu hohe Frequenzen aufweisen (über 2500 Hz), um schlagtonbildend zu wirken, dagegen aber Unterton und Prim nun beginnen, in den optimalen Hörbereich einzutreten. Der Schlagton fällt hier umso kräftiger aus, je mehr Unterton und Prim zur Oberoktave in Oktavintervallen (Verhältnis 1 : 2 : 4) stehen bzw. Unterton und Prim das Intervall einer Oktave bilden (Verhältnis 1 : 2). Bei Tonlagen um $c^{\prime\prime\prime}$ und höher wird der Schlagton praktisch nur mehr durch Unterton und Prim gebildet, da hier alle Lauttöne schon außerhalb des optimalen Frequenzbereiches liegen. Bei ganz kleinen Glocken (ab etwa $g^{\prime\prime\prime}$) ist nur noch der Unterton tonlagenbestimmend. Besonders alte, kleine Glocken, wo Prim und Unterton nicht im Oktavintervall stehen, haben oft eine schwer bestimmbare, nicht eindeutige Tonlage. Die übrigen Teiltöne des Schlagtonkomplexes dagegen sind in der Regel nur für die Klangfarbe des Schlagtones (Tongebung) bzw. für die Bildung des sog. Quart-Nebenschlagtones verantwortlich.

2.3.2. Schlagtonbestimmung

Da ein Schlagton erst im menschlichen Gehör entsteht, kann dieser mit physikalischen Mitteln (Stimmgabeln, Klanganalyse mit Computer) nicht direkt gemessen werden. Seine Tonhöhe ist daher nur gehörmäßig zu erfassen (z. B. durch Vergleich mit einer anderen Tonquelle). Indirekt ist eine Messung des Schlagtones möglich, indem man die Teiltöne nachweist, die für das Schlagtonresiduum verantwortlich sind. Bei einer Klanganalyse am Computer sucht man daher stets die für das Residuum verantwortliche Teiltonfolge, aus welchem die Tonlage der Glocke gebildet wird. Diese ist in der Regel leicht auffindbar, da die Klangkonstante bzw. die Lauttöne meist gut ausgeprägt in Erscheinung treten. Es gibt aber einige Regeln, mit denen sich Schlagtöne ziemlich genau und auch einfach ermitteln lassen:

- 1) Bei Tonlagen im Bereich von c' bis etwa e'' (mittlere und größere Glocken) wird die Schlagtonbildung hauptsächlich durch die Oberoktave geprägt. Für diesen Tonbereich kann man nun in sehr guter Näherung festlegen: Die Höhe des Schlagtones ist gleich der Höhe der um eine Oktave vertieften Oberoktave; z.B. Oberoktave = $g''+6 \rightarrow$ Tonlage = $g'+6$. Diese Gesetzmäßigkeit wird als **Regel von Rayleigh** bezeichnet und ist auch für die meisten Glocken gültig (Ausnahme: Wenn Unterton und Prim ein sehr starkes Residuum bilden, etwa bei Nonglocken mit vertiefter Prim bzw. Septimglocken mit erhöhter Prim und daher die Tonhöhe des Schlagtones ein wenig nach unten bzw. oben verschieben).
- 2) Bei Tonlagen unter c' (sehr große Glocken) wird der Einfluß der Doppeloktave immer stärker, bis sie bei Tonlagen tiefer als g° die Oberoktave, die nun außerhalb des optimalen Bereichs der Gehörempfindlichkeit liegt, als schlagtonbestimmende Komponente ablöst. Das hat insofern Auswirkungen, da die Frequenz der Doppeloktave nicht genau doppelt so groß ist wie die der Oberoktave (kein reines Verhältnis 1: 2), sondern fast immer um ca. 2 bis 4 Gt/16 höher liegt, weshalb die Tonlage von sehr großen Glocken höher bewertet werden muß. Die Regel von Rayleigh ist daher bei diesen tiefen Tonlagen nicht mehr gültig. Es gilt nun: Bei Tonlagen tiefer g° ist die Höhe des Schlagtones näherungsweise gleich der Höhe der um zwei Oktaven vertieften Doppeloktave (z.B.: Doppeloktave = $f''+3 \rightarrow$ Tonlage = $f^\circ+3$). Bei Tonlagen zwischen g° und c' liegt die Höhe des Schlagtones zwischen um einer Oktave vertieften Oberoktave und zwei Oktaven vertiefter Doppeloktave, z.B. Oberoktave = $b'+1$, Doppeloktave = $b''+5 \rightarrow$ Tonlage = $b^\circ+3$. Abweichungen von dieser Regel gibt es nur dann, wenn Unterton, Prim und Oberoktave exakt im Verhältnis 1 : 2 : 4 stehen (reinste Oktavglocke), weil hier das aus diesen Teiltönen gebildete starke Residuum den Einfluß der Doppeloktave überwiegen kann und sich daher der Schwerpunkt der Residuumbildung Richtung Oberoktave verlagert (dies kann man bei sehr tontiefen Bochumer Stahlglocken in V7-Rippe beobachten). Bei starker „Streckung“ der Klangkonstante findet auch bei kleineren Glocken über Tonlage c' eine geringfügige Verschiebung der Tonlage nach oben hin statt (z.B. bei gewissen Stahlglocken).
- 3) Für kleine Glocken (Tonlage über etwa e'') gibt es keine verbindliche Regel für die Höhe des Schlagtones, da sie sehr stark von der Lage von Unterton und Prim abhängt. Die Tonlage muß in solchen Fällen für jede Glocke individuell bestimmt werden.

Auch für Nebenschlagtöne (siehe Kapitel 2.4) sind obige Regeln zu einem gewissen Grade anwendbar. So gilt für den **Quart-Nebenschlagton** in sehr guter Näherung: Dieser liegt 2 Oktaven unterhalb des Teiltones Quarte (Beispiel: Quarte = $h''+3 \rightarrow$ Quart-Nebenschlagton = $h^\circ+3$). Dagegen ist für den **Sekunden-Nebenschlagton** nur Regel 1, und das auch eher bedingt, anwendbar. **Terzschlagtöne** können dagegen nur gehörmäßig ermittelt werden; ihre Ausbildung hängt zu sehr vom jeweiligen Teiltonaufbau der Glocke ab, als daß sich hier eine bestimmte Regel aufstellen ließe.

Leider wird in der Glockenkunde die Regel von Rayleigh (Regel 1) völlig gedankenlos praktisch für jede Glocke angewandt, auch für solche, wo sie eigentlich nicht gültig ist. Die hier aufgestellte Regel 2) für tontiefe Glocken, die im Rahmen dieser Arbeit formuliert wurde (ebenso wie die 3) scheint überhaupt unbekannt zu sein. Offensichtlich hat man es nie der Mühe Wert gefunden, die als Selbstverständlichkeit aufgefaßte Rayleigh'sche Regel für die Schlagtonbestimmung einmal kritisch zu hinterfragen.

2.3.3. Dispositionen

Die Tonlage einer einzeln geläuteten Glocke unterscheidet sich bisweilen geringfügig, wenn sie gleichzeitig mit mehreren Glocken im Rahmen eines Geläutes erklingt⁸⁾. Dies hat seinen Grund, daß kleinere Abweichungen von der reinen Stimmungslinie vom Ohr zurechtgerückt werden können; denn das menschliche Gehör besitzt nämlich die Eigenschaft, in gewissen Grenzen bleibende musikalische Abweichungen (bis maximal $4 \text{ Gt} / 16 = 1 \text{ Viertelton}$) auszugleichen und geringfügig verzogene Intervalle als rein zu empfinden (der berühmte Physiker *H. Helmholtz* beschrieb dieses Phänomen so: *Unser Gehör glaubt das zu hören, was es hören will!*)¹⁴⁾. Dies führt zu einer geringfügigen Verschiebung der Tonlage einer Glocke, abhängig von deren Umfeld (sprich mitläutenden Glocken). Dieses Phänomen trifft man nicht nur bei der Tonlage einer Glocke an, sondern auch beim Glockentyp (siehe Kapitel 2.5.1).

Die Töne von Glocken eines Geläutes, geordnet nach der Tonhöhe, nennt man Stimmungslinie oder auch *Disposition* (Bsp: $c' - e' - g'$). In der Glockenkunde werden in der Disposition stets die Tonhöhen angegeben, welche die Glocke einzeln geläutet ergibt. Weil aber das Gehör geringfügig verzogene Intervalle „zurechtrückt“, kann sich die Tonlage einer allein geläuteten Glocke von derjenigen, wenn diese gleichzeitig mit anderen Glocken erklingt, geringfügig unterscheiden, was zu dementsprechenden Verschiebungen in der Stimmungslinie eines Geläutes führt. Deshalb sollte die Disposition eines Geläutes nicht mit den Tonlagen der allein geläuteten Glocken („*t h e o r e t i s c h e D i s p o s i t i o n*“), sondern mit denjenigen Tonlagen, welche im Geläute gehörmäßig erfaßt werden und damit die wirkliche („reale“ bzw. „effektive“) Stimmungslinie wiedergeben, beschrieben werden. Die so ermittelte Disposition heißt dann die „*e f f e k t i v e D i s p o s i t i o n*“. Diese kann nur gehörmäßig bestimmt werden, es gibt hier keine Regeln wie bei der Schlagtonbestimmung einer einzelnen Glocke. Dazu folgendes Beispiel:

Stimmungslinie eines Geläutes

Die Glocken des Frankfurter Domes haben, als Einzelglocken betrachtet, folgende Tonlagen (bestimmt nach Regel 1 und 2 in Kapitel 2.3.2):

$$e^{\circ}+3,5 / a^{\circ}-0,5 / cis'-1,5 / e'+0,5 / fis'\pm 0 / gis'-2 / a'+0,5 / h'-0,5 / cis''+2,5$$

Die theoretische Disposition, die sich durch die Tonlagen der einzeln geläuteten Glocken ergibt, wirkt auf dem ersten Blick verstimmt (Unterschiede bis zu einem Viertelton). Im Vollgeläute, wenn alle Glocken gleichzeitig läuten, empfindet man die Tonlagen der Glocken jedoch folgendermaßen (Tonlagen gehörmäßig erfaßt):

$$e^{\circ}+2 / a^{\circ}\pm 0 / cis'\pm 0 / e'\pm 0 / fis'\pm 0 / gis'\pm 0 / a'\pm 0 / h'\pm 0 / cis''+2$$

Die effektive Disposition des Geläutes hat eine viel sauberere Stimmungslinie (Dur Quart-Sextakkord), nur Gl.1 und 9 erscheinen geringfügig erhöht. Eine Besonderheit ergibt sich, wenn nur Gl.1 und 2 geläutet werden; man hört dann:

$$e^{\circ}+4 / a^{\circ}-2 (= e^{\circ}+4 / gis^{\circ}+6)$$

In diesem Fall empfindet man das Intervall zwischen den beiden Glocken als (etwas überdehnte) Durterz, im Gegensatz zum Vollgeläute, wo sie die das Geläutemotiv prägende Quarte des Quart-Sextakkordes bilden. Das Geläute der Erzabtei St. Peter in Salzburg, ebenfalls auf einen Dur-Quartsextakkord gestimmt, zeigt den gleichen Stimmungsfehler wie in Frankfurt.

Ähnlich wie beim Teiltonaufbau von Läuteglocken (Glockentyp) ist eine exakte theoretische Disposition bei Geläuten nicht erforderlich, es zählt nur die effektive Disposition. Kleinere Unstimmigkeiten in der theoretischen Stimmungslinie (wenige Gt/16, maximal 1 Viertelton = 4 Gt/16) wirken sich bei Geläuten als nicht störend aus; Glockenspiele dagegen reagieren darauf aufgrund ihrer andersartigen Wirkungsweise als reines Musikinstrument weitaus empfindlicher und klingen schnell „falsch“.

Nebenschlagtöne

2.4

Neben dem (Haupt-) Schlagton können unter gewissen Umständen ein zweiter oder noch weitere metallische Toneindrücke mit bestimmter Tonhöhe wahrgenommen werden, die als *N e b e n - s c h l a g t ö n e* bezeichnet werden. Die Intensität der Nebenschlagtöne ist normalerweise geringer als die des Hauptschlagtones (daher auch die Bezeichnung Nebenschlagton), kann aber manchmal so stark ausfallen, das ein Nebenschlagton die Tonlage der Glocke bestimmt, und nicht mehr der Hauptschlagton. Da Nebenschlagtöne das musikalische Erscheinungsbild einer Glocke unter Umständen besonders nachhaltig prägen können (siehe dazu auch im Kapitel 2.5.1 „Glockentyp“), ist es notwendig, stark klingende Nebenschlagtöne immer zusätzlich zum Hauptschlagton mit anzuführen. Nebenschlagtöne sind Phänomene, die als solche erst nach 1945 bewußt wahrgenommen wurden und seitdem in der Glockenkunde bekannt sind.

2.4.1 Quart-Nebenschlagton

Der wichtigste Nebenschlagton ist der *Q u a r t - N e b e n s c h l a g t o n* (Abb. 9). Er wird aus den Lauttönern **Quarte**, **Tripeloktave** und noch einem weiteren, höheren Lauttöner (in der Regel der **L2**) gebildet, die wie Oberoktave, Duodecime und Doppeloktave stets im Verhältnis von ca. 2 : 3 : 4 stehen (diese Teiltöne sind ebenfalls Bestandteil der Klangkonstante). Der Quart-Nebenschlagton kommt daher wie der Hauptschlagton prinzipiell in jeder Glocke vor. Da aber die nebenschlagtonbildenden Teiltöne sehr hoch sind und daher außerhalb des optimalen Hörbereiches für die Residuumbildung liegen, wird der Quart-Nebenschlagton erst in tiefen Tonlagen, d. h. bei sehr großen Glocken (unter ca. c') deutlich wahrnehmbar. Je tiefer die Glocke, desto stärker wird die Intensität des Quart-Nebenschlagtones, da die ihn bildenden Teiltöne dem für die Residualbildung günstigen Frequenzbereich immer näher kommen, während die des Hauptschlagtones aus ihm herausrücken. Die Intensität des Quart-Nebenschlagtones ist in der Regel zwar geringer als die des Hauptschlagtones; in sehr tiefen Tonlagen (unter g^o) kann er aber manchmal stärker als der Hauptschlagton ausfallen und daher tonbestimmend werden.

Der Quart-Nebenschlagton liegt theoretisch zwar eine Undecime über dem Hauptschlagton, wird aber durch Oktaventäuschung immer als Quarte über dem Hauptschlagton wahrgenommen (daher der Name). Bei manchen Glocken kann aber der Abstand zum Hauptschlagton auch eine Durterz betragen. Dieser Spezialfall des Quart-Nebenschlagtones heißt *D u r n e b e n s c h l a g t o n* (berühmtes Klangbeispiel: Wiener Pummerin). Er entsteht durch die sog. „Stauchung“ der

Klangkonstante (Die Begriffe „Stauchung“ und „Streckung“ der Klangkonstante werden im Kapitel 3.3.1 näher erörtert).

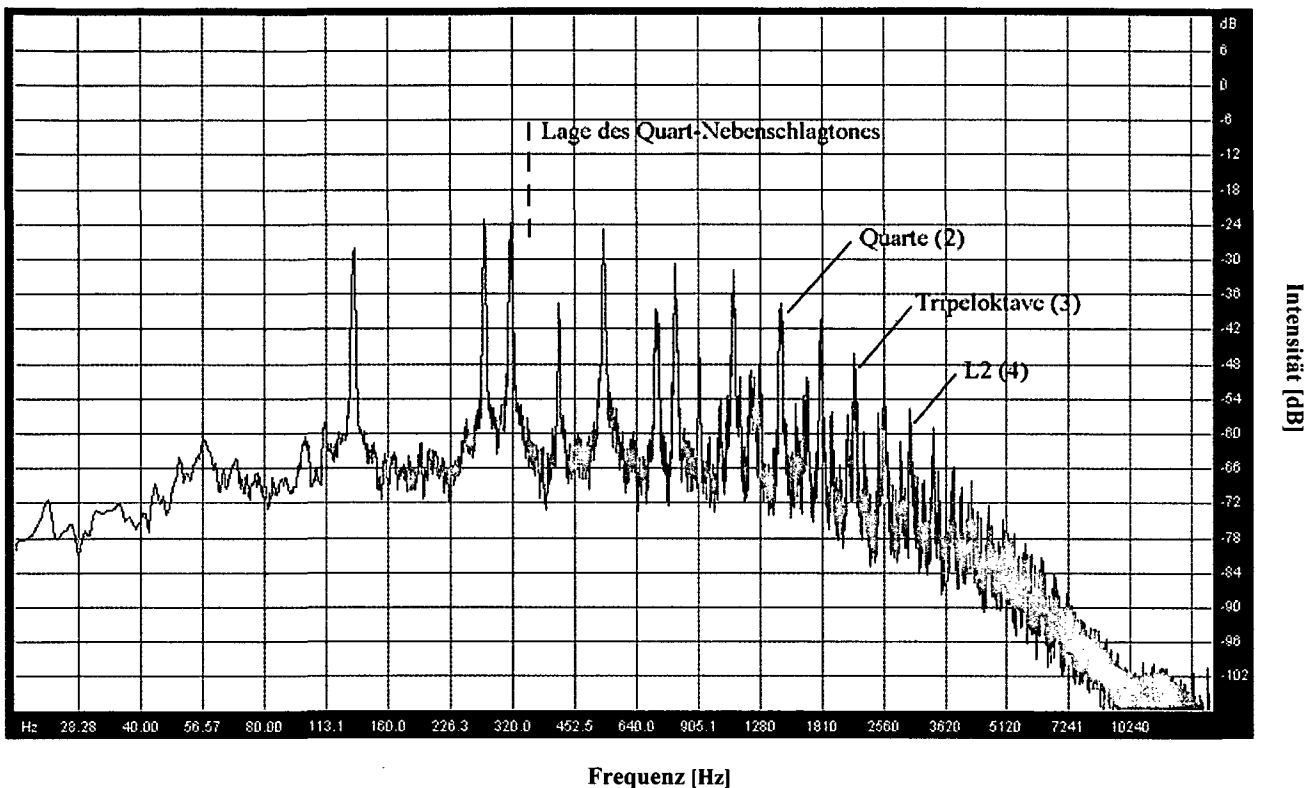


Abb. 9: Residuum Quart-Nebenschlagton

Ein unreiner Quart-Nebenschlagton besitzt einen eigentümlich rauhen, kesselartigen Akzent, was als „Nebenschlagtongeräusch“ bezeichnet werden kann. Das Zustandekommen von Nebenschlagtongeräuschen hängt von mehreren, jedoch gleichzeitig eintreffenden Faktoren ab (u.a. stärkere Abweichung vom ganzzahligen Verhältnis, unruhiger Abklingverlauf und hohe Abklingdauer der Teiltöne ab der Doppeloktave, Obertönigkeit und hohe Tonspanne etc.). Obwohl Nebenschlagtongeräusche gehörmäßig leicht wahrgenommen werden können, so ist ihre Detektion mittels Klanganalyse am Computer schwierig, weil es sich hier um ein Phänomen handelt, das sich aus mehreren, zugleich eintretenden Ereignissen zusammensetzt.

2.4.2 Sekundnebensschlagton

Ein weiterer Nebenschlagton ist der sog. Sekundnebensschlagton, der aber äußerst selten ist. Er entsteht, wenn die Glocke aufgrund einer fehlerhaften Glockenrippe (Glockenform) eine in zwei benachbarte Töne (bis zum Ganztonintervall) gesplante Oberoktave aufweist (Abb. 10). Man hört in diesem Fall zwei, in etwa gleich laute Hauptschlagöne, die bis zu einem Ganztonintervall (= Sekunde) auseinander liegen. Solche Glocken besitzen daher keine eindeutig bestimmbare Tonlage, klingen „falsch und verstimmt“ und sind absolute Fehlkonstruktionen. Im Grunde handelt es sich beim Phänomen Sekundnebensschlagton um einen gesplanten Hauptschlagton. Welcher von den beiden der stärkere ist, hängt vom jeweiligen Teiltonaufbau ab; im Grunde ist es derjenige, welcher der Residuumsbedingung (d.h. das Verhältnis 2 : 3 : 4) besser entspricht. In der Regel wird aber stets der tiefere als Hauptschlagton festgelegt. Berücksichtigt für ihren Sekundnebensschlagton sind gewisse Stahlglocken des Bochumer Vereines (die Glocken in der

sog. ersten Oktavrippe)¹⁵⁾, welche sich durch ihren abscheulichen Klang auszeichnen (z.B. Geläute vom Kloster Ettal in Bayern).

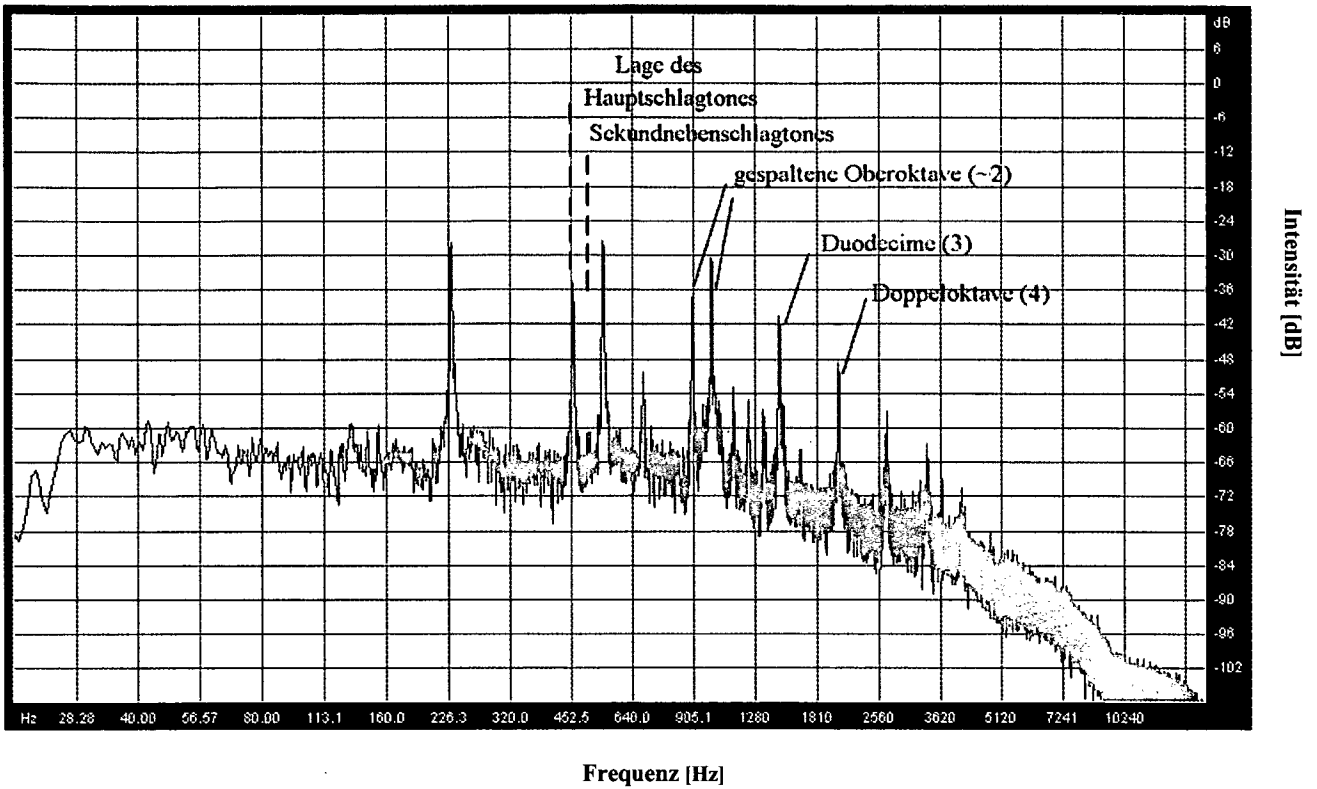


Abb. 10: Residuum Sekundnebschlagton

2.4.3 „Terzschlagton“

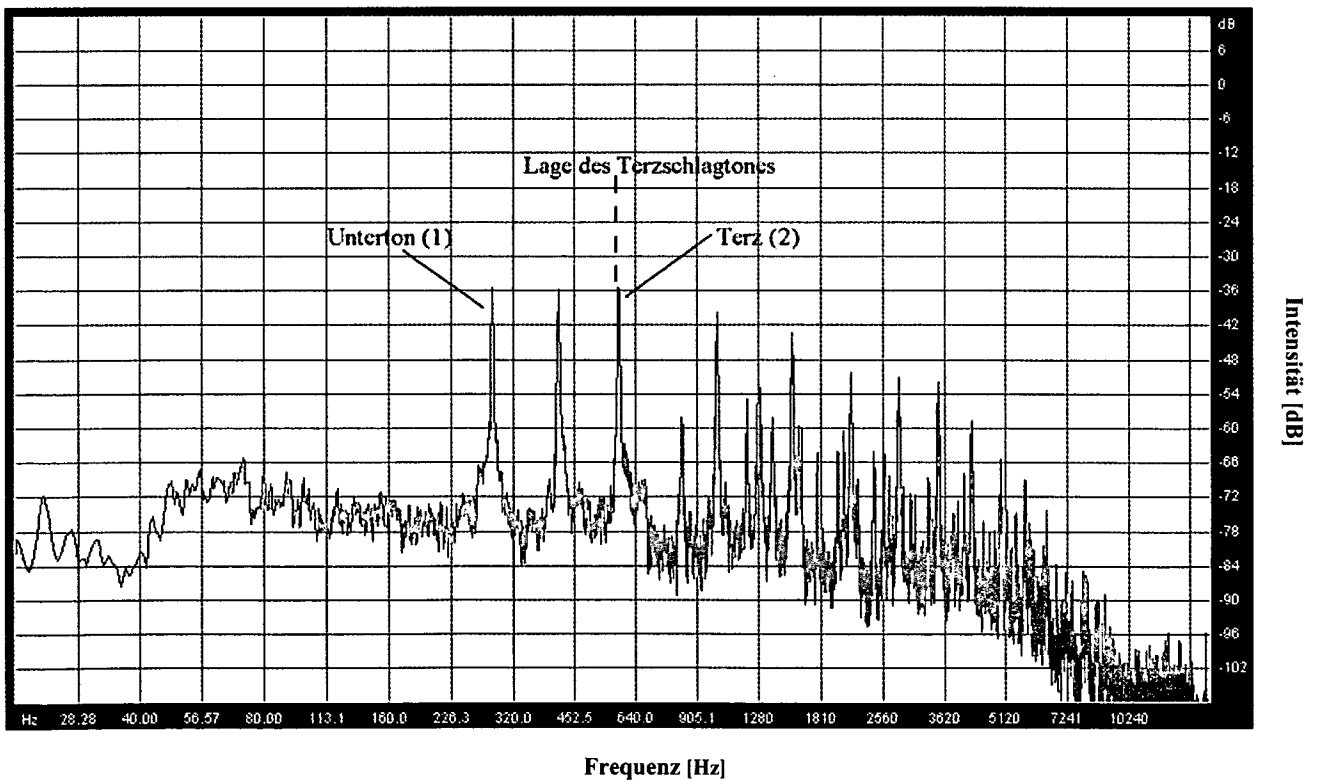


Abb. 11: Residuum Terznebschlagton

Ein Spezialfall ist der sog. „T e r z s c h l a g t o n“ (nicht zu verwechseln mit dem Dur-Nebenschlagton!), der nur bei kleinen Sextglocken (d. s. Glocken, wo das Intervall Unterton-Schlagton eine Sexte beträgt) fallweise entsteht. Hierbei stehen Unterton und Terz im Oktavintervall (Verhältnis 1 : 2), die zusammen eine starke, schlagtonartige Wirkung ergeben, die um so ausgeprägter ist, je kleiner die Glocke wird und daher Unterton und Terz in den optimalen Frequenzbereich der Residualbildung hineinrücken. Aufgrund Oktaventäuschung empfindet man der Terzschlagton etwa eine Mollterz über dem Hauptschlagton. Eine zusätzliche Verstärkung des Effektes tritt noch ein, wenn die Prim so zuliegen kommt, daß Unterton, Prim und Terz im Verhältnis von ca. 2 : 3 : 4 stehen (= Obertonreihe!), wie es in Abb. 11 der Fall ist. Glocken mit Terzschlagtönen haben einzeln geläutet aufgrund der starken Betonung der Mollterz einen eigenartigen, stark elegischen Charakter, der aber nicht schlecht ist; bei Kombination mit anderen Glocken (vor allem mit „normalen“ Glocken) zu einem Geläute ergeben sich aber aufgrund ihrer Zwittertönigkeit gewisse Probleme. Terzschlagtöne sind noch seltener als Sekundnebeschlagtöne. Bekannt für ihre Terzschlagtöne sind die ersten von Böhler-Kapfenberg gegossenen Stahlglocken (in der 1. Versuchsrippe „B1“).

Da die Glockensachverständigen das Phänomen „Terzschlagton“ bis heute noch nicht begriffen haben, ist der Begriff in der herkömmlichen Glockenkunde unbekannt; in vorliegender Arbeit wird er erstmals beschrieben und erklärt.

Der Glockentyp

2.5

2.5.1 Definition

Schon ganz am Anfang wurde festgehalten, daß dem Glockenklang eine mehrstimmige Klangstruktur zugrunde liegt. Dadurch, daß der aus den lange nachklingenden Summtönen Unterton, Prim und Terz bestehende Nachhall (die Quinte ist in der Regel viel zu schwach, um selektiv herausgehört zu werden) einen den Schlagton begleitenden, mehr oder weniger harmonischen Akkord bzw. Dreiklang ergibt, entsteht ein gewisses musikalisches Erscheinungsbild, welches als **G l o c k e n t y p** bezeichnet wird. Der Glockentyp wird im allgemeinen nur vom musikalisch geschulten Zuhörer bewußt wahrgenommen und erzeugt beim „normalen“ Zuhörer mehr eine unterbewußte Wirkung. Da der Glockentyp nur von der Form (Gestalt) der Glocke abhängt und nicht vom Werkstoff, ist eine eventuelle Korrektur in einem gewissen Rahmen nach dem Guß durch Abschleifen von Metall an der Glockenwand möglich.

Der Glockentyp wird nach dem Intervall Unterton-Schlagton benannt¹⁾. Die meisten Glocken kann man den vier Haupttypen **N o n -**, **O k t a v -**, **S e p t i m -**, und **S e x t t y p** zuordnen. Äußerst selten dagegen sind Quint-, Quart- und Decimentypen. Besitzt die Prim dieselbe Tonlage wie der Schlagton, spricht man von einer **g l e i c h l i e g e n d e n P r i m**; ist sie tiefer, von einer **v e r t i e f t e n P r i m**; wenn sie höher ist, von einer **e r h ö h t e n P r i m**. Erhöhte Primen (etwa über einen Viertelton) erzeugen in der Regel fast immer eine unangenehme Wirkung, während vertiefte Primen weit weniger störend sind. Gleichliegende Primen sind aufgrund der Deckungsgleichheit mit dem Schlagton am optimalsten. Während die Lage von Unterton und Prim, je nach Form der Glocke, stark variabel ist, so liegt die Terz, die Bestandteil der Klangkonstante ist, immer eine Terz über dem Schlagton (in der Regel eine Mollterz, seltener eine Durterz).

Die vier Hauptglockentypen sollen nun näher betrachtet werden:

- Oktavtyp

Der Oktavtyp, wo Unterton und Schlagton das Intervall einer Oktave bilden, hat bei gleichliegender Prim (= reine Oktavglocke, auch Molloktavglocke) die besten musikalischen Eigenschaften. Dieses gilt heute als das ideale Klangbild einer Glocke, welches von jeder modernen Glocke gefordert wird, weshalb der Oktavtyp unter den neuen Glocken dementsprechend stark verbreitet ist. Zur Erreichung einer möglichst einheitlichen Beurteilung von Abweichungen von der reinen Stimmung hat man 1951 in Deutschland die Limburger Richtlinien¹⁶⁾ festgelegt, die 1986 ergänzt und erläutert worden sind. Demnach gelten für die Oktavglocke folgende Toleranzgrenzen:

Teilton	Abweichung in Gt/16	Abweichung in Cent
Unterton	+1,5 / -5	+19 / -63
Prim	+1,5 / -3	+19 / -38
Mollterz	+2 / -2	+25 / -25
Durterz (bei Duroktavglocken)	+2 / -2	+25 / -25

Heutzutage ist man, aufgrund der Form- und Gießtechnik und der Korrekturmöglichkeiten nach dem Guß in der Lage, daß der Teiltonaufbau fast immer innerhalb der zulässigen Toleranzen zu liegen kommt. Neben der reinen Oktavglocke gibt es auch solche mit erniedrigter bzw. erhöhter Prim, welche musikalisch aber nicht so günstig sind. Besonders stark erhöhte Primen wirken unangenehm, vertiefte Primen erzeugen einen etwas „herben“ Charakter, sind aber besser als erhöhte Primen. Reine Oktavglocken, die statt der Mollterz eine Durterz aufweisen, nennt man Duroktavglocken. Diese wurden erstmals gezielt in den 50er Jahren des 20. Jh. hergestellt. Die Verbreitung der Duroktavglocke ist jedoch gering geblieben, vermutlich weil der Effekt (Durklang) nicht besonders groß ist. Die ersten, die Duroktavglocken entwickelt haben, waren *Rudolf Perner* in Passau 1950, Dipl. Ing. *Karl Stumpf* (Karlsruher Glockengießerei) 1951, und *Wilhelm Bröcker* (Bochumer Verein) 1958 (diese am gelungensten). Die Herstellung von Duroktavglocken ist auf wenige Gießereien beschränkt geblieben. In Österreich hat noch keine Glockengießerei jemals eine Duroktavglocke gezielt hergestellt.

- Septimtyp

Beim Septimtyp bilden Unterton und Schlagton das Intervall einer großen bzw. einer kleinen Septime. Septimglocken besitzen in der Regel vertiefte Primen und haben aufgrund dieses Teiltonaufbaues einen etwas herben musikalischen Charakter. Septimglocken mit gleichliegender Prim sind weit weniger häufig, klingen aber besser, da nur ein Teilton (Unterton) vom idealen Klangbild (reine Oktavglocke) Akkord abweicht. Ziemlich selten sind Septimglocken mit erhöhter Prim; manchmal täuschen diese den Gehöreindruck einer Oktavglocke vor (vor allem dann, wenn sie eine Durterz aufweisen). Der Septimtyp ist ebenfalls relativ stark verbreitet, in erster Linie bei älteren Glocken. Im 20. Jh. ist - zumindestens in Westeuropa - der Septimtyp von der Oktavglocke verdrängt worden und wird heute praktisch nicht mehr verwendet.

- Nontyp

Wenn der Unterton eine kleine bzw. große Non unterhalb des Schlagtones liegt, spricht man vom Nontyp. Die Prim ist häufig tiefer oder höher als der Schlagton und weniger mit diesem gleichliegend. Der Nontyp hat ein etwas „kühles“ musikalisches Erscheinungsbild. Nonglocken mit erhöhter Prim klingen unangenehm und besitzen ein äußerst schlechtes musikalisches Klangbild. Glocken mit kleiner Non und halbtontvertiefter Prim täuschen besonders in höheren Tonlagen den

Eindruck von Duroktavglocken vor. Im Gegensatz zum Oktav- und Septimtyp kommt der Nontyp nicht so häufig vor. In Italien dagegen ist der Nontyp ziemlich verbreitet und die typisch langgestreckten alten italienischen Glocken, wie man sie auch in Österreich und Südtirol findet, gehören in der Regel alle dem Nontyp an.

- Sexttyp

Beim **S e x t t y p** bilden Unterton und Schlagton das Intervall einer großen bzw. kleinen Sexte. Der Sexttyp mit großer Sexte, welchem der mit Abstand größte Teil der Sextglocken angehört, ist in musikalischer Hinsicht besser als der Septim- und Nontyp, besonders wenn die Prim gleichliegend ist. Dieser spezielle Fall wird als **U n t e r m o l l s e x t g l o c k e** bezeichnet und ist der wohl zweitschönste Glockentyp nach der reinen Oktavglocke. Aufgrund der starken Betonung der Terz (Unterton und Terz stehen in Oktavabstand) haben diese Glocken einen elegischen Charakter. Eine größere Verbreitung hat dieser Typ hauptsächlich durch die Bochumer- und Böhler-Stahlglocken gefunden, welche aber heute nicht mehr hergestellt werden.

Ein günstiger musikalischer Klangaufbau (Glockentyp) ist eine erwünschte, aber nicht die wichtigste Voraussetzung für eine gute Klangqualität. Denn die Intensität der Summtöne ist geringer als die des Schlagtones und daher tritt der Glockentyp eher in den Hintergrund. Exakte Reinstimmung (z.B. reinsten Oktavtyp) ist bei Kirchenglocken zudem nicht unbedingt erforderlich; denn das menschliche Gehör besitzt nämlich die Eigenschaft, in gewissen Grenzen bleibende musikalische Abweichungen (bis maximal $4 \text{ Gt} / 16 = 1$ Viertelton) auszugleichen und geringfügig verzogene Intervalle als rein zu empfinden¹⁴⁾ (vergl. dazu Kapitel 2.3.3 - Dispositionen), weshalb es auch hier zu Unterschieden zwischen „formellen“ und gehörmäßig erfaßten Glockentyp kommen kann. Aus diesem Grund sind bei Kirchenglocken minimale Abweichungen vom idealen (= reinsten) Teiltonaufbau von $1 \text{ Gt}/16$ und darunter im Grunde bedeutungslos, da diese rein gehörmäßig nicht mehr feststellbar sind (nur technisch meßbar). Bei Glockenspielglocken dagegen hat Reinstimmung eine viel größere Bedeutung, da die Glocken hier Bestandteil eines Musikinstrumentes sind, wo Unstimmigkeiten jeder Art generell unerwünscht sind und sich auch stärker störend auswirken.

Der Teiltonaufbau (Glockentyp) einer Glocke spielte bis Ende des 19. Jh. generell keine besondere Rolle. Man konnte bis zu diesem Zeitpunkt zwar Glocken mit bestimmten Tonlagen gezielt herstellen, aber nicht solche mit einem bestimmten Glockentyp; auch war man sich über die Wirkung des Glockentyps lange Zeit nicht im Klaren, darüber hinaus fehlten taugliche Meßgeräte zum Erfassen des Teiltonaufbaues (Stimmgabeln wurden erst ab den 19. Jh. verwendet). Schon die Tatsache, daß damals ein Gießer verschiedene Glockentypen, manchmal sogar in einem Geläute, verwendete, spricht für diese Annahme. Eine Ausnahme gab es nur in den Niederlanden im 17. und 18. Jh., wo einige Gießer es verstanden, reine Oktavglocken gezielt herzustellen und auch zu stimmen (diese waren hauptsächlich für die dort stark verbreiteten Glockenspiele bestimmt; herausragende Leistungen erbrachten diesbezüglich die Brüder *Hemony* (17. Jh.), deren Glocken und Glockenspiele noch heute gerühmt werden). Diese große Leistung in den Niederlanden steht aber allein da und scheint später verloren gegangen zu sein. Ab der 2. Hälfte des 19. Jh. setzte aufgrund von Anforderungen nach einem idealen musikalischen Klangaufbau eine gezielte Einführung des reinen Oktavtyps ein. So sind es Ende des 19. Jh. die Musiker und Sachverständigen *Simpson* in England, und in den 20er Jahren des 20. Jh. *Peter Griesbacher* in Deutschland und *Andreas Weißenböck* in Österreich, die es in ihren Ländern erreichten, daß die reine Oktavglocke allgemein erzeugt werden¹⁾. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden gezielt auch andere Glockentypen entwickelt und hergestellt (z.B. Duroktavglocke), doch erfuhren diese keine Verbreitung.

Das vermehrte zeitliche Auftreten gewisser Glockentypen in früheren Epochen hat hingegen seine Ursache in der Verwendung der in den verschiedenen Stilepochen jeweils aktuellen Glockenrippen (den sog. „charakteristischen Glockenformen“, siehe Kapitel 3.4); so neigt die im Mittelalter weit verbreitete gotische Rippe aufgrund ihrer Konstruktion mehr zum Oktavtyp, während die seit der Mitte des 17. Jh. angewandte Barockrippe meist dem Septimtyp angehört.

Doch nicht nur der Glockentyp, auch **N e b e n s c h l a g t ö n e** können das musikalische Erscheinungsbild der Glocke prägen, vor allem dann, wenn sie eine hohe Intensität besitzen. So wird bei sehr großen Glocken (Tonlage unter g°) die musikalische Wirkung hauptsächlich durch das Intervall Hauptschlagton und Quart-Nebenschlagton bestimmt, und weniger vom Glockentyp. Aufgrund des (heiteren) Durcharakters wirkt ein Durnebenschlagton angenehmer als ein Quart-Nebenschlagton, der eine ernstere und strengere musikalische Wirkung ausübt. Glocken mit Sekundnebenschlagtönen besitzen in der Regel aufgrund des Fehlens einer eindeutig bestimmbareren Tonlage einen unklaren Glockentyp. Solche mit Terzschlagtönen täuschen den Oktavtyp vor, obwohl sie eigentlich Sextglocken sind. Es ist daher notwendig, stark klingende Nebenschlagttöne immer zusätzlich zum Glockentyp mit anzuführen.

2.5.2 Beschreibung des Glockentyps; Tonanalyse

Mit der Angabe des Glockentyps (Non, Okt, Sept, Sext, . . .) ist das musikalische Erscheinungsbild einer Glocke schon recht gut beschrieben (sofern keine stark klingenden Nebenschlagttöne vorhanden sind; das wird dann extra angegeben). Eine genauere Angabe erfolgt, wenn man die Lage der Prim (erhöht, gleichliegend, vertieft) zusätzlich als Index zum Glockentyp anführt:

vertieft = - erhöht = + gleichliegend = $^\circ$

Beispiele: Sept⁻, Non⁺, Okt[°]. Eine spezielle Angabe der Terz ist eigentlich nicht notwendig, da sie Bestandteil der Klangkonstante ist und daher fast immer eine (Moll-) Terz über dem Schlagton liegt. Sollte sie aber ausnahmsweise einmal als Durterz auftreten, kann man dies durch den Ausdruck „Dur-“ vor dem Glockentyp zum Ausdruck bringen; z.B.: Dur-Okt[°]. Die Quinte hat aufgrund ihrer geringen Intensität keine Bedeutung für den Glockentyp und ist daher vernachlässigbar. Diese genauere Beschreibung des Glockentyps, der die Lage von Prim und Terz berücksichtigt, kann man als „**d e t a i l l i e r t e n G l o c k e n t y p**“ bezeichnen. Die Bestimmung des Glockentyps (sowohl des „einfachen“ als auch des detaillierten) ist, wenn man darin etwas Übung besitzt, mit bloßem Ohr möglich.

Eine präzise Messung und Beschreibung des Teiltonaufbaues (Glockentyps) erfolgt hingegen mit speziellen Meßinstrumenten (Stimmgabeln, Computer). Bei einer solchen **T o n a n a l y s e** wird in der Glockenkunde die genaue Tonhöhe der Teiltöne der Reihe nach aufgelistet, z.B.:

Unterton: $d^\circ-2$, Prim: $d'+7$, Terz: $f'+4.5$, Quinte: $a'-4$, Oberoktave: $d''+3$

Oft wird noch die Tonhöhe des Schlagtones (Tonlage) mit angeführt; in diesem Falle beträgt sie etwa: $d'+3$ (bestimmt nach der Regel von Rayleigh). Bei der Auflistung der Teiltöne (Tonanalyse) ist die Angabe von **Unterton, Prim, Terz, Quinte** (= Teiltöne des Nachhalls) sowie der **Oberoktave** und bei größeren Glocken (tiefer als c') auch noch der **Doppeloktave** und der **Quarte** als wichtigste Schlagtonbildner völlig ausreichend. In der Glockenkunde neigt man jedoch dazu, soviel Teiltöne wie möglich anzuführen. Besser als eine Auflistung von Teiltönen ist die Angabe des Teiltonaufbaues mittels eines Klangspektrums, ein Modus, der in der Glockenkunde aber völlig ungebräuchlich ist. Eine Tonanalyse ist eigentlich nur bei wissenschaftlichen Untersuchungen oder beim Glockenguß notwendig. Für den normalen Gebrauch bzw. für das Verständnis des

Glockenklanges genügt eigentlich die Angabe des detaillierten Glockentyps; er ist zudem auch viel übersichtlicher, weil hier der Zusammenhang der verschiedenen Töne in einem einzigen Ausdruck wiedergegeben wird (so faßt der Begriff Non⁺ die obige Tonanalyse zusammen).

2.5.3 Reduzierte Analysen

Um Teiltonaufbauten von unterschiedlichen Glocken vergleichen zu können, muß ein Teilton als fester Bezugspunkt gewählt werden, wobei am zweckmäßigsten die Oberoktave verwendet wird. Es gibt dabei mehrere Möglichkeiten, welche man alle als *reduzierte Analysen* bezeichnen kann.

- a) Der Vergleich kann in der Weise erfolgen, indem man die Oberoktave als gemeinsamen Bezugspunkt mit der Tonhöhe $c''\pm 0$ festlegt und die anderen Teiltöne dementsprechend umtransponiert. z. B.:

$$c^{\circ}+4 / cis'-1 / dis''+2,5 / g'-6 / c'' / g''+0,5 / c''' +4,5 / f''+2 / \dots$$

Dieses Verfahren ist anscheinend das älteste und schon seit dem 2. Weltkrieg bekannt (es wurde auf den Datenblättern der im 2. Weltkrieg abgelieferten Glocken angewandt, unter der Bezeichnung „Reduktion“, daher auch der Begriff „reduzierte Analyse“).

- b) Eine andere Methode gibt die Intervalle der Teiltöne von der Oberoktave in cents an, wobei die Oberoktave mit 0 festgelegt ist, z. B.:

$$-2450 / -1145 / -9620 / -420 / 0 / 730 / 1233 / 1730 / 2111 / 2460 \dots$$

Den entsprechenden cent-Wert erhält man durch folgende Gleichung¹⁰⁾:

$$[\text{cent}] = 3986 * \log \frac{f [\text{Hz}]}{f_0 [\text{Hz}]} \quad \text{Glg. 2}$$

Dabei ist f die Frequenz des jeweiligen Teiltöns, und f_0 die Frequenz der Oberoktave. Als Logarithmus wird hier der dekadische verwendet.

- c) Ein weiterer Vergleich erfolgt mit Verhältniszahlen. Dabei werden die Frequenzen der Teiltöne durch diejenige der Oberoktave bzw. durch die halbe Frequenz der Oberoktave dividiert. Die Oberoktave ist daher mit dem Wert 1 bzw. mit 2 festgelegt. Wenn man die halbe Frequenz der Oberoktave als Bezugspunkt wählt (sie hat dann den Wert 2), erhält man diejenigen Verhältniszahlen, an denen man die Residuumbildung des Schlagtones erkennen kann z.B.:

$$0,5 / 1 / 1,2 / 1,5 / 2 / 3 / 4 / 5,5 / 6,5 / 8$$

- d) Reduzierte Analysen sind auch graphisch darstellbar; man kann hier sowohl musikalische Toneinheiten als auch cents oder Verhältniszahlen in einem Diagramm auftragen – siehe Diagramm 2 (bei Verhältniszahlen empfiehlt sich eine logarithmische Darstellung, vergl. Diagramm 3 in Kapitel 3.3.1):

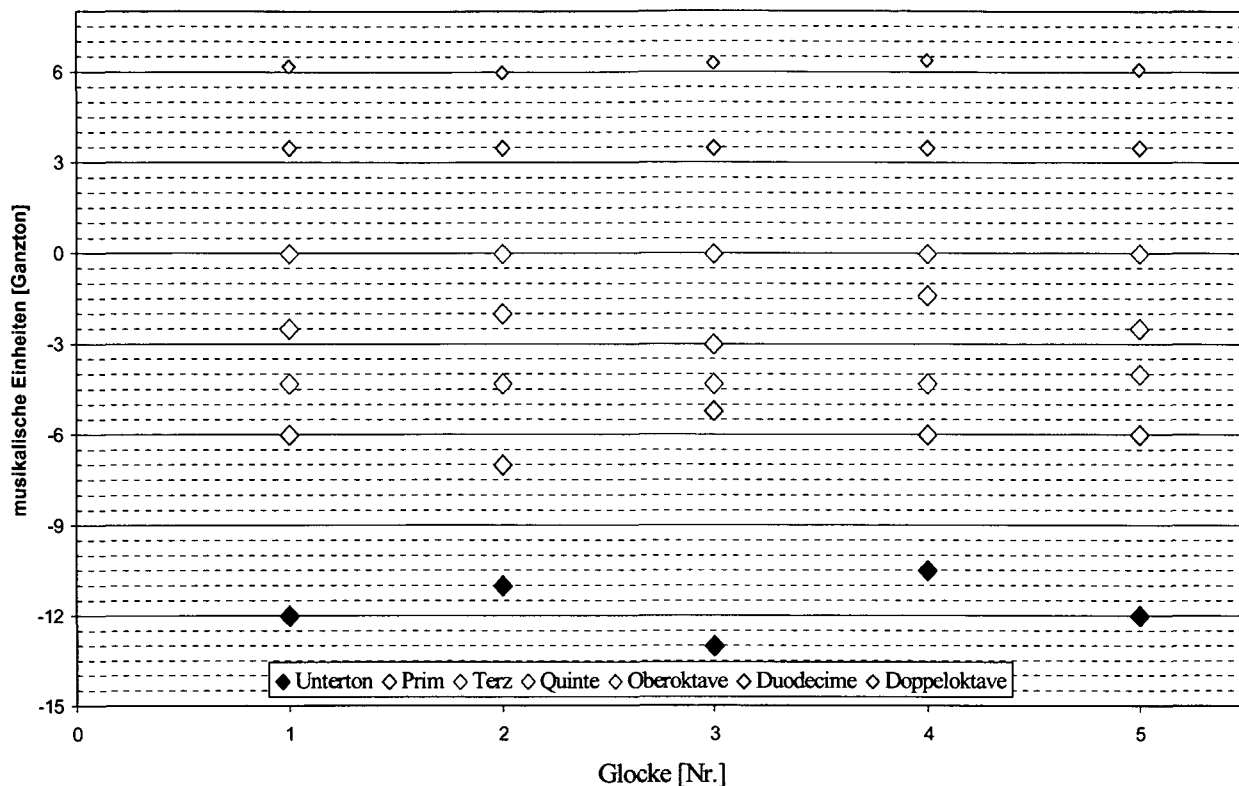


Diagramm 2: Vergleich von Teiltonaufbauten verschiedener Glocken (= graphische reduzierte Analyse). Dargestellt sind musikalische Toneinheiten, bezogen auf die Oberoktave (d.h. Oberoktave = 0).

1: Reine Oktavglocke (Molloktavglocke); 2: Septimglocke mit vertiefter Prim; 3: Nonglocke mit erhöhter Prim; 4: Sextglocke mit gleichliegender Prim (Untermollsextglocke); 5: Duroktavglocke.

Am brauchbarsten hat sich die Methode a) erwiesen, aber auch die graphische Methode ist sehr nützlich.

Die Tongebung

2.6

2.6.1 Definition

Selbst bei gleicher Tonlage und gleichem Teiltonaufbau (Glockentyp) kann man starke klangliche Unterschiede bei verschiedenen Glocken beobachten, welche hauptsächlich durch die **T o n - g e b u n g** hervorgerufen werden. Als Tongebung bezeichnet man die **K l a n g f a r b e** oder das Timbre der Glocke. Die Tongebung entsteht durch unterschiedliche Intensitäten (Lautstärkenverhältnisse) und Abklingverhalten der Teiltöne (in erster Linie der Lauttöne des Schlagtonkomplexes), deren Ursachen sowohl im Werkstoff der Glocke als auch in der Gestaltung der Glockenrippe begründet sind (siehe Kapitel 3.3 und 4.2). Sie kann durch Armaturen (Klöppel, Joch), die Art des Läutens und die Glockenstube (Turmakustik) beeinflusst werden (siehe Kapitel 6). Eine angenehme Tongebung ist bei Kirchenglocken die wichtigste Voraussetzung für eine gute Klangqualität und wiegt mehr als ein optimaler Glockentyp. Auch wird die Klangfarbe, im Gegensatz zum Glockentyp, von jedem Menschen, sogar von solchen, die kein musikalisches Gehör besitzen, sofort wahrgenommen. Die Tongebung wird am besten erfaßt, wenn die Glocke geläutet wird, da sie nur hier voll erregt wird.

Obwohl die Tongebung für den Glockenklang sehr wichtig ist, wird sie in der Glockenkunde meist wenig berücksichtigt (vielleicht aus dem Grund, da man sie im Gegensatz zum Glockentyp nicht „richtig“ messen, d. h. numerisch wiedergeben kann) und findet wegen ihrer Komplexibilität in der glockenkundlichen Literatur kaum Niederschlag. *Weißbäck-Pfundner*¹⁾ waren bis jetzt die einzigen, welche die Bedeutung der Tongebung erkannt und bei der Bewertung des Glockenklanges auch dementsprechend berücksichtigt haben. Ihr Konzept der Tongebung (ihre Einteilung in „Wertstufungen“, siehe Kapitel 2.6.7) welches in dieser Arbeit als Vorbild diente, wurde aufgrund der Erkenntnisse durch verschiedene Klangmessungen präzisiert und zugleich systematisch ausgebaut und erweitert. Der folgende Abschnitt soll ein erster Versuch zur Erklärung und Messung der Tongebung darstellen.

Die Entstehung der Tongebung ist komplex, ebenso ihre Messung, obwohl sie gehörmäßig sehr leicht erfaßt werden kann. Dadurch verhält sie sich genau umgekehrt wie der Glockentyp (leicht meßbar, aber nur für das geübte Ohr bewußt erfaßbar). Ähnlich wie sich der Glockentyp aus dem Zusammenspiel mehrerer Töne (Schlagton - Summtöne) zusammensetzt, kann man sich die Tongebung aus mehreren unterschiedlich wirkenden und zu ihrer Entstehung beitragenden folgenden fünf „Klangkomponenten“ zusammengesetzt denken: T o n f ü l l e , „T ö n i g k e i t“, „T o n s p a n n e“, „G e r ä u s c h a n t e i l“ und „A n s c h l a g“. Diese Komponenten sind wie die Summtöne des Nachhalles (Glockentyp) mit bloßem Gehör erfaßbar, können aber auch am Computer meßtechnisch nachgewiesen werden, wenn oft nur qualitativ. Die Zerlegung der Tongebung in einzelne Komponenten ist notwendig, um diese überhaupt technisch meßbar zu machen. In der Glockenkunde ist nur der Begriff Tonfülle (hier oft als Resonanz bezeichnet) als Klangeigenschaft einer Glocke bekannt.

2.6.2 Tonfülle

Die erste Klangkomponente ist die sogenannte T o n f ü l l e (auch Klangfülle; in der Glockenkunde fälschlicherweise oft als Resonanz bezeichnet). Die Tonfülle der Glocke beschreibt das Abklingverhalten des Schlagtones vom Klöppelanschlag bis zu seinem Verstummen und ist eine Art Maß für dessen Lebensdauer bzw. für das Klangvermögen der Glocke. Eine große Tonfülle bedeutet daher ein lange klingender Schlagton, bei geringer Tonfülle verklingt er sehr rasch. Die Tonfülle hängt sowohl von der Glockenform als auch vom Glockenmetall (und zwar sowohl von dessen Materialdämpfung als auch der „Inneren Tonhöhe“) ab; sie ist im Prinzip nach dem Guß nicht mehr veränderbar (Ausnahme: Stahlglocken, siehe Kapitel 4.5). Die Tonfülle wird sowohl durch Armaturen als auch durch äußere Einflüsse (Glockenstube, Schallfenster etc.) praktisch nicht beeinflusst. Die höheren Teiltöne des Schlagtonkomplexes (z.B. Doppeloktave, Quarte) haben einen größeren Anteil an der Tonfülle als die tieferen Teiltöne (z.B. Oberoktave); die Teiltöne des Nachhalles (Unterton, Prim, Terz, Quinte) tragen hingegen aufgrund ihres völlig andersartigen Charakters nicht zur Tonfülle einer Glocke bei. Weiters beeinflusst auch die Art des Abklingverlaufes zu einem gewissen Grade die Tonfülle. Denn der Schlagton verhält sich bezüglich des Abklingens keineswegs wie der Idealfall einer gedämpften Schwingung. Dies liegt daran, daß dieser sich ja aus zahlreichen Teiltönen zusammensetzt, die dazu noch aufgrund der sog. „Kopplung“ keine ideale gedämpfte Schwingung verkörpern. Wie unterschiedlich das Abklingverhalten sein kann, zeigen die Amplitudendiagramme von Schlagtonkomplexen in Abb. 12.

In der Glockenkunde wird die sog. N a c h h a l l d a u e r bzw. Nachhallzeit (= Gesamtabklingdauer) einer Glocke, die sich vom Klöppelanschlag bis zum Verstummen der Summtöne (Nachhalles) erstreckt, u.a. als Maß für die Tonfülle betrachtet. In der Regel wird hier die Abklingdauer des längsten klingenden Teiltones – des Untertones – herangezogen; manchmal werden neben diesem auch die von Prim und Terz mitgemessen. Die Mindestnachhallzeiten sind ebenfalls von den Limburger Richtlinien¹⁶⁾ von 1951 festgelegt worden, wobei hier Nachhallzeiten

von Bronze, Sonderbronze, Stahl- und Gußeisenglocken getrennt bewertet werden, wie in Tab. 5, 7 und 8 zusammengestellt ist (Kapitel 4.3, 4.4 und 4.6.1).

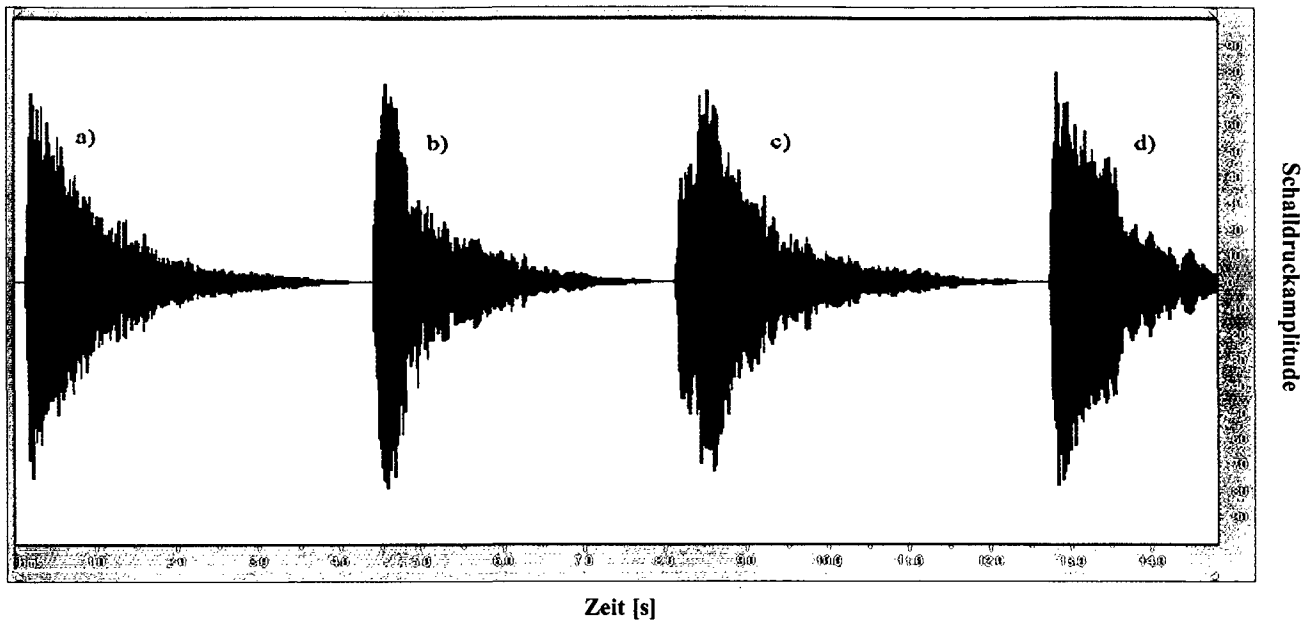


Abb. 12: Amplitudendiagramme von Schlagtönen. Dargestellt sind Schlagtonkomplexe, die Teiltöne des Nachhalls (Unterton, Prim, Terz, Quinte) sind weggefiltert. Das Abklingverhalten von Schlagtönen zeigt vielfältige Formen; doch es lassen sich 3 „Grundtypen“ feststellen: Den „gleichförmigen“ Verlauf (a), den „abgehackten“ Verlauf (b) und den „schwellenden“ Verlauf (c); oft ist der Abklingverlauf des Schlagtones eine Kombination aus diesen 3 Grundtypen (d). Gleichförmiger Verlauf beschreibt eine mehr oder weniger kontinuierliche Abnahme der Intensität; abgehackter Verlauf hingegen äußert sich durch eine anfangs recht starke Abnahme der Intensität, was sich durch eine mehr oder weniger ausgeprägte „Stufe“ im Amplitudendiagramm bemerkbar macht, um danach gleichförmig und relativ langsam zu verklingen. Im Vergleich zu gleichförmigem Verlauf wird bei abgehacktem Verlauf die Tonfülle als geringer empfunden. Bei schwellendem Verlauf steigt die Intensität nach einer gewissen Zeit wieder an und kann u.U. sogar ihr Maximum erreichen, um danach wieder abzunehmen. Dieser Klangverlauf erzeugt den Eindruck besonders hoher Tonfülle, welcher sie größer empfinden läßt als bei gleichförmigen Verlauf.

Obwohl es einen Zusammenhang zwischen Nachhalldauer und Tonfülle gibt (die Tonfülle steigt prinzipiell mit zunehmender Nachhalldauer), so ist diese dennoch nicht als Maß für die Tonfülle geeignet. Der Grund ist, daß die hohen Teiltöne des Schlagtonkomplexes, welche für die Tonfülle verantwortlich sind, einen hohen Anteil an Strahlungsdämpfung aufweisen, der stark von der jeweiligen Glockenkonstruktion bzw. von der „Inneren Tonhöhe“ des Glockenwerkstoffes abhängig ist, im Gegensatz zu den Summtönen des Nachhalls, die davon praktisch nicht betroffen sind (vor allem der Unterton). Aus diesem Grund können Glocken u.U. auch bei ziemlich schlechten Nachhallzeiten hohe Tonfülle besitzen (Näheres dazu siehe Kapitel 3.3.2). Das in der Glockenkunde gängige Verfahren, Nachhallzeiten als Maß für die Tonfülle heranzuziehen, ist wegen des unterschiedlich starken Einflusses der Strahlungsdämpfung höchstens nur für bestimmte Gruppen von Glocken anwendbar, wo die Strahlungsdämpfung in vergleichbaren Beträgen auftritt (z.B. Bronzeglocken in mittleren Rippen); bei Glocken, wo das aber nicht der Fall ist, sind Nachhallzeiten als Maßstab für die Tonfülle teilweise völlig ungeeignet, weil die Werte nicht mehr miteinander vergleichbar sind (etwa bei Bronzeglocken in mittleren und extrem schweren Rippen). Die Nachhalldauer kann aber als Maß für die sog. Materialdämpfung herangezogen werden; sie ist ihr indirekt proportional (je größer die Nachhalldauer, desto kleiner die Materialdämpfung).

Die Tonfülle läßt sich am besten mittels **Amplitudendiagrammen** untersuchen. Als sehr nützlich hat sich hier das Prinzip des „K l a n g v e r m ö g e n s“ KV erwiesen, welches im Zuge dieser Arbeit konzipiert wurde; dieses gibt die relative Intensität des Schlagtones, bezogen auf dessen maximale Intensität, zu einem bestimmten Zeitpunkt nach dem Klöppelanschlag an, beschreibt also,

wie stark der Schlagton nach einer bestimmten Zeitspanne noch ist. Das Klangvermögen ist definiert als (vergl. dazu auch Abb. 13):

$$KV = \frac{I_t}{I_{\max}} * 100 \quad \text{Glg. 3}$$

wobei I_t Intensität des Schlagtones zum Zeitpunkt t
 I_{\max} maximale Intensität des Schlagtones

Das Klangvermögen KV wird in % angegeben.

Um die Tonfülle von Glocken in unterschiedlichen Tonlagen vergleichen zu können, muß man einen von der Tonhöhe abhängigen Bezugszeitraum verwenden, nach dem I_t gemessen wird (die Abklingdauer eines Tones ist indirekt proportional zu dessen Frequenz, d.h. $t \propto 1/f$). Bewährt hat sich als Bezugszeitraum:

$$t_{\text{ref}} = \frac{700}{f} \quad \text{Glg. 4}$$

mit t_{ref} Bezugszeitraum [s]
 f Frequenz d. Oberoktave [Hz]

Dieser Bezugszeitraum entspricht in etwa der Zeitspanne zwischen zwei Klöppelanschlägen einer läutenden Glocke.

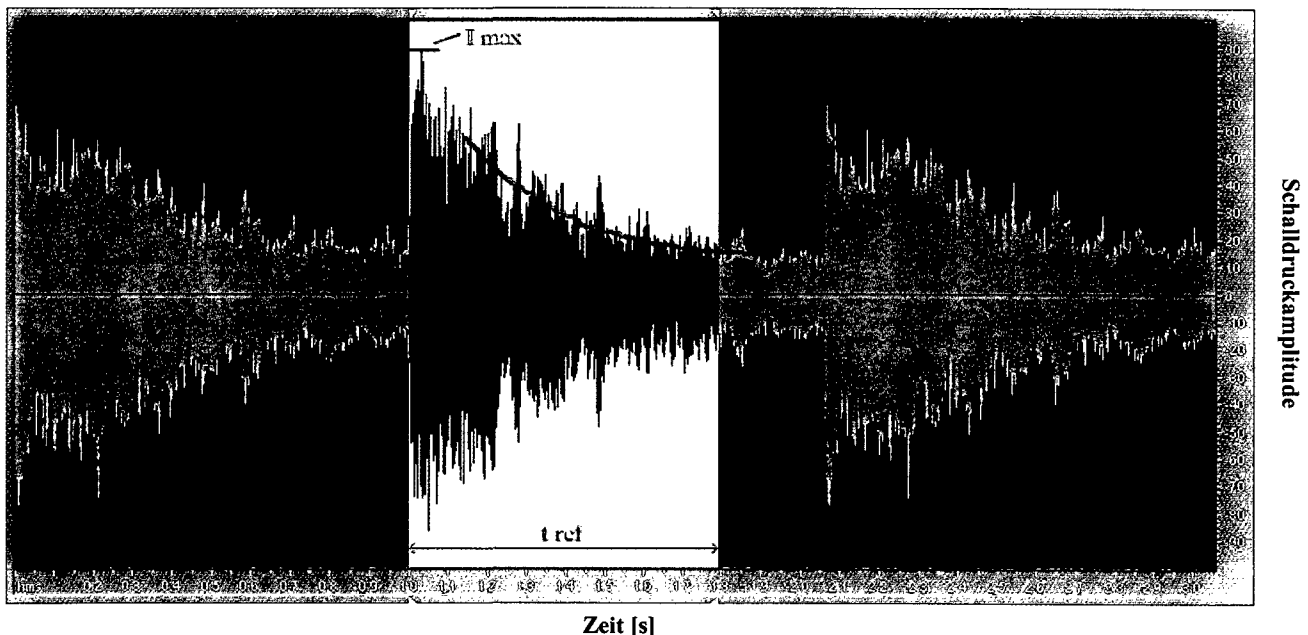


Abb. 13: Ermittlung des Klangvermögens KV anhand von Amplitudendiagrammen. Herangezogen werden Amplitudendiagramme vom Schlagtonkomplex ohne der Oberoktave (d.h. Unterton, Prim, Terz, Quinte und Oberoktave sind weggefiltert). Da der Abklingverlauf von Glockentönen immer „unruhig“ bzw. „rauh“ verläuft, empfiehlt es sich, um brauchbare Werte für I_t ermitteln zu können, eine „Ausgleichskurve“ mit möglichst gleichförmigem Verlauf zu erstellen, welche den „durchschnittlichen“ Abklingverlauf des Glockenklangs zeigt. I_t entspricht dann der Intensität der Ausgleichskurve zum Zeitpunkt t (Bezugszeitraum) nach dem Klöppelanschlag. I_{\max} ist hingegen die höchste im Amplitudendiagramm feststellbare Intensität. Man ermittelt das Klangvermögen am besten graphisch, indem man einen Ausdruck des entsprechenden Amplitudendiagramms auswertet.

Es hat sich bei zahlreichen Versuchen herausgestellt, daß sich bei der Ermittlung des Klangvermögens solche Amplitudendiagramme, welche nur die Teiltöne ab der Oberoktave enthalten (d.h. Schlagtonkomplex ohne Oberoktave) die brauchbarsten Ergebnisse liefern, die auch mit der gehörmäßig erfaßten Tonfülle gute Übereinstimmung zeigen. Wie man nun bei der Ermittlung des Klangvermögens praktisch vorgeht, ist aus Abb. 13 zu entnehmen.

Obwohl das Ablesen der Intensitäten an Amplitudendiagrammen nicht immer sehr eindeutig ist, so lassen sich mit Hilfe des Klangvermögens doch äußerst brauchbare Resultate erzielen, die auf jeden Fall viel besser sind als die normalerweise verwendeten Nachhallzeiten (diese sind als Maß für die Tonfülle aufgrund des Einflusses der Strahlungsdämpfung teilweise ungeeignet). Weil die Tonfülle von Klöppelanschlag zu Klöppelanschlag leicht differiert (Klöppelanschläge sind nie völlig gleich, dazu kommen noch Effekte bedingt durch die „Kopplung“ und, im läutenden Zustand, der Einfluß der sog. „Dynamik“ – siehe dazu Kapitel 6.1.2), ist es empfehlenswert, von einer Glocke mehrere Messungen durchzuführen und von diesen dann einen Mittelwert zu bestimmen. Der Meßfehler, der hauptsächlich auf der Ablesung des Amplitudendiagramms beruht (stark davon abhängig, wie „ruhig“ bzw. „unruhig“ der Abklingverlauf ist), beträgt schätzungsweise 10 – 15 %.

Aufgrund von Tonanalyse-Messungen zahlreicher Glocken kann man das Klangvermögen und damit die Tonfülle einer Glocke zwecks besserer Übersicht in folgende Bereiche einteilen:

KV unter 10 %: gering
KV zwischen 10 und 20 %: normal
KV über 20 %: hoch

Glocken mit Werten über KV = 30 % sind selten anzutreffen. Die höchsten Werte, die Glocken erreichen können, liegen bei ca. KV = 50 %, die kleinsten unter KV = 5 %. Als Beispiel soll hier das im Zuge dieser Arbeit ermittelte Klangvermögen einiger ausgewählter berühmter Glocken gezeigt werden:

Dom zu Salzburg, „Salvator“:	KV = ~35 %
Kölner Dom, „Pretiosa“:	KV = ~25 %
Dom zu Erfurt, „Gloriosa“:	KV = ~20 %
Wien, Stephansdom, „Pummerin“:	KV = ~17 %
Neustadt/Weinstraße, „Kaiserglocke“ (Stahlglocke):	KV = ~13 %
Kölner Dom, „St. Petersglocke“:	KV = ~11%

Sonagramme eignen sich nur bedingt zur Erfassung der Tonfülle (u.a. berücksichtigen sie nicht die Art des Abklingverlaufes). Allerdings kann man hier jedoch sehr schön die Abklingdauer der verschiedenen Teiltöne des Schlagtonkomplexes beobachten und auch vergleichen, was bei Amplitudendiagrammen nicht möglich ist (Abb. 14). Ein Schlagton dauert in etwa so lange, wie die Abklingzeit des längsten klingenden Teiltones beträgt; oftmals ist dieser Teilton die Duodecime, manchmal aber auch die Oberoktave.

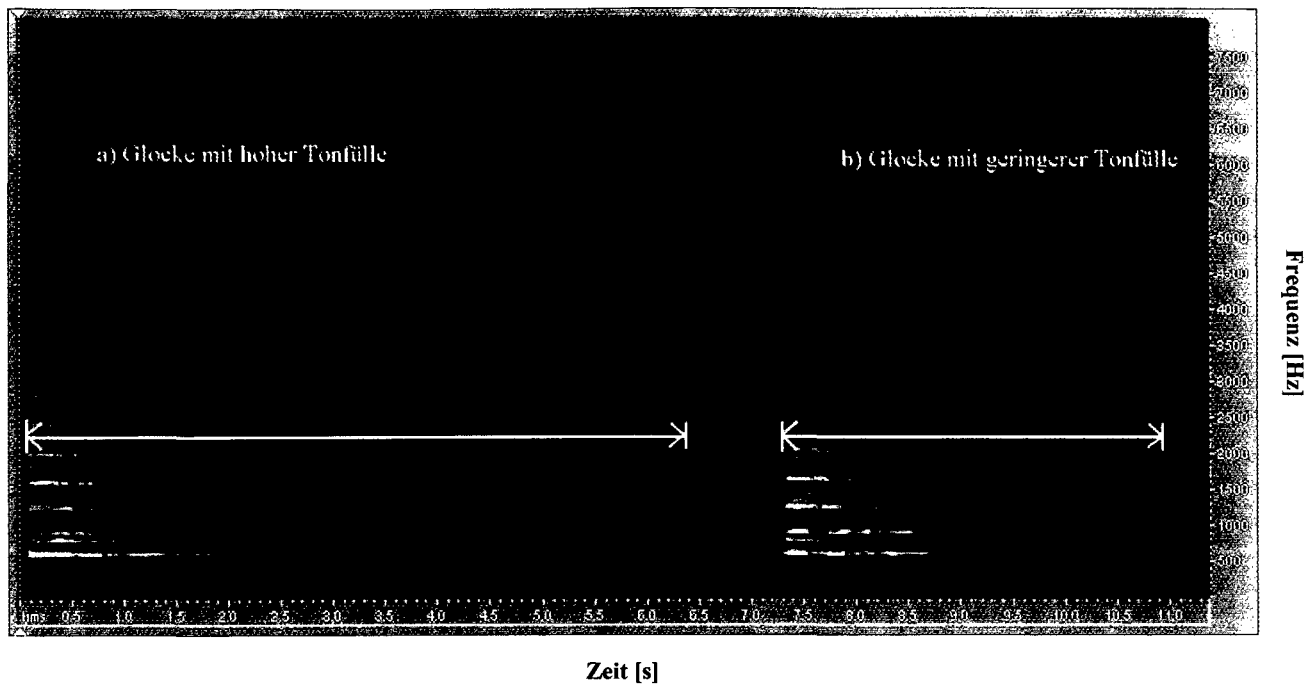


Abb. 14: Sonogramme zweier verschiedener Schlagtonkomplexe; links Glocke mit hoher Tonfülle, rechts Glocke mit geringerer Tonfülle. Die Spanne entspricht der ungefähren Abklingdauer des Schlagtones. Beide Glocken besitzen dieselbe Tonlage, die Abklingzeiten der Teiltöne sind daher direkt miteinander vergleichbar.

2.6.3 „Tönigkeit“

Die **Tönigkeit** beinhaltet Intensitätsverhältnisse (Lautstärkenverhältnisse) von Teiltönen und beschreibt, welche Teiltöne den Glockenklang hauptsächlich prägen. Dominieren eher die tieferen Teiltöne, spricht man vom einem **grundtönigen** Klang. Sind die hohen Teiltöne besonders stark ausgeprägt, von **obertönigem** Klang. Die Tönigkeit wird einerseits von der Materialdämpfung, aber auch von der Glockenrippe geprägt; die Zusammenhänge sind aber noch nicht vollständig geklärt. Die Tönigkeit kann durch die Beschaffenheit der Armaturen (insbesondere des Klöppels) verändert werden, aber auch die Turmakustik übt einen deutlichen Einfluß auf diese Klangkomponente aus.

Man kann die Tönigkeit anhand von **Klangspektren** qualitativ abschätzen, wobei man hierbei die durchschnittlichen Intensitäten der Teiltöne einer läutenden Glocke über einen gewählten Zeitraum (mehrere Glockenschläge, mindestens jedoch 2) heranzieht. Zur Interpretation sollen Abb. 15a und 15b als Beispiele dienen. Aber auch **Amplitudendiagramme** sind zur qualitativen Abschätzung der Tönigkeit geeignet. Hierbei vergleicht man Amplitudendiagramme von bestimmten Teiltongruppen, nämlich den Nachhall, den Tonlagenbereich und den Nebenschlagton- & Geräuschbereich (Abb. 16). Das Verhältnis der Intensitäten dieser 3 Teiltongruppen untereinander gibt dann an, ob der untersuchte Glockenklang grund- oder obertönig ist. Hier bestünde eventuell auch die Möglichkeit, die Tönigkeit auch quantitativ abzuschätzen, indem man die Intensitätsverhältnisse als Zahlentriplett angibt; man müßte hierbei „gemittelte“ Intensitäten heranziehen, deren Bestimmung allerdings nicht einfach ist. Eine qualitative Auswertung über Klangspektren erscheint aber als ausreichend, zumal sie auch einfacher zu bewerkstelligen ist.

Sonogramme kann man ebenfalls zu Tönigkeitsmessungen heranziehen; sie eignen sich aber in erster Linie nur für Vergleichszwecke (Abb. 82 und 83 in Kapitel 6.4.1).

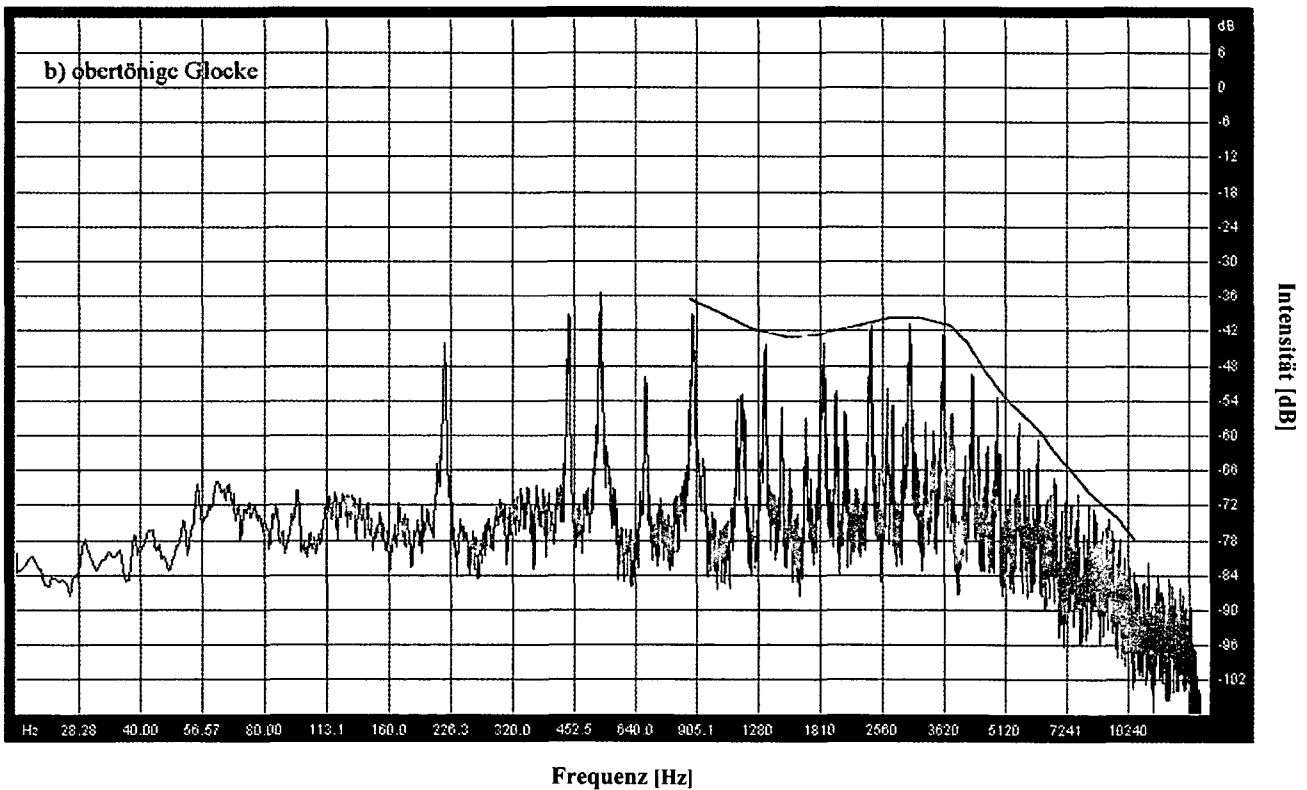
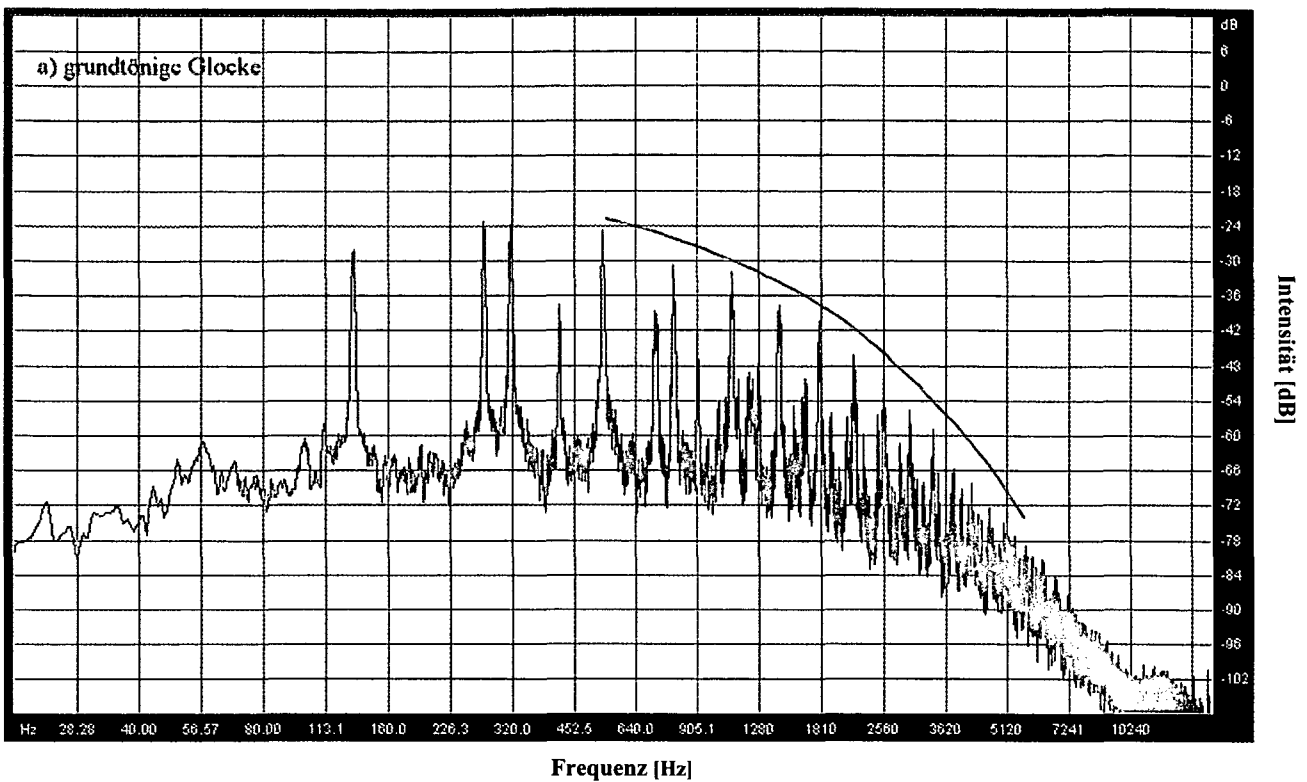


Abb. 15a und b: Klangspektrum einer a) grundtönigen und einer b) ausgesprochen obertönigen Glocke im läutenden Zustand (gemittelte Intensität über je 4 Anschläge). Bei grundtönigem Klang nimmt die Intensität der Teiltöne des Schlagtonkomplexes mit zunehmender Tonhöhe (d.h. von links nach rechts) kontinuierlich ab; je stärker die Abnahme, desto grundtöniger ist das Klangspektrum. Obertöniger Klang hingegen äußert sich dadurch, daß die höheren Teiltöne des Schlagtonkomplexes (vor allem ab der Doppeloktave) teilweise deutlich höhere Intensitäten aufweisen als die tieferen. Da der Nachhall im Gesamtglockenklang eine deutlich geringere Intensität aufweist als der Schlagton, wird die Tönigkeit in erster Linie von den Teiltönen im Schlagtonkomplex geprägt, und weniger von den Summtönen; aus diesem Grund konzentrieren sich Tönigkeitsuntersuchungen hauptsächlich im Bereich der höheren Teiltöne ab der Oberoktave.

