Akustik der Evangelischen Filialkirche in Guarda-Giarsun: mehr als bloss Zufall?

Autor(en): **Heutschi, Kurt**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **118 (2000)**

Heft 41

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-79991

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Kurt Heutschi, Dübendorf

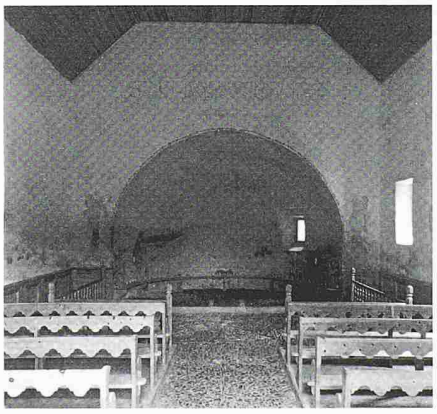
Akustik der Evangelischen Filialkirche in Guarda-Giarsun

Mehr als bloss Zufall?

Die Evangelische Filialkirche in Guarda-Giarsun weist eine eindrückliche akustische Besonderheit auf. Für eine bestimmte Sprecherposition erzeugt die kugelförmige Apsis eine bedeutende schallverstärkende Wirkung von 10 bis 15 dB. Da keine Quellen zur Baugeschichte überliefert sind, lässt sich die Frage, ob dieser besondere akustische Effekt gezielt gesucht wurde, nicht beantworten. Allerdings lassen sich einige Argumente anführen, die eine solche These stützen.



1
Blick in die Apsis der Filialkirche von Guarda-Giarsun



2
Blick von der Apsis in den Kirchenraum mit der Pflästerung im Mittelgang

Die vermutlich ins 13. Jahrhundert zu datierende spätromanische Filialkirche (Tochterkirche ohne eigenen Pfarrer) in Guarda-Giarsun setzt sich im Grundriss aus einem 9 m langen und 7,5 m breiten rechteckförmigen Hauptraum und einer anschliessenden halbrunden Apsis zusammen (Bild 1). Die Apsis, räumlich betrachtet eine nahezu perfekte Viertelskugel, ruht auf einem 1,40 m hohen Sockel. Der Kirchenboden besteht aus einer Bollensteinpflästerung. Im Bereich des Mittelgangs sind die Steine zu einem sternförmigen Muster ausgelegt, wodurch sich vier ausgezeichnete Punkte ergeben (Bild 2). Im 17. Jahrhundert wurde das Dach erhöht und das Glockenjoch aufgebaut. Die letzte Renovation geht auf das Jahr 1922 zurück [1], [2]. Die dabei vorgenommene Anhebung des Apsisbodens um etwa 10 cm kann aus heutiger Sicht als akustisch relevanter Eingriff bezeichnet werden.

Akustik

Die Kirche weist eine bemerkenswerte akustische Eigenheit auf. Für eine bestimmte, eng lokalisierte Sprecherposition erzeugt die kugelförmige Apsis eine schallverstärkende Wirkung von 10 bis 15 dB praktisch im ganzen Publikumsbereich. Dies entspricht mehr als einer Verzehnfachung der Schallintensität. Schallkonzentrationen sind immer bei konkav gekrümmten Flächen zu erwarten. Üblicherweise gelten solche Flächen als akustische Gefahrenherde und werden heute im raumakustischen Entwurf möglichst vermieden. Es sind jedoch viele historische Bauten bekannt, die schallverstärkende Effekte aufweisen. Es herrscht aus heutiger Sicht Unklarheit darüber, ob solche Effekte gezielt gesucht wurden, oder nur Produkte des Zufalls sind wie W. C. Sabine [3], einer der ersten wissenschaftlichen Raumakustiker, vermutete:

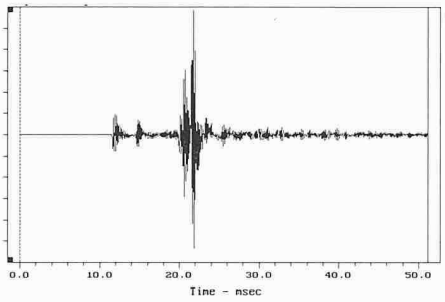
«It is probable that all existing whispering galleries [Raumformen mit schallverstärkender Wirkung], it is certain that the six more famous ones, are accidents,...»