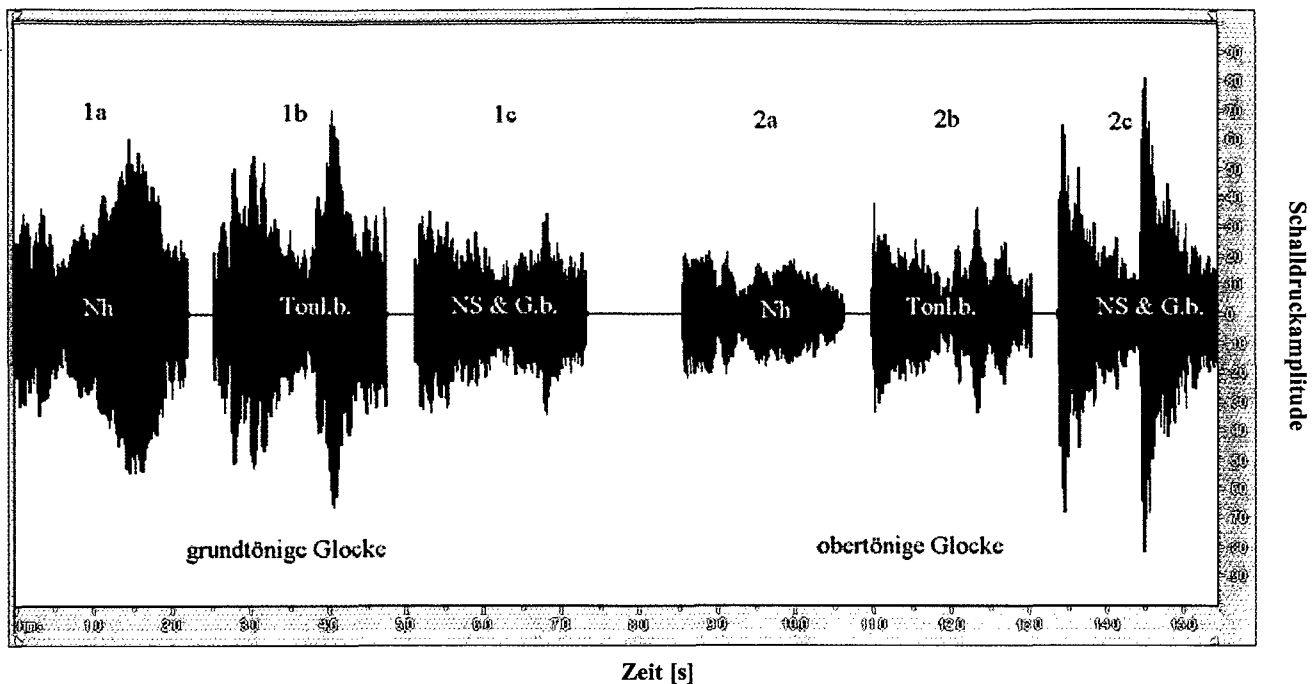


Abb. 16: Amplitudendiagramme einer grundtönigen (1) und einer obertönigen (2) Glocke (dieselben wie in Abb. 15), wobei hier der Gesamtklang in je 3 Teiltongruppen (a: Nachhall, b: Tonlagenbereich, c: Nebenschlagton- & Geräuschbereich) aufgegliedert wurde: 1a, 1b und 1c zeigen die Teiltongruppen der grundtönigen Glocke, 2a, 2b und 2c die der obertönigen Glocke. Man erkennt, daß bei obertönigem Klang sich die Intensitätsverhältnisse zugunsten der Teiltongruppen mit den höheren Frequenzen verschieben, die hier deutlich stärker ausgebildet sind als bei der grundtönigen Glocke. Untersucht wurden von jeder Glocke je 2 Anschläge im läutenden Zustand.

2.6.4 „Tonspanne“

Eine gewisse Ähnlichkeit mit der Tönigkeit hat die „T o n s p a n n e“. Sie sagt aus, wie weit sich das Klangbild einer Glocke (= Bereich vom Unterton bis zum höchsten noch meßbaren Teilton) erstreckt. Je mehr dieses in den Bereich hoher Frequenzen hineinragt (je größer die Tonspanne also ist), desto klarer und heller wird der Glockenklang; ein Fehlen hoher Frequenzen, d.h. eine geringe Tonspanne, hingegen läßt den Glockenklang dumpf erscheinen. Die Tonspanne ist daher eine Art Maß für die „Klarheit“ des Glockenklanges. Wie die Tönigkeit, wird auch die Tonspanne sowohl vom Material (Materialdämpfung) als auch von der Glockenform beeinflusst, wenn auch die Zusammenhänge noch nicht völlig geklärt sind. Tönigkeit und Tonspanne hängen eng zusammen; in der Regel ist eine hohe Tonspanne oft mit Obertönigkeit verbunden, Grundtönigkeit zeigt hingegen eine Tendenz zu geringeren Tonspannen. Die Tönigkeit ist wie die Tonspanne durch die Armaturen und vor allem durch die Turmakustik beeinflussbar; da hohe Frequenzen stärker streuen bzw. absorbiert werden als tiefe, ist die Tonspanne darüber hinaus noch stark vom Standort abhängig. Aus diesem Grund klingen Glocken aus großer Entfernung weich bzw. dumpf, ebenso aus Türmen mit verschlossenen Fenstern.

Zur Messung der Tonspanne eignen sich am besten **Sonagramme**. Normalerweise reichen die Frequenzen einer Glocke bis etwa 10 000 Hz hinein. Liegen sie unter 5000 Hz, so ist die Tonspanne gering, wenn sie über 10 000 Hz beträgt, ist sie hoch; vergleiche Abb. 17. Die Tonspanne hängt stark von der Turmakustik und der Entfernung von der Schallquelle ab, was man bei den Messungen immer berücksichtigen soll.

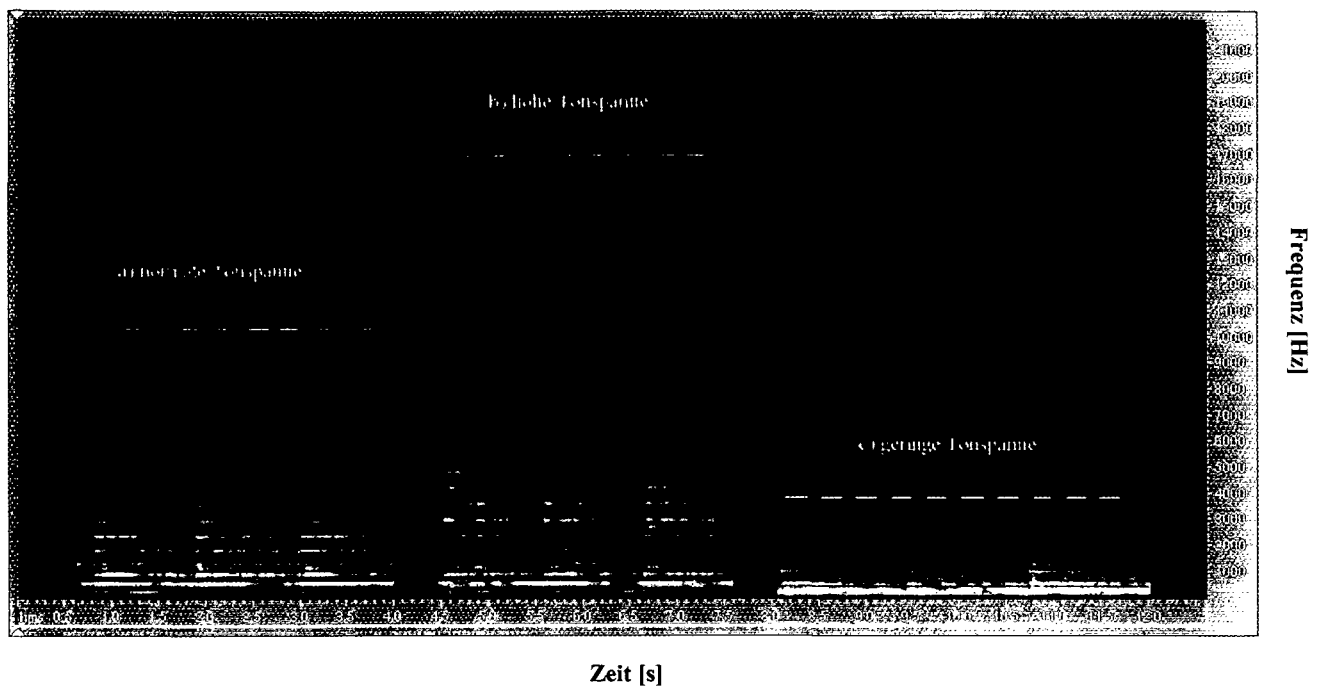


Abb. 17: Sonagramm einer läutenden Glocke a) mit normaler, b) mit auffallend hoher und c) mit ziemlich geringer Tonspanne. Turmakustik und der Standort sind bei allen 3 Glocken von vergleichbarer Größenordnung, die unterschiedlichen Tonspannen daher in erster Linie auf die Glocken selbst zurückführbar.

2.6.5 „Geräuschanteil“

Der **Geräuschanteil** ist diejenige Klangkomponente, welche die „Rauhigkeit“ des Glockenklanges bestimmt. Er äußert sich durch eine besonders hohe und intensitätsmäßig stark ausgeprägte Teiltondichte im oberen Teil des Klangbildes (über der Doppeloktave), was als geräuschartig empfunden wird: Die Glocke scheppert bzw. klingt blechern. Je stärker und ausgeprägter diese Teiltondichte auftritt, desto größer ist der Geräuschanteil einer Glocke. Er hängt in erster Linie von der Glockenform ab; das Material übt offensichtlich nur dann einen Einfluß aus, wenn dieses Fehler wie Lunker, Risse etc. aufweist. Aus diesem Grund ist der Geräuschanteil nach dem Guß so gut wie nicht mehr veränderbar; allerdings ist er aber über die Tonspanne bzw. Tönigkeit beeinflussbar: Je schwächer der hochfrequente Bereich der Glocke wird, desto weniger trägt dieser und damit auch der Geräuschanteil zum Glockenklang bei. Die Teiltondichte selbst ist nicht veränderbar.

Da der Geräuschanteil sich durch höhere Teiltondichte äußert, kann dieser sowohl anhand von **Klangspektren** als auch von **Sonagrammen** qualitativ abgeschätzt werden; zur Veranschaulichung sollen folgende Beispiele in den Abb. 18 und 19 dienen.

Nicht zu verwechseln mit dem Geräuschanteil sind Nebenschlagtongeräusche, die aufgrund eines unreinen Quart-Nebenschlagtones entstehen und daher mit dem Geräuschanteil nichts zu tun haben.

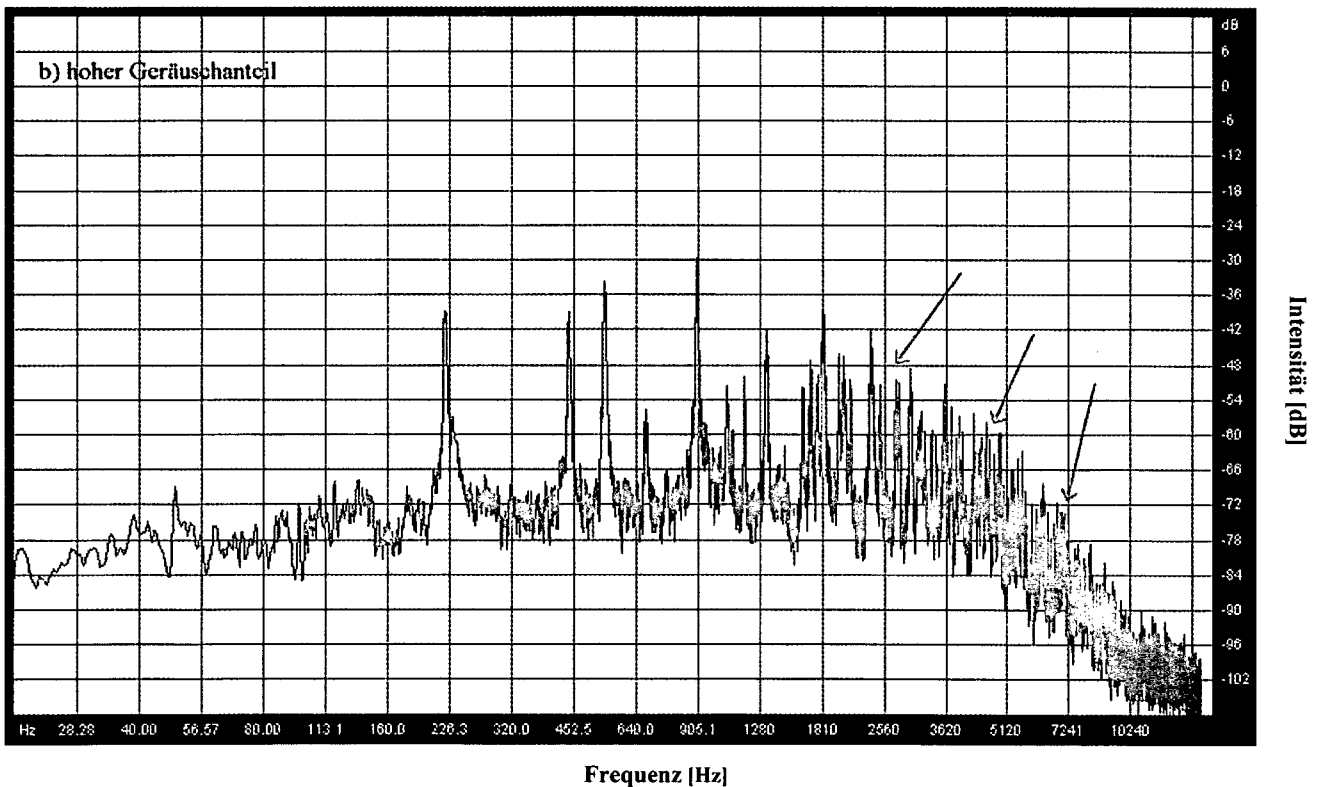
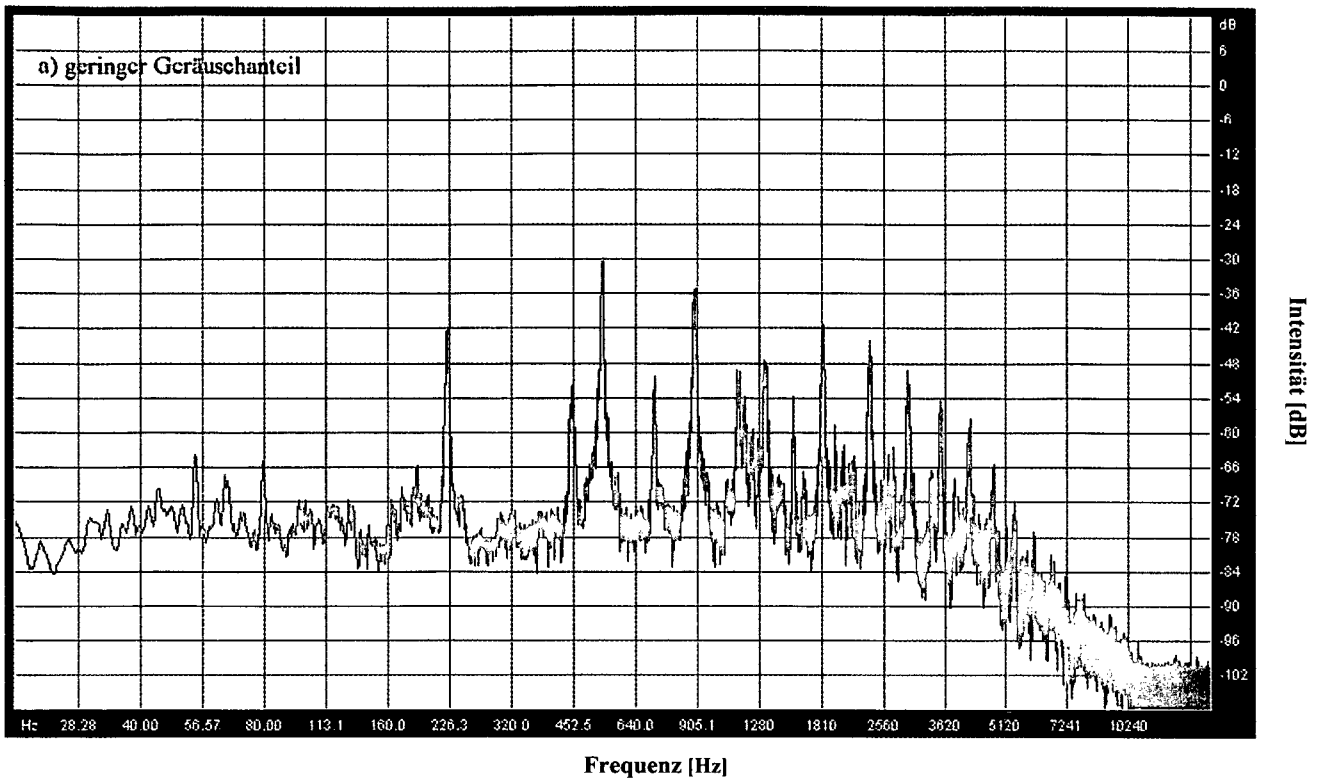


Abb. 18: Klangspektrum einer läutenden Glocke mit a) geringem und b) hohem Geräuschanteil (gemittelte Intensität über je 4 Anschläge). Bei a) sind die Lauttöne im Schlagtonkomplex deutlich zu erkennen, die übrigen Teiltöne zwischen ihnen sind relativ schwach ausgebildet. Bei b) erkennt man deutlich die zahlreichen, in hoher Dichte auftretenden Teiltöne ab der Doppeloktave, die so ausgeprägt ist, daß man die Lauttöne kaum noch von diesen unterscheiden kann; diese Glocke hat einen stark rauhen, schepprigen Klang im Gegensatz zur a), die hell und „glatt“ klingt.

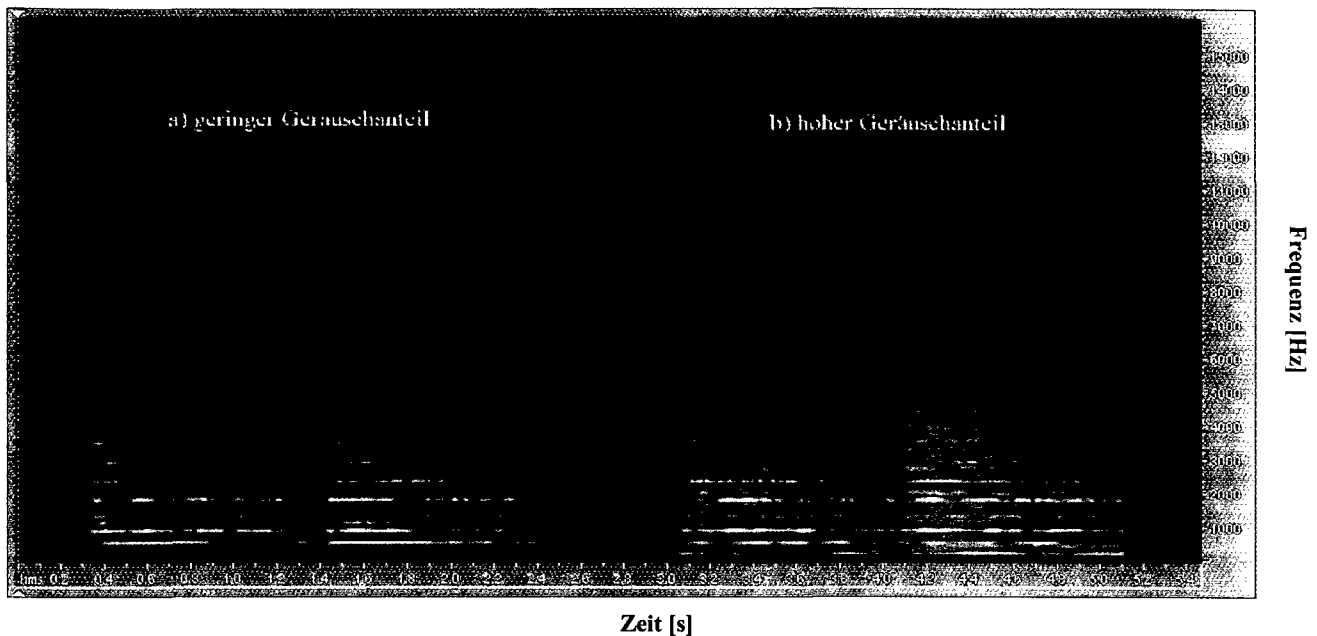


Abb. 19: Sonagramm von denselben Glocken (läutender Zustand) wie in Abb. 18. Man beachte die Unterschiede im Teiltonaufbau ab der Doppeloktave; während bei a) die Lauttöne als parallele Linien deutlich in Erscheinung treten, erscheint der Klangaufbau bei b) aufgrund der hohen Teiltondichte ziemlich diffus und „vernebelt“.

2.6.6 „Anschlag“

Der sogenannte „A n s c h l a g“ beschreibt den Verlauf der Klängauslösung durch den Klöppelanschlag. Dieser Prozeß ist sehr kurz und liegt im Bereich von 100stel bis 10tel Sekunden. Die Vorgänge, die während dieses Zeitabschnittes stattfinden, entscheiden darüber, wie hart bzw. stark der Klöppelanschlag wirkt. Der Anschlag ist daher für die Härte des Glockenklanges verantwortlich. Der Klöppelanschlag wird umso ausgeprägter, je größer die Kraft ist, mit welcher der Klöppel auf die Glocke schlägt; der Anschlag wird daher von der Beschaffenheit der Armaturen (Klöppel) und von der Art des Läutens beeinflusst. Inwieweit er von der Glocke selbst abhängt, ist nicht ganz klar, einen Einfluß dürfte aber die Konstruktion des Schlagringbereiches darstellen.

Der Anschlag ist meßtechnisch nicht so einfach zu erfassen wie z.B. der Geräuschanteil; die Stärke des Anschlages kann nur ungefähr anhand von **Amplitudendiagrammen** (und zwar vom Schlagtonkomplex, da in erster Linie die hohen Teiltöne für den Anschlag verantwortlich sind) bzw. **Sonagrammen** abgeschätzt werden, wozu die folgenden Beispiele in Abb. 20 und 21 einige Hinweise geben sollen. Bei Anschlagmessungen sollten sowohl Klangspektren als auch Sonagramme zwecks gegenseitiger Ergänzung herangezogen werden, wodurch die Interpretation der Meßergebnisse erleichtert und auch mehr präzisiert wird.

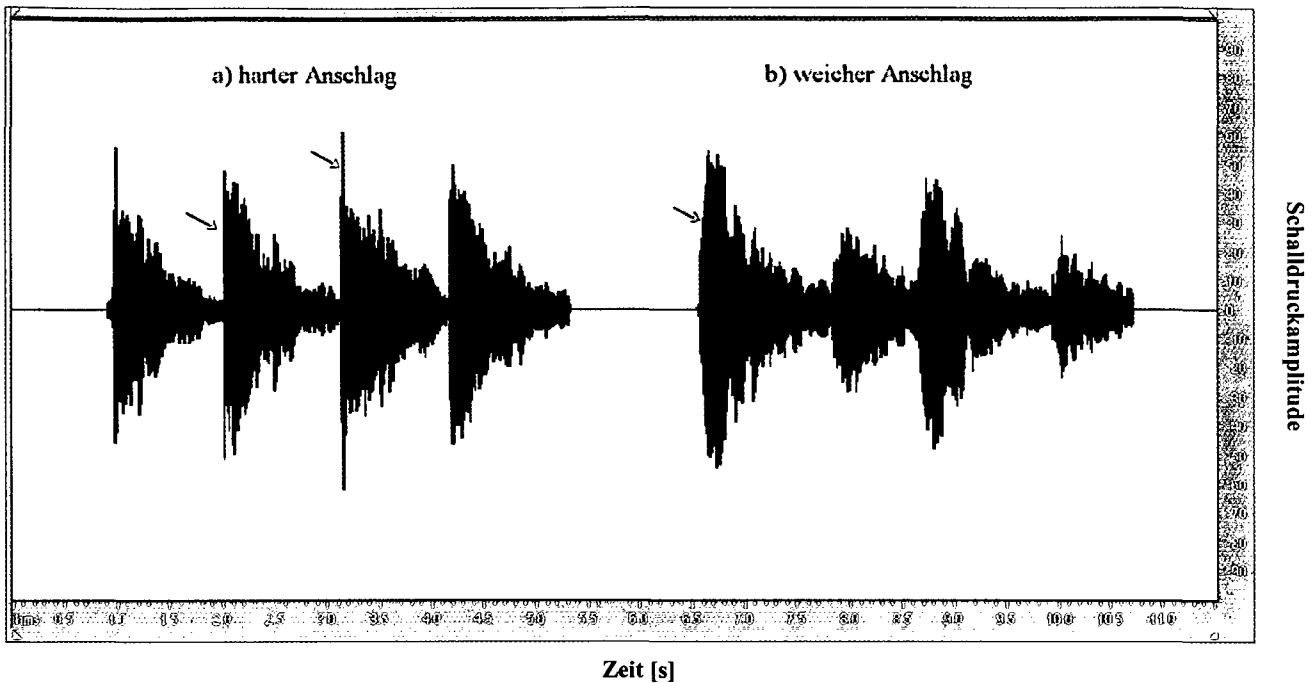


Abb. 20: Amplitudendiagramm einer läutender Glocke mit a) hartem bzw. b) weichem Anschlag. Dargestellt sind Schlagtonkomplexe, da hauptsächlich die hohen, schlagtonbildenden Teiltöne zum Eindruck „Anschlag“ beitragen; auf diese Weise treten die Effekte des Anschlags deutlicher in Erscheinung als in Amplitudendiagrammen vom Gesamtglockenklang. Harter, knalliger Anschlag macht sich in Amplitudendiagrammen durch folgende Anzeichen bemerkbar: 1) durch einen praktisch senkrechten Intensitätsanstieg unmittelbar zum Zeitpunkt des Klöppelanschlages („Intensitätssprung“), sowie 2) durch sog. „Intensitätsspitzen“, die umso ausgeprägter sind, je härter und stärker der Anschlag ist. Bei weichem Anschlag nimmt die Intensität zum Zeitpunkt des Klöppelanschlages nicht sprunghaft, sondern innerhalb eines – allerdings sehr kurzen – Zeitraumes (einige 100stel Sekunden) kontinuierlich zu und erreicht erst dann ihr Maximum.

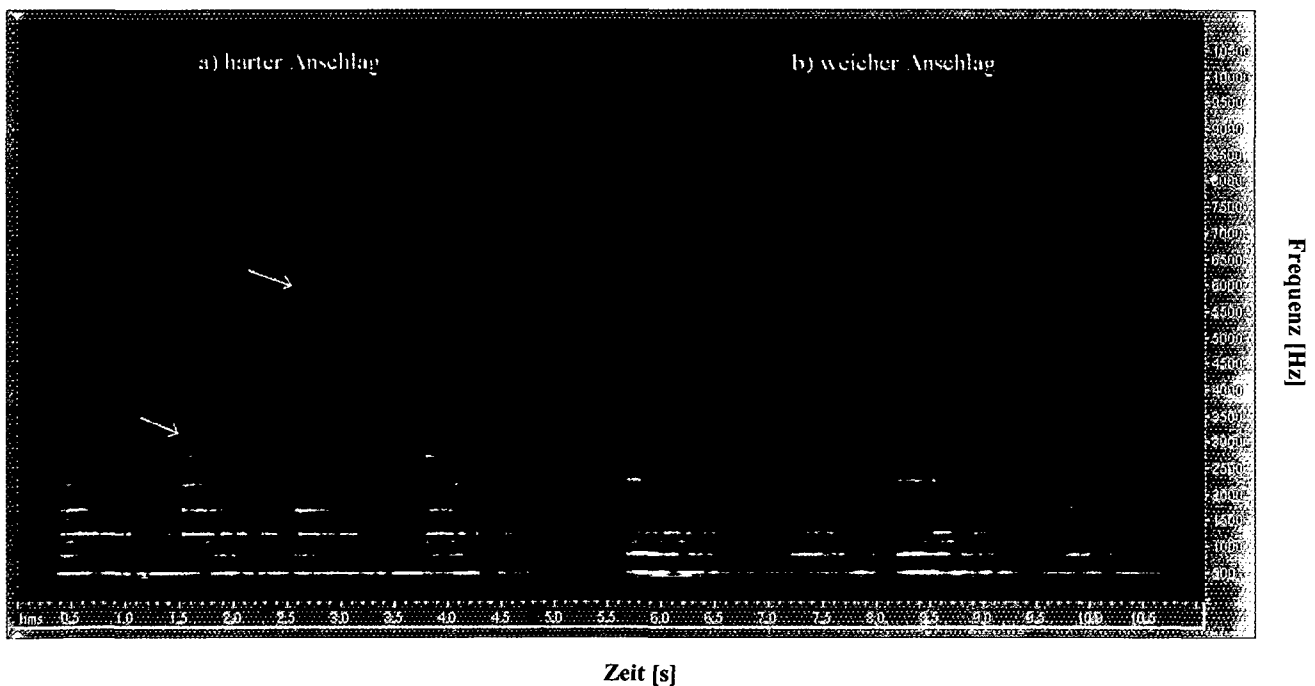


Abb. 21: Sonagramm derselben Glocken (läutender Zustand) wie in Abb. 20. Harter Anschlag macht sich in Sonogrammen durch sog. „Geräuschbänder“ bemerkbar; es handelt sich hierbei um durchgehende, senkrechte „Linien“ (im Gegensatz zu den „waagrechten“ Linien, welche Glockenteiltöne verkörpern!) zum Zeitpunkt des Klöppelanschlages, die umso ausgeprägter sind, je stärker und härter der Anschlag ist; dabei nimmt nicht nur die Intensität des „Geräuschbandes“ zu, sondern es erstreckt sich immer weiter in den Bereich hoher Frequenzen hinein.

2.6.7 Beschreibung der Tongebung

Die Komponenten, welche die Tongebung bilden, sind zwar mit speziellen Klanganalysen am Computer meßbar, womit diese auch mit Zahlenwerten bzw. Klangspektren etc. unterlegt und damit objektiv beurteilt werden können. Für eine übersichtliche Bewertung der Tongebung ist es aber sinnvoller, den Klang der Glocke einer „W e r t s t u f u n g“ zuzuteilen, die eine bestimmte Klangfarbe beschreibt. Diese Wertstufungen können gehörmäßig leicht erfaßt werden. Dieses Konzept der Wertstufungen wurde erstmals von *Weißbäck-Pfundner*¹⁾ angewandt, allerdings fehlte hier eine genaue Definition der jeweiligen Tongebung. Mit Hilfe des Konzeptes der Klangkomponenten ist es nun jedoch möglich, die gehörmäßig empfundenen Klangfarben mit meßtechnisch erfaßbaren Größen zu beschreiben, womit diese eindeutig definiert werden können.

Die wichtigsten und am meisten vorkommenden Wertstufungen sind demnach:

- **h e l l** : Dieses ist die „klassische“ Klangfarbe einer Glocke; ausreichende bis große Tonfülle, geringer Geräuschanteil, ausgeglichene Tönigkeit, sowie normale Tonspanne und ein nicht zu fester Anschlag. Sehr kleine Glocken werden besser mit „sehr hell“ bewertet.
- **w e i c h , v o l l** : Wie hell, nur mit dem Unterschied, das der Klang mehr grundtönig und auch die Tonspanne etwas geringer ist. Weichen Klang trifft man eher bei großen Glocken an als bei kleineren Stücken. Besitzt die Glocke noch zusätzlich einen leuchtenden, stark ausgeprägten Schlagton (das ist dann der Fall, wenn die Oberoktave eine besonders hohe Intensität besitzt), spricht man von einem „vollen“ Klang.
- **s c h a r f** : Diese Tongebung unterscheidet sich von „hell“ dadurch, daß hier der Klang besonders obertönig und auch die Tonspanne sehr groß ist und in sehr hohe Frequenzbereiche reicht. Ansonsten gilt dasselbe wie bei hell: Ausreichende bis große Tonfülle, geringer Geräuschanteil und ein nicht zu fester Anschlag.
- **g e d ä m p f t** : Kennzeichnend für diese Klangfarbe ist eine geringe Tonfülle und ein ausgeprägter Anschlag. Ansonsten gilt das unter „weich“ gesagte: Eher grundtöniger Klang und nicht so große Tonspanne. Der Geräuschanteil hält sich in Grenzen, der Anschlag kann hingegen schon etwas stärker auftreten.
- **m a t t , d u m p f** : Geringe Tonfülle, grundtöniger Klang und eine ziemlich geringe Tonspanne charakterisieren diese Tongebung. Der Anschlag ist eher schwach, ebenso ist der Geräuschanteil gering. Wenn die Tonfülle normal ist, der Rest aber wie bei „matt“ ist, spricht man von „hellmatten“ Klang. „Mäßig hell“ ist eine Zwischenabstufung zwischen hell, gedämpft und matt.
- **k u r z , h a r t** : Kurz unterscheidet sich von „hell“ dadurch, daß hier die Tonfülle gering ist. Die Tönigkeit ist normal bis obertönig; die Tonspanne ausgeglichen bis hoch, der Anschlag normal. Wenn bei kurzer Tongebung der Anschlag sehr stark ist, wird der Glockenklang „hart“.
- **s c h e p p r i g , b l e c h e r n** : Wenn ein auffallend großer Geräuschanteil den Glockenklang prägt, spricht man von „scheppriger“ bzw. „blecherner“ Tongebung. Ansonsten gilt das unter „hell“ bzw. „weich“ gesagte. Sollte die Tonfülle jedoch gering sein, klingt die Glocke „gedämpft und schepprig“ und tritt zusätzlich noch ein sehr starker Anschlag hinzu, „hart und schepprig“.

- **klirrend**: Diese Tongebung ist der Klangfarbe „scharf“ sehr ähnlich, allerdings ist hier der Geräuschanteil noch zusätzlich ziemlich hoch und erzeugt einen dementsprechenden Klangeindruck.
- **schrill, durchdringend**: Eine Klangfarbe, die nur bei kleinen Glocken auftritt. „Schrill“ ist eine Glocke dann, wenn der Schlagton penetrant laut und auch obertönig ist; die Tonfülle ist hierbei eher gering. „Durchdringend“ bzw. „schreiend“ wird eine Glocke hingegen, wenn die Tonfülle auffallend groß ist. Der Geräuschanteil ist sowohl bei „schrill“ als auch bei „durchdringend“ in der Regel gering, kann aber auch hoch sein.

Obwohl das Konzept der Wertstufungen überaus nützlich ist, so fand es außerhalb Österreichs in der Glockenkunde kaum Anwendung und scheint momentan überhaupt nicht mehr verwendet zu werden.

Bewertung des Glockenklanges – Die Klangqualität

2.7

2.7.1 Beurteilung des Glockenklanges

Glockentyp und Tongebung sind Eigenschaften, die den Glockenklang zwar beschreiben, aber noch nicht bewerten. Die Beurteilung einer Glocke geschieht mittels der **Klangqualität**, die darüber aussagt, ob eine Glocke schön, mittelmäßig oder gar häßlich klingt. Doch worauf kommt es beim Glockenklang an? - Diese Frage ist schwierig zu beantworten, denn über einen schönen Glockenklang gibt es verschiedene Ansichten, die vom jeweiligen Geschmack abhängen. So ist zum Beispiel in Tirol, aber auch im übrigen Österreich ein kräftiger, voller Glockenklang seit jeher beliebt, während in Deutschland derzeit jegliche Härten im Glockenklang verpönt sind. Und während in den Niederlanden und in England Reinstimmung (d.h. reinster Oktavtyp) besonders wichtig ist, so spielt der Glockentyp in Spanien und Portugal überhaupt keine Rolle. Aber auch zeitlich gab es verschiedene Ansichten: In der Gotik kam es eher darauf an, eine Glocke mit weichem, volltönendem Klang und großer Tonfülle herzustellen, während man im Barock Glocken mit kräftigem und markigem Ton schätzte. Und der Glockentyp, dem erst seit ca. 100 Jahren allgemein hohe Bedeutung zugemessen wird, war vorher, von wenigen Ausnahmen abgesehen, nicht wichtig. Man sieht – es gibt keinen allgemein gültigen idealen Glockenklang. Dennoch, um eine Glocke klanglich halbwegs objektiv zu beurteilen, ist eine Art Maßstab notwendig, der angibt, wann eine Glocke gut oder schlecht klingt. Die hier als Beispiel für einen solchen Maßstab wiedergegeben Kriterien entsprechen in etwa den hierzulande in Österreich herrschenden Vorstellungen über eine wohlklingende Glocke:

Beispiel: Bewertungsmaßstab für die Klanggüte einer Glocke

An erster Stelle steht eine angenehme **Tongebung**; weicher voller Ton bzw. hell und klar sind am besten. Der Glockenklang wird besonders bei einem leuchtenden, klar ausgeprägten Schlagton als schön empfunden. Nebenschlagtongeräusche verschlechtern die Klangqualität. Die Tonfülle sollte ein gewisses Maß nicht unterschreiten: Glocken mit zu geringer Tonfülle besitzen in der Regel keine sehr gute Klangqualität; hohe Tonfülle hingegen ist besonders vorteilhaft. Eine Glocke klingt angenehmer, wenn ihr Klangspektrum mehr grundtönig ist; große Obertönigkeit verbunden mit hoher Tonspanne (scharfer Klang) wird eher als unangenehm empfunden. Ein nicht zu großer Geräuschanteil im Glockenklang ist akzeptabel; wird er zu groß, und die Glocke klingt sehr blechern oder klirrend, sinkt die Klangqualität stark ab. Gedämpfter, scheppriger Klang zählt zu den

schlechtesten Tongebungen. Ein etwas stärkerer Anschlag ist durchaus nicht schlecht, sondern gibt dem Klang der Glocke mehr an Kraft. Bei zu schwachem Anschlag klingt die Glocke kraftlos, aber auch zu fester Anschlag ist kein Vorteil; der Glockenklang wird dann zu hart. Der Einfluß des Glockentyps, welcher geringer als der Tongebung ist, wurde schon im entsprechenden Kapitel besprochen. Demnach ist der Oktavtyp am besten (am optimalsten die reine Oktavglocke mit gleichliegender Prim), danach folgen die anderen Glockentypen, wobei gleichliegende Primen am vorteilhaftesten, vertiefte Primen weniger gut und stark erhöhte Primen am unangenehmsten wirken. Bei ausgezeichneter Tongebung kann auch bei schlechtem Glockentyp eine Glocke mit guter bis sehr guter Klangqualität bewertet werden. Bei sehr großen Glocken (tiefer g°) werden Durnebensschlagtöne aufgrund ihres mehr fröhlichen Charakters als angenehmer empfunden als solche mit Quart-Nebenschlagtöne. Glocken mit Sekundnebensschlagtöne besitzen immer eine schlechte Klangqualität, während Terzschlagtöne weit weniger nachteilig wirken.

Maßstäbe in der Art wie oben dargestellt sind in der herkömmlichen Glockenkunde unbekannt. Vielmehr werden, zumindestens im deutschen Sprachraum, für die Bewertung des Glockenklanges die schon oben erwähnten Limburger Richtlinien¹⁶⁾ aus dem Jahre 1951 herangezogen. Allerdings enthalten diese keinerlei Hinweise zur Tongebung der Glocke (nur Toleranzen für Abweichungen im Teiltonaufbau sowie Grenzwerte für die Nachhalldauer; alles andere ist nur lyrisch umrissen und ohne genaue Definition, wie etwa der Begriff „Klangentfaltung“, mit dem anscheinend Tonfülle gemeint sein dürfte); weil dadurch der Glockenklang äußerst unzureichend beschrieben wird, sind die Limburger Richtlinien zur Beurteilung der Klangqualität eigentlich nicht geeignet.

2.7.2 Angabe der Klangqualität

Als sehr brauchbares – weil übersichtliches – Konzept der Beschreibung der Klangqualität hat sich jenes von *Weißbäck-Pfundner*¹⁾ erwiesen; hierbei wird diese mit Zahlen wiedergegeben, ähnlich wie Schulnoten. Es bedeuten dabei:

I	sehr gut
II	gut
III	mittelmäßig, unterdurchschnittlich
IV	schlecht

Besonders wohlklingende Glocken kann man mit Ia bewerten. Es sind auch Zwischenabstufungen möglich, z.B. III-, II-III, II+ etc. Die Bewertung von Glocken hängt vom Gehör und Geschmack des jeweiligen Zuhörers ab und wird daher immer subjektiv ausfallen. Wenn man sich jedoch an bestimmte Maßstäbe hält, sollten die Abweichungen \pm maximal einen Notengrad nicht übersteigen.

Obwohl die zahlenmäßige Beurteilung des Glockenklanges sehr vorteilhaft ist, so hat sie in der Glockenkunde, abgesehen in den Arbeiten von *Pfundner & Weißbäck*¹⁾, keinerlei Anklang gefunden; überhaupt scheint es hier keinen geregelten Modus zur Angabe der Klangqualität zu geben. Auch die Limburger Richtlinien geben hierzu keinerlei Hinweise. Stattdessen wird diese oft mit lyrischen Worten wiedergegeben.

2.7.3 Angabe von Klangdaten bei Glocken

In der Regel werden in glockenkundlicher Literatur folgende musikalische und akustische Daten einer Glocke angeführt:

Tonlage (Hauptschlagton, eventuell auch Quartnebensschlagton, beide meist nach der Regel von Rayleigh bestimmt); **Tonanalyse**, beinhaltend: Unterton, Prim, Terz, Quinte, Oberoktave sowie – soweit meßbar – noch weitere Teiltöne über der Oberoktave (die Intensität wird gelegentlich durch musikalische Bewertungen wie $f = \text{forte}$ etc. zusätzlich angegeben); **Nachhallzeiten** (in der Regel die vom Unterton, in Deutschland meist zusätzlich die von Prim und Terz, was dann als Zahlentriplett ausgedrückt wird), eventuell mit Beschreibung des Abklingverlaufes des Nachhalles. Dazu ein Beispiel:

In der Glockenkunde übliche Angabe von Klangdaten

Schlagton:	$h^{\circ}+1,5$
Nebenschlagton:	$e'-0,5 f$
Unterton:	$H+0,5$
Prim:	$cis'-1,5$
Terz:	$dis'+1$
Quinte:	$f'+2$
Oberoktave:	$h'+1,5$
Dezime (= 1. Decime)	$d''+1$
Undecime (= 2. Decime)	$e''-3,5 p$
Duodecime	$fis''-1$
Tredecime (= 4. Decime)	$g''-1,5$
Quatuordecime (= 5. Decime)	$a''-1$
Doppeloktave	$h''+3,5$
2'-Sekunde	$c''' \pm 0$
2'-Terz	$d''' + 4$
2'-Quarte (= Quarte)	$e''' \pm 0$
2'-Quinte	$f''' - 1$
2'-Sexte (= Sexte)	$g''' + 4$
1'-Terz (= L1)	$d'''' - 1,5$
1'-Quarte (= L2)	$e'''' + 2$
Nachklang (Sek.)	125/34/28
Nachhallverlauf	schwebend, dann glatt

(Bemerkung: Die Tripeloktave wurde bei dieser mit Stimmgabeln durchgeführten Tonanalyse offensichtlich „übersehen“ und fehlt daher in dieser Auflistung)

Diese Angaben beschreiben den Klang einer Glocke jedoch ziemlich mangelhaft und vermitteln kaum eine Vorstellung, wie die jeweilige Glocke klingen könnte. Aus diesem Grund wird hier eine Darstellungsart vorgeschlagen, bei welcher die in den obigen Kapiteln dargestellten Konzepte und Methoden einbezogen werden und somit eine wesentlich bessere Beschreibung des Glockenklanges bietet; sie beinhaltet die Angabe der **Tonlage** (Hauptschlagton, und eventuell auch Nebenschlagton), einer **Tonanalyse** (Unterton, Prim, Terz, Quinte, Oberoktave, und bei großen Glocken tiefer als ca. c' noch Doppeloktave und Quarte), des **Glockentyps**, der **Nachhallzeit**, des **Klangvermögens**, der **Tongebung** und der **Klangqualität**:

Größe	Erläuterung	Beispiel
Tonlage	Tonhöhe des Hauptschlagtones (eventuell auch Nebenschlagton, dieser in Klammer) bestimmt nach den Regeln in Kapitel 2.3.2	$h^{\circ}+2 (e' \pm 0)$
U	Tonhöhe des Untertones	$H+0,5$
P	Tonhöhe der Prim	$cis' -1,5$
T	Tonhöhe der Terz	$dis' +1$
Q	Tonhöhe der Quinte	$f' +2$
O	Tonhöhe der Oberoktave	$h' +1,5$
DO	Tonhöhe der Doppeloktave	$h'' +3,5$
Qua	Tonhöhe der Quarte	$e'' \pm 0$
Gltyp	Angabe des Glockentyps (entweder „einfacher“ oder detaillierter Glockentyp)	Dur-Okt ⁺
Nh	Nachhallzeit des Untertones	125 s
KV	Klangvermögen in %	17 %
Tongebung	Angabe der jeweiligen Wertstufung	weich
Klq.	Numerische Angabe der Klangqualität	II

In der Regel ist aber für das Verständnis des Glockenklanges die „g e h ö r m ä ß i g e D a r - s t e l l u n g“, d. h. Angabe von Tonlage (eventuell auch Nebenschlagton, in Klammer), (detaillierter) Glockentyp, Tongebung (Wertstufung) und Klangqualität (numerische Bewertung), völlig ausreichend und auch genau genug:

Tonlage: $h^{\circ}+2 (e' \pm 0)$; Gltyp: Dur-Okt⁺; Tongebung: weich; Klq.: II

Die Beschreibung des Glockenklanges durch diese Größen ist zudem sehr übersichtlich, leicht zu verstehen und kann außerdem schnell und auch relativ einfach ermittelt werden (notwendig sind nur ein gutes Gehör und eventuell eine Vergleichstonquelle, z.B. ein kleines tragbares Keyboard). Eine Klanganalyse ist eigentlich nur in Sonderfällen (z.B. Untersuchung von Anomalien und anderen Merkwürdigkeiten im Glockenklang), bei wissenschaftlichen Arbeiten (spezielle Untersuchungen) oder beim Glockenguß notwendig, wo genaue Messungen wirklich wichtig sind.

3. Die Glockenrippe

Aufbau einer Glocke – die Glockenrippe

3.1

3.1.1 Definition

Als **Glockenform** oder **Glockenrippe** bezeichnet man die Gestalt einer Glocke, welche sowohl den Wandungsverlauf vom untersten Rand bis zum obersten Bereich, der Haube, als auch die Proportionen des Glockenkörpers zeigt und dadurch die Konstruktion (Form) der Glocke beschreibt. Von ihrer Beschaffenheit hängen der Teiltonaufbau (Glockentyp), aber auch die Tongebung einer Glocke ab.

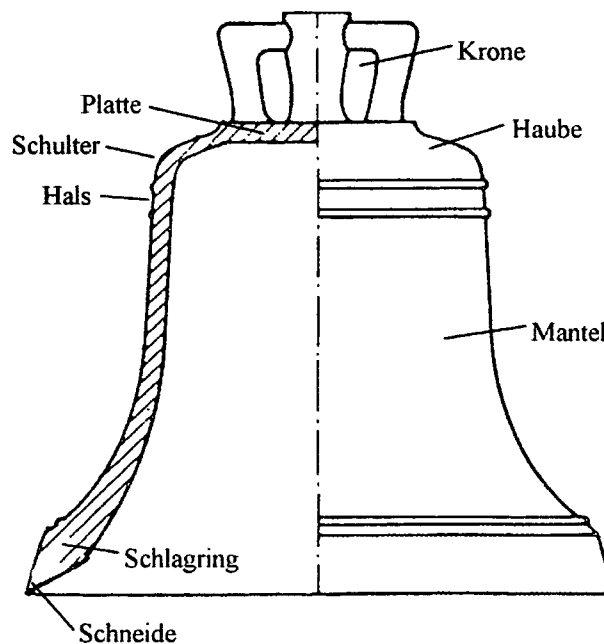


Abb. 22: Aufbau einer Glocke (Glockenrippe)

Die obenstehende Abbildung, welche eine halb durchgeschnittene Glocke zeigt, illustriert den typischen Aufbau einer Glocke. Der oberste, gewölbte Teil wird **Haube** genannt. Auf ihren höchsten Punkt befindet sich die **Krone**. Sie besteht aus mehreren Henkeln, die um eine Mittelöse oder Zapfen angeordnet sind. Moderne Glocken können aber statt einer Henkelkrone einen runden Flansch haben, der als Scheibenkrone bezeichnet wird. In der Regel sind Kronen nicht direkt auf der Haube aufgesetzt, sondern auf einem kleinen, meist flachen Podest, der sogenannten **Platte**. Der stark gekrümmte Bereich, wo die Glockenform steil abfällt, heißt **Schulter**. An ihr schließt sich der **Mantel** an, der den größten Teil der Glocke umfaßt. Er ist mehr oder weniger stark geschweift, wobei die Glocke nach unten hin zunehmend mehr ausladend wird. Der oberste, direkt an die Schulter anschließende Teil des Mantels wird **Hals** genannt. Der Mantel endet schließlich am **Schlagring**, wo auch die Schweifung der Glocke ihre Richtung ändert. An dieser Stelle besitzt die Glocke die größte Wandstärke, hier schlägt auch der Klöppel an. Nach oben hin nimmt die Wandstärke der Glocke kontinuierlich ab und erreicht an der Schulter ihre geringste Dicke. Der Schlagring läuft nach unten mittels der Schärfe oder **Schneide** am untersten Rand aus, wo die Glocke ihren größten Durchmesser besitzt.

Dieser besondere Wandaufbau mit der größten Dicke am Schlagring ist das charakteristische Merkmal der europäischen Kirchenglocke, der für die Schlagtonbildung und damit für den uns vertrauten Glockenklang verantwortlich ist. Glocken aus anderen Kulturen (z.B. asiatische Glocken), die keinen ausgeprägten Schlagring, sondern nur gleichmäßige Wanddicken aufweisen, besitzen keinen regelmäßigen Teiltonaufbau (= Klangkonstante) und damit auch keinen Schlagton.

3.1.2 Glockenabmessungen – „Relativmaße“

Die wichtigste Abmessung einer Glocke ist der **u n t e r e D u r c h m e s s e r** (Dm) am Rand (kurz schlichtweg nur Durchmesser genannt), der auch die Größe der Glocke angibt; weitere wichtige Abmessungen sind der **o b e r e D u r c h m e s s e r** (dm) am Hals direkt unter der Glockenschulter, weiters die **s c h r ä g e H ö h e** (sh) vom Rand bis zur Schulter und die **D i c k e** (Sr) am Schlagring. Unterer und oberer Durchmesser sowie die schräge Höhe beschreiben die Proportionen des Glockenkörpers (sie ergeben gleichsam einen den Glockenkörper umhüllenden Kegelstumpf) und können daher als „U m r i s s m a ß e“ bezeichnet werden. Die Abmessungen einer Glocke werden in der Glockenkunde in Zentimeter [cm] angegeben.

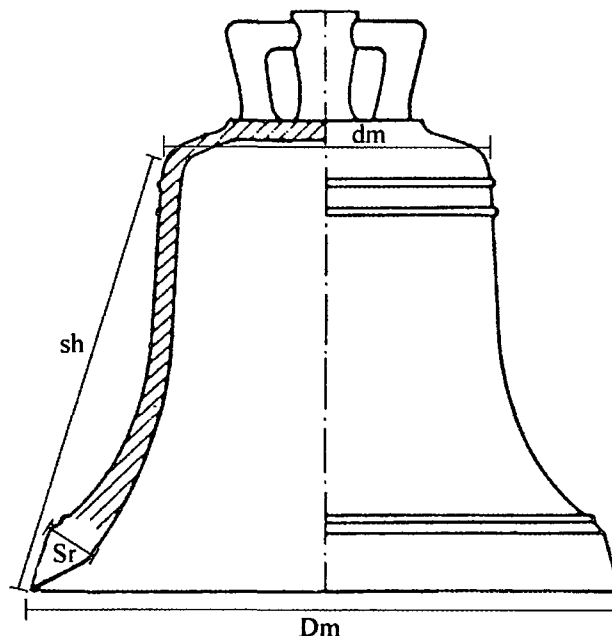


Abb. 23: Glockenabmessungen

Um die Glockenabmessungen wie schräge Höhe, oberer Durchmesser etc. von verschiedenen Glocken miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig, diese auf eine Bezugsgröße zu normen. Als Bezugsmaß eignet sich am besten der untere Durchmesser, der die wichtigste Abmessung der Glocke darstellt. Die sich daraus ergebenden „R e l a t i v m a ß e“ werden in Prozent des Durchmessers angegeben und mittels Glg. 5 berechnet:

$$\bar{x} = \frac{x}{Dm} * 100 \quad \text{Glg. 5}$$

mit \bar{x} Relativmaß [-]
 x Glockenabmessung (Dm, dm, sh, etc.) [cm]
 Dm unterer Durchmesser [cm]

Der untere Durchmesser ist per Definitionem mit 100 % festgelegt; aus diesem Grund kann auf seine Angabe, weil er als Relativmaß immer denselben Wert aufweist, verzichtet werden. Die übrigen Umrißmaße (oberer Durchmesser, schräge Höhe) und die Dicke am Schlagring befinden sich bei den meisten Glocken in folgenden Bereichen:

Oberer Durchmesser:	50 – 58 %
Schräge Höhe:	70 – 80 %
Dicke am Schlagring:	7,0 – 9,0 %

Die typischen Abmessungen einer modernen Glocke betragen etwa (dm – sh – Sr): 54 – 77 – 7,1 %.

3.1.3 Glockengewicht

Das Glockengewicht hängt einerseits von Größe und Gestalt der Glocke, und andererseits von der Dichte des jeweils verwendeten Werkstoffes ab. Es steigt mit zunehmender Größe (Dm) der Glocke, und bei gleichem Durchmesser nimmt es zu, je größer der obere Durchmesser (dm), die Höhe (sh) und die Wanddicke (= Rippenstärke, siehe Kapitel 3.2.2) werden. Einen weiteren, wenn auch nicht allzu großen Einfluß übt auch die „Schlagringneigung“ (Definition siehe Kapitel 3.3.1) auf das Gewicht aus (je größer die Schlagringneigung, desto geringer das Gewicht). Mit zunehmender Dichte des Glockenwerkstoffes steigt ebenfalls das Glockengewicht. Gewichtsangaben erfolgen in der Glockenkunde in Kilogramm [kg].

Das Gewicht einer Glocke wird vor allem in der Bevölkerung als Maß für die Größe einer Glocke angesehen, obwohl eigentlich der untere Durchmesser die Glockengröße angibt. In früheren Zeiten war man stets bestrebt, die Nachbargemeinden mit einer möglichst schweren Glocke zu übertrumpfen, und wenn man eine solche Glocke besaß, verwies man mit großem Stolz auf deren hohes Gewicht. Während heute gegossene Glocken alle gewogen werden, so war das in früheren Zeiten kaum der Fall, und nur von den wenigsten historischen Glocken ist auch das wahre Gewicht bekannt. So schätzte man das Gewicht solcher Glocken meist ab, meist mit falschen Ergebnissen (oftmals zu hoch). Selbst Glockengießer und auch Glockenexperten sind oft kaum in der Lage, das Gewicht einer Glocke halbwegs genau zu bestimmen. Aus diesem Grund sollen hier zwei, im Zuge dieser Arbeit entwickelte Methoden erläutert werden, mit denen man das Gewicht einer Glocke relativ exakt bestimmen kann. Sie beruhen auf Messungen von Glocken in der Glockensammlung Pfundner in Wien (ca. 100 historische Glocken vom 13. bis 20. Jh., allesamt genau gewogen und abgemessen).

Methode I:

Hierbei nimmt man die Glocke näherungsweise als Kegelstumpf an, dessen Abmessungen den Umfangmaßen (unterer Dm, oberer Dm, schräge Höhe) der Glocke entsprechen. In der Gleichung werden dann die Dichte des Materials, sowie konstruktive Merkmale der Glocke berücksichtigt.

Das Volumen eines Kegelstumpfes lautet allgemein:

$$V = \frac{h * \pi}{3} * (r_1^2 + r_1 * r_2 + r_2^2) \quad \text{Glg. 6}$$

Wenn man nun die Maße r_1 , r_2 und h durch die Umrißmaße Dm, dm und sh ausdrückt, dann erhält man

$$r_1 = \frac{Dm}{2} \quad \text{Glg. 7}$$

$$r_2 = \frac{dm}{2} \quad \text{Glg. 8}$$

$$h = \sqrt{\text{sh}^2 * \left(\frac{Dm - dm}{2}\right)^2} \quad \text{Glg. 9}$$

eingesetzt in Glg. 6 für den Kegelstumpf allgemein ergibt sich schließlich:

$$V = \frac{\pi}{12} * \sqrt{\text{sh}^2 * \left(\frac{Dm - dm}{2}\right)^2} * (Dm^2 + Dm * dm + dm^2) \quad \text{Glg. 10}$$

Will man nun die Masse dieses Kegelstumpfes berechnen, muß man dessen Volumen mit der Dichte ρ des jeweils betrachteten Stoffes multiplizieren:

$$m = \frac{\pi}{12} * \rho * \sqrt{\text{sh}^2 * \left(\frac{Dm - dm}{2}\right)^2} * (Dm^2 + Dm * dm + dm^2) \quad \text{Glg. 11}$$

Mit Glg. 11 erhält man noch keineswegs brauchbare Gewichtswerte für Glocken. Um dies zu erreichen, müssen folgende Umstände in die Gleichung noch Einklang finden, nämlich die Rippenstärke (entspricht der Wandstärke der Glocke; näheres dazu siehe Kapitel 3.2.2) sowie konstruktive Elemente der Glocke (in erster Linie die Schlagringneigung und die Schweifung). Ein der Rippenstärke proportionales Maß ist das Produkt von Tonlage (= halbe Frequenz der Oberoktave) der Glocke und deren Durchmesser $f * Dm$; dabei muß aber der Beitrag der „Inneren Tonhöhe“, den der Werkstoff auf die Tonlage ausübt, berücksichtigt werden (die „innere Tonhöhe“ ist eine akustische Eigenschaft eines Werkstoffes, welche die absolute Tonhöhe beeinflusst; Definition siehe Kapitel 4.1.1). Dies geschieht mittels eines Korrekturfaktors I , der mit der Frequenz der Tonlage multipliziert wird. Die konstruktiven Eigenheiten hingegen können durch eine Art „Formfaktor“ k ausgedrückt werden; dieser ist eine empirische Größe, der experimentell ermittelt werden muß. Wenn man nun diese Größen in Glg. 11 einsetzt, erhält man nun die „Glockengewichtsformel“:

$$m = \frac{\pi}{12} * \rho * f * I * k * \sqrt{\text{sh}^2 * \left(\frac{Dm - dm}{2}\right)^2} * (Dm^3 + Dm^2 * dm + Dm * dm^2) \quad \text{Glg. 12}$$

Hierbei ist:

- m Gewicht der Glocke [kg]
- ρ Dichte des Glockenwerkstoffes [g/cm^3]
- f Tonlage der Glocke (= halbe Frequenz der Oberoktave) [Hz]
- I Korrekturfaktor, der die „Innere Tonhöhe“ berücksichtigt

k von der Glockenkonstruktion abhängiger Formfaktor
 D_m . . . unterer Durchmesser der Glocke [cm]
 d_m . . . oberer Durchmesser der Glocke [cm]
 sh . . . schräge Höhe der Glocke [cm]

Die durchschnittlichen Dichtewerte betragen für die jeweiligen Werkstoffe: Bronze: $\rho = \sim 8,5 \text{ g/cm}^3$; Sonderbronze und -messing: $\rho = \sim 8,1 \text{ g/cm}^3$; Stahl: $\rho = \sim 7,8 \text{ g/cm}^3$; Gußeisen: $\rho = \sim 7,3 \text{ g/cm}^3$.

Der Korrekturfaktor I , der die „Innere Tonhöhe“ des jeweiligen Materials berücksichtigt, beträgt für Bronze: $I = 1$; Sonderbronze und -messing: $I = 0,95$; Stahl: $I = 0,65$ und Gußeisen: $I = 0,75$.

Der Formfaktor k bewegt sich in den allermeisten Fällen in einem Bereich von etwa $6,0 \cdot 10^{-9} \pm 0,7 \cdot 10^{-9}$, abhängig von den konstruktiven Eigenheiten der Glockenrippe (Werte außerhalb dieses Bereiches sind sehr selten). Wenn man für die Gewichtsrechnung den experimentell ermittelten Mittelwert des Formfaktors, $6,0 \cdot 10^{-9}$, einsetzt, so liegt der Fehler (= Abweichung vom wahren Glockengewicht) innerhalb von maximal ca. $\pm 10 \%$. Der Fehler wird um so kleiner, je besser man es schafft, den Formfaktor der jeweiligen Glockenkonstruktion anzupassen.

Der Formfaktor hängt in erster Linie von der Schlagringkonstruktion (insbesondere von der Schlagringneigung) ab. Eine große Schlagringneigung verringert den Formfaktor, bei geringer Schlagringneigung steigt er hingegen. Ebenfalls, wenn auch deutlich geringer, wirkt sich auch die Schweifung auf den Formfaktor aus; denn mit abnehmender Stärke der Schweifung nimmt er zu, bei starker Schweifung hingegen ab. Allgemein gilt, daß der Formfaktor durch Maßnahmen, welche die Masse Richtung Glockeninneres verschieben (vor allem am Schlagring), erniedrigt wird. Das Abschätzen des Formfaktors ist teilweise nicht ganz eindeutig durchführbar und erfordert zudem ein gewisses Maß an Erfahrung; man kann die jeweiligen Konstruktionsmerkmale (Schlagringneigung, Schweifung) optisch, aber teilweise auch über den Teiltonaufbau bewerten (die Schlagringneigung prägt in erster Linie die Klangkonstante, die Schweifung hingegen den Glockentyp; Näheres siehe Kapitel 3.3.1). Einige Beispiele sind in Abb. 24-26 dargestellt, in welchen einige Aspekte zur Wahl des passenden Formfaktors erläutert werden. Abhängig von der Wahl des Formfaktors kann nun der Fehler auf unter $\pm 5\%$ sinken; verglichen mit dem, was in der Glockenkunde normalerweise praktiziert wird (Gewichtsermittlung mittels Tabellen), ist das ein ganz hervorragendes Ergebnis!

Beispiele zur Berechnung von Glockengewichten

a) Glocke aus 1687 (D_m 62,1 cm; d_m 34,3 cm; sh 50,1 cm; Gew. 178 kg; Tonl. = $f' + 2 / 701 \text{ Hz}$)



Abb. 24: Glocke mit höherem Formfaktor. Diese Glocke, gegossen 1687 von Johann Kippo, befindet sich in der Glockensammlung Pfundner in Wien.

Diese Glocke besitzt eine geringe Schlagringneigung und auch eine relativ geringe Schweifung; aus diesem Grund beträgt der Formfaktor bei dieser Glocke $k = 6,4 \cdot 10^{-9}$.

- b) Glocke aus 1923 (Dm 48,3 cm; dm 26,4 cm; sh 33,9 cm; Gew. 52,5 kg; Tonl. = $g''-1 / 769,5$ Hz)



Abb. 25: Glocke mit niedrigem Formfaktor. Diese Glocke, gegossen 1923 von der Fa. Szabo in Graz, befindet sich in der Glockensammlung Pfundner in Wien.

An dieser Glocke sind die Maßnahmen, welche die Masse Richtung Glockeninneres verschieben und dadurch gewichtsvermindernd wirken, besonders deutlich ausgeprägt: Große Schlagringneigung und starke Schweifung haben den Formfaktor auf $k = 5,45 \cdot 10^{-9}$ gesenkt.

- c) Glocke aus 1675 (Dm 33,5 cm; dm 19,2 cm; sh 25,8 cm; Gew. 27 kg; Tonl. = $cis''' + 4 / 1128$ Hz)

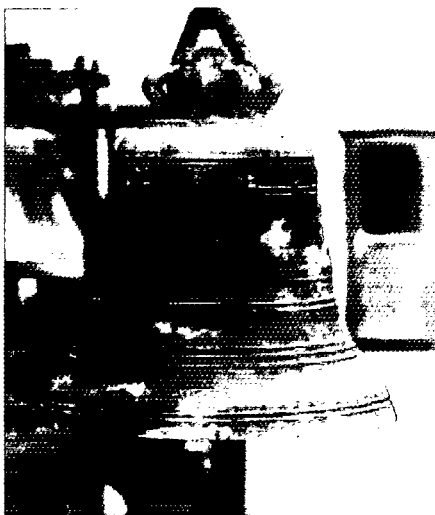


Abb. 26: Glocke mit extrem hohem Formfaktor. Diese Glocke, gegossen 1675 von C. Trabuchi, befindet sich in der Glockensammlung Pfundner in Wien.

Dieses Stück ist bezüglich des Formfaktors ein Extremfall: Es zeichnet sich durch einen sehr tiefliegenden Schlagring, äußerst geringe Schlagringneigung sowie durch eine besonders geringe Schweifung aus, Maßnahmen, welche die Masse nach außen verschieben und dadurch das Gewicht erhöhen. Aus diesem Grund weist diese Glocke den ungewöhnlich hohen Formfaktor von $k = 7,15 \cdot 10^{-9}$ auf.

Methode II:

Diese ist ein relativ einfaches und auch rasches Verfahren, das Glockengewicht zu bestimmen, denn im Gegensatz zur Methode a) werden hier die Umrißmaße nicht benötigt (nur Durchmesser). Es beruht auf der Anwendung des sog. Proportionalitätsgesetzes (siehe Kapitel 5.7.2), mit welchem man die Abmessungen bzw. Gewicht einer Glocke in jede beliebige Größe oder Tonlage umrechnen kann. Das Prinzip von Methode b) ist folgendes: Man sucht eine Vergleichsglocke mit bekannten Abmessungen + Gewicht, die konstruktionsmäßig mit der zu untersuchenden Glocke mehr oder weniger übereinstimmt (d.h. etwa gleiche Rippenstärke und Proportionen) und rechnet deren (bekanntes!) Gewicht auf die Größe der zu untersuchenden Glocke um. Die dazugehörige Gleichung lautet:

$$m = m_v * \left(\frac{Dm}{Dm_v} \right)^3 \quad \text{Glg. 13}$$

mit: mGewicht der zu untersuchenden Glocke [kg]
 m_vGewicht der Vergleichsglocke [kg]
 DmDurchmesser der zu untersuchenden Glocke [cm]
 Dm_vDurchmesser der Vergleichsglocke [cm]

Die Genauigkeit der Werte hängt von der Wahl der Vergleichsglocke ab, sie können daher mehr oder weniger stark vom genauen Wert abweichen. Das Verfahren ist aber immer noch besser als die gängige Methode in der Glockenkunde, bei der man das Gewicht aus Tabellen abliest (diese Methode darf man eigentlich nur auf die in der Tabelle beschriebenen Glockenrippe anwenden) und liefert schnell und einfach doch sehr brauchbare Ergebnisse.

Anstatt einer Vergleichsglocke kann man auch die sog. „Rippenschwere“ (Rippenschwere ist das Gewicht einer Glocke bei Dm = 100,0 cm, siehe Kapitel 3.2.3) für die Gewichts Berechnung heranziehen; die Gleichung lautet dann:

$$m = m_{RS} * \left(\frac{Dm}{100} \right)^3 \quad \text{Glg. 14}$$

mit: mGewicht der zu untersuchenden Glocke [kg]
 m_{RS}Rippenschwere [kg]
 DmDurchmesser der zu untersuchenden Glocke [cm]

Die Ergebnisse sind umso genauer, je mehr die gewählte Rippenschwere mit derjenigen der zu untersuchenden Glocke übereinstimmt. In Tab. 3 (Kapitel 3.4.7) sind Rippenschweren verschiedener Glockenrippen angeführt, die hier zur Orientierung für die Gewichts Berechnung herangezogen werden können.

3.2.1 „Bezugsglocke“

Es gibt derzeit in der Glockenkunde keine brauchbaren bzw. nur wenig aussagekräftige Konzepte, mit welchen man Eigenschaften von Glocken quantitativ, d.h. numerisch beurteilen kann. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit einige Verfahren entwickelt, mit deren Hilfe man relativ rasch sehr brauchbare und auch handliche Werte ermitteln kann, welche die jeweiligen Rippeneigenschaften charakterisieren. Für Vergleichszwecke hat es sich als sehr nützlich erwiesen, eine sog. „B e z u g s g l o c k e“ einzuführen. Diese ist eine Glocke mit willkürlich festgelegten Eigenschaften, welche als Fixpunkt bei der Berechnung von gewissen Eigenschaften von Glockenrippen dient. Als Bezugsglockenwerte wurde in dieser Arbeit festgelegt:

$$\begin{aligned}D_m &= 100,0 \text{ cm} \\ \text{Tonlage} &= g' \pm 0 = 387,5 \text{ Hz} \\ \text{Gewicht} &= 600 \text{ kg}\end{aligned}$$

Tonlage ist hier die halbe Frequenz der Oberoktave, und nicht die gehörmäßig bestimmte, da letztere ja Schwankungen unterliegt und daher nur bedingt brauchbar ist. Die Werte der Bezugsglocke entsprechen denjenigen einer gängigen, modernen Bronzeglocke in mittlerer Rippe (d.h. einer ganz „normalen“ Glocke) und wurden aus diesem Grunde so gewählt.

3.2.2 Die Rippenstärke – Der „RS-Wert“

Eine der wichtigsten Eigenschaften einer Glockenrippe ist die **R i p p e n s t ä r k e**. Damit ist die relative Wandstärke (genaugenommen eigentlich die mittlere Wandstärke) bezogen auf den unteren Durchmesser der Glocke gemeint¹⁾. Es gibt dick- und dünnwandige Glocken; erstere bezeichnet man als **s c h w e r r i p p i g**, letztere als **l e i c h t r i p p i g**. Da die Wandstärke – diese ist in der Glocke nicht gleichmäßig – nur sehr umständlich zu bestimmen ist (dazu müßte man die Glocke genau vermessen), verwendet man statt dessen andere, dazu annähernd proportionale Größen und bestimmt auf indirektem Wege die Rippenstärke.

In der Glockenkunde ist es üblich, zur Bestimmung der Rippenstärke das Glockengewicht in Relation zur Tonlage heranzuziehen. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, daß bei gleicher Tonlage Glocken mit größerer Wandstärke höhere Gewichte besitzen. Der Vergleich erfolgt durch Tabellen, in denen die zu den jeweiligen Tonlagen gehörigen Gewichte aufgeführt sind. Man unterscheidet nach diesem System **l e i c h t e**, **m i t t l e r e** und **s c h w e r e R i p p e n**, welche durch die Limburger Richtlinien¹⁶⁾ festgelegt sind (siehe dazu Tabelle 2). Dieses Meßverfahren birgt aber einen schweren Fehler: Das Glockengewicht hängt nämlich nicht nur von der Wandstärke, sondern auch vom oberen Durchmesser und besonders von der Höhe der Glocke, d.h. von ihren Umrißmaßen, ab (vergl. Kapitel 3.1.3). Weil aber der obere Durchmesser nur wenig und die Höhe praktisch keinen Einfluß auf die Tonhöhe der Glocke ausüben (vergl. dazu Kapitel 5.2.1), können aus diesem Grund selbst bei gleicher Wandstärke beträchtliche Unterschiede im Gewicht auftreten, wodurch diese Methode für den Vergleich von Rippenstärken nur sehr bedingt geeignet ist. Vollkommen unbrauchbar wird sie dann, wenn das genaue Glockengewicht nicht bekannt ist (das trifft z. B. auf fast alle historischen Glocken zu, gerade da, wo Rippenstärken wirklich interessant wären).

Tonl.	c°	cis°	d°	dis°	e°	f°	fis°	g°	gis°	a°	b°	h°
schwer	20 800	17 500	14 700	12 400	10 400	8750	7350	6200	5200	4350	3700	3100
mittel	16 800	14 100	11 900	10 000	8400	7050	5950	5000	4200	3550	2950	2500
leicht	13 600	11400	9600	8100	6800	5700	4800	4050	3400	2850	2400	2000

Tonl.	c'	cis'	d'	dis'	e'	f'	fis'	g'	gis'	a'	b'	h'
schwer	2600	2190	1840	1550	1300	1090	920	770	650	550	460	390
mittel	2100	1770	1490	1250	1050	880	740	620	530	440	370	310
leicht	1700	1430	1200	1010	850	720	600	510	430	360	300	250

Tonl.	c''	cis''	d''	dis''	e''	f''	fis''	g''	gis''	a''	b''	h''
schwer	325	275	230	195	165	135	115	95	80	70	60	50
mittel	260	220	185	155	130	110	95	80	65	55	45	40
leicht	215	180	150	125	105	90	75	65	55	45	35	30

Tabelle 2: Mindestgewichte in [kg] für Glocken in leichter, mittlerer und schwerer Rippe zur Bestimmung der Rippenstärke nach den Limburger Richtlinien.

Ebenfalls recht ungenau ist das in der Glockenkunde gelegentlich verwendete Verhältnis von Schlagringdicke und unterem Durchmesser $Sr : Dm$ als Maß für die Rippenstärke³⁾, aus dem Grund, weil aufgrund der unterschiedlichsten Schlagringkonstruktionen keine einheitliche und manchmal auch keine eindeutige Messung (vor allem bei Glocken mit rundlichem Schlagring) möglich ist. Dieses Verfahren leitet sich vom Glockenguß ab.

Aus diesem Grund lag es nahe, ein geeigneteres Maß für die Rippenstärke zu entwickeln, das sich einerseits aus leicht und eindeutig zu bestimmenden Meßgrößen ableiten soll, möglichst gut der „wahren“ Rippenstärke proportional, aber auch einfach zu handhaben ist (d.h. numerische Bewertung mit einer Kennzahl). Das im Zuge dieser Arbeit entwickelte Konzept der sog. „RS - Wert“ (abgeleitet von RippenStärke) erfüllt obige Anforderungen sehr gut. Es handelt sich dabei um dimensionslose Kennzahlen, welche den Grad der Rippenstärke charakterisieren. Als Maß für die Rippenstärke wird hier die Tonlage der Glocke in Relation zu deren Durchmesser herangezogen; denn bei gegebenen Durchmesser bewirkt eine Erhöhung der Wandstärke eine Erhöhung der Tonlage und umgekehrt (vergl. dazu Kapitel 5.2.1). Von 2 Glocken mit gleichem Durchmesser ist die mit der höheren Tonlage demnach die schwerrippigere, oder, anders ausgedrückt, von 2 Glocken in gleicher Tonlage ist die mit dem größeren Durchmesser die mit der höheren Wandstärke. Auf diesem Vergleich beruht das Prinzip des RS-Wertes.

Der RS-Wert gibt an, um wieviel Prozent sich die zu untersuchende Glocke im unteren Durchmesser von einer Bezugsglocke mit genormten Eigenschaften - bei gleicher Tonlage - unterscheidet. Bei der Berechnung des RS-Wertes geht man wie folgt vor: Man rechnet den Durchmesser der betrachtenden Glocke für die Tonlage der Bezugsglocke aus, bildet dann die Differenz zum Durchmesser der Bezugsglocke und bezieht schließlich diesen Wert auf den Bezugsglockendurchmesser. Grundlage für die Herleitung der „RS-Formel“ ist das Proportionalitätsgesetz (siehe Kapitel 5.7.2):

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{Dm_2}{Dm_1} \quad \text{Glg. 15}$$

mit f . . . Tonlage der Glocke = halbe Frequenz der Oberoktave [Hz]
 Dm . . . unterer Durchmesser der Glocke
 Index $_1$: Glocke 1
 Index $_2$: Glocke 2

Wenn man nun für Glocke 1 die Werte der zu untersuchenden Glocke einsetzt und für f_2 die Tonlage der Bezugsglocke einsetzt, erhält man den Durchmesser der zu untersuchenden Glocke für diese Tonlage:

$$Dm_2 = \frac{f_1 * Dm_1}{387,5} \quad \text{Glg. 16}$$

Die Differenz ΔDm zwischen diesem und dem der Bezugsglocke ist:

$$\Delta Dm = \frac{f_1 * Dm_1}{387,5} - 100 \quad \text{Glg. 17}$$

Diese Differenz beziehen wir nun auf den Durchmesser der Bezugsglocke und drücken dieses Ergebnis in % aus; da der Bezugsglockendurchmesser zahlenmäßig mit 100 festgelegt ist, erspart man sich hier das formelle Durchkürzen und kann die Differenz im Prinzip direkt mit dem RS-Wert gleichsetzen. Allerdings muß bei der Bestimmung der RS-Werte die „Innere Tonhöhe“ des jeweiligen Glockenmetalls mit einbezogen werden, da man sonst Glocken aus unterschiedlichen Werkstoffen (z.B. Bronze- und Stahlglocken) nicht miteinander vergleichen kann. Den Einfluß der Inneren Tonhöhe wird durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt, mit dem man die Frequenz der Tonlage multipliziert, weshalb man schließlich für die „RS-Formel“ erhält:

$$RS = \frac{Dm * f * I}{387,5} - 100 \quad \text{Glg. 18}$$

mit RS RS-Wert [-]
 Dm unterer Durchmesser der Glocke in cm
 I Korrekturfaktor für die „Innere Tonhöhe“
 f Tonlage der Glocke in Hertz

Die Korrekturfaktoren für die unterschiedlichen Materialien (sie entsprechen deren Schallgeschwindigkeitsverhältnissen) sind:

Bronze: I = 1
 Sonderbronze und Sondermessing: I = 0,95
 Stahl: I = 0,65
 Gußeisen: I = 0,75

Als Frequenz der Tonlage ist hier stets die halbe Frequenz der Oberoktave heranzuziehen.

Die Bezugsglocke hat per Definitionem eine Rippenstärke von $RS = 0$. Demnach besitzen Glocken mit geringerer Rippenstärke als die Bezugsglocke *n e g a t i v e* RS-Werte, diejenigen mit größerer Rippenstärke *p o s i t i v e*. Für eine bessere Unterscheidung kann man die RS-Werte in folgende Bereiche einteilen, die auch mit den Limburger Richtlinien konform sind:

RS-Werte unter -6: sehr leichte Rippe
 von -6 bis 0: leichte Rippe
 von 0 bis 6: mittlere Rippe
 von 6 bis 12: schwere Rippe
 über 12: sehr schwere Rippe

Die leichtesten Rippen können bis $RS = -25$ sinken; Werte über $RS = 20$ (extrem schwere Rippen) oder gar 30 sind äußerst selten. Die meisten Glocken (Bronze, Sonderbronze bzw. -messing, Gußeisen) befinden sich im Bereich von $RS = -5$ bis 10, Stahlglocken hingegen weisen normalerweise RS -Werte von etwa $RS = -15$ bis -25 auf, sind also ziemlich dünnwandig.

Da Durchmesser und Tonhöhe der Oberoktave (oder näherungsweise Schlagton, wenn nichts anderes vorhanden) ohne großen Aufwand und auch sehr genau meßbar sind, ist der RS -Wert eine äußerst exakte und einfach zugängliche Größe. Mit Hilfe der RS -Werte lassen sich die verschiedensten Glockenrippen sehr bequem miteinander vergleichen, vor allem kann man mit ihnen sehr schnell überprüfen, ob Glocken in gleicher Rippe gegossen sein könnten; auf diese Problematik wird dann in Kapitel 5.2.4 näher eingegangen.

Die Bewertung der Rippenstärke durch RS -Werte kommt der „wahren“ Rippenstärke sehr nahe. Die größten Fehler entstehen hierbei hauptsächlich durch unterschiedliche Schlagringneigung (siehe Kapitel 3.3.1 und 5.2.1), welche in der RS -Formel nicht berücksichtigt ist. Dieser Fehler kann, in RS -Werten ausgedrückt, bis zu $RS = \pm 5$ betragen. Das ist aber immer noch ein viel geringerer Fehler als derjenige, der bei der üblichen Methode mittels Gewichtstabellen entstehen kann. Überdies ist die Schlagringneigung bei den meisten Glocken sehr ähnlich, so daß sich die Abweichung von der wahren Rippenstärke dementsprechend geringfügig in Grenzen hält.

Man kann RS -Werte auch in *G a n z t o n s e c h z e h n t e l* $Gt/16$ ausdrücken, womit die durch die Rippenstärke bedingte Abweichung der Tonlage von der Bezugsglocke wiedergegeben wird (von 2 Glocken mit gleichem Durchmesser hat die mit der größeren Rippenstärke / RS -Wert die höhere Tonlage). Das Vorzeichen gibt dann an, ob es sich um eine Tonerhöhung (= schwerere Rippe) bzw. Tonerniedrigung (= leichtere Rippe) hinsichtlich der Bezugsglocke handelt. $Gt/16$ sind mathematisch formuliert als:

$$Gt/16 = 138,39 * \ln \frac{f_1}{f_2} \quad \text{Glg. 19}$$

Wenn man nun f_1/f_2 durch Glg. 18 ausdrückt (wobei f_1 = Tonlage der Glocke bei $D_m = 100$ cm und $f_2 = 387.5$ Hz), erhält man den Zusammenhang zwischen RS -Werten und $Gt/16$:

$$Gt/16 = 138,39 * \ln (RS + 100) - 637,31 \quad \text{Glg. 20}$$

Glg. 20 eignet sich für Tonlagenvergleiche innerhalb eines Geläutes, da man hier sofort die rippenbedingten Tonabweichungen erkennen kann (vergl. dazu Kapitel 5.7.4).

3.2.3 Die „Rippenschwere“

Das Glockengewicht stellt in gewisser Weise dennoch eine Größe dar, welche eine Eigenschaft der Glockenrippe wiedergibt, die man am besten als *R i p p e n s c h w e r e* (m_{RS}) bezeichnet. Denn im Glockengewicht sind sowohl die Rippenstärke als auch die Proportionen des Glockenkörpers (Umrißmaße), aber auch die Schlagringneigung indirekt enthalten, da das Gewicht von diesen Größen abhängig ist. In der Glockenkunde sind Rippenschwere und Rippenstärke derselbe Begriff, weil man hier fälschlicherweise das Gewicht als Maß für die Rippenstärke heranzieht; es handelt sich hier aber um zwei verschiedene Eigenschaften, die man nicht miteinander verwechseln darf.