Raumakustische Messungen

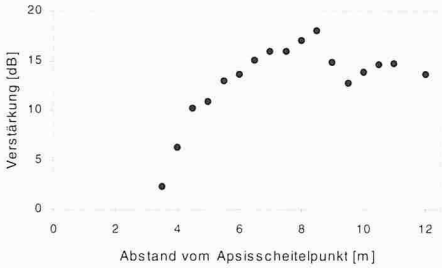
Die schallverstärkende Wirkung der Apsis wurde durch Messungen mit Lautsprecher und Mikrophon quantitativ erfasst. Die Verstärkung ergibt sich in voller Ausprägung für einen bestimmten Quellenpunkt (Fokuspunkt). Zur Bestimmung dieses Fokuspunktes wurde das Reziprozitätsprinzip ausgenützt. Das Reziprozitätsprinzip beruht darauf, dass Quelle und Empfänger vertauscht werden können, d.h. der Effekt umkehrbar ist. Für einen feststehenden Sprecher im Publikumsbereich konnte durch Hören der Punkt in der Apsis mit maximaler Lautstärke ermittelt werden.

Der so ermittelte Fokuspunkt lag in einem Abstand von 1,43 m von der Apsisrückwand. Im Fokuspunkt wurde der Lautsprecher auf einer Höhe von 1,60 m über Boden installiert. Das Mikrophon wurde auf der Mittelachse des Kirchenraumes in 0,5 m Schritten verschoben. Zusätzlich wurden wenige Messungen mit aus der Achse versetzten Mikrophonpositionen durchgeführt.

Die Messungen wurden in Form von sogenannten Impulsantworten aufgezeichnet. Die Impulsantwort entspricht dem Mikrophonsignal, wenn am Sen-



3
Beispiel einer gemessenen Impulsantwort. Die Abszisse ist eine Zeitachse in Millisekunden, die Ordinate zeigt den Schalldruck. Nach gut 10 ms ist das Eintreffen des Direktschalls zu erkennen. Kurz danach folgt die Bodenreflexion und dann bei etwa 20 ms trifft die alles überragende Reflexion aus der Apsis ein



4
Verstärkung durch die Reflexion an der Apsis im Frequenzband von 350–3000 Hz in Funktion der Empfangsposition im Mittelgang für eine Quelle im Fokuspunkt

delautsprecher ein kurzer Impuls abgestrahlt wird. Dabei werden die verschiedenen Ausbreitungspfade auf Grund der unterschiedlichen Schalllaufzeiten sichtbar (Bild 3).

Die Reflexion bzw. die Fokussierung des Schalls an der Apsis erzeugt eine Verstärkung gegenüber dem Direktschall, d.h. gegenüber freier Schallausbreitung. Für kleine Abstände ist die Verstärkung gering, da der Direktschall auf Grund der Geometrie dominiert. Für zunehmende Distanzen steigt die Verstärkung aber stark an und erreicht einen Wert von etwa 15 dB (Bild 4).

Strahlenakustik im Kreis

Im Sinne einer Approximation für hohe Frequenzen kann die Schallausbreitung mit der Vorstellung von geradlinig verlaufender Strahlen modelliert werden. Beim Auftreffen auf ein hartes Hindernis erfolgt eine Reflexion gemäss dem Spiegelgesetz Einfallswinkel = Ausfallswinkel. Die räumliche Dichte der Strahlen bei einem Empfänger ist ein Mass für die Schallintensität. Hier wird diese Betrachtungsweise der Strahlenakustik auf das Problem der Reflexion im Kreis angewendet.

Strahlenbilder

Die Strahlenbilder (Bild 5) zeigen, dass für einen Quellenpunkt im halben Kreisradius ein nahezu parallel verlaufendes reflektiertes Strahlenbündel entsteht. Dies entspricht einer konstanten Schallintensität, die sich mit dem Abstand kaum verändert. Da für den Direktschall die Strahlen divergieren, entspricht dieser Umstand einer Verstärkung durch die Reflexion, die mit zunehmendem Abstand zunimmt. Zylinder- bzw. Kugelflächen können also für einen geeigneten Quellenpunkt als verstärkende Reflektoren eingesetzt werden, wobei sich die verstärkende Wirkung nicht nur in einem bestimmten Empfangspunkt sondern in einem ganzen Bereich manifestiert. Für einen Quellenpunkt im halben Radius stellt der Kreis eine Approximation an die Parabel mit ihrem Brennpunkt dar.

Es ist bemerkenswert, dass den Griechen bereits im 2. Jahrhundert v. Chr. bekannt war, dass ein Paraboloid parallel einfallendes Sonnenlicht auf einen einzigen Punkt (Brennpunkt) konzentriert. Über den Umweg einer arabischen Abschrift ist ein Dokument von Diocles erhalten, das unter anderem diese Eigenschaft der Parabel beweist [4].