Für Vergleichszwecke ist es notwendig, das Glockengewicht und damit die Rippenschwere auf eine Bezugsgröße zu normieren, am besten auf einen gemeinsamen Durchmesser, indem man das Glockengewicht der jeweils zu untersuchenden Glocke auf diesen Durchmesser umrechnet. Die Wahl des Bezugsdurchmessers ist im Prinzip beliebig; es ist aber ein Vorteil, wenn man den der Bezugsglocke wählt (d.h. $D_m = 100.0$ cm), weil hierdurch aus der Rippenschwere noch ein Relativmaß ableitbar ist (die sog. „relative Rippenschwere“, siehe unten). Grundlage für die Berechnung der Rippenschwere ist wiederum das Proportionalitätsgesetz; es lautet für Gewichte, weil diese dem Kubus des Durchmessers proportional sind:

$$\frac{m_2}{m_1} = \left(\frac{D_{m_2}}{D_{m_1}} \right)^3 \quad \text{Glg. 21}$$

mit: D_m unterer Durchmesser
 m Gewicht der Glocke
 Index 1: Glocke 1
 Index 2: Glocke 2

Wenn man nun für Glocke 2 den Bezugsdurchmesser 100.0 cm einsetzt und dann nach m_2 auflöst, erhält man schließlich das Gewicht der zu untersuchenden Glocke 1 für diesen Durchmesser und damit die Rippenschwere:

$$m_{RS} = m * \left(\frac{100}{D_m} \right)^3 \quad \text{Glg. 22}$$

mit: m_{RS} Rippenschwere [kg]
 D_m unterer Durchmesser der zu untersuchenden Glocke [cm]
 m Gewicht der zu untersuchenden Glocke [kg]

Die Rippenschwere liegt für die gängigsten Bronze-Glockenrippen im Bereich von 550 - 650 kg; sie kann jedoch Werte bis über 1000 kg bzw. unter 400 kg annehmen, abhängig von der jeweiligen Rippenkonstruktion. Bei Stahlglocken erhält man meist Werte im Bereich von 380 - 450 kg.

In dieser Form ist die Rippenschwere nur sehr bedingt geeignet, um aus ihr Rückschlüsse über die Glockenform zu ziehen; zu diesem Zweck bedarf es einiger Modifizierungen. Zunächst muß man den Einfluß der Dichte der jeweiligen Werkstoffes berücksichtigen, um auch Glocken aus unterschiedlichen Metallen vergleichen zu können. Dies geschieht mit Hilfe eines Korrekturfaktors k , mit welchem man die Rippenschwere multipliziert. Um die Aussagekraft zu erhöhen, ist es zweckmäßig, die Rippenschwere auf die der Bezugsglocke zu beziehen (diese lautet per Definitionem $m_{RS} = 600$ kg) und als „relative Rippenschwere“ \bar{m}_{RS} anzugeben:

$$\bar{m}_{RS} = \frac{m_{RS} * k}{600} * 100 \quad \text{Glg. 23}$$

mit: \bar{m}_{RS} relative Rippenschwere [%]
 m_{RS} Rippenschwere der zu untersuchenden Glocke [kg]
 k die Dichte des Glockenmetalls berücksichtigender Korrekturfaktor [-]

Der Korrekturfaktor wird aus dem Verhältnis der Dichten berechnet und beträgt für:

Bronze: $k = 1$
Sonderbronze: $k = 1,05$
Stahl: $k = 1,09$
Gußeisen: $k = 1,16$

Die Angabe der relativen Rippenschwere erfolgt in %. Sie beträgt für die Bezugsglocke 100 % (per Definitionem); Glocken mit höherer Rippenschwere als die Bezugsglocke besitzen Werte $> 100 \%$, solche mit geringerer Rippenschwere liegen unter 100% . Die Abweichungen lassen nun direkt einen Schluß auf die Glockenkonstruktion zu: Eine höhere relative Rippenschwere deutet darauf hin, daß entweder die Rippenstärke oder die Umrißmaße bzw. beides der zu untersuchenden Glocke dementsprechend hoch sind; bei geringer relativer Rippenschwere ist es umgekehrt.

Durch einen weiteren Schritt ist es möglich, zwischen dem Einfluß der Rippenstärke und dem der Glockenproportionen (Umrißmaße) zu differenzieren. Das Gewicht einer Glocke und damit deren Rippenschwere nimmt näherungsweise um ca. 1% zu bzw. ab, wenn man deren Rippenstärke um 1 RS-Einheit erhöht bzw. erniedrigt (dies ergibt sich aus Glg. 12 & 18); für die Bezugsglocke heißt dies, daß ihre festgelegte Rippenschwere von $m_{RS} = 600$ kg sich um den Betrag $RS * 6$ kg ändert, falls man deren (festgelegte) Rippenstärke von $RS = 0$ dementsprechend vergrößert bzw. verkleinert. Wenn man nun die Rippenschwere der Bezugsglocke auf die jeweilige Rippenstärke der zu untersuchenden Glocke umändert und diesen Wert als Bezugspunkt in Glg. 23 annimmt, kann man auf diese Weise den Anteil der Rippenstärke mehr oder weniger eliminieren, sodaß im Großen und Ganzen nur die Einflüsse der Glockenproportionen auf die Rippenschwere übrigbleiben, welche man nun direkt an der so erhaltenen „proportionalen Rippenschwere“ \bar{m}'_{RS} ablesen kann:

$$\bar{m}'_{RS} = \frac{m_{RS} * k}{600 + RS * 6} * 100 \quad \text{Glg. 24}$$

mit: \bar{m}'_{RS} . . . proportionale Rippenschwere [%]
 m_{RS} . . . Rippenschwere der zu untersuchenden Glocke [kg]
 k . . . die Dichte des Glockenmetalls berücksichtigender Korrekturfaktor [-]
 RS . . . Rippenstärke (RS-Wert) der zu untersuchenden Glocke

Mit Hilfe der proportionalen Rippenschwere kann man nun gezielt auf die Proportionen (insbesondere auf die Umrißmaße) der jeweiligen Glockenform rückschließen. Hierbei zeigen Werte $> 100 \%$ an, daß die Proportionen der zu untersuchenden Glocke verstärkt zur Rippenschwere beitragen und daher dementsprechend hoch sind (überdurchschnittliche große schräge Höhe und / oder besonders großer oberer Durchmesser); bei Werten $< 100 \%$ ist das Gegenteil der Fall (geringe schräge Höhe und / oder besonders kleiner oberer Durchmesser). Demnach besitzen langgestreckte Glocken wie z.B. Zuckerhutglocken besonders hohe proportionale Rippenschweren (bis zu 150%), gedrungene, niedrige Stücke wie z.B. Glocken in Barockform dagegen eine relativ geringe proportionale Rippenschwere (bis 80%). In der Regel bewegt sich die proportionale Rippenschwere in einem Bereich von $90 - 110 \%$. Neben den Proportionen der Glockenform, die den Hauptanteil stellen, enthält die proportionale Rippenschwere auch den Einfluß, der von der Schlagringneigung ausgeht, der in der Regel gering ist, aber nicht unerheblich sein kann; demnach führt eine geringe Schlagringneigung zu einer Erhöhung der proportionale Rippenschwere, eine hohe Schlagringneigung hingegen bewirkt das Gegenteil.

Mit dem in der Glockenkunde gängigen Verfahren, die Rippenstärke einer Glocke anhand ihres Gewichtes zu bewerten, ist es nicht möglich, „echte“ Schwerrippigkeit bedingt durch höhere Wandstärken (d.h. RS-Werte) von „Pseudoschwerrippigkeit“, bei der infolge hoher proportionaler Rippenschweren das Gewicht zusätzlich erhöht wird, zu unterscheiden (aus diesem Grund ist diese Methode als Maß für die Rippenstärke eigentlich nicht geeignet, siehe Kapitel 3.2.2). So entpuppen sich solche Glocken, die in der regulären Glockenkunde als „schwerrippig“ bewertet werden, oft als „pseudoschwerrippig“; solche Stücke besitzen eine besonders hohe Rippenschwere bei vergleichsweise geringer Rippenstärke.

3.2.4 Die „Dimensionierung“

Eine weitere wichtige Eigenschaft, die aber nicht alleinig die Rippe, sondern die Glocke im Gesamten erfaßt (d.h. die Eigenschaften des Materials werden mit einbezogen), ist die sog. „Dimensionierung“. Darunter versteht man die Größe der Glocke (= unterer Durchmesser) bezüglich ihrer Tonlage. Wenn man z.B. zwei Glocken mit gleicher Tonlage hat, so ist von den beiden diejenige größer dimensioniert, welche den größeren Durchmesser aufweist. Die Dimensionierung hängt hauptsächlich von der Rippenstärke und von der „Inneren Tonhöhe“ des Materials, aus dem die Glocke gegossen ist, ab: Sie steigt mit zunehmender Rippenstärke und zunehmender „Inneren Tonhöhe“. Als Maß für die Dimensionierung kann man die sogenannten „D-Werte“ heranziehen (D wie Dimensionierung). Die D-Werte geben an, um wieviel Prozent die untersuchte Glocke größer oder kleiner als die Bezugsglocke in gleicher Tonlage ist.

Der D-Wert Berechnung liegt dasselbe Prinzip wie beim RS-Wert zugrunde, weshalb er mit derselben Formel berechnet werden kann; allerdings entfällt hier der Korrekturfaktor für die Innere Tonhöhe, weil diese ja zur Dimensionierung beiträgt:

$$D = \frac{D_m * f}{387,5} - 100 \quad \text{Glg. 25}$$

mit D D-Wert [-]
 D_m unterer Durchmesser der Glocke in cm
 f Tonlage der Glocke in Hertz (= halbe Frequenz d. Oberoktave)

In der Regel besitzen Glocken Dimensionierungen im Bereich von D = -5 bis 10; extrem hoch dimensionierte Stücke könne jedoch Werte bis über D = 50 erreichen (z.B. Stahlglocken, die in Rippen für Bronzeglocken gegossen wurden). Gußeisenglocken haben D-Werte um D = 30, sehr schwerrippige Bronzeglocken und die geläufigen Stahlglocken um D = 10 bis 20. Negative D-Werte besitzen nur leichtrippige Bronzeglocken.

3.2.5 Einteilung von Glockenrippen

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften, die eine Glockenrippe aufweist, kann man die unterschiedlichen Glockenformen in verschiedene Kategorien einteilen, und zwar:

- a) nach musikalischen Aspekten: Die Unterscheidung erfolgt nach dem Glockentyp, den die Glockenrippe besitzt. Man unterscheidet daher zwischen Sext-, Septim-, Oktav- und Nonrippen.
- b) nach dem äußeren Erscheinungsbild: hierbei werden die Glockenrippen anhand ihrer Konstruktion bzw. Aufbaues unterschieden und ordnet sie den für die verschiedenen

Stilepochen „charakteristischen Glockenformen“ zu. Zu diesen gehören u. a.: Die Bienenkorbform, die Zuckerhutform, die Übergangsformen, die gotische Rippe, die Sekundärrippen, die Barockform und die modernen Rippen. Was darunter gemeint ist, wird im Kapitel 3.4 beschrieben.

- c) nach der **R i p p e n s t ä r k e**. Diese Einteilung ist die geläufigste in der Glockenkunde, wonach es leichte, mittlere und schwere Rippen gibt; näheres dazu siehe Kapitel 3.2.2.

Einfluß der Glockenrippe auf das Klangverhalten

3.3

Es ist schon vorher erwähnt worden, daß die Form der Glocke großen Einfluß auf deren Klangverhalten ausübt. So hängt der Teiltonaufbau (Glockentyp) ausschließlich von der Gestalt der Glockenrippe ab. Die Tongebung wird ebenfalls sehr stark von der Gestalt der Glockenrippe beeinflusst. So besitzt jede Glockenform eine eigene, mehr oder weniger charakteristische Klangfärbung, die dem Glockenklang derart prägen kann, daß man (mit ein wenig Übung) schon anhand der Tongebung auf die Glockenform schließen bzw. sogar den Gießer erkennen kann.

3.3.1 Einfluß der Glockenform auf den Teiltonaufbau

Den Einfluß der Konstruktion der Glocke auf den Teiltonaufbau (Glockentyp) kann man seit einigen Jahren mittels FEM-Rechnungen (FEM = Finite-Elemente-Methode, das sind Simulationsrechnungen am Computer), die äußerst exakte Ergebnisse bei Form-Klang Rechnungen liefern, genau berechnen^{5) 12)}. Bei der FEM-Methode werden allgemein beliebig geformte Körper, die auch höchst komplex sein können, auf einfache, berechenbare Grundbausteine zurückgeführt und wieder zusammengesetzt. Bei bekannten Werkstoffeigenschaften lassen sich dann u.a. Eigenschwingungen (= Teiltonaufbau) berechnen. Auf diese Art und Weise kann man nun Zusammenhänge zwischen Glockenform und Teiltonaufbau feststellen. Allerdings wurden bis jetzt nur – soweit es überhaupt veröffentlicht ist – der Teiltonaufbau für verschiedene Glockenrippen exemplarisch berechnet, Zusammenhänge bzw. Gesetzmäßigkeiten sind hingegen noch größtenteils unerforscht. An dieser Stelle sollen – wenn auch nur qualitative – Zusammenhänge zwischen Glockenform und Teiltonaufbau genannt werden, als Ergebnis von Beobachtung an zahlreichen Glocken bzw. der Auswertung der in der Literatur veröffentlichten Form-Klang-Rechnungen:

G l o c k e n t y p (Unterton, Prim)

Die Lage von **Unterton** und **Prim** bezüglich zum Schlagton und damit auch der **Glockentyp** hängen in erster Linie von der **S c h w e i f u n g** der Glockenwandung (Mantel) und von der Proportion der Glockenform = **U m r i ß m a ß e** ab (Verhältnis von schräger Höhe bzw. des oberen Durchmesser zum unteren Durchmesser).

Der **Unterton** steigt, je stärker die Glocke nach innen geschweift ist und sinkt, je flacher die Glockenwandung wird (Abb. 27). Wenn die Schweifung gleich bleibt, steigt er, wenn das Verhältnis von schräger Höhe zu unterem Durchmesser zunimmt (die Glocke länglicher wird) und / oder das Verhältnis von oberem Durchmesser zu unterem Durchmesser sinkt (die Glocke oben schmaler, „kegelförmiger“ wird). Dagegen sinkt der Unterton, wenn das Verhältnis von schräger Höhe zu unterem Durchmesser verringert wird (die Glocke niedriger und gedrungener wird) und / oder das Verhältnis von oberem Durchmesser zu unterem Durchmesser zunimmt (die Glocke oben

weiter, „zylindrischer“ wird). Das Ändern der Proportion von Schräger Höhe : Durchmesser erreicht man, indem man z.B. die Rippe nach innen bzw. außen parallel verschiebt; die Proportionen von oberen zu unterem Durchmesser hingegen, wenn man die Rippe dementsprechend kippt (Abb. 28a und b).

Die **Prim** verhält sich genau u m g e k e h r t wie der Unterton (sinkt der Unterton, steigt die Prim). Unterton und Prim reagieren auf Formänderungen ziemlich empfindlich, am stärksten die Prim.

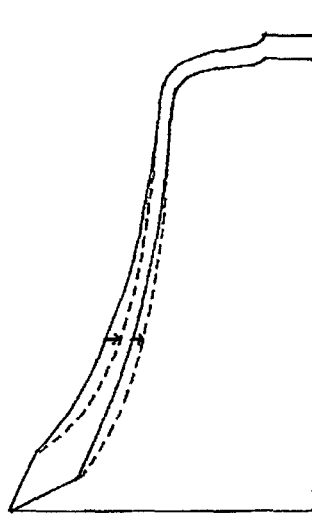


Abb. 27: Einfluß der Schweifung der Glockenrippe auf die Lage von Unterton und Prim. Eine Verstärkung der Schweifung führt zu einer Erhöhung des Untertones; die Prim wird durch diesen Vorgang hingegen erniedrigt.

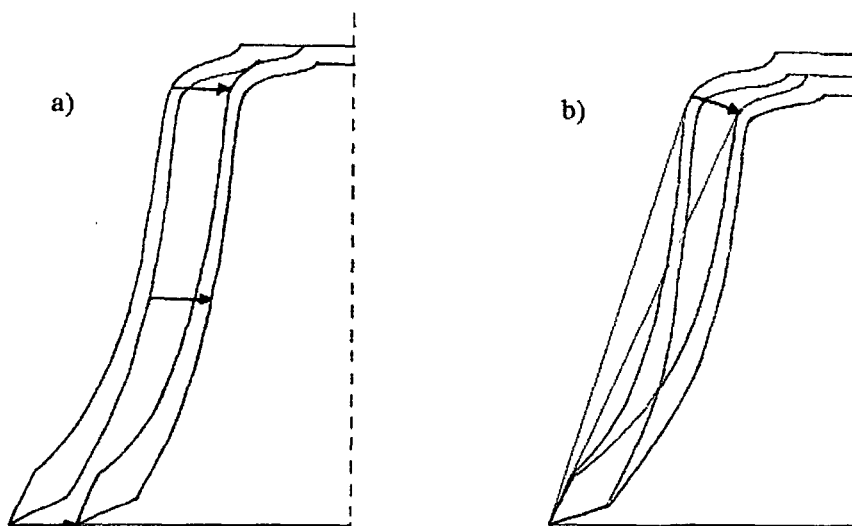


Abb. 28: Einfluß der Proportionen der Glockenrippe auf die Lage von Unterton und Prim.

- a) Parallelverschieben der Glockenrippe nach innen: Die dadurch erfolgte Vergrößerung des Verhältnisses von schräger Höhe zu unterem Durchmesser führt zu einer Erhöhung des Untertones und zu einer Erniedrigung der Prim.
- b) Kippen der Rippe nach innen: Die Die dadurch erfolgte Verkleinerung des Verhältnisses von oberen zu unterem Durchmesser führt ebenfalls zu einer Erhöhung des Untertones und zu einer Erniedrigung der Prim.

Anhand der Glockenform kann man schon in gewissen Maßen auf den Teiltonaufbau schließen: So gehören stark geschweifte Glocken wie etwa Glocken in Barockrippe dem Septim- bzw. Sexttyp an und haben vertiefte Primen. Mäßig geschweifte Glocken, wie Glocken in gotischer und moderner Rippe, sind mehrheitlich Oktavglocken. Glocken, die oben besonders weit sind, neigen zu erhöhten Primen. Langgestreckte, schmale Glocken wie z.B. Zuckerhutglocken besitzen immer vertiefte Primen. Gedrungene, oben sehr weite Glockenformen wie etwa Bienenkorbglocken besitzen in der Regel vertiefte Untertöne und erhöhte Primen.

Eine Veränderung der **W a n d s t ä r k e** wirkt sich um einiges komplexer auf den Teiltonaufbau aus und hängt stark davon ab, wo und in welcher Weise man die Veränderungen vornimmt. Sie soll deshalb nicht weiters besprochen werden. Verändern der Wandstärke ist das Prinzip des Stimmens von Glocken, wobei Metall von der Glockenwandung abgeschliffen wird (siehe dazu auch Kapitel 5.5.1).

K l a n g k o n s t a n t e (Quart-Nebenschlagton, Terz)

Die Klangkonstante weist in ihrem Verhalten eine interessante Eigenschaft auf, welche sich durch eine „**S t r e c k u n g**“ bzw. „**S t a u c h u n g**“ äußert: Bei ersterer ist die an sich fixe Intervallfolge in der Klangkonstante geringfügig auseinander gestreckt worden (d. h. alle Intervalle zwischen den Teiltönen der Klangkonstante wurden leicht vergrößert), bei letzterer etwas zusammengestaucht (d.h. alle Intervalle wurden leicht erniedrigt), wie eine Feder, die auseinandergezogen oder zusammengedrückt wird. Dieser Effekt ist bei den hohen Teiltönen stärker als bei den tieferen, d.h. die Intervalle zwischen den höheren Teiltönen ab der Doppeloktave werden von der Streckung/Stauchung mehr beeinflusst als die tieferen. Der Effekt von Streckung/Stauchung bewegt sich in einem Rahmen, der nur wenige Gt/16tel umfaßt (vergl. dazu Diagramm 3).

Die Streckung/Stauchung bestimmt das Intervall zwischen der Doppeloktave und der Quarte und damit die genaue Lage des **Quart-Nebenschlagtones**. Glocken mit gestauchter Klangkonstante besitzen einen Durnebensschlagton; diejenigen mit gestreckter Klangkonstante besitzen Quart-Nebenschlagtöne. Ein Strecken und Stauchen der Klangkonstante wird hauptsächlich durch die Konstruktion des Schlagringes, und zwar insbesondere durch die sog. „**S c h l a g r i n g n e i g u n g**“ verursacht. Unter dem Begriff „Schlagringneigung“ ist hier ein Aspekt der Schlagringgestaltung gemeint, der am ehesten dem Abstand zwischen dem Schlagringzentrum und der schrägen Höhe gleichzusetzen ist. Die Schlagringneigung kann man grob anhand des Abstandes zwischen schräger Höhe und der äußeren Schlagringkante (-rundung) abschätzen; je kleiner dieser ist, desto geringer ist die Schlagringneigung. Meistens liegt die Schlagringkante ein wenig hinter der schrägen Höhe, manchmal auch auf dieser, aber nur ganz selten darüber. Zu berücksichtigen ist dabei aber auch die Wandstärke der Glocke, denn die Schlagringneigung nimmt mit zunehmender Wandstärke – sofern die Verdickung an der Glockeninnenseite erfolgt – zu (weil durch die Wandverdickung sich das Schlagringzentrum ebenfalls nach innen verschiebt; ein merkbarer Effekt erreicht man hier aber nur bei deutlichen Wandstärkeerhöhungen, etwa leichte Rippe → sehr schwere Rippe). Zum besseren Verständnis ist dies in Abb. 29 a – c graphisch dargestellt.

Je stärker nun der Bereich um bzw. unmittelbar oberhalb des Schlagringes nach innen verschoben ist (d.h. die Schlagringneigung vergrößert wird), desto stärker wird die Klangkonstante gestaucht. Glocken mit geringer Schlagringneigung zeigen deshalb gestreckte Klangkonstanten und daher Quart-Nebenschlagtöne, solche mit hoher Schlagringneigung gestauchte Klangkonstanten und damit Durnebensschlagtöne. Eine Erhöhung der Schlagringneigung kann man durch eine dementsprechende Neigung des Schlagringbereiches nach innen erreichen, aber auch durch Verdicken der Glockenwandung an der Innenseite. Weil ein Ändern der Schlagringneigung gleich

dem Ändern der gesamten Glockenform gleichkommt, können Quart-Nebenschlagöne durch Schleifen an der Glockenwandung praktisch nicht korrigiert werden.

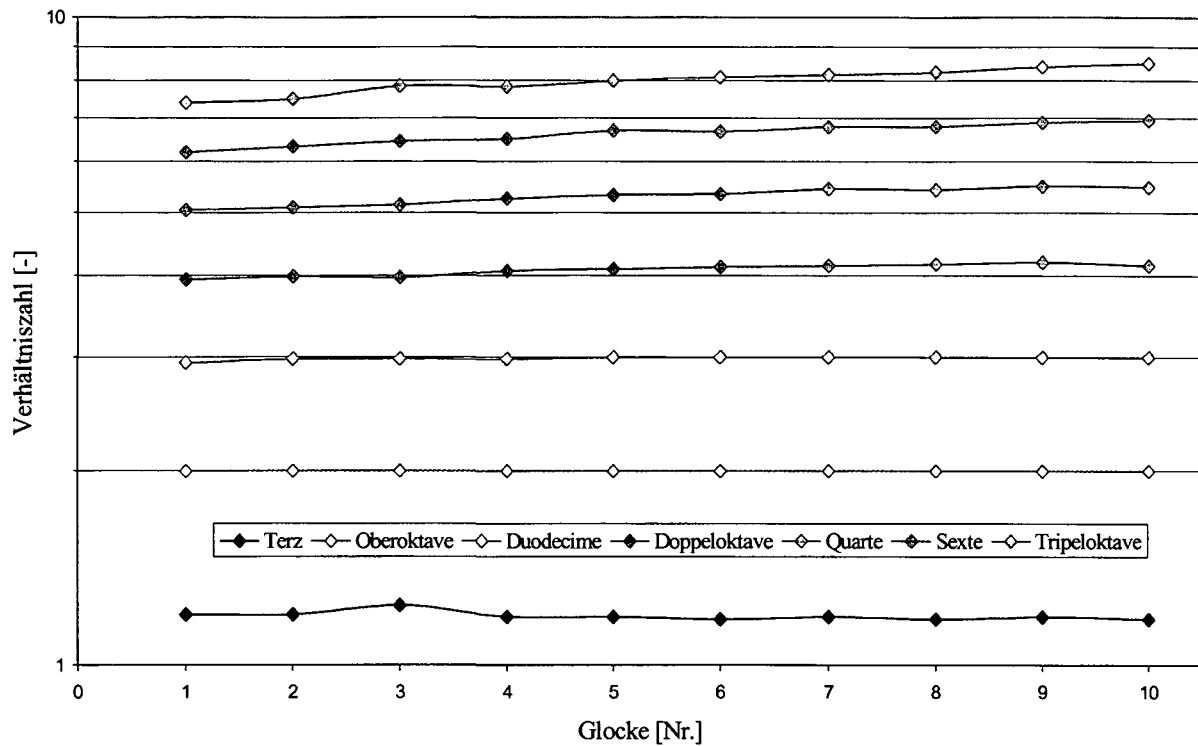


Diagramm 3: Streckung/Stauchung der Klangkonstante verschiedener Glockenrippen, geordnet nach der Stärke der Streckung (graphische reduzierte Analyse). Die Y-Achse (Verhältniszahlen; Bezugspunkt: Oberoktave = 2) ist im logarithmischen Maßstab dargestellt, was auch dem musikalischen Maßstab entspricht. Die Rippen 4, 5 und 6 zeigen eine Klangkonstante mit durchschnittlicher Streckung / Stauchung. Rippe 1 und 2 besitzen hingegen eine stark gestauchte Klangkonstante, während sie bei den Rippen 8, 9 und 10 stark gestreckt ist. Die Rippen mit geringerer Streckung der Klangkonstante (etwa bis zur 4) zeichnen sich durch Durnebensschlagöne aus, die mit stärker gestreckten Klangkonstante (ab der 5) besitzen hingegen Quart-Nebenschlagöne.

1: Oberascher-Rippe; 2: Duroktavrippe (Karlsruher Glockengießerei); 3: Duroktavrippe (Bochumer Verein); 4: Kordler-Rippe (Fa. St. Florian); 5: Pfundner-Rippe; 6: Graßmayr-Rippe; 7: Rippe der Fa. Petit & Edelbrock; 8: Rincker-Rippe; 9: B2-Rippe (Böhler); 10: V7-Rippe (Bochumer Verein).

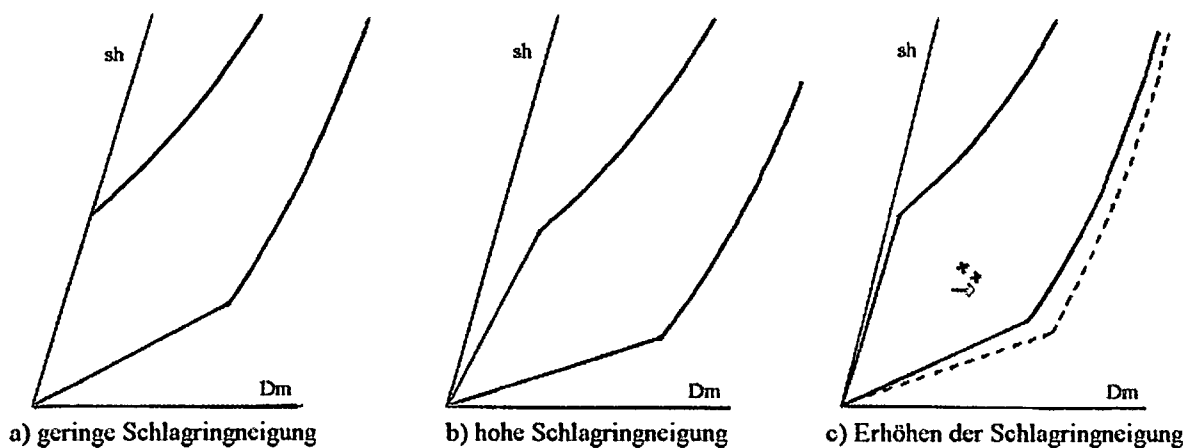


Abb. 29: Schlagringneigung.

- a) Glocke mit geringer Schlagringneigung
- b) Glocke mit hoher Schlagringneigung
- c) Erhöhen der Schlagringneigung durch Wandverdickung an der Glockeninnenseite

Aber auch die Lage der **Terz**, ebenfalls Bestandteil der Klangkonstante, wird recht stark von der Schlagringneigung beeinflusst, aber nicht so sehr wie der Quartnebensschlagton. So weisen Glocken mit Durterzen gestauchte Klangkonstanten und damit auch höhere Schlagringneigung auf. Terzen kann man ebenfalls durch nachträgliche Klangkorrekturen kaum verändern, ein Stimmen von z.B. Mollterz auf Durterz ist daher nicht möglich.

„Dubletten“

Abweichungen von der idealen Rotationssymmetrie im Glockenkörper (z.B. Ausbuchtungen, stark hervortretende Glockenzier, keine genaue kreisrunde Form) verursachen geringfügige Aufspaltungen der Teiltöne (nur wenige Hertz), die man als „Dubletten“ bezeichnen kann. Sie erzeugen mehr oder wenige starke Schwebungen der Teiltöne, die sich auf den Glockenklang aber nicht störend auswirken (nur bei Glockenspielglocken sind sie unerwünscht). Da keine Glocke ganz genau die ideale Rotationssymmetrie aufweist (schon aus dem Grund, weil sich auf Glocken stets Inschriften oder sonstige Verzierungen befinden), sind Dubletten daher in jeder Glocke nachweisbar. Allerdings ist die Aufspaltung meist so gering, daß man sie nur mit hochauflösenden Klangspektren feststellen kann (Abb. 30); mit Stimmgabeln hingegen ist ihr Nachweis praktisch unmöglich. Die starke, bis zu einem Ganzton gehende Spaltung von Teiltönen, wie man sie z.B. bei Glocken mit Sekundnebensschlagton findet, hat hingegen andere Ursachen (ist also kein Dublett), die noch nicht genau geklärt sind; sie dürfte durch einen falsch konstruierten Schlagring hervorgerufen werden.

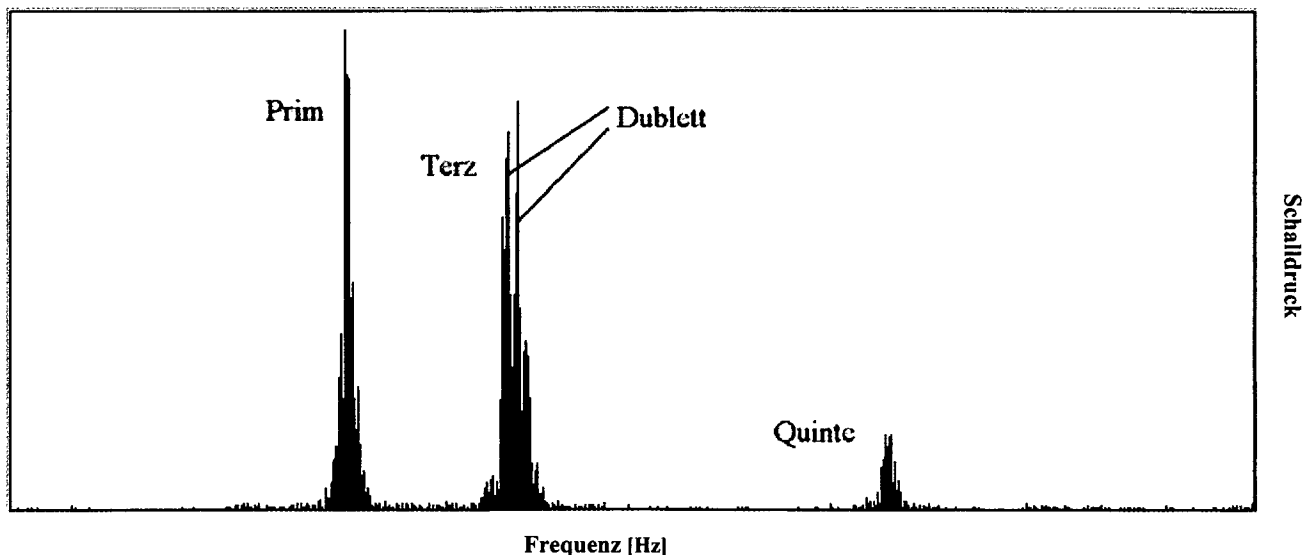


Abb. 30: Dubletten in einem hochauflösenden Glockenklangspektrum. Der Frequenzmaßstab ist hier linear, ebenso wie die Intensitätsangabe, die hier als Schalldruck und nicht in Dezibel wiedergegeben ist. Der Ausschnitt zeigt die Teiltöne Prim, Terz und Quinte der Glocke von Abb. 1. Deutlich erkennbar die Aufspaltung der Terz in 2 benachbarte Frequenzen, die hier 314,5 bzw. 317 Hz beträgt, was musikalisch etwa 1 Gt/16 entspricht. Mit Stimmgabeln ist so eine geringfügige Aufspaltung praktisch nicht nachweisbar.

3.3.2 Einfluß der Glockenform auf die Tongebung

Der Einfluß der Glockenrippe auf die Tongebung ist bis jetzt praktisch unerforscht geblieben, nicht nur, weil die Tongebung selbst in der Glockenkunde kaum behandelt wird, sondern auch, weil der Zusammenhang Tongebung-Glockenform nicht so ohne weiteres meßbar oder berechenbar (wie etwa der Teiltonaufbau durch die FEM-Methode) ist. Allerdings lassen sich hierzu empirische

Beobachtungen anstellen; man geht hier u.a. so vor, daß man bei Glocken, die eine bestimmte Tongebung aufweisen (z.B. blechern), nach Gemeinsamkeiten in der Konstruktion sucht. Auf diese Art und Weise konnten im Zuge dieser Arbeit einige Erkenntnisse bezüglich der Glockenform und deren Einfluß auf die jeweiligen Klangkomponenten der Tongebung gewonnen werden, die wie folgt lauten:

Tonfülle

Diese hängt sehr stark von der Dimensionierung der Glocke ab. Durch eine größere Glockendimensionierung wird die Tonfülle stark erhöht, was konstruktionsmäßig durch Erhöhung der Rippenstärke erreicht wird; schwerrippige Glocken haben daher in der Regel mehr Tonfülle als leichtrippige (Voraussetzung: Gleiche Materialeigenschaften!). Grund für dieses Verhalten ist die durch diese Maßnahmen verbundene Abnahme der Strahlungsdämpfung, welche die Abklingdauer vor allem der hohen, schlagtonbildenden Teiltöne (besonders der Oberoktave) zusätzlich verkürzt; sinkt der Anteil der Strahlungsdämpfung, so verringert sich die Gesamtdämpfung, und die Abklingzeiten der Teiltöne im Schlagtonkomplex und damit die Tonfülle nehmen zu (zur Erinnerung: Die Gesamtdämpfung von Teiltönen setzt sich aus der Material- und der Strahlungsdämpfung zusammen, siehe Glg. 1) in Kapitel 2.2.2.

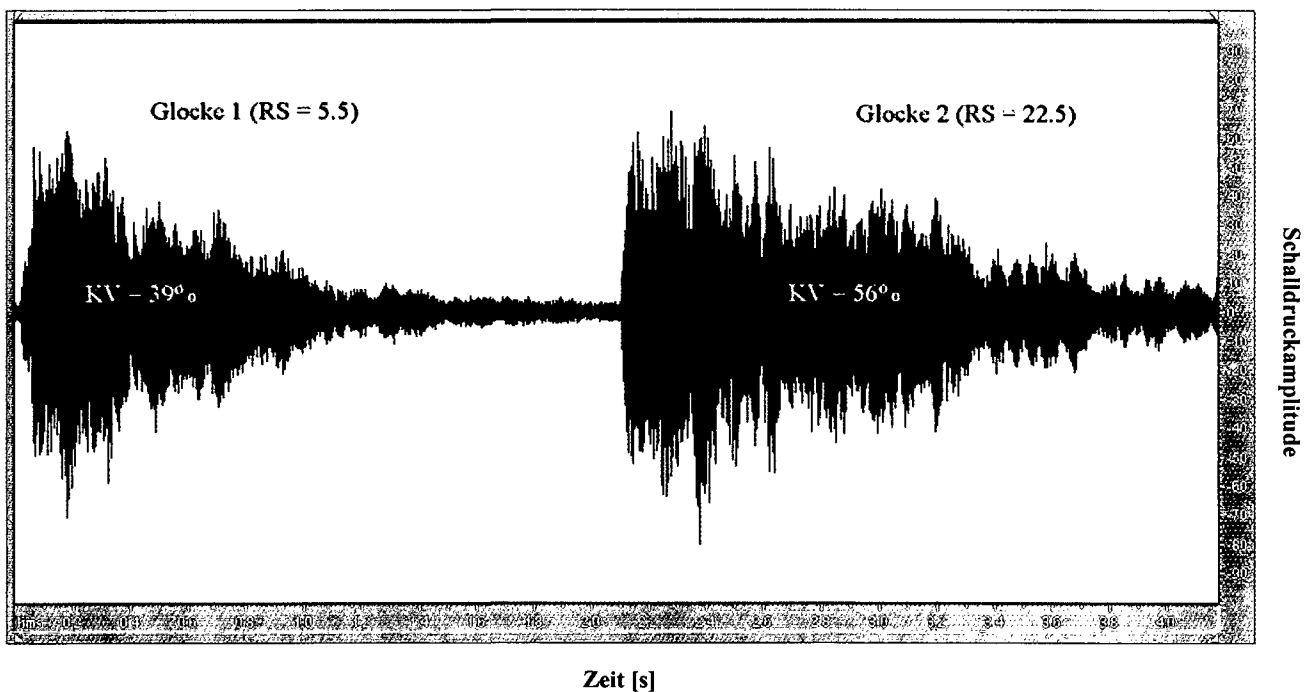


Abb. 31: Erhöhen der Tonfülle durch Vergrößerung der Rippenstärke. Amplitudendiagramm des Schlagtonkomplexes ohne die Oberoktave. Dargestellt sind Amplitudendiagramme von 2 Glocken (im läutenden Zustand), wobei die 1) (links) eine Rippenstärke von $RS = 5,5$ aufweist, die 2) (rechts) hingegen von $RS = 22,5$. Aufgrund des durch die starke Wandverdickung erfolgten erheblichen Dimensionierungsanstieges (von $D = 5,5$ auf $D = 22,5$) erhöhte sich die Tonfülle von $KV = 39\%$ bei Gl. 1 auf $KV = 56\%$ bei Gl. 2. Beide Glocken sind aus gleichem Material und in vergleichbaren Rippen gegossen („F.W.S. – Rippe“), die sich hier hauptsächlich nur durch die Wandstärke unterscheiden; der Einfluß anderer Größen auf die Tonfülle (Materialdämpfung, Proportionen der Glockenrippe) ist auf ein Minimum reduziert. Beide Glocken sind hier auf gleiche Tonlage gestellt, der Abklingverlauf daher direkt vergleichbar. Die Rippen beider Glocken zeichnen sich desweiteren durch ziemlich hohe proportionale Rippenschwere aus (115 % bzw. 108 %) und sind demnach als überaus „pseudoschwerrippig“ zu bezeichnen. Diese Eigenschaft führt zu einer zusätzlichen Erhöhung des Klangvermögens, das bei beiden Glocken auffallend hohe Werte zeigt.

Die Strahlungsdämpfung wird nach *Grützmaker et al.*⁹⁾ vom Verhältnis von Umfangswellenlänge : Schallwellenlänge bestimmt, wobei hier in erster Näherung $2U/n$ als Umfangswellenlänge

festgelegt wurde (mit U = Umfang der Glocke am unteren Rand und n = Anzahl der Meridianknoten des jeweils betrachteten Teiltones). Die Umfangswellenlänge ist – wenn man nun jeweils denselben Teilton, z.B. die Oberoktave, betrachtet (d.h. n wird als konstant angesehen) – proportional zum Durchmesser der Glocke ($D_m = U/\pi$); wenn man nun weiters die Schallwellenlänge als konstant annimmt (d.h. man betrachtet alle Glocken bei gleicher Tonlage), wird sofort deutlich, daß das Verhältnis von Umfangswellenlänge : Schallwellenlänge direkt proportional zur Dimensionierung der Glocke ist (Dimensionierung = Durchmesser der Glocke bezüglich Tonlage). Die von *Grützmacher et al.* festgestellte Tendenz, daß die Strahlungsdämpfung mit zunehmenden Verhältnis von Umfangswellenlänge : Schallwellenlänge, d.h. mit zunehmender Dimensionierung abnimmt, konnte im Zuge dieser Arbeit anhand von Beobachtungen an verschiedenen Kirchenglocken bestätigt und bekräftigt werden: So nimmt mit zunehmender Rippenstärke (= Erhöhung der Dimensionierung) nicht nur die Abklingdauer der hohen, schlagtonbildenden Teiltöne wie Oberoktave, Duodezime etc. und damit die Tonfülle zu (Abb. 31), auch das Verhältnis der Abklingzeiten dieser Teiltöne zueinander ändert sich zugunsten der Oberoktave, welche von der Strahlungsdämpfung besonders stark betroffen ist (Abb. 32). Die Summtöne des Nachhalles hingegen sind von der Strahlungsdämpfung nicht bzw. nur kaum betroffen, weshalb die Dimensionierung praktisch keinen Einfluß auf deren Abklingdauer hat; aus diesem Grund ist auch die Nachhalldauer, wie man in der Glockenkunde weitverbreitet glaubt, kein geeignetes Maß für die Tonfülle (Abb. 33).

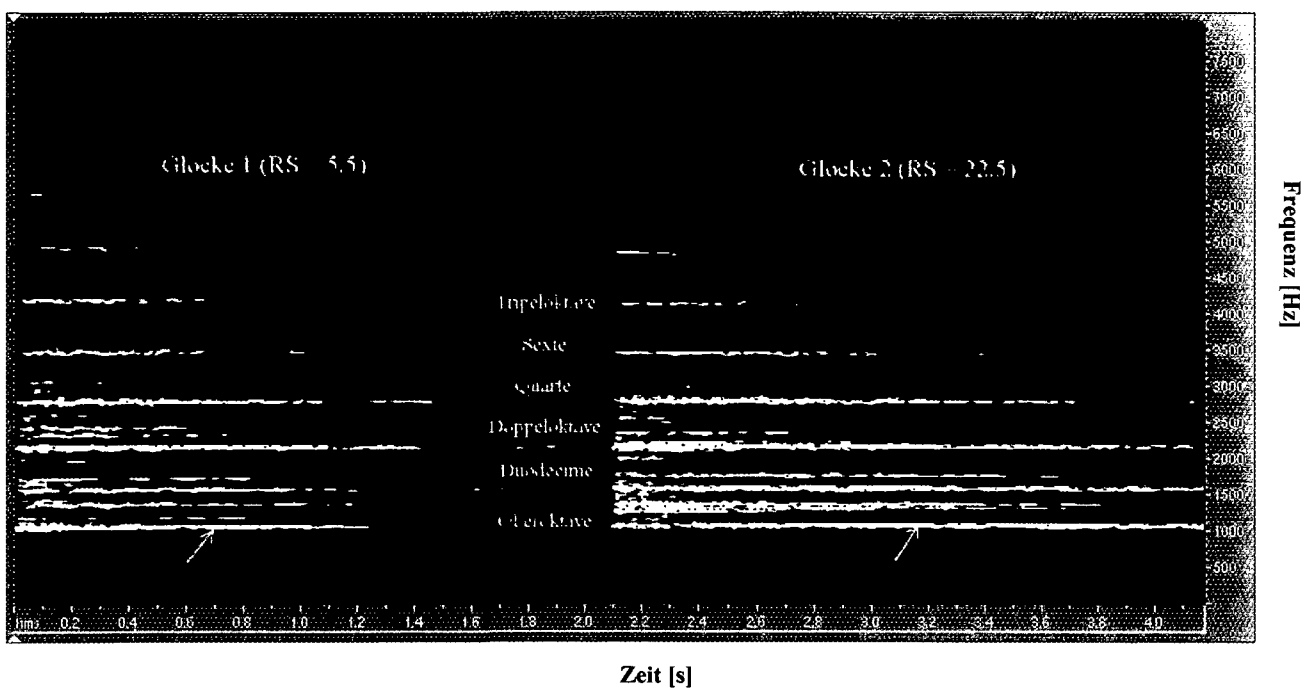


Abb. 32: Sonagramm der Schlagtonkomplexe der beiden Glocken in Abb. 31, links die 1), rechts die 2). Die Intensität wird hier im linearen Maßstab wiedergegeben. Die Glocken sind auf gleiche Tonhöhe gestellt und daher sind die Abklingzeiten der Teiltöne direkt vergleichbar. Es ist deutlich zu erkennen, daß bei der Glocke 2) nicht nur die Abklingdauer der Teiltöne insgesamt zugenommen, sondern daß sich noch zusätzlich das Verhältnis der Abklingzeiten deutlich zugunsten der Oberoktave verändert hat (Pfeil). Dies ist dadurch zu erklären, daß die Oberoktave von der Strahlungsdämpfung noch mehr beeinflusst wird als die übrigen schlagtonbildenden Teiltöne (vergl. dazu Kapitel 2.2.2).

Daß die Tonfülle ganz erheblich von der Dimensionierung abhängt, wird vor allem an hochdimensionierten Glocken mit geringen Nachhallzeiten besonders deutlich; denn die Erfahrung zeigt, daß solche Glocken aufgrund der geringen Strahlungsdämpfung in der Regel ausreichende und manchmal sogar äußerst hohe Tonfülle besitzen. Als Beispiele hierfür stehen sehr schwer bis extrem schwerrippige Bronzeglocken, aber auch sämtliche Stahlglocken und Gußeisenglocken, die von Haus aus geringe Nachhallzeiten aufweisen (die große Dimensionierung bei Stahl- und

Gußeisenglocken hat allerdings in der hohen „Inneren Tonhöhe“ von Stahl und Gußeisen seinen primären Grund). Zu den Bronzeglocken noch ein prominentes Beispiel: Die „Pretiosa“ im Kölner Dom von 1448 (Dm 240 cm, Tonl. $g^{\circ}+0,5$) ist berühmt für ihre hohe Tonfülle, hat ein Klangvermögen von $KV = \sim 25 \%$; ihre Nachhallzeiten sind dagegen miserabel, nur 117 s, anstatt etwa 200 s, dem Mindestwert nach den Limburger Richtlinien (Optimalwert wären ca. 240 s). Ihre große Tonfülle verdankt diese Glocke ihrer mit $RS = 20,5$ extrem schweren Rippe, weshalb sie aufgrund ihrer hohen Dimensionierung ($D = 20,5$) nur eine geringe Strahlungsdämpfung aufweist, welche daher nur wenig zur Gesamtdämpfung beiträgt. Wäre die „Pretiosa“ in einer mittleren Rippe gegossen, so würde sie niemals diese hohe Tonfülle besitzen, weil dann aufgrund der viel geringeren Dimensionierung die Gesamtdämpfung aufgrund des nun hohen Strahlungsdämpfungsanteiles erheblich zugenommen hätte.

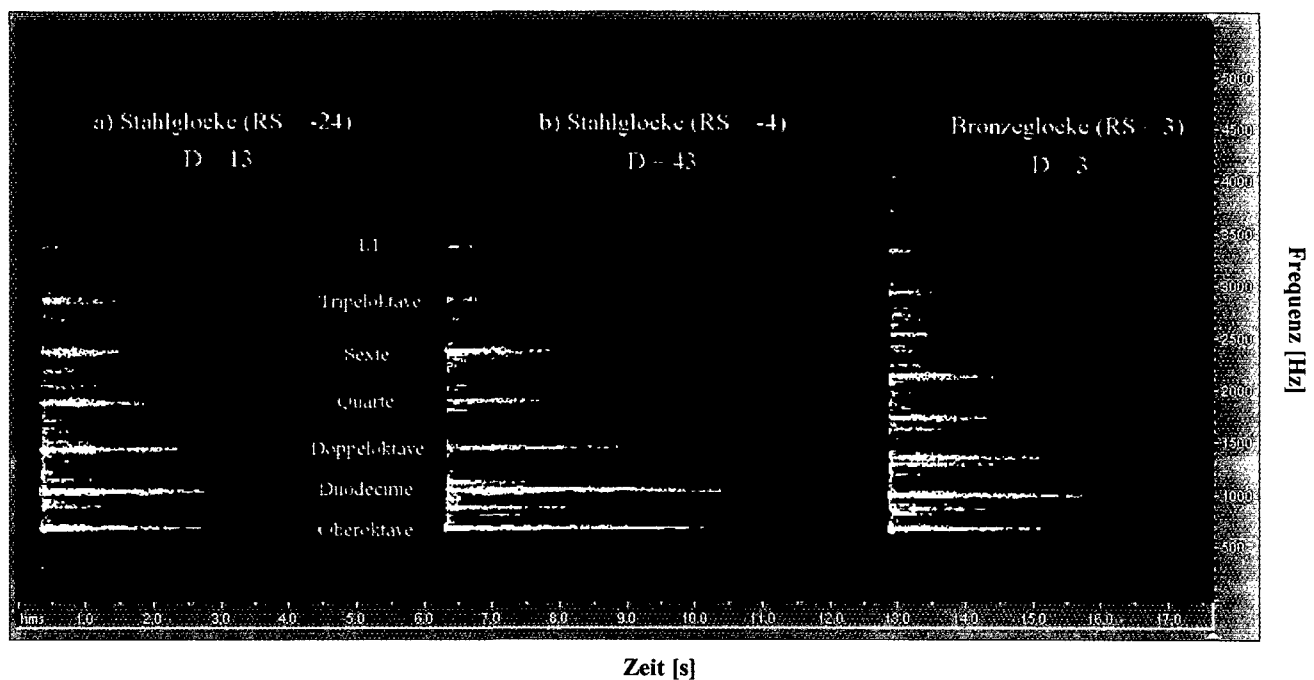


Abb. 33: Sonagramme der Schlagtonkomplexe zweier Stahlglocken (a, b) und einer Bronzeglocke (c). Die Intensität wird hier im linearen Maßstab wiedergegeben. Alle Glocken sind auf gleiche Tonhöhe gestellt und daher sind die Abklingzeiten der Teiltöne direkt vergleichbar (läutender Zustand; Klöppel jeweils mittels Klöppelfängers festgehalten). Die Stahlglocken sind aus Material gleicher Güte (d.h. gleiche Materialdämpfung) und in vergleichbaren Rippen gegossen („Böhler – Rippe“), die sich hauptsächlich nur durch die Wandstärke unterscheiden – d.h. zusätzliche Größen, welche die Tonfülle beeinflussen könnten, sind auf ein Minimum reduziert. Die Wandstärke der Stahlglocken nimmt von $RS = \text{ca. } -24$ (a) nach $RS = \text{ca. } -4$ (b) zu (Stahlglocke a ist in einer für Stahlglocken typischen dünnwandigen Glockenrippe gegossen, Stahlglocke b hingegen in einer Rippe, die bezüglich der Rippenstärke der einer leichtrippigen Bronzeglocke entspricht). Aufgrund dieser Wandverdickung erhöht sich aufgrund des Dimensionierungsanstieges die Abklingdauer der Teiltöne, mit denselben Tendenzen wie in Abb. 32. Obwohl Stahlglocken generell sehr niedrige Nachhallzeiten besitzen (hohe Materialdämpfung), die bei gleicher Tonlage höchstens ca. 1/3 der von Bronzeglocken betragen, so zeigen sie aufgrund der großen Dimensionierung, die von der hohen „Inneren Tonhöhe“ des Materials herrührt (bei Stahlglocke a ist $D = 13$, bei Stahlglocke b gar $D = 43$), dennoch eine Tonfülle, die der von guten Bronzeglocken entspricht bzw. sie sogar übertreffen kann; zum Vergleich eine Bronzeglocke in mittlerer Rippe (c), die für ihre Verhältnisse schon eine ziemlich hohe Tonfülle zeigt ($KV = \text{ca. } 25 \%$). Man sieht deutlich, daß die Abklingdauer der schlagtonbildenden Teiltöne der Stahlglocken nicht nur denjenigen der Bronzeglocke entspricht, sondern teilweise noch um einiges höher ist (Stahlglocke b). Dieses Beispiel zeigt besonders deutlich, daß Nachhallzeiten als Maß für die Tonfülle teilweise völlig ungeeignet sind, denn nach diesen hätten die Stahlglocken mit $Nh = \text{ca. } 40 - 50$ s nicht annähernd soviel Tonfülle wie die Bronzeglocke mit $Nh = \text{ca. } 100 - 120$ s.

Daneben übt aber auch der o b e r e D u r c h m e s s e r einen Einfluß auf die Tonfülle aus. So führt die Vergrößerung desselben zu einer Erhöhung der Tonfülle, allerdings ist der Effekt geringer als bei der Dimensionierung. Ähnlich wie bei der Dimensionierung führt auch die Vergrößerung des

oberen Durchmessers zu einer Erhöhung der Umfangwellenlänge und damit zu einer Reduzierung des Strahlungsdämpfungsanteiles.

Beobachtungen haben darüber hinaus ergeben, daß Glocken mit auffallend hoher *proportionaler Rippenschwere* ebenfalls zu hoher Tonfülle neigen. Dies kann man sich einerseits durch die Zunahme des oberen Durchmessers erklären (dadurch steigt u.a. die proportionale Rippenschwere), ein weiterer Grund dürfte die durch die hohe Masse bedingte große Trägheit darstellen, die einem raschem Abklingen infolge Strahlungs- oder Reibungsdämpfung offensichtlich entgegenwirkt. Pseudoschwerrippige Glocken, d.h. Glocken, die in auf „Masse“ konstruierten Rippen mit hoher proportionaler Rippenschwere gegossen wurden, sind demnach hinsichtlich höherer Tonfülle begünstigt (Abb. 31).

Geräuschanteil

Dieser hängt in erster Linie von der Konstruktion des *Schlagringbereiches* ab. Dünne Wandteile, wie langgezogene, „scharfe“ Schneiden begünstigen einen hohen Geräuschanteil, weil hierdurch die Teiltöne, die im Schlagringbereich einen Kreisknoten besitzen, besser angeregt werden können (es sind diese Teiltöne, welche für die hohe Teiltondichte im oberen Klangspektrum einer Glocke = Geräuschanteil verantwortlich sind). Eine Glocke klingt daher umso blecherner, je höher der Schlagringbereich liegt und je schärfer daher die Schneide ist (vergl. Abb. 34). Vermutlich dürften aber auch dünne Wandteile im Bereich Hals-Schulter zu höherem Geräuschanteil beitragen. Geringe Rippenstärken machen sich in dieser Hinsicht erst im negativen RS-Bereich bemerkbar. Schwerrippigkeit und vor allem tiefliegende, massive Schlagringe wirken dem entgegen und verringern scheinbaren Klang.

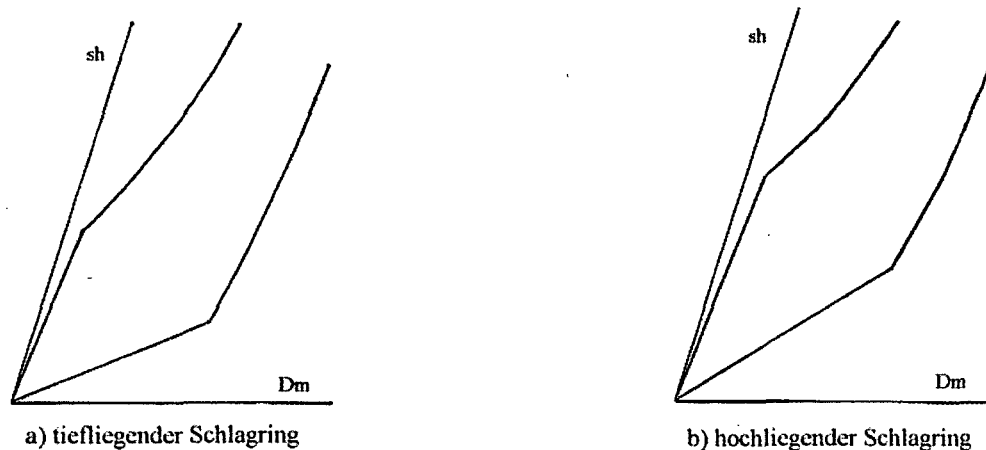


Abb. 34: Glocke mit a) tiefliegender und b) hochliegender Schlagring. Obwohl beide Glocken dieselbe Dicke am Schlagring aufweisen, so zeigt diejenige mit dem hochliegenden Schlagring (b) effektiv größere Bereiche mit geringen Wandstärken als die a), was sich in erster Linie durch eine „schärfere“ Schneide bemerkbar macht. Von einem hochliegenden Schlagring kann man sprechen, wenn dieser in einer Höhe von ca. 15 % der schrägen Höhen zu liegen kommt, tiefliegende Schlagringe befinden sich in einem Bereich von 10% der schrägen Höhe.

Tönigkeit / Tonspanne

Diese beiden Klangkomponenten dürften u.a. von der *Rippenstärke* und von der *Schlagringkonstruktion* beeinflusst werden: Denn die Erfahrung lehrt, daß eine Glocke umso weicher und grundtöniger klingt, je dicker der Schlagringbereich (d.h. je schwerrippiger die Glocke) ist und je tiefer dieser liegt (besonders ausgeprägt bei sehr schwerrippigen mittelalterlichen

Glocken, welche oft einen charakteristischen weichen bis hellmatten Klang aufweisen). Hohe Wandstärken fördern demnach ein grundtöniges Klangspektrum sowie eine geringere Tonspanne. Man kann dieses Verhalten dadurch erklären, daß aufgrund der großen Masse (= Trägheit) im Schlagringbereich die hochfrequenten Teiltöne weniger stark angeregt werden als die tiefen. Leichttrippigkeit und dünne Wandteile, wie langgezogenen Schneiden unterhalb des Schlagringes, bewirken offensichtlich das Gegenteil. Inwieweit die Proportionen der Glocke (Umrißmaße, Schweifung) die Tönigkeit / Tonspanne beeinflussen, muß noch genauer untersucht werden. Daß die Proportionen offensichtlich einen Einfluß ausüben, wird anhand der Glocken der Gießereien *Pfundner* (Wien) und *Graßmayr* (Innsbruck) deutlich: Während erstere für ihren weichen Klang bekannt sind, so neigen Graßmayr-Glocken bisweilen zu scharfer Obertönigkeit. Die Glockenrippen dieser beiden Firmen unterscheiden sich im Grunde nur durch ihre Umrißmaße, denn die Schweifung und die Wandstärke sind annähernd gleich.

A n s c h l a g

Eine Glockenrippe besitzt eine gewisse, mehr oder weniger ausgeprägte Empfindlichkeit gegenüber zu starkem Klöppelanschlag und damit Härten im Glockenklang. Sie dürfte ebenfalls von der Schlagringkonstruktion und der Rippenstärke abhängen (je dünnwandiger und je höherliegender der Schlagring, desto empfindlicher).

N e b e n s c h l a g t o n g e r ä u s c h e

Der genaue Grund ihrer Entstehung ist komplex, da sie nur dann auftreten, wenn mehrere Umstände gleichzeitig eintreffen (siehe Kapitel 2.4.1). Doch dürften sowohl die Wandstärke (man findet Nebenschlagtongeräusche nur bei eher dünnwandigen Glocken) als auch die Konstruktion des Schlagringes (eine große Streckung der Klangkonstante begünstigt Nebenschlagtongeräusche) am meisten dafür verantwortlich sein.

L a u t s t ä r k e

Die Lautstärke einer Glocke nimmt im Allgemeinen mit zunehmender Größe zu und hängt daher auch von der Dimensionierung (= Größe bezüglich Tonlage ab); hochdimensionierte Glocken wie z.B. sehr schwerrippige Bronzeglocken oder Stahlglocken sind daher in der Regel lauter als ihre geringer dimensionierten Gegenstücke in gleicher Tonlage.

Entwicklung der Glockenrippe – die charakteristischen Glockenformen 3.4

Die ersten Glocken waren aus Eisenblech geschmiedet und hatten eine Gestalt, die der von Kuhglocken ähnelt. Erst seit dem 8. Jh. werden Glocken auch gegossen. Dieser Zeitpunkt ist der eigentliche Beginn der Entwicklungsgeschichte der Glockenform. Diese hat seit ihrer Entstehung im Laufe der Zeit unterschiedliche Veränderungen erfahren, um ihr neben klanglichen bzw. musikalischen Verbesserungen (Glockentyp, Tongebung) vor allem ein solches Aussehen zu geben, das den Vorstellungen der jeweilig vorherrschenden Kunstrichtungen entsprach (so wie Form und Design von Kunst- oder Gebrauchsgegenständen dem Stil der Zeit angepaßt werden). So hat jede Stilepoche wie Romanik, Gotik oder Barock eine oder mehrere „c h a r a k t e r i s t i s c h e G l o c k e n f o r m e n“ hervorgebracht, die in diesen Zeiträumen vorherrschend waren und von der Mehrheit der Glockengießer verwendet wurden. Anhand dieser Glockenformen läßt sich auch die Entwicklung des Glockengusses verfolgen. Da diese aber in den verschiedenen Ländern Europas nicht gleichartig verlief, ist daher eine allgemeine Übersicht über die Entwicklung der Glockenform, besonders ab der Neuzeit, nur bedingt möglich. Die größten und nachhaltigsten Entwicklungsprozesse in der Formgebung fanden im 12. / 13. Jh. statt. Seit dieser Zeit hat sich die Glockenform nicht mehr grundlegend verändert.

In der Glockenkunde haben zwar gewisse historische Glockenkonstruktionen eigene Bezeichnungen wie z.B. die Bienenkorb- oder Zuckerhutglocke, ansonsten gibt es aber keine systematische bzw. einheitliche Klassifizierung der Glockenrippen bezüglich ihrer Konstruktion. Da man zudem auch nicht in der Lage ist, die Eigenschaften von Glockenrippen genau bzw. überhaupt zu bewerten (bekannt ist eigentlich nur die Bewertung nach der Rippenstärke, die aber falsch praktiziert wird, sowie die musikalische Einteilung nach Glockentyp), sind in der glockenkundlichen Literatur bezüglich der Entwicklung der Glockenformen teilweise erhebliche Irrtümer verbreitet, vor allem, was die Glocken der Barockzeit angeht.

Das Konzept der charakteristischen Glockenformen, welches nicht nur die Einteilung der verschiedenen Glockenkonstruktionen, sondern auch deren Entwicklung beinhaltet, ist im Zuge dieser Arbeit entstanden und soll hier nun vorgestellt werden. Grundlage hierfür war die Auswertung der Unterlagen im Glockenarchiv Pfundner (Daten und Fotografien von über 1000 historischen Glocken in Österreich); die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden, soweit Material vorhanden war, mit Glocken anderer europäischer Länder verglichen bzw. überprüft und dementsprechend erweitert.

3.4.1 Die Bienenkorbform (8. – 12. Jh.)

Die **B i e n e n k o r b f o r m** ist die älteste Rippe, in der in Europa Glocken gegossen worden sind. Man unterscheidet zwischen **ä l t e r e n** und **j ü n g e r e n** Bienenkorbformen. Ihnen gemeinsam ist ein gedrungener, wenig ausladender Glockenkörper mit einer hochgewölbten, kallottenförmigen Haube, was an die Form eines Bienenkorbes erinnert. Sie besitzen einen nur schwach ausgebildeten Schlagring, der innen eben ist. Die Tonlage von Bienenkorbglocken ist aufgrund des unharmonischen Teiltonaufbaus (Unterton stark vertieft, Prime erhöht, die Teiltöne der Klangkonstante meist gespalten) meist nicht eindeutig bestimmbar, ihr Klang ist in der Regel hohl und geräuschvoll. Manche Bienenkorbglocken besitzen sog. Foramina, das sind kleine Schalllöcher an der Haube. Diese wurden angebracht, da man eine bessere klangliche Wirkung von ihnen versprach. Foramina haben jedoch, wie moderne Messungen und Versuche ergaben, keinen Einfluß auf das Klangverhalten der Glocke¹⁷⁾.

Die ältere Bienenkorbform besitzt einen geraden, fast zylindrischen Mantel. Das Profil hat überall gleiche Wandstärke und ist nur am Schlagring etwas verdickt. Sie besitzen aufgrund der Form einen extrem unharmonischen Teiltonaufbau, der die Regelmäßigkeiten im Teiltonaufbau (Klangkonstante) kaum noch erkennen lässt und haben daher keinen Schlagton. Sie sind außerdem extrem dünnwandig (RS-Werte bis -30), die Tongebung ist daher in der Regel schepprig und kübelig.

Da solch dünnwandigen Glocken relativ leicht zerbrechlich sind, begann man im 11./ 12. Jh., diese besonders am Schlagring zu verstärken, in erster Linie um die Haltbarkeit zu verbessern¹⁸⁾. Diese Glocken weisen nun ein Profil mit unterschiedlichen Wandstärken auf und sind auch schon geringfügig geschweift und wesentlich dickwandiger als ihre Vorgänger (RS-Werte bis 30). Diese Glockenrippe kann man als die jüngere Bienenkorbform bezeichnen. Sie klingt um einiges voller als die älteren Version, ist nicht mehr so geräuschartig und lässt manchmal auch eine recht eindeutige Tonlage vernehmen. Die Bienenkorbform wurde nach 1200 nicht mehr verwendet (Ausnahme: Spanien, wo bienenkorbartige Glocken gelegentlich noch weiter bis ins 20. Jh. gegossen wurden). Von den ganz wenig erhaltenen Bienenkörben des Hochmittelalters befindet sich ein größerer Teil in Deutschland.

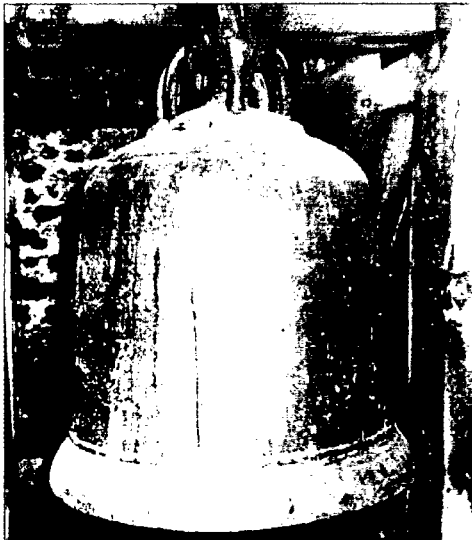


Abb. 35: „Lullusglocke“ (ältere Bienenkorbform)



Abb. 36: Odenthal / Köln (jüngere Bienenkorbform)

Berühmte Beispiele für die ältere Bienenkorbform sind:

- Bad Hersfeld (Deutschland), „Lullusglocke“ (Gj: um 1040, Dm: 111.2 cm) – Abb. 35
- Dom zu Augsburg, die zwei „Chorglocken“ (Gj: um 1070, Dm: 92 cm und 91.5 cm)

Für die jüngere Bienenkorbform:

- Odenthal bei Köln (Gj: um 1175, Dm: 104.3 cm) – Abb. 36
- Dom zu Bamberg, „Kunigunde“ (Gj: um 1200, Dm: 159.6 cm)

3.4.2 Die Zuckerhutform (12. – 14. Jh.)

Charakteristisch für die Zuckerhutform ist ein extrem langgestreckter, schlanker, kegelförmiger Glockenkörper mit hochgewölbter Haube, etwa in der Art eines Zuckerhutes. Der Mantel ist schwach geschweift und nur am Schlagring mehr oder weniger ausladend. Der mäßig bis schwach ausgebildete Schlagring ist innen meist eben. Aufgrund der Form besitzen

Zuckerhutglocken meist einen zur Non vertieften Unterton. Die Prim ist immer vertieft, manchmal sehr stark, während die Oberoktave oft gespalten ist. Vor allem die kleineren Zuckerhutglocken besitzen in der Regel nur einen schwach ausgeprägten Schlagton, der bei gespaltenen Oberoktaven von einem ebenfalls eher schwachen Sekundnebschlagton begleitet wird, und werden musikalisch mehr von den Summtönen Unterton, Prim und Terz geprägt. Ihr Klang ist oft durchdringend und schrill, besonders dann, wenn sie schwerrippig sind.

Die Zuckerhutform entstand im 12. Jh. parallel zur Bienenkorbform. Verantwortlich dafür war wohl die Einführung eines neuen Formverfahrens, des sog. Mantelabhebeverfahrens¹⁸⁾ (siehe Kapitel 5.1.2), das kegelförmige Formteile begünstigt. Die Zuckerhutform fand keine besonders starke Verbreitung mit Ausnahme von Italien. Hier war sie die dominierende Glockenform bis teilweise weit ins 18. Jh. Aber auch in Spanien waren zuckerhutartige Glocken beliebt und werden dort bis in die Gegenwart noch hergestellt. Im Gegensatz zu den deutschen Zuckerhutglocken, die meist extrem schwerrippig gegossen wurden (RS-Werte bis 50), sind die italienischen Stücke besonders dünnwandig (RS-Werte bis -20). Im deutschen Sprachraum verschwand der Zuckerhut nach 1300. Eine größere Anzahl dieser Glocken findet man in Mittel- und Ostdeutschland.

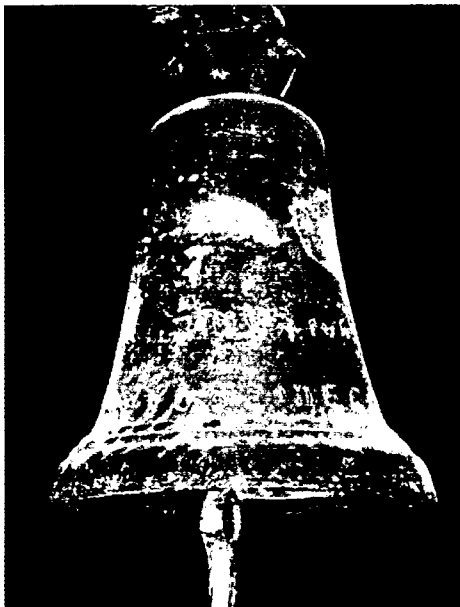


Abb. 37: „Arnoldusglocke“

Berühmte Beispiele für Zuckerhutglocken im deutschen Sprachraum:

- Gilching bei München, „Arnoldusglocke“ (Gj: um 1172, Dm: 41 cm) – Abb. 37
- Dom zu Limburg / Lahn, „Sturmiglocke“ (Gj: um 1225, Dm: 102.8 cm)

3.4.3 Die Übergangsformen (12. – 14. Jh.)

Bienenkorb- und Zuckerhutglocken sind klanglich nicht befriedigend und besitzen in der Regel auch keine eindeutige Tonlage. Die Änderung des Klangverhaltens, das sich aus der Formänderung zur Zuckerhutglocke bzw. zur jüngeren Bienenkorbglocke ergeben hatte, könnte die Gießer des 12. Jh. veranlaßt haben, neue Glockenformen zu entwickeln¹⁸⁾. Die Formvarianten sind äußerst vielfältig und spiegeln die Experimentierfreudigkeit damaliger Gießer wieder. Sie werden unter dem Begriff **Ü b e r g a n g s f o r m e n** zusammengefaßt. Aufgrund der vielfältigen Formvarianten ist eine allgemeine Beschreibung der Übergangsformen nur schwer möglich, doch kann man zwischen zwei Gruppen unterscheiden, nämlich den **l ä n g l i c h e n Ü b e r g a n g s f o r m e n** (aus dem Zuckerhut entwickelt) und den **g e d r u n g e n e n Ü b e r g a n g s f o r m e n** (aus der jüngeren

Bienenkorbform entstanden). Alle Übergangsformen sind in der Regel sehr bis extrem schwerrippig. Sie sind stärker geschweift als ihre Vorgänger, aus denen sie entwickelt worden sind und besitzen schon einen deutlich ausgeprägten Schlagring. Vom Klang sind die Übergangsformen besser als die Zuckerhut- oder gar Bienenkorbform, vor allem weil sie teilweise schon einen recht stark ausgebildeten Schlagton besitzen. Aufgrund der großen Formunterschiede findet man bei Glocken in Übergangsrippen alle vier Hauptgruppen der Glockentypen (Non-, Oktav-, Septim- und Sexttyp). Die Übergangsformen verschwanden im Laufe des 14. Jh. und wurden durch die gotische Rippe abgelöst bzw. in diese umgewandelt.

Berühmte Beispiele von Glocken in Übergangsformen:

Gedrungene Übergangsform:

- Dom zu Merseburg, „Clinsa“ (Gj: um 1180, Dm: 131.5 cm) – Abb. 38

Längliche Übergangsform:

- Münster zu Freiburg / Breisgau, „Hosanna“ (Gj: 1258, Dm: 161 cm) – Abb. 39

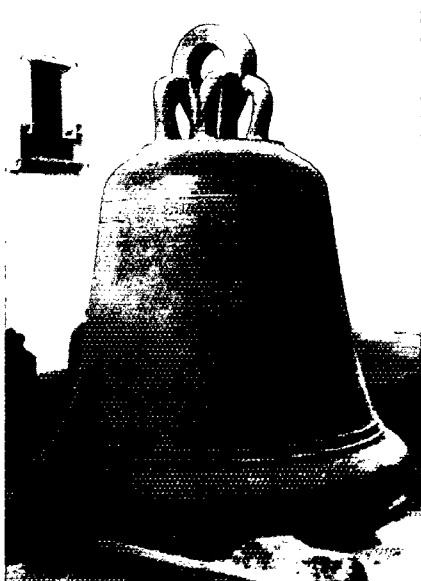


Abb. 38: „Clinsa“ (gedrungene Übergangsform)

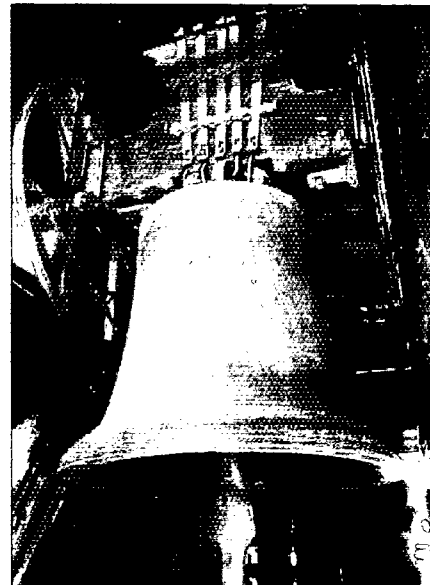


Abb. 39: „Hosanna“ (längliche Übergangsform)

3.4.4 Die Gotische Rippe (ca. 1200 – 16. Jh.)

Die **g o t i s c h e R i p p e**, die in der Glockenkunde auch unter dem Begriff gotische Dreiklangrippe bekannt ist, besitzt eine gefällige, wohlproportionierte geschweifte Gestalt mit fließendem Verlauf der Glockenwandung, d.h. sie hat weder Knicke und Kanten an Schlagring und Schulter. Die frühen gotischen Glocken besitzen manchmal noch stärker gewölbte Hauben. Der Schlagring ist massiv und niedrigliegend. Glocken in gotischer Form sind gewöhnlich sehr schwerrippig (besonders die älteren Exemplare) und haben hauptsächlich Rippenstärken im Bereich von $RS = 10$ bis 20 , doch kann diese bis ca. 30 steigen. Diese nahm im Laufe der Zeit kontinuierlich ab und lag im 16. Jh. nur noch selten über $RS = 10$ (meist mittlere bis schwere Rippe; vergl. Diagramm 4). Die gotische Rippe besitzt einen klaren, stark ausgeprägten Schlagton und damit eine eindeutig bestimmbare Tonlage, was die älteren Glockenformen in der Regel nicht

hatten. Die Schweifung der gotischen Rippe ist in der Regel eher mäßig ausgeprägt, weshalb diese Glocken mehr zum Oktav- und Nontyp neigen und weniger zum Septimtyp. Die gotische Form besitzt in der Regel eine angenehme Tongebung (hell bzw. weich; große Tonfülle); besonders die sehr schwerrippigen Stücke klingen weich und sehr volltönend.

Die gotische Rippe entstand in den letzten Jahren des 12. Jh. und war um 1200 schon voll ausgebildet, wie erhaltene Exemplare belegen. Für die Entwicklung dürften musikalische und klangliche Aspekte verstärkt eine Rolle gespielt haben: Man wünschte sich offensichtlich eine Glocke mit einer deutlich ausgebildeten Tonlage und vollem, tragfähigem Klang¹⁹⁾. Eine eindeutige Tonlage ist auch die Voraussetzung dafür, um Glocken zu einem mehrstimmigen Geläute zu kombinieren. Man bemerkte auch bald den mehrstimmigen Tonaufbau dieser Glockenform (Schlagton und Summtöne; Glockentyp), der erstmals im 13. Jh. von *Vincenz von Beauvais* erwähnt wurde²⁰⁾, aber bis in die Neuzeit keine Rolle spielen sollte. Die gotische Rippe verbreitete sich rasch und hat sich nach 1300 in Mittel-, West- und Nordeuropa durchgesetzt. Sie erlebte vor allem im 15. Jh. eine Blütezeit, in der viele der schönsten Stücke gegossen worden sind. Im 15./16. Jh. wurde neben der Verdünnung der Wandstärke auch der Schlagringbereich der gotischen Rippe teilweise leicht verändert; dieser wurde etwas höherliegend konstruiert und besitzt einen vom Rand aufwärts gehenden geraden Verlauf, der erst im Schlagringbereich abrundet. Diese jüngere Variante der gotischen Rippe sollte man der besseren Unterscheidung wegen als „spätgotische Glockenform“ bezeichnen. Die gotische Rippe ist seit dem 16. Jh. in den verschiedenen Ländern unterschiedlich weiterentwickelt worden (siehe „Sekundärrippen“) und diente Jahrhunderte später als Vorbild für die moderne Oktavglocke der Gegenwart. Die gotische Rippe wurde in ihrer mittelalterlichen, schwerrippigen Gestalt nach Ende des 16. Jh. nicht mehr verwendet.

Von den vielen, schönen Exemplaren in gotischer Rippe sollen als Marksteine erwähnt werden:

- St. Martin/Ybbsfeld (Nö); älteste bekannte Glocke in vollendeter gotischer Form (Gj: 1200, Dm: 96 cm) – Abb. 40
- Dom zu Bamberg, „*Heinrichsglocke*“ (Gj: 1311, Dm: 179.8 cm)
- Stiftskirche St. Florian (Oö); komplett erhaltener 4-stimmiger Geläutesatz aus 1318/19, Dm: 125.5, 106.5, 91.4, 76.3 cm. Ältestes bekanntes Glockenensemble, das gezielt aufeinander abgestimmt wurde.
- Münster in Straßburg, „*Le Bourdon*“ von Johann Gremp (Gj: 1427, Dm: 222 cm)
- Kölner Dom, „*Pretiosa*“ von Brodermann & Cloit, eine der klanglich schönsten Glocken, die je gegossen wurde (Gj: 1448, Dm: 240 cm) – Abb. 41
- Kölner Dom, „*Speciosa*“ von Johannes de Vechel, (Gj: 1449, Dm: 203 cm)
- Dom zu Erfurt, „*Maria Gloriosa*“ von Gerdt van Wou (Gj: 1497, Dm: 256 cm); gilt bei vielen Fachleuten als schönste Glocke des Abendlandes; wurde zum Vorbild der modernen Oktavglocke im deutschen Sprachraum. – Abb. 42
- Kathedrale in Fribourg (Schweiz), „*Sionsglocke*“ von Pierre Monturiolis (Gj: 1505, Dm: 220 cm)
- Dom zu Utrecht (Niederlande), größter erhaltener Geläutesatz der Gotik, bestehend aus 6 Glocken von Gerdt van Wou, Gj: 1505 / 1506; Dm: 227.2 cm, 203.4 cm, 182 cm, 170 cm, 152.8 cm, 136 cm
- Dom zu Krakau, „*Alter Sigismund*“ von Hans Behaim (Gj: 1520, Dm: 242 cm)
- Wien, Stephansdom, „*Halbpummerin*“ von Urban Weiß (Gj: 1558, Dm: 257 cm), wurde leider 1945 zerstört.
- Kathedrale in Reims, „*Charlotte*“ von Pierre Deschamps (Gj: 1570, Dm: 246 cm)

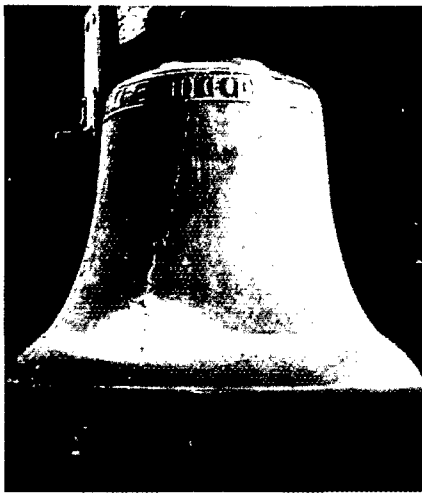


Abb. 40: St. Martin / Ybbsfeld

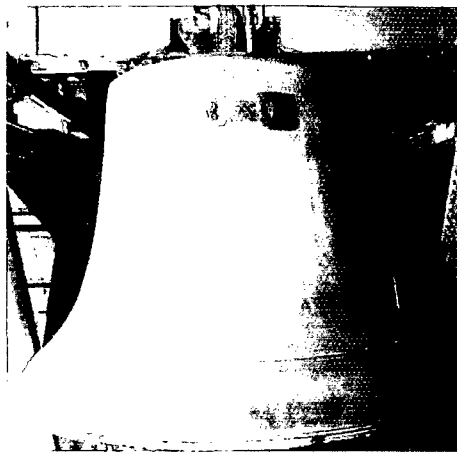


Abb. 41: „Pretiosa“



Abb. 42: „Gloriosa“

3.4.5 Die „Sekundären Rippen“ (16. Jh. – heute)

Unter dem Begriff „S e k u n d ä r e R i p p e n“ kann man alle Glockenformen zusammenfassen, die sich seit dem 16. Jh. unmittelbar aus der gotischen Rippe entwickelt haben (aus diesem Grund auch der Name, da die gotische Form in den sekundären Rippen quasi als Weiter- oder Zweit- (= sekundäre) Verwendung weiterlebt. Der Name „Renaissancerippe“ erschien aufgrund ihrer starken Verwandtschaft zur gotischen Rippe und der zahlreichen, in den jeweiligen Kulturräumen auftretenden Variationen dieser Glockenform als nicht zutreffend). Ihnen gemeinsam ist die Ähnlichkeit mit ihrer mittelalterlichen Vorgängerform, sie unterscheiden sich im Detail aber von dieser. Ihre Rippenstärke liegt etwa im Bereich von $RS = -5$ bis 10 (d. h. meist mittelschwere Rippen) und entspricht damit in etwa derjenigen der spätgotischen Form. Sehr schwerrippige Varianten sind seltene Ausnahmen. Klanglich sind die Sekundärformen den (spät-)gotischen Vorgängern ziemlich ähnlich. Stilistische Gründe dürften daher bei dieser Weiterentwicklung wohl im Vordergrund gestanden haben, um der Glockenform ein dem neuen Zeitstil (Renaissance, Manierismus) entsprechendes Äußeres zu verleihen. Der Übergang von gotischer in sekundäre Rippe ist manchmal fließend. Die Entwicklung der Sekundärformen verlief in den verschiedenen Ländern (Kulturräumen) unterschiedlich. Aus diesem Grund gibt es mehrere charakteristische Sekundärformen, wobei für unseren Kulturraum die manieristische und die französische Rippe die größte Bedeutung besitzen:

Die „M a n i e r i s t i s c h e R i p p e“ (deutscher Kulturraum, ca. Mitte 16. Jh. bis 18. Jh.)

Die deutsche Version der Sekundärformen ist die sog. „manieristische Rippe“ (benannt nach der hier um 1600 vorherrschenden Stilrichtung Manierismus, einer Art Spätrenaissance mit gotischen Reminiszenzen). Sie ist eine konsequente Weiterentwicklung der spätgotischen Form: Der Bereich vom Rand bis Schlagring hat einen geraden Verlauf, während der Schlagring selbst durch einen mehr oder weniger betonten Knick hervorgehoben wird. Der Schlagring ist in der Regel etwas höherliegend als es in der Gotik der Fall war. Die Schweifung entspricht etwa derjenigen der gotischen Rippe, manchmal ist sie auch etwas stärker. Es treten daher bevorzugt Oktav- und Septimtypen auf. Die klanglichen Eigenschaften sind ungefähr die gleichen wie bei der spätgotischen Rippe (helle Tongebung), weisen aber manchmal einen etwas stärkeren herben (leicht blechern) Akzent auf. Die manieristische Form findet man bevorzugt in Süddeutschland, Österreich und der Schweiz. Sie wurde ziemlich rasch seit Mitte des 17. Jh. von der neuen Barockrippe verdrängt und nach 1700 in der Regel nicht mehr verwendet. Nur in Tirol und in der

Schweiz hielt sie sich länger. Dementsprechend gering ist die Anzahl an Glocken in manieristischer Form.

Bedeutende Exemplare in manieristischer Rippe sind:

- Burg zu Wr. Neustadt (Nö), „*Maximilianische H-Glocke*“ von Heinrich Reinhart (Gj: 1607, Dm: 180 cm)
- Münster in Bern, Große Glocke von Zehnder & Füllli (Gj: 1611, Dm: 247.3 cm)
- Dom zu Salzburg, „*Marienglocke*“ von Wolfgang und Johann Neidhart (Gj: 1628, Dm: 183 cm)
- Wien, Stephansdom, „*Josefinische Glocke*“ (= „*Alte Pummerin*“) von Johann Achamer (Gj: 1711, Dm: 320 cm), wurde leider 1945 zerstört - Abb. 43
- Stiftskirche St. Gallen (Schweiz), „*Dreifaltigkeitsglocke*“ von Peter Ludwig Kaiser (Gj: 1767, Dm: 235 cm)

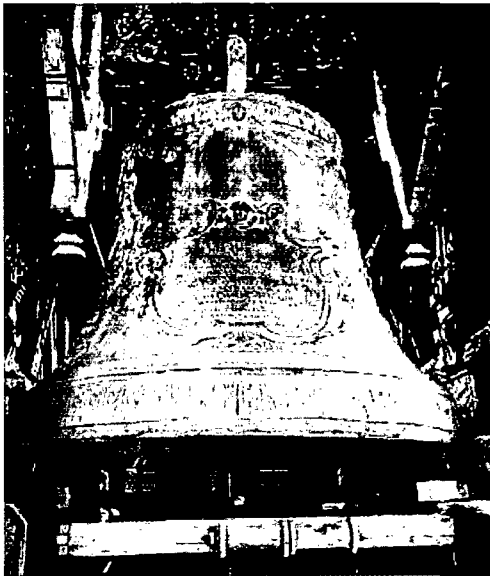


Abb. 43: „Josefinische Glocke“ (= „Alte Pummerin“)

Die Französische Rippe (französischer Kulturraum, ca. 16. Jh. bis heute)

Die französische Rippe ist der spätgotischen sehr ähnlich. Sie ist aber oft etwas länglicher geformt und besitzt einen elegant geschweiften Körper. Die Platte ist meist leicht gewölbt, was den fließenden Verlauf der Glockenwandung noch unterstreicht. Die Glocken gehören in der Regel dem Oktav- und Nontyp an, oft mit erhöhter Prim, und besitzen eine helle, klare Tongebung. In Frankreich wird diese Rippe, leicht abgewandelt (reine Oktavglocke), noch heute verwendet, und daher zeigen die überwiegende Mehrheit der in Frankreich vorhandenen Glocken diese Rippenkonstruktion.

Die lothringischen Wandergießer, die seit ca. 1630 in Deutschland, aber auch der Schweiz, Österreich und den Beneluxländern tätig waren, gossen ihre Glocken ebenfalls in der französischen Rippe, die sie aus ihrer französischen Heimat mitbrachten. Vor allem in Westdeutschland (Rheinland, Westfalen, Baden-Württemberg) war die Verwendung der französischen Rippe aufgrund des starken Wirkens dieser Gießer lange Zeit dominierend; aus diesem Grund sind auch die Glocken einiger westdeutscher Glockengießereien mehr oder weniger von der französischen Rippe abgeleitet. Da die lothringischen Wandergießer in der Geschichte des Glockengusses im deutschen Kulturraum eine bedeutende Stellung einnehmen, sollen hier einige von ihnen hergestellte Musterexemplare in französischer Rippe genannt werden.

Berühmte Glocken in französischer Rippe im deutschen Sprachraum:

- Trier, Dom, „*Helena*“ von N. Chapel, N. Hubert sowie F. und M. Brulet, alle französische bzw. loth. Glockengießer (Gj: 1628, Dm.: 236 cm), leider 1945 zerstört
- St. Lambrecht, Stiftsk. (Stm), „*Alte Lothringerin*“ von Dubois & Gyot, beide lothringische Wandergießer (Gj: 1637, Dm: 186 cm) – Abb. 44
- Einsiedeln, Stiftsk. (Schweiz), „*Große Glocke*“ von Rozier, Gyot, Reichart und Michelin, alle aus Lothringen (Gj: 1637, Dm: 211 cm)
- Dom zu Augsburg, „*große Glocke St. Maria*“ von J. Gerard und Tobi de la Paix de La Mothe (Gj: 1652, Dm: 169.5 cm)
- Münster in Bonn, komplett erhaltenes Geläute (7 Glocken) von Martinus Legros, wallonischer Glockengießer (Gj: 1756; gr. Glocke mit Dm: 178 cm)



Abb. 44: „Alte Lothringerin“

Die übrigen Sekundärformen trifft man in Österreich zwar so gut wie nicht an, sollen aber dennoch kurz umrissen werden:

Die „*E n g l i s c h e R i p p e*“ (angelsächsischer Kulturraum, 16. Jh. bis heute)

Die englische Rippe besitzt den fließenden Verlauf (ohne Knicke und Kanten) der gotischen Rippe, ist aber meist etwas niedriger und gedrungener und unten auch stärker geschweift. Glocken in englischer Rippe sind daher oft Septimglocken, ihr Klang ist bisweilen blechern. Ende des 19. Jh. wurde die englische Rippe so umgeändert, daß sie den reinen Oktavtyp ergibt. Diese modernen englischen Rippen zeichnen sich teilweise durch ausgezeichnete Klangqualität aus. In Großbritannien ist der größte Teil der vorhandenen Glocken in der englischen Rippe geformt; die berühmtesten und größten Vertreter dieser Glockenrippe hängen in der St. Pauls Kathedrale in London bzw. im Uhrturm des Londoner Parlament (der berühmte „Big Ben“).



Abb. 45: „Stafford-Bell“ (Kathedrale zu Exeter); geg. 1676 von Thomas Purdue (ca. 2000 kg). Gilt als eine der schönsten und größten Glocken Großbritanniens aus dieser Zeit.

Die „Niederländische Rippe“ (Niederlande, Belgien; ca. 16. Jh. bis heute)

In den Niederlanden hat sich die gotische Rippe am ursprünglichsten erhalten und die dortigen Sekundärformen unterscheiden sich, abgesehen von der Rippenstärke (in der Regel mittelschwer), kaum von dieser. Veränderungen fanden nur soweit statt, um den Typ der reinen Oktavglocke herzustellen. In dieser Form wird sie dort heute noch gegossen. Die zahlreichen Glockenspiele in Holland und Belgien sind praktisch sämtlich in Niederländischer Rippe geformt; die Glocken des bekannten Glockenspieles zu Salzburg wurden im 17. Jh. in den Niederlanden gegossen und sind ebenfalls in der Niederländischen Rippe konstruiert – das wohl berühmteste und für Jahrhunderte auch das einzige Beispiel dieser Glockenform in Österreich.



Abb. 46: „Große Triumphanten-Glocke“ (Gent); geg. 1660 durch Pieter Hemony (ca. 6000 kg). Eine der bedeutendsten Glocken Belgiens, leider 1914 gesprungen.

3.4.6 Die „Barockrippe“ (ca. 1600 – 20. Jh.)

Die „Barockrippe“ besitzt einen gedrungenen und wuchtig wirkenden Glockenkörper. Charakteristisch für sie ist der hochliegende, stark betonte Schlagring. Dieser ist oft ziemlich massiv konstruiert und wird durch einen Knick oder Buckel hervorgehoben. An der Schulter dagegen ist die Wandstärke relativ gering. Ihre Rippenstärke liegt wie bei den Sekundärformen im Bereich von $RS = -5$ bis 10 , sie ist daher ebenfalls mittelschwer (vergl. Diagramm 4). Da Glocken in Barockform in der Regel niedriger sind als solche in manieristischer bzw. spätgotischer Rippe, ist ihre Rippenschwere auch dementsprechend geringer. Dies führte in der Glockenkunde zum falschen Schluß, daß Glocken in Barockform besonders leichtrippig seien. Grund für diesen Irrtum ist die falsche Methode, Rippenstärken nach dem Gewicht zu bestimmen (siehe Kapitel 3.2.2). Die Barockrippe ist besonders im unteren Teil des Mantels stark geschweift, weshalb sie meist dem Septim- oder Sexttyp zugehört, sehr oft mit vertiefter Prim. Oktav- und Nontyp dagegen sind äußerst selten. Die Barockrippe neigt aufgrund der Form (Schlagringbereich) zu blecherner Tongebung (hoher Geräuschanteil), besonders in mittleren und höheren Tonlagen. In tiefen Tonlagen besitzt sie dagegen oft einen wuchtigen und kräftigen vollen Klang.

Die Barockform ist in den Jahren um 1600 entstanden und um 1630 finden sich die ersten voll ausgeprägten Exemplare. Ihr Ursprung liegt in Österreich, Bayern und Ostdeutschland und hat sich bis um 1700 im größten Teil des deutschen Sprachraumes und den nördlich und östlich angrenzenden Ländern relativ schnell verbreitet. Die Barockform war in diesen Ländern über 200 Jahre die dominierende Glockenform. In Westeuropa, England, Rußland, Italien und auch Spanien dagegen findet man sie nicht. Erst im Laufe des 20. Jh. wurde die klassische Barockform als Septimglocke in Deutschland, Österreich und der Schweiz durch die Einführung der modernen Glockenrippen (= Oktavglocken) abgelöst bzw. durch Formänderungen in reine Oktavglocken umgewandelt. In dieser neugestalteten, „modifizierte Barockform“, die bis auf den Glockentyp (reiner Oktavtyp) dieselben Eigenschaften wie die alte Barockform besitzt, wird sie in diesen Ländern bis heute weiterverwendet. Vor allem in Österreich und Bayern ist der Anteil der Glocken in Barockform relativ hoch. In den Ostblockstaaten findet die klassische Barockform als Septimglocke sogar heute noch teilweise Anwendung (z.B. in Ungarn).

Die Barockrippe ist aus gewissen Sonderformen der gotischen Rippe entwickelt worden und stellt somit einen Spezialfall einer sekundären Glockenform dar. So finden sich z.B. in Ostdeutschland, einem Ursprungsgebiet der Barockrippe, schon im Mittelalter Glocken, welche der Barockform ziemlich ähnlich waren (Abb. 47). Aber auch in manchen anderen Gußorten (etwa in Bayern) war im späten Mittelalter (16. Jh.) der Gebrauch von spätgotischen Glockenrippen mit relativ hochliegendem Schlagring und stärkerer Schweifung recht beliebt, die der Barockrippe manchmal ziemlich nahe kommen. Durch Weiterentwicklung (Verstärkung) dieser Stiltendenzen ist aus diesen lokal verbreiteten „gotischen Barockformen“ in den Jahrzehnten um 1600 und danach die Barockrippe entstanden. Bei einigen Glockengießern kann man im Laufe ihres Schaffens diese Entwicklung deutlich erkennen (Abb. 48) Manchmal sehen sich frühe Barockglocken, bei denen die charakteristischen Merkmale noch nicht so stark ausgeprägt sind, und Glocken in manieristischer Rippe recht ähnlich.

Das Verlangen, die Glockenform dem neuen Stil (= Barock) entsprechend anzupassen, aber auch veränderte klangliche Vorstellungen dürften wohl als Hauptgrund für die Entwicklung und Verbreitung der Barockform betrachtet werden. Stark geschwungene, Dynamik und Bewegung vermittelnde Architektur- und Zierformen sind ein Kennzeichen des Barocks, was man offensichtlich auch auf die Glockenrippe übertragen hat und so deren starke Schweifung erklären könnte (in der Tat hat die Barockform gewisse Ähnlichkeiten mit einem barocken Volutengiebel). Und ein wuchtiger und markiger Glockenklang, der bei der Barockrippe besonders deutlich in Erscheinung tritt, dürfte dem barocken Geschmack ebenfalls mehr entsprochen haben als der

weiche, volle Klang von gotischen Glocken. Für diese Annahme sprechen vor allem die sehr schwer konstruierten, mit langen Vorschwüngen versehenen Klöppel der Barockzeit, die einen besonders kräftigen und markigen Klang erzeugen (siehe dazu das Kapitel 6.4.1 und Abb. 50).

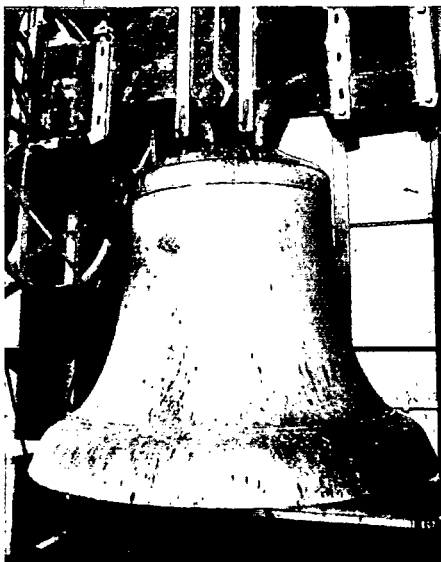


Abb. 47: „Gotische Barockform“ (Dom zu Halberstadt in Ostdeutschland, „Osanna“ aus dem Jahre 1454, Dm 198.5 cm)

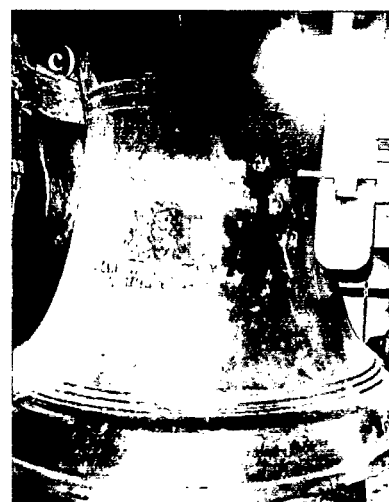
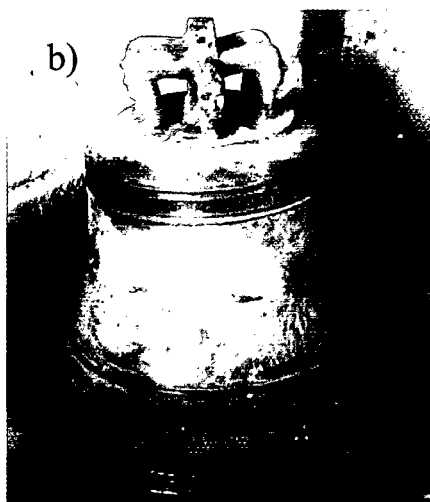
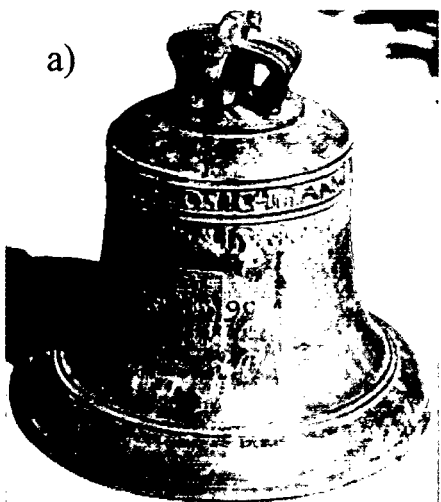


Abb. 48a-c: Entwicklung der Barockform aus Sonderformen der gotischen Rippe. Gezeigt sind Werke des Glockengießers *Hans Lang* aus Steyr (Oö). Die früheren Glocken dieses Gießers besitzen noch eine gedrungene gotische Form, die unten stark ausladend ist (a: Glocke von Niederranna aus 1590), eine sog. „gotische Barockform“. Später wurde der Schlagring erhöht und stärker betont konstruiert (b: Glocke von Weitra, aus 1606). Die große Glocke von Randegg aus 1629 zeigt schon die voll ausgeprägte, klassische Barockform (c), sie gehört zu den ältesten Exemplaren dieser Art in Österreich.

Bezüglich der Barockform sind in der Glockenkunde teils drastische Irrtümer verbreitet. Als Grund für die Entwicklung und Verbreitung der Barockform wird hier der 30-jährige Krieg (1618-48) verantwortlich gemacht; so wird behauptet, daß die Barockform aufgrund eines kriegsbedingten Verlustes der mittelalterlichen Gießervertradition entstanden sei^{21) 22)}. Es läßt sich allerdings nicht nachweisen, ob der 30-jährige Krieg die Entwicklung der Barockform in irgendeiner Weise beeinflusst hat; jedenfalls man kann von einem Verfall oder Abbrechen der mittelalterlichen Glockengießervertradition zu jener Zeit keinesfalls sprechen, welche die Entwicklung der Barockrippe herbeigeführt haben soll; die mittelalterliche Gußtradition ist nämlich schon im 16. Jh.

verschwunden (Renaissance - Entwicklung der Sekundärformen), und teilweise ist die Barockform auch in solchen Gebieten entwickelt worden, die vom 30-jährigen Krieg entweder nur am Rande oder gar nicht betroffen waren (wie etwa in Österreich; siehe Abb. 46, Hans Lang zu Steyr).

Obwohl Glocken in Barockform aufgrund ihrer geringeren Höhe eine niedrigere Rippenschwere aufweisen, dürfte die damit verbundene Kostenersparnis, begünstigt durch die wirtschaftlichen Notzeiten während des 30-jährigen Krieges, für die Entwicklung der Barockrippe quasi als „Sparversion“ nicht ausschlaggebend gewesen sein. Denn die frühen Versionen der Barockform aus dem 17. Jh. unterscheiden sich bezüglich der Rippenschwere oft nur wenig von Glocken in manieristischer bzw. spätgotischer Rippe (vor allem von der gotischen Barockform, aus denen sich die Barockform entwickelt hat), während ziemlich niedrige und auch eher leichtrippige Barockformen mit relativ geringer Rippenschwere erst im 18. und 19. Jh. verstärkt verwendet wurden. Es läßt sich kein wirklich signifikanter Wechsel zu verringerten Rippenschweren und vor allem geringeren Rippenstärken (siehe Diagramm 4) zur Zeit der Entstehung der Barockform (1. H. 17. Jh.) feststellen, der ihre Entwicklung als kostengünstige „Sparversion“ bekräftigt.

Völlig irrig ist die Ansicht, daß die Barockform von lothringischen Wandergießern eingeführt wurde und sich daher von der französischen Rippe ableiten bzw. mit ihr ident sein soll^{21) 23)}. Die französische Rippe ist konstruktionsmäßig nämlich das blanke Gegenteil der Barockform, weshalb schon aus diesem Grund diese Behauptung unrichtig ist.

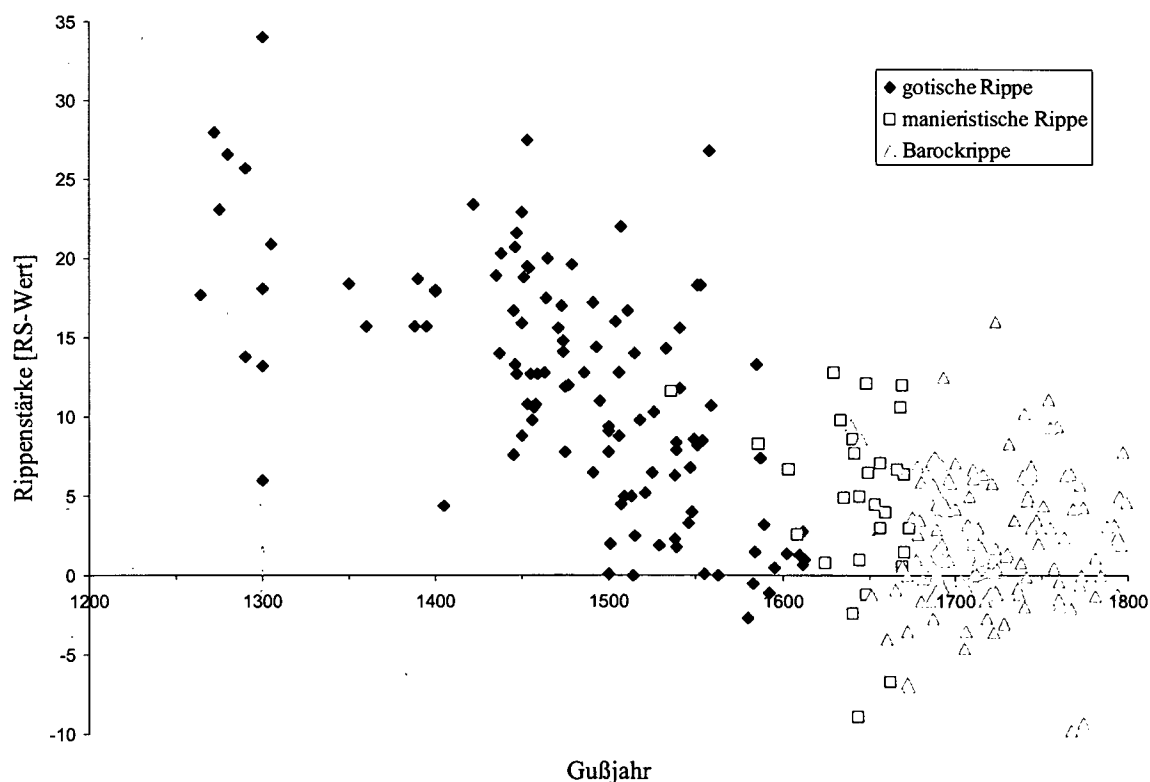


Diagramm 4: Änderung der Rippenstärke von Glocken im Zeitraum vom 13. bis 18. Jh. Die Konstruktion der Glocken wird durch die Art der Punktdarstellung angezeigt. Dargestellt sind hier Glocken aus der Steiermark und Kärnten, weil hier noch ein relativ geschlossener historischer Glockenbestand vorhanden ist.

Zu den schönsten und bedeutendsten Exemplaren in Barockrippe (sowohl „klassisch“ als auch modifiziert) zählen:

- Klosterneuburg, Stiftsk. (Nö), „*Leopoldiglocke*“ von Leonhard Löw (Gj: 1644, Dm: 202 cm)
- Dom zu Maria Saal (Ktn), „*Maria Saalerin*“ von Mathias Landsmann (Gj: 1687, Dm: 222 cm)
- Görlitz, Peter & Paulsk., gr. Glocke von Joachim Hannibal Brors (Gj: 1697, Dm: 277 cm), leider 1917 zerschlagen – Abb. 50
- Dom zu Magdeburg, „*Maxima*“ von Johann Jacobi (Gj: 1702, Dm: 247.0 cm)
- Weimar, Schloß, gr. Glocke von Nikolaus Jonas Sorber, Gj: 1712 (Dm: 233.0 cm)
- Stiftskirche St. Florian (Oö), „*Angstglocke*“ von Mathias Prininger, Gj: 1717 (Dm: 244.3 cm) – Abb. 49
- Dom zu Freising (Bayern), „*Korbinian*“ von Langenegger & Ernst (Gj: 1724, Dm: 206 cm)
- Stiftskirche Melk (Nö), „*Vesperin*“ von Andreas Klein, Gj: 1739 (Dm: 236 cm)
- Feldkirch, Katzenturm (Vbg), „*Katzenturm-glocke*“ von Josef Anton Graßmayr (Gj: 1857, Dm: 243 cm)
- Kölner Dom, „*Kaiserglocke*“ von Andreas Hamm (Gj: 1874, Dm: 342 cm), 1918 eingeschmolzen
- Neuer Dom zu Linz (Oö), „*Immaculata*“ von Anton Gugg (Gj: 1901, Dm: 238 cm)
- Bregenz, St. Gallus (Vbg), „*Marienglocke*“ von Hamm & Hartner (Gj: 1954, Dm: 211 cm) – modifizierte Barockform
- Dom zu Salzburg (Sbg), „*Salvatorglocke*“ von Oberascher (Gj: 1961, Dm: 279 cm) – modifizierte Barockform – Abb. 51

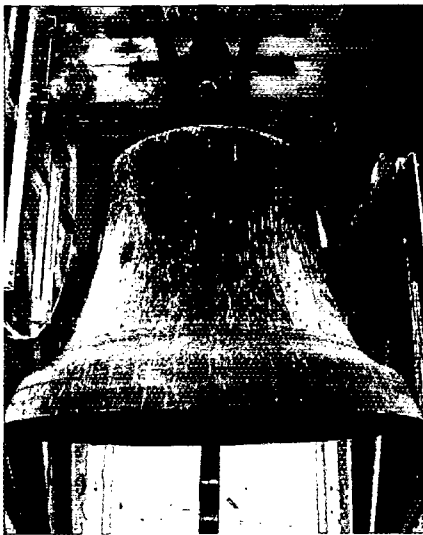


Abb. 49: „Angstglocke“



Abb. 50: Görlitz, St. Peter & Paul

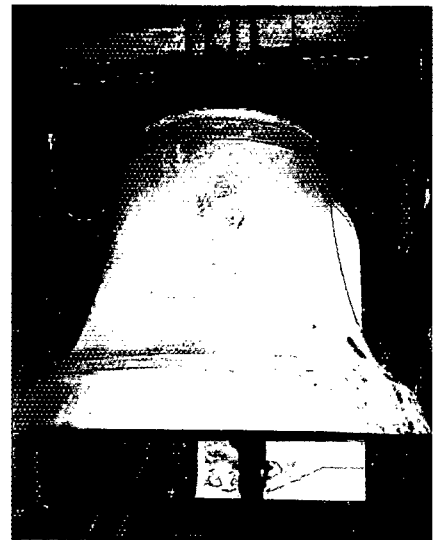


Abb. 51: „Salvatorglocke“

3.4.7 Die „Modernen Rippen“ (ca. 1850 – heute)

Der Begriff „*M o d e r n e R i p p e n*“ ist eine Zusammenfassung für alle Glockenformen, die seit der Mitte des 19. Jh. völlig neu erschaffen worden sind, meist in dem Ziel, einen bestimmten Teiltonaufbau (Moll-/ Duroktavglocke, Untermollsextglocke) zu erzeugen. Das Propagieren eines idealen musikalischen Klangaufbaues (sprich reine Oktavglocke) ab Ende des 19. Jh. ist als ein Hauptgrund der Entwicklung der modernen Glockenrippen in Deutschland und Österreich zu werten (vergl. Kapitel 2.5.1). Zu den modernen Rippen zählen auch die Stahlglocken, denn ihre

Konstruktion muß die speziellen Eigenschaften dieses Werkstoffes berücksichtigen. Rippen von Stahlglocken unterscheiden sich stark von den Rippen von Bronzeglocken (Stahlglocken sind wesentlich dünnwandiger). Moderne Rippen sind entweder völlige Neukonstruktionen oder haben bestimmte historische Glocken (in der Regel die gotische Rippe) zum Vorbild. Die meisten modernen Bronzeglocken sind von mittlerer Rippenstärke (RS-Werte von 0 bis 6) und konstruktionsmäßig am ehesten mit der spätgotischen oder manieristischen Rippe vergleichbar. Ihre Tongebung ist hell / weich, sie neigen aber bisweilen zu scharfer Obertönigkeit. Die Stahlglocken werden im Kapitel 4.6 genauer besprochen.

Glocken in modernen Rippen sind vor allem im deutschen Sprachraum (Deutschland, Österreich) verbreitet, u.a. deshalb, weil sie von dort ihren Ausgang hatten. In anderen Ländern sind sie dagegen selten, besonders in den Gebieten, wo Sekundärformen weiter verwendet wurden (Frankreich, Großbritannien, Niederlanden). Die Erfindung der Stahlglocke um 1850 in Deutschland bzw. der Guß des Frankfurter Domgeläutes im Jahre 1877 sind als Beginn der Entwicklung der modernen Glockenrippen aufzufassen. Für das Frankfurter Geläute wurde nachweislich die *Gloriosa* im Erfurter Dom, die als Inbegriff einer wohlklingenden Glocke gilt, vermessen²³). Viele Gießereien folgten diesem Beispiel und entwarfen moderne Glockenrippen nach dem Vorbild dieser berühmten Erfurter Glocke (besonders deutlich bei den Firmen *Schilling-Apolda* und *Ulrich*, beide Deutschland). Andere Gießereien konstruierten völlig neue Glockenformen; herausragend in dieser Hinsicht sind vor allem *F. W. Schilling* (Heidelberg), *Karl Stumpf* in der Karlsruher Glockengießerei, der *Bochumer Verein* (Stahlglocken) sowie *Perner* in Passau. Die drei letzten schufen als erste auch Duroktavglocken. Die Verwendung von modernen Glockenrippen in Österreich fand erst nach dem Ersten Weltkrieg statt (erstmalig 1917). Hier zeichneten sich besonders *Pfundner* und *Böhler* durch Neukonstruktionen aus.

Zu den größten und berühmtesten Exemplaren in moderner Rippe gehören:

- die „*St. Petersglocke*“ im Kölner Dom (Heinrich Ulrich, Gj. 1923; Dm: 322 cm) – Abb. 53
- die „*Pummerin*“ im Wiener Stephansdom (St. Florian, Gj: 1951, Dm: 314 cm)
- die „*Gloriosa*“ im Frankfurter Dom (Hermann Große, Gj: 1877, Dm: 258.5 cm) – Abb. 52
- die „*Kaiserglocke*“ von Neustadt / Weinstraße, Deutschland (Stahlglocke - Bochumer Verein, Gj: 1949, Dm: 321 cm)



Abb. 52: „*Gloriosa*“ (Frankfurter Dom)

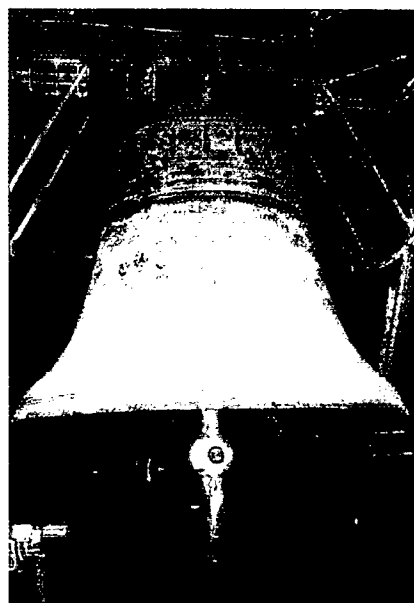


Abb. 53: „*St. Petersglocke*“

Die heutigen „italienischen Rippen“ entstanden im Verlauf der Barockzeit aus den Zuckerhutglocken und sind den modernen Rippen, wie sie im deutschen Sprachraum verwendet werden, sehr ähnlich. Dem Äußeren nach kommen sie der manieristischen Rippe am nächsten; ihre Rippenstärke ist in der Regel mittel bis leicht. Glocken in italienischer Rippe gehören dem reinen Oktavtyp an und besitzen helle Tongebung, neigen aber bisweilen zu blechernem Klang (vor allem die dünnwandigeren Versionen). Diese italienischen Rippen sind in Oberitalien gängig, in Süditalien dürften dagegen noch längliche Glockenformen verwendet werden. In Italien sind praktisch alle Glocken entweder in italienischer Rippe oder in zuckerhutartigen Formen gegossen; andere Glockenrippen findet man dort kaum.

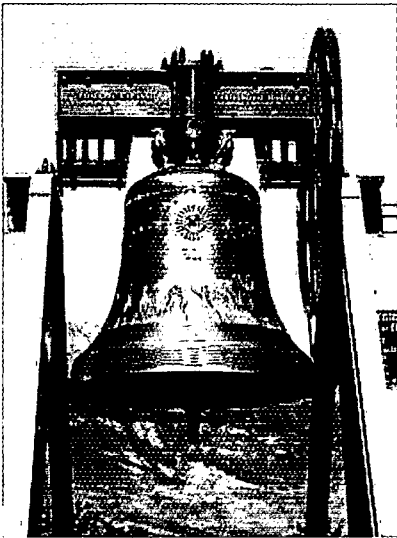


Abb. 54: Typische Glocke in italienischer Rippe (Friedensglocke „Maria Dolens“ zu Rovereto, Dm 321 cm – größte Glocke Italiens).

In S p a n i e n wurden und werden heute noch die verschiedensten Rippen kunterbunt durcheinander verwendet (sogar Bienenkorb- und Zuckerhutglocken!), ohne daß sich irgendeine Systematik finden ließe. Zudem herrschen hier starke regionale Unterschiede vor. Über die Glocken anderer Länder (z.B. Rußland) sind zu wenige Unterlagen vorhanden, um bestimmte Aussagen bezüglich der dort verwendeten Rippen zu machen.

Eine spezielle Glockenform sind die sogenannten S c h e l l e n , sehr gedrungene, manchmal sogar kallottenförmige Glocken, die nur dem Uhrs Schlag dienen.



Abb. 55: Schelle

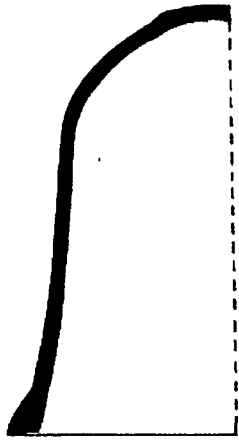
In der folgenden Tabelle sind abschließend die Eigenschaften (Relativmaße, Rippenstärke, Rippenschwere, Dimensionierung) der wichtigsten charakteristischen Glockenformen zusammengefasst, in Abb. 56 sind dagegen die Rippenprofile dieser Glockenformen graphisch dargestellt.

Glockenform	dm [-]	sh [-]	Sr [-]	RS [-]	m _{RS} [kg]
Bienenkorbform	60 - 80	70 - 80	4,0 - 10,0	-30 bis 30	320 - 900
-ältere	„	„	4,0 - 7,0	<0	320 - 600
-jüngere	„	„	7,0 - 10,0	>0	600 - 900
Zuckerhutform	47 - 53	90 - 110	6,0 - 11,0	- 20 bis 50	650 - 1300
Übergangsformen	50 - 60	70 - 90	7,0 - 10,0	-10 bis 50	500 - 1100
Gotische Rippe	52 - 58	72 - 80, meist > 75	7,1 - 8,7	0 bis >30	550 - 900
- hochgotisch	„	„	meist um 8,0	meist 10 - 20	650 - 900
- spätgotisch	„	„	meist um 7,3	meist 0 - 10	550 - 650
Manieristische Rippe (Sekundärform)	52 - 56	71 - 80	7,1 - 8,0	-5 bis 10	550 - 650
Barockrippe	51 - 56	69 - 78, meist < 74	7,1 - 8,5	-5 bis 10	500 - 620
Moderne Rippen					
- Bronzeglocken	54 - 55	76 - 78	7,1 - 7,3	0 - 5	600 - 650
- Stahlglocken	54 - 55	77 - 85	5,3 - 5,8	-25 bis -15	380 - 450

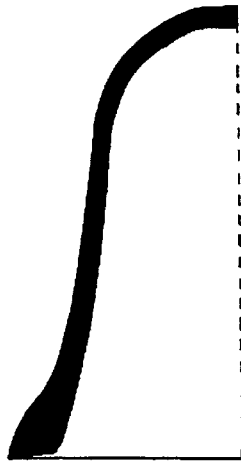
Tabelle 3: Eigenschaften von charakteristischen Glockenrippen

Abb. 56a-l: Rippenprofile von charakteristischen Glockenformen. Den Rippenaufritten liegen vermessene Glocken zugrunde. Die Skizzen sind maßstabgetreu als Relativmaße wiedergegeben, ein direkter Vergleich ist daher möglich.

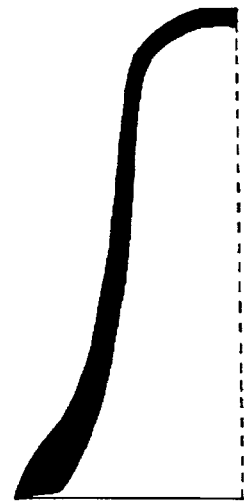
- a) Ältere Bienenkorbform
- b) Jüngere Bienenkorbform
- c) Zuckerhutform
- d) Gedrungene Übergangsform
- e) Längliche Übergangsform
- f) Gotische Rippe (hochgotische Version)
- g) Gotische Rippe (spätgotische Version)
- h) Manieristische Rippe
- i) Französische Rippe
- j) Barockrippe
- k) Moderne Rippe (Bronzeglocke)
- l) Moderne Rippe (Stahlglocke)



a) ältere Bienenkorbform



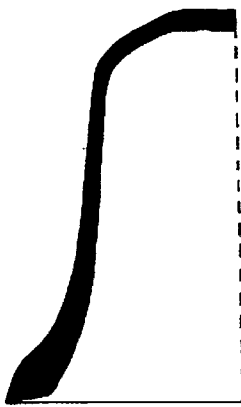
b) jüngere Bienenkorbform



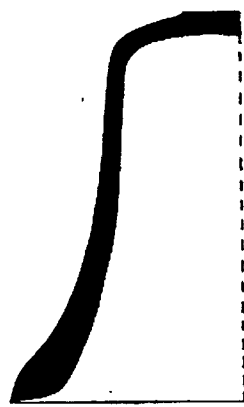
c) Zuckerhutform



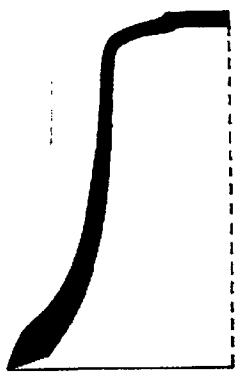
d) längliche Übergangsform



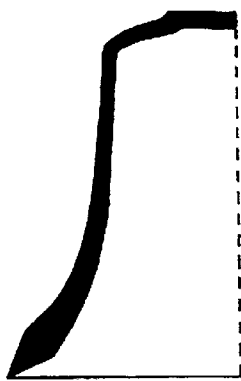
e) gedrungene Übergangsform



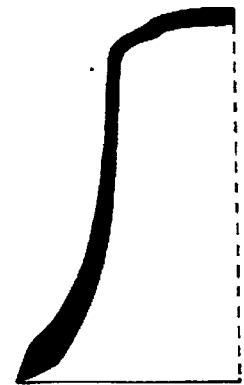
f) gotische Rippe (hochgotisch)



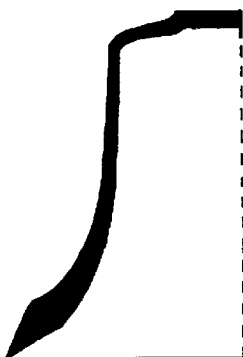
g) gotische Rippe (spätgotisch)



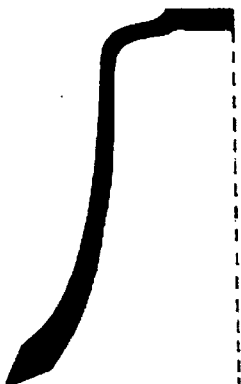
h) manieristische Rippe



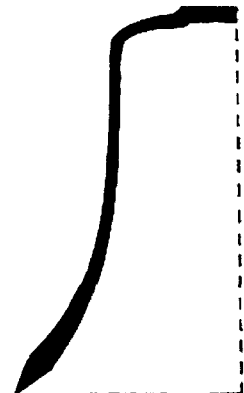
i) französische Rippe



j) Barockrippe



k) moderne Rippe (Bronzeglocke)



l) moderne Rippe (Stahlglocke)

4. Glockenwerkstoffe

Um für den Glockenguß verwendet zu werden, muß ein Metall oder eine Legierung bestimmte Anforderungen erfüllen, oder anders ausgedrückt, es muß bestimmte **W e r k s t o f f e i g e n - s c h a f t e n** besitzen. Diese sind ziemlich zahlreich, und es sollen nun die für Glockenmetalle am wichtigsten Werkstoffeigenschaften näher betrachtet werden. Zwecks besserer Übersicht empfiehlt es sich, diese in der Glockenkunde in folgende drei Gruppen einzuteilen:

- Akustische Eigenschaften
- Mechanische Eigenschaften
- Korrosionsbeständigkeit

4.1.1 Akustische Eigenschaften

Unter diesem Begriff fast man alle Werkstoffeigenschaften zusammen, die einen Einfluß auf das Klangverhalten der Glocke ausüben. Es handelt sich hier im speziellen um die **M a t e r i a l - d ä m p f u n g** und um die sog. „**I n n e r e T o n h ö h e**“. Die Akustischen Eigenschaften eines Glockenwerkstoffes haben, weil sie das Klangverhalten einer Glocke direkt beeinflussen, eine besonders hohe Bedeutung; der „beste“ Werkstoff (in mechanischer Hinsicht) ist für den Glockenguß ungeeignet, wenn er nicht „klingt“!

Materialdämpfung

Es ist schon aus dem täglichen Leben bekannt, daß jede Schwingung zeitlich und räumlich „abklingt“. Dieses Abklingen der Vorgänge wird im allgemeinen als Dämpfung bezeichnet. Die Dämpfung von mechanischen Schwingungen (Vibrationen) in Festkörpern erfolgt durch Vorgänge im Festkörper, die man als innere Reibung oder **M a t e r i a l d ä m p f u n g** bezeichnet. Die Schwingungen, welche in Glocken auftreten, besitzen Frequenzen, die im Bereich der Hörfähigkeit des menschlichen Ohres liegen (d.h. ca. 20 – 20 000 Hz). In diesem Frequenzbereich beruht die Dämpfung auf Wärmeleitungseffekten zwischen Gebieten verschiedener Dehnung, aber auch auf Versetzungsvorgängen²⁴⁾. Diese physikalischen Vorgänge, welche die innere Dämpfung von Metallen bewirken, sind sehr verwickelt und auch noch nicht ganz erforscht. Bei sehr niedrigen Frequenzen (unter 1 Hz) erfolgt die Dämpfung durch andere Mechanismen, die aber bei Glocken nicht von Bedeutung sind.

Die Materialdämpfung ist keine konstante Materialeigenschaft, da sie durch Veränderungen im Gefüge (Verformung, Wärmebehandlung), von inneren Spannungen, von der Korngröße etc. teilweise recht stark beeinflusst wird. Der Anteil von Legierungsbestandteilen bzw. Verunreinigungen kann ebenfalls zu Veränderungen im Dämpfungsverhalten führen. Auch weist die Materialdämpfung eine Abhängigkeit sowohl von der Temperatur als auch von der Frequenz auf. Doch sowohl im Frequenzbereich, in welchem die wichtigsten Teiltöne von Kirchenglocken liegen (ca. 100 bis 5000 Hz), als auch im Temperaturbereich, dem Kirchenglocken ausgesetzt sind (ca. -20 bis + 50 ° C) kann man die Materialdämpfung als konstant ansehen^{10) 25)}.

Es gibt verschiedene Methoden, die Dämpfung zu charakterisieren. In der Glockenkunde wird hierfür das **l o g a r i t h m i s c h e D e k r e m e n t δ** verwendet. Es ist definiert aus den Amplitudenabnahmen pro Periode. Ist also A_n der zu irgendeiner Zeit gemessene Maximalausschlag und A_{n+1} der Maximalausschlag eine Periode später, dann gilt für das logarithmische Dekrement δ

$$\delta = \ln \left(\frac{A_n}{A_{n+1}} \right) \quad \text{Glg. 26}$$

Der Materialdämpfung indirekt proportional ist die Nachhallzeit, d.h. der Zeitraum vom Anschlag bis zum endgültigen Verstummen des Nachhalles (= Gesamtdauer des Glockenklanges; nicht zu Verwechseln mit der Tonfülle, die nur die Länge des Schlagtones beinhaltet). Je länger die Nachhalldauer, desto geringer ist die Materialdämpfung. Zwischen Nachhalldauer und der Materialdämpfung besteht folgender logarithmischer Zusammenhang: Bei Verdoppelung der Dämpfung (logarithmisches Dekrement δ) halbiert sich die Nachhalldauer. Anhand der Nachhalldauer kann man die Materialdämpfung einer Glocke – wenn auch nur ziemlich grob – annähernd abschätzen. Die Limburger Richtlinien hat für die verschiedenen Glockenwerkstoffe (Bronze, Sonderbronze, Stahl, Gußeisen) Mindestnachhallzeiten festgelegt, die damit eine gewisse Orientierung bezüglich der Materialdämpfung bieten. Mittels Klanganalyse am Computer ist es jedoch möglich, das logarithmische Dekrement δ und damit die Materialdämpfung der Glocke direkt zu bestimmen¹¹⁾.

Die Materialdämpfung eines Glockenwerkstoffes sollte möglichst klein sein. Der maximale Materialdämpfungswert, bei dem ein Material für den Glockenguß noch halbwegs brauchbare Ergebnisse (sprich akzeptable Tonfülle) liefert, hängt von der Dimensionierung der Glocke ab. Für niedrig- und normaldimensionierte Stücke liegt dieser Grenzwert um $\delta = \text{ca. } 7 * 10^{-4}$. Bei hochdimensionierten Glocken kann die Materialdämpfung höher sein, weil hier die geringere Strahlungsdämpfung kompensierend wirkt, wodurch die Tonfülle auch bei geringen Nachhallzeiten ausreichend bis groß ist. In diesem Falle sind auch Materialien mit Materialdämpfungswerten bis zu maximal $\delta = \text{ca. } 12 * 10^{-4}$ noch brauchbar. Werkstoffe, die eine noch höhere Materialdämpfung aufweisen, sind für den Glockenguß nicht mehr geeignet. Die meisten Glocken weisen eine Materialdämpfung auf, die sich im Bereich von ca. $\delta = 3-10 * 10^{-4}$ befindet.

„I n n e r e T o n h ö h e“

Die Tonhöhe (Eigenfrequenz) eines Körpers hängt allgemein von seiner Größe, von seiner Form (Konstruktion) und vom Material, aus welchem er besteht, ab. So besitzt z.B. eine größere Glocke eine tiefere Tonlage als eine kleinere, und von zwei Glocken, die den gleichen Durchmesser besitzen (also gleich groß sind) besitzt die schwerrippigere (d.h. die dickwandigere) eine höhere Tonlage als die leichtrippigere (= dünnwandigere). Wenn jedoch zwei Glocken gleich groß sind und auch völlig gleich konstruiert sind (d.h. gleiche Rippe), aber aus unterschiedlichen Materialien bestehen (z. B. Stahl – Bronze), so können sie ebenfalls unterschiedliche Tonlagen besitzen (in diesem Falle ist die Stahlglocke höher als die Bronzeglocke). Dieser Einfluß des Werkstoffes auf die Tonhöhe, der eigentlich bis heute keinen eigenen Namen besitzt, wird im folgenden als „I n n e r e T o n h ö h e“ bezeichnet¹¹⁾.

Als Maß für die Innere Tonhöhe kann man die Schallgeschwindigkeit s heranziehen¹⁰⁾. Sie ist definiert als

$$s = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Glg. 27

wobei E Elastizitätsmodul
 ρ Dichte des Werkstoffes

Dichte und Elastizitätsmodul sind ziemlich unabhängig von der Vorgeschichte eines gegebenen Werkstoffes (Wärmebehandlungen, Verformungen . . .), der Dauer der Beanspruchung, von der Frequenz etc.²⁴⁾. Auch im Temperaturbereich, dem Kirchenglocken normalerweise ausgesetzt sind (siehe oben) kann man die Schallgeschwindigkeit und damit die Innere Tonhöhe als praktisch konstant betrachten²⁵⁾. Das Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten von unterschiedlichen Materialien ($s_1 : s_2$) gibt an, um wieviel höher oder tiefer im Ton der eine Werkstoff im Vergleich zum anderen ist²⁶⁾; denn die durch die Schallgeschwindigkeiten ermittelte Verhältniszahl ist ident mit den musikalischen Verhältniszahlen der Intervalle. So entspricht z.B. ein Schallgeschwindigkeitsverhältnis von $s_1 : s_2 = 1,189$ dem Intervall einer Mollterz: Werkstoff 1 ist im Ton um eine Mollterz höher als Werkstoff 2.

Die Innere Tonhöhe beeinflusst sehr stark die Dimensionierung und damit auch die Tonfülle der Glocke, denn mit steigender inneren Tonhöhe nehmen sowohl Dimensionierung als auch Tonfülle zu. Eine hohe Tonfülle ist besonders vorteilhaft, eine große Dimensionierung – weil hochdimensionierte Glocken viel Platz im Turm benötigen – dagegen weniger, weshalb es schwer zu sagen ist, ob eine hohe oder niedrige Innere Tonhöhe eines Werkstoffes für den Guß von Glocken am günstigsten ist, weil beides gleichzeitig Vor- und Nachteile besitzt. Werkstoffe auf Kupferbasis (Bronzen, Messinge) besitzen annähernd gleiche Innere Tonhöhen, entsprechend Schallgeschwindigkeiten um 3500 m/s. Die Unterschiede bezüglich der in einem Rahmen liegen, der musikalisch ausgedrückt etwas weniger als ein Ganzton beträgt. Werkstoffe auf Eisenbasis (Stahl, Gußeisen) weisen dagegen wesentlich höhere Schallgeschwindigkeiten auf, die bis über 5000 m/s betragen können, oder musikalisch ausgedrückt um bis zu einer Quinte höher im Ton sind als Werkstoffe auf Kupferbasis.

4.1.2 Mechanische Eigenschaften

Diese Gruppe faßt diejenigen Eigenschaften eines Werkstoffes zusammen, die sein Verhalten gegenüber mechanischer Belastung (Druck, Zug, Stoß etc.) charakterisieren. Vordergründig sollen hier Festigkeit, Härte und Zähigkeit behandelt werden.

Festigkeit

Als Festigkeit bezeichnet man den Widerstand, den ein Werkstoff einer Formänderung und damit einem Bruch entgegensetzt. Je höher die Festigkeit eines Materials ist, desto schwerer bricht es. Als Maß hierfür dient die Zugfestigkeit R_m , die im Rahmen eines Zugversuches ermittelt wird. Die Zugfestigkeit sollte bei einem Glockenwerkstoff naturgemäß hoch sein. Sie beträgt für technische Metalle zwischen ca. 15 N/mm² (reines Blei) bis 4500 N/mm² (martensitaushärtende Stähle)²⁷⁾. Die geläufigen Glockenwerkstoffe (Bronze, Sonderbronze, Stahl, Gußeisen) besitzen Festigkeitswerte zwischen 100 und 700 N/mm².

Die Festigkeit ist bei wechselnder Beanspruchung (z.B. bei Schwingungen, Vibrationen) aufgrund Ermüdungseffekte kleiner als die unter konstanter Belastung; dies hängt nicht nur vom Werkstoff selbst ab, sondern vor allem auch von der Stärke und Dauer der Schwingbeanspruchung sowie von Defekten wie Kerben und Mikrorissen. Die **Schwingfestigkeit** wird durch sog. Wöhlerkurven ermittelt, die experimentell aus Schwingungsversuchen gewonnen werden. Das Gebiet der Schwingfestigkeit ist um einiges komplizierter als die der statischen Festigkeit, und Kennwerte sind dementsprechend schwieriger zu erhalten; weil gerade Glocken schwingend beansprucht werden, hat hier die Schwingfestigkeit eine höhere Bedeutung als die statische Festigkeit. Allerdings gibt es hierzu bei Glocken praktisch keine Untersuchungen.

Härte

Härte dagegen ist der Widerstand eines Werkstoffes gegen plastische Verformung, wenn ein anderer Körper in ihm eindringt, also eine Festigkeitseigenschaft oberflächennaher Bereiche. Härte ist u.a. ein Maß für den Verschleiß; je höher die Härte desto geringer ist die Abnutzung. Es gibt zahlreiche Verfahren, die Härte zu ermitteln; sehr verbreitet sind die Härteprüfverfahren nach **Brinell** (HB) und nach **Vickers** (HV), bei denen ein Prüfkörper eine Eindruckstelle in der Probe hinterläßt, welche als Maß für die Härte herangezogen wird; beim Brinell-Verfahren ist der Prüfkörper eine Stahlkugel, beim Vickers-Verfahren hingegen eine Diamantenpyramide. Härtewerte nach Brinell und Vickers sind – allerdings nur in einem gewissen Rahmen – miteinander vergleichbar. Eine hohe Härte ist für einen Glockenwerkstoff aufgrund der Abnutzung, die durch den Klöppelanschlag hervorgerufen wird, von Vorteil. Bei zu geringer Härte ist der Verschleiß dementsprechend hoch, und die Glocke schnell „ausgeschlagen“. Wichtig ist nicht so sehr die absolute Härte des Glockenwerkstoffes, sondern der Härteunterschied zwischen Glocke und Klöppel; letzterer sollte eine geringere Härte als die der Glocke aufweisen, wodurch der Verschleiß auf ein Minimum reduziert wird (ein Klöppel ist überdies leichter zu ersetzen als eine Glocke!).

Zähigkeit

Unter plötzlicher Belastung (z.B. ein Stoß) kann es vorkommen, daß ein Material schon bei geringerem Kraftaufwand bricht, als es seine Festigkeit erlaubte. Das Bruchverhalten eines Werkstoffes unter schlagartiger Krafteinwirkung wird auch als Zähigkeitsverhalten oder nur **Zähigkeit** genannt. Werkstoffe, die unter stoßartiger Beanspruchung schwer brechen, nennt man allgemein **zäh**; Werkstoffe, die unter diesen Bedingungen leicht brechen, sind hingegen **spröde**. Zur Untersuchung des Bruchverhaltens wird sehr oft der Kerbschlagbiegeversuch angewandt; die hierbei ermittelte **Schlagarbeit** K bzw. Schlagzähigkeit dient als Maß für das Zähigkeitsverhalten eines Körpers. Die Größe der Schlagarbeit ist sehr stark von der Probenform abhängig, was beim Vergleich von verschiedenen Schlagarbeiten stets beachtet werden muß. Da Glocken stets schlagartiger Belastung ausgesetzt sind (Klöppelanschlag!), spielt das Zähigkeitsverhalten eines Glockenwerkstoffes eine dementsprechend große Rolle; je spröder das Metall, desto höher die Wahrscheinlichkeit, daß die Glocke zerspringt. Ein möglichst zäher Werkstoff ist daher beim Glockenguß von Vorteil.

Werkstoff	Bronze	Briloner Sonderbronz	Euphon (Sondermessing)	Gußstahl	Hartguß (Gußeisen)	Zinklegierung (Weißbronz)
Zusammensetzung [%]	80 Cu / 20 Sn	92 Cu / 7 Si / 1 Zn	81 Cu / 14 Zn / 5 Si	0,45 C / 0,25 Si / 0,65 Mn	3 C / 0,5 Si / 1,2 Mn	95 Zn / Rest Al & Cu
Schmelzbereich [°C]	800 - 900	*)	um 1000	1450 - 1550	1150 - 1350	380 - 400
Dichte [g/cm ³]	8,9	8,1	8,1	7,8	7,2 - 7,4	7,0 - 7,1
Elastizitätsmodul [N/mm ²]	~ 95 000	~ 110 000	~ 105 000	~ 205 000	~ 140 000	~ 90 000
Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]	180	300 - 500	300 - 500	500 - 700	100 - 300	*)
Härte HB	180	220	170	200	um 350	<50
Bruchdehnung A [%]	0 - 1	3 - 8	3 - 8	10 - 30	0 - 1	*)
Schallgeschwindigkeit [m/s]	3350	3700	3600	5150	~4500	~3600
Materialdämpfung - fehlerfreies Material (log. Dekrement δ) [-]	3 * 10 ⁻⁴	1 * 10 ⁻⁴	1,5 * 10 ⁻⁴	1 * 10 ⁻⁴	*)	*)
Materialdämpfung - Glocken (log. Dekrement δ) [-]	ca. 3-7 * 10 ⁻⁴	ca. 3-9 * 10 ⁻⁴	ca. 5-9 * 10 ⁻⁴	ca. 8-12 * 10 ⁻⁴	> 10 * 10 ⁻⁴	> 6 * 10 ⁻⁴

Tabelle 4: Übersicht über mechanische und akustische Eigenschaften von verschiedenen Glockenwerkstoffen. Von den mit *) gekennzeichneten Eigenschaften liegen keine Daten vor. Ebenso sind über das Zähigkeitsverhalten bei den meisten Glockenwerkstoffen keine Daten hinsichtlich Schlagarbeit bekannt; allerdings läßt sich dieses über die sog. Bruchdehnung abschätzen (je größer die Bruchdehnung, desto zäher der Werkstoff).

4.1.3 Korrosionsbeständigkeit

Unter **K o r r o s i o n** versteht man die chemische bzw. elektrochemische Reaktion von Werkstoffen mit der Umgebung. Sie verursacht Korrosionsschäden, die u.a. zur Beschädigung oder Zerstörung eines Materials führen. Bei Metallen ist Korrosion meist auf elektrochemische Prozesse zurückzuführen. Korrosion zeigt vielfältige Erscheinungsformen; neben gleichmäßiger Flächenabtragung gibt es lokale Korrosion, die sich durch Mulden, Risse oder Vertiefungen (Lochfraß) äußert. Treten noch zusätzlich mechanische Beanspruchungen (Zug) auf, spricht man von sog. Spannungsrißkorrosion bzw. Schwingungsrißkorrosion. Damit Korrosion stattfindet, müssen ein Oxidationsmittel und ein Elektrolyt vorhanden sein. Als Oxidationsmittel ist bei der Korrosion metallischer Werkstoffe meist Luftsauerstoff verantwortlich; als Elektrolyt fungiert in der Regel Wasser; Feuchtigkeit aus der Luft ist hierfür schon ausreichend.

Bei Glocken tritt Korrosion in der Regel in Form von gleichmäßigem Flächenabtrag auf, bei dem sich das Metall in verschiedene Korrosionsprodukte umwandelt: So setzen Bronzeglocken im Laufe der Jahre Patina an, Stahlglocken hingegen zeigen Rost. Die Metallauflösung ist beim gleichmäßigen Flächenabtrag im allgemeinen ziemlich langsam und bei Glocken ungefährlich, da die mechanischen und akustischen Werkstoffeigenschaften und damit das Klangverhalten bzw. die Haltbarkeit auf lange Sicht hin praktisch nicht verändert werden. Nur das optische Erscheinungsbild erfährt dadurch eine Beeinträchtigung, die vor allem bei Stahlglocken nicht gerade ansprechend wirkt. Inwieweit andere Korrosionsarten bei Glocken auftreten (insbesondere Schwingungsrißkorrosion), ist unbekannt und bis jetzt offensichtlich noch nie untersucht worden. Nichtsdestoweniger ist eine hohe **K o r r o s i o n s b e s t ä n d i g k e i t**, d. h. der Widerstand eines Werkstoffes gegenüber chemischen bzw. elektrochemischen Einflüssen, eine erwünschte Eigenschaft bei Glockenwerkstoffen; hier ist es in erster Linie die Beständigkeit gegenüber atmosphärischen Einflüssen wie Feuchtigkeit und Abgase. Die Korrosionsbeständigkeit sollte besonders groß sein, um einen jahrhundertlangen Bestand zu gewährleisten. Gegebenenfalls ist Korrosionsschutz notwendig, d.h. man hält entweder die korrosiven Medien fern (z.B. Schutz der

Glocken vor Wetter und Feuchtigkeit durch dementsprechende bauliche Maßnahmen im Glockenturm) oder schützt die Glocke selbst durch einen Schutzanstrich, wie das bei Stahlglocken normalerweise praktiziert wurde. Korrosionsschichten wie Rost oder Patina zeigen praktisch keinen Einfluß auf das Klangverhalten (Materialdämpfung), und die dämpfende Wirkung von Farbanstrichen ist ebenfalls vernachlässigbar gering, wie Untersuchungen gezeigt haben¹¹⁾.

Neben den oben erwähnten Werkstoffeigenschaften gibt es noch andere Eigenschaften, welche die Verwendbarkeit eines Glockenwerkstoffes beeinflussen können; dazu zählen u.a. eine gute *V e r a r b e i t b a r k e i t* (leichte Vergießbarkeit), *R e p a r a t u r f ä h i g k e i t* (z.B. Schweißbarkeit), leichte Verfügbarkeit der Metalle, aber auch die *M a t e r i a l k o s t e n* können eine erhebliche Rolle spielen.

Einfluß des Materials auf das Klangverhalten

4.2

Jahrhundertlang glaubte man, daß der Wohlklang einer Glocke ausschließlich vom Metall und seiner Zusammensetzung abhängt; doch in Wirklichkeit ist der Anteil des Metalls am Glockenklang weitaus geringer. So wirkt sich das Metall nur auf die Tongebung der Glocke aus und hat keinen Einfluß auf den Teiltonaufbau bzw. dem Glockentyp¹²⁾ (die Glockenform hingegen beeinflusst beides). Eine Glockenrippe ergibt das gleiche Klangbild (Glockentyp), wenn man statt Bronze z.B. Stahl oder ein anderes Metall verwendet. Auch überbewertet wird der Einfluß der Zusammensetzung des Metalls oder der Zusatz von Drittkomponenten bzw. der Verunreinigungsgrad. So hält sich noch immer die verbreitete Ansicht, daß gewisse Zusätze (z.B. Silber bei Bronzeglocken) den Klang – in welcher Hinsicht auch immer – verbessern, während Verunreinigungen stets das Gegenteil bewirken sollen. Untersuchungen haben aber gezeigt, daß diese Verallgemeinerungen nicht bzw. in einem viel geringerem Ausmaß als behauptet zutreffen¹⁰⁾. Unterschätzt hingegen wird der Einfluß des Gefüges, insbesondere der Porosität, welche das Klangverhalten erheblich beeinträchtigen kann.

Die Abhängigkeit der akustischen Eigenschaften von Zusammensetzung und Gefüge ist – zumindestens für Bronze¹⁰⁾ und Stahl¹¹⁾ – ziemlich ausführlich erforscht worden; sie wird in den Kapiteln der jeweiligen Metalle ausführlicher behandelt. Wie aber das Metall im konkreten auf die Tongebung bzw. deren Klangkomponenten einwirkt, ist bis jetzt nur sehr wenig untersucht worden, weil sich hier dieselben Probleme wie beim Einfluß der Glockenform auf die Tongebung stellen (siehe Kapitel 3.3.2). Die folgenden qualitativen Erkenntnisse entstammen mehrheitlich empirischen Beobachtungen, die im Zuge dieser Arbeit angestellt wurden.

Beim Vergleich von Glocken aus unterschiedlichen Werkstoffen ist grundsätzlich darauf zu achten, daß die Einflüsse der Glockenrippe auf das Klangverhalten unter Umständen so stark sein kann, daß sie die Auswirkungen, die vom Werkstoff herrühren, völlig überdecken und somit zu falschen Schlüssen führen können; dies gilt besonders beim Vergleich von Bronze- und Stahlglocken. Aus diesem Grund darf man, wenn man die klanglichen Auswirkungen von verschiedenen Metallen an Glocken studieren möchte, nur Glocken in gleichen oder zumindestens sehr ähnlichen Rippen heranziehen. Dieser wichtige Aspekt wurde in der Glockenkunde bis jetzt völlig mißachtet (auch seitens der Sachverständigen), und das ist teilweise auch der Grund für die verbreiteten unwahren Aussagen über die angeblichen Qualitäten verschiedener Werkstoffe als Glockenmetall.

Tonfülle

Diese Klangkomponente wird vom Metall am stärksten beeinflusst; sie hängt sowohl von der **M a t e r i a l d ä m p f u n g**, als auch von der **I n n e r e n T o n h ö h e** ab. Die Abklingdauer der hohen, schlagtonbildenden Teiltöne wird nämlich nicht nur durch die Materialdämpfung allein, sondern auch noch durch die Strahlungsdämpfung, die von der Dimensionierung der Glocke abhängt, bestimmt. Die Dimensionierung hingegen wird nicht nur durch die Glockenrippe, sondern auch durch die Innere Tonhöhe nachhaltig beeinflusst, denn mit zunehmender Innerer Tonhöhe steigt die Dimensionierung an, wodurch die Strahlungsdämpfung verringert wird. Demnach nimmt die Tonfülle zu, je geringer die Materialdämpfung, aber je größer die Innere Tonhöhe ist. Die Innere Tonhöhe wird von Gefügestand, Spannungen und diversen Verunreinigungen im Metall kaum beeinflusst; die Materialdämpfung reagiert hingegen darauf teilweise ziemlich empfindlich. Schwankungen in der Tonfülle sind daher bei Glocken in ähnlichen Rippen und aus Werkstoffen mit vergleichbarer Innerer Tonhöhe (z.B. Bronze und Sonderbronze) hauptsächlich auf die Materialdämpfung zurückzuführen, denn die Innere Tonhöhe und damit deren Anteil an der Strahlungsdämpfung bleiben mehr oder weniger konstant (vergl. dazu Abb. 57).

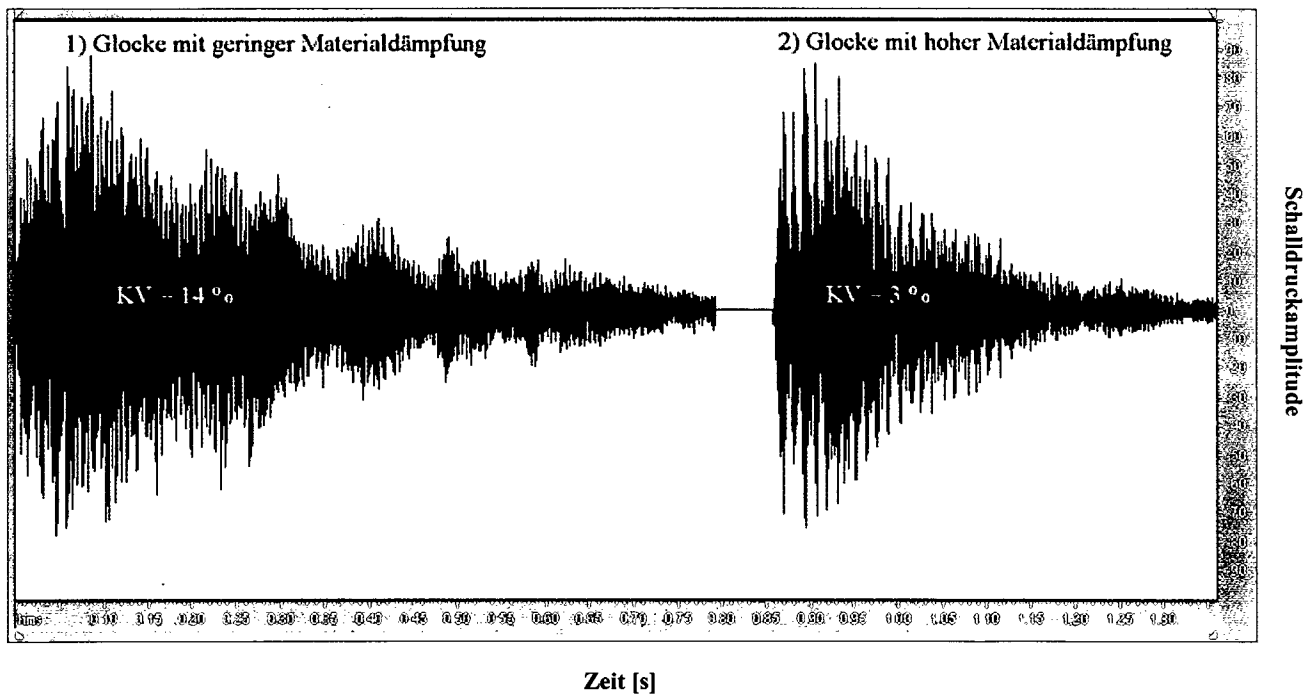


Abb. 57: Amplitudendiagramm des Schlagtonkomplexes (ohne Oberoktave) zweier Glocken in gleicher Tonlage (läutender Zustand), von denen die 1) geringe Materialdämpfung und daher hohe Tonfülle, die 2) hingegen hohe Materialdämpfung und daher geringe Tonfülle aufweist. Beide Glocken sind in gleicher Rippe („Pfundner-Rippe“) gegossen und daher ist der Einfluß der Materialdämpfung direkt vergleichbar, weil der Einfluß der Strahlungsdämpfung in beiden Fällen gleich ist. Glocke 1 ist in guter Zinnbronze, Glocke 2 in schlechter Sonderbronze gegossen (beide Materialien unterscheiden sich nur durch die Materialdämpfung; die Innere Tonhöhe ist praktisch ident). Unter optimalen Bedingungen jedoch besitzt Sonderbronze ebenfalls wie Zinnbronze eine geringe Materialdämpfung; in diesem Falle würde die Sonderbronzeglocke dasselbe Klangverhalten zeigen wie die Bronzeglocke und wäre klanglich von dieser nicht unterscheidbar (vergl. dazu Kapitel 4.4)

Tönigkeit/Tonspanne

Die Tonspanne und mit ihr auch die Tönigkeit werden nur von der **M a t e r i a l d ä m p f u n g** beeinflusst; in der Regel besitzen Glocken mit hoher Materialdämpfung eine geringere Tonspanne und neigen zu grundtönigem Klang (Abb. 58). Offensichtlich erschwert eine hohe Materialdämpfung die Anregung der hochfrequenten Teiltöne, welche daher zugunsten der tieferen Teiltöne in den Hintergrund treten. Erfahrungsgemäß klingen Glocken bei hoher Materialdämpfung auch gedämpft oder matt, sofern sie nicht in sehr leichten Rippen (weit im negativem RS-Bereich) gegossen sind. Daß Stahlglocken trotz der hohen Materialdämpfung hell bzw. kurz klingen und nicht dumpf oder matt kommt dadurch zustande, weil Stahlglocken äußerst dünnwandig sind, wodurch die Anregung der hohen Teiltöne erleichtert wird: Tonspanne und Obertönigkeit nehmen dadurch zu (vergl. Kapitel 3.3.2).

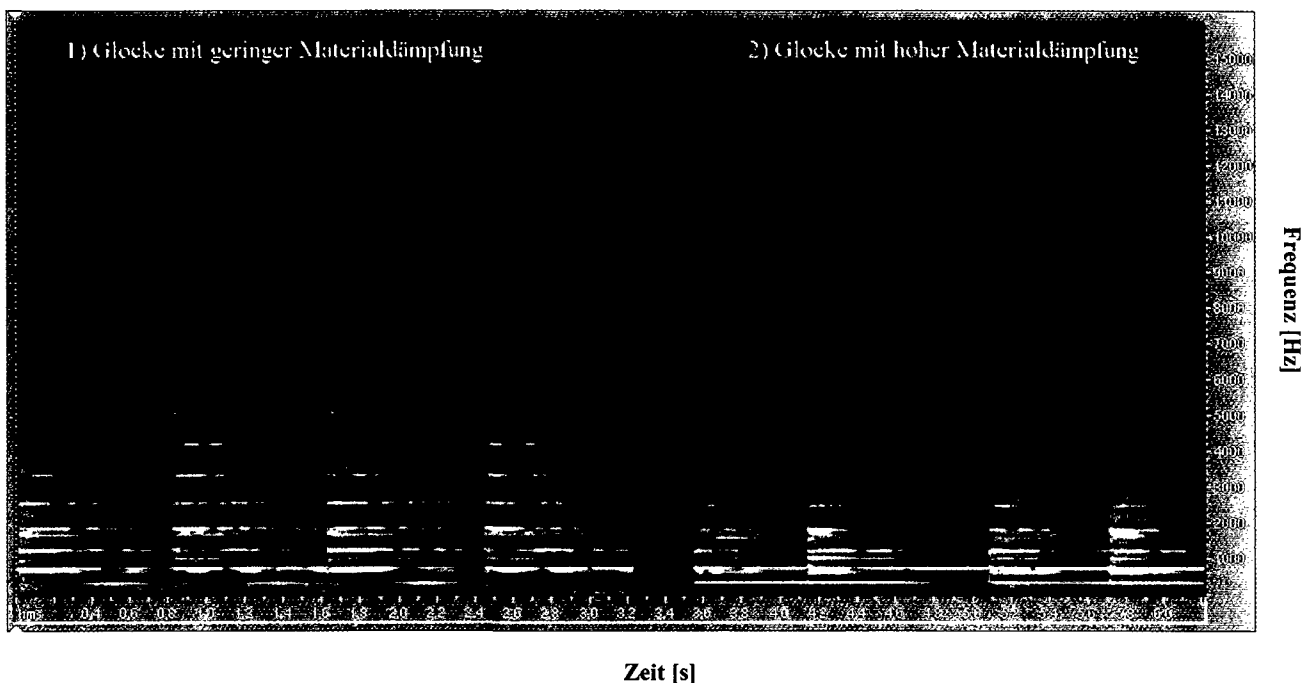


Abb. 58: Sonagramm derselben Glocken wie in Abb. 57 (läutender Zustand). Deutlich erkennbar die aufgrund der höheren Materialdämpfung geringere Tonspanne der Glocke 2. Aufgrund gleicher Verhältnisse (identische Rippen, praktisch gleiche Innere Tonhöhe, vergleichbare Turmakustik) ist ein direkter Vergleich der Auswirkung der Materialdämpfung auf die Tonspanne zulässig.

Geräuschanteil

Der Geräuschanteil sollte im Prinzip nicht durch das Material verursacht werden. Ein Einfluß des Werkstoffes auf den Geräuschanteil zeigt sich offensichtlich nur dann, wenn im Metall Gefügefehler wie feinste (nicht durchgehende, d.h. innere) Haarrisse oder Lunker (flache Hohlräume) vorhanden sind, wobei sich durch die Vibration die beweglichen Metallteile einander reiben und somit ein klirrendes bzw. blechernes Geräusch erzeugen; gesprungene Glocken klingen aufgrund des durchgehenden Risses immer stark schepprig.

Anschlag

Hängt wahrscheinlich nur von der Glockenform ab.

Nebenschlagtongeräusche

Dürften ebenfalls nur formbedingt verursacht werden.

Lautstärke

Die Erfahrung lehrt, daß Glocken mit hoher Materialdämpfung leiser klingen als solche mit geringer Dämpfung. Die Ursachen sind hier dieselben, wie sie bereits unter Tönigkeit / Tonspanne genannt wurden: Hohe Materialdämpfung erschwert die Anregung, die Intensität fällt dementsprechend geringer aus (bei hochfrequenten Teiltönen mehr als bei tieferen).

Bronze

4.3

Bronze in der ungefähren Zusammensetzung von 80% Kupfer und 20% Zinn ist der klassische Glockenwerkstoff schlechthin und wird in dieser Zusammensetzung auch **Glockenbronze** genannt⁵⁾; sie zeichnet sich vornehmlich durch ihre besonders günstigen akustischen Eigenschaften aus. Die Legierung läßt sich sehr gut vergießen und füllt die Formen sehr scharf aus. Sie ist gegen atmosphärische Einflüsse besonders widerstandsfest. Härte und Festigkeit sind für jahrhundertelangen Gebrauch ausreichend. Da man Bronze schweißen kann, ist bei Beschädigung (Sprung, Riß etc.) eine eventuelle Reparatur möglich.

Die Limburger Richtlinien¹⁶⁾ haben bezüglich Glockenbronze festgelegt, daß diese aus mindestens 20% Zinn bestehen und der Anteil an Fremdbestandteilen einen Wert von maximal 2% nicht überschreiten soll, darunter höchstens 1% Blei. Als „ideale Zusammensetzung“ sehen diese eine Bronze von 78% Cu und 22% Sn vor. Die Realität zeigt jedoch (siehe Tabelle 6), daß der Sn-Gehalt bei Glockenbronze allerdings in einem erheblichen Maße variieren kann, abhängig von den jeweiligen Umständen, und kann bis auf unter 13% absinken; in der Regel liegt er in einem Bereich zwischen 15% und 20%. Auch der Verunreinigungsgrad ist teilweise beträchtlich und kann bis zu 10 % betragen, oft liegt er um 5%. Der Cu-Gehalt hingegen streut viel weniger und liegt in der Regel um 78 – 81 %. „Ideale“ reine Glockenbronze dürfte man wohl nur bei den jüngeren Stücken aus der Zeit nach dem 2. Weltkrieg vorfinden, die ausschließlich aus Neumetallen gegossen wurden, ohne Hinzufügung von Altmaterial.

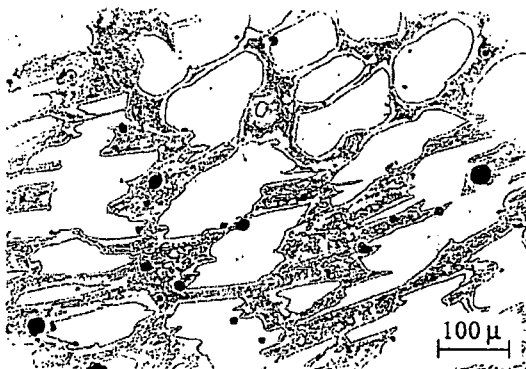


Abb. 59: Schliffbild von Glockenbronze einer modernen Kirchenglocke (79% Cu, 21% Sn). Hell: α -Mischkristall; dunkel: $(\alpha+\delta)$ -Eutektoid. Man beachte die zahlreichen kleinen, runden Gasporen (schwarz) = Porosität.

Reine Glockenbronze zeigt einen heterogenen Aufbau: So setzt sich das Gefüge aus dem eher weichen α -Mischkristall und aus dem ziemlich harten $(\alpha+\delta)$ -Eutektoid zusammen (Abb. 59). Der Eutektoid-Anteil nimmt mit steigendem Sn-Gehalt zu. Die Anordnung der Gefügebestandteile

hängt stark von den jeweiligen Gußbedingungen (u.a. der Abkühlungsrate) ab; eine Glocke zeigt aufgrund der unterschiedlichen Wandstärkenverhältnisse daher keinen gleichmäßigen Gefügebau (unterschiedliche Korngrößen, Gußtextur).

Bronze zeichnet sich vornehmlich durch ihre sehr guten akustischen Eigenschaften aus, in erster Linie ist hier die sehr geringe Materialdämpfung zu nennen, die bei einem Sn-Gehalt von 20% um $\delta = 3 \cdot 10^{-4}$ liegt. Bei fehlerfreiem Guß erreicht Glockenbronze daher besonders hohe Nachhallzeiten, die im optimalen Falle nach einer alten Faustregel ungefähr so viele Sekunden beträgt wie die Glocke Zentimeter im Durchmesser mißt. Die Limburger Richtlinien¹⁶⁾ haben folgende Mindestwert für die Nachhalldauer bei Bronzeglocken festgelegt:

Glockengröße	Nachhalldauer Unterton [s]	Nachhalldauer Prim & Terz [s]
von h° bis c'	über 150	25
von cis' bis e'	150-120	20
von f' bis a'	110-85	17
von b' bis cis''	80-65	12
von d'' bis f''	60-50	10

Tab. 5: Mindestnachhallzeiten für Bronzeglocken nach Limburger Richtlinien

Die Materialdämpfung von Bronze zeigt eine Abhängigkeit vom Sn-Gehalt und wird auch durch Drittkomponenten (Verunreinigungen) sowie durch Porosität beeinflusst. Der Einfluß des S n – G e h a l t s ist aus Diagramm 5 zu entnehmen; demnach nimmt die Materialdämpfung mit zunehmenden Sn-Gehalt merkbar ab. Eine Erhöhung des Sn-Gehalts von z.B. 18 auf 22% reduziert die Materialdämpfung um ca. 50 %, wodurch sich die Nachhallzeiten verdoppeln. Zinnreichere Bronze erhöht demnach die Tonfülle einer Glocke, allerdings nimmt auch die Sprödigkeit des Materials zu.

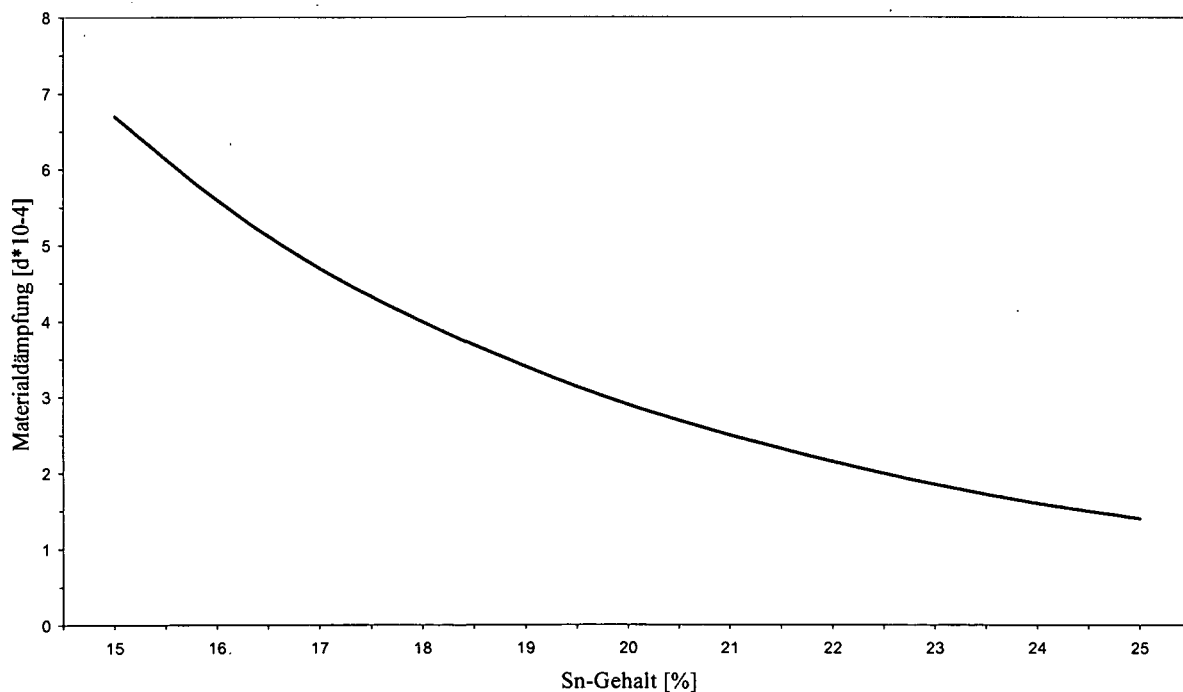


Diagramm 5: Abhängigkeit der Materialdämpfung von Bronze vom Sn-Gehalt¹⁰⁾

Die Abhängigkeit der Materialdämpfung von **D r i t t k o m p o n e n t e n** (Verunreinigungen) hängt stark vom jeweiligen Element ab, hält sich aber insgesamt in Grenzen. Die Materialdämpfung nimmt im allgemeinen mit zunehmenden Verunreinigungsgrad zu. Blei und Silber, denen eine starke Wirkung nachgesagt wird, zeigen praktisch keinen Einfluß auf die Materialdämpfung und erhöhen diese selbst bei einem Gehalt von mehreren % nur minimal; der alte Volksglaube, Silber „verbessere“ den Glockenklang (= erhöht die Tonfülle), trifft also nicht zu, ebensowenig, daß Blei den Klang „dumpf“ macht, d.h. die Materialdämpfung stark erhöht. Aus diesem Grund erscheint der von den Limburger Richtlinien aufgestellte Grenzwert von max. 1% Blei in Glockenbronze als nicht zielführend, weil dieses Metall praktisch keinen Einfluß auf das Klangverhalten ausübt. Hingegen können solche Elemente wie Al, P und Bi schon bei einem Gehalt von wenigen 1/10 bis 1/100-% die Dämpfung merkbar erhöhen. Dabei ist aber zu bemerken, daß letztere Elemente keinen kontinuierlichen Anstieg der Materialdämpfung bewirken; nach Überschreiten einer bestimmten Konzentration nimmt diese sogar wieder ab. Eine Übersicht ist in Diagramm 6 zusammengestellt.