Besonders interessant ist der Umstand, dass Diocles darüber hinaus auch die zwar nicht perfekte aber doch beträchtliche Fokussierung von Kugelschalen diskutiert. Diocles weist darauf hin, dass es genügt, den Kugelreflektor so gross zu machen, dass der Öffnungswinkel vom Kugelzentrum aus gesehen 60° beträgt, bzw. dass eine weitere Vergrösserung keinen zusätzlichen Gewinn ergibt. Es ist anzunehmen, dass den Gelehrten auch die Umkehrung der oben diskutierten Eigenschaft bewusst war, d.h. dass die Abstrahlung einer sich im Brennpunkt befindlichen Quelle auf einen engen Bereich konzentriert wird.

Die Vorstellung der Schallausbreitung entlang gerader Linien ist in Analogie zu Lichtstrahlen naheliegend und bereits seit langem bekannt. Ein Zeugnis ist in der Phonurgia von Athanasius Kircher [5] zu finden. Er demonstriert dort beispielsweise die fokussierende Schallausbreitung in einer Ellipse von einem Brennpunkt zum anderen (Bild 6).

Anwendung der Strahlenakustik im Kreis auf die Kirche in Giarsun

Die Apsis der Kirche in Giarsun ist im Grundriss gesehen ein nahezu perfekter Halbkreis mit einem Radius von rund 2,95 m (Bild 7). Im Längsschnitt präsentiert sich die Apsis als Viertelskreis mit einem Radius von 3 m der auf einem 1,40 m (ab heutigem Apsisboden) hohen Sockel ruht (Bild 8). Die obigen Überlegungen der Strahlenakustik im Kreis können hier sowohl im Grundriss als auch im Schnitt angewendet werden. Im Grundriss ergibt sich dabei eine optimale Sprecherposition im Abstand von etwa 1,50 m vom Kreismittelpunkt, entsprechend einem Wandabstand im Scheitelpunkt von 1,45 m.

Anlässlich der Messungen wurde der optimale Sprecherpunkt durch Probieren in einem Wandabstand von 1,43 m gefunden. Unter Berücksichtigung der Messtoleranzen ist damit eine sehr gute Übereinstimmung mit dem theoretisch erwarteten Optimum gegeben.

Interessanter als im Grundriss ist die Diskussion im Schnitt, da die Quellenhöhe durch die Grösse des Sprechenden fest vorgegeben ist und nicht mehr variiert werden kann. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Ohrhöhe der Zuhörer im Sitzen etwas geringer als die Sprecherhöhe ist.

Bei einer optimalen Peilung in die Mitte des Publikumsbereichs ergibt sich in der gegebenen Geometrie eine optimale Sprecherhöhe zwischen 1,40 m und 1,50 m bzgl. des heutigen Apsisniveaus. Eine durchschnittliche Körpergrösse von etwa 1,70 m lässt auf eine Sprechhöhe von rund

1,50 m schliessen. Diese Höhe vergleicht sich erstaunlich gut mit der auf Grund der gegebenen Geometrie optimalen Quellenhöhe, insbesondere wenn berücksichtigt wird, dass ursprünglich der Apsisboden etwa 10 cm tiefer lag als heute.

Bodenmakierung

Die Pflästerung im Mittelgang der Kirche markiert vier ausgezeichnete Punkte (Bild 7). Anlässlich der raumakustischen Messungen wurden diese Punkte untersucht, wobei keine besonderen akustischen Effekte festzustellen waren. Es ist jedoch denkbar, dass die Markierungen gleichwohl akustisch inspiriert sind. Mit dem oben erwähnten Konzept der Schallstrahlen lässt sich für zwei der vier Punkte eine geometrische Interpretation vermuten (Bild 9). Dazu wird die Kugelform der Apsis im Schnitt betrachtet.