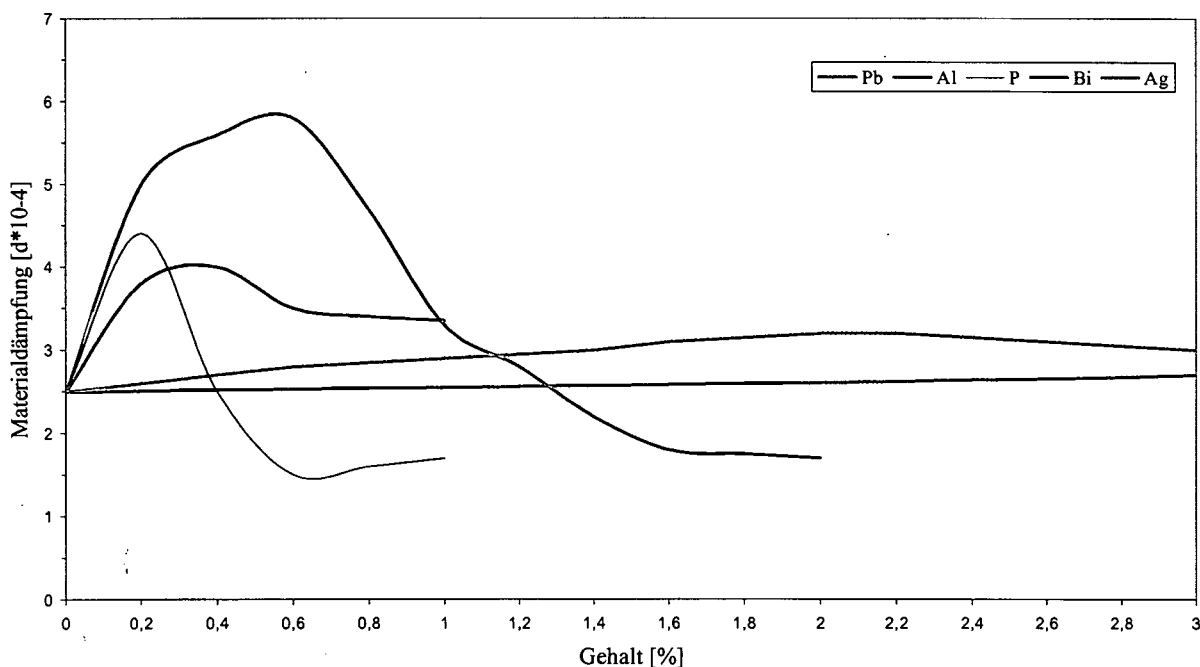


Diagramm 6: Abhängigkeit der Materialdämpfung von Bronze vom Gehalt von diversen Drittkomponenten („Verunreinigungen“)¹⁰⁾. Das Verhältnis von Cu zu Sn ist jeweils konstant (79:21).

Viel mehr als Drittkomponenten übt die **P o r o s i t ä t** einen nachteiligen Einfluß auf die Materialdämpfung aus, der bisweilen unterschätzt wird, da man immer noch recht häufig nur Verunreinigungen für schlechte Materialeigenschaften verantwortlich macht. In Glockenbronze tritt Porosität meist in Form feinverteilter kleiner Gasblasen auf, die oft nur im Mikroskop sichtbar sind (siehe Abb. 59). Sie entsteht beim Gießprozeß, wobei sich in der Schmelze Gase (Wasserdampf, Luft, Verbrennungsgase) lösen, die aber beim Erstarrungsprozeß nicht mehr entweichen können und daher im Metall kleine Bläschen bilden. Die Materialdämpfung nimmt mit steigender Porosität recht stark zu; nach *Schad*¹⁰⁾ zeigt die durch Porosität zusätzlich erzeugte Dämpfung folgende lineare Abhängigkeit:

$$\Delta\delta \cdot 10^4 = 0,7 \cdot P \quad \text{Glg. 28}$$

mit $\Delta\delta$. . . durch Porosität zusätzlich erzeugte Dämpfung [log. Dekrement]
 P . . . Porosität [%] (definiert als relative Abweichung der gemessenen Dichte von der idealen Dichte = porenfreier Zustand)

Man erkennt, daß wenige % Porosität einen Dämpfungsanteil erzeugen, der so hoch wie die Materialdämpfung von Bronze ($\delta = \text{ca. } 3 \cdot 10^{-4}$) selbst ist und damit die Nachhallzeit halbieren. Porosität, die in Glockenbronze immer vorhanden ist (normalerweise 2-3%, kann aber erheblich größer sein), stellt den Hauptgrund für geringere Nachhallzeiten bei Bronzeglocken dar, und nicht so sehr Verunreinigungen; sie rührt von den Umständen her, daß Bronzeschmelzen mit zunehmender Temperatur zu höherem Gaslösevermögen neigen und die praktizierte Glockengußtechnik, die noch aus dem Mittelalter stammt (Verwendung von Herd-Flammöfen, Zuleitung der Schmelze vom Ofen zur Gußform über lange Rinnen), das Lösen von Gasen in der Schmelze noch fördert. Reine Werkstoffe sind daher kein automatischer Garant für lange Nachhallzeiten, wie immer behauptet wird (vor allem seitens der Gießereien). Da Porosität nach dem Guß nicht mehr zu beseitigen ist, können diesbezüglich entstandene Mängel im Klang (Nachhallzeiten, Tonfülle) nicht mehr korrigiert werden.

Die Innere Tonhöhe hingegen wird viel weniger als die Materialdämpfung vom Zinngehalt und von Drittkomponenten beeinträchtigt. Weil Porosität gleichzeitig Dichte und Elastizitätsmodul verringert, bleibt insgesamt die Schallgeschwindigkeit und damit auch die Innere Tonhöhe annähernd gleich. Die Schwankungen, die aufgrund Porosität, Sn-Gehalt und Drittkomponenten entstehen, liegen in einem Rahmen, welcher, als Verhältniszahl ausgedrückt, etwa 1,07 beträgt, also etwa einen Halbton umfassen. Über den Einfluß von anderen Gefügegrößen auf den Glockenklang (z.B. Korngröße) gibt es bei Bronze bis heute keine Untersuchungen. Sie sind aber nicht auszuschließen.

Trotz ihrer sehr guten akustischen Eigenschaften hat Bronze aber auch einige Nachteile: In erster Linie ist es der Umstand, daß Glockenbronze aufgrund des hohen Zinngehaltes äußerst spröde ist und Bronzeglocken daher, vor allem bei Überbeanspruchung, zum Zerspringen neigen. Das typische „Ende“ einer Bronzeglocke ist in der Regel ein Sprung; dieser kann unter Umständen schon nach kurzer Zeit nach dem Guß eintreten. Zinnreichtum erniedrigt zwar die Materialdämpfung, gleichzeitig nimmt aber auch die Sprödigkeit des Materials zu. Ein hoher Sn-Anteil, der aufgrund der besseren Klangqualität bisweilen propagiert wird, zeigt daher nur bedingt Vorteile, weil sie auf Kosten der Beständigkeit der Glocke gehen. Der von den Limburger Richtlinien angestrebte „Idealgehalt“ von 22% Zinn erscheint aus diesem Grund als wenig förderlich, zumal bei 20% Zinn die Materialdämpfung schon sehr gering und für hohe Nachhallzeiten + Tonfülle völlig ausreichend ist.

Nachteilig ist auch das relativ hohe Gaslösevermögen von Bronzeschmelzen, was zu Porosität und damit zu geringen Abklingzeiten führt. Das Gaslösevermögen nimmt mit steigender Temperatur der Schmelze zu. Man muß beim Glockenguß daher sehr darauf achten, daß die erforderliche Gießtemperatur nicht überschritten, der Gußprozeß nicht unnötig in die Länge gezogen wird und daß entweder kein Gas in die Schmelze gelangt oder diese vor dem Guß entgast wird. Optimal ist der Guß aus dem Tiegel, weil hier die Schmelze mit reagierenden Gasen (Luft, Feuchtigkeit etc.) nur wenig ausgesetzt ist; die traditionelle Glockengußtechnik mittels Herd-Flammöfen und Gußrinnen dagegen erleichtert die Reaktion der Schmelze mit umgebenden Gasen (großes Verhältnis von Oberfläche der Schmelze zu deren Volumen im Ofen, dazu die relativ langen Wegstrecken der Gußrinnen, wo die Schmelze noch zusätzlich mit der umgebenden Luft reagieren kann). Porosität ist beim Glockenguß am häufigsten auf Feuchtigkeit zurückzuführen¹⁰⁾, und zwar auf jede Art von Feuchtigkeit, die mit der Schmelze in Berührung kommen kann (es genügt schon feuchtes Holz, mit dem der Schmelzofen geheizt wird). Es wundert daher nicht, daß alte Glocken, die oft auf freiem Felde, vor der Witterung höchstens durch einen Unterstand geschützt, aufgrund der schlechten Gußbedingungen nur sehr selten hohe Nachhallzeiten besitzen. Moderne Bronzeglocken weisen in der Regel weitaus höhere Nachhallzeiten als historische Stücke auf, was in erster Linie auf die bessere Gießtechnik, aber auch auf die heutzutage reineren Rohstoffe zurückzuführen ist.

Glockenbronze besaß zwar schon von Anfang an die klassische Zusammensetzung mit einem durchschnittlichen Cu-Gehalt von ungefähr 80 %. Allerdings weisen ältere Glocken fast immer einen hohen Grad an Verunreinigungen auf, der bis zu 10 % betragen kann. In erster Linie handelt es sich hier um Blei – im Schnitt etwa 4 % – welches auf Kosten des Zinnanteils geht (Tab. 6) und daher offensichtlich als Folge von Bleiverunreinigungen im Zinn in die Bronze gelangte. Aber auch weitere Drittkomponenten mit Gehalten > 1% (meist Zn, Ni und Fe) findet man bisweilen in alten Glocken. Der Cu-Gehalt schwankt weitaus weniger, kann aber bis zu ± 5 % vom idealen Wert (80%) abweichen. Hinsichtlich der Zusammensetzung entspricht das Metall historischer Glocken kaum dem, was man unter einer Glockenbronze versteht, schon gar nicht nach den Limburger Richtlinien, und ist eigentlich als *R o t g u ß* aufzufassen (Rotguß = Mehrstoffzinnbronzen, die außer Zinn zusätzlich Blei und Zink enthalten²⁷⁾). Dennoch sind die akustischen Resultate von historischen Glockenbronzen im allgemeinen befriedigend, woraus ebenfalls deutlich wird, daß der Einfluß der Metallzusammensetzung (vor allem bezüglich der Reinheit) auf den Glockenklang weitaus geringer ist als stets behauptet.

Moderne Glocken hingegen weisen aufgrund der im Vergleich zu früheren Jahrhunderten viel reineren Rohstoffe weniger Verunreinigungen auf (etwa 1-2%), sofern hier Neumetalle benutzt wurden. Analysen von einigen modernen Glocken zeigen aber, daß dies nicht immer zutrifft und teilweise recht hohe Anteile an Verunreinigungen bzw. merkliche Abweichungen von der Idealzusammensetzung 80 Cu / 20 Sn anzutreffen sind, vergleichbar mit denen historischer Stücke. Da beim Glockenguß selten Qualitätskontrollen bezüglich der Metallzusammensetzung durchgeführt wurden und werden, ist bei modernen Glocken nicht auszuschließen, daß sogar ein erheblicher Anteil von diesen bezüglich der Reinheit des Metalls als „minderwertig“ zu betrachten ist (vergleiche dazu auch Tab. 6).

Glocke: Gußjahr / Gießer	Cu [%]	Sn [%]	Pb [%]	sonstige [%]
12./13. Jh. <i>unbekannt</i>	78,4	15,8	2,0	Ni 2,4; Fe 1,4
1. H. 13. Jh. <i>Kärntner Gießer</i>	78,9	14,3	5,3	Fe 1,5
1.H. 13. Jh. <i>1.Oberkärntner Gießer</i>	76,8	17,8	4,0	Ni 1,4
1. H. 13. Jh. <i>Wiener Gießer</i>	72,3	17,3	10,4	-
1242 <i>unbekannt</i>	87,3	12,7	-	-
um 1250 <i>2.Oberkärntner Gießer</i>	81,7	18,3	-	-
2. H. 13. Jh. <i>steirischer Gießer</i>	75,4	17,0	7,6	-
2. H. 13. Jh. <i>Walgauer Gießer</i>	80,8	16,3	2,9	-
2. H. 13. Jh. <i>Walgauer Gießer</i>	76,2	15,6	8,2	-
um 1280 <i>Amaricus</i>	78,9	17,6	3,5	-
um 1300 <i>Kärntner Gießer</i>	82,1	12,5	3,1	Zn 2,3
um 1300 <i>Walgauer Gießer</i>	77,1	13,9	6,2	Fe 2,8
um 1300 <i>Walgauer Gießer</i>	80,3	16,1	3,6	-
1318 <i>St. Florianer Werkstätte</i>	75,9	18,7	5,4	-
1318 <i>St. Florianer Werkstätte</i>	71,9	15,7	9,9	Fe 1,2, Zn 1,3
1319 <i>St. Florianer Werkstätte</i>	77,0	15,1	5,8	Fe 2,1
1319 <i>St. Florianer Werkstätte</i>	79,9	15,6	4,5	-
um 1330 <i>Lucas v. Venedig</i>	77,0	19,4	3,6	-
2.H.14.Jh. <i>Wiener Gießer (Ulrich?)</i>	82,4	14,8	2,8	-
um 1400 <i>Kärntner Gießer</i>	76,1	15,6	4,7	Ni 3,6
um 1440 <i>Straifing & Obrecht</i>	77,9	16,8	5,3	-
1446 <i>Hans Mitter</i>	79,5	17,5	3,0	-
1453 <i>Hans Mitter</i>	81,8	16,6	1,6	-
1459 <i>Hans Mitter</i>	83,0	14,2	2,8	-

1471 Jörg Gloppitscher	81,0	16,5	2,5	-
1490 Kärntner Gießer	80,9	14,7	2,8	Ni 1,6
1498 Schweizer Gießer	80,0	16,5	2,1	Zn 1,4
15. Jh. unbekannt	77,6	15,2	4,3	Fe 2,9
um 1500 Mert Perger	81,5	12,7	5,8	-
1508 Nikolaus Grünwald	81,2	16,4	1,3	Ni 1,1
1526 Frater Urbanus Hanel	79,8	13,3	3,8	Fe 1,1, Zn 2,0
1567 italienischer Wandergießer	79,9	13,0	5,8	Fe 1,3
1582 Hans Christof Löffler	78,6	14,9	4,3	Fe 2,2
1582 Hans Christof Löffler	76,9	17,7	2,9	Fe 0,9, Zn 1,6
1585 Martin Hilger	82,6	13,3	4,1	-
1592 Hans Dinkelmayer	80,5	17,3	2,2	-
1622 Simon Selner	78,1	12,9	6,9	Zn 2,1
1624 Claudius Aubert	79,4	15,2	5,4	-
1643 Simon Selner	78,2	14,1	4,7	-
1648 Martin Fidler	77,5	15,8	5,4	Fe 1,3
1648 David Polster	77,9	19,6	2,5	-
1658 Balthasar Herold	79,8	14,6	5,6	-
1687 Johann Kippo	86,6	10,1	3,3	-
1717 Mathias Prininger	84,1	13,5	2,4	-
1731 Josef Graßmayr (Brixen)	83,4	12,8	3,8	-
1949 Fa. Oberascher(Sbg)	82,1	12,2	3,6	Fe 2,1
1954 Fa. Pfundner (W)**	78,1	20,6	-	Fremdbestandt. 1,2
1955 Fa. St. Florian (Oö) [†]	78,0	19,9	1,3	-
1957 Fa. Graßmayr (Innsbruck)	79,8	16,0	4,2	-
1963 Fa. Oberascher(Sbg)	82,4	13,7	3,3	Fe 0,6
1965 Fa. Graßmayr (Innsbruck)	84,7	13,9	1,4	-
mittlerer Gehalt	79,6	15,4	4,0	-

Tab. 6: Materialanalysen von Glocken verschiedener Jahrhunderte. Berücksichtigt sind hier nur Haupt- und Nebenbestandteile mit einem Gehalt > 0.5 %. Die Glocken stammen bis auf ganz wenige Ausnahmen abgesehen von österreichischen Gießern. Analysen: Institut f. Festkörperphysik, TU Wien; *): TVFA Wien; **) Technolog. Gewerbe-Museum

Außer Blei sind in Glockenbronze noch zahlreiche weitere Drittkomponenten in Spuren (1/10tel %, 1/100tel %) als Folge von Verunreinigungen vorhanden, insbesondere bei alten Glocken. Art und Menge dieser Verunreinigungen lassen bisweilen auf den Herkunftsort des Metalls (in erster Linie des Kupfers) schließen, wie man bei einigen historischen Glocken nachweisen konnte; vergl. dazu die folgenden 3 Beispiele:

Beispiel 1: Romanische Glocke aus Döbriach²⁸⁾ (Ktn), Gj. um 1300

Cu	79,20 %
Sn	17,30 %
Pb	2,06 %
Ni	0,40 %
As	0,21 %
Sb	0,20 %
Cd	0,20 %

Ag	0,17 %
Fe	0,15 %
Au	0,03 %
Ti	0,027 %
Bi	0,02 %
Si	0,02 %
Pt	0,01 %
Mg	0,003 %
Mn	< 0,0001 %

Summe der Verunreinigungen: 3,50 %

Die Analyse weist wegen des Edelmetallgehaltes auf Kärntner Erze hin. Es ist möglich, daß das Material aus dem Zirknitzgraben stammt und in der Döllacher Hütte (Bezirk Spittal / Drau) verarbeitet wurde.

Beispiel 2: Gotische Glocke aus Tirol²⁸⁾, geg. 1510 von Peter Löffler

Cu	76,75 %
Sn	20,85 %
As	0,85 %
Pb	0,52 %
Fe	0,25 %
Ag	0,21 %
Si	0,20 %
Zn	0,19 %
Sb	0,10 %
Al	0,05 %
Ni	0,02 %
Mg	0,006 %
Mn	0,004 %

Summe der Verunreinigungen: 2,40 %

Die Analyse zeigt anhand der hohen Arsen- und Silbergehalten, daß Schwazer Kupfer für den Guß verwendet wurde. Durch den hohen Arsengehalt ist es verständlich, daß beim Bildguß, wo das Metall wegen der geringen Wandstärke sehr heiß vergossen werden muß, giftige, gesundheitsschädliche Dämpfe in stärkerem Ausmaße als beim starkwandigem Geschütz- und Glockenguß entstehen. Peter Löffler war nach dem Guß der ersten Figur für das Maximiliansgrab (die sog. „Schwarzen Mander“ von Innsbruck) kränklich und früh gealtert. Gregor Löffler, der das Standbild des Chlodwig (in einem Stück) und auch die Figur von Karl den Großen gegossen hatte, die allerdings nicht überarbeitet, sondern 1569 wieder eingeschmolzen wurde, warnte, wie E. Egg schreibt, seinen Sohn Hans Christof vor dem ungesunden Bildguß; er selbst hatte sich bei der Arbeit für das Grabmal eine langwierige Krankheit zugezogen.

Beispiel 3: Die „Pummerin“ im Wiener Stephansdom²⁸⁾

Cu	79,00 %
Sn	18,62 %
Zn	1,15 %
Fe	0,28 %
Pb	0,25 %
Cd	0,25 %
P	0,25 %
Ba	0,05 %
Ni	0,05 %
Bi	0,02 %
B	0,02 %
Al	0,02 %
Ti	0,02 %
W	0,02 %
Au	< 0,001 %

Summe der Verunreinigungen: 2,38 %

Für den Guß der Pummerin wurde hauptsächlich das Material der 1945 zerstörten „Josephinischen Glocke“ (= „Alte Pummerin“) verwendet, die ihrerseits aus türkischem Kanonenmetall gegossen ist, worauf auch der Wolframgehalt hinweist; in österreichischen Kupfererzen tritt Wolfram nie auf.

Obwohl Bronze bezüglich der akustischen Eigenschaften hervorragend ist, so heißt dies noch lange nicht, daß Bronzeglocken am besten sind. Denn die Klangqualität wird nicht nur vom Metall, sondern sehr stark auch von der Glockenrippe beeinflusst. So kann bei bester Metallqualität der Klang unbefriedigend sein, wenn die Rippe ungenügend ist. Die Mehrheit der modernen Bronzeglocken ist zwar qualitätsmäßig sehr gut bis gut (Klq. I bis II); historische Bronzeglocken dagegen sind aufgrund ungünstig konstruierter Rippen und/oder auch aufgrund schlechterer Metallqualität (Porosität) nicht so hervorragend. Die Klangqualität alter Bronzeglocken ist daher in der Regel eher mittelmäßig (Klq. II-III), und nur selten findet man wirklich ausgezeichnete historische Stücke.

Glockenbronze ist ein besonders teurer Werkstoff, was vor allem in den hohen Zinnpreisen seine Ursachen hat. Weil in den beiden Weltkriegen Bronzeglocken vornehmlich wegen ihres hohen Zinngehaltes eingezogen wurden¹⁾, das in Europa nur in geringen Mengen vorkommt, hat man nach Beendigung der Kriege nach zinnfreien Legierungen gesucht (Sonderbronze/-messing), um in der Zukunft vor eventuellen Beschlagnahmen sicher zu sein.

Legierungen aus mindestens 78 % Kupfer als Hauptbestandteil und Aluminium, Blei, Nickel, Mangan, Eisen, Silizium oder Beryllium als Nebenbestandteile, wobei diese Legierungszusätze allein oder in Kombination verwendet werden, heißen *Sonderbronzen*²⁹⁾. Sie werden oft nach dem Hauptlegierungselement bezeichnet, also z.B. bei Aluminium Aluminiumbronze, bei Blei Bleibronze etc. Im Glockenguß wurden – soweit bekannt – nur *Siliziumbronzen* verwendet (im folgenden ist daher mit Sonderbronze stets Siliziumbronze gemeint). Im Gegensatz zu anderen gewerblich-industriellen Sonderbronzen sind die im Glockenguß zur Anwendung gekommenen Legierungen ausschließlich nur für diesen Zweck verwendet worden. Aus diesem Grund ist über deren Eigenschaften nur relativ wenig bekannt; weitreichende Untersuchungen, vor allem bezüglich der akustischen Eigenschaften, wie man sie bei Bronze oder Stahl durchgeführt hat, sind bei diesen Werkstoffen bis heute noch nicht gemacht worden. Teilweise weiß man nicht einmal die genaue chemische Zusammensetzung – Gießergeheimnis! Die im Glockenguß verwendeten Sonderbronzen (und auch Sondermessinge) werden in der Glockenkunde auch *Austauschlegierungen* genannt, weil man sie in dem Ziel entwickelt hatte, das teure Zinn durch andere Metalle zu ersetzen („auszutauschen“).

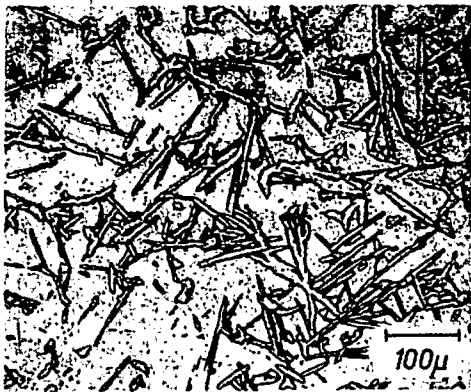


Abb. 60: Schliffbild von *Briloner Sonderbronze* (Laborprobe)

Sonderbronzen weisen ganz allgemein eine hohe Korrosionsbeständigkeit und teilweise auch gute Festigkeitseigenschaften auf. Die im Glockenguß verwendeten Sonderbronzen sind wesentlich fester als Zinnbronze, nicht so spröde und werden auch durch Sturz oder Schlag nicht zerstört. Ihre akustischen Eigenschaften (Materialdämpfung, Innere Tonhöhe) sind denen von Zinnbronze praktisch gleich, weshalb man für Sonderbronze dieselben Rippen wie bei Bronzeglocken verwendet. Allerdings hängt die Materialdämpfung offensichtlich ziemlich stark vom Guß- bzw. Erstarrungsvorgang und damit vom Gefüge ab (vermutlich bildet sich teilweise hohe Porosität, genaue Untersuchungen gibt es jedoch nicht), weshalb die Materialdämpfung von Sonderbronze in einem relativ großen Bereich von geringen bis ziemlich hohen Werten streut. Im optimalen Falle besitzt Sonderbronze eine sehr geringe Materialdämpfung und ist in diesem Falle hinsichtlich akustischer Eigenschaften der Zinnbronze gleichwertig. Bei fehlerhaftem Gefüge kann hingegen die Materialdämpfung ganz erheblich zunehmen (bis $\delta = 9 \cdot 10^{-4}$), was sich dann durch ziemlich geringe Nachhallzeiten äußert; weil für Sonderbronzeglocken nur Glockenrippen mittlerer Stärke (d.h. geringe Dimensionierung) verwendet wurden, besitzen sie unter solchen Bedingungen zusätzlich noch wenig Tonfülle und klingen gedämpft bis sehr dumpf. Diese starken Schwankungen in der Materialdämpfung, abhängig von den Gußbedingungen bzw. der Gußtechnik, sind typisch für Sonderbronze, weshalb sich dieses Material offensichtlich viel störungsanfälliger und auch unberechenbarer als Zinnbronze verhält. Weil bis jetzt jegliche Untersuchungen fehlen, läßt sich über die Ursache dieses Verhaltens nichts sagen.

Die Qualität von Sonderbronzeglocken ist aufgrund der oben genannten Gußprobleme viel stärker streuend als bei Bronzeglocken, neben ausgezeichneten Exemplaren trifft man auch auf besonders schlechte mit äußerst geringen Nachhallzeiten und dumpfer Tongebung, doch dürfte die Mehrheit von guter Klangqualität sein (Klq. II). Aufgrund der starken Schwankungen bezüglich der Materialdämpfung haben die Limburger Richtlinien¹⁶⁾ dementsprechend niedrigere Mindestnachhallzeiten für Sonderbronzeglocken festgesetzt, die nur ca. 2/3 der von Bronzeglocken betragen (Tab. 7). Dies dürfte wohl auch den durchschnittlichen Nachhallzeiten von Sonderbronzeglocken entsprechen. Aufgrund ihrer stärker streuenden Klangqualität, aber viel mehr noch aus ideologischen Gründen werden Sonderbronzeglocken in der Glockenkunde oft nicht gerechtfertigt generell als minderwertig angesehen (siehe auch Stahl).

Glockengröße	Nachhalldauer Unterton [s]	Nachhalldauer Prim & Terz [s]
von h° bis c'	über 120	25
von cis' bis e'	95-80	20
von f' bis a'	75-60	17
von b' bis cis''	58-46	12
von d'' bis f''	45-35	10

Tab. 7: Mindestnachhallzeiten für Sonderbronze- und Sondermessingglocken nach Limburger Richtlinien

Sonderbronze als Glockenwerkstoff wurde erstmals von der Fa. *Junker* in Brilon in Westfalen (Deutschland) in den 1930er Jahren entwickelt, wohl infolge der Weltwirtschaftskrise. Diese Firma arbeitete zu diesem Zeitpunkt u.a. mit Messinglegierungen, wobei hier die unterschiedlichsten Legierungsversuche durchgeführt wurden, als deren Folge schließlich die *Briloner Sonderbronze*, eine Siliziumbronze mit einer durchschnittlichen Zusammensetzung von 92 % Cu, 7 % Si und 1 % Zn entstand^{26) 30)}. Die Produktion von Sonderbronzeglocken setzte aber erst nach 1945 ein. Nach Ende des Zweiten Weltkrieges war in Deutschland (und auch in Österreich) Zinn sehr schwer zu beschaffen. Dadurch erlebte Sonderbronze als Glockenwerkstoff einen großen Aufschwung. Sonderbronzeglocken waren nicht nur um ca. ein Drittel billiger als Zinnbronzeglocken, sondern hatten noch den „Vorteil“, in einem eventuellen Krieg nicht ablieferungspflichtig zu sein (sie sind aufgrund ihrer hohen Festigkeit nur sehr schwer zerstörbar, dazu fehlt noch das Zinn, welches als der Hauptgrund der Glöckenablieferungen betrachtet werden muß). Von 1945 bis 1957 wurden von *Junker* in Brilon ca. 5000 Glocken aus *Briloner Sonderbronze* gegossen, wobei nach Verbesserung der Gußtechnik in den 50er Jahren mit diesem Werkstoff teilweise besonders gute Ergebnisse erzielt worden sind, sehr guter Zinnbronze ebenbürtig. Im großen und ganzen beschränkte sich der Guß von Sonderbronzeglocken auf diese Firma (daneben hat auch die Fa. Pfundner in Wien nach 1945 einige hundert Sonderbronzeglocken gegossen, wobei über die genaue Zusammensetzung des Materials keine Angaben existieren. Die Qualität dieser Sonderbronze liegt aufgrund der meist höheren Materialdämpfung unter der von *Briloner Sonderbronze*).

Messing und Sondermessing

4.5

M e s s i n g e sind Legierungen aus Kupfer und Zink, wobei der Zinkanteil stark variiert und bis 45% betragen kann. Werden zwecks Verbesserung bestimmter Eigenschaften (Erhöhung der Härte und Festigkeit bzw. Korrosionsbeständigkeit) geringe Mengen noch weiterer Bestandteile wie Blei, Nickel, Mangan oder Zinn hinzu legiert, ohne daß die Legierung ihren Messingcharakter verliert, spricht man von S o n d e r m e s s i n g²⁹⁾. Messinge mit einem Gehalt von 36 - 43 % Zn und 1 - 3 % Pb (die Zugabe von Blei erleichtert spangebende Bearbeitung wie Fräsen) werden als G u ß m e s s i n g²⁷⁾ bezeichnet.

Die Eigenschaften (vor allem die mechanischen) und auch das Gefüge von Messing hängen sehr stark von der Zusammensetzung ab. Messing besitzt generell besonders gute Korrosionsbeständigkeit und auch eine relativ hohe Festigkeit, die über den Zn-Gehalt veränderbar sind. Allerdings ist Messing für Spannungsrißkorrosion anfällig, vor allem bei Anwesenheit von Ammoniakspuren, die aus Verbrennungs- oder Faulgasen überall auftreten können. Die akustischen Eigenschaften von Messing bzw. Sondermessing (vor allem die Materialdämpfung; die Innere Tonhöhe läßt sich aus den meist bekannten Daten von Dichte und Elastizitätsmodul ermitteln) sind bis jetzt nur wenig untersucht worden; im Prinzip sind sie aber denen von Zinnbronze sehr ähnlich.

Bis zu einem Gehalt von ca. 37% Zn ist Messing eine einphasige homogene Legierung, bestehend aus α -Mischkristallen und wird daher als α -M e s s i n g bezeichnet. Dieses ist sehr zäh und besitzt bei einem Gehalt von ca. 36% Zn wie Zinnbronze sehr gute akustische Eigenschaften, Materialdämpfung und Innere Tonhöhe sind annähernd gleich, ist aber aufgrund der geringen Härte für den Guß von Kirchenglocken nicht geeignet (starker Verschleiß). Sobald die Zusammensetzung 37 % Zn überschreitet, entsteht ein zweiphasiges Gefüge, das sog. $(\alpha + \beta)$ - M e s s i n g. Dieses ist aufgrund des Zutritts der β -Mischkristalle um einiges härter und fester als α -Messing, aber auch spröder (die Zähigkeit nimmt mit zunehmendem Zn-Gehalt stark ab). Über die Materialdämpfung von $(\alpha+\beta)$ -Messing fehlen zwar jegliche Daten; doch ist anzunehmen, daß diese sich nicht zu sehr von der von α -Messing unterscheidet. G u ß m e s s i n g ist ein Spezialfall von $(\alpha+\beta)$ -Messing, denn das zulegierte Blei ist praktisch unlöslich und sammelt sich als Ausscheidungen im $(\alpha+\beta)$ -Gefüge an. Wie bei $(\alpha+\beta)$ -Messing sind auch bei Gußmessing die akustischen Eigenschaften (Materialdämpfung) bis jetzt noch nicht untersucht worden.

Bei S o n d e r m e s s i n g handelt es sich gefügemäßig meist ebenfalls um $(\alpha+\beta)$ -Messing. Die mechanischen Eigenschaften von Sondermessing hängen stark von Menge und Art der zulegierten Elemente ab. Die für den Glockenguß verwendeten Sondermessinge sind den entsprechenden Sonderbronzen sehr ähnlich; auch sie sind sehr fest und haben prinzipiell gleiche akustische Eigenschaften wie Zinnbronze, zeigen aber ebenfalls die starken Schwankungen bezüglich der Materialdämpfung und damit auch in der Klangqualität. Aus diesem Grund haben die Limburger Richtlinien dementsprechend niedrigere Mindestnachhallzeiten für Sondermessingglocken festgesetzt, die nur ca. 2/3 der von Bronzeglocken betragen (Tab. 7).

M e s s i n g bzw. G u ß m e s s i n g wird nur zum Guß von Schiffs- Signal- und Kuhglocken verwendet. Kirchenglocken wurden nur in Ausnahmefälle gegossen. Die wenigen vorhandenen Messingkirchenglocken wurden als Notglocken nach dem Zweiten Weltkrieg von Industriebetrieben hergestellt (bekannt ist derzeit nur die Fa. *Zahn & Glöckel* in Niederösterreich, die nach 1945 einige Kirchenglocken aus Messing gegossen hat; sie haben einen dumpfen Klang und wenig Tonfülle).

Hingegen fanden S o n d e r m e s s i n g e im Glockenguß eine teilweise recht starke Verbreitung. Sie wurden wie Sonderbronze in dem Ziel entwickelt, das teure Zinn, welches in Deutschland und Österreich nach Ende des Zweiten Weltkrieges kaum vorhanden war, durch andere, preiswertere Metalle zu ersetzen und werden in der Glockenkunde ebenfalls zu den Austauschlegierungen gezählt. Von mehreren, großteils patentierten Legierungen sind hauptsächlich nur zwei zur praktischen Anwendung gekommen: *Euphon* und die sog. *Neulegierung*.

Bei *Euphon* handelt es sich um eine von *E. Vaders*³¹⁾ speziell für den Glockenguß entwickelte Legierung mit der ungefähren Zusammensetzung von 81% Cu, 14% Zn und 5% Si²⁶⁾. Der Name *Euphon* stammt aus dem altgriechischen und bedeutet soviel wie „Schönklang“. Mechanisch betrachtet ist *Euphon* aufgrund seiner hohen Festigkeit und der etwas höheren Zähigkeit gegenüber Zinnbronze begünstigt; *Euphonglocken* gelten praktisch als unzerbrechlich. Akustisch zeigt *Euphon* zwar fast dieselben Eigenschaften wie Zinnbronze, allerdings treten hier, ähnlich wie bei der

Briloner Sonderbronze, starke Unterschiede in der Materialdämpfung auf, die offensichtlich ebenfalls von den jeweiligen Gußbedingungen abhängen. So trifft man neben klanglich guten Euphonglocken mit relativ hohen Nachhallzeiten auch auf solche mit sehr geringer Nachhalldauer und wenig Tonfülle mit dumpfen Klang. Die Klangqualität ist hier genauso wie bei der Briloner Sonderbronze stärker streuend als bei Zinnbronze, allerdings scheint die Neigung zu hoher Materialdämpfung bei Euphon stärker ausgeprägt zu sein als bei Briloner Sonderbronze. Euphon wurde von der Glockengießerei *Czudnochowsky* in Erding (Oberbayern) verwendet, in welcher Firma nach 1945 bis über 700 Euphonglocken entstanden.



Abb. 61: Schliffbild von *Euphon* (Laborprobe)

Die sog. *Neulegierung* wurde nach 1945 von der Glockengießerei *Oberascher* in Salzburg entwickelt und auch sehr stark verwendet (über 1000 Glocken wurden gegossen); es handelt sich hierbei um ein Sondermessing mit der ungefähren Zusammensetzung von 60% Cu, 29% Zn, 6% Pb und 5% Sn (Analyse einer *Oberascher*-Glocke; Institut f. Festkörperphysik, TU Wien). Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften gibt es zwar keinerlei Unterlagen, doch dürften sie den anderen im Glockenguß verwendeten Sondermessingen bzw. Sonderbronzen entsprechen (d.h. höhere Festigkeit als Zinnbronze). Akustisch verhält sich die Neulegierung wie Euphon bzw. Briloner Sonderbronze, nämlich prinzipiell sehr ähnliche akustische Eigenschaften wie Zinnbronze, aber stärkere Schwankungen bezüglich der Materialdämpfung. Obwohl die Neulegierung wie Euphon eher zu höherer Materialdämpfung neigt, so hat sie sich im großen und ganzen ziemlich gut bewährt und muß daher nach der Briloner Sonderbronze als zweitbesten Austauschwerkstoff betrachtet werden.

Die Sondermessinge wurden wie Sonderbronze nur in Deutschland und Österreich verwendet, da sich hier der Zinnmangel nach Ende des Zweiten Weltkrieges besonders drastisch auswirkte. Dementsprechend hoch war anfangs auch der Absatz von aus solchen Legierungen gegossenen Glocken. Als Ende der 50er Jahre Zinn wieder ausreichend zur Verfügung stand, wurde die Produktion von Legierungsglocken eingestellt. Wie Sonderbronzeglocken werden auch solche aus Sondermessing nicht gerechtfertigt als generell minderwertig angesehen, wobei hier die stark schwankenden Ergebnisse bezüglich der Klangqualität (Materialdämpfung) zwar ihren Beitrag geleistet haben, die abwertende Haltung aber in erster Linie auf ideologischen Gründen beruht.

4.6.1 Eigenschaften

Als **Stahl** bezeichnet man Eisen-Kohlenstofflegierungen, deren Kohlenstoffgehalt unter 2 % liegt. Stahl ist schmiedbar; durch Wärmebehandlung sind seine mechanischen Eigenschaften in weiten Grenzen veränderbar (z.B. Härten, Vergüten, Normalglühen, Weichglühen). Man unterscheidet anhand der Zusammensetzung zwischen unlegierten (nur Fe und C) und legierten Stählen (enthält Legierungsbestandteile wie Nickel, Chrom, Mangan). Für Stahlglocken wurden nur unlegierte Kohlenstoffstähle verwendet, und ausschließlich diese sollen nun näher betrachtet werden (wenn im folgenden von Stahl die Rede ist, sind damit immer unlegierte Kohlenstoffstähle gemeint).

Stahl zeigt wie Bronze ein heterogenes Gefüge, welches sich, zumindestens im Gleichgewichtszustand, aus den beiden Phasen Ferrit (α -Eisen) und Zementit (Fe_3C) zusammensetzt. Das Erscheinungsbild hängt sehr stark sowohl vom C-Gehalt als auch von Wärmebehandlungen ab. Bei Nichtgleichgewichtszuständen treten noch Martensit bzw. Zwischenstufengefüge auf, die aber bei Stahlglocken nicht vorkommen. Stahlglocken bestehen, soweit bis jetzt bekannt, aus untereutektoidem Stahl mit mittlerem C-Gehalt (Böhler-Stahlglocken besitzen z.B. etwa 0,6 % C). Drittbestandteile wie Mn und Si sind nur in Spuren vorhanden und herstellungstechnisch bedingt. Stahlglocken zeigen entweder ein Gußgefüge (= sog. Widmannstättengefüge), z.B. Bochumer Stahlglocken, oder, wenn sie wärmebehandelt wurden, ein weichgeglühtes bzw. normalgeglühtes Gefüge, z.B. Böhler-Stahlglocken. Im Gegensatz zur Glockenbronze, die vor allem bei älteren Glocken fast immer stark verunreinigt ist (Tab. 6), ist Stahl bezüglich seiner Zusammensetzung – der Werkstoff ist sehr rein – als besonders hochwertig zu betrachten, zumal Stahlglocken immer in großen Industriebetrieben hergestellt wurden, wo Qualitätskontrollen die Regel sind. Eine Materialanalyse¹¹⁾ einer 1923 gegossenen Böhler-Stahlglocke erbrachte folgendes Ergebnis: C 0,56%, Si 0,30%, Mn 0,01%, Rest < 0,01%.

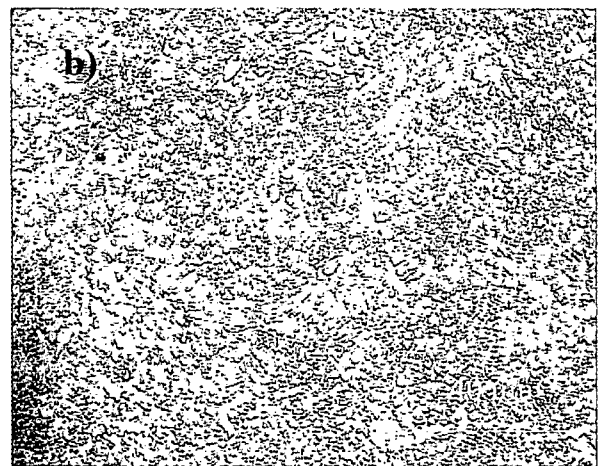
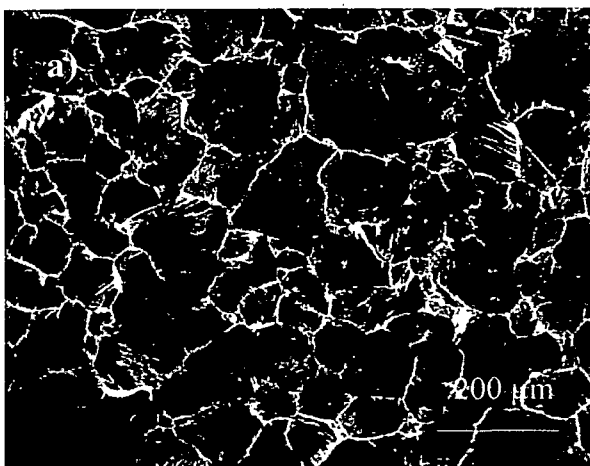


Abb. 62: Schliffbild von Stahl mit ca. 0.6 % C

- a) Gußgefüge (Laborprobe) – Ferritreifen in perlitischer Grundmasse (Perlit = Gemenge aus Ferrit & Zementit)
- b) Weichgeglühtes Gefüge (Böhler-Stahlglocke) – deutlich erkennbar die kleinen Zementitkügelchen, eingebettet in ferritischer Grundmasse

Die mechanischen Eigenschaften von Stahl (Härte, Festigkeit, Zähigkeit) sind von allen Glockenwerkstoffen am besten. Er besitzt eine hohe Festigkeit, ist verschleißfest und beständig gegen mechanische Belastung wie Schlag und Stoß. Die hohe Zähigkeit ist ein besonderer Vorteil von Stahl: Stahlglocken springen daher nicht und überstehen selbst stärkste Belastungen wie Abstürze aus großer Höhe ohne Schaden. Trotz seiner Neigung zur Rostbildung ist Stahl unter normalen Umständen (= Unterbringung in einer geschützten Glockenstube) gegen Witterungseinflüsse ausreichend beständig, und die ältesten Stahlglocken aus der Mitte des 19. Jh. zeigen in der Regel nur eine sehr dünne Rostschicht (meist nur auf der Glockenaußenseite), die zwar den optischen Eindruck beeinträchtigt, nicht aber die Haltbarkeit und die übrigen Eigenschaften des Metalls. Daß die Korrosionsbeständigkeit von Stahl für jahrhundertlangen Gebrauch ausreicht, demonstrieren besonders gut alte Klöppel oder andere Armaturteile wie Achsen und Hängeschrauben, die ebenfalls aus Kohlenstoffstählen wie Stahlglocken bestehen und teilweise seit dem Mittelalter in Verwendung stehen und heute noch einwandfrei sind. Und die allerältesten, aus dünnen Eisenblechen geschmiedeten Glocken sind teilweise noch nach über 1000 Jahren funktionsfähig (z.B. der sog. „Saufang“ in Köln, eine irische Eisenblechglocke aus dem 9. Jh.). Üblicherweise wurden Stahlglocken mit einem Schutzanstrich versehen.

Stahlschmelzen sind zähflüssig und daher nicht leicht vergießbar (füllen die Gußform schlecht aus), weshalb Stahlglocken auch nicht aufwendig verziert sind. Im Gegensatz zu Bronze zeigt Gußstahl normalerweise keine Porosität, weil für den Stahlguß in der Regel sog. beruhigter Stahl verwendet wird, bei dem gelöste Gase (Sauerstoff) durch Zugabe bestimmter Zusätze (z.B. FeSi) gebunden und abgetrennt werden. Allerdings neigt beruhigter Stahl zur Lunkerbildung, weshalb hier besondere gußtechnische Maßnahmen erforderlich sind, damit sich diese nicht in der Glocke ausbilden können (so werden Stahlglocken auf dem „Kopf stehend“ gegossen, wobei sich die Lunker in den am Schlagring angebrachten Eingußtrichtern ausbilden).

Die akustischen Eigenschaften von Stahl unterscheiden sich erheblich von Bronze; so weist Stahl aufgrund des höheren Elastizitätsmoduls eine viel größere Innere Tonhöhe auf: Das Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten von Stahl und Bronze beträgt etwa 1,5, oder musikalisch ausgedrückt, Stahl ist im Ton ungefähr um eine Quinte höher als Bronze. Die Materialdämpfung dagegen ist die kleinste unter allen Glockenmetallen, sie beträgt nur $\delta = \sim 1 \cdot 10^{-4}$; Stahl hat daher besonders lange Abklingzeiten, viel länger als Bronze (etwa doppelt so lange). Interessant ist, daß die akustischen Eigenschaften von unlegierten Kohlenstoffstählen (Materialdämpfung, Innere Tonhöhe) über weite Bereiche sowohl vom C-Gehalt als auch von dessen Gefüge (Gußgefüge, normalgeglühtes Gefüge) praktisch unabhängig sind und Stahl somit ein völlig gegensätzliches Verhalten wie Bronze zeigt, wo etwa eine deutliche Abhängigkeit der Materialdämpfung vom Sn-Gehalt vorhanden ist. Verunreinigungen (Si, Mn) erhöhen offensichtlich die Materialdämpfung, allerdings nur im bescheidenem Umfang, zumal der Gehalt von Drittkomponenten in Stählen immer sehr niedrig ist und auch niedrig gehalten wird (Qualitätskontrollen!). Die Innere Tonhöhe bleibt bei Stahl praktisch konstant.

Aufgrund der hohen Inneren Tonhöhe und der sehr geringen Materialdämpfung besitzt Stahl theoretisch ein Potential, mit dem sich größte Tonfüllen und Nachhallzeiten bei Glocken erzielen lassen sollten. Tatsächlich zeigen aber Stahlglocken in der Regel viel geringere Nachhallzeiten als Bronzeglocken, die bestenfalls nur ein Drittel derjenigen von Bronzeglocken in gleicher Tonlage ausmachen. Dementsprechend gering sind auch die Nachhallzeiten für Stahlglocken bei den Limburger Richtlinien¹⁶⁾ gesetzt worden (Tab. 8). An Stahlglocken durchgeführte Dämpfungsmessungen ergaben ebenfalls bestens Werte von ca. $\delta = 8 \cdot 10^{-4}$. Wie ist das zu erklären?

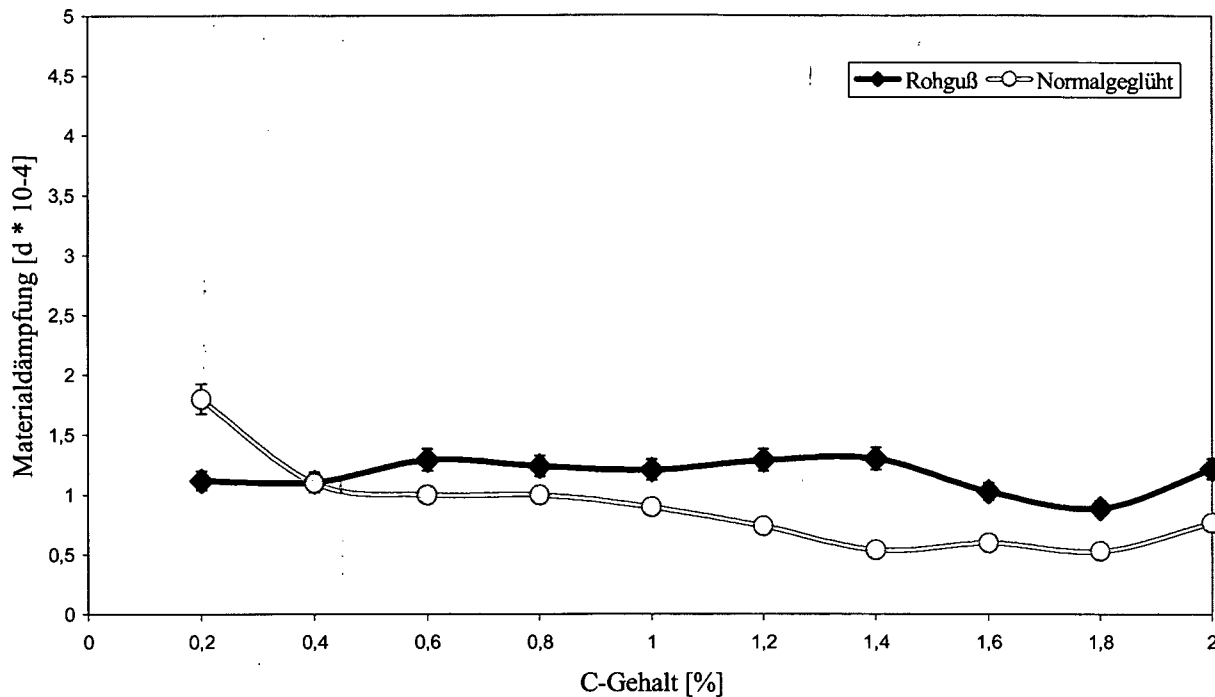


Diagramm 7: Abhängigkeit der Materialdämpfung von Stahl vom C-Gehalt und vom Gefügestand¹¹⁾

Glockengröße	Nachhalldauer Unterton [s]	Nachhalldauer Prim & Terz [s]
von h° bis c'	60	22
von cis' bis e'	50	18
von f' bis a'	40	14
von b' bis cis''	25	10
von d'' bis f''	20	8

Tab. 8: Mindestnachhallzeiten für Stahl- und Hartgußglocken nach Limburger Richtlinien

Erst jüngste Untersuchungen¹¹⁾ haben ergeben, daß für die hohe Dämpfung von Stahlglocken innere Spannungen an der Glockenoberfläche verantwortlich sind, die beim Fräsen und Schleifen erzeugt werden. Bis jetzt nahm man an, daß Stahl generell eine hohe Materialdämpfung besitzt. Durch spangebende Bearbeitung (Fräsen, Drehen, Schleifen) werden jedoch infolge der hierdurch erzeugten Oberflächenverformungen innere Spannungen in die Oberfläche injiziert, welche wie ein dämpfender Belag wirken und dadurch die Materialdämpfung deutlich erhöhen, und zwar umso mehr, je stärker die Oberfläche deformiert wird. Weil es sich hierbei um einen Oberflächeneffekt handelt, nimmt die durch spangebende Bearbeitung erzeugte Dämpfung zu, je größer die spezifische Oberfläche (Oberfläche bezogen auf die Masse) eines Körpers ist. Allerdings kann die durch innere Spannungen erzeugte Dämpfung durch eine Wärmebehandlung (z.B. Spannungsarmglühen) praktisch beseitigt werden, und der Stahl erhält wieder seine ursprünglichen niedrigen Dämpfungswerte. Weil die durch innere Spannungen erzeugte Dämpfung beseitigbar ist, kann man in diesem speziellen Fall bei Kohlenstoffstählen von „temporärer Dämpfung“ sprechen (Diagramm 8).

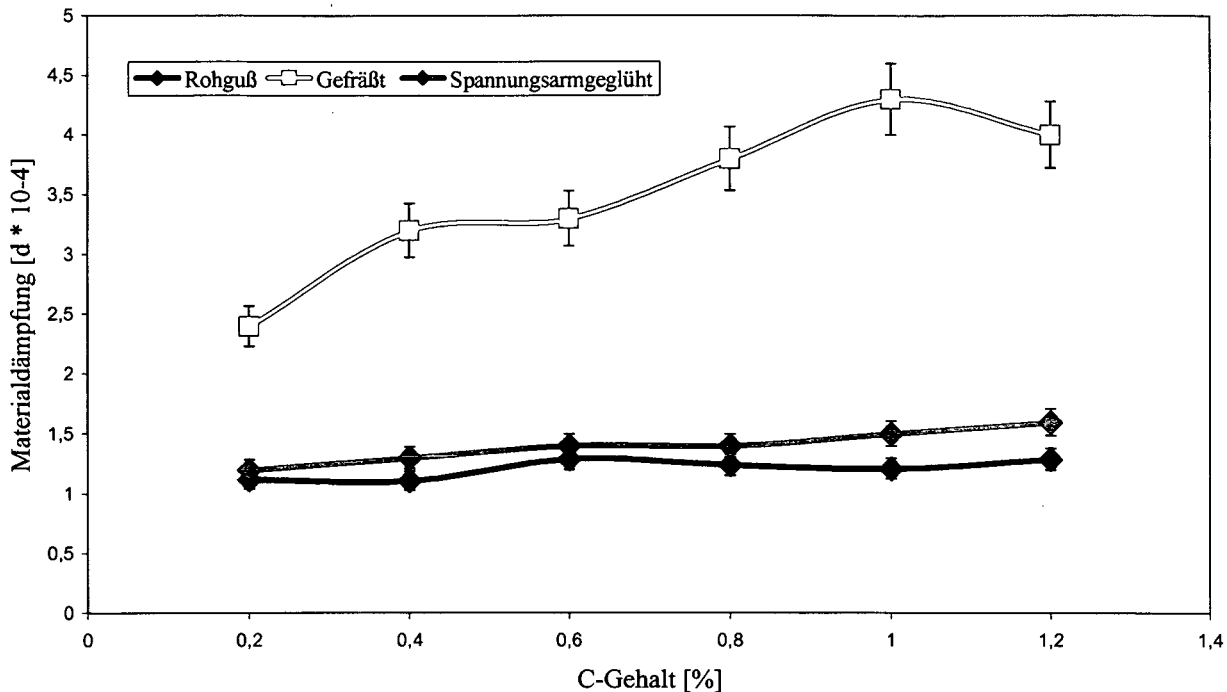


Diagramm 8: Materialdämpfung von Stahl in Abhängigkeit von Bearbeitungszustand und Wärmebehandlung

Stahlglocken sind unmittelbar nach dem Guß wie alle anderen Gußgegenstände unansehnlich und müssen von Gußformresten (angebrannter, festgebackener Formsand) befreit (mit Preßluftmeißel), gesäubert und anschließend poliert (geschliffen) werden. Bei Stahlglocken befinden sich die Gußtrichter nicht oben an der Krone, sondern unten am Schlagring an der Glockeninnenseite (Stahlglocken werden auf dem „Kopf stehend“ gegossen). Die Überreste der Gußtrichter und Aufgußreste müssen nach dem Guß beseitigt werden, weshalb alle Stahlglocken an der Glockeninnenseite gedreht (gefräßt) wurden. Klangkorrekturen, falls durchgeführt, erfolgen ebenfalls durch Abschleifen von Metall an der Glockeninnenseite. All diese Vorgänge erhöhen die durch innere Spannungen induzierte Dämpfung in der Stahlglocke. Dazu kommt noch der Umstand, daß Glocken allgemein eine besonders hohe spezifische Oberfläche besitzen, wodurch sich der Effekt der „temporären Dämpfung“ noch vervielfacht. Die für Stahlglocken typischen kurzen Nachhallzeiten sind die Folge.

Weil diese aufgrund „temporärer Dämpfung“ resultieren, sollte eine nachträgliche Wärmebehandlung von Stahlglocken zu einer merklichen Erhöhung der Nachhallzeiten und damit auch Erhöhung der Tonfülle führen. Diese Wärmebehandlung wurde bis jetzt noch an keiner Stahlglocke bewußt ausprobiert (bis jetzt nur Versuche an verschiedenen Stahlproben¹¹⁾), allerdings zeigen Stahlglocken, die unfreiwillig infolge eines Kirchenbrandes einer „Wärmebehandlung“ unterzogen wurden, daß ein nachträgliches Glühen den Klang von Stahlglocken positiv beeinflusst. Ein Beispiel dafür stellen die Stahlglocken von Maria Langegg in Niederösterreich dar, was auf den nachfolgenden Seiten noch genauer erläutert wird. Bei Bronzeglocken hingegen kann man die Nachhallzeiten und damit auch die Tonfülle durch eine Wärmebehandlung kaum mehr verändern, da hier eine höhere Materialdämpfung hauptsächlich durch Porosität erzeugt wird, die nach dem Guß nicht mehr zu beseitigen ist. Daß Stahlglocken aber trotz ihrer geringen Nachhallzeiten in der Regel dennoch ausreichende bis große Tonfülle besitzen, liegt daran, daß sie aufgrund der hohen Inneren Tonhöhe bedingten größeren Dimensionierung nur eine recht geringe Strahlungsdämpfung aufweisen, wodurch die Tonfülle bekanntlich ansteigt (vergl. dazu Abb. 33 in Kap. 3.3.2).

Beispiel für das Erhöhen der Tonfülle bei Stahlglocken

Die Wallfahrtskirche Maria Langegg (Nö) besaß früher ein 4-stimmiges Geläute, bestehend aus 3 Stahlglocken von Böhrler und einer alten Bronzeglocke. 1966 brannte der Turm infolge von Blitzschlag nieder. Die Stahlglocken überstanden den Brand schadlos und werden heute noch verwendet; die Bronzeglocke ist aber seitdem nicht mehr klangfähig und heute in der Vorhalle der Kirche aufgestellt; sie wurde durch neue Bronzeglocken ersetzt. Durch das Feuer bzw. die vom Turmbrand ausgehende Wärmestrahlung sind die Stahlglocken einer, wenn auch höchst obskuren „Wärmebehandlung“ unterzogen worden, die das Klangverhalten der Stücke teilweise merklich verändert hat. Zwar liegen keinerlei Aufzeichnungen über die Nachhallzeiten der Glocken vor; allerdings sind Tonbandaufnahmen vorhanden, welche das Geläute vor und nach dem Turmbrand dokumentieren. Anhand dieser Tonbandaufnahmen läßt sich das Klangvermögen KV und damit die Tonfülle der Glocken quantitativ bestimmen.

Die kleinste Stahlglocke (Ton a') hatte vor dem Brand eine stark gedämpfte Tongebung und besaß sehr wenig Tonfülle, nur $KV = 5,4 \pm 1,3 \%$. Grund dafür ist ein Materialfehler, denn die Glocke weist im Schlagringbereich zahlreiche Lunker auf, die auf porösen Guß hindeuten (daher hohe Materialdämpfung). Da hohe Materialdämpfung infolge Porosität nicht mehr zu beseitigen ist, ist die Tonfülle dieser Glocke nach dem Brand erwartungsgemäß nur sehr geringfügig angestiegen, sie beträgt nun $KV = 6,3 \pm 1,6 \%$, was ebenfalls sehr wenig ist; gehörmäßig klingt das Stück genauso dürrig wie vorher.

Ganz anders verhielt sich die große Stahlglocke (Ton c'). Sie hatte schon früher einen kräftigen, vollen Ton mit $KV = 13,5 \pm 1,5 \%$, der das Geläute nachhaltig prägte. Durch die Einwirkungen des Brandes klingt diese Glocken nun noch klangvoller als vorher, was auch die Klanganalyse bestätigt, denn die Tonfülle ist auf $KV = 17,3 \pm 1,3 \%$ gestiegen, was einen äußerst beachtlichen Wert darstellt (vergl. dazu Abb. 63).

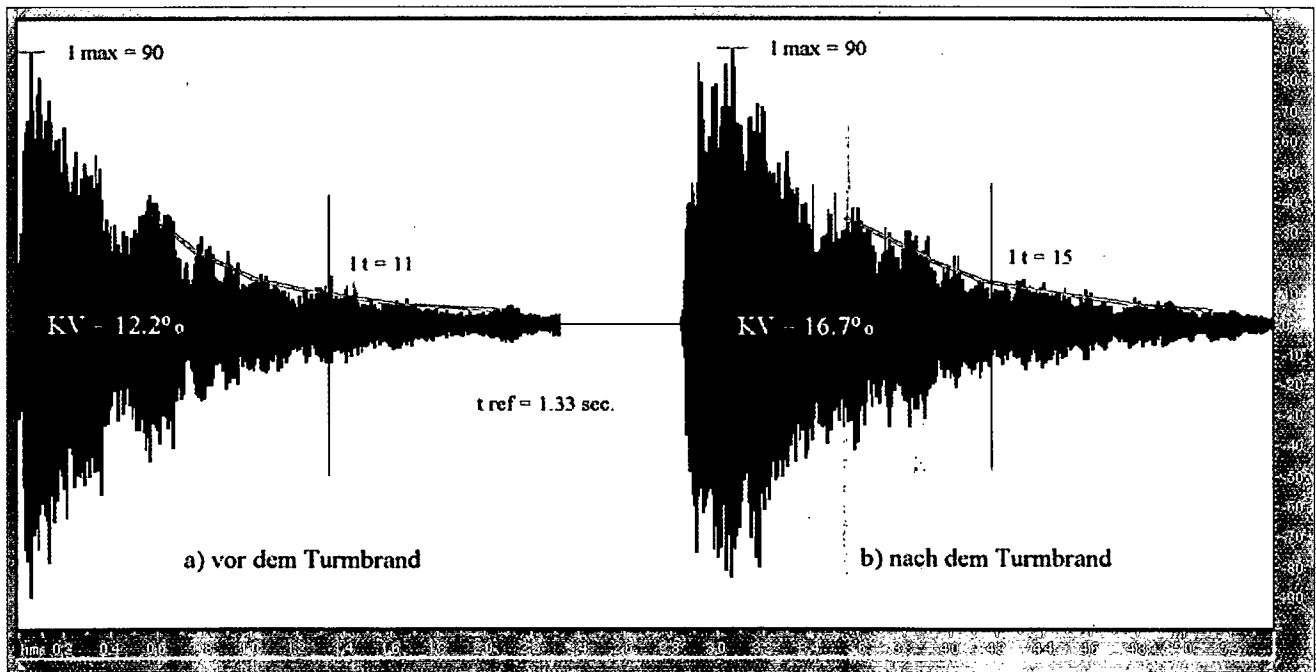


Abb. 63: Amplitudendiagramm je eines Klöppelanschläges der großen Stahlglocke a) vor dem Turmbrand und b) nach dem Turmbrand.

Von der zweitgrößten Stahlglocke (Ton e') ließ sich nur die jetzige Tonfülle (d. h. nach dem Brand) mit $KV = 17,2 \pm 0,9 \%$ exakt bestimmen, da vom vorherigen Zustand keine für die Auswertung brauchbare (Einzel-) Aufnahme vorhanden war (Aufnahme nur im Rahmen des Vollgeläutes, daher stand kein genügend langer Klöppelanschlag zur Verfügung); durch Extrapolation mehrerer Klöppelanschläge ließ sich die ursprüngliche Tonfülle näherungsweise mit ungefähr $KV = 13 \%$ ermitteln, was auch der gehörmäßigen Bewertung nahekommt, denn diese Glocke wies früher eine Tonfülle auf, die höchstensfalls die der großen Glocke entsprach; sie erschien im Vergleich zu dieser ein wenig matt im Ton. Nichtsdestoweniger ist daraus ersichtlich, daß auch die zweitgrößte Stahlglocke deutlich an Tonfülle zugenommen hat; sie klingt heute merklich heller und auch fülliger als vorher und steht heute bezüglich des Klangverhaltens (Tongebung) der großen Glocke um nichts nach.

Es ist anzunehmen, daß mit der Abnahme der Materialdämpfung (zumindestens bei den beiden großen Stahlglocken) auch die Tonspanne zugenommen und die Tönigkeit sich in Richtung höherer Frequenzen verschoben hat, was sich aber mit den vorhandenen Tonbandaufnahmen nicht exakt nachweisen läßt, denn deren Aufnahmequalität ist diesbezüglich zu unterschiedlich. Unterschiede in der Aufnahmequalität schlagen sich in erster Linie auf die Tönigkeit/Tonspanne nieder, während die Tonfülle dadurch praktisch nicht beeinträchtigt wird. Die Verschiebungen in der Tonfülle gehen daher auf die Glocken zurück und nicht auf qualitätsmäßige Unterschiede in den Tonbandaufnahmen; dies ist u.a. daraus ersichtlich, daß die Tonfülle bei den einzelnen Glocken verschiedentlich zugenommen hat.

Die Dimensionierung fällt bei Stahlglocken aufgrund der hohen Inneren Tonhöhe enorm groß aus, wenn man diese in Rippen für Bronzeglocken gießt (Dimensionierungen bis $D > 50!$). Um aber auf mit Bronzeglocken halbwegs vergleichbare Dimensionierungen zu kommen, gießt man Stahlglocken besonders dünnwandig (Verringern der Wandstärke erniedrigt die Dimensionierung); sie haben in der Regel Rippenstärken im Bereich von $RS = \text{ca. } -20$ bis -25 (oder anders ausgedrückt ca. $2/3$ der Wandstärke von Bronzeglocken in mittlerer Rippe) und besitzen dann Dimensionierungen, die derjenigen sehr schwerrippiger Bronzeglocken entsprechen (etwa $D = 10 - 15$). Aufgrund der Dünnwandigkeit und der geringeren Dichte von Stahl besitzen Stahlglocken eine geringere Rippenschwere als Bronzeglocken. Ein Verringern der Wandstärke fördert allerdings Obertönigkeit und größere Tonspannen, und weiters wird dadurch, abhängig von der jeweiligen Rippenkonstruktion, die Anfälligkeit für höherem Geräuschanteil, hartem Anschlag, aber auch für Nebenschlagtongeräusche erhöht. Die typische kurze bzw. harte, mit einem mehr oder weniger ausgeprägtem blechernem Akzent behaftete Tongebung mittelmäßiger und schlechter Stahlglocken sind die Folge, die bei ungünstig konstruierter Rippe in tiefen Tonlagen aufgrund von Nebenschlagtongeräuschen zusätzlich einen röhrenden, kesselartigen Beiklang aufweist („Stahlklang“). Die Klangqualität von Stahlglocken wird bei dünnwandigem Guß daher besonders stark von der jeweiligen Rippenkonstruktion geprägt. In Rippen für Bronzeglocken gegossen zeichnen sich Stahlglocken jedoch durch besonders große Tonfülle und weiche Tongebung aus, wie z.B. die in 1. Versuchsrippe gegossenen Böhler-Stahlglocken beweisen (siehe dazu Abb. 33 in Kapitel 3.3.2, Glocke b). Trotz dünner Rippen verhalten sich Stahlglocken bezüglich der Klangqualität ähnlich wie Bronzeglocken: So ist die Mehrheit der Stücke, je nach Konstruktion der Glockenrippe, von recht guter bis sehr guter Klangqualität (Klq. im Bereich von I bis III), wobei die jüngeren Glocken in der Regel besser sind als die alten, und nur eine Minderheit ist wirklich schlecht (Klq. unter III).

Dennoch werden Stahlglocken in der Glockenkunde als generell minderwertig betrachtet. In erster Linie haben nicht objektive Urteile von verschiedenen Glockensachverständigen, die nur Bronze als einzig zulässiges Glockenmetall akzeptieren und daher die Verwendung von Stahl und anderen Metalle von Grund auf ablehnen und sogar teilweise bekämpfen, erheblich zur abwertenden

Meinung über Stahlglocken beigetragen. Unwahre Behauptungen, daß Stahlglocken prinzipiell schlechter klingen als Bronzeglocken bzw. durchrosten und dann vom Turm fallen sowie ideologische Aussagen wie Stahl sei unedel und hätte keine „Seele“; Stahlglocken seien Not- oder Ersatzglocken, Stahl klingt hart etc., aber auch mangelndes Wissen (Verwecheln von Stahl mit Gußeisen, die Unkenntnis über den Einfluß von Form und Material auf den Glockenklang, fehlende Kenntnis über die Eigenschaften von Stahl) sind schuld daran, daß Stahlglocken als zweitklassig angesehen werden. Diese Anti-Stahl-Propaganda betrifft aber nicht nur die Glocken selbst, sondern auch Armaturen und Glockenstühle (siehe Kapitel 6.4.3 und 6.5). Sonderbronze-, Sondermessing- und Gußeisenglocken (in Prinzip allen Nichtbronzeglocken) geht es nicht besser bezüglich „objektiver“ Bewertung.

4.6.2 Die Stahlglocke – durch Zufall entstanden

Um 1850 war es dem aus Schwaben gebürtigen *Jakob Mayer* als erstem gelungen, flüssigen Stahl in aus feuerfestem Material hergestellte Formen zu gießen. Damit hatte Mayer eine Aufgabe gelöst, der lange Zeit unüberbrückbare Schwierigkeiten entgegenstanden. Um die Vergießbarkeit von Gußstahl zu dokumentieren, goß er als Versuchsobjekte vor allem Glocken. Dies war die Geburtsstunde der Stahlglocke, die ihre Entstehung mehr einem Zufall verdankt, und seit 1851 wurden Stahlglocken von der von Jakob Mayer gegründeten Gußstahlfabrik *Mayer & Kühne*, seit 1854 *Bochumer Verein für Gußstahlfabrikation*, gegossen. Bereits auf der Weltausstellung in Paris 1855 erregten Gußstahlglocken großes Aufsehen, wurden aber von Alfred Krupp und anderen Stahlfachleuten für Gußeisenglocken gehalten, da man damals die Herstellung von so großen Gußstücken aus Stahl für unmöglich hielt. Zum Gegenbeweis wurde eine Glocke zerschlagen und Stücke davon ausgeschmiedet und gehärtet, womit festgestellt war, daß es sich tatsächlich um Stahlguß handelte. Seitdem erfreuten sich Stahlglocken regster Nachfrage und erhielten auf späteren Weltausstellungen hohe Auszeichnungen. Die weitere Geschichte der Stahlglocke ist eng mit dem *Bochumer Verein* (Deutschland), aber auch mit den *Böhlerwerken* in Kapfenberg (Österreich) verbunden. Besonders der Bochumer Verein, die größte Glockengießerei, die es je gab, führte mehr als jede andere deutsche Glockengießerei Forschungen und wissenschaftliche Untersuchungen über Glockenrippen zwecks Verbesserung der Klangqualität und das Klangverhalten von Glocken durch (in Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig).

Gußstahl war von Anfang an als der Zinnbronze ebenbürtiger, alternativer Werkstoff gedacht und ist kein Ersatzwerkstoff, der wie Gußeisen und Sonderbronze aus einer Zwangslage aus entwickelt bzw. verwendet wurde. Denn es bestand nämlich zur Zeit der Entstehung der Gußstahlglocke überhaupt kein Bedarf, Zinnbronze durch Stahl zu ersetzen: Diese stand im Übermaß zur Verfügung. Stahl war damals ein Symbol für Fortschritt, technische Innovation und Moderne, ein Faktor, der sicherlich stark zur Verbreitung der Stahlglocke beigetragen hat. Daß Stahlglocken in den Weltkriegen nicht beschlagnahmt worden waren, förderte neben dem günstigen Preis noch zusätzlich ihre weitere Verbreitung. Besonders nach den Weltkriegen war die Nachfrage groß, denn Zinnbronze war teuer und kaum vorhanden. Als nach den Kriegen der Markt gesättigt war und die meisten Kirchen mit Glocken versehen waren, wurde aus Rationalisierungsgründen die Produktion der Stahlglocken eingestellt und seit 1970 werden, zumindestens im deutschen Sprachraum, keine Stahlglocken mehr gegossen. Die Herstellung von Stahlglocken beschränkte sich hauptsächlich auf Deutschland und Österreich.

Die meisten Stahlglocken wurden vom Bochumer Verein gegossen, die im Zeitraum von 1851 bis 1970 Zehntausende von Glocken in alle Welt geliefert haben. Böhler hat immerhin einige tausend Stahlglocken in der Zwischenkriegszeit geschaffen. Diese beiden Firmen waren von Anfang an bemüht, Glocken mit bester Klangqualität zu entwickeln und zu gießen, was sich u.a. in der Konstruktion zahlreicher „Versuchsrippen“ äußerte, mit welchen man Verbesserungen in der

Klanggüte erprobte. Daneben hat auch die Fa. *Buderus* in Wetzlar (Deutschland) einige Stahlglocken hergestellt. Ob aber anderen Gießereien wie das *Lauchhammerwerk* (ehem. DDR) und die Betriebe in den ehemaligen Ostblockstaaten auch wirklich Gußstahlglocken und nicht Gußeisenglocken gegossen haben, ist aufgrund fehlender Unterlagen, Materialanalysen etc. derzeit nicht zu beantworten.

Gußeisen

4.7

Gußeisen ist eine Legierung aus Eisen und Kohlenstoff, wobei der C-Gehalt über 2 % liegt. Da das Gefüge von Gußeisen sich im Aufbau von dem des Stahles stark unterscheidet, besitzt dieses grundsätzlich andere Materialeigenschaften. So ist Gußeisen weder härtbar noch schmiedbar, dafür aber besonders fest und hart, aber auch spröde und schlagempfindlich. Gußeisen läßt sich nur durch Gießen oder spangebende Verfahren (z.B. Fräsen) formen. Die Schmelze ist dünnflüssig und läßt sich leicht vergießen, daher besitzen Gußeisenglocken teilweise reiche Verzierungen, im Gegensatz zu Stahlglocken, wo das aufgrund der zähflüssigen Schmelze nicht möglich ist. Gußeisen ist um einiges billiger wie Gußstahl. Je nachdem, in welcher Phase der Kohlenstoff im Gußeisen vorliegt, unterscheidet man zwischen Hartguß (C im Eisen gelöst bzw. als Zementit gebunden) und Grauguß (C als Graphit ausgeschieden; von dessen grauer Färbung stammt auch der Name Grauguß). Aufgrund seiner extrem hohen Materialdämpfung, die vom Graphit herrührt, kommt Grauguß als Glockenwerkstoff nicht in Frage (hat praktisch keinen Klang); Gußeisenglocken bestehen daher sämtlich aus Hartguß, der nun näher betrachtet werden soll.



Abb. 64: Schliffbild von Gußeisen

a) Hartguß (Laborprobe) – sog. ledeburitisches Gefüge

b) Grauguß (Laborprobe) – deutlich erkennbar die dunklen Graphitlamellen, eingebettet in perlitischer Grundmasse

Hartguß ist äußerst hart und verschleißfest, jedoch auch sehr spröde. Aus diesem Grund neigen Gußeisenglocken, genauso wie Bronzeglocken, zum Zerspringen. Beschädigte Gußeisenglocken können nicht repariert und müssen ersetzt werden. Die Korrosionsbeständigkeit von Hartguß dürfte dieselbe sein wie bei Stahl, doch gibt es darüber keine verlässlichen Unterlagen; Gußeisenglocken gelten in der Glockenkunde als korrosionsanfälliger als Stahlglocken, wobei hier aber offensichtlich Schäden durch Korrosion (d.h. Rostbildung an der Oberfläche) und Schäden aufgrund der hohen Sprödigkeit des Materials (d.h. das Zerspringen der Glocke) verwechselt werden²⁾. Die Haltbarkeit von Gußeisenglocken ist aus letzterem Grund wie bei Bronzeglocken stark unterschiedlich („Ende“ durch Sprung) und liegt auf alle Fälle unter der von Stahlglocken.

Obwohl Hartguß ein industriell verwendeter Werkstoff ist, so wurden bis jetzt noch nie Untersuchungen bezüglich seiner akustischen Eigenschaften durchgeführt, weshalb detaillierte Aussagen zu diesen teilweise gänzlich fehlen. Einige wenige Dämpfungsmessungen wurden in dieser Arbeit an Gußeisenglocken getätigt, wodurch wenigstens ein paar Anhaltspunkte gewonnen werden konnten. Die Innere Tonhöhe läßt sich aus den Werten von Dichte und Elastizitätsmodul berechnen.

Die Materialdämpfung von Gußeisenglocken liegt in einer Größenordnung, die derjenigen von Stahlglocken entspricht, ungefähr $10 \cdot 10^{-4}$, sie kann aber manchmal erheblich größer sein. Denn bei Hartguß ist immer die Wahrscheinlichkeit vorhanden, daß sich beim Abkühlen der Schmelze der Kohlenstoff teilweise auch als Graphit ausscheidet (= Entstehen von Graugußgefüge, damit Erhöhung der Materialdämpfung; man nennt diese Mischgefüge aus Hartguß und Grauguß meliertes Gußeisen). Dieser Vorgang hängt stark von der Abkühlgeschwindigkeit, vom C-Gehalt und von der Gegenwart von Begleitelementen wie Si und Mn ab^{27) 29)}. Mit zunehmender Wandstärke (= geringere Abkühlgeschwindigkeit) wird die Bildung von Grauguß gefördert, ebenso bei steigendem C- und Si-Gehalt; hingegen begünstigt ein höherer Mn-Anteil die Bildung von Hartguß. Schon allein aufgrund der recht hohen Wandstärken bei Glocken (mehrere cm) sind die Bedingungen für die Ausbildung von Graueisengefüge immer gegeben (insbesondere im Schlagringbereich, wo die Glockenwandung am stärksten ist), und das würde auch die teilweise besonders geringen Nachhallzeiten von Gußeisenglocken erklären. Die Bildung von „temporären Dämpfung“ durch spangebende Verfahren wie bei Stahl erscheint bei Hartguß aufgrund seiner hohen Sprödigkeit als sehr unwahrscheinlich (keine Verformung der Oberfläche; dasselbe gilt auch für Glockenbronze, die ebenfalls sehr spröde ist). Jedenfalls sind die von den Limburger Richtlinien¹⁶⁾ festgesetzten Mindestnachhallzeiten für Gußeisenglocken sehr niedrig und entsprechen denen von Stahlglocken (d. h. nur etwa ein Drittel der von Bronzeglocken – siehe Tab. 8). Wie groß die Materialdämpfung von reinem Hartguß aber wirklich ist, kann aufgrund fehlender Untersuchungen derzeit nicht gesagt werden.

Hartguß besitzt wie Stahl ebenfalls eine sehr große Innere Tonhöhe (das Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten von Hartguß und Bronze beträgt etwa 1,35, d.h. Hartguß ist etwa eine Quarte höherstehend als Bronze), weshalb sehr hohe Dimensionierungen die Folge sind. Aufgrund der Sprödigkeit des Materials ist jedoch kein dünnwandiger Guß zwecks Kompensation der Glockengröße (wie bei Stahlglocken) möglich, weshalb Gußeisenglocken in Rippen gegossen werden müssen, die in der Stärke mit leichten Bronzerippen vergleichbar sind (Gußeisenrippen sind daher Bronzerippen). Dadurch sind Gußeisenglocken jedoch besonders hoch dimensioniert (D = um 30, sind also noch höher dimensioniert als extremst schwerrippige Bronzeglocken), der Raumbedarf im Turm ist daher dementsprechend hoch. Aufgrund ihrer überdimensionalen Glockengrößen ist die Tonfülle von Gußeisenglocken trotz der hohen Materialdämpfung ausreichend bis recht groß (sehr geringe Strahlungsdämpfung), sofern nicht ausgeschiedener Graphit die Materialdämpfung zu stark erhöht und den Klang sehr dumpf macht. Aufgrund der im Vergleich zu Stahlglocken viel stärkeren Rippen klingen Hartgußglocken in der Regel nicht so obertönig bzw. hell wie diese und besitzen vielmehr ein grundtöniges Klangspektrum mit weicher, leicht gedämpfter Tongebung, woran man Gußeisenglocken von Stahlglocken normalerweise unterscheiden kann. Die Klangqualität von Gußeisenglocken ist wie bei Sonderbronzeglocken eher stärker streuend, je nachdem ob sich im Gefüge Graphit befindet oder nicht, und reicht von sehr gut bis ziemlich schlecht (Klq. im Bereich von I bis III-IV), doch die Mehrheit der Gußeisenglocken dürfte durchwegs gute Klangqualität (Klq. II) besitzen; dies zeigen jedenfalls die in Österreich vorhandenen Stücke.

Gußeisen wurde hauptsächlich nur in Notzeiten, in der Bronze schwer beschaffbar war, verwendet. Gußeisenglocken lassen sich schon seit dem 17. Jh. nachweisen (1610 in Genf, später auch in Preußen). Doch waren das nur seltene Ausnahmefälle. Erst nach dem Ersten Weltkrieg und besonders nach 1945 kamen Gußeisenglocken stark auf. Ihre Herstellung und Verbreitung

beschränkt sich hauptsächlich auf Deutschland, die ehem. DDR (hier sind etwa die Hälfte aller vorhandener Glocken aus Gußeisen) und die Ostblockstaaten (vor allem Polen). Die bedeutendsten Gießereien waren die Firmen *Schilling & Lattermann* (ehem. DDR) und *Ulrich & Weule* (nach 1945 *Weule* allein) in Deutschland, die Zehntausende von Gußeisenglocken gegossen haben. Diese Betriebe haben ihre Glocken irrtümlicherweise zuerst als „Stahlglocken“, später als „Klangstahl-“ bzw. „Klanggußglocken“ auf den Markt gebracht, eine Werbestrategie, die bessere Qualität vortäuschen sollte und ebenfalls zur Verwechslung von Stahl und Gußeisenglocken beigetragen hat. Gußeisenglocken werden in Deutschland seit den 60er Jahren nicht mehr hergestellt, dürften im Ostblock dagegen noch produziert werden. Daß Gußeisenglocken eine besonders schlechte Stellung in der Reihe der Sachverständigen einnehmen, muß nicht sonderlich erwähnt werden.

Zinklegierung (Weißbronze)

4.8

Die Glockengießerei *Grüniger* in Deutschland goß nach dem 2. Weltkrieg Glocken aus einer patentierten **Z i n k l e g i e r u n g**, die aufgrund ihrer weißen Farbe von der Firma irrtümlicherweise als **W e i ß b r o n z e** bezeichnet und vertrieben wurde. Diese besteht aus 95% Feinzink, der Rest ist Aluminium und Kupfer, welche zwecks Erhöhung der Festigkeit und besserer Vergießbarkeit zugemischt wurden, aber auch, um eine feinkristallinere Struktur zu erhalten³²⁾. Die Glocken wurden nach dem Guß einer Wärmebehandlung unterzogen (Homogenisierungsglügen) und erreichen manchmal akzeptable Klangergebnisse, die Mehrheit ist aber qualitätsmäßig unterdurchschnittlich (geringe Nachhallzeiten – hohe Materialdämpfung). Die Firma ging 1951 in Konkurs.

Weißbronze ist relativ weich, weshalb Glocken aus diesem Metall in kurzer Zeit stark ausgeschlagen und abgenutzt sind. Aus diesem Grund ist sie für den Glockenguß nicht geeignet. Die akustischen Eigenschaften sind denen von Zinnbronze teilweise recht ähnlich (vergleichbare Innere Tonhöhe), allerdings ist die Materialdämpfung deutlich größer, und diese dürfte stark vom Gefüge und damit von den jeweiligen Gußbedingungen abhängen. Daher gibt es auch hier stark schwankende Ergebnisse, von heller, leicht gedämpfter Tongebung und recht guter Klangqualität bis sehr dumpfem Glockenklang.

Einige Zinkglocken, gegossen aus Feinzink, wurden während des Zweiten Weltkrieges im Deutschen Reich als Ersatzglocken für die abgelieferten Bronzeglocken hergestellt (sog. Kriegsglocken). Ihre Klangqualität ist schlecht, der Ton matt.

Material	Vorteil	Nachteil
Zinnbronze	<ul style="list-style-type: none"> - sehr gute akustische Eigenschaften - Material sehr gut vergießbar - sehr korrosionsbeständig - Material ist bei Um-/Neuguß wiederverwertbar - Reparatur durch Schweißen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - sehr spröde, neigt zum Springen - hohe Gaslöslichkeit der Schmelze, neigt bei schlechter Gußtechnik zur Porosität, damit verbunden hohe Dämpfung und geringe Nachhallzeiten und Tonfülle, die nicht mehr zu beseitigen sind - teuer in der Anschaffung - im Kriege ablieferungspflichtig
Sonderbronze & Sondermessing	<ul style="list-style-type: none"> - prinzipiell sehr gute akustische Eigenschaften - hohe Festigkeit, geringe Sprunggefahr - sehr korrosionsbeständig - billig in der Anschaffung 	<ul style="list-style-type: none"> - Dämpfung hängt stark von den Gießbedingungen ab, damit verbunden starke Unterschiede in der Klangqualität möglich (sehr große bis geringe Nachhallzeiten)
Stahl	<ul style="list-style-type: none"> - ausgezeichnete mechanische Eigenschaften (sehr fest und zäh), keine Sprunggefahr, übersteht stärkste Belastungen - prinzipiell sehr geringe Dämpfung (d. h. hohe Abklingzeiten, große Tonfülle), kann durch spezielle Wärmebehandlung auch nach dem Guß erreicht werden - hohe „Innere Tonhöhe“, begünstigt große Tonfülle - billig in der Anschaffung 	<ul style="list-style-type: none"> - durch Bearbeitung der Oberfläche (Schleifen) starker Anstieg der Dämpfung, damit verbunden geringe Nachhallzeiten und Tonfülle; dies kann aber durch spezielle Wärmebehandlung großteils rückgängig gemacht werden. - aufgrund hoher „Innerer Tonhöhe“ große Dimensionierung, die nur durch dünnwandigen Guß kompensiert werden kann; damit verbunden klangliche Nachteile möglich (blecherner bzw. harter Klang, Nebenschlagtongeräusche)
Hartguß	<ul style="list-style-type: none"> - Material sehr gut vergießbar - sehr hart und verschleißfest - hohe „Innere Tonhöhe“, begünstigt große Tonfülle - billig in der Anschaffung 	<ul style="list-style-type: none"> - sehr spröde, neigt zum Springen - teilw. hohe Dämpfung, damit verbunden geringe Nachhallzeiten und Tonfülle, stark abhängig vom Gußgefüge - aufgrund hoher „Innerer Tonhöhe“ große Dimensionierung, welche konstruktionsmäßig nicht kompensiert werden kann
Zinklegierung (Weißbronze)	<ul style="list-style-type: none"> - billig in der Anschaffung 	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Härte, damit starker Verschleiß - teilw. große Dämpfung, damit schlechte Klangqualität

Tab. 9: Vor- und Nachteile verschiedener Glockenwerkstoffe

5. Ton- und Glockenrippenberechnungen

Konstruieren von Glockenrippen

5.1

Beim Glockenguß wird die Glockenrippe mittels einer *Schablone* konstruiert, mit deren Hilfe man die Gußform für die Glocke herstellt. Die Schablone besteht aus einem Brett, in dem die Außen- bzw. Innenkonturen der Glockenrippe eingeschnitten sind. Diese Konturen, welche die Glockenrippe bilden, kann man sich aus Kreisbögen und geraden Linien zusammengesetzt denken und werden daher am zweckmäßigsten mittels Zirkel und Lineal konstruiert. Dabei sind die verschiedenen Abmessungen (Durchmesser und Umrißmaße der Glocke, Radien der Kreisbögen, Abstände, Wandstärken, etc.) Vielfache oder Bruchteile eines Grundmaßes, dem sogenannten Schlagmaß oder *Schlag*³²⁾. Oft entspricht die Länge des Schlagmaßes der Dicke am Schlagring. Mit der Hilfsgröße *Schlag* ist es möglich, eine Glockenrippe jederzeit reproduzierbar zu konstruieren und bei entsprechender Vergrößerung / Verkleinerung des Schlags in jede beliebige Größe zu übertragen. Die Größe des Schlags hängt davon ab, welchen Ton die Glocke haben soll (mehr über die Ermittlung des Schlagmaßes und die Berechnung von Tonhöhen im Kapitel 5.2. ff.). Das Konstruieren einer Glockenrippe (Schablone), früher sagte man dazu „das Reißen der Rippe“, läuft dann ungefähr so ab (Abb. 65):

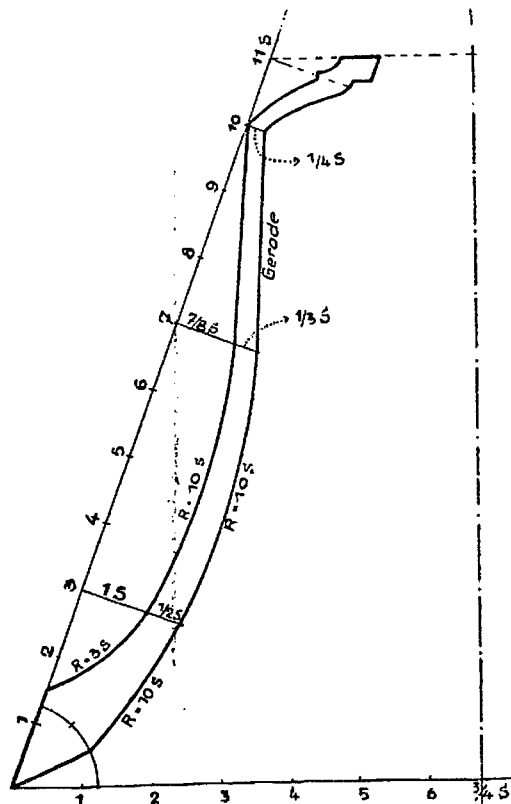


Abb. 65: Konstruktion einer Glockenrippe (Schablone). Dargestellt die Rippe der Glockengießerei Gugg in Braunau³³⁾ (Oö); es handelt sich hier um eine Barockform.

- Zeichnen einer Grundlinie (der sog. Schlaglinie), welche der Geraden zwischen unterem Rand und Schulter (= schräge Höhe) der Glocke entspricht. Auf dieser werden wie in einem Koordinatensystem, dessen Ursprung der untere Rand bildet, Punkte der Außen- und

Innenkontur der Glocke aufgetragen. Die Länge der Schlaglinie beträgt meist 10 bis 14 Schlag, die Dicke am Schlagring 1 Schlag und an der Schulter 1/3 Schlag.

- Die Punkte werden nun mittels Geraden und Kreisbögen miteinander verbunden. Die Kreisbögen werden mittels Zirkelschlägen, wobei die Einstichpunkte vorher noch ermittelt werden müssen, oder mittels Kurvenlinealen gezeichnet. In der Regel setzen sich sowohl Außen- als auch Innenkontur der Glocke vom Schlagring bis zur Schulter aus je 2 Kreisbögen und einer Geraden, der Schlagringbereich (je nach Konstruktion) aus Geraden, aus Kreisbögen oder aus beiden zusammen.
- Die Abstände von unterem Rand bzw. Schulter zur Symmetrieachse der Glocke (= halber unterer bzw. oberer Durchmesser) werden erst beim Einspannen der Schablone zum Glockenformen auf ihr richtiges Maß gebracht. Die Symmetrieachse entspricht der Achse, um welche die Schablone drehbar gelagert ist. Der Abstand vom unteren Rand zur Achse (= halber unterer Durchmesser) beträgt meist ca. 7 Schlag, der Abstand der Schulter an der Innenseite der Glocke zur Achse (= halber Innendurchmesser an der Schulter) ist nach alter Faustregel genau halb so groß wie der halbe untere Durchmesser. Der größte Fehler beim Glockenformen entsteht bei diesem Vorgang (wenn z.B. die Schablone falsch eingespannt wird oder beim Formen verrutscht).

Die Art und Weise, aus wie vielen Schlageinheiten sich die verschiedenen Abmessungen (Umrißmaße, Radien, Punktabstände) der Glocke zusammensetzen, wird als Firmengeheimnis gehütet (sog. Glockengießergeheimnis) und nur an den jeweiligen Betriebsnachfolger weitergegeben. Während man früher nur durch Ausprobieren (etwa durch Probegüsse) die Auswirkungen beim Verändern einer Konstruktion bzw. einer Neukonstruktion erfahren konnte, so verwenden moderne Gießereien (wie z.B. in den Niederlanden) Computer zur Konstruktion von Glockenrippen, mit deren Hilfe man Glocken mittels FEM in jeder beliebigen Tonlage und Teiltonaufbau im voraus berechnen und gestalten und auch alte Glockenrippen rekonstruieren kann. Zwischen den Zahlenwerten der Schlagmaße und dem Teiltonaufbau der Glocke besteht kein Zusammenhang; diese dienen einzig als Hilfsmittel, um eine Glockenrippe reproduzierbar zu zeichnen.

Die ältesten Glocken wurden freihändig nach Augenmaß geformt. Mit konstruierten Glockenrippen ist frühestens mit der Einführung der Schablone zu rechnen; vermutlich ist das Verfahren, Glockenrippen zu konstruieren, in der Gotik entstanden (eventuell verbunden mit der Entwicklung der gotischen Rippe); denn das Prinzip der Konstruktion von Glockenprofilen (alle Abmessungen setzen sich aus einem Grundmaß zusammen) ist nämlich dasselbe, mit welchem man gotische Maßwerkformen bildet³⁴), welches dann offensichtlich auf den Glockenguß übertragen worden sein könnte. Allerdings dürften lange Zeit einige Teile (etwa das Verbinden der Punkte zur Außen- und Innenkontur) noch freihändig gezeichnet worden sein. Bis ins 19. Jh. war es üblich, daß ein Gießer seine Glocken meist nach einem festen Schema konstruierte, das aber für jedes Exemplar im Detail jedoch mehr oder weniger abgewandelt wurde (einmal etwas länglicher, das andere mal etwas dünnwandiger . . .), weshalb bei einem früheren Gießer sehr selten Glocken in der Konstruktion haargenau übereinstimmen. In einem solchen Fall spricht man besser vom „R i p p e n t y p u s“, womit zum Ausdruck gebracht wird, daß die Glocken eines Gießers zwar gewisse Unterschiede aufweisen (d.h. unterschiedliche Rippenstärken, Glockentypen und Umrißmaße), aber alle nach einem gleichbleibenden Konzept geformt wurden (z.B. eine längliche Barockform, eine gedrungene manieristische Rippe etc.) und sich daher relativ ähnlich sind; Glocken eines Rippentypus weisen daher gewisse gemeinsame charakteristische Merkmale auf, welchen diesen kennzeichnen und an den man ihn auch erkennt (z.B. gewölbte Hauben oder ein rundlicher Schlagring, eine schwach ausgeprägte Schweifung etc.). Das Prinzip des Rippentypus ist in der Glockenkunde unbekannt, zumal es hier an geeigneten Mitteln fehlt, Eigenschaften von Glockenrippen zu bewerten (vor allem

in quantitativer Hinsicht), ohne die man die Unterschiede in den einzelnen Glocken eines Gießers nur schwer nachweisen kann (dies gilt vor allem für die Rippenstärke). Das nachfolgende Beispiel verdeutlicht das Wesen des Rippentypus, der in dieser Arbeit als Folge der in Abschnitt 3.2 entwickelten Hilfsmittel entdeckt und formuliert wurde; gleichzeitig soll dadurch auch demonstriert werden, welche Möglichkeiten vor allem die RS-Werte in der Erforschung alter Glocken bieten (vergl. weiters dazu auch Kapitel 5.2.4 sowie Diagramm 4 in Kapitel 3.4.6).

Beispiel für einen Rippentypus anhand der Glocken des Judenburger Glockengießers Hans Mitter

Gj.	Ort/Kirche	Dm	Gew.	Tonl.	Gltyp	RS-Wert
<u>1438</u>	Seckau, Dom (Stm)	185,5 cm	ca. 4700 kg	c'-4	Okt	20,3
<u>1445</u>	Bad Aussee, Pfk. (Stm)	137 cm	ca. 1700 kg	dis'-1,5	Non ⁺	7,6
~ <u>1445</u>	Bad Aussee, Fk. St. Leonhard (Stm)	62 cm	162 kg	fis''	-	~17
<u>1446</u>	Aflenz, Pfk. (Stm)	144 cm	ca. 2250 kg	e'-1	Okt ^o	20,7
<u>1446</u>	Neuberg / Mürz, Stiftsk. (Stm)	72 cm	ca. 240 kg	dis''-1,5	Sept	13,1
<u>1447</u>	Utsch, Fk. (Stm)	68 cm	ca. 220 kg	dis''+4	Okt ^o	12,7
~ <u>1450</u>	St. Jakob/Breitenau, Fk. (Stm)	91 cm	ca. 500 kg	h'+1,5	Okt	15,9
<u>1451</u>	Göß, Stiftsk. (Stm)	79 cm	ca. 300 kg	d''±0	Okt	18,8
<u>1453</u>	Bruck/Mur, Ruprechtsk. (Stm)	69 cm	ca. 200 kg	e''+4	Okt	19,5
<u>1453</u>	Samml. Pfundner (W)	43,4 cm	61 kg	cis'''-1,5	Okt	21,3
~ <u>1453</u>	Mariazell, Basilika (Stm)	53 cm	ca. 35 kg	f'''+3	Okt	27,5
<u>1454</u>	Mariabuch, Pfk. (Stm)	76 cm	ca. 280 kg	dis''-1,5	Okt	19,4
<u>1454</u>	Samml. Graßmayr (T)	54 cm	121 kg	g''+4	Okt	11,2
<u>1456</u>	Lind/Zeltweg (Stm)	80,5 cm	ca. 290 kg	c''+3	Okt	9,8
<u>1457</u>	Kirchberg/Raab (Stm)	76 cm	ca. 300 kg	cis''+4	Okt	10,6
<u>1458</u>	Gaishorn (Stm)	60 cm	ca. 150 kg	f''+5	Sept	10,8
<u>1459</u>	Samml. Pfundner (W)	63,5 cm	181 kg	f''-0,5	Okt	12,7

Tab. 10: Werkverzeichnis des Judenburger Glockengießers Hans Mitter, enthaltend den Durchmesser, das Gewicht und die Tonlagen der Glocken sowie den detaillierten Glockentyp und die RS-Werte.



Abb. 66: Aflenz (1446)



Abb. 67: Mariazell (~1453)



Abb. 68: Samml. Graßmayr (1454)

Abb. 66-68: Glocken von Hans Mitter

Sämtliche Glocken von Hans Mitter zeigen eine vollendete, wohlproportionierte gotische Form mit einem charakteristischem fließenden Verlauf, was diese Glockenrippen kennzeichnet (vergl. dazu Abb. 66-68). Rein äußerlich wirken die Glocken, als ob sie in gleicher Rippe gegossen wären.

Anhand der Daten in Tabelle 10 erkennt man aber, daß es sich bei der „Mitter-Rippe“ nicht um eine fixe Rippe, bei der alle Glocken dieselben Eigenschaften aufweisen, sondern um einen sog. Rippentypus handelt, bei welchem der Gießer zwar ein gewisses Konzept als Vorbildkonstruktion hatte (hier die gotische Rippe mit dem eleganten fließenden Verlauf), diese aber mehr oder weniger für jede Glocke abwandelte, was an den teilweise stark unterschiedlichen RS-Werten (im Bereich von $RS = 7,6$ bis $27,5$) und auch Glockentypen erkenntlich ist. Jede Glocke ist konstruktionsmäßig ein Unikat. Hans Mitter zählt zu den bedeutendsten und besten Glockengießern des Mittelalters in Österreich. Seine Werke zeichnen sich neben der guten Klangqualität vor allem durch die erstklassige Gußausführung und den künstlerisch äußerst qualitätsvollen Zierat (Reliefs) aus¹⁾.

Heutige Glockengießer arbeiten mit „f i x e n R i p p e n“, d. h. alle Glocken werden in genau derselben Rippe geformt und sind daher bezüglich der Konstruktion alle gleich (d.h. praktisch idente Relativmaße, Rippenstärke, Rippenschwere und Glockentyp; dies ist der Unterschied zum Rippentypus, wo sich die Glocken relativ betrachtet nur ähnlich, aber nicht gleich sind; siehe obenstehendes Beispiel). Fixe Rippen sind die Folge der Anwendung des Proportionalitätsgesetzes (siehe Kapitel 5.2.2), welches gleiche Rippen voraussetzt. Ein Betrieb besitzt in der Regel mehrere fixe Rippen (oft drei: eine leichte, eine mittlere und eine schwere), wobei der größere Teil der Glocken in nur einer Rippe konstruiert wird. Glocken eines modernen Betriebes besitzen daher, von geringen, durch den Guß hervorgerufenen Schwankungen abgesehen, alle fast gleiche Eigenschaften (Proportionen, RS-Werte, Teiltonaufbau, Klangfarbe), sie unterscheiden sich praktisch nur durch die Größe, die Tonlage und durch die äußere Gestaltung (Inschriften, Verzierungen). Da die meisten modernen Glocken nach dieser Methode konstruiert werden, kann man aufgrund der großen Reproduzierbarkeit schon anhand des Klanges den Gießer erkennen. Das ist bei alten Glocken aufgrund der Abwandlungen des Rippenschemas, welche jede Glocke praktisch als Unikat erscheinen läßt, nicht möglich (hier kann man nur auf die Glockenform, nicht aber auf den Gießer schließen). Fixe Rippen sind oft nach der Gießerei benannt, in der sie verwendet werden (z.B. Pfundner-Rippe, Oberascher-Rippe, Perner-Rippe etc.).

Errechnen der Tonlage einer zu gießenden Glocke

5.2

5.2.1 Allgemeine Grundlagen

Es gehört zu den wichtigsten Aufgaben beim Glockenguß, die Glocke so zu formen, daß sie nach dem Guß auch die gewünschte Tonlage ergibt. Aus diesem Grund sollen die Parameter, welche die absolute Tonhöhe einer Glocke bestimmen, sowie deren Ermittlung (oder, wie man sagt, wie der Ton einer Glocke „berechnet“ wird) etwas genauer besprochen werden. Die Tonlage einer Glocke hängt in erster Linie von ihrer *G r ö ß e* (Durchmesser) ab, wird aber auch von der Form der *R i p p e* (Rippenstärke, Schlagringneigung) und vom *W e r k s t o f f* (und zwar von dessen Inneren Tonhöhe) beeinflußt.

Im Folgenden wird für alle Fälle gleiches Material und Gefüge, d.h. konstante Innere Tonhöhe angenommen, sodaß nur die Größe der Glocke und deren Rippe als tonhöhenbestimmende Größen übrigbleiben. Es sollen nun zunächst die qualitativen Zusammenhänge dargestellt werden; die drei wichtigsten Fälle lauten:

- a) Bei gleicher Rippe (d. h. Relativmaße, RS-Wert und Rippenschwere sind konstant, die Glocken sind also gleich proportioniert) wird die Tonlage einer Glocke umso tiefer, je größer ihr Durchmesser ist. Bei Verringern des Durchmessers steigt die Tonlage. Die Frequenzen der Tonlagen von Glocken in gleicher Rippe verhalten sich umgekehrt wie ihre Durchmesser oder andere Abmessungen. Die Größe (Durchmesser) übt den größten Einfluß auf die Tonhöhe einer Glocke aus; theoretisch ist dadurch jede beliebige Tonhöhe erzielbar (in der Praxis erreicht man Tonhöhen, die sich über mehrere Oktaven erstrecken).
- b) Bei gleichem Durchmesser und Umrißmaßen sowie gleicher Schlagringneigung steigt die Tonlage einer Glocke, je größer deren Wandstärke (Rippenstärke), besonders am Schlagring, wird, und sinkt bei Verringern der Wandstärke. Ein Vergrößern / Verkleinern der Wandstärke bringt eine ebensolche Änderung des RS-Wertes und der Rippenschwere mit sich. Mit Wandstärkenveränderungen lassen sich zwar nicht so starke Veränderungen in der Tonhöhe wie mit der Größe (Durchmesser) erzielen, doch kann man damit Tonhöhenunterschiede bis zu (maximal) einer Septime erzeugen.
- c) Bei gleicher Wandstärke, Durchmesser und Umrißmaßen steigt die Tonlage, je näher das Zentrum des Schlagringbereiches an die Symmetrieachse der Glocke zu liegen kommt, was effektiv einer Verringerung des Durchmessers gleichkommt. Dies ist der Effekt der Schlagringneigung. Ihr Einfluß auf die Tonlage der Glocke beträgt in der Regel etwa ± 1 Halbton, ist also relativ gering. Ein Verschieben des Schlagringzentrums Richtung Symmetrieachse der Glocke (= Vergrößern der Schlagringneigung) erhöht zwar deren RS-Wert, verändert aber nicht die „wahre“ Rippenstärke, da ja Wandstärke und Durchmesser gleich bleiben. Aus diesem Grund ist der RS-Wert kein 100 % exaktes Maß für die Rippenstärke, sondern nur eine Näherung, aber eine sehr gute (vergl. Kapitel 3.2.2). Die Rippenschwere wird bei Vergrößerung der Schlagringneigung dagegen erniedrigt, weil aufgrund der effektiven Verringerung des Durchmessers auch das Gewicht abnimmt.

Fall a) und b) sind seit jeher in der Glockenkunde bekannt, nicht jedoch der Einfluß der Schlagringneigung auf die Tonlage (Fall c), der im Zuge dieser Arbeit präzisiert wurde. Desweiteren konnten noch folgende Gesetzmäßigkeiten durch Auswerten der Arbeiten von *Schad*¹²⁾ formuliert werden:

- Bei konstantem Profil (= Wandungsverlauf von der Schulter bis zum unteren Rand) und gleichem Durchmesser bringt eine Erhöhung des oberen Durchmessers, indem man das Profil der Glocke dementsprechend „kippt“ (vergl. Abb. 28b in Kapitel 3.3.1) nur eine sehr geringfügige Erniedrigung der Tonlage, die maximal nur wenige Gt/16 beträgt. Die „wahre“ Rippenstärke bleibt hierbei unverändert, der RS-Wert nimmt jedoch aufgrund der Tonhöhenänderung ab (allerdings nur sehr geringfügig); die Rippenschwere hingegen wird aufgrund des größeren oberen Durchmessers merkbar erhöht.
- Wenn man das (konstante) Profil der Glocke nach außen verschiebt (vergl. dazu Abb. 28a in Kapitel 3.3.1), erfolgt dadurch eine massive Erniedrigung der Tonlage, weil zur durch die Vergrößerung des Durchmessers hervorgerufenen Tonlagenvertiefung noch die der relativen Wandstärkenverdünnung dazutritt; Rippenstärke (RS-Wert) und Rippenschwere nehmen bei diesem Vorgang ab.
- Die Höhe der Glocke hat bei gleichem Durchmesser, gleicher Wandstärke und Schlagringneigung fast keinen Einfluß auf die Tonlage der Glocke, dafür aber umso mehr auf die Rippenschwere, denn je höher die Glocke, desto schwerer wird sie. Dies ist u.a. ein Grund, warum die in der Glockenkunde übliche Korrelation von Tonlage und Gewicht als Maß für die Rippenstärke ungeeignet ist (siehe Kapitel 3.2.2).

5.2.2 Das „Proportionalitätsgesetz“

Die erste und wichtigste Gesetzmäßigkeit (a) in Kapitel 5.2.1 ist das „P r o p o r t i o n a l i t ä t s g e s e t z“ (in der Glockenkunde als Gesetz der konstanten Rippenmensur bzw. Prinzip der dynamischen Gleichförmigkeit bezeichnet). Es ist das älteste, seit dem Mittelalter bekannte und einfachste Verfahren, um Glocken gezielt vor dem Guß aufeinander abzustimmen. Mathematisch formuliert lautet das Proportionalitätsgesetz:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{Dm_2}{Dm_1} \quad \text{Glg. 29}$$

mit f . . . Tonlage der Glocke [Hz]
 Dm . . . unterer Durchmesser der Glocke [cm]
Index $_1$: Glocke 1
Index $_2$: Glocke 2

Voraussetzung ist, daß die Glocken alle in derselben Konstruktion geformt sind (d.h. gleiche Proportionen besitzen) und aus demselben Material (d.h. gleiche Innere Tönhöhe) bestehen.

Wenn man das Glockengewicht als Größenmaß heranzieht, lautet das Proportionalitätsgesetz:

$$\frac{f_1}{f_2} = \left(\frac{m_2}{m_1} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Glg. 30}$$

mit f Tonlage der Glocke [Hz]
 m . . . Gewicht der Glocke [kg]
Index $_1$: Glocke 1
Index $_2$: Glocke 2

Weil das Proportionalitätsgesetz für gleich proportionierte Glocken gilt, kann man statt des unteren Durchmessers oder des Gewichts auch jede andere Glockenabmessungen verwenden, z.B. die schräge Höhe oder die Dicke am Schlagring. Die allgemeine Formulierung des Proportionalitätsgesetzes lautet dann:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{x_2}{x_1} = \left(\frac{m_2}{m_1} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Glg. 31}$$

mit f Tonlage der Glocke [Hz]
 x beliebige Glockenabmessung (Dm , sh , Sr etc.) [cm]
 m . . . Gewicht der Glocke [kg]
Index $_1$: Glocke 1
Index $_2$: Glocke 2

Wie bei der Berechnung der Dimensionierung und des RS-Wertes soll auch hier für die Tonlage nur die halbe Frequenz der Oberoktave herangezogen werden, und nicht die gehörmäßig erfaßte!

Das Proportionalitätsgesetz leitet sich von der Monochordlehre des *Pythagoras* ab^{20) 35)}. Die Monochordlehre, welche Pythagoras anhand von Experimenten an schwingenden Saiten formulierte, beschreibt den Zusammenhang von musikalischen Intervallen und den

Längenverhältnissen von Saiten, was mathematisch nichts anderes bedeutet, daß die Frequenzen schwingender Saiten im umgekehrten Verhältnis zu deren Abmessungen (Länge) stehen. Daß man die Monochordlehre auch auf den Glockenguß übertragen kann – unter der Voraussetzung der gleichen Proportionen – beweist die seit Jahrhunderten ausgeübte Praxis. Vor einigen Jahren durchgeführte FEM-Rechnungen bestätigen die Gültigkeit des Proportionalitätsgesetzes¹²⁾. Man kann jedoch anhand bekannter Gesetzmäßigkeiten einfacherer Schalen das Proportionalitätsgesetz für Glocken mathematisch herleiten. Grundlage ist hierbei die von *Lord Rayleigh*¹⁰⁾ aufgestellte Näherungsformel für die Bestimmung der Eigenfrequenz der Umfangsschwingungen einer kreiszylindrischen Schale, welche lautet:

$$f = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{E * d^2}{12 * \rho * R_0^4 * (1 - \mu^2)}} * \frac{n * (n^2 - 1)}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad \text{Glg. 32}$$

wobei

- E ... Elastizitätsmodul
- ρ ... Dichte
- μ ... Poisson-Zahl
- R_0 ... mittlerer Halbmesser der Schale
- d ... Wandstärke
- n ... Zahl der Knotenmeridiane / 2 der betrachteten Schwingungsform
- f ... Frequenz der betrachteten Schwingungsform

Wir betrachten für alle weiteren Fälle jeweils dieselbe Schwingungsform (d.h. $n = \text{const.}$) und ersetzen den Halbmesser R_0 durch den Durchmesser $D_m (= 2 * R_0)$. Nach Zusammenfassen der konstanten Anteile („k“) vereinfacht sich Glg. 32 zu

$$f = k * \frac{d}{D_m^2} * \sqrt{\frac{E}{(1 - \mu^2) * \rho}} \quad \text{Glg. 33}$$

Im folgenden untersuchen wir den Fall, daß die verschiedenen Glocken a) aus demselben Metall (konstante Werkstoffeigenschaften) und b) in derselben Rippe (d.h. die Proportionen aller Glockenabmessungen zueinander sind konstant) hergestellt werden, eine Voraussetzung für die Gültigkeit des Proportionalitätsgesetzes, d.h.:

$$a) \quad \sqrt{\frac{E}{(1 - \mu^2) * \rho}} = \text{const} \quad \text{Glg. 34}$$

und

$$b) \quad \frac{x}{D_m} = \text{const.} \quad \text{Glg. 35}$$

mit D_m ... Durchmesser der Glocke [cm]
 x ... beliebige andere Glockenabmessung (z.B. dm, sh, Sr, etc. . .) [cm]

Daraus folgt:

$$\frac{d}{D_m^2} = \frac{k'}{D_m}, \text{ da } \frac{d}{D_m} = \text{const.} = k' \quad \text{Glg. 36}$$

Durch Zusammenfassen aller konstanten Beträge zu k'' erhält man schließlich:

$$f = \frac{1}{D_m} * k'' \quad \text{Glg. 37}$$

bzw. nach Umformung

$$f * D_m = k'' = \text{const.} \quad \text{Glg. 38}$$

Wenn man nun zwei Glocken, Gl. 1 mit (f_1, D_{m1}) und Gl.2 mit (f_2, D_{m2}) , die aus gleichem Material bestehen und auch in gleicher Rippe gegossen worden sind, miteinander vergleicht, dann gilt:

$$f_1 * D_{m1} = f_2 * D_{m2} = \text{const.} \quad \text{Glg. 39}$$

was umgeformt dem Proportionalitätsgesetz entspricht:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{D_{m2}}{D_{m1}} \quad \text{Glg. 40}$$

Mit Hilfe des Proportionalitätsgesetzes lassen sich also für Glocken beliebige Tonfolgen (z. B. Dur-Dreiklang) berechnen, aber noch keine absoluten Tonhöhen (z.B. $c' - e' - g'$), weil hier nur Frequenz- und Größenverhältnisse behandelt werden. Wenn aber die Abmessung (z.B. Durchmesser, Schlag etc.) und auch die Tonlage einer (Referenz-)Glocke bekannt sind, dann kann man mittels des Proportionalitätsgesetzes auch absolute Tonhöhen von Glocken ermitteln bzw. die Größe einer Glocke mit einem bestimmten Ton berechnen. Die absolute Tonlage einer Glocke nur aus stofflichen und geometrischen Daten ohne Referenzobjekt auszurechnen ist äußerst kompliziert und nur mittels FEM-Rechnungen am Computer durchführbar, was allerdings erst seit einigen Jahren durchführbar ist¹²⁾.

Wenn ein Glockengießer den „Ton einer Glocke berechnet“, so rechnet er im allgemeinen die Glockenmaße (d.h. das Schlagmaß) einer Referenzglocke mit bekannten Eigenschaften, die vorher experimentell ermittelt worden sind, z.B. durch einen Probeuß, mit Hilfe des Proportionalitätsgesetzes in die gewünschten Tonlagen, welche die zu gießenden Glocken haben sollen, um (= Prinzip der fixen Rippe). Bis ins 20. Jh. verwendete man für die „Berechnung“ von Glocken sog. Glockenmaßstäbe, das sind Diagramme, an denen man das für die jeweilige Tonhöhe benötigte Schlagmaß der zu gießenden Glocken ablesen konnte; heute macht man das mit einem gewöhnlichen Taschenrechner.

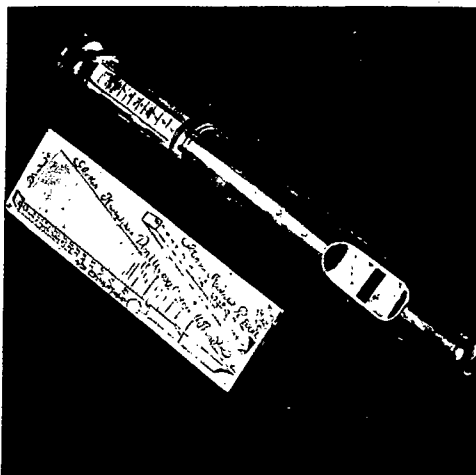


Abb. 69: Glockenmaßstab mit dazugehöriger Stimmpfeife der Glockengießerei Gugg in Braunau (Oö)

5.2.3 Verhältniszahlen

Der Ausdruck f_1/f_2 im Proportionalitätsgesetz entspricht den musikalischen Verhältniszahlen V der Intervalle. Verhältniszahlen sind wie $Gt / 16$ tel ein Maß für Tonabstände; wenn nun z.B. das Intervall zwischen 2 Glocken vorgegeben oder bekannt ist, kann man dadurch das Durchmesser Verhältnis der beiden Glocken ermitteln. Umgekehrt ist es aber auch möglich, wenn allein die Durchmesser der Glocken bekannt sind, nicht aber deren Tonlage, das Intervall zu bestimmen, auf das die betrachteten Glocken abgestimmt sind, da hier das Durchmesser Verhältnis mit der musikalischen Verhältniszahl der Intervalle ident ist (Voraussetzung: Gleiche Rippe + Material!). Die den jeweiligen Intervallen zugehörigen Verhältniszahlen sind aus Tab. 11 zu entnehmen.

Intervall (temperierte Stimmung)	Prim	Halbton (Kl. Sekunde)	Ganzton (Gr. Sekunde)	Mollterz	Durterz	Quarte	vermind. Quinte
relative Tonlage, bezogen auf c	c	cis	d	dis	e	f	fis
Verhältniszahl V	1	0,944	0,891	0,841	0,794	0,749	0,707

Intervall (temperierte Stimmung)	Quinte	kleine Sexte	große Sexte	kleine Septime	große Septime	Oktave
relative Tonlage, bezogen auf c	g	gis	a	b	h	c2
Verhältniszahl V	0,667	0,630	0,595	0,561	0,530	0,500

Intervall (temperierte Stimmung)	1 Gt/16	2 Gt/16	3 Gt/16	4 Gt/16	5 Gt/16	6 Gt/16	7 Gt/16
relative Tonlage, bezogen auf c	c + 1	c + 2	c + 3	c + 4	c + 5	c + 6	c + 7
Verhältniszahl V	0,993	0,985	0,978	0,971	0,964	0,957	0,950

NB: $8 Gt / 16 =$ Halbton

Tab. 11: Verhältniszahlen

Weiters gilt für V :

$$\text{Intervall 1} + \text{Intervall 2} = V_1 * V_2 \quad \text{Glg. 41}$$

$$\text{Intervall 1} - \text{Intervall 2} = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Glg. 42}$$

Eine Umkehrung der Verhältniszahl (Kehrwert) ändert nicht das Intervall an sich, sondern nur den Vorgang (Tonerhöhung/Tonerniedrigung).

Wenn man nun V in das Proportionalitätsgesetz einbaut, erhält man:

$$V = \frac{Dm_2}{Dm_1} = \frac{x_2}{x_1} = \left(\frac{m_2}{m_1} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Glg. 43}$$

bzw.:

$$Dm_2 = Dm_1 * V \quad \text{Glg. 44}$$

$$x_2 = x_1 * V \quad \text{Glg. 45}$$

$$m_2 = m_1 * V^3 \quad \text{Glg. 46}$$

Zusammenfassend sei nochmals gesagt: Mit dem Proportionalitätsgesetz kann man einen Zustand in einen anderen umrechnen. Es ist nur dann anwendbar, wenn die betrachteten Glocken in d e r s e l b e n R i p p e und aus d e m s e l b e n M e t a l l hergestellt sind.

5.2.4 Nachweis der Anwendung des Proportionalitätsgesetzes

Das Proportionalitätsgesetz bzw. dessen Prinzip wandte man schon seit der Gotik im Glockenguß an, aber es sollte noch Jahrhunderte dauern, bis es Allgemeingut unter den Glockengießern wurde, was man erst für das 19. Jh. als sicher annehmen kann. Bedauerlicherweise gibt es aber über die Arbeitsweisen früherer Gießer so gut wie keine Unterlagen, etwa in Form schriftlicher Dokumente oder dergl., und man kann eigentlich nur anhand der Glocken selbst nachweisen, ob einem früheren Gießer das Proportionalitätsgesetz bekannt war bzw. es angewandt hatte.

Es wurde schon im Kapitel 3.2.2 darauf hingewiesen, daß man mittels der RS-Werte überprüfen kann, ob Glocken in derselben Rippe gegossen sein könnten; denn bei gleichen Rippen sind auch die RS-Werte ident. Im folgenden soll nun ein in dieser Arbeit entwickeltes Konzept gezeigt werden, wie man mit Hilfe der RS-Werte, reduzierter Analysen (Glockentyp) und der Relativmaße relativ schnell und einfach ermitteln kann, ob die zu untersuchenden Glocken in gleicher Rippe gegossen bzw. mittels des Proportionalitätsgesetzes aufeinander abgestimmt sein könnten:

Schritt 1

Ist ein historisches Geläute vorhanden, daß augenscheinlich zusammenstimmt bzw. diesen Eindruck erweckt (bei einer unharmonischen Tonfolge kann man ein gezieltes Abstimmen eher ausschließen), berechnet man zuerst die R S – W e r t e der einzelnen Glocken. Diese sind nämlich gute Indikatoren dafür, ob Glocken in gleicher Rippe gegossen sein könnten (in diesem Falle sind nämlich die RS-Werte ident). Liegt die Spanne des größten und des kleinsten RS-Wertes der untersuchten Glocken innerhalb von maximal ca. 3 RS-Einheiten (bei sehr schwerrippigen Glocken ca. 4 RS-Einheiten) – das entspräche einer Tonspanne von einem Viertelton (= 4 Gt/16) – ist die Anwendung des Proportionalitätsgesetzes schon sehr wahrscheinlich. Der Viertelton wurde hier als Grenzwert festgelegt, weil er den Übergang eines Intervalls in das nächstfolgende markiert und damit die maximal vertretbare „Verstimmung“ festlegt (z.B. Mollterz c'- dis' geht bei einer Erhöhung von 4 Gt/16 in die Durterz c'- e' über: dis'+4 = e'-4). Bei größeren RS-Spannen wären die Intervalle und damit das Geläutemotiv nicht mehr eindeutig festgelegt, und gleichzeitig wird auch die Voraussetzung der gleichen Proportionen nicht mehr ausreichend erfüllt. Aus diesem Grund ist bei zu großen RS-Wert-Spannen eine Anwendung des Proportionalitätsgesetzes auszuschließen.

Man kann die rippenstärkenbedingten Tonabweichungen auch direkt mittels Glg. 20 in Kapitel 3.2.2 ermitteln; man erhält hierbei die tonlichen Abweichungen in Gt/16 zur „Bezugsglocke“ (Kapitel 3.2.1). Die innerhalb der untersuchten Glocken vorkommenden Abweichungen sollen dann innerhalb eines Rahmens von 4 Gt/16 zuliegen kommen (z.B. +12; +11,5; +10; +13; die Abweichungen liegen hier innerhalb von 3 Gt/16); prinzipiell gilt (für RS-Werte und Gt/16): Je kleiner die Differenzen untereinander sind, desto besser wird das Proportionalitätsgesetz erfüllt.

Schritt 2

Sehr ähnliche bzw. gleiche RS-Werte sind noch kein völliger Nachweis für die Konstruktion in gleicher Rippe (eigentlich nur für gleiche Rippenstärke). Ein weiterer Vergleich der Glocken ist daher notwendig, und zwar vor allem bezüglich des Teiltonaufbaues sowie der Proportionen (Umrißmaße) der Glocken, wobei der Teiltonaufbau mittels r e d u z i e r t e r A n a l y s e, die

Proportionen mittels *Relativmaßen* untersucht werden. Der Teiltonaufbau (Glockentyp) und hier vor allem die Lage von Unterton, Prim und Quinte (gehören nicht der Klangkonstante an) sind für den Vergleich von ähnlichen Glockenformen ein sehr guter Indikator, weil sie schon auf geringe Formänderungen empfindlich ansprechen. Je ähnlicher die Rippen, desto mehr stimmt der Teiltonaufbau (d.h. die reduzierten Analysen) überein. Aus diesem Grund müssen auch die Relativmaße dementsprechend übereinstimmen. Wenn Relativmaße nicht vorhanden sind, kann man statt dessen auch (halbwegs verzerrungsfreie) Fotografien für den Formvergleich heranziehen. Je mehr nun die untersuchten Glocken in Proportionen und Teiltonaufbau übereinstimmen, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese in gleichen Rippen gegossen worden sind und auch das Proportionalitätsgesetz zur Anwendung kam. Ein exakter Beweis erfolgt zwar erst durch ein genaues Vermessen der Glocken; normalerweise ist aber ein Vergleich der RS-Werte sowie des Teiltonaufbaues (reduzierte Analyse) und von Abbildungen der Glocken völlig ausreichend.

In der Glockenkunde wird der Nachweis des Proportionalitätsgesetzes durch den Vergleich der Verhältniszahlen von unterem Durchmesser (bzw. des Gewichts) und der Tonlage der Glocken durchgeführt, die bei Erfüllung des Proportionalitätsgesetzes übereinstimmen müssen²³⁾ (vergl. Glg. 43). Dieses Verfahren ist aber recht unübersichtlich und auch unpraktisch, vor allem weil man hier die Größe der Abweichungen nur schwer abschätzen und damit nur sehr bedingt beurteilen kann, wie genau das Proportionalitätsgesetz durchgeführt wurde.

Das Proportionalitätsgesetz wurde schon im 14. Jh. im Glockenguß nachweislich angewandt, allerdings war es aber im Mittelalter nur sehr wenigen Glockengießern bekannt. Am meisten haben sich zu jener Zeit niederländische Gießer hervorgetan, allen voran *Gerdt van Wou* (ca. 1450-1527). Er verstand es, mit hoher Genauigkeit Tonfolgen neuer Geläute im Voraus zu bestimmen, in einer Exaktheit, die der heutiger Glockengießer entspricht. Er beherrschte diese Kunst so gut, daß er teilweise sogar die Intervallbezeichnungen in den Glockeninschriften festhielt. Seit dem 17. Jh. war das Proportionalitätsgesetz in den Niederlanden und wohl auch in England allgemein bekannt (und zwar aufgrund der in den Niederlanden verbreiteten Glockenspielen bzw. des in England üblichen „Change-Ringing“, was nur mit abgestimmten Glocken möglich ist). Das Verfahren, Glocken gezielt aufeinander abzustimmen, fand hingegen bei Gießern im deutschen Sprachraum (Deutschland, Österreich, Schweiz) erst in der Barockzeit größere Anwendung. Ursache war wohl der Umstand, daß im Mittelalter mehr die Einzelglocke und ihre jeweilige Funktion im Vordergrund stand, während das gleichzeitige Zusammenläuten mit mehreren Glocken eher selten erfolgte, womit auch kein Bedarf an einem abgestimmten Geläute gegeben war. Spätestens seit dem 18. / 19. Jh. ist auch hier das Proportionalitätsgesetz ein Allgemeingut unter den Glockengießern geworden. Über süd- und osteuropäische Gießer fehlen diesbezüglich Unterlagen, doch scheint hier teilweise die Kenntnis über das Abstimmen von Glocken unbekannt zu sein.

Während die Abstimmung von Glocken auf bestimmte Tonfolgen (Intervalle) schon seit dem Mittelalter beherrscht wurde, so war der Guß von Glocken mit einer absoluten Tonlage lange oft mit großen Problemen verbunden und wird, wenn man von Ausnahmen in Westeuropa (Niederlande) absieht, erst seit dem 19. Jh. sicher beherrscht (dazu beigetragen hat auch sicher die Einführung von verstellbaren Stimmgabeln, mit denen man Tonhöhen genau messen kann, was vorher nicht möglich war). In dieser Zeit hat sich auch das Arbeiten mit sog. fixen Rippen (d. h. alle Glocken werden in derselben Rippe gegossen) eingebürgert, mit denen man, da sie bekannte Eigenschaften (Abmessungen, Tonlage) besitzen, Glocken in gewünschten Tonlagen leicht herstellen kann.

Beispiel für die Anwendung des Proportionalitätsgesetzes

Unter den 7 Glocken im Stift St. Florian (Oö) befinden sich 4 bemerkenswerte gotische Glocken aus den Jahren 1318/19, welche das ursprüngliche mittelalterliche Geläute darstellen, das bis heute unversehrt erhalten blieb. Dieses „Kerngeläute“ zeigt eine gezielte Abstimmung mittels des Proportionalitätsgesetzes. Die beiden größeren Glocken, die 1318 gegossen wurden, zeigen darin eine solche Präzision, wie sie nur bei modernen Glockengießern vorkommt; die beiden kleineren Glocken aus 1319 sind weniger sorgfältig abgestimmt worden, aber für damalige Verhältnisse immer noch gut. Ob alle 4 Glocken gezielt aufeinander abgestimmt worden sind, ist nicht ganz eindeutig zu entscheiden, doch ergeben sie jedenfalls ein klar erkennbares Moll-Dur-Motiv. Das St. Florianer „Kerngeläute“ bildet den ältesten bekannten Geläutesatz in der gesamten Glockenkunde, bei dem die Anwendung des Proportionalitätsgesetzes bis jetzt nachgewiesen werden konnte.

Glocke Nr.	1.	2.	3.	4.
Name	Zwölferin	Elferin	Sechserin	1. Chorglocke
Gießer	unbekannt	unbekannt, derselbe wie 1.	unbekannt	unbekannt, derselbe wie 3.
Gußjahr	1318	1318	1319	1319
Dm [cm]	125,5	106,5	91,4	76,3
Gewicht [kg]	1456 kg	ca. 890 kg	560 kg	ca. 325 kg
RS [-]	20,2	21,1	26,8	29,3
Tonlage	$\text{fis}'+2$	$\text{a}'+2$	$\text{cis}''-2.5$	$\text{e}''+1$
Glockentyp	Okt ^o	Okt ^o	Non ⁺	Sept ⁻
Tongebung	weich	hell	hell	etwas gedämpft
Klangqualität	Ia	I	II	II-III
Unterton	$\text{fis}^{\circ}+7$	$\text{a}^{\circ}+7.5$	$\text{c}'-0,5$	$\text{f}'+1,5$
Prim	$\text{fis}'+2$	$\text{a}'\pm 0$	$\text{cis}''+1,5$	$\text{dis}''-1$
Terz	$\text{a}'+7$	$\text{c}''+7,5$	$\text{e}''-2,5$	$\text{g}''+2,5$
Quinte	$\text{cis}''\pm 0$	$\text{e}''+2$	$\text{gis}''-3$	$\text{c}''' +4,5$
Oberoktave	$\text{fis}''+2$	$\text{a}''+2$	$\text{cis}'''-2,5$	$\text{e}''' +1$

Tab. 12: Technische und musikalische Daten der St. Florianer Stiftsglocken von 1318/19.

Die beiden großen Glocken aus dem Jahre 1318 bilden ein gemeinsames, von ein und demselben Meister gleichzeitig gegossenes Glockenpaar, welches auf ein reines Mollterzintervall ($\text{fis}'+2 / \text{a}'+2$) abgestimmt wurde. Der Gießer arbeitete äußerst präzise. Dies erkennt man an den fast identen RS-Werten:

Zwölferin: RS = 20,2

Elferin: RS = 21,1

oder in Gt/16 ausgedrückt:

Zwölferin: +25,5

Elferin: +26,5

Die Unterschiede sind minimal und liegen weit unter der Grenzspanne von $\Delta\text{RS} = \text{ca. } 4$ respektive $\Delta\text{Gt}/16 = 4$.

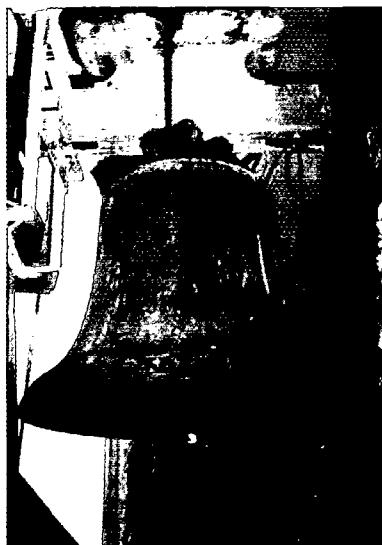
Es sind zwar keine Werte über andere Glockenabmessungen wie schräge Höhe oder oberer Durchmesser vorhanden, aber schon anhand von Fotografien ist feststellbar, dass beide Glocken eine

nahezu gleiche gotische Form besitzen (Abb. 70). Dies wird durch eine Tonanalyse bestätigt, denn beide zeigen fast dasselbe Tonbild; zum besseren Vergleich die reduzierten Analysen:

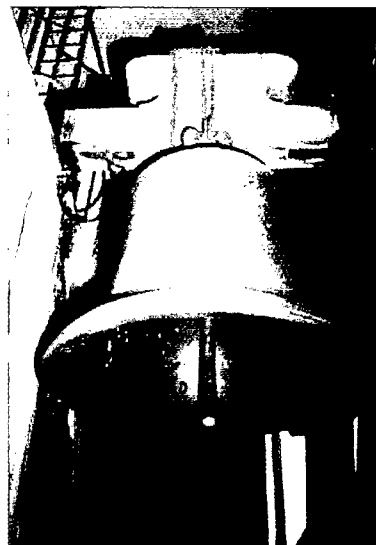
Zwölferin : $U = c^{\circ}+5; P = c' \pm 0; T = dis' + 5; Q = g' - 2$
 Elferin $U = c^{\circ}+5,5; P = c' - 2; T = dis' + 5,5; Q = g' \pm 0$

Also Abweichungen von nur maximal 2 Gt/16! Die Teiltöne Unterton, Prim und Quinte (gehören nicht der Klangkonstante an) sprechen schon auf geringe Formänderungen empfindlich an und sind daher für den Vergleich von ähnlichen Glockenformen ein sehr guter Indikator.

Praktisch gleiche RS-Werte sowie reduzierte Analysen lassen größere Unterschiede in den Proportionen der Glockenrippe nicht mehr zu, und aus diesem Grund kann man schon anhand dieser beiden Messungen mit allergrößter Sicherheit auf idente Rippen schließen. Das Proportionalitätsgesetz wurde in diesem Fall in höchster, heutigen Maßstäben vergleichbarer Perfektion angewandt, und das vor ca. 700 Jahren – alle Achtung vor diesem Meister! Die Glocken zeichnen sich daneben noch durch ausgezeichnete Klangqualität und schöne Gußausführung aus.



a) „Zwölferin“,



b) „Elferin“

Abb. 70: Die beiden Glocken aus dem Jahre 1318 im Stift St. Florian; links (a) die „Zwölferin“, rechts (b) die „Elferin“.

Die beiden Glocken von 1319 sind der äußeren Gestaltung nach (u.a. Konzept der Inschriften u. Verzierungen) fast eine kleinere Kopie des Glockenpaares von 1318. Allerdings sind Gußausführung und Klangqualität nicht so gut, auch sind die Glocken in leicht unterschiedlichen gotischen Rippen gegossen. Dies merkt man schon an den verschiedenen Glockentypen, die Sechserin ist Non⁺, die 1. Chorglocke hingegen Sept⁺; in der Tat ist letztere auch unten stärker geschweift, während die Sechserin oben eher weit ist (Abb. 71).

Die Rippenstärke ist jedoch bei beiden Stücken sehr ähnlich; diese beträgt bei der Sechserin $RS = 26,8$ und bei der 1. Chorglocke $RS = 29,3$. Auch hier liegt die Differenz innerhalb der Grenzspanne von $\Delta RS = ca. 4$, und aus diesem Grund ist eine gezielte Abstimmung auf eine Mollterz (hier $cis'' - 2,5 / e'' + 1$), ähnlich wie beim Glockenpaar aus 1318, ebenfalls sehr wahrscheinlich, wenn sie auch bei weitem nicht die Präzision des älteren Glockenpaares aufweist. Sie ist aber für frühere Verhältnisse (bis weit ins 18. Jh.) immer noch gut; bei früheren Glockengießern trifft man selten das Proportionalitätsgesetz in einer solchen Perfektion wie bei den Glocken aus 1318;

unterschiedliche Glockentypen und größere RS-Spannen, manchmal sogar geringfügig über den Grenzspannen von $\Delta RS = 3$ bzw. 4 oder musikalisch ausgedrückt 4 Gt/16, sind üblich.

Daß die Sechserin etwas zu tief geraten ist, liegt daran, daß ihre Rippe wohl aufgrund eines Formfehlers etwas dünner geraten ist (erkennlich am niedrigeren RS-Wert, wodurch die Tonlage etwas abgesunken ist. Rein rippenstärkenbedingt beträgt der Unterschied $33 \text{ Gt}/16 - 35,5 \text{ Gt}/16 = -2,5 \text{ Gt}/16$).



a) „Sechserin“



b) „1. Chorglocke“

Abb. 71: Die beiden Glocken aus dem Jahre 1319 im Stift St. Florian; links (a) die „Sechserin“, rechts (b) die „1. Chorglocke“.

Nicht ganz klar ist, ob die Glocken von 1319 auf die von 1318 gezielt abgestimmt sind. Alle 4 ergeben zwar ein (leicht verzogenes) Moll-Dur-Motiv; wären die Glocken von 1319 aber in derselben Rippenstärke gegossen worden wie die von 1318 (also RS um 21), ergäbe sich als Motiv eine Mollterzenfolge $fis' - a' - c'' - dis'''$; was gar nicht schön klingt. Vielleicht waren auch nur 2 separate, voneinander getrennte Glockenpaare geplant? Insgesamt lassen die Glocken von 1319 nicht das Können des Gießers der Glocken von 1318 erkennen, sodaß man fast einen anderen Gießer annehmen muß; die Nachahmung des Konzeptes der Inschriften und der bildnerischen Gestaltung sowie die jeweilige Abstimmung auf die Mollterz sprechen sehr dafür, so als ob ein Schüler das Werk seines Meisters nachzuahmen versuchte, wenn auch mit geringerem Erfolg.

6. Armaturen und Turmakustik

Um eine Glocken zu läuten, benötigt man einiges Zubehör, mit dem dieser Vorgang ermöglicht werden kann. Dazu gehören vor allem der **Kl ö p p e l** und das **J o c h**, aber auch spezielle Sonderausstattungen wie z.B. Klöppelfänger. Diese Bestandteile werden unter dem Begriff **A r m a t u r e n** zusammengefaßt. Klöppel und Joch sind nicht nur zum Läuten notwendig, sondern beeinflussen auch das Klangverhalten der Glocke.

Damit der Glockenklang weithin hörbar ist, werden Glocken gewöhnlich in Türmen untergebracht. Diese Glockentürme besitzen für diesen Zweck eine spezielle Kammer, allgemein als **G l o c k e n - s t u b e** bekannt, wo die Glocken in einem Gerüst, dem sog. Glockenstuhl, aufgehängt werden. Meist ist die Glockenstube im obersten Stockwerk des Turmes untergebracht. Die Bauweise des Turmes und der Glockenstube (insbesondere der Schallöffnungen) üben ebenfalls einen beträchtlichen Einfluß auf das Klangverhalten der Glocke aus, was unter dem Begriff **T u r m - a k u s t i k** zusammengefaßt wird.

Läuten

6.1

6.1.1 Definition

Läuten ist die uns vertraute Art, Glocken zum Erklingen zu bringen. Hierbei wird die auf eine bewegliche Achse (= Joch) montierte Glocke in pendelartige Bewegungen versetzt, wobei sie von innen mit einem ebenfalls drehbar gelagertem Klöppel angeschlagen wird: Die Glocke schwingt hin und her, sie **l ä u t e t**. Das Läuten erfolgt dadurch, indem man auf die Glocke periodische Kraftmomente ausübt. Zu diesem Zweck sind am Joch ein oder mehrere Läutehebel bzw. ein Läuterad angebracht, an welchem der Zug über ein Seil oder eine Kette ausgeübt wird. Dies kann händisch oder maschinell erfolgen.

Den Ausschwingwinkel oder **L ä u t e w i n k e l**, der angibt, wie hoch eine Glocke geschwungen wird, gibt man in Grad bzw. „Uhrzeiten“ an (letztere sind vor allem in Tirol gebräuchlich) und kann in folgende Stufen eingeteilt werden: niedrig (normal): Ausschwingung bis ca. 60° (bis ca. 8 Uhr); mäßig hoch: Ausschwingung bis zur Waagrechten (90° ; bis 9 Uhr); hoch: Ausschwingung bis ca. 140° (bis ca. 10 Uhr); sehr hoch: Ausschwingung bis zur Lotrechten (etwa 11-12 Uhr).

Die **L ä u t e g e s c h w i n d i g k e i t** (Läutefrequenz), auch **T a k t**, d.h. wieviel Anschläge eine Glocke in der Minute hat, hängt von der Größe der Glocke, dem Lätewinkel und von der Bauart des Joches ab. Eine Glocke läutet um so langsamer, je größer sie ist, je höher sie geläutet wird und je mehr Schwerpunkt von Glocke + Joch in Richtung der Drehachse verlagert wird. Die Abhängigkeit der Läutegeschwindigkeit vom Lätewinkel ist aus Diagramm 9 zu entnehmen, der Einfluß der Jochkonstruktion auf die Läutegeschwindigkeit wird im Kapitel 6.4.2 näher erläutert.

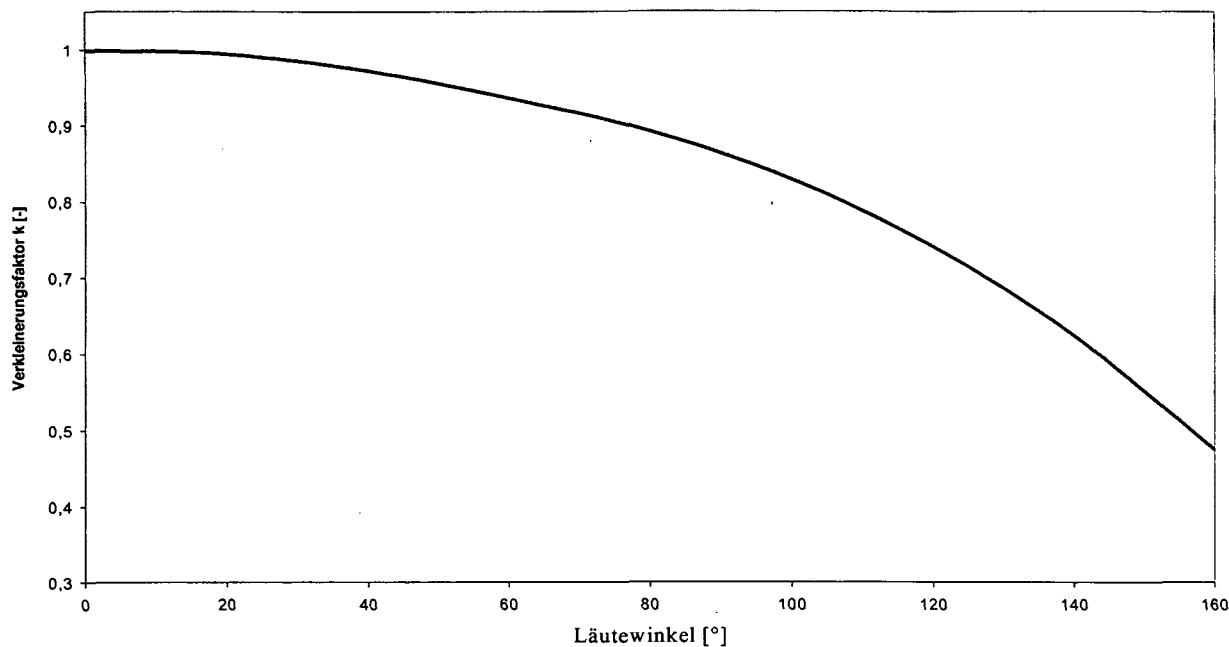


Diagramm 9: Abhängigkeit der Lütengeschwindigkeit vom Lütewinkel^{36) 37)}. Die Lütefrequenz (Anschläge / Minute) ist nur bei sehr kleinen Lütewinkeln ($< 20^\circ$) unabhängig von der Elongation. Bei größeren Lütewinkeln sinkt die Lütefrequenz und damit die Lütengeschwindigkeit ab, wobei die Abhängigkeit vom Lütewinkel durch den sog. Verkleinerungsfaktor k gegeben ist. So ist die Lütengeschwindigkeit bei sehr hohem Lütewinkel (ca. 160°) nur mehr halb so groß wie bei niedrigem Lütewinkel (ca. 45°)

6.1.2 Die „Dynamik“

Die Glocke wirkt im lütenden Zustand besonders schön, da die durch das Läuten auftretende „D y n a m i k“ eine wesentliche Bereicherung des Glockenklanges hervorruft. Die Dynamik äußert sich durch recht kräftige, aber unregelmäßige Schwebungen (d.h. unregelmäßige Intensitätsschwankungen sowie minimalste, ebenfalls unregelmäßige Schwankungen in der Tonhöhe) im Glockenklang, welche diesen lebendig und schwungvoll erscheinen lassen. Ursache dieser Schwebungen ist nicht alleinig der Dopplereffekt, wie allgemein angenommen wird^{1) 2) 38)}, sondern, wie Beobachtungen während dieser Arbeit ergeben haben, auch durch die sich bewegende Glocke erzeugten Luftturbulenzen, die unregelmäßige Schwankungen in der Schallintensität hervorrufen (so klingen fixierte Glocken, die nur angeschlagen werden, deutlich unruhig, wenn direkt daneben starke Luftturbulenzen, z.B. durch eine schwingende Glocke, deren Klöppel etwa durch einen Klöppelfänger noch befestigt ist, erzeugt werden). Eine Glocke klingt umso schwungvoller, je stärker diese Schwebungen und damit die Dynamik ist; sind sie nur schwach, klingt die Glocke leblos. Obwohl die Auswirkungen der Dynamik in der Glockenkunde bekannt sind, so besitzt dieser Effekt dennoch keine eigene Bezeichnung; manchmal wird er mit dem Begriff Klangentfaltung, mit dem in der Glockenkunde scheinbar alle undefinierten bzw. undeutbaren Klangphänomene betitelt werden, gleichgesetzt (vergl. Kapitel 2.7.1).

Die durch die Dynamik entstehenden Schwebungen sind durch Klanganalysen am Computer nachweisbar; Amplitudendiagramme, gleichgültig ob vom Gesamtklang oder von Teiltongruppen bzw. Teiltönen verlaufen im geläuteten Zustand der Glocke viel „unruhiger“ als wenn diese nur in Ruheposition angeschlagen wird (Abb. 72). Aber auch in Klangspektren kann man die Dynamik deutlich erkennen. Diese äußert sich – wenn man über einem Zeitraum gemittelte Intensitäten mißt – durch eine Verbreiterung der Peaks (vor allem die der Lauttöner), die um so größer ausfällt, je stärker die Dynamik auftritt (Abb. 73); sie entsteht aufgrund der unregelmäßigen Tonhöhen-

schwankungen, welche auf diese Weise nachweisbar sind (Amplitudendiagramme zeigen hingegen Intensitätsschwankungen).

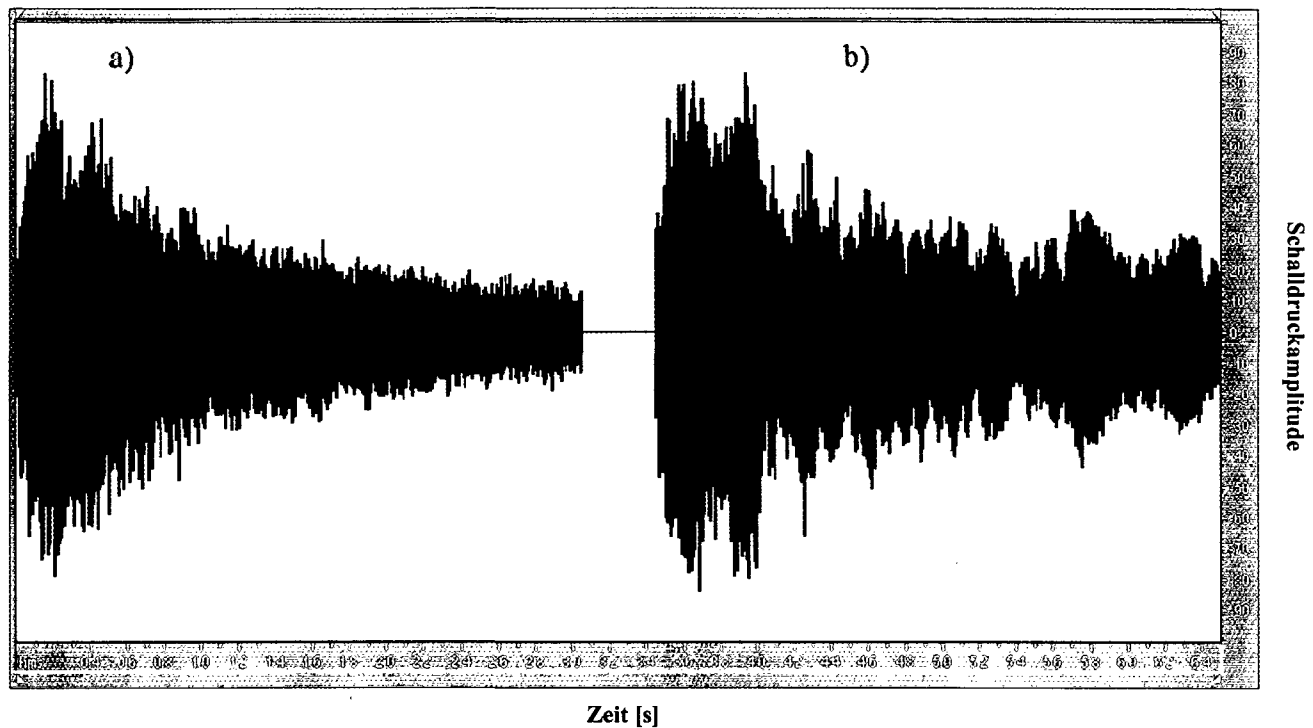


Abb. 72: Amplitudendiagramm (Vollklang) des Abklingverlaufes einer Glocke in Ruheposition (a) und im läutenden Zustand (Klöppel mittels eines Klöppelfängers festgehalten) (b); man beachte die Unterschiede im Klangverlauf, der im läutenden Zustand viel unruhiger und turbulenter erscheint als Folge der auftretenden Dynamik.

Das Ausbilden dieser Schwebungen und damit der Dynamik, die nur dann entsteht, wenn die Glocke bewegt (d.h. geläutet) wird, hängt von der Art des Läutens und von der Konstruktion des Joches ab. Die Dynamik steigt generell mit zunehmenden **L ä u t e w i n k e l** an; eine höher geläutete Glocke klingt „schwungvoller“ als eine mit nur geringem Läutewinkel. Mäßig hohe Läutewinkel von etwa 8 bis 9 Uhr sind klanglich am schönsten, weil hier Dynamik und Läutegeschwindigkeit in einem sehr günstigem Verhältnis liegen; bei zu geringem Läutewinkel ist die Dynamik relativ schwach und die Glocke dementsprechend leblos, bei sehr hohem Läutewinkel ist dagegen die Läutegeschwindigkeit ziemlich gering und man empfindet die Glocke trotz der besonders starken Dynamik als zu „langsam“. Wie die **B a u a r t** des **J o c h e s** die Dynamik beeinflusst, ist im Kapitel 6.4.2 genauer beschrieben. Generell gilt hier, daß eine Maßnahme am Joch, die Verlegung des Schwerpunktes von Glocke + Joch in Richtung Drehachse der Glocke bewirken, die Dynamik reduziert.

Die Dynamik, zusammen mit der mehrstimmigen, akkordartigen Struktur des Glockenklanges einer läutenden Glocke wirkt emotional stark anregend, worauf der seelentiefe Stimmungseindruck des Glockenklanges beruht (eine alte Glockeninschrift drückt dies besonders gut aus: *Mein Ton ist gestimmt gleichwie dein Herz, bald klingt er freudig, bald voll Schmerz*).

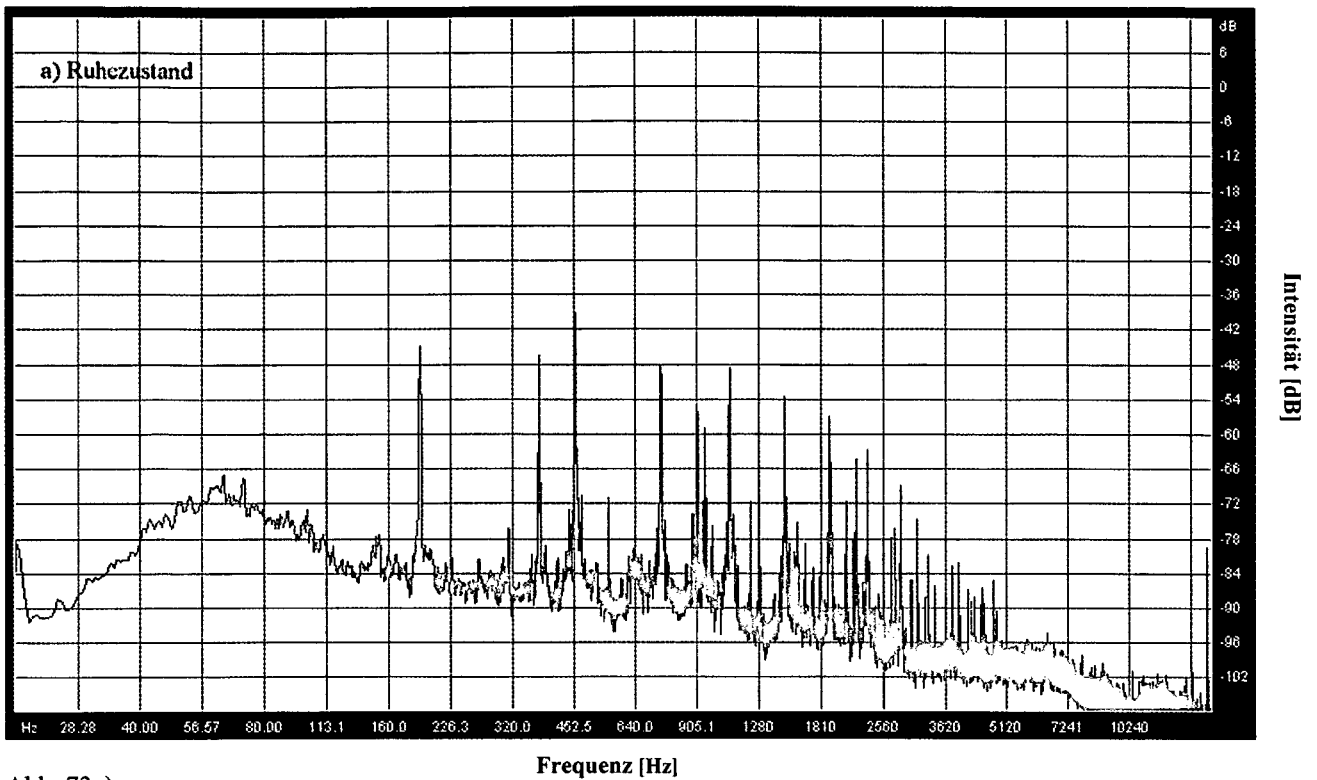


Abb. 73a)

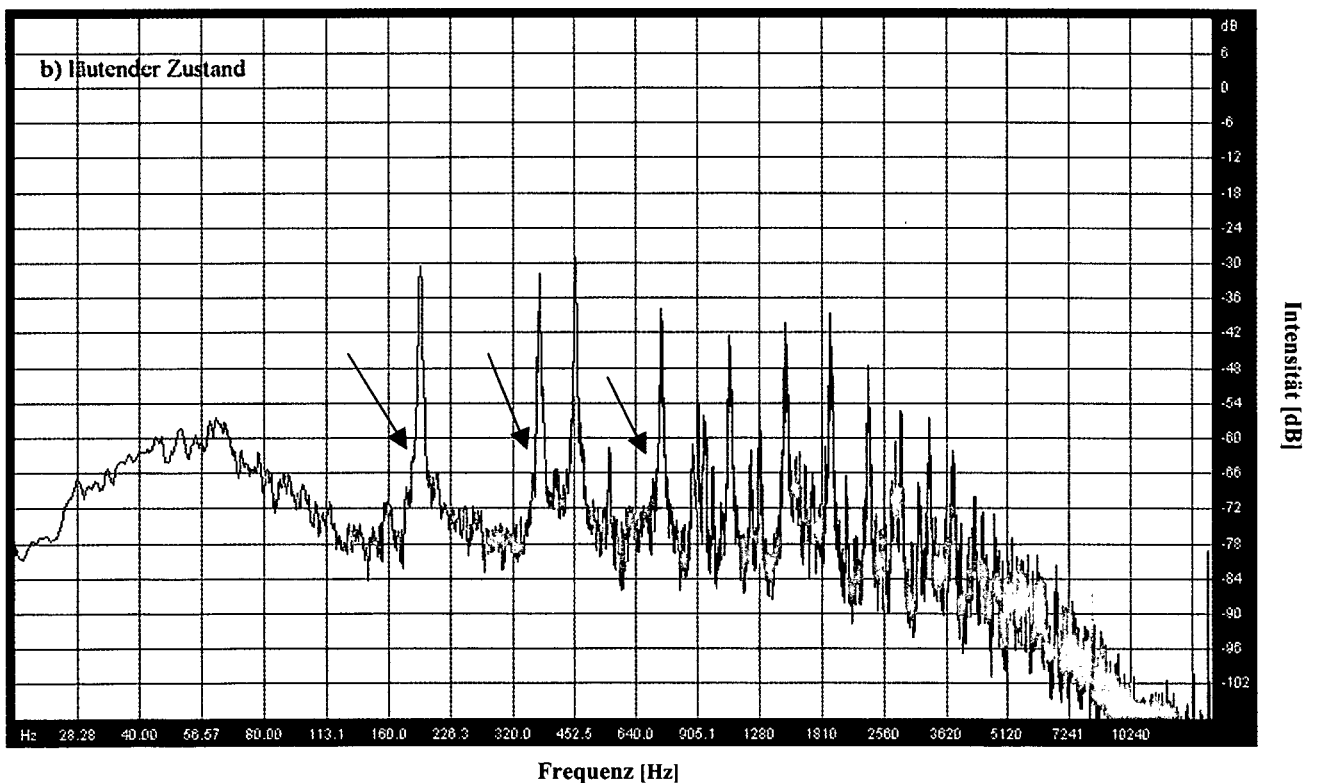


Abb. 73b)

Abb. 73a und b: Klangspektrum einer Glocke in Ruheposition (a) und im läutenden Zustand (b) (durchschnittliche Intensität über jeweils 4 Anschläge). Deutlich zu erkennen die Peakverbreiterung vor allem der Lauttöne im läutenden Zustand, die sie aus der Menge der Teiltöne noch deutlicher hervorhebt.

6.2.1 Allgemeines

Der **Klöppel** (auch Schwengel, Senkel, Klachel oder Haller genannt) ist ein aus weichem Schmiedeeisen (= unlegierter Stahl mit geringem C-Gehalt) hergestelltes längliches Werkstück, das an der Anschlagstelle eine Verdickung, den sogenannten **Ballen**, aufweist. Er ist im Inneren der Glocke unterhalb der Platte drehbar gelagert, wodurch er beim Läuten gegen die Glockenwand schlägt und somit den Klang der Glocke auslöst.

Ein Klöppel besteht in der Regel aus dem **Schaft**, dem **Ballen**, dem **Vorschwung** (das ist die Fortsetzung unterhalb des Ballens) und einer **Aufhängevorrichtung** (moderne Klöppel besitzen eine Platte, alte Klöppel eine Öse). Sein Gewicht beträgt etwa 2,5 – 6 % des Glockengewichtes. Der Klöppel soll genau am Schlagring anschlagen, da ober- oder unterhalb desselben die Wandstärken schwächer sind und an diesen Stellen einerseits erhöhte Sprunggefahr besteht, aber andererseits auch die Tongebung und damit die Klangqualität der Glocke nachteilig beeinflusst werden kann. Ein Seitenspiel nach links und rechts dagegen ist unbedenklich.

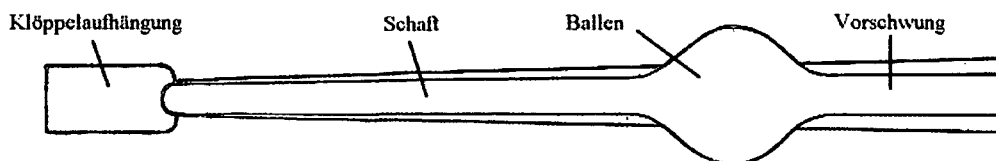


Abb. 74: Klöppelaufbau

Der Klöppel wird mittels eines Lederriemens an eine im Inneren der Glocke befindliche Öse, dem sog. **Hängeisen**, aufgehängt. Die Hängeeisen von alten Glocken waren fest eingegossen, die von modernen Glocken sind an einer drehbaren Schraube, die durch die Krone hindurchgeht, befestigt. Dadurch kann man die Lage des Hängeeisens verändern und beim Wenden der Glocke die Anschlagstelle des Klöppels leicht wechseln, um eine zu starke Abnutzung an ein und derselben Stelle zu verhindern. Um bei Glocken mit fest eingegossenem Hängeeisen ein Wenden zu ermöglichen, muß nachträglich ein sog. **Wendeisen** in die Glocke geschraubt werden. Bei den älteren Klöppelaufhängungen hatte der Klöppel einen gewissen Spielraum (erkennbar an den nach links und rechts verbreiterten Anschlagflächen an der Glocke), während er bei den modernen Aufhängungen beim Läuten der Glocke genau immer auf dieselbe Stelle trifft (punktuellem Anschlag), wie in Abb. 75 gezeigt wird.

Ein Klöppel soll nicht nur regelmäßig anschlagen, sondern auch so, daß der Glockenklang möglichst günstig wirkt. Denn der Klöppel übt als Klangauslöser einen recht großen Einfluß auf die Tongebung der Glocke aus, die durch die Gestaltung des Klöppels verändert werden kann. Wie sich die Größe, Form und Material des Klöppels auf den Glockenklang auswirken, wird im Kapitel 6.4.1 genauer beschrieben, die Bedingungen für einen regelmäßigen Klöppelanschlag hingegen im Kapitel 6.2.3.

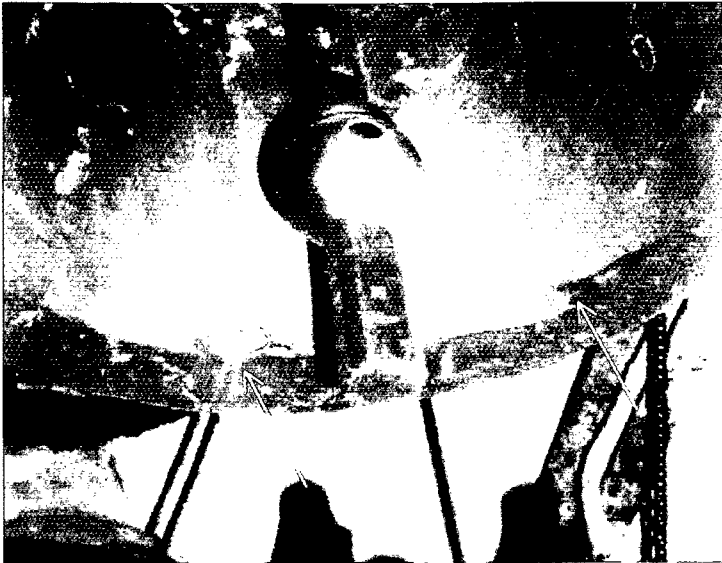


Abb. 75: Klöppelanschlagstelle; rechts vom Klöppel sieht man noch die ursprüngliche Anschlagstelle des Klöppels mit der alten Aufhängung; deutlich erkennbar das größere Seitenspiel, welche eine Verbreiterung der Anschlagstelle herbeiführte. Links vom Klöppel die derzeitige Anschlagstelle, die fast punktförmig erscheint; dies ist das Merkmal moderner Klöppelaufhängungen, die fast kein Seitenspiel zulassen. Der Verschleiß wird dadurch nur scheinbar verringert; der Abtrag bleibt jedoch derselbe und richtet sich nun verstärkt ins Glockenmetall, während er vorher auf eine größere Fläche verteilt war.

6.2.2 Einteilung von Klöppeln

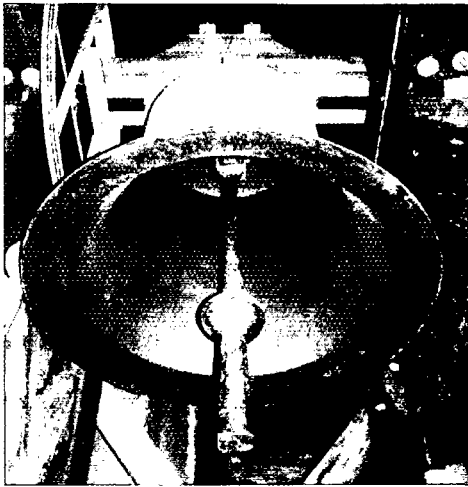
Die verschiedenen Klöppel kann man entweder nach der Form des Ballens oder nach der Klöppelbewegung beim Läuten unterscheiden:

a) Ballenform

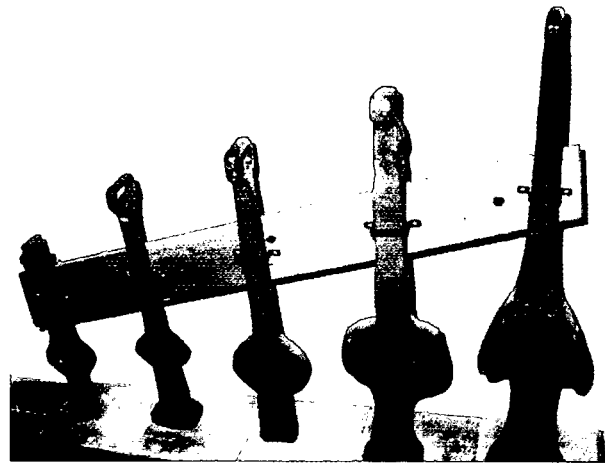
Anhand der Konstruktion des Ballens unterscheidet man zwischen **R u n d b a l l e n k l ö p p e l** und **F l a c h b a l l e n k l ö p p e l**; für die Entwicklung der unterschiedlichen Ballenformen sind vermutlich herstellungstechnische oder stilistische Gründe verantwortlich.