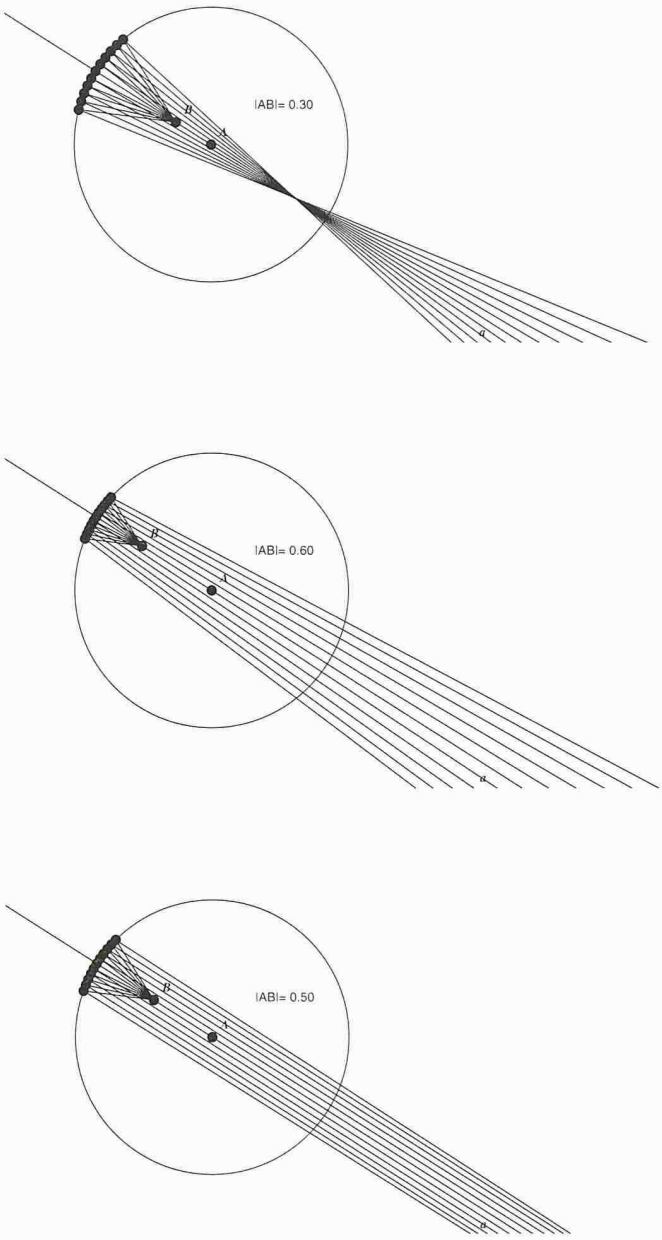
Vom optimalen Quellenpunkt aus werden jene zwei ausgezeichneten Strahlen konstruiert, die vor der Reflexion bzw. nach der Reflexion am Apsiskreis senkrecht verlaufen. Diese beiden Strahlen schneiden die Verbindungslinie «Optimaler Quellenpunkt zu Apsiskugelzentrum» genau in den Abständen der beiden ersten Bodenmarkierungen.

Schlussfolgerung

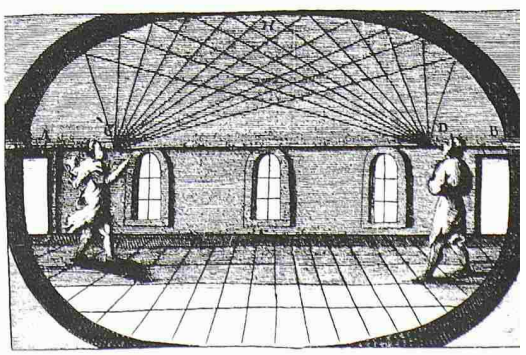
Die Geometrie der Apsis der Kirche in Guarda-Giarsun führt für eine geeignete Sprecherposition zu einer bedeutenden akustischen Verstärkung in der Grössenordnung von 10 bis 15 dB. Durch geringe Verschiebung des Sprechers kann das Verhältnis von Direktschall (inklusive erster Reflexion) zu Nachhall und damit die Stimmqualität in grossem Mass beeinflusst werden. So tönt im einen Fall die Stimme sehr präsent und nah während dem sie im anderen Fall diffus wirkt und aus grosser Entfernung zu kommen scheint.

Leider sind keine Quellen bekannt, die über die Motivation der Apsisgestaltung beim Bau Auskunft geben. Es lassen sich aber einige Anhaltspunkte finden, die die These stützen, dass der akustische Effekt möglicherweise gezielt gesucht wurde:

- Der Verstärkungseffekt wirkt nahezu im ganzen Publikumsbereich und ist somit durchaus nützlich, um den Pegel des Sprechers oder der Sprecherin gegenüber dem Nachhall zu erhöhen.
- Die Höhe des Sockels, auf dem die kugelförmige Apsis ruht, stimmt für eine ange-



5
Strahlenbild im Einheitskreis für einen Quellenpunkt B im Abstand 0,3, 0,6 bzw. 0,5 vom Kreismittelpunkt A. Die reflektierten Strahlen konvergieren, divergieren bzw. verlaufen annähernd parallel



6
Studium der Fokussierungserscheinungen in Ellipsen durch Konstruktion von Schallstrahlen von Athanasius Kircher

nommene Körpergrösse von 1,70 m auf wenige Zentimeter genau mit dem optimalen Wert überein.