Der **R u n d b a l l e n k l ö p p e l** besitzt einen rotationssymmetrischen Ballen, d. h. der Ballen hat eine kugel- oder birnförmige Gestalt (Abb. 76a). Er ist die in Westösterreich (Tirol, Vorarlberg, Oberkärnten) und Südtirol bevorzugte Klöppelform. In Deutschland wird er derzeit in Form des sogenannten Ellipsoidklöppels propagiert, weil man glaubt, daß dieser die Klangqualität der Glocke besonders gut beeinflusse.

Beim **F l a c h b a l l e n k l ö p p e l** erscheint der Ballen als flache Scheibe, wobei der Anschlag an die Glocke mit der schmalen Seite (Rand) erfolgt (Abb. 76b). Der Flachballenklöppel ist die typische Klöppelform in Ostösterreich (Wien, Niederösterreich, Steiermark, Salzburg, Oberösterreich, Unterkärnten) und war dort vor allem in der Barockzeit bis weit ins 20. Jh. sehr beliebt.



a)



b)

Abb. 76a: Ein moderner Rundballenklöppel (sog. Ellipsoidklöppel)

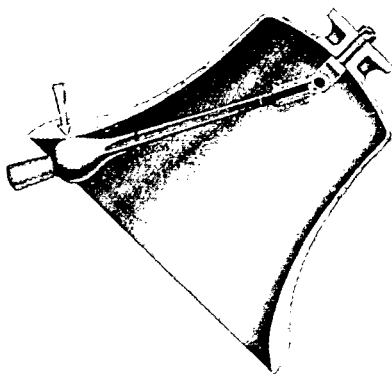
Abb. 76b: Ein Sortiment verschiedener Flachballenklöppel aus unterschiedlichen Jahrhunderten (der 2. von links mit einem Zusatzgewicht am Vorschwung, einem sog. „Mondschein“)

b) Klöppelbewegung

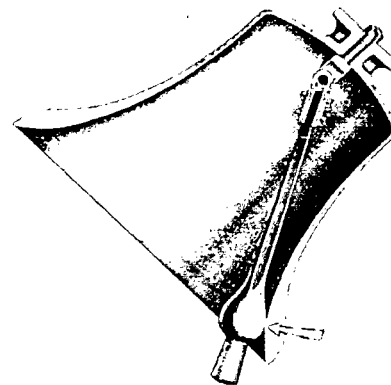
Bezüglich der Klöppelbewegung unterscheidet man zwischen **F l u g k l ö p p e l** und **F a l l k l ö p p e l**; beide können sowohl als Rundballen- als auch als Flachballenklöppel konstruiert sein:

Von einem **F l u g k l ö p p e l** spricht man, wenn der Aufhängungspunkt des Klöppels unter der Drehachse der Glocke liegt (was in der Regel der Fall ist). Hierbei erfolgt der Klöppelanschlag im höchsten Punkt der Glockenschwingung (der Klöppel schlägt in der Glocke „oben“ an, Abb. 77a).

Liegt der Drehpunkt des Klöppels über dem Drehpunkt der Glocke, wie es bei stark gekröpften Jochen vorkommen kann, spricht man von einem **F a l l k l ö p p e l**. Der Anschlag erfolgt hierbei im tiefsten Punkt der Glockenschwingung durch den sich in entgegengesetzter Richtung bewegend und gewissermaßen auf die Glocke fallenden Klöppel (d.h. der Klöppel schlägt in der Glocke „unten“ an, Abb. 77b). Fallklöppel trifft man nur vereinzelt an und sind ziemlich selten.



a)



b)

Abb. 77: Flugklöppel (a) und Fallklöppel (b)

Die ältesten romanischen Klöppel waren an der Anschlagstelle etwas verdickt (hatten noch keinen ausgeprägten Ballen und auch keinen Vorschwung) und zeigten eine birnförmige Gestalt. Gotische Klöppel hatten einen rundlichen Ballen (Rundballenklöppel) sowie einen kantigen Vorschwung. In der Barockzeit, und zwar dort, wo auch die barocke Glockenform verbreitet war, verwendete man

meist Flachballenklöppel mit langen Vorschwüngen, auf denen manchmal Zusatzgewichte in Form eines „Mondscheines“ angebracht sind (vergl. Abb. 76b). Moderne Klöppel sind in der Regel Rundballenklöppel (in Österreich werden auch Flachballenklöppel hergestellt, jedoch immer seltener); stark bevorzugt, vor allem in Deutschland, sind derzeit die sogenannten Ellipsoidklöppel, so benannt, weil deren Ballen ellipsoidförmig sind. Sie sollen angeblich besonders gute klangliche Eigenschaften besitzen, sind aber in Wirklichkeit nicht besser als andere Klöppelformen (siehe Kapitel 6.4.1). Da Klöppel prinzipiell eine lange Lebensdauer haben, die wie bei Glocken mehrere Jahrhunderte betragen kann, empfiehlt es sich, alte (aber auch neuere) Klöppel, die gut funktionieren, aber z.B. durch das Läuten im Laufe der Zeit am Ballen breitgeschlagen sind, nach Möglichkeit zu reparieren und nicht auszutauschen.

6.2.3 Die „Anschlagbedingung“

Der Klöppel soll beim Läuten der Glocke mit einer gewissen Mindeststärke und auch regelmäßig anschlagen. Dies hängt nicht nur von der Gestaltung des Klöppels selbst ab, sondern auch von der Bauart des Joches sowie vom Lätewinkel. Diese 3 Faktoren, die sich zudem noch gegenseitig beeinflussen, bestimmen die Klöppelbewegung und damit über den Klöppelanschlag. Das System Glocke & Joch - Klöppel stellt physikalisch betrachtet ein Doppelpendel dar. *W. Veltmann*³⁹⁾ berechnete aus den Bewegungsgleichungen dieses System die Bedingung für den Nichtanschlag (d.h. der Klöppel bewegt sich relativ zur Glocke nicht):

$$\Delta l = \frac{l_{\text{Glocke red.}} - l_{\text{Klöppel red.}}}{1 + \frac{m_{\text{Klöppel}}}{m_{\text{Glocke}}} * \frac{l_{\text{Klöppel red.}} - s_{\text{Klöppel}}}{s_{\text{Glocke}}}} \quad \text{Glg. 47}$$

Hierbei ist (vergl. dazu auch Abb. 78):

- Δl Abstand zwischen den Drehachsen von Glocke und Klöppel
- $l_{\text{Glocke red.}}$ reduzierte Pendellänge vom System Glocke + Joch
- $l_{\text{Klöppel red.}}$ reduzierte Pendellänge des Klöppels
- m_{Glocke} Masse von Glocke & Joch
- $m_{\text{Klöppel}}$ Masse des Klöppels
- s_{Glocke} Abstand zwischen der Drehachse und dem Schwerpunkt des Systems Glocke & Joch
- $s_{\text{Klöppel}}$ Abstand zwischen der Drehachse und dem Schwerpunkt des Klöppels

Die reduzierte Pendellänge entspricht dem Abstand von Schwingungsmittelpunkt zur Drehachse des jeweiligen Systems; der Schwingungsmittelpunkt entspricht der Stelle eines physikalischen Pendels, an der man sich dessen Masse in einem einzigen Punkt vereinigt denken kann.

Der Bruch $m_{\text{Klöppel}}/m_{\text{Glocke}}$ ist relativ klein (etwa 0,025-0,06), und auch der Ausdruck $\frac{l_{\text{Klöppel red.}} - s_{\text{Klöppel}}}{s_{\text{Glocke}}}$ stellt einen ziemlich geringen Wert dar, weshalb man den Nenner annähernd mit

1 gleichsetzen kann, wodurch sich die Bedingung für den Nichtanschlag vereinfacht zu:

$$\Delta l = l_{\text{Glocke red.}} - l_{\text{Klöppel red.}} \quad \text{Glg. 48}$$

bzw.

$$l_{\text{Glocke red.}} = l_{\text{Klöppel red.}} + \Delta l \quad \text{Glg. 49}$$

Aus Glg. 49 ist ersichtlich, daß im dem Falle, wo die Schwingungsmittelpunkte von Glocke & Joch sowie vom Klöppel zusammenfallen, kein Klöppelanschlag stattfindet. Erst wenn die jeweiligen Schwingungsmittelpunkte unterschiedliche Positionen zueinander einnehmen, schlägt der Klöppel an die Glocke, und zwar umso besser (d.h. stärker und regelmäßiger), je mehr sich die Lage der Schwingungsmittelpunkte unterscheidet, wobei deren Stellung das Bewegungsverhalten des Klöppels (Flugklöppel, Fallklöppel) bestimmt (vergl. dazu auch Abb. 78). Mathematisch formuliert bedeutet dies:

a) Flugklöppel
$$l_{\text{Glocke red.}} < l_{\text{Klöppel red.}} + \Delta l \quad \text{Glg. 50}$$

b) Fallklöppel
$$l_{\text{Glocke red.}} > l_{\text{Klöppel red.}} + \Delta l \quad \text{Glg. 51}$$

mit $l_{\text{Glocke red.}}$ reduzierte Pendellänge vom System Glocke + Joch

$l_{\text{Klöppel red.}}$ reduzierte Pendellänge des Klöppels

Δl Abstand zwischen den Drehachsen von Glocke und Klöppel

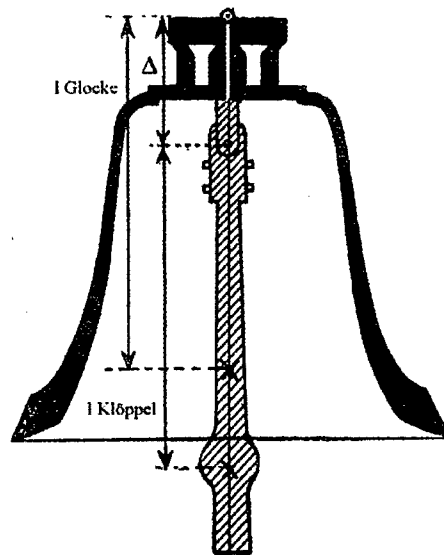


Abb. 78: Lage der Schwingungsmittelpunkte vom System Glocke & Joch bzw. vom Klöppel

Glg. 50 und Glg. 51 beschreiben die Anschlagwilligkeit des Flug- bzw. Fallklöppels und können daher als die „Anschlagbedingung“ bezeichnet werden. Sie lautet für den Flugklöppel in Worten: Ein Klöppel schlägt dann beim Läuten an die Glocke an, wenn der Schwingungsmittelpunkt des Klöppels tiefer liegt als der gemeinsame Schwingungsmittelpunkt von Glocke & Joch. Je kleiner der Abstand zwischen beiden Schwingungsmittelpunkten wird, desto schlechter schlägt der Klöppel an (es nimmt nicht nur die Stärke des Klöppelanschlages ab, sondern es ist auch noch mit Unregelmäßigkeiten im Anschlagverhalten zu rechnen); ist er Null, findet gar kein Anschlag statt, Klöppel und Glocke schwingen wie ein einziges starres System (das war z.B. bei der Kaiserglocke im Kölner Dom der Fall). Beim Fallklöppel verhält es sich umgekehrt: Dieser schlägt dann beim Läuten an die Glocke an, wenn der Schwingungsmittelpunkt des Klöppels höher liegt als der von Glocke & Joche.

Die Anschlagbedingung mutet auf den ersten Blick sehr theoretisch an, doch liefert sie auch für die Praxis sehr wertvolle Hinweise, und zwar nicht nur hinsichtlich des Anschlagverhaltens, sondern auch über Einwirkungen im Klangverhalten der Glocke. Um dies zu demonstrieren, soll hier die Anschlagbedingung hinsichtlich des Anschlagverhaltens für den **F l u g k l ö p p e l**, da er am meisten vorkommt, anhand von einigen praktischen Beispielen diskutiert werden (der Einfluß auf

die Tongebung wird in Kapitel 6.4.1 beschrieben). Demnach wird die Anschlagwilligkeit verbessert durch:

- a) **V e r l ä n g e r n** d e s **V o r s c h w u n g e s** d e s Klöppels bzw. Anbringen von Zusatzgewichten am Vorschwung (= Tiefersetzen des Schwingungsmittelpunktes des Klöppels). Diese Methode ist äußerst effektiv und dürfte wohl u.a. einen Grund darstellen, daß alte Klöppel oft relativ lange Vorschwünge aufweisen, die vor allem bei solchen alten Holzjochen, die recht massive Gegengewichte besitzen, das Anschlagverhalten verbessern. Zusatzgewichte am Ballen erzeugen aufgrund der höheren Lage am Klöppel keine so große Wirkung wie am Vorschwung.
- b) Anbringen eines Gegengewichtes über dem Klöppelaufhängepunkt (= Klöppeldrehpunkt); hierbei wird ebenfalls der Schwingungsmittelpunkt des Klöppels tiefergesetzt. Man nennt auf diese Weise hergestellte Klöppel **G e g e n g e w i c h t s k l ö p p e l**. Mit dieser Methode kann man einen Fallklöppel in einen Flugklöppel umwandeln.
- c) **E r h ö h e n** d e s **L ä u t e w i n k e l s**. Mit steigendem Lätewinkel nimmt effektiv betrachtet die reduzierte Pendellänge zu (siehe unten); damit sinkt zwar allgemein die Lage des Schwingungsmittelpunktes, beim Klöppel jedoch stärker als beim System Glocke & Joch, weil der Klöppel stets höher schwingt als die Glocke (Abb. 77a), weshalb insgesamt der Schwingungsmittelpunkt des Klöppels tiefergelegt wird. Bei sehr hohen Lätewinkeln können bisweilen Doppel- und Mehrfachanschläge („Flattern“) entstehen (in diesem Fall ist die Rückprallgeschwindigkeit des Klöppels geringer als die der Glocke, wodurch diese den Klöppel vor sich hin treibt). Im Extremfall bleibt der Klöppel regelrecht auf der Glocke kleben und „würgt“ geradezu den Klang der Glocke ab (insbesondere den Nachhall wird hierdurch stark abgedämpft); dies tritt normalerweise aber nur bei besonders hohem Lätewinkel auf.
- d) **V e r k l e i n e r n** d e s **G e g e n g e w i c h t e s** über dem Joch bzw. Verringern der **K r ö p f u n g** d e s Joches (= Höherlegen des Schwingungsmittelpunktes des Systems Glocke + Joch).

Die Methoden a) – c) kommen einer Vergrößerung von $l_{\text{Klöppel red.}}$ gleich, Methode d) hingegen entspricht einer Reduzierung von $l_{\text{Glocke red.}}$ sowie im Falle der Kröpfung noch zusätzlich einer Vergrößerung von Δl . Methoden a) und c) sind am einfachsten durchzuführen und werden auch am meisten angewandt, können aber gleichzeitig einen kräftigeren bzw. härteren Anschlag verursachen (siehe Kapitel 6.4.1). Eine Herabsetzung der Klöppeldrehachse ist dagegen nicht zielführend, weil hierbei gleichzeitig der Klöppel verkürzt werden muß und dadurch keine Änderung der Lage des Schwingungsmittelpunktes erfolgt.

Will man die Anschlagsbedingung quantitativ nützen, ist es notwendig, die reduzierten Pendellängen von Glocke & Joch bzw. vom Klöppel zu bestimmen. Die reduzierte Pendellänge ist eine Rechengröße, die von der Pendelfrequenz abhängig ist. Sie entspricht der Länge eines Fadenpendels (= mathematischen Pendels), welches die gleiche Pendelfrequenz aufweist wie das jeweils betrachtete System. Zwischen der Schwingdauer T und der reduzierten Pendellänge $l_{\text{red.}}$ eines mathematischen Pendels besteht der Zusammenhang⁴⁰⁾:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} * \sqrt{l_{\text{red}}} \cong 2 * \sqrt{l_{\text{red}}} \quad \text{Glg. 52}$$

Wenn man nun T als Pendelfrequenz (Anschläge / Minute = A_{min}) ausdrückt (mit den Beziehungen $A = 2/T$ und $A_{\text{min}} = 60 * A$, wobei $A = \text{Anschläge / Sekunde}$), erhält man:

$$A_{\min} = \frac{60}{\sqrt{l_{\text{red}}}} \quad \text{Glg. 53}$$

Mit Hilfe von Glg. 53 kann nun auf recht einfache Weise durch Bestimmen der Läutefrequenz (A_{\min}) die reduzierte Pendellänge von System Glocke & Joch ermittelt werden; allerdings gilt Glg. 53 nur für sehr kleine Elongationen; da der Lätewinkel doch erhebliche Werte aufweisen kann, muß dieser in der Messung berücksichtigt werden, was mit dem sog. Verkleinerungsfaktor k (siehe Diagramm 9) geschieht, mit welchem man den Ausdruck $60/\sqrt{l_{\text{red}}}$ multipliziert; nach Auflösen nach l_{red} lautet dann die Gleichung für die Bestimmung von $l_{\text{Glocke red.}}$:

$$l_{\text{Glocke red.}} = \left(\frac{60 * k}{A_{\min}} \right)^2 \quad \text{Glg. 54}$$

mit $l_{\text{Glocke red.}}$ reduzierte Pendellänge des Systems Glocke & Joch [m]
 k Verkleinerungsfaktor [-] beim jeweiligen Lätewinkel
 A_{\min} Läutefrequenz [Anschläge/Minute]

Die reduzierte Pendellänge des Klöppels läßt sich hingegen durch einen einfachen Schwingungsversuch ermitteln, in dem man den Klöppel in der ruhenden Glocke hin- und herschwenkt und dabei seine Pendelfrequenz (Ausschwünge/Minute) ermittelt; in diesem Fall läßt sich dann die reduzierte Pendellänge des Klöppels mit folgender Gleichung errechnen:

$$l_{\text{Klöppel red.}} = \left(\frac{60 * 0,99}{A_{\min}} \right)^2 \quad \text{Glg. 55}$$

mit $l_{\text{Klöppel red.}}$ reduzierte Pendellänge des Klöppels [m]
 A_{\min} Pendelfrequenz des Klöppels [Anschläge/Minute]

Δl selbst wird vor Ort an der Glocke gemessen (z.B. mit einem Maßband). Für den (allerdings sehr seltenen) Fall, daß der Drehpunkt des Klöppels über dem vom System Glocke & Joch liegt, ist Δl als $-\Delta l$ anzugeben³⁶⁾. Die so erhaltenen Werte für $l_{\text{Glocke red.}}$ (Glg. 54), $l_{\text{Klöppel red.}}$ (Glg. 55) und Δl sind genügend genau, um aussagekräftige Betrachtungen im Läuteverhalten bewerkstelligen zu können. Es muß dazu gesagt werden, daß mit diesen Werten nur die Zusammenhänge von Glocke, Joch und Klöppel berücksichtigt werden, nicht jedoch der Einfluß des Lätewinkels, der ja durch den Verkleinerungsfaktor quasi ausgeschaltet wurde. Ein Erhöhen des Lätewinkels bewirkt effektiv eine Vergrößerung der reduzierten Pendellänge, was man aus Glg. 54 als $l_{\text{red. eff}} = l_{\text{red.}} / k^2$ ausdrücken kann. Diese effektive reduzierte Pendellänge $l_{\text{red. eff}}$ kann man zwar für das System Glocke & Joch bestimmen, nicht aber für den Klöppel, da dieser während des Lätens durch die Glocke behindert wird (Klöppelanschlag!) und daher k nicht ermittelbar ist.

Um Glocken verschiedener Größe vergleichen zu können, ist es notwendig, die Parameter in der Anschlagbedingung auf $l_{\text{Glocke red.}}$ zu beziehen; in diesem Falle lautet dann die Anschlagbedingung:

Flugklöppel $1 < \frac{l_{\text{Klöppel red.}} + \Delta l}{l_{\text{Glocke red.}}} \quad \text{Glg. 56}$

Fallklöppel $1 > \frac{l_{\text{Klöppel red.}} + \Delta l}{l_{\text{Glocke red.}}} \quad \text{Glg. 57}$

Eine genaue Interpretation der durch Glg. 56 und 57 erhaltenen Werte ist derzeit aufgrund fehlender Untersuchungen jedoch leider nicht möglich, nur daß die Anschlagwilligkeit mit zunehmenden Werten (Glg. 56) bzw. abnehmenden Werten (Glg. 57) zunimmt. Für den Flugklöppel hat *Veltmann*³⁹⁾ durch Messung einiger Glocken des Kölner Domes bzw. des Bonner Münsters Werte von 1.06 bis 1.20 erhalten, womit man wenigstens weiß, in welchen Größenrahmen sich diese Werte bewegen; *Steiner*³⁷⁾ hält einen Wert von 1.25 als günstig, ohne zu begründen, warum.

Dennoch liefert die Anschlagbedingung teilweise sehr wertvolle Hinweise bezüglich des Anschlagverhaltens und auch bezüglich des Einflusses der Armaturen auf die Tongebung (siehe Kapitel 6.4.1) und kann auf konkrete Fälle, wo es in erster Linie um Vergleiche geht, auch gut angewendet werden (siehe Kapitel 6.4.4).

Ein geplantes Dimensionieren eines gut funktionierenden Klöppels auf rein rechnerischem Wege ist hingegen kaum durchführbar; die Tauglichkeit eines Klöppels (d.h. sowohl regelmäßiger, ausreichend starker Anschlag als auch „optimale“ Klangauslösung) wird in der Praxis seit jeher empirisch (etwa durch Ausprobieren oder Improvisieren) ermittelt.

Das Joch

6.3

6.3.1 Allgemeines

Als *Joch* (auch Helm genannt) bezeichnet man den drehbar gelagerten Tragebalken, an dem die Glocke befestigt ist. Joche werden aus Holz oder Stahl, selten auch aus Gußeisen hergestellt. Damit das Joch die für das Läuten notwendige Drehbewegung ausführen kann, sind an den Enden des Jochbalkens stählerne Achszapfen befestigt, die in Lagern eingebettet sind, welche sich am Glockenstuhl befinden. Früher verwendete man Gleitlager, heute ausschließlich Kugellager. Die Glocke ist mit der Krone durch lange Schrauben (sog. *Hängeschrauben*) an das Joch befestigt; alte Hängeschrauben (vor allem barocke) sind manchmal besonders kunstvoll geschmiedet und mit schönen Beschlägen verziert; moderne sind dagegen ziemlich schlicht (Rund- oder Flachstäbe). Bei Stahl- und Gußeisenjochen muß zwischen der Glocke und dem Joch ein Holzbrett bzw. eine Gummipatte angebracht werden. Einmal, um eine stabilere Verbindung der Glocke an das Joch zu erreichen (vor allem alte Glocken haben meist gekrümmte Henkel, welche auf gerade Jochbalken nicht gut passen, weshalb man durch dementsprechende Vertiefungen, die als Einbettung dienen und nur in Holz möglich sind, eine stabilere Platzierung an das Joch erzeugt), aber auch, um die Weiterleitung von störendem Körperschall (macht sich u.a. bemerkbar durch dumpfes Klopfen im Gebäude, verursacht durch die Klöppelschläge) auf den Glockenstuhl und das Mauerwerk zu unterbinden, was vor allem bei Betontürmen notwendig ist.

Anhand der Konstruktion kann man Joche in *gerade*, *leicht gekröpfte* und *stark gekröpfte Joche* einteilen (Genauerer siehe Kapitel 6.3.2 ff.). Von der Bauart des Joches hängt u.a. sehr stark die Dynamik der läutenden Glocke ab, so daß man schon oft am Klang erkennen kann, auf was für einem Joch die Glocke hängt; der Einfluß auf die Tongebung dagegen ist geringer als beim Klöppel und erfolgt auch nur indirekt über diesen, weil der Klöppel mehr oder weniger an die Konstruktion des Joches angepaßt werden muß.

Holz ist das am ältesten verwendete Material, aus dem Joche hergestellt werden, Stahl wird erst seit dem 19. Jh. verwendet. Während die Joche des Mittelalters ziemlich einfach gestaltet sind, so zeigen die Gegengewichte bei barocken Jochen schöne geschwungene Formen. Diese barocken Joche findet man nicht nur in den Gebieten, wo die barocke Glockenform verwendet wurde,

sondern auch noch in Spanien, Portugal und in Südfrankreich. In den anderen Gebieten blieben weiterhin die einfacheren mittelalterlichen Formen in Verwendung. Die Holzjoche des 19. Jh. unterscheiden sich nicht von den Barockjochen. Moderne Holzjoche werden großteils ebenfalls nach barocken Formen gebaut, manchmal sind sie aber auch ziemlich schlicht. Da alte Holzjoche schon recht selten geworden sind (wie bei den alten Klöppeln wurden vor allem nach dem Zweiten Weltkrieg viele alte Holzjoche durch Stahljoche ersetzt), sollte man sie nicht grundlos entfernen, vor allem dann nicht, wenn sie eine gute klangliche Wirkung auf die Glocke haben.

6.3.2 Gerade Joche

Bei **geraden Jochen** liegt die Drehachse (und damit die Achszapfen) in der Höhe der Glockenkrone. Der Name stammt daher, daß Achszapfen und Jochbalken in etwa eine gerade Linie beschreiben. Gerade Joche sind entweder aus Holz oder aus Stahl hergestellt. Gerade Joche aus Holz besitzen im Gegensatz zu solchen aus Stahl in der Regel ein **Gegengewicht**, ebenfalls aus Holz, das bei alten Jochen manchmal besonders kunstvoll geformt und geschnitzt ist. Dieses Gegengewicht verhindert einerseits ein Durchbiegen des Jochbalkens und erleichtert zudem noch aufgrund der Höhersetzung des Schwerpunktes der Glocke in Richtung der Drehachse das Läuten der Glocke (jeder, der einmal eine Glocke händisch geläutet hat, wird das sofort bemerken). Gegengewichte zeigen in der Regel eine Höhe, die dem einfachen bis maximal doppeltem Wert der Dicke des Tragebalkens entspricht. Noch höhere Gegengewichte – größer als die Glocke selbst – sind nur in Südeuropa und Lateinamerika gebräuchlich. Der Vorteil des geraden Joches liegt in der günstigen Klangwirkung, die u.a. durch die stark auftretende Dynamik hervorgerufen wird, vor allem, wenn das Joch ein Gegengewicht besitzt (bei zu großen Gegengewichten sinkt die Dynamik jedoch wieder ab; dies tritt aber erst bei extremer, überdimensionaler Ausbildung des Gegengewichtes ein). Nachteilig sind der große Raumbedarf für das Ausschwingen der Glocke und die relativ große, durch Horizontalschübe und lotrechttem Druck verursachte Belastung von Glockenstuhl und Turm, die beim Läuten entsteht.

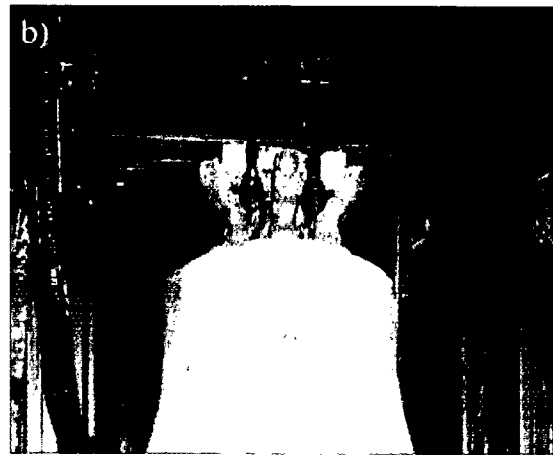
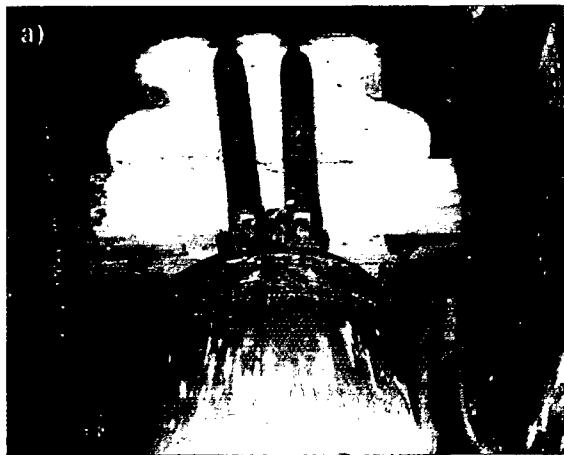


Abb. 79: Gerade Joche; altes Holzjoch mit Gegengewicht (a), modernes Stahljoch (b).

6.3.3 Leicht gekröpfte Joche

Bei **leicht gekröpften Jochen** befinden sich die Achszapfen, die auf kleinen Trägerstützen unterhalb des Jochbalkens angebracht sind, im Kronenbereich bis maximal in der Höhe der Platte; diese Joche sind in der Regel aus Stahl und besitzen kein Gegengewicht. Die geringfügige Tieferlegung der Achse (= **K r ö p f u n g**) erleichtert wie das Gegengewicht bei

geraden Jochen das Läuten und verringert auch ein wenig den Platzbedarf der schwingenden Glocke sowie die Belastung von Turm und Glockenstuhl. Ansonsten sind leicht gekröpfte Joche in ihren Eigenschaften den geraden Jochen sehr ähnlich und erzeugen ebenfalls eine hohe Dynamik. Bei massiverer Bauweise (d.h. dicker Tragebalken) haben sie dieselbe Wirkung wie gerade Joche mit (nicht zu großem) Gegengewicht, weil der Tragebalken aufgrund seiner etwas erhöhten Lage über der Drehachse der Glocke quasi als Gegengewicht wirkt. Leicht gekröpfte Joche sind unter diesen Bedingungen (d.h. massive Bauweise) geraden Jochen mit (nicht zu großem) Gegengewicht prinzipiell gleichwertig und auch am Klang nicht zu unterscheiden (vergl. dazu Kapitel 6.4.2 und 6.4.3).



Abb. 80: Leicht gekröpftes Joch; die massive Bauweise des hier abgebildeten Joches wirkt sich akustisch günstig aus, weshalb es in seiner Wirkung geraden Jochen mit (nicht zu großem) Gegengewicht gleichgesetzt werden kann.

6.3.4 Stark gekröpfte Joche

Bei stark gekröpften Jochen befindet sich die Drehachse im Bereich der Schulter bzw. Hals der Glocke oder liegt noch tiefer. Sie sind in der Regel aus Stahl, manchmal auch aus Gußeisen, sehr selten aus Holz und besitzen normalerweise kein Gegengewicht (Ausnahme: Italien, wo stark gekröpfte Joche oft äußerst massive Gegengewichte aufweisen). Gelegentlich werden stark gekröpfte Joche aufgrund der langen Trägerstützen für die Achszapfen auch „Stelzenjoche“ genannt. Durch die starke Verlegung des Drehpunktes in die Nähe des Schwerpunktes der Glocke wird eine viel leichtere Läutbarkeit erreicht; auch werden der Raumbedarf sowie die Belastung von Glockenstuhl und Turm durch Verkleinern von Horizontalschub und Lagerdruck stark verringert. Allerdings bildet sich bei stark gekröpften Jochen die Dynamik nur äußerst schwach aus; das und die geringe Läutgeschwindigkeit sind verantwortlich für den langsamen und leblosen Klang von Glocken auf stark gekröpften Jochen (daran kann man gekröpfte Joche am Klang leicht erkennen), was um so deutlicher wird, je stärker die Kröpfung ist. Stark gekröpfte Joche sind daher geraden und leicht gekröpften Jochen klanglich benachteiligt (durch einen höheren Läutewinkel kann man dem jedoch etwas entgegen steuern, siehe Kapitel 6.1.2 und 6.1.2). Ein weiterer Nachteil besteht in der beim Läuten verhältnismäßig starken Belastung des oberen Glockenbereiches, die stärker ist als bei geraden bzw. leicht gekröpften Jochen und im ungünstigen Falle zum Riß oder gar Bruch von Krone oder Schulter führen kann (aus diesem Grund werden bei stark gekröpften Jochen die Kronen oft entfernt und die Glocken direkt mit der Platte ans Joch montiert).

Die stark gekröpften Joche sind erst im 19. Jh. entwickelt worden, teilweise wurden auch alte, gerade Holzjoche durch Aufbringen von Trägerstützen mit Achszapfen dementsprechend umgestaltet. Stark gekröpfte Joche haben eine besonders starke Verbreitung in den Niederlanden, Belgien, DDR, Skandinavien, Oberitalien, im Tessin, aber auch in Nordamerika, Polen, Tschechoslowakei sowie Ungarn und Siebenbürgen. Große Einzelglocken in England werden ebenfalls so aufgehängt. Die stark gekröpften Joche, wie sie in Oberitalien und Tessin zum

Taktläuten gebraucht werden, besitzen noch zusätzlich schwere Gegengewichte aus Eisen oder Stein.

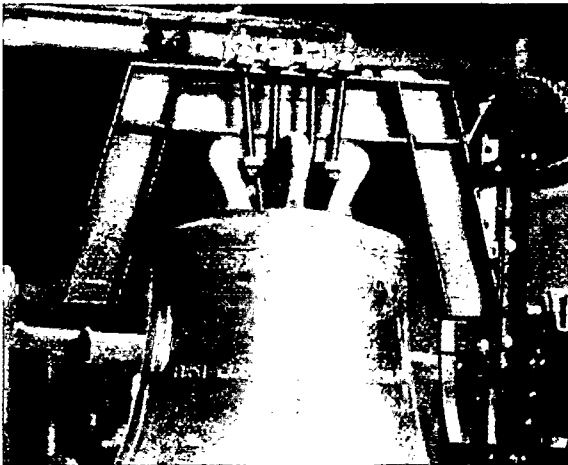


Abb. 81: Stark gekröpftes Joch

Einfluß der Armaturen auf das Klangverhalten

6.4

Von den verschiedenen Armaturteilen (Joch, Klöppel) übt der Klöppel den nachhaltigsten Einfluß auf den Glockenklang (Tongebung) aus. Das Joch hingegen bestimmt wie der Lätewinkel in erster Linie die Dynamik der läutenden Glocke; auf die Tongebung der Glocke selbst wirken sie nur indirekt über den Klöppel, da dieser sowohl auf die Jochkonstruktion, aber auch auf den Lätewinkel abgestimmt sein muß. Generell gilt, daß der Einfluß der Armaturen auf das Klangverhalten der Glocke komplex ist, da die verschiedenen Armaturteile (Joch, Klöppel) als auch der Lätewinkel sich gegenseitig beeinflussen und auf die jeweiligen Klangkomponenten der Tongebung bzw. die Dynamik gleichzeitig wirken, wenn auch mit unterschiedlichem Anteil. In grober Näherung kann aber gesagt werden:

- Die T ö n i g k e i t / T o n s p a n n e wird hauptsächlich vom Klöppel geprägt.
- Ebenfalls vornehmlich vom Klöppel wird der G e r ä u s c h a n t e i l beeinflusst.
- Der A n s c h l a g zeigt eine recht komplexe Abhängigkeit sowohl vom Klöppel als auch von der Jochkonstruktion und vom Lätewinkel .
- Die T o n f ü l l e bleibt von den Armaturen als auch vom Lätewinkel praktisch unbeeinflusst.
- Die D y n a m i k hängt dagegen nur von der Jochkonstruktion und vom Lätewinkel ab.

Im Folgenden soll nun konkret gezeigt werden, wie die einzelnen Klangkomponenten der Tongebung als auch die Dynamik von den jeweiligen Armaturteilen sowie vom Lätewinkel beeinflusst werden.

6.4.1. Einfluß der Armaturen auf die Tongebung

Tönigkeit/Tonspanne

Die Tönigkeit (und mit ihr verbunden die Tonspanne) wird vor allem vom Klöppel geprägt. Sie zeigt hinsichtlich ihrer Ausbildung eine starke Abhängigkeit von der *Berührungsdauer* des Klöppels an der Glocke. Der Zusammenhang zwischen Berührungsdauer und dem akustischen Verhalten läßt sich so beschreiben: Je kürzer die Dauer des Klöppelanschlags ist, desto stärker werden die hohen Teiltöne der Glocke angeregt, die Glocke klingt obertöniger und schärfer. Bei längerer Berührungsdauer dagegen werden die hohen Teiltöne nicht so stark angeregt und es dominieren mehr die tieferen Teiltöne: Der Klang der Glocke wird voller und grundtöniger.

Der Klöppelanschlag ist, physikalisch betrachtet, ein elastischer Stoß, wobei die Stoßdauer der Berührungszeit des Klöppels an der Glocke entspricht (Größenordnung um ca. 2 ms). Die Umstände, von welchen die Stoßdauer bei elastischen Körpern abhängt, wurden von *Schneebeil*⁴¹⁾⁴²⁾ experimentell untersucht; dessen Ergebnisse stimmen mit der Theorie von *Hertz*⁴³⁾ gut überein. Demnach hängt die Stoßzeit und damit die Berührungsdauer u.a. von folgenden Parametern ab:

- a) Die Stoßdauer nimmt mit der Masse des anstoßenden Körpers zu, annähernd proportional mit dieser.
- b) Die Stoßzeit nimmt mit steigendem Elastizitätsmodul E ab. Die Berührungsdauer ist etwa proportional zu:

$$\frac{1}{\sqrt{E}}$$

- c) Die Stoßzeit nimmt mit steigender Geschwindigkeit des stoßenden Körpers (d.h. mit zunehmender Stärke des Anschlags) ab.
- d) Die Stoßzeit nimmt mit der Länge des stoßenden Körpers zu.
- e) Die Stoßzeit nimmt ab, wenn der Krümmungshalbmesser der Anschlagfläche des stoßenden Körpers zunimmt.

Punkte a), b), c) und d) wurden experimentell von *Grützmacher et al.*⁹⁾ an Glocken untersucht, wobei man hier nicht nur die Berührungsdauer gemessen, sondern auch gleichzeitig akustische Messungen vorgenommen hatte; die hierbei ermittelten Werte bezüglich der Berührungsdauer zeigen hinsichtlich ihres Verhaltens sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen von *Schneebeil*. Desweiteren konnten *Grützmacher et al.* feststellen, daß mit zunehmender Berührungsdauer die Tendenz zu Grundtönigkeit zunimmt, während bei sinkender Berührungsdauer die höheren Frequenzen stärker erregt werden. Das Verhalten hinsichtlich der Tönigkeit konnte durch Messungen im Zuge dieser Arbeit bestätigt werden; mit zunehmender Obertönigkeit steigt zudem auch mehr oder weniger die Tonspanne.

Diese allgemeinen Erkenntnisse sollen nun genauer erläutert werden; eine höhere Berührungsdauer und damit grundtönigeren Klang + geringere Tonspanne erreicht man demnach folgendermaßen:

- a) Durch **E r h ö h e n** des **K l ö p p e l g e w i c h t e s**. Ein schwerer Klöppel erzeugt einen grundtönigeren Klang und eine geringere Tonspanne als ein leichter Klöppel (Abb.82). Das Klöppelgewicht hat den größten Einfluß auf die Tönigkeit/Tonspanne und ist um so wirkungsvoller, je mehr die Masse im Klöppelballen konzentriert ist. Hohe Gewichts-

konzentrationen unterhalb des Ballens (z.B. ein langer, massiver Vorschwung oder ein Zusatzgewicht an diesem wie etwa die barocken „Mondscheine“) sind ebenfalls sehr wirksam, erhöhen aber gleichzeitig um so mehr die Härte des Anschlages (siehe unten unter Anschlag). Gewichtskonzentrationen im Bereich des Klöppelschaftes oder am Klöppeldrehpunkt (z.B. bei Gegengewichtsklöppel) wirken hingegen viel weniger effektiv. Das maximal mögliche Klöppelgewicht ist dann erreicht, wenn der Klöppel aufgrund der großen Trägheit für Sekundenbruchteile auf dem Klöppel „liegenbleibt“ - der Klöppelanschlag ist in diesem Fall kein elastischer Stoß mehr -, wodurch vor allem die tieferen Teiltöne gedämpft und deren Abklingzeiten erheblich verkleinert werden (man sagt auch, der Klang wird „abgewürgt“).

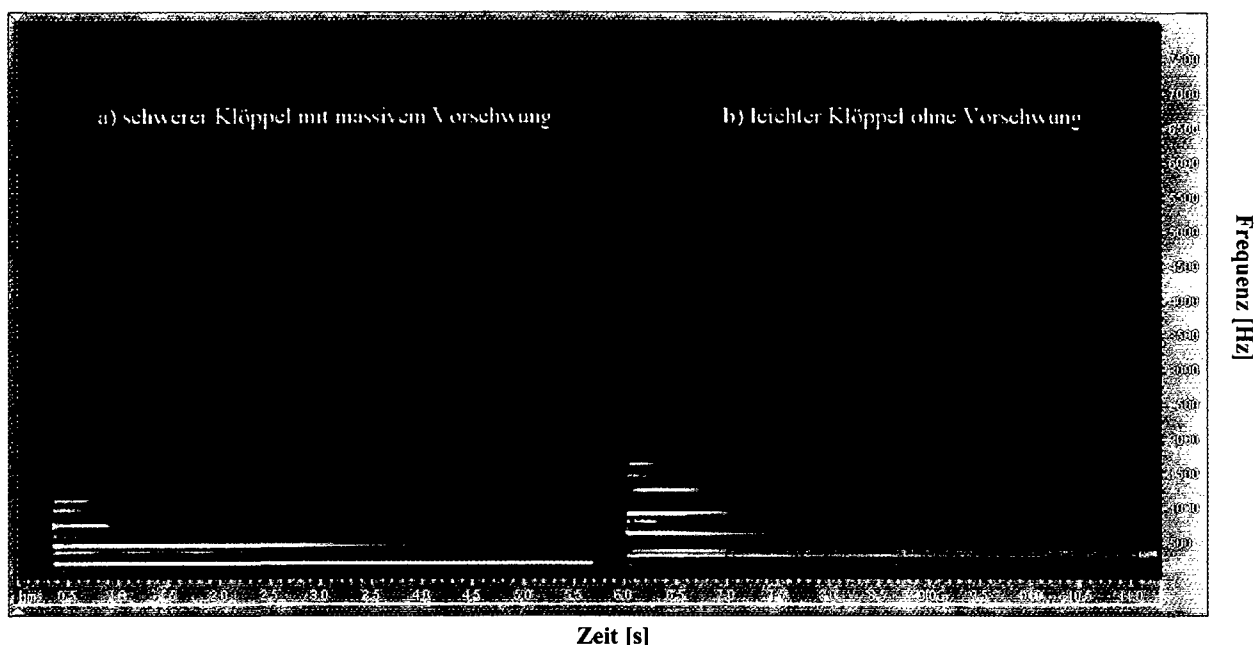


Abb. 82: Sonagramm zweier Glocken mit unterschiedlich schweren Klöppeln. Beide Glocken sind in derselben Rippe gegossen (wurden mittels des Proportionalitätsgesetzes konstruiert) und zeigen hinsichtlich des Materiales gleiche Eigenschaften (vergleichbare Nachhallzeiten und Materialdämpfung); sie sind hinsichtlich ihres akustischen Verhaltens als gleichwertig zu betrachten. Glocke a) besitzt einen alten schweren Flachballenklöppel mit einem langem, massiven Vorschwung, an dem noch ein Zusatzgewicht (ein sog. „Mondschein“) befestigt ist; Glocke b) ist ebenfalls mit einem Flachballenklöppel ähnlich wie bei Glocke a) ausgestattet, allerdings ist bei diesem der Vorschwung etwas unterhalb des Ballens abgeschnitten worden, weshalb das Gewicht dieses Klöppel verhältnismäßig betrachtet (d.h. auf die Glocke bezogen) um einiges geringer ist als der Klöppel bei Glocke a) (nach einer überschlagsmäßigen Berechnung anhand der Klöppelabmessungen um etwa 40% weniger als bei Glocke a). Die Unterschiede in der Masse schlagen sich deutlich auf das Klangverhalten der Glocken aus; Glocke a) ist merklich grundtöniger als Glocke b), bei der die hohen Frequenzen viel stärker angeregt werden und auch die Tonspanne größer ist als bei Glocke a). Dafür zeigt Glocke a) einen ausgeprägteren Anschlag (Geräuschband), welcher auf den langen, massiven Vorschwung zurückzuführen ist (vergl. dazu unten unter Anschlag). Beide Glocken wurden im ruhenden Zustand mit dem Klöppel mit etwa gleicher Stärke angeschlagen; die Aufnahme entstand unmittelbar neben den Glocken in der Glockenstube (beide Stücke hängen nebeneinander), daher bei beiden Glocken der Einfluß der Turmakustik derselbe ist.

- b) Durch die Wahl eines Klöppelwerkstoffes mit geringem Elastizitätsmodul. Dessen Einfluß wirkt sich aber deutlich schwächer als der des Klöppelgewichtes aus (ist indirekt proportional nur zu etwa \sqrt{E}), weshalb hier signifikante Unterschiede im Elastizitätsmodul vorliegen müssen, um eine merkbare Wirkung zu erreichen. Bei der Verwendung von Stahl (Schmiedeeisen) als Klöppelwerkstoff, woraus Klöppel normalerweise immer bestehen, spielt der Einfluß des Elastizitätsmoduls praktisch überhaupt keine Rolle, da dieser stets gleiche Werte um $200\,000\text{ N/mm}^2$ besitzt, unabhängig von Gefüge und C-Gehalt. Bronze besitzt zwar nur einen halb so großen Elastizitätsmodul wie Stahl (ca. $95\,000\text{ N/mm}^2$); trotzdem ist der Unterschied nicht ausreichend, um mit einem Klöppel, der mit Bronzepuffern am Ballen ausgestattet ist (Bronze selbst wäre als Klöppelwerkstoff viel zu spröde) eine

signifikante, deutlich hörbare Änderung in der Tongebung der Glocke zu erzeugen, die der bei Verändern des Klöppelgewichtes wie in Abb. 82 gleichkommt. Denn durch den Elastizitätsmodul der Bronze erhöht sich die Berührungsdauer nur um das etwa 1.2-fache⁹⁾, was einer Gewichtszunahme von ca. 20% entspräche; verglichen mit den Möglichkeiten, die mittels des Klöppelgewichtes machbar sind, ist das relativ wenig (die Spannweiten bei Klöppelgewichtes betragen bis zu 150%, wodurch die Berührungszeiten auf das ca. 2.5-fache ansteigen können; die Zunahme des Klöppelgewichtes beträgt bei den Glocken in Abb. 82 ca. 65%). Aus diesem Grund ist z.B. die Behauptung, daß Glocken mit Klöppeln, die mit Bronzepuffer am Ballen ausgestattet sind, wesentlich weicher und grundtöniger klingen, als wenn sie schmiedeeiserne Klöppel besitzen, übertrieben, und in der Tat sind solche Klöppel von jenen aus Schmiedeeisen, wie die Erfahrung zeigt, klanglich kaum unterscheidbar. Akustisch betrachtet sind Klöppel mit Bronzepuffer aber keineswegs von Nachteil (zumal bei Bronzepuffern der Effekt des höheren Klöppelgewichtes hinzutritt – denn Bronze hat eine höhere Dichte als Stahl, und dadurch sind Klöppel mit Bronzepuffer auch geringfügig schwerer, als wenn sie nur als Stahl bestünden), jedoch aber in mechanischer Hinsicht, da solche Puffer recht schnell abnutzen und erneuert werden müssen, Probleme, die ein durchgehend aus Stahl bestehender Klöppel nicht hat. Die H ä r t e des Klöppelstahles (Schmiedeeisens) beeinflusst dagegen, wie so oft behauptet wird⁴⁴⁾, den Glockenklang nicht (der Elastizitätsmodul ist bei Stahl praktisch unabhängig vom Gefügestand und damit vom Härtegrad), sondern wirkt sich nur auf den Verschleiß aus, weshalb ein weicherer Klöppelstahl nur aufgrund der geringeren Abnutzung der Glocke besser ist, und nicht weil dieser einen weichen Klang erzeugt.

- c) Mit abnehmender Geschwindigkeit, mit welcher der Klöppel an die Glocke auftrifft, d.h. mit abnehmender Stärke des Klöppelanschlages nehmen Obertönigkeit und Tonspanne im Glockenklang ab, im umgekehrten Falle, d.h. bei starkem Klöppelanschlag, hingegen zu. Die Klangkomponente Anschlag zeigt dasselbe Verhalten (siehe dort). Den Effekt, welche die Stärke des Klöppelanschlages auf die Tönigkeit/Tonspanne ausübt, ist teilweise recht groß, jedoch ist dessen Einfluß nicht so hoch wie der des Klöppelgewichtes, denn nur bei signifikanter Änderung des Lätewinkels sind merkbare Änderungen wahrnehmbar.

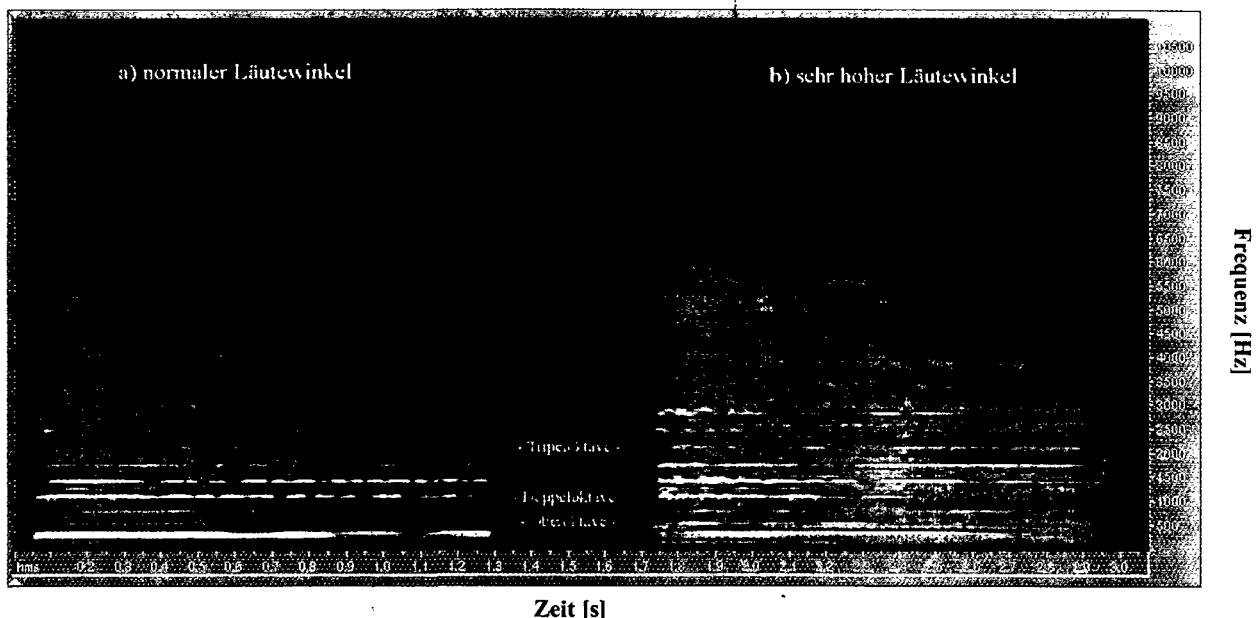


Abb. 83: Sonagramm zweier Klöppelschläge einer Glocke bei unterschiedlichem Lätewinkel. a) zeigt das Sonagramm eines Klöppelschlages bei normalem Lätewinkel um ca. halb 8 Uhr, und b) stellt einen Klöppelschlag derselben Glocke bei sehr hohem Lätewinkel um ca. 11-12 Uhr dar. Man erkennt, daß bei sehr hohem Lätewinkel die Intensität der Teilöne oberhalb der Doppeloktave und der Tripeloktave deutlich zugenommen hat, desweiteren hat sich auch die Tonspanne etwas vergrößert. In der Tat erklingt die Glocke bei sehr hohem Lätewinkel nicht nur schärfer, auch der Quart-Nebenschlagton tritt merklich intensiver in Erscheinung.

Die Geschwindigkeit (Stärke), mit welcher der Klöppel im Anschlagpunkt die Glocke berührt, hängt nicht allein vom Klöppel, sondern vom Zusammenspiel von Klöppel, Joch und Glocke (d.h. vom Grade, wie die Anschlagbedingung erfüllt wird) sowie vom Lätewinkel ab; die genauen Zusammenhänge sind weiter unten unter „Anschlag“ beschrieben. Bei einem gegebenen System Glocke-Joch-Klöppel wird die Stärke des Klöppelanschlages nur vom Lätewinkel geprägt (nimmt mit steigendem Lätewinkel zu); merkbare Änderungen in der Tönigkeit / Tonspanne sind in diesem Falle allerdings erst bei größeren Verschiebungen im Lätewinkel feststellbar (etwa von normal auf hoch; siehe Abb. 83).

Die Form des Klöppelballens hat hingegen keinen merkbaren Einfluß auf die Tönigkeit/Tonspanne. Zwar nimmt mit steigendem Krümmungsradius (diesen kann man in erster Näherung mit dem Radius des Klöppelballen gleichsetzen) die Berührungszeit ab; gleichzeitig nimmt aber die Länge des Klöppelballens (d.h. sein Durchmesser) bei Vergrößern des Krümmungsradius zu, womit sich die Berührungszeit wieder erhöht und somit kompensierend auf den Einfluß des Krümmungsradius wirkt (ansonsten müßten große Glocken, die entsprechend ihrer Größe einen großen Klöppel mit hohem Krümmungsradius besitzen, deutlich obertöniger klingen als kleine Glocken, deren Klöppel viel kleiner sind, was aber, wie die Erfahrung zeigt, nicht der Fall ist). Darüber hinaus ist der Einfluß des Krümmungsradius, verglichen mit dem der Klöppelmasse, verhältnismäßig ziemlich gering, ebenso derjenige der Länge des stoßenden Körpers. In der Tat ist es praktisch nicht möglich, Klöppel mit unterschiedlichem Klöppelballen (z.B. Rundballenklöppel, Flachballenklöppel) am Klang zu erkennen bzw. zu unterscheiden, erst recht nicht einen kugelförmigen von einem ellipsoidförmigen Ballen. Die Behauptung, daß die derzeit propagierten Ellipsoidklöppel aufgrund ihres ellipsoidförmigen Ballens besonders günstige akustische Eigenschaften aufweisen^{16) 21)}, ist aus diesen Gründen nicht zutreffend und mehr als starke Übertreibung zu werten. Ein stark ausgeschlagener Klöppel mit großer, abgeplatterter Anschlagstelle kann „Patschgeräusche“ beim Anschlag erzeugen.

Geräuschanteil

Durch die Berührungszeit des Klöppels werden nicht nur allein die Tönigkeit / Tonspanne beeinflusst, sondern auch diejenigen Klangkomponenten, welche mit ihnen verbunden sind. Dazu gehört der Geräuschanteil. Wie im Kapitel 2.6.5 bereits erwähnt, ist der Geräuschanteil bezüglich seiner Intensität über die Tonspanne bzw. Tönigkeit einflußbar: Je schwächer der hochfrequente Bereich der Glocke wird, desto weniger trägt der Geräuschanteil zum Glockenklang bei. Demnach sollten alle Maßnahmen am Klöppel, die ein grundtöniges Klangspektrum fördern, den Geräuschanteil in seiner Intensität abschwächen; die Ursache selbst, die hohe, stark ausgebildete Teiltondichte, wird dadurch allerdings nicht verändert. Scheppriger Klang z.B. kann daher durch den Klöppel zwar ein wenig gemildert, aber nicht beseitigt werden.

Anschlag

Die Erfahrung zeigt, daß der Anschlag umso ausgeprägter empfunden wird, je stärker der Klöppel an die Glocke schlägt. So werden z.B. die Klöppelschläge beim Abläuteprozeß, wenn die Glocke zum Stillstand gebracht wird, als kräftiger bzw. härter empfunden als diejenigen während des Läuteprozesses (vor allem wenn die Glocke stark abgebremst wird und der Klöppel mit voller Wucht auf die schon fast ruhende Glocke trifft), was auch klanganalytisch nachweisbar ist (Abb. 84).

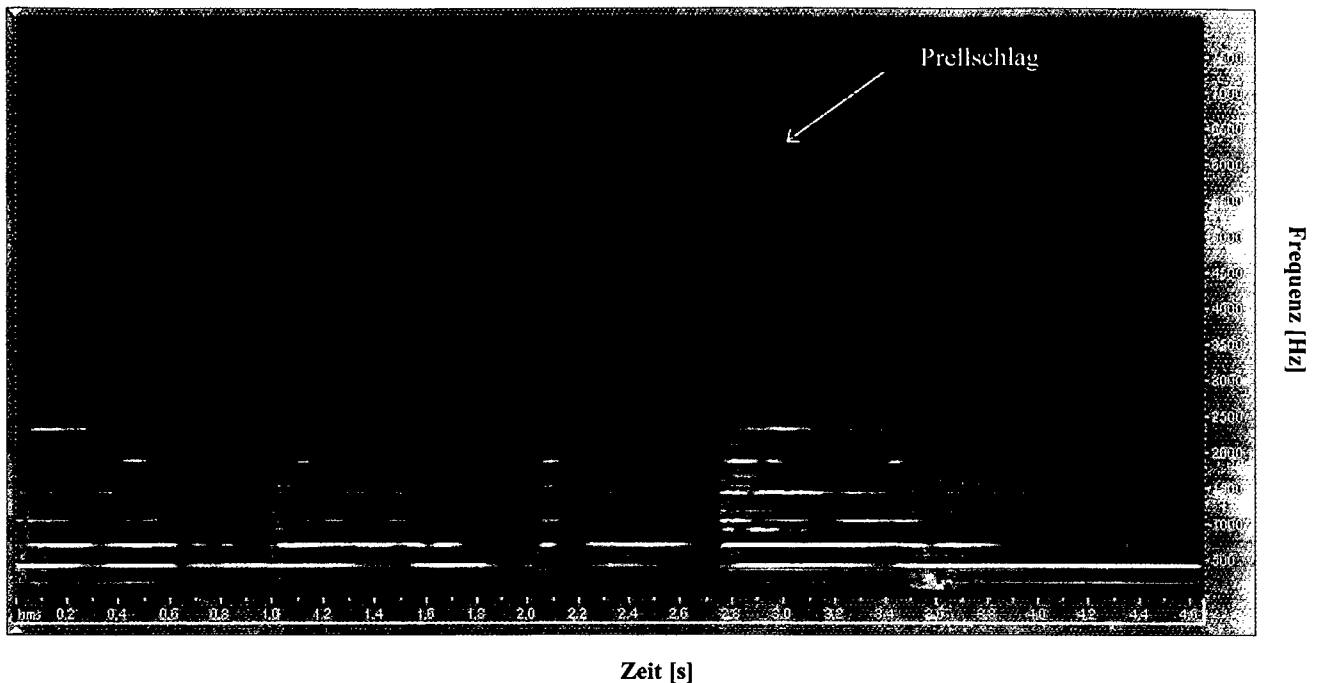


Abb. 84: Sonagramm einer läutenden Glocke. Diese händisch geläutete Glocke wird zum Schluß ziemlich stark abgebremst, wodurch der Klöppel mit voller Wucht auf die halbwegs zum Stillstand gekommene Glocke aufschlägt, was sich durch einen kräftigen Anschlag (einem sog. Prellschlag - Pfeil) äußert. Aus dem Sonagramm ist ersichtlich, daß dieser Prellschlag ein deutliches Geräuschband aufweist, Kennzeichen eines harten Anschlages; bei den Klöppelanschlägen während des „regulären“ Läutens sind diese weitaus weniger ausgeprägt, auch ist hier die Tonspanne bzw. Obertönigkeit ein wenig geringer als beim Prellschlag.

Es ist offensichtlich, daß zwischen der Stärke, mit welcher der Klöppel auf die Glocke trifft und der Klangkomponente Anschlag ein Zusammenhang besteht. Die Stärke nimmt in erster Linie mit der Geschwindigkeit zu, mit welcher der Klöppel an die Glocke schlägt, die daher in guter Näherung als Maß für den Anschlag herangezogen werden kann. Aus der Anschlagbedingung (Kapitel 6.2.3, Glg. 47) ist ersichtlich, daß die Geschwindigkeit zunimmt, je besser die Bedingungen für regelmäßigen Klöppelanschlag erfüllt werden, d.h. die Anschlagwilligkeit zunimmt. Je schlechter die Anschlagwilligkeit, desto geringer ist die Klöppelgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Klöppelanschlages, bis zum Grenzfall, wo die Geschwindigkeit Null ist und kein Anschlag mehr stattfindet. Aus diesem Grund können die Maßnahmen, welche die Anschlagwilligkeit beeinflussen, auch für die Klangkomponente Anschlag herangezogen werden; demnach nimmt die Härte des Anschlages (aber auch die Obertönigkeit und die Tonspanne, siehe oben) zu, wenn man:

- a) die reduzierte Pendellänge des Klöppels $l_{\text{Klöppel red.}}$ vergrößert. Dies geschieht durch Verlängern des Vorschwungs bzw. durch Anbringen von Zusatzgewichten an diesen. Durch diese Methode kann man am wirkungsvollsten harten, kräftigen Anschlag erzeugen. Dies wird vor allem bei alten barocken Klöppeln deutlich, die in der Regel äußerst massive und lange Vorschwünge besitzen, an denen oftmals ein Zusatzgewicht, ein sog. „Mondschein“ befestigt ist (vergl. Abb. 50, 76b und 82a). Eine Konzentration der Masse im Klöppelballen trägt hingegen weitaus weniger zu hartem Anschlag bei.
- b) den Läutewinkel erhöht; hierbei wird ebenfalls die reduzierte Pendellänge des Klöppels $l_{\text{Klöppel red.}}$ vergrößert. Der Effekt bezüglich härteren Anschlages ist aber schwächer verglichen mit den Maßnahmen in Punkt a) (= Verlängern des Vorschwungs). Härterer Anschlag bei hohem Läutewinkel beruht zu einem Teil durch die damit verbundene Zunahme von Obertönigkeit und der Tonspanne (siehe oben Punkt 1), denn der Anschlag wird in erster Linie von den hohen Frequenzen geprägt.

- c) das Gegengewicht bei geraden Jochen verkleinert bzw. ganz entfernt. Hierbei wird die reduzierte Pendellänge des Systems Glocke & Joch $l_{\text{Glocke red.}}$ verkleinert, was effektiv betrachtet eine Verlängerung der reduzierten Pendellänge des Klöppels bewirkt. Härterer Anschlag, den man bisweilen bei Glocken beobachtet, die man von einem geraden Holzjoch mit Gegengewicht auf ein gerades Stahljoch ohne Gegengewicht umgehängt hat, wobei der ursprüngliche Klöppel aber belassen wurde, ist auf diese Maßnahme zurückzuführen. Dies führte in der Glockenkunde zu der falschen Meinung, das Material des Joches (Stahl) habe den Klang der Glocke härter gemacht. In Wirklichkeit ist dafür aber das ungünstige Zusammenspiel vom System Glocke & Joch und Klöppel verantwortlich, also nur durch die Konstruktion der Armaturen bedingt, nicht aber durch den Werkstoff des Joches (siehe auch Kapitel 6.4.3). Ein Umhängen einer Glocke von einem geraden Joch mit Gegengewicht auf ein leicht gekröpftes Joch (bei Belassen des alten Klöppels) erzeugt nur dann härteren Anschlag, wenn dieses die Lage des Schwingungsmittelpunktes vom System Glocke & Joch bezüglich dem des Klöppels erhöht, was im allgemeinen durch Leichtbauweise des Joches (dünne Tragebalken etc.) erreicht wird. Massiv gebaute leicht gekröpfte Joche hingegen entsprechen in ihrer Wirkung in etwa geraden Jochen mit (nicht zu großem) Gegengewicht, da hier bezüglich der Lage der Schwingungsmittelpunkte ungefähr gleiche Verhältnisse bestehen.
- d) ein Gegengewicht auf den Klöppel, oberhalb von dessen Aufhängepunkt, montiert (= Gegengewichtsklöppel), wodurch, wie beim Verlängern des Vorschwunges, die reduzierte Pendellänge des Klöppels $l_{\text{Klöppel red.}}$ vergrößert wird. Inwieweit ein Gegengewichtsklöppel in der Wirkung bezüglich harten Anschlages einem „normalen“ Klöppel gleichkommt, muß noch näher untersucht werden, zumal Gegengewichtsklöppel nicht die Regel sind und ziemlich selten vorkommen.

Obige Maßnahmen (a-d) gelten ausschließlich für Flugklöppel. Es ist ersichtlich, daß der Anschlag nicht von einem einzigen Armaturteil (z.B. Klöppel), sondern vielmehr vom Zusammenspiel von Klöppel, Joch & Glocke sowie dem Lätewinkel beeinflusst wird. Allgemein ist zu sagen, daß Maßnahmen, welche die Anschlagwilligkeit verbessern, einen stärkeren Anschlag sowie Obertönigkeit und höhere Tonspannen fördern.

Aber auch das Klöppelgewicht spielt beim Anschlag eine Rolle. Da dieser in erster Linie von den hohen Teiltönen über der Oberoktave geprägt wird, wird durch Verstärken von Obertönigkeit und Erhöhen der Tonspanne, was durch Verringern des Klöppelgewichtes erreicht wird, der Eindruck von hartem Anschlag erhöht. Leichte Klöppel begünstigen daher harten Anschlag noch zusätzlich (vergl. dazu das Beispiel in Kapitel 6.4.4).

Mit zunehmender Geschwindigkeit des Klöppels im Anschlagpunkt nimmt nicht nur die Stärke des Anschlages zu, es steigt auch die Sprunggefahr an (jedenfalls bei Glocken aus spröden Materialien wie Bronze oder Gußeisen); aus diesem Grund, aber auch, um zu hartem Anschlag zu vermeiden, verwendet man beim hohen Läuten, aber auch beim Taktläuten Klöppel mit kurzem Vorschwung.

Tonfülle

Die Tonfülle wird durch die Armaturen praktisch nicht beeinflusst, weil sie auf das Dämpfungsverhalten einer Glocke nicht einwirken können. Daß die Tonfülle dennoch geringfügigen Schwankungen unterliegt, liegt hauptsächlich an den Auswirkungen der „Kopplung“ bzw. der Dynamik, die einen unruhigen und regellosen Abklingverlauf fördern (aus diesem Grund sind bei der Ermittlung des Klangvermögens auch mehrere Messungen durchzuführen, vergl. Kapitel 2.6.2). Einer Glocke, die von Haus aus geringe Tonfülle (d.h. eine hohe Gesamtdämpfung) aufweist, wird man mittels Armaturen niemals hohe Tonfülle entlocken können; sie wird mit jedem

noch so raffiniert konstruierten Klöppel gedämpft oder kurz klingen. Nur wenn der Klöppelanschlag nicht mehr einem elastischen Stoß entspricht (er auf der Glocke „kleben“ oder „liegen“ bleibt und damit dämpfend wirkt), kann dadurch die Tonfülle verringert werden (man sagt, der Klang wird „abgewürgt“).

Lautstärke

Die Lautstärke einer Glocke nimmt im allgemeinen zu, je stärker der Klöppel auf die Glocke schlägt; demnach sind alle Maßnahmen, welche stärkeren Klöppelanschlag fördern mit einer Zunahme der Lautstärke verbunden (dies kann man z.B. sehr schön beim An- bzw. Abläuteprozess beobachten, wo die Glockenschläge allmählich lauter stärker werden respektive leiser werdend ausklingen).

6.4.2. Einfluß der Armaturen auf die Dynamik

Die Dynamik der läutenden Glocke wird von der Konstruktion des Joches sowie vom Lätewinkel geprägt. Verallgemeinernd läßt sich der Zusammenhang von Dynamik und Jochkonstruktion so beschreiben, daß sich die Dynamik um so geringer ausbildet, je mehr der Schwerpunkt vom System Glocke + Joch sich der Drehachse nähert; in diesem Fall sinkt die Geschwindigkeit der läutenden Glocke immer stärker ab, und damit werden auch die Luftturbulenzen als auch der Doppler-Effekt der läutenden Glocke verringert, welche für die unregelmäßigen Schwebungen verantwortlich sind (Bemerkung: die Geschwindigkeit darf nicht mit der Lätewinkelgeschwindigkeit verwechselt werden, dazu folgendes Beispiel: Eine sehr hoch geläutete Glocke hat eine geringe Lätewinkelgeschwindigkeit, ihre Geschwindigkeit (= Weg, den die Glockenmündung zurücklegt dividiert durch die Zeit zwischen 2 Klöppelanschlägen) ist aber ziemlich hoch, dementsprechend stark auch die Dynamik ausgebildet ist. Eine gleich große Glocke am stark gekröpften Joch hat bei normalen Lätewinkel ebenfalls eine geringe Lätewinkelgeschwindigkeit, ihre Geschwindigkeit ist aber auch niedrig, in erster Linie weil der zurückgelegte Weg der Glockenmündung klein ist verglichen mit dem bei hohem Lätewinkel).

Konstruktiv wird eine Verringerung der Dynamik folgendermaßen erreicht:

- a) Durch Verstärken der Kröpfung des Joches. Ein merkbarer Effekt entsteht erst ab einer Kröpfung, wo die Drehachse etwa im Bereich der Schulter zuliegen kommt, d. h. erst bei stark gekröpften Jochen (Abb. 85); die Verringerung der Dynamik nimmt dann aber mit zunehmender Kröpfung relativ rasch zu. Leicht gekröpft haben nur einen geringen Einfluß auf die Dynamik und sind daher geraden Jochen gleichsetzbar.
- b) Durch Anbringen eines Gegengewichtes auf das Joch. Hier wird jedoch erst eine Wirkung erreicht, wenn das Gegengewicht eine gewisse Mindestgröße aufweist. Die hierzulande gängigen Gegengewichte (d.h. einfache bis doppelte Höhe des Tragbalkens) beeinflussen die Dynamik nur sehr wenig, genauso wie schwach gekröpft Joche. Erst überdimensionale Gegengewichte, die so hoch wie die Glocke selbst sind oder noch höher (wie z.B. in Spanien), verringern deutlich die Dynamik, vergleichbar mit stark gekröpften Jochen. Den stärksten Effekt erzielt man, wenn man das Joch stark kröpft und noch zusätzlich ein schweres Gegengewicht montiert, wie es in Teilen Oberitaliens und dem Schweizer Tessin üblich ist.

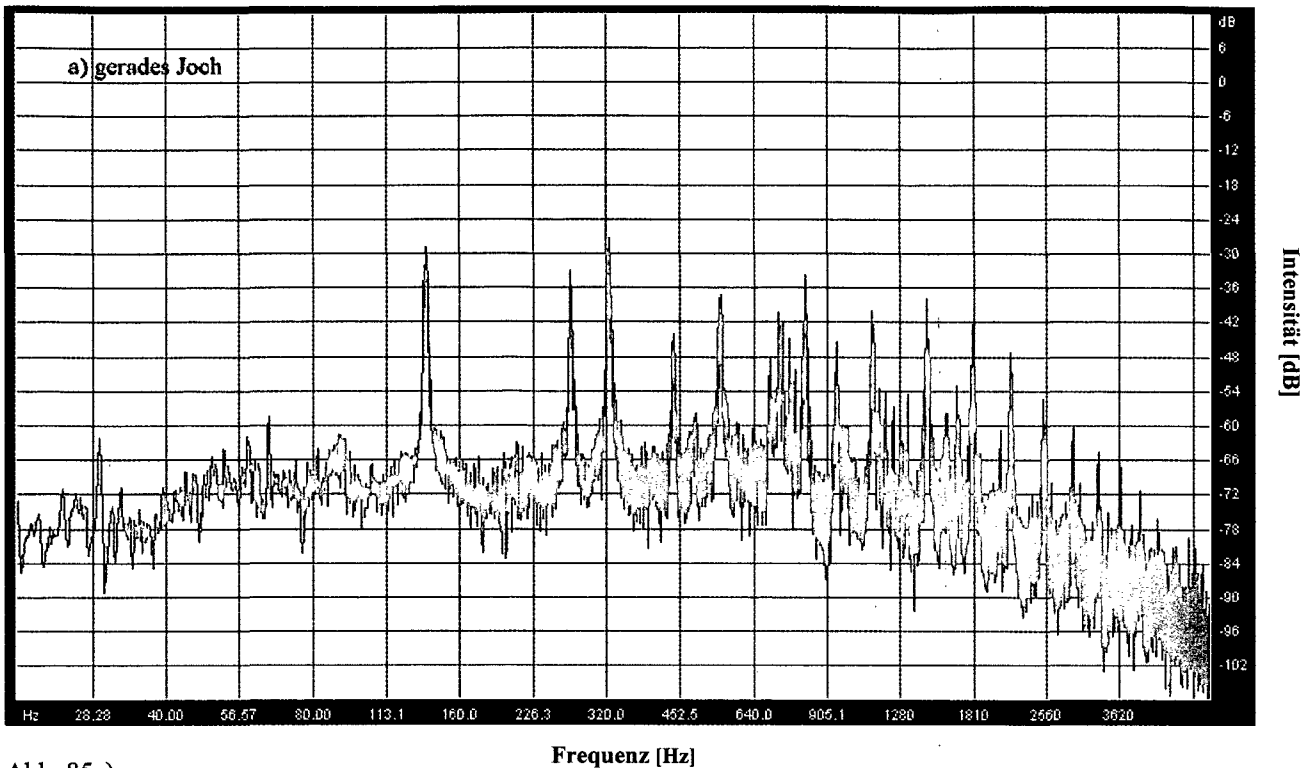


Abb. 85a)

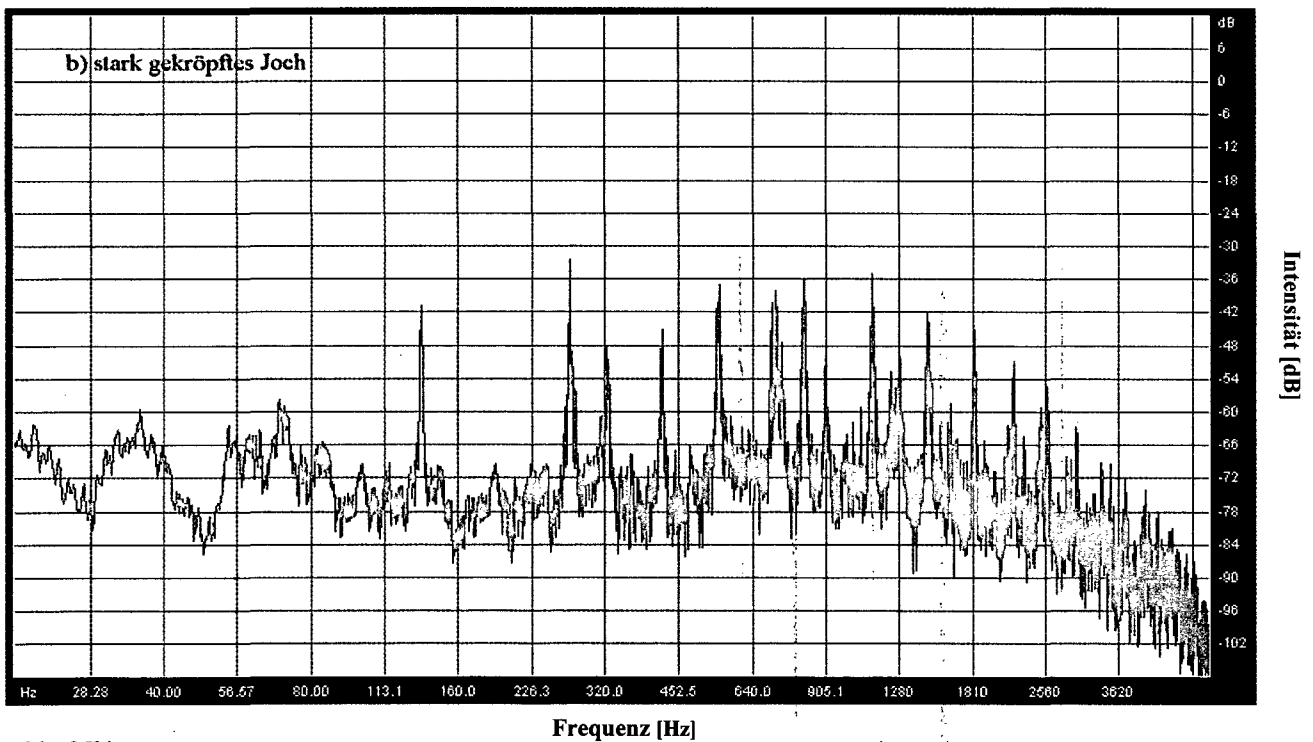


Abb. 85b)

Abb. 85: Klangspektren zweier Glocken, wobei die erste an einem geraden Joch ohne Gegengewicht hängt (a), die zweite aber an einem stark gekröpften Joch (b). Beide Glocken sind gleich groß, haben dieselbe Tonlage und sind auch in gleicher Rippe („Graßmayr-Rippe“) gegossen. Auch der Läutewinkel ist bei beiden Glocken gleich (ca. halb 8 Uhr), sie unterscheiden sich einzig durch die Aufhängung. Es ist zu sehen, daß bei a) die Verbreiterung der Peaks etwas mehr ausgeprägt ist als bei b) (am deutlichsten bei den tiefsten Teiltönen); in der Tat klingt Glocke a) ziemlich schwungvoll aufgrund der stärker ausgeprägten Dynamik, während die b) aufgrund der nur eher schwach ausgebildeten Dynamik recht leblos und lahm erscheint.

Der Einfluß des L ä u t e w i n k e l s auf die Dynamik ist schon in Kapitel 6.1.2. genauer erläutert worden; sie nimmt mit steigendem Lätewinkel zu. Aus diesem Grund kann man durch Erhöhen des Lätewinkels die jochbedingte Verringerung der Dynamik (z.B. starke Kröpfung) durch Erhöhen des Lätewinkels mehr oder weniger kompensieren; eine ebenso hohe Dynamik wie bei einer Aufhängung an einem geraden bzw. leicht gekröpften Joch erreicht man dadurch aber nicht.

6.4.3. Einfluß des Jochmaterials auf das Klangverhalten

Das Material, aus dem das Joch hergestellt ist (Holz, Stahl, Gußeisen), hat keinerlei Einfluß auf den Glockenklang, sowohl auf die Tongebung als auch auf die Dynamik. Die Glockenkrone stellt bezüglich der Schwingungsformen der Teiltöne (vor allem für die Lauttöne) einen Knotenpunkt dar (vergl. Abb. 4 in Kapitel 2.2.1), und eine signifikante Energieabgabe der Glocke an ihre Aufhängung ist ebenfalls nicht feststellbar¹⁰⁾. Aus diesen Gründen erfolgt durch das Joch keine Beeinflussung des Abklingverhaltens der Teiltöne, weder die Dämpfung, noch die Intensität betreffend. Der von der Glocke auf das Joch und weiters über den Glockenstuhl ins Mauerwerk übertragene Körperschall hat mit dem Glockenklang nichts zu tun; er äußert sich vor allem durch dumpfes Klopfen im Kirchenraum¹⁾, auf das Klangverhalten der Glocke selbst hat er keinerlei Wirkung. Ein Dämpfen der hohen Frequenzen der Glocke infolge Luftschalldämpfung (Schallabsorption) am Joch tritt aufgrund der im Vergleich zur Glockenstube verschwindend geringen Oberfläche praktisch nicht auf. Sofern Joche gleiche bzw. gleichwertige Konstruktionen zeigen, ist es daher so gut wie unmöglich, am Klang zu erkennen, ob eine Glocke z.B. an einem Holzjoch oder an einem Stahljoch hängt, was anhand von Klanganalysen bestätigt wird. Unterschiedliche Jochkonstruktionen dagegen kann man aufgrund unterschiedlicher Dynamik sehr wohl am Klang erkennen (siehe Abb. 85). Daß das Jochmaterial für den Glockenklang keine Rolle spielt, soll nun anhand von 2 Glocken, die auf Joche aus unterschiedlichem Material montiert sind, gezeigt werden:

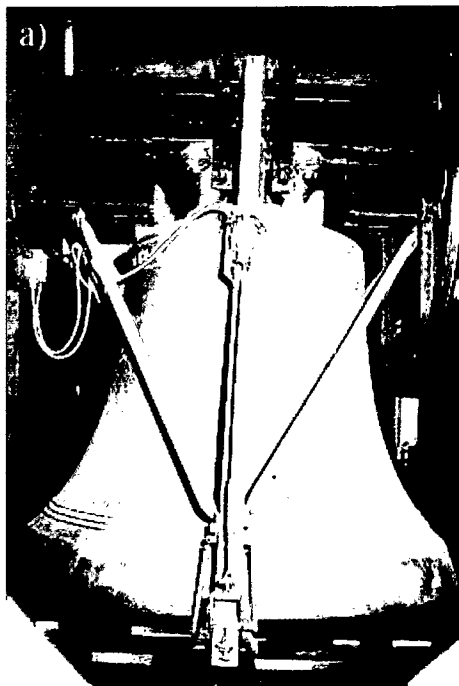


Abb. 86: Glocke an einem leicht gekröpften Stahljoch massiver Bauart (a), bzw. an einem geraden Holzjoch mit Gegengewicht (b)

Es handelt sich bei den in Abb. 86 gezeigten Glocken um 2 Stücke der Fa. Graßmayr aus dem Jahre 1956. Beide Glocken sind in derselben Rippe gegossen und besitzen beide gleich gute akustische Eigenschaften (d.h. vergleichbare Nachhallzeiten bzw. Tonfülle und Tongebung), sind daher klanglich als so gut wie gleichwertig zu betrachten. Beide Glocken besitzen zudem gleich konstruierte Rundballenklöppel und werden gleich hoch geläutet. Ein unterschiedlicher Einfluß von Glockenrippe, Material, Klöppel, Läutewinkel und auch Turmakustik (die Glocken hängen im Turm nebeneinander) auf das Klangverhalten sind daher im Prinzip auszuschließen, Differenzen sollten daher nur durch das Joch bedingt sein, und weil die Konstruktionen (leicht gekröpftes massives Joch, gerades Joch mit Gegengewicht) in guter Näherung als gleichwertig angesehen werden können, bleibt diesbezüglich nur noch mehr die Materialkomponente übrig.

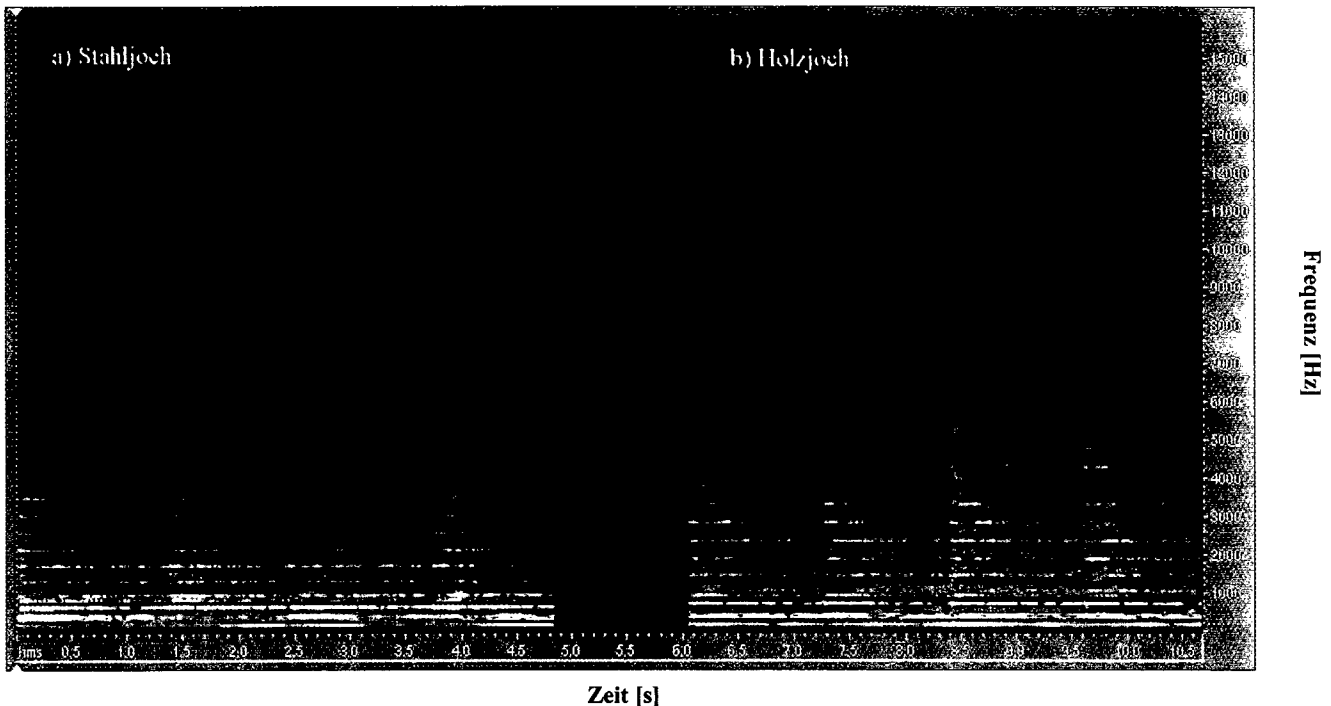


Abb. 87: Sonagramm der Glocken in Abb. 86 im läutendem Zustand; (a) Stahljoch, (b) Holzjoch.

Allerdings zeigen die Sonogramme (Abb. 87) und auch die Klangspektren (Abb. 88a und b) keine signifikanten, sondern nur sehr geringe Unterschiede bezüglich Tönigkeit, Tonspanne und Anschlag; beide Glocken zeigen beinahe dasselbe Klangverhalten, und in der Tat gibt es auch gehörmäßig fast keine klanglichen Unterschiede zwischen beiden Glocken (Gl. 1 hat einen leicht stärkeren Anschlag als die zweite, dafür ist Gl. 2 ein wenig obertöniger als die erste, was aber an den Glocken selbst, aber auch an den Jochkonstruktionen liegt, denn Glocken und Jochkonstruktionen sind nur in guter Näherung, aber nicht 100%ig ident). Die in der Glockenkunde gängige Behauptung, das Material des Jochs beeinträchtigt den Klang vor allem hinsichtlich Obertönigkeit so sehr, daß man dies deutlich heraushören kann, d.h. signifikante Unterschiede bewirkt, trifft also keineswegs zu. Vor allem widerspricht sich diese Behauptung sogar in diesem Beispiel, weil hier stärkere Obertönigkeit bei der Glocke, die am Holzjoch hängt, auftritt, und nicht bei der am Stahljoch.

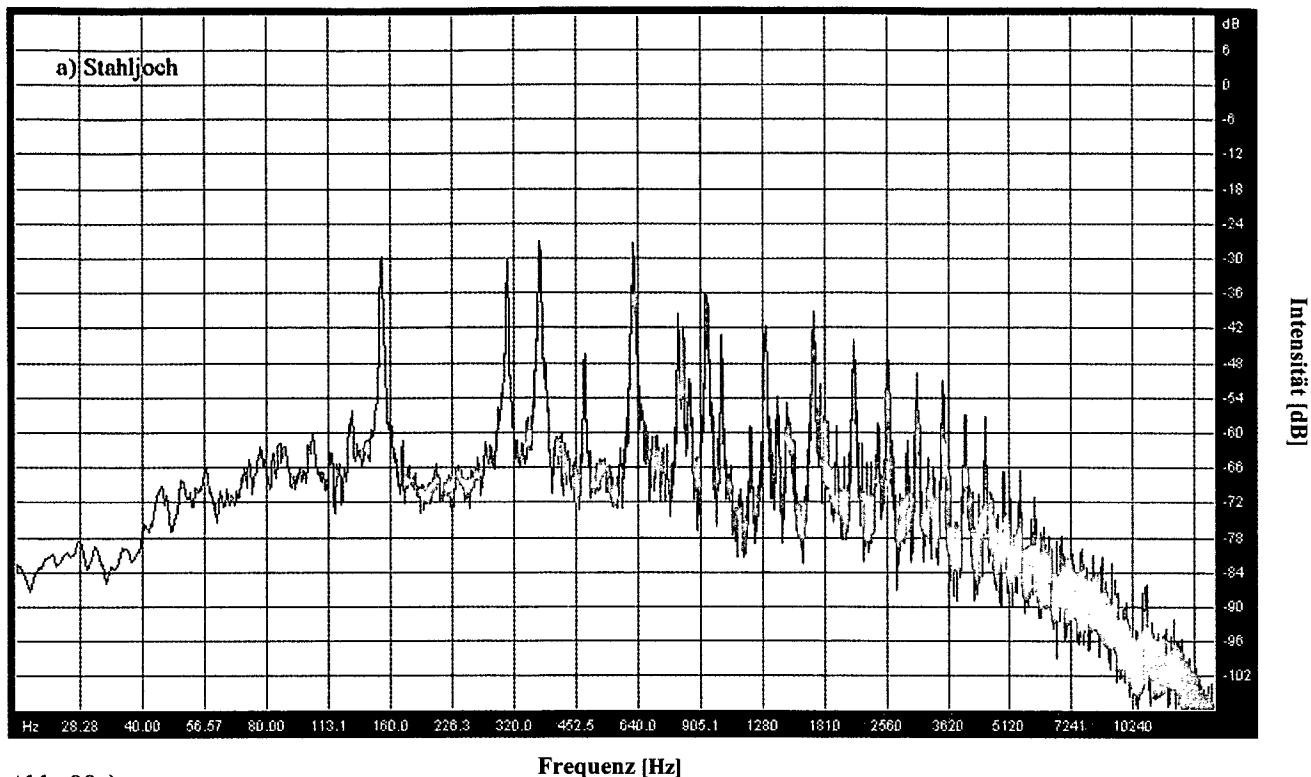


Abb. 88a)

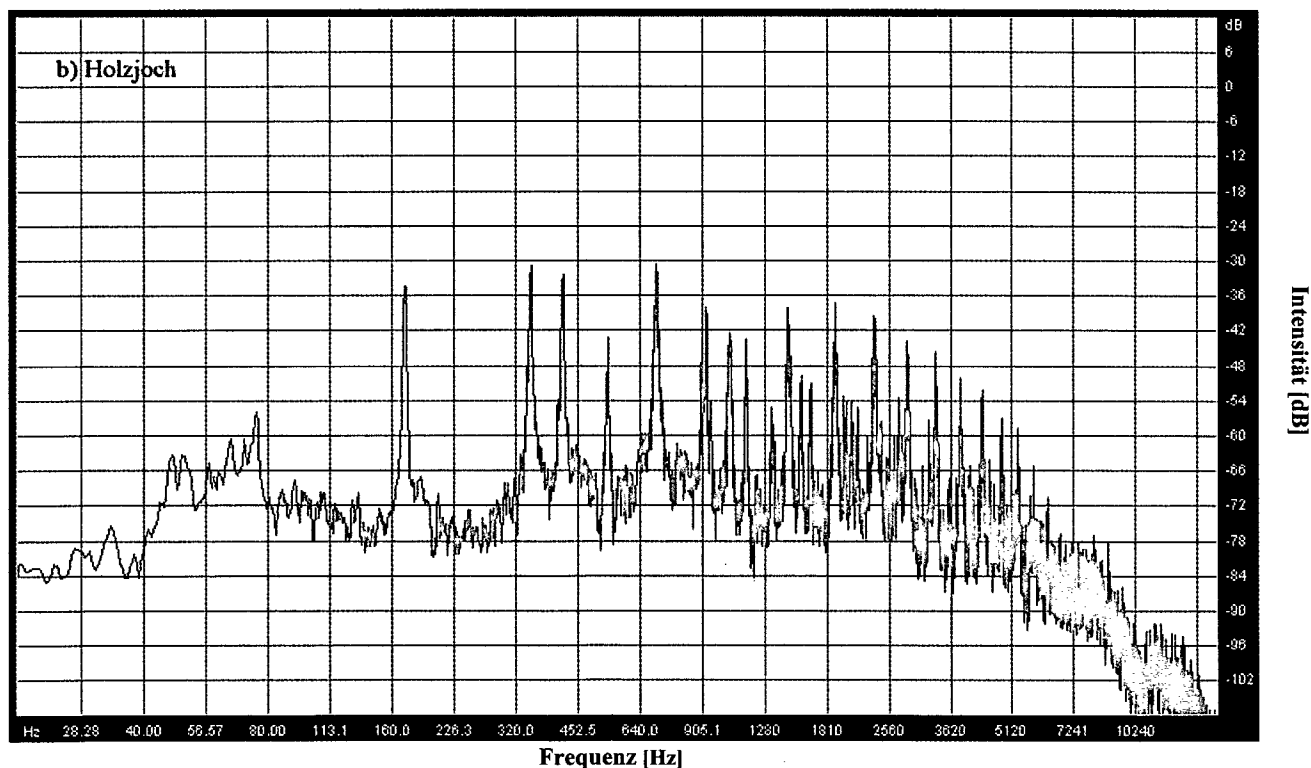


Abb. 88b)

Abb. 88: Klangspektren derselben Glocken (läutender Zustand) wie in Abb. 86, (a) Stahljoch, (b) Holzjoch. Aufgezeichnet jeweils die mittlere Intensität über 4 Anschläge.

Die heute in der Glockenkunde aufgestellte Behauptung, daß Glocken an Holzjochen generell besser klingen als solche an Stahljochen, und daß Stahljocher den Glockenklang grell und obertönig machen, entbehrt jeder wissenschaftlichen Grundlage und ist im Grunde nur ein ideologisches

Argument, ähnlich wie das gegen die Stahlglocken. Mit großer Wahrscheinlichkeit beruht dieser Irrtum auf eine Verwechslung von Jochkonstruktion und Material: Denn Holzjoche sind fast immer gerade konstruiert und dadurch klanglich besonders günstig, während man die klanglich nicht so guten stark gekröpften Joche nur aus Stahl oder Gußeisen herstellen kann, was zur falschen Annahme führte, daß nur das Material für diesen Umstand verantwortlich sei (in Wirklichkeit ist es die Konstruktion des Joches).

6.4.4 Optimieren der Armaturen bezüglich des Klangverhaltens

Eine „optimale“ Klangauslösung durch die Armaturen hängt vom Geschmack des Zuhörers bzw. von den Anforderungen der jeweiligen Gemeinde oder Landes am Glockenklang ab (vergl. dazu Kapitel 2.7.1). So ist z.B. in Österreich ein kräftigerer Anschlag erwünscht, in Deutschland dagegen nicht. Die Ansichten wechselten zudem auch mit den jeweiligen Stilepochen; so war z.B. im Barock ein besonders kräftiger Glockenklang erwünscht, weshalb man damals Klöppel mit besonders langen Vorschwüngen, die unten noch mit einem zusätzlichen Gewicht (einem sog. „Mondschein“) versehen waren, hergestellt hat.

Allgemein ist jedoch eine Förderung von grundtönigem, vollem Klang erwünscht; in dieser Hinsicht ist eine Aufhängung von Glocken an geraden Joche mit Gegengewichten (bzw. leicht gekröpften Joche in massiverer Bauweise), verbunden mit einem möglichst schweren Klöppel die günstigste Lösung. Denn bei einer Vergrößerung des Gegengewichtes am geraden Joch muß bzw. kann man auch den Klöppel schwerer machen, damit er einerseits richtig anschlägt, womit aber auch gleichzeitig ein grundtönigerer Klang erreicht wird, vor allem, wenn die Gewichtszunahme am Ballen erfolgt (Beschweren des Vorschwunges verstärkt gleichzeitig auch den Anschlag). Darüber hinaus verringert ein Vergrößern des Gegengewichtes in gewissen Maßen die Anfälligkeit für zu harten Anschlag (Zusammenhang mit der Anschlagbedingung). Weil größere Gegengewichte einen höheren Läutewinkel erleichtern bzw. fördern, wird auch die Dynamik dementsprechend günstig beeinflusst. Oben genanntes gilt nicht nur für gerade Joche, sondern auch für leicht gekröpfte Joche massiver Bauart, wenn auch nur bis zu einem gewissen Grade, weil hier der Tragbalken, der die Funktion des Gegengewichtes ausübt, nur begrenzt durch massivere Bauweise vergrößerbar und damit die Wirkung als Gegengewicht nicht beliebig verstärkbar ist (vergl. dazu Kapitel 6.3.3). Generell gilt für gerade und leicht gekröpfte Joche, daß eine massive Bauweise (d.h. dicke Tragbalken und größere Gegengewichte) hinsichtlich volleren und grundtönigeren Klanges und in gewissen Maßen auch weicheren Anschlages förderlicher und damit akustisch günstiger ist als Konstruktionen, die auf ein Minimum an Gewicht ausgelegt sind (dünne Tragbalken, abgeschrägte Trägerstützen und Jochenden, zu kleines bzw. fehlendes Gegengewicht).

Folgendes ist bei Armaturen immer zu beachten: Ein optimiertes System (Glocke + Joch + Klöppel + Läutewinkel) wird mehr oder weniger beeinträchtigt, sobald nur eine Komponente davon (z.B. Klöppel oder Joch) verändert wird. Vor allem beim Umhängen einer Glocken auf ein neues Joch, das anders konstruiert ist als das vorherige, ist zu berücksichtigen, daß der Klöppel unter Umständen für das neue Joch nicht mehr geeignet ist. So sind z.B. Klöppel mit langen Vorschwüngen bei Aufhängung der Glocke an Jochen mit stärker ausgebildeten Gegengewichten optimal, nicht jedoch an Jochen ohne oder mit zu geringem Gegengewicht. In so einem Fall wird dann der Anschlag beim Läuten aufgrund des nun zu langen Vorschwunges zu kräftig, der Klang der Glocke härter. Dieser Fall tritt dort meist auf, wenn alte, massive Holzjoche durch moderne, zu leichte Stahljoche ersetzt werden. Ebenso sollte man alte, gut funktionierende Klöppel nicht durch neue Klöppel ersetzen, da diese meist leichter als die alten sind, wodurch der Klang der Glocke obertöniger wird. Eine unsachgemäße „Sanierung“ der Armaturen kann aus diesen Gründen manchmal verheerende Resultate bezüglich des Klangverhaltens mit sich führen, wie anhand des folgend beschriebenen Falles ersichtlich ist:

Unsachgemäßer Austausch von Armaturen

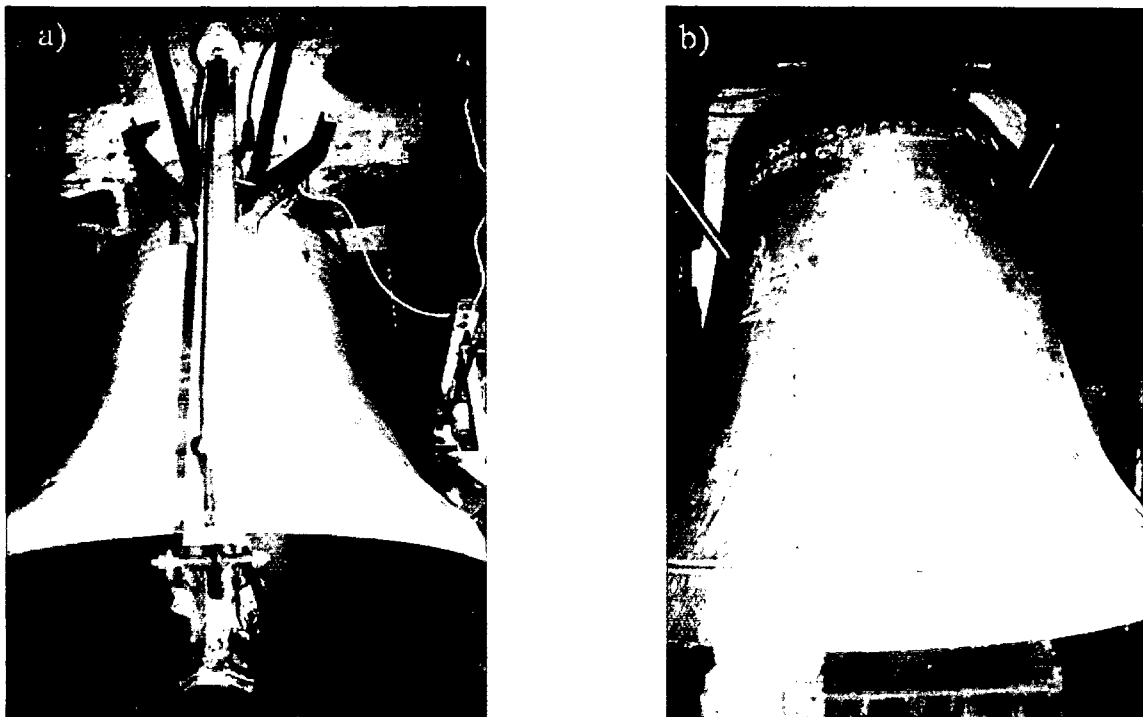


Abb. 89a und b:

- a) Glocke an einem geraden Holzjoch mit Gegengewicht und massivem Rundballenklöppel (= alte Armaturen)
- b) Glocke an einem leicht gekröpften Stahljoch in Leichtbauweise und leichtem Flachballenklöppel (= neue Armaturen)

Der vorliegende Fall behandelt eine Glocke der Gießerei Pfundner aus dem Jahre 1953 (Gewicht: 1621 kg), bei der Anfang der 1990er Jahre im Rahmen einer Sanierung der Glockenanlage die Armaturen ausgewechselt wurden (Abb. 89b). Ursprünglich hing diese Glocke an einem alten, recht schwer gebauten geraden Holzjoch mit Gegengewicht und hatte einen massiven, ebenfalls noch alten Rundballenklöppel, genauso wie in Abb. 89a zu sehen ist (von den Originalarmaturen standen keine geeigneten Fotografien zur Verfügung). Die neuen Armaturen bestehen aus einem leicht gekröpften Stahljoch, das ziemlich leicht konstruiert ist (dünner Tragebalken, Abschrägungen am Jochende) sowie aus einem schmalen, leicht gebauten Flachballenklöppel, der offensichtlich aus einer Stahlplatte geschnitten wurde (Abb. 89b). Der Lätewinkel von etwa 8-9 Uhr blieb mehr oder weniger unverändert (er dürfte jetzt etwas geringer sein).

Dieser Wechsel der Armaturen hat sich erheblich auf das Klangverhalten dieser Glocke niedergeschlagen, die nun spürbar schlechter klingt als früher. Einst zeichnete sich dieses Stück durch hervorragende Klangqualität aus, in erster Linie war es ihr weicher, voller Ton, der einen ungemein leuchtenden Charakter hatte. Jetzt klingt die Glocke ziemlich hart, ist nicht mehr so volltönend wie früher (deutlich obertöniger und dünner im Klang) und hat bei weitem nicht mehr den leuchtenden Charakter, den dieses Stück so prägte. Der gehörmäßig wahrgenommene signifikante Wechsel im Klangverhalten läßt sich auch klanganalytisch eindeutig nachweisen, wie aus den folgenden Amplitudendiagrammen, Sonagrammen und auch Klangspektren zu entnehmen ist; die für die Analysen verwendeten Aufnahmen (vorher-nachher) entstanden ungefähr an derselben Stelle, sodaß ein unterschiedlicher Einfluß der Turmakustik auszuschließen ist.

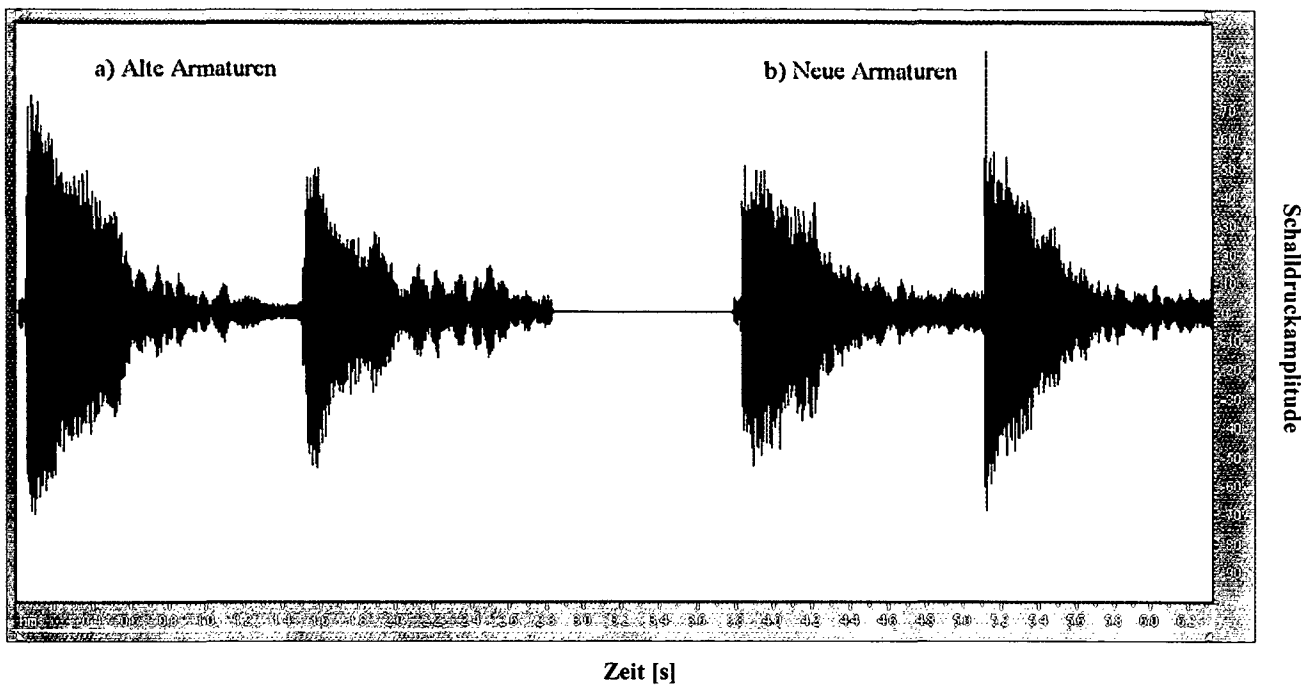


Abb. 90: Amplitudendiagramm (Schlagtonkomplex, läutender Zustand) der Glocke in Abb. 89b mit den alten Armaturen (a) und mit den neuen Armaturen (b)

Das Amplitudendiagramm zeigt deutlich, daß durch die neuen Armaturen die Stärke des Anschlages erheblich zugenommen hat: Deutlich erkennbar die teilweise sehr ausgeprägten Intensitätsspitzen als auch Intensitätssprünge (Abb. 90b), Kennzeichen eines ziemlich harten Anschlages, den es vorher nicht gegeben hat. Das Sonagramm untermauert die Aussagen des Amplitudendiagrammes, denn auch hier sind die Anzeichen von hartem Anschlag eindeutig feststellbar, die sich hier durch recht kräftige Geräuschbänder äußern (Abb. 91b). Gleichzeitig ist aus dem Sonagramm zu entnehmen, daß die Tonspanne angestiegen ist, als Folge davon, daß der neue Klöppel leichter ist als der alte.

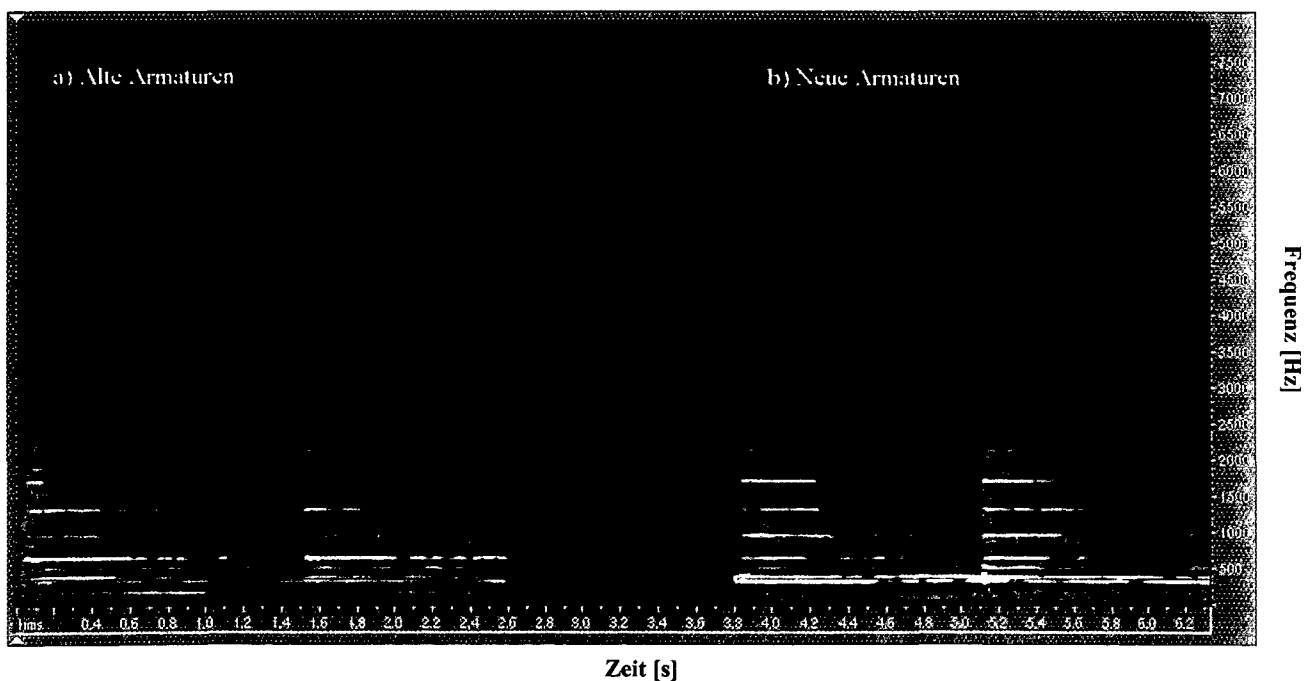


Abb. 91: Sonagramm (läutender Zustand) der Glocke in Abb. 89b mit den alten Armaturen (a) und mit den neuen Armaturen (b)

Durch Verringerung des Klöppelgewichtes steigen Tonspanne und vor allem die Obertönigkeit im Glockenklang an; dies dokumentieren die beiden Klangspektren, bei denen eine massive Änderung der Tönigkeit festzustellen ist. Im früheren Zustand (Abb. 92a) zeichnete sich das Klangspektrum durch eine ausgeprägte Grundtönigkeit aus, wobei die Oberoktave eine auffallend hohe Intensität aufwies, die für den leuchtenden Toncharakter dieser Glocke verantwortlich war (vergl. dazu Kapitel 2.6.7). Durch die neuen Armaturen hat sich das Klangspektrum nicht nur eindeutig in Richtung Obertönigkeit verlagert (Abb. 92b), auch die Oberoktave hat bei weitem nicht mehr die hohe Intensität von einst, wodurch der besonders leuchtende Klangcharakter verloren gegangen ist (stattdessen hat der Quart-Nebenschlagton in seiner Intensität merklich zugenommen).

Die Zunahme der Tonspanne als auch der Wandel von grundtönigem zu obertönigem Klang ist in diesem Fall in erster Linie auf den neuen Klöppel zurückzuführen, der viel leichter ist als der alte Vorgängerklöppel; dieser wog nach Aufzeichnungen ca. 100-110 kg (das sind etwa 6,5 % des Glockengewichtes) und war damit ein verhältnismäßig äußerst schwerer Klöppel. Von dem neuen sind zwar keine Unterlagen über dessen Gewicht bekannt, anhand der Klöppelabmessung kann man dennoch näherungsweise sein Gewicht berechnen, das etwa 50-60 kg beträgt und damit ungefähr nur die Hälfte des früheren ausmacht.

Der harte Anschlag ist dagegen aus dem ungünstigen Zusammenspiel von Joch und Klöppel erklärbar; durch das ziemlich leicht gebaute neue Joch ist der Schwingungsmittelpunkt vom System Glocke & Joch merklich Richtung Drehachse verlagert worden. Dies läßt sich anhand der Anschlagbedingung (Glg. 56) wie folgt nachweisen: Durch den Wechsel der Läutefrequenz von 42 Anschlägen/Minute (alte Armaturen) auf 48 Anschläge/Minute verkürzte sich die reduzierte Pendellänge vom System Glocke & Joch von ca. $l_{\text{Glocke red.}} = 1,5 \text{ m}$ auf ca. $l_{\text{Glocke red.}} = 1,25 \text{ m}$, das ist eine erhebliche Abnahme um fast 20%. Die reduzierte Pendellänge des neuen Klöppels $l_{\text{Klöppel red.}}$ dürfte sich hingegen von der des alten nur wenig unterscheiden; alter und neuer Klöppel sind etwa gleich lang und damit sind auch die reduzierten Pendellängen in etwa vergleichbar; konkrete Werte hierzu konnten jedoch nicht ermittelt werden. Δl ist aufgrund der schwachen Kröpfung verringert worden, aber ebenfalls nur geringfügig, sodaß nur eine unwesentliche Abnahme der Summe von $l_{\text{Klöppel red.}} + \Delta l$ durch die neuen Armaturen anzunehmen ist. Insgesamt hat aber aufgrund der massiven Änderung von $l_{\text{Glocke red.}}$ die Anschlagwilligkeit zugenommen, und zwar merklich, was bedeutet, daß der Klöppel nun mit einer höheren Geschwindigkeit an die Glocke auftrifft als früher: Härterer Anschlag ist die Folge, der durch das geringe Klöppelgewicht (dadurch mehr Obertönigkeit) in seiner Wirkung noch verstärkt wird. Die alten Armaturen (Joch und Klöppel) hingegen waren hingegen sehr gut aufeinander und auf auch die Glocke abgestimmt, was auch akustisch zum Ausdruck kam, im Gegensatz zu den jetzigen Armaturen, die man als klanglich besonders ungünstig einstufen muß.

Der Fall dieser Glocke steht als eines von vielen Beispielen in Österreich, wo in den letzten Jahren durch ungekonnte „Sanierungen“ klangliche schöne Glocken und Geläute mehr oder weniger verdorben und in ihrer Qualität erheblich beeinträchtigt wurden.

Es sei hier eindrücklich noch einmal darauf hingewiesen, daß die Unterschiede im Klangverhalten nicht durch das Material des Joches (Holz-Stahl) zurückzuführen sind, sondern ausschließlich in der Konstruktion der Bauteile (unpassendes Joch und vor allem ein zu leichter Klöppel) und deren ungünstigen Zusammenspiel ihren Grund haben!

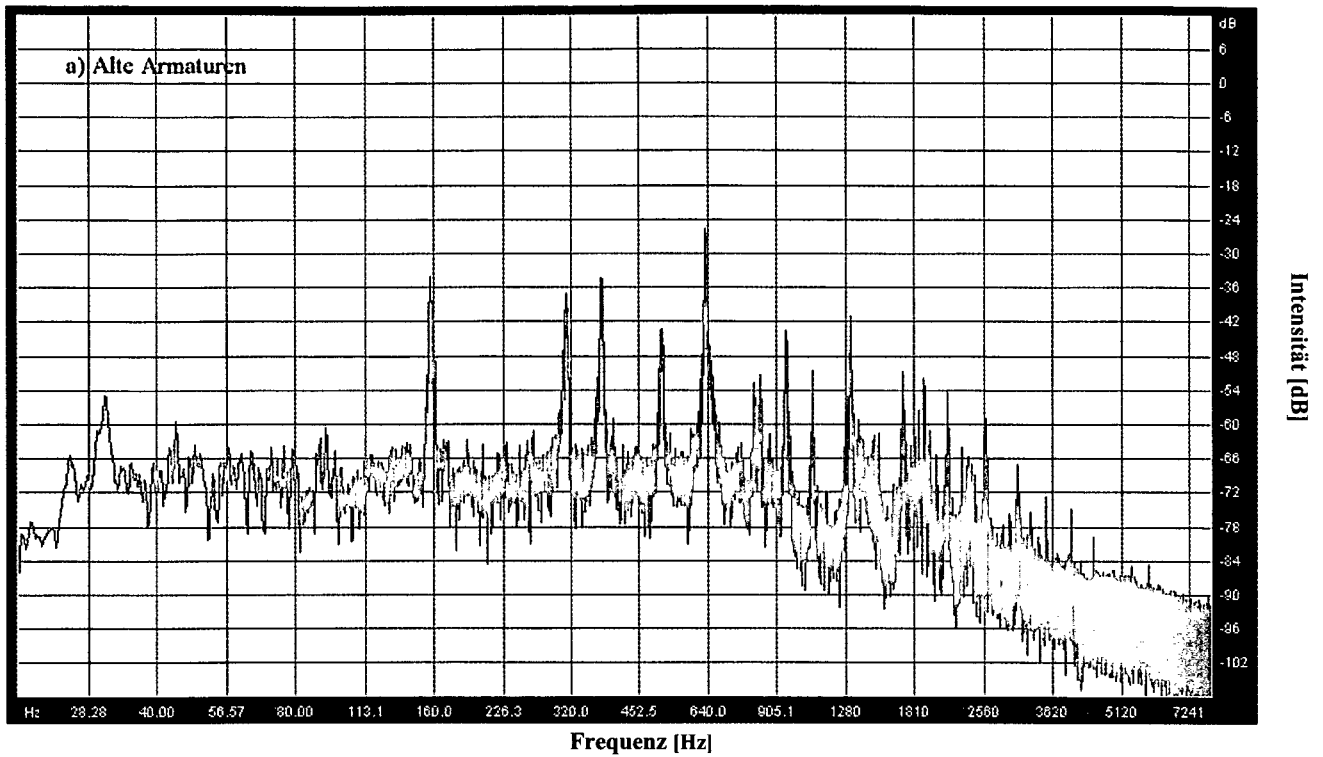


Abb. 92a)

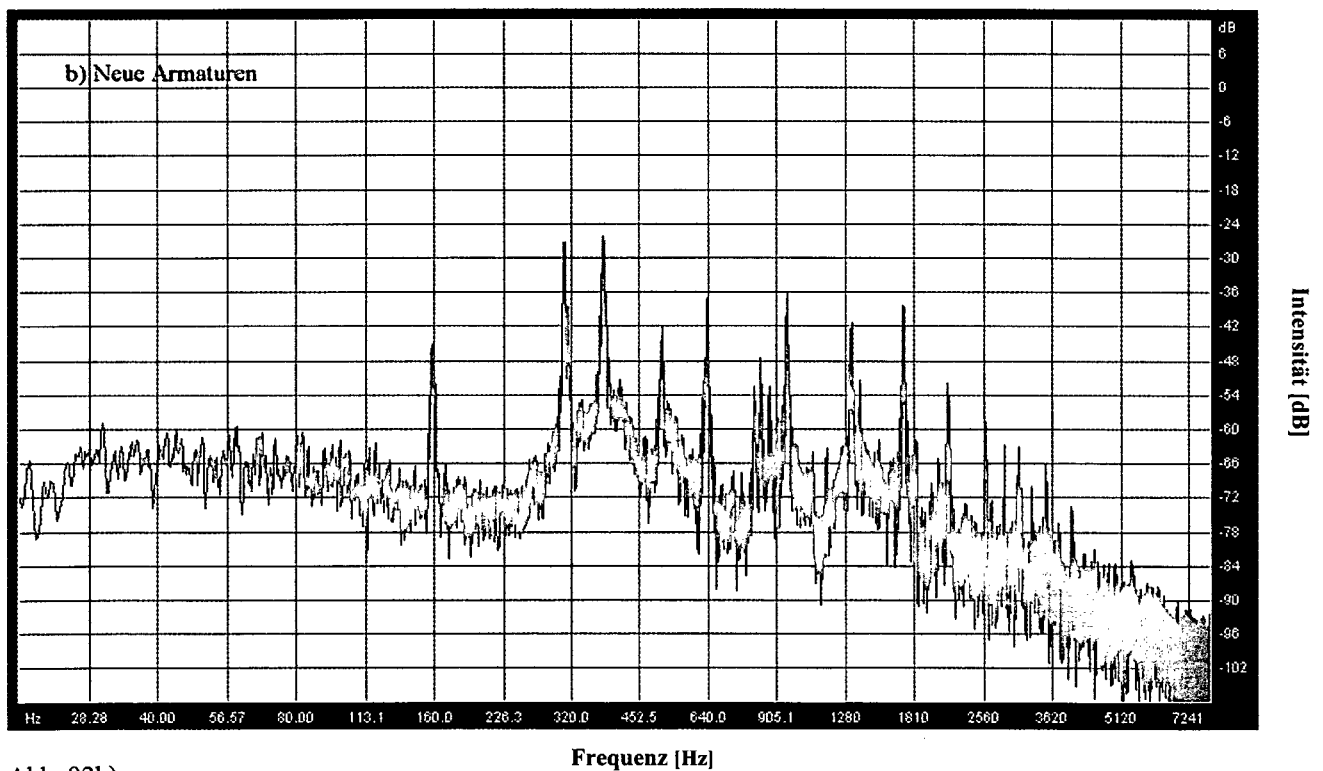


Abb. 92b)

Abb. 92: Klangspektrum der Glocke in Abb. 89b mit den alten Armaturen (a) und den neuen Armaturen (b); aufgezeichnet jeweils die mittlere Intensität über 2 Anschläge.

Bis der Glockenklang das Ohr erreicht, kann er durch verschiedene Begebenheiten mehr oder weniger stark verändert werden: z.B. durch die Höhe des Turmes, die Gestaltung der Schallfenster, die Art und Weise, wie und wo die Glocken im Turm untergebracht sind etc. Der Einfluß all dieser Faktoren faßt man unter dem Begriff **T u r m a k u s t i k** zusammen.

Die Turmakustik beeinflusst sowohl die Tongebung als auch die Lautstärke der Glocke. Von den Klangkomponenten der Tongebung sind in erster Linie die **T o n s p a n n e** und die **T ö n i g k e i t** betroffen. Grund dafür ist, daß hohe Frequenzen stärker absorbiert werden als tiefe Töne und dadurch an Intensität verlieren. Dieser Intensitätsverlust wird in erster Linie durch die sog. **L u f t s c h a l l d ä m p f u n g** bewirkt, die von der sog. Körperschalldämpfung (siehe dazu Kapitel 6.3.1) zu unterscheiden ist, aber auch durch Luftschalldämmung (ein Teil der Schallwellen wird an schalldämmenden Hindernissen rückreflektiert)^{45) 46)}. Schallabsorption infolge Luftschalldämpfung findet nicht nur an Oberflächen fester Körper (Mauern, Glockenstuhl, Jalousien etc.), sondern auch in der Luft statt. Ebenfalls merkbar beeinflusst werden, weil mit der Tonspanne / Tönigkeit gekoppelt, der **G e r ä u s c h a n t e i l** und auch der **A n s c h l a g**. Auf die **T o n f ü l l e** hingegen wirkt sich die Turmakustik praktisch nicht aus. Die **L a u t s t ä r k e** zeigt eine Abhängigkeit von der Turmakustik, die einerseits durch die Größe der Schallöffnungen und deren Gestaltung (offen, mit Jalousien, verschlossen), und von der Distanz zwischen Glocke und Zuhörer bestimmt wird.

Der Einfluß der Turmakustik auf den Glockenklang kann ziemlich stark sein, so daß man schon anhand von Tonaufnahmen manchmal auf den Turm schließen kann, bevor man diesen überhaupt gesehen hat. Im Folgenden soll gezeigt werden, inwieweit die verschiedenen Faktoren sich auf die Turmakustik und damit auf das Klangverhalten der Glocke auswirken:

a) H ö h e des Turmes

Mit zunehmender Entfernung wird der Klang prinzipiell leiser (unter der Annahme, daß die Glocke eine punktförmige Schallquelle darstelle, nimmt der Schalldruck proportional zur Distanz ab) und auch grundtöniger, weil mit zunehmender Weglänge nicht nur die Gesamtintensität abnimmt, sondern gleichzeitig die Absorption der hohen Frequenzen durch die Luft zunimmt. Je höher der Turm und die Lage der Glockenstube, d.h. je größer die Distanz zum Zuhörer, desto weicher und leiser wird der Glockenklang; bei sehr niedriger Aufhängung und geringer Distanz ist der Klang hell, klar und laut, bisweilen auch scharf und stechend. Mit zunehmender Höhe des Turmes steigt auch die Reichweite der Glocke.

b) G l o c k e n s t u b e

Dieser Raum dient nicht nur als Unterbringungsort der Glocken, sondern auch als Art Resonanzraum, in welchem sich der Schall der Glocken vermischen kann, wodurch der Klang gleichmäßiger aus allen Schallfenstern treten kann; damit der Effekt gut ist, soll die Glockenstube am Boden und an der Decke verschlossen sein und die Schallaustrittsfläche (Schallfenster) eine gewisse Größe nicht überschreiten. Glockenstuben mit sehr großen Fenstern oder eine Aufhängung im Freien fördern in der Regel die Unausgeglichenheit eines Geläutes; es dominieren, je nach Standort, die einen oder anderen Glocken, der Klang wird nicht gleichmäßig in alle Richtungen verbreitet. Aus diesem Grund soll man auch alle Glocken eines Geläutes in möglichst einer Glockenstube unterbringen und nicht auf mehrere Stockwerke bzw. Türme verteilen. Eine Verteilung aller Glocken auf möglichst gleicher Höhe im Glockenstuhl ist vorteilhaft^{1) 47)}.

c) Glockenstuhl

Da Luftschalldämpfung erheblich von der Größe der Oberfläche und deren Schallabsorptionseigenschaften (diese werden durch den Absorptionsgrad α bestimmt) abhängt, sollte ein Glockenstuhl umso mehr den Glockenklang beeinflussen, je größer dessen Oberfläche und Absorptionsgrad sind. Ersteres ist konstruktionsmäßig zu erreichen (etwa durch eine massive Bauweise aus zahlreichen Balken bzw. Trägern), letzteres durch die Wahl des Werkstoffes. Für den Bau von Glockenstühlen werden hauptsächlich Holz oder Stahl verwendet, wobei Holz günstigere Eigenschaften hinsichtlich Schallabsorption aufweist. Holzglockenstühle begünstigen daher grundtönigen Klang. Desweiteren übt der Glockenstuhl eine gewisse luftschalldämmende Wirkung auf den Glockenklang aus, weil der Schall an den Balken teilweise reflektiert und auch gestreut wird.

Allerdings ist der Einfluß des Glockenstuhls auf den Glockenklang relativ gering, weil dessen Oberfläche in Vergleich zu derjenigen der Glockenstube verhältnismäßig klein ausfällt und damit auch seine schalldämpfende Wirkung, wobei die Bauweise des Glockenstuhles mehr Einfluß ausübt als das Material, aus dem er hergestellt ist (die Glockenstuhloberfläche ist durch die Bauweise variierbar, während die Absorptionsgrade unverändert bleiben). Aus diesem Grund ist ein klanglicher Unterschied zwischen Glocken, die im Holzglockenstuhl bzw. im Stahlglockenstuhl untergebracht sind, in den meisten Fällen auch kaum heraushörbar (das heute verbreitete Argument, daß Glocken im Holzglockenstuhl wesentlich besser klingen, ist stark überzogen und fällt eher in die Anti-Stahlideologie, die derzeit unter den Experten grassiert; vergl. dazu auch die Argumente über Stahljoche im Kapitel 6.4.3); die Bauweise des Glockenstuhles kann dagegen schon deutlicher das Klangverhalten von Glocken prägen.

d) Baumaterial des Turmes / Glockenstube

Aufgrund ihres großen Flächenanteiles übt die Glockenstube infolge Luftschalldämpfung einen dementsprechenden Einfluß auf das Klangverhalten von Glocken aus. Dabei wird der Klang (Tönigkeit / Tonspanne) nicht nur von der Art des Materials (Holz, Stein, Beton etc.) beeinflusst, sondern auch von dessen Oberflächenstruktur. So wird Grundtönigkeit durch raue Oberflächen wie z.B. bei Bruchsteinmauerwerk, grober Verputz, Ziegelmauerwerk mit tiefen Fugen gefördert^{1) 47)}. Glatte Mauerflächen wie man es z.B. bei Stahlbeton, glattverfugtem Naturstein- und Ziegelmauerwerk findet, verstärken hingegen Obertönigkeit und große Tonspannen. Besonders Stahlbeton zeigt in dieser Hinsicht einen großen Effekt. Stahlbetonglockentürme besitzen daher eine charakteristische Turmakustik, die einen besonders hellen, klaren Klang erzeugt, der bei großen Schallfenster relativ scharf und laut ist, bei sehr kleinen Schallfenstern aber weich und voll klingt und zudem einen typischen „Hall“ aufweist (als ob sich das Geläute in einem sehr großen Raum befände). Letzterer ist bedingt durch das gute Reflexionsvermögen von Stahlbeton.

e) Schallfenster

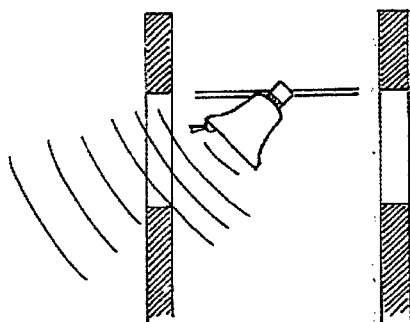
Die Größe der Schallfenster hat ebenfalls einen starken Einfluß auf den Glockenklang; denn mit zunehmender Fenstergröße nimmt einmal die Fläche des Mauerwerkes und damit die Möglichkeit der Luftschalldämpfung ab, und andererseits steigt damit die Wahrscheinlichkeit des Direktschalls (siehe Punkt f) an. Die Folge: Der Klang wird obertöniger, die Tonspanne höher und der Anschlag härter. Zugleich können sich die Schallwellen bei sehr großen Fenstern aufgrund des fehlenden Resonanzraumes nicht vermischen, wodurch das Geläute unausgeglichen wird (es dominiert je nach Standort die eine oder andere Glocke). Eine Erfahrung lehrt: Türme, bei denen Glocken sichtbar sind, besitzen keine gute Akustik. Am schlechtesten ist eine Aufhängung im Freien (z.B. auf einem

Gerüst oder dergl.). Kleine Schallfenster bzw. die Anbringung von Fensterläden oder Jalousien (je feinlamelliger desto besser; die Konstruktionen sind sehr vielfältig) fördern einen weichen, grundtönigen Klang. Jalousien schützen zudem Glocken und Glockenstuhl vor Witterung (Regen, Schnee) und Verschmutzung. Bei zu kleinen bzw. verschlossenen Fenstern dagegen klingen Glocken dumpf und leise. Die Größe der Schallaustrittsfläche hängt vom Baumaterial ab; bei rauheren Oberflächen wie Naturstein- oder Ziegelmauerwerk soll sie etwa 10 %, bei glatten Oberflächen wie Stahlbeton ca. 5 % der Wandoberflächen betragen⁴⁷⁾; insgesamt aber soll sie 25% der Wandoberfläche der Glockenstube nicht überschreiten¹⁾.

f) Direktschall-Indirektschall

Unter den Begriffen Direktschall und Indirektschall versteht man, auf welche Art der Weg des Schalls von der Glocke bis zum Zuhörer verläuft; befinden sich die Glocken in der Höhe der Schallfenster, so geht der Weg des Schalls (von Jalousien und dergl. sei abgesehen) direkt zum Zuhörer: **D i r e k t s c h a l l**. Wenn sich die Glocken aber unterhalb der Schallfenster befinden, so wird der Schall durch die Wände umgeleitet und erreicht erst nach diesem Umweg auf indirektem Wege den Zuhörer: **I n d i r e k t s c h a l l**. Indirektschall ist eine sehr wirkungsvolle Möglichkeit, Härten im Klang zu entschärfen, weil durch den indirekten Weg der Schall stärker absorbiert wird und daher hohe Frequenzen geschwächt werden. Zugleich wird dadurch auch die Schalldurchmischung infolge Mehrfachreflexion gefördert (wirkt wie ein Orchestergraben). So zeigen Glockentürme mit Indirektschall besonders gute akustische Eigenschaften, selbst wenn die Fenster groß und offen sind (so ist z.B. der weiche volle Klang des Geläutes vom Stephansdom in Wien auf das Prinzip Indirektschall zurückzuführen, denn die Schallfenster im Hohen Turm sind zwar sehr groß und zudem offen, die Glocken hängen hier aber unterhalb der Schallöffnungen). Bei Stahlbetontürmen ist der „Hall“ bei Indirektschall besonders stark entwickelt und erzeugt eine eigentümliche, aber besonders angenehme Klangwirkung. Das nachfolgende Beispiel zeigt meßtechnisch die Auswirkungen von Direkt- und Indirektschall.

a) Direktschall



b) Indirektschall

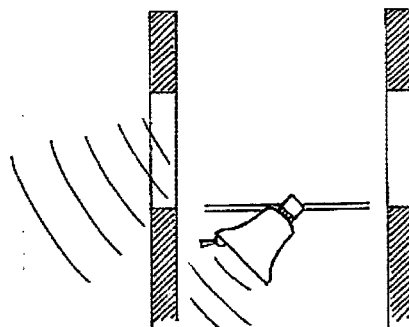


Abb. 93: Prinzip von Direktschall (a) und Indirektschall (b)

Indirektschall trifft man relativ selten an; die meisten Kirchtürme sind auf Direktschall ausgelegt und bilden somit den Standardzustand. Direktschall macht sich dann unangenehm bemerkbar, wenn die Glocken vor dem Schallfenster aufgehängt sind und regelrecht zum Fenster hinausläuten (man sieht dann von unten den in der Glocke anschlagenden Klöppel), was relativ hart und laut klingt (besonders deutlich, wenn man in Schwungrichtung der läutenden Glocke steht, wobei sich ein relativ harter und lauter und ein sehr weicher und leiser Glockenschlag einander abwechseln, vergl.

dazu Abb. 94). Eine Aufhängung in den Fensteröffnungen, wie man das z.B. in Italien so oft sieht, ist akustisch aufgrund des starken Direktschalls sehr ungünstig.

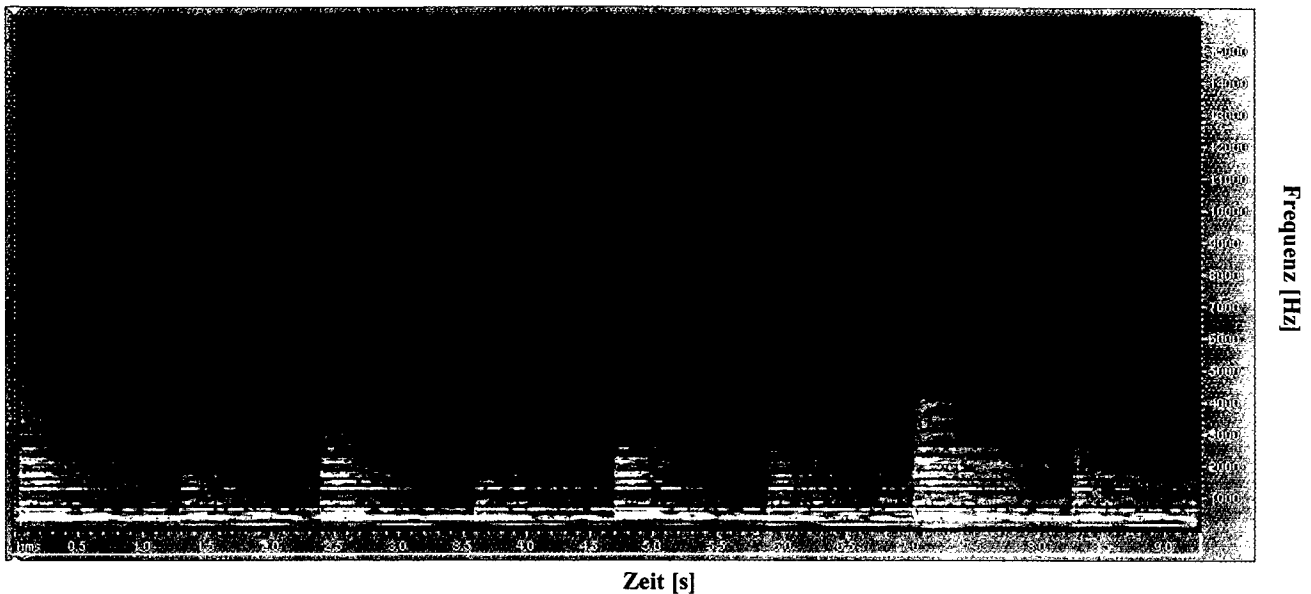


Abb. 94: Sonogramm einer läutenden Glocke, die direkt vor dem Schallfenster aufgehängt ist; folgende Aufnahme erfolgte in Schwungrichtung der Glocke; aufgrund starken Direktschalls zeigt die Glocke einen ziemlich harten Anschlag (hier ist die Glockenmündung mit dem Klöppel zum Zuhörer gerichtet), gefolgt von einem jeweils sehr schwachen Anschlag, bei dem die Glockenmündung zur entgegengesetzten Seite zeigte. Man beachte die deutlich ausgebildeten „Geräuschbänder“ beim jeweils starken Anschlag.

Beispiel: Direktschall – Indirektschall

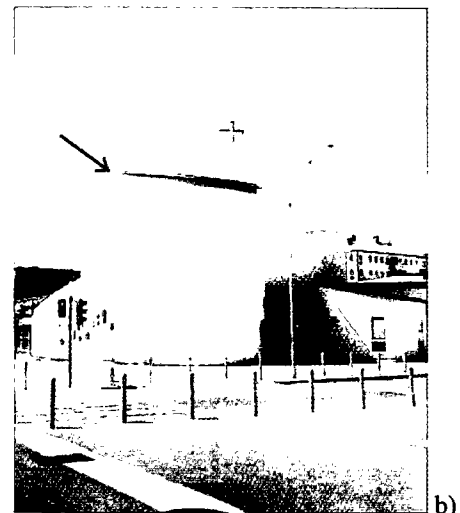
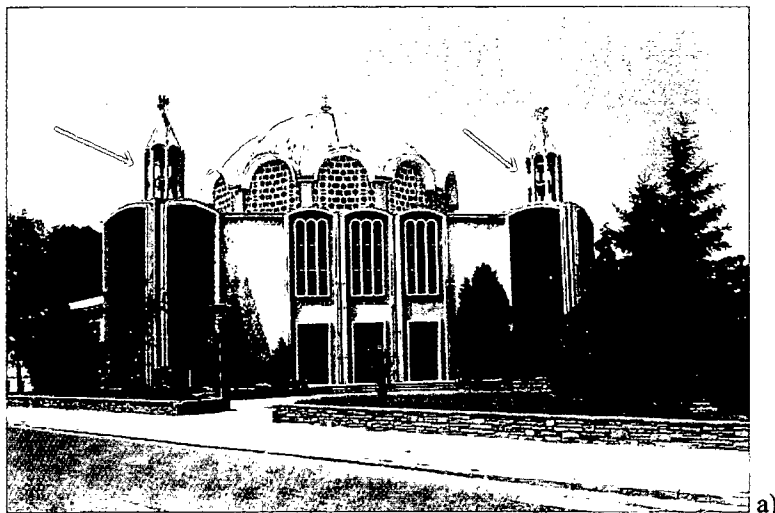


Abb. 95: Links die Abbildung eines akustisch äußerst ungünstigen Glockenträgers (a), bei dem die Glocken praktisch im Freien und zudem auch relativ tief hängen und der Zuhörer daher stärkstem Direktschall ausgesetzt ist. Rechts ein Glockenträger, der auf Indirektschall ausgelegt ist und akustisch besonders günstig wirkt (b); die Schallöffnung stellt der „obere Rand“ des Baukörpers dar, während die Glocken tief unten im „Bauch“ des Turmes aufgehängt sind.

Die etwa gleich großen Glocken beider Objekte sind in derselben Rippe gegossen („Pfundner-Rippe“) und akustisch in jeder Hinsicht gleichwertig (helle Tongebung, sehr gute Klangqualität).

Auch die Armaturen sind bei beiden Geläuten gleich (Stahlglockenstuhl und gerade bis leicht gekröpfte Stahljoche + gleicher Läutewinkel). Zudem weisen beide Baukörper in etwa dieselbe Höhe und auch das gleiche Baumaterial (Stahlbeton) auf, sodaß klangliche Unterschiede hier im wesentlichen auf die Folgen von Direkt- und Indirektschall zurückzuführen sind. Es ist deutlich zu sehen, daß das Geläute im linken Turm (a) besonders obertönig ist und hohe Tonspannen aufweist; infolge des Direktschalls klingen die Glocken hier ziemlich scharf, grell und stechend und sind in unmittelbarer Nähe auch äußerst laut. Dagegen zeigt das Geläute im rechten Turm (b) viel geringere Tonspannen und ist auch wesentlich grundtöniger; infolge des Indirektschalls, erklingen hier die Glocken weich und sehr sonor, dazu kommt noch der für Stahlbeton typische „Hall“, der einen Eindruck erzeugt, als ob sich die Glocken in einer großen Halle befänden. Der Unterschied der beiden Objekte hinsichtlich der Turmakustik ist wie der von Tag und Nacht.

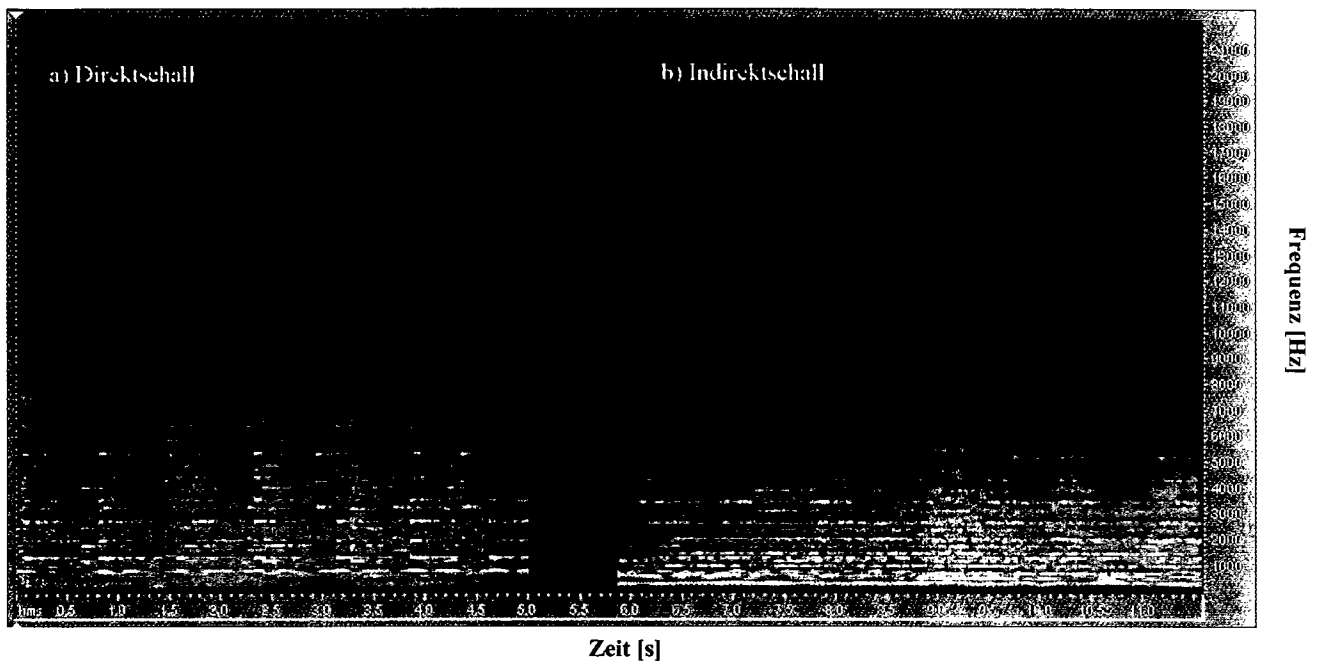


Abb. 96: Sonagramm der Glocken der Glockenträger in Abb. 95, links Turm (a) und rechts Turm (b). Die Aufnahme erfolgte jeweils direkt vor den Türmen.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Zuge der Untersuchungen des Teiltonaufbaus von Glocken konnten einige Gesetzmäßigkeiten entdeckt werden, die eine Einteilung der Teiltöne nicht nur anhand ihrer Schwingungsformen, sondern auch nach ihrer Intensität, der Abklingdauer, ihrer Wirkung im Glockenklang („Nachhall“ – Schlagton) und ihrer Abhängigkeit von der Glockenform ermöglichte. Es stellte sich dabei heraus, daß die in der Glockenkunde übliche Einteilung der Teiltöne in den Prinzipal- und Mixturbereich, die offensichtlich aus dem Orgelbau stammt, äußerst ungenügend ist, weil sie auf die Eigenschaften der Teiltöne keinerlei Rücksicht nimmt. Desweiteren konnten neue Gesetzmäßigkeiten bezüglich der Schlagtonbildung gefunden werden: So konnte u.a. festgestellt werden, daß die für alle Glockengrößen angewandte Regel von Rayleigh (Tonlage des Schlagtons = halbe Frequenz der Oberoktave) nur für Glocken in mittleren Tonlagen, nicht aber für sehr tontiefe Glocken bzw. besonders kleine Glocken gültig ist. Nebenschlagöne fanden in der Arbeit ebenfalls Berücksichtigung; neben dem bekannten Quart-Nebenschlagton und Sekundnebschlagton konnte ein weiterer Nebenschlagton, der sog. „Terzschlagton“ erstmals präzisiert werden. Einen Schwerpunkt bildete die Tongebung (Klangfarbe) der Glocke und deren Messung mittels Methoden der EDV. Dabei hat sich die Aufgliederung der Tongebung in 5 „Klangkomponenten“ (Tonfülle, „Tönigkeit“, „Tonspanne“, „Geräuschanteil“, „Anschlag“), die einzeln mittels Klanganalyse am Computer meßbar sind, als ein sehr nützliches Konzept erwiesen. Die Tonfülle, ein sehr wichtiger Aspekt des Glockenklanges, läßt sich hierbei am sinnvollsten mittels des in dieser Arbeit entwickelten „Klangvermögens“ KV quantitativ beurteilen, denn es hat sich herausgestellt, daß die in der Glockenkunde übliche Beurteilung der Tonfülle anhand der Nachhallzeiten teilweise völlig ungeeignet ist. Da die Angabe von Klangdaten, so wie sie derzeit gehandhabt wird, nur wenig auf das jeweilige Klangverhalten schließen läßt, wird hier eine neue Darstellungsart vorgeschlagen, die auf den in dieser Arbeit entwickelten Konzepten beruht und den Glockenklang weitaus anschaulicher wiedergibt.

Die Glockenform (Glockenrippe) hat einen entscheidenden Einfluß auf das Klangverhalten, denn sie bestimmt nicht nur den Teiltonaufbau, sondern auch noch mit Nachhall die Tongebung. Der Zusammenhang von Teiltonaufbau und Glockenform wurde bis jetzt nur exemplarisch für einzelne Glocken mittels FEM berechnet, in dieser Arbeit werden hingegen, wenn auch nur in qualitativer Hinsicht, Gesetzmäßigkeiten zwischen Form und Teiltonaufbau formuliert. Hauptsächlich anhand empirischer Beobachtungen konnten ferner Zusammenhänge zwischen der Glockenrippe und den einzelnen Klangkomponenten gefunden werden. Untersuchungen wurden aber auch an den Glockenrippen selbst vorgenommen, insbesondere wurden deren konstruktiven Eigenschaften behandelt. Um diese zu beurteilen, sind teilweise neue Konzepte erarbeitet worden, die es erlauben, diese numerisch wiederzugeben, womit ein Vergleich von verschiedenen Glockenformen erleichtert bzw. überhaupt erst ermöglicht wird. Dazu gehören die „Relativmaße“, die „Dimensionierung“, die Rippenschwere und insbesondere die Rippenstärke, die hier mit dem Konzept der „RS-Werte“ errechnet und beurteilt wird. Auch hier hat sich herausgestellt, daß die in der Glockenkunde gängigen Methoden, insbesondere die zur Bestimmung der Rippenstärke, teilweise große Fehler verursachen und daher im Grunde sich als ebenfalls ungeeignet herausstellen. Ferner werden 2 neu entwickelte Methoden vorgestellt, mit denen man das Gewicht von Glocken mit einer Genauigkeit bis zu 5% und darunter ermitteln kann.

Insbesondere der RS-Wert bietet große Möglichkeiten in der Erforschung der Arbeitsweisen früherer Gießer bzw. in der Entwicklung der Glockenformen. Letztere wurde systematisch von der Romanik bis zur Gegenwart untersucht, im Zuge dessen das Konzept der „charakteristischen Glockenformen“ formuliert worden ist. Diesem liegt die Tatsache zugrunde, daß die verschiedenen Kunstepochen (Romanik, Gotik, Barock) gewisse Glockenrippen hervorbrachte, die sich durch

bestimmte, charakteristische Merkmale auszeichnen, anhand deren man die verschiedenen Glockenrippen konstruktiv beurteilen kann. Es handelt sich hierbei um die Bienenkorbform, die Zuckerhutform, die Übergangsformen, die gotische Rippe, die „sekundären Rippen“ mit ihren für jeden Kulturraum typischen Abwandlungen (z.B. die französische Rippe), die „Barockrippe“ und die „modernen Rippen“. Vor allem bezüglich der Glockenrippen der Barockzeit konnten geläufige Ansichten hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Entstehung als teilweise schwere Irrtümer aufgedeckt und widerlegt werden. Hinsichtlich der Arbeitsweisen früherer Gießer konnte festgestellt werden, daß diese ihre Glocken, im Gegensatz zu heutigen Gießern, fast nie in derselben Konstruktion formten (die sog. „fixen Rippen“), sondern diese jeweils mehr oder weniger abwandelten, eine Methode, die hier als „Rippentypus“ bezeichnet wurde. Um Glocken gezielt aufeinander abzustimmen (etwa in einem Geläute), bediente man sich seit jeher des „Proportionalitätsgesetzes“, mit dessen Hilfe man die Größe von Glocken, die auf bestimmte Intervalle abgestimmt sein sollen, ermitteln kann. Vor allem bei früheren Gießern weiß man aber meist nichts über deren genaue Arbeitsweise, insbesondere ob diese in der Lage waren, Glocken gezielt aufeinander abzustimmen. Mit Hilfe der hier erarbeiteten Methoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Glockenrippen konnte ein Verfahren entwickelt werden, mit dem man relativ leicht nachweisen kann, ob innerhalb eines historischen Geläutes die Anwendung des Proportionalitätsgesetzes zum Einsatz kam, d.h. Glocken gezielt aufeinander abgestimmt wurden.

Akustische Eigenschaften von Glockenmetallen (Materialdämpfung, „Innere Tonhöhe“) wurden bis jetzt vor allem bei Bronze und Stahl ausführlich untersucht, bei anderen, sogar geläufigen Glockenwerkstoffen wie Gußeisen fehlen sie teilweise aber gänzlich. Es wurde daher versucht, diese Lücken nicht nur zu schließen, sondern auch konkret die Auswirkungen von akustischen Eigenschaften auf die Tongebung zu formulieren. Aufgrund empirischer Beobachtungen konnten einige Zusammenhänge zwischen der Materialdämpfung und der „Inneren Tonhöhe“ eines Werkstoffes und den Klangkomponenten der Tongebung, zumindestens in qualitativer Hinsicht, umrissen werden. Ferner erfolgte eine Diskussion aller bis jetzt im Glockenguß verwendeten Werkstoffe, sowohl die akustischen als auch mechanischen Eigenschaften betreffend; vor allem bei den Werkstoffen sind erhebliche Vorurteile in der Glockenkunde geläufig, die teils auf Nichtwissen, teils auf ideologischen Gründen beruhen. Bronze zeichnet sich allgemein durch sehr günstige akustische Eigenschaften aus und ist der Glockenwerkstoff schlechthin, besitzt aber aufgrund ihrer hohen Sprödigkeit und der Anfälligkeit zu porösem Guß gewisse Nachteile. Sonderbronze ist in akustischer Hinsicht der üblichen Glockenbronze gleichwertig, mechanisch sogar noch um einiges besser, allerdings hängen die Klangergebnisse stark von den jeweiligen Gußbedingungen ab, weshalb sich hier starke Schwankungen bezüglich der Klangqualität (von sehr gut bis sehr schlecht) ergeben. Dasselbe gilt auch für die im Glockenguß verwendeten Sondermessinge. Stahl zeigt von allen Glockenwerkstoffen die günstigsten mechanischen Eigenschaften, was auch für die Materialdämpfung gilt. Allerdings hängt letztere vom Bearbeitungszustand ab; durch Bearbeiten der Oberfläche (z.B. Fräsen, Schleifen) steigt nämlich die Materialdämpfung stark an, was der Grund für die geringen Nachhallzeiten von Stahlglocken ist, was aber durch eine Wärmebehandlung rückgängig gemacht werden kann. Aufgrund der hohen „Inneren Tonhöhe“ werden Stahlglocken zwecks Vermeidung überdimensionaler Glockengrößen besonders dünnwandig gegossen, wodurch aber u.U. klangliche Nachteile begünstigt werden. Gußeisen (Hartguß) ist gegenüber Bronze, Sonderbronze (-messing) und Stahl benachteiligt, sowohl in mechanischer, aber auch in akustischer Hinsicht (höhere Dämpfung), dennoch sind auch mit Gußeisen gute Klangergebnisse erzielbar. Gußeisen hat wie Stahl eine große „Innere Tonhöhe“; aufgrund der Sprödigkeit des Materials ist aber kein dünnwandiger Guß möglich, weshalb Gußeisenglocken im Verhältnis zur Tonlage überdimensional groß sind. Zinklegierungen sind vor allem aufgrund ihrer schlechten mechanischen Eigenschaften, aber auch der nicht besonders herausragenden akustischen Eigenschaften für den Glockenguß ungeeignet.

Der Einfluß der Armaturen auf das Klangverhalten der Glocke ist komplex, da die verschiedenen Armaturteile (Joch, Klöppel) als auch der Lätewinkel sich gegenseitig beeinflussen und auf die jeweiligen Klangkomponenten der Tongebung bzw. die „Dynamik“ gleichzeitig wirken, wenn auch mit unterschiedlichem Anteil. Der Effekt der „Dynamik“, unregelmäßige Schwebungen, die nur dann entstehen, wenn die Glocke bewegt, d.h. geläutet wird, ist in der Glockenkunde zwar bekannt, besitzt aber keine eigene Bezeichnung; sie ist mittels Klanganalyse am Computer nachweisbar. Von den verschiedenen Armaturteilen übt der Klöppel einen nachhaltigen Einfluß auf die Tongebung aus, welche vor allem vom Klöppelgewicht eine Abhängigkeit zeigt, während der Werkstoff (Elastizitätsmodul) bzw. die Klöppelform einen viel geringeren Effekt erzeugen. Die Härte des Klöppelwerkstoffes wirkt sich hingegen nur auf den Verschleiß der Glocke aus. Das Joch bestimmt wie der Lätewinkel in erster Linie die Dynamik der läutenden Glocke; auf die Tongebung der Glocke selbst wirkt das Joch nur indirekt über den Klöppel, da dieser sowohl auf die Jochkonstruktion, aber auch auf den Lätewinkel abgestimmt sein muß. Es konnte gezeigt werden, daß die Abstimmung von Klöppel, Joch und Lätewinkel, die durch die sog. „Anschlagsbedingung“ miteinander verknüpft sind, nachhaltig das Klangverhalten von Glocken prägt. Es ist alleinig die Konstruktion des Joches (gerade, leicht bzw. stark gekröpft), welches den Glockenklang beeinflusst, nicht aber das Material, aus dem es hergestellt ist. Die in der Glockenkunde aufgestellte Behauptung, daß Glocken an Stahljochen schlechter klingen als solche auf Holzjochen, trifft nicht zu (vorausgesetzt gleiche bzw. gleichwertige Jochkonstruktionen!), wie durchgeführte Messungen bestätigen, und ist daher als Vorurteil zu werten.

Bei der Diskussion der Turmakustik wurden die Auswirkungen diverser Größen wie Baumaterial, Anlage der Glockenstube und Schallfenster, der Glockenstuhl etc. auf das Klangverhalten von Glocken behandelt; insbesondere ist hier das Prinzip von Direktschall – Indirektschall beleuchtet worden. Die Auswirkungen der jeweiligen Turmakustik sind mittels Klanganalyse am Computer nachweisbar und wurden am Beispiel Direktschall – Indirektschall durchgeführt.

Literaturverzeichnis

- 1) Weißenbäck A., Pfundner J.: Tönendes Erz. Die Abendländische Glocke als Toninstrument und die historischen Glocken in Österreich. Böhlau Verlag, Graz-Köln 1961
- 2) Wagner Gerhard: Die Glocke als Musikinstrument; Glocken in Geschichte und Gegenwart: Beiträge zur Glockenkunde (2). Badenia Verlag, Karlsruhe 1997
- 3) Schaeben Jakob: Einführung in die Technik der Glockenprüfung; Glocken in Geschichte und Gegenwart: Beiträge zur Glockenkunde (1). Badenia Verlag, Karlsruhe 1986
- 4) Foersch H., Wagner G.: Systematik der Geläuteprüfung; Glocken in Geschichte und Gegenwart: Beiträge zur Glockenkunde (1). Badenia Verlag, Karlsruhe 1986
- 5) Schad Carl-Rainer: Wörterbuch der Glockenkunde. Hallwag Verlag, Bern 1996
- 6) Schad C.-R., Frik G.: Klangfiguren einer Glocke. *Acustica* **78** [1993] 46-54
- 7) Fricke J. P.: Schwingungsformen der Glocke; Glocken in Geschichte und Gegenwart: Beiträge zur Glockenkunde (2). Badenia Verlag, Karlsruhe 1997
- 8) Kramer K., Menschick W., Wagner G.: Zur Benennung der Glockentöne; Glocken in Geschichte und Gegenwart: Beiträge zur Glockenkunde (2). Badenia Verlag, Karlsruhe 1997
- 9) Grützmacher M. et al: Akustische Untersuchungen an Kirchenglocken. *Acustica* **16** [1965/66] 34-45
- 10) Schad Carl-Rainer: Werkstoffeinflüsse auf die klanglichen Eigenschaften von Glockenbronzen, Dissertation Universität Stuttgart, Stuttgart 1969
- 11) Wernisch J.: Akustische Eigenschaften von Kohlenstoffstählen und deren Auswirkungen auf das klangliche Verhalten von Kirchenglocken. Diplomarbeit TU Wien, Wien 2002
- 12) Schad Carl-Rainer: Form-Klang-Rechnungen an Glocken. *Acustica* **64** [1987] 272-285
- 13) Schlick Johannes: Die gehörmäßige Beurteilung des Glockenklanges; Glocken in Geschichte und Gegenwart: Beiträge zur Glockenkunde (1). Badenia Verlag, Karlsruhe 1986
- 14) Schaeben Jakob: Glocken, Geläute, Türme im Landkreis Euskirchen. Rheinland Verlag, Köln 1977
- 15) Fehn Theo: Der Glockenexperte 3 – Bochumer Gußstahlglocken. Badenia Verlag, Karlsruhe 1997
- 16) Limburger Richtlinien & Erläuterungen zu den Limburger Richtlinien: Glocken in Geschichte und Gegenwart: Beiträge zur Glockenkunde (1). Badenia Verlag, Karlsruhe 1986

- 17) Glocken- und Glockenguß im 11. und 12. Jh.; Ausstellungskatalog „Das Reich der Salier 1024-1125“, Speyer 1992
- 18) Peter Claus: Die musikalischen und gußtechnischen Entwicklungsstufen der Glocke; Glocken in Geschichte und Gegenwart - Beiträge zur Glockenkunde (2). Badenia Verlag, Karlsruhe 1997
- 19) Peter Claus: Westfalen. Die deutschen Glockenlandschaften, herausgegeben von Kurt Kramer. Deutscher Kunstverlag, München 1989
- 20) Bund Konrad: Die Entwicklung der mittelalterlichen Glocke vom Signalgeber zum Musikinstrument; Glocken in Geschichte und Gegenwart - Beiträge zur Glockenkunde (2). Badenia Verlag, Karlsruhe 1997
- 21) Kramer Kurt: Die Glocke und ihr Geläute. Geschichte, Technologie und Klangbild vom Mittelalter bis zur Gegenwart. Deutscher Kunstverlag, München 1990
- 22) Kramer Kurt: Baden-Hohenzollern. Die deutschen Glockenlandschaften, herausgegeben von Kurt Kramer. Deutscher Kunstverlag, München 1990
- 23) Bund Konrad: Frankfurter Glockenbuch. Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt/Main 1986
- 24) Cremer L., Heckl M.: Körperschall – Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen, 2. Auflage. Springer Verlag, Berlin 1995
- 25) Förster F., Köster W.: Elastizitätsmodul und Dämpfung in Abhängigkeit vom Werkstoffzustand; Zeitschrift f. Metallkunde 29 [1937] 116-123
- 26) Schad Carl-Rainer: Werkstoffeinflüsse auf die Klangeigenschaft von Glocken; Glocken in Geschichte und Gegenwart: Beiträge zur Glockenkunde (1). Badenia Verlag, Karlsruhe 1986
- 27) Bargel H. J., Schulze G.: Werkstoffkunde, 7. Auflage. Springer Verlag, Berlin 2000
- 28) Pfundner Josef: Nachtrag zum Bestand der historischen Glocken Österreichs; Österr. Zeitschrift f. Kunst- und Denkmalpflege 1968, Heft 1
- 29) Schuhmann H.: Metallographie, 13. Auflage. Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie, Stuttgart 1991
- 30) Best G., Halekotte T.: Die ehemalige Glockengießerei Albert Junker – vormals Heinrich Humpert – in Brilon / Westfalen 1918-1957; Jahrbuch f. Glockenkunde 3-4 [1991/1992], 31-71
- 31) Vaders E.: Herstellung und Eigenschaften von Kirchenglocken, Glocken aus Zinnbronze und aus zinnfreien Legierungen, Euphon-Bronze. Metall 7 [1953] 110-114
- 32) Ellerhorst - Klaus: Handbuch der Glockenkunde. Martinus Buchhandlung, Weingarten 1957
- 33) Walzl Artur: Die Braunauer Glockengießerei; Oberösterr. Heimatblätter, Jg. 6, Heft 2, 1952
- 34) Jaxtheimer B. W.: Knaurs Stilkunde Gotik – Die Baukunst; Droemer Knauer, München-Zürich 1982

- 35) Bund K., Peter C.: Die Glockengüsse des Meisters Gherardus de Wou zu Erfurt im Jahre 1497; Jahrbuch f. Glockenkunde **1-2** [1989/90] 37-65
- 36) Lehr Andre: Eine einfach auszuführende Untersuchung an einer nicht gut läutenden Glocke; Jahrbuch f. Glockenkunde **9-10** [1997/1999] 211-215
- 37) Steiner Josef: Das Zusammenspiel von Glocke, Joch und Klöppel; Glocken in Geschichte und Gegenwart - Beiträge zur Glockenkunde (2). Badenia Verlag, Karlsruhe 1997
- 38) Müller Volker: Wider das gekröpfte Joch; Jahrbuch f. Glockenkunde **11-12** [1999/2000] 337-345
- 39) Veltmann W.: Über die Bewegung einer Glocke. Dinglers Polytechnisches Journal Bd **220** Heft 6 [1876] 481-495
- 40) Westphal W. W.: Physik. Springer Verlag, Berlin 1963
- 41) Schneebeli H.: Über den Stoß elastischer Körper und eine numerische Bestimmung der Stoßzeit; Ann. d. Phys. **141** [1871] 239-250
- 42) Schneebeli H.: Stoßversuche mit Kugeln aus verschiedenem Metall; Ann. d. Phys. **145** [1872] 328-331
- 43) Pöschl Th.: Der Stoß. Handbuch d. Physik Bd VI, herausgegeben von Geiger & Scheel. Springer Verlag Berlin 1928
- 44) Fehn T., Müller V.: Die Bedeutung von Klöppel und Intonation für die Klangwirkung der Glocke; Glocken in Geschichte und Gegenwart: Beiträge zur Glockenkunde (1). Badenia Verlag, Karlsruhe 1986
- 45) Heckl M., Müller H. A.: Taschenbuch der technischen Akustik. Springer Verlag, Berlin 1975
- 46) Heindl W., Sigmund A., E. Tschegg: Grundzüge der Bauphysik; Springer Verlag 1984
- 47) Kramer Kurt: Grundbegriffe der Turmstubenakustik und Schallabstrahlung; Glocken in Geschichte und Gegenwart: Beiträge zur Glockenkunde (1). Badenia Verlag, Karlsruhe 1986

Abbildungsnachweis

- 1) Lit. 1: Diagramm 1, Abb. 43
- 2) Lit. 6: Abb. 4
- 3) Lit. 10: Abb. 59, 60, 61
- 4) Lit. 15: Abb. 77a & b
- 5) Lit. 23: Abb. 52
- 6) Lit. 27: Abb. 64a & b
- 7) Lit. 32: Abb. 42, 74, 78
- 8) Lit. 33: Abb. 65, 69
- 9) Sammlung Pfundner: Abb. 35, 36, 40, 44, 48a-c, 54, 55, 66, 67, 68
- 10) Rama Jean-Pierre: Cloches de France. LTA, Paris 1993 : Abb. 81
- 11) Schilling, Margarethe: Glocken – Gestalt, Klang und Zier. VEB, Dresden 1988: Abb. 38, 50
- 12) Seidler, Martin: Die Kölner Domglocken. Verlag Kölner Dom, Köln 1992: Abb. 41
- 13) Weber, Gottfried: Die Romanik in Oberbayern. Gondrom Verlag, Bindlach 1990: Abb. 37
- 14) Ein Spaziergang durch Gent. Verlag THILL S.A, Brüssel 1988: Abb. 46
- 15) Glocken in Geschichte und Gegenwart: Beiträge zur Glockenkunde (2). Badenia Verlag, Karlsruhe 1997: Abb. 47
- 16) Homepage der Cathedral of Exeter: Abb. 45

Alle übrigen Abbildungen stammen vom Verfasser

Lebenslauf

Jörg Wernisch

Geboren am 11. September 1972 in Wien als Sohn von Johann Wernisch, Physiker, und seiner Ehefrau Christa Wernisch, geb. Jeske.

- 1979 – 1983: Besuch der Volksschule Leopoldgasse, Wien 2
- 1983 – 1991: Besuch des Bundesgymnasiums Zirkusgasse, Wien 2; realistischer Zweig ab der Oberstufe (5. Klasse). Matura im Mai 1991 (mündlich gewählte Fächer: Latein, Darstellende Geometrie, Chemie)
- September 1991: Feriarbeit bei Zivilingenieur Univ. Prof Wruß, Wien 13 (Umweltanalytik)
- 1991 – 2003: Studium der Technischen Chemie auf der TU-Wien.
1. Diplomprüfung Juni 1999.
Im 2. Studienabschnitt Wahl des Studienzweiges Anorganische Technologien, mit Schwerpunkt Werkstoffkunde, Pulvermetallurgie und Korrosion. Diplomarbeit verfaßt über das Thema: „Akustische Eigenschaften von Kohlenstoffstählen“.
2. Diplomprüfung Jänner 2003, damit Erlangung des akademischen Grades „Diplom-Ingenieur“.
- ab 1999: Studium der Kunstgeschichte an der Universität Wien.
- ab 1995: Private Forschung im Bereich der Campanologie („Glockenkunde“) mit Schwerpunkten Klanganalyse & Klanglehre, Glockenkonstruktionen, Stahlglocken und historische Glocken.
-