▪

Die beiden apsisnahen Bodenpunkte im Mittelgang lassen sich durch zwei vom optimalen Quellenpunkt ausgehende, ausgezeichnete Schallstrahlen konstruieren und könnten damit andeuten, dass den Erbauern das Strahlenkonzept bekannt war.

▪

Die Wissenschaft kennt seit Diokles (2. Jahrhundert vor Christus) die fokussierende Wirkung von Kugelflächen als Approximation an Parabelflächen.

Adresse des Verfassers:
Kurt Heutschi, dipl. El.-Ing. ETH, Dr. sc.techn., EMPA, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf

Literatur

[1]
Die Kunstdenkmäler der Schweiz, Kanton Graubünden. Bd.III, Birkhäuser, 1940.

[2]
Mengia Mathis: Jahresbericht Denkmalpflege Kt. Graubünden, 2000.

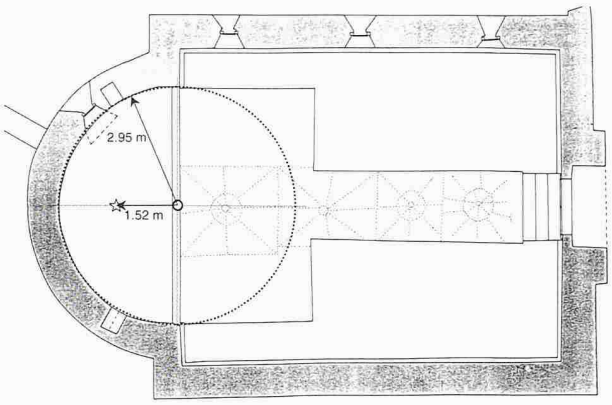
[3]
Wallace C. Sabine: Collected Papers on Acoustics. Harvard University Press, 1922.

[4]
G.J. Toomer: Diocles on Burning Mirrors. Springer, 1976.

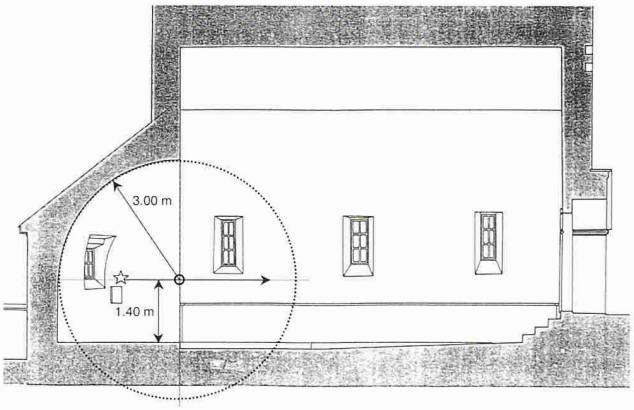
[5]
Athanasius Kircher: Phonurgia (Neue Hall- und Tonkunst). Nördlingen 1684.

Dank

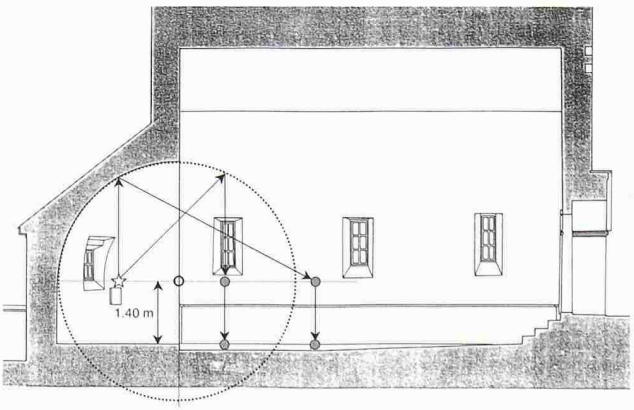
Informationen zur Baugeschichte sowie das Bild- und Planmaterial wurde freundlicherweise von Mengia Mathis von der Kantonalen Denkmalpflege in Chur zur Verfügung gestellt.



7
Grundriss der Kirche in Giarsun mit eingezeichnetem Kreis mit Radius 2,95 m und optimaler Sprecherposition (Stern)



8
Längsschnitt der Kirche in Giarsun mit eingezeichnetem Kreis mit Radius 3 m und optimaler Sprecherposition (Stern)



9
Die beiden apsisnächsten Bodenpunkte können durch zwei ausgezeichnete Schallstrahlen interpretiert werden