

# Raumform und Klangform

Hans-Peter Tennhardt

Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken (IEMB) e.V. an der TU Berlin, D-10587 Berlin, Germany, E-Mail: tennhardt@iemb.de

## Einleitung

Die vorliegenden Betrachtungen sollen einen Beitrag zur Korrespondenz zwischen der Raumform in der Primärstruktur bei Konzertsälen und der Klangform leisten. Unter Klangform soll man in erster Linie die Klangfärbung im Nachhall, unterteilt in den Anteil der tiefen (Klangwärme) und der hohen Frequenzen (Brillanz) verstehen.

Ein Anlass, sich mit dieser Thematik zu befassen, ist die sog. Berliner Konzertsallaandschaft mit der Berliner Philharmonie und dem Konzerthaus Schauspielhaus Berlin. Während der große Konzertsaal der Philharmonie eine prinzipiell helle Klangfärbung aufweist, ist der große Konzertsaal des Konzerthauses durch Klangwärme gekennzeichnet. Glücklicherweise stehen sich somit diese beiden Räume in der raumakustischen Qualität nicht als Konkurrenten, sondern als Ergänzung gegenüber. In gleicher Weise unterscheiden sich auch die Primärstrukturen dieser Säle. Während der Konzertsaal im Konzerthaus eine strenge Rechteckform des Klassizismus aufweist, ist der Saal in der Philharmonie von seinen polygonalen Formen geprägt.

Bei der Frage der Einschätzung der Qualität der Konzertsäle schlägt man zuerst das Buch von BERANEK (Concert and Opera Halls, 1]) von 1996 auf. Dort findet man eine Auflistung von 66 Konzertsälen, geordnet in 6 subjektive Kategorien ihrer akustischen Qualität. Zur Kategorie A+ der herausragenden („superior“) und A der vorzüglichen („excellent“) Konzertsäle zählen hiervon 3 bzw. 6. Hiervon besitzen 8 eine Schuhkartonform. Der große Konzertsaal des Konzerthauses Berlin wird von BERANEK hierbei unter diese Kategorie der 9 besten Säle eingestuft, die Konzertsäle der Berliner Philharmonie der unter der folgenden Kategorie B+ (gut bis vorzüglich). Damit schließt sich natürlich sofort die Frage an, ob eine sehr gute raumakustischen Qualität an die Form eines Rechteckraumes geknüpft ist. Das umfangreichen Datenmaterial von BERANEK liefert vielleicht hierzu einen ersten Anhaltspunkt.

Ein markanter subjektiver raumakustischer Unterschied zwischen den beiden Berliner Sälen ist einmal die Wärme und zum anderen die Helligkeit oder Brillanz des Klangbildes. Die „Wärme“ bezieht sich dabei vorwiegend auf den Einfluss der Schallenergiedichte im unteren, die Brillanz – oder auch der Glanz – auf den oberen Frequenzbereich. Zunächst sollen dabei die Fragen der Anfangsschallreflexionen außer Acht gelassen werden, es erfolgt nur eine Betrachtung auf die Klangfärbung im Abklingvorgang. Die diesbezüglich relevanten oktavbewerteten Nachhallzeitwerte sind im o.g. Buch von BERANEK vergleichbar für den besetzten Raumzustand zusammengestellt.

Das Kriterium „Bassverhältnis BR (BERANEK)“ liefert eine unstrittige Aussage zur Klangwärme:

$$BR = (T_{125\text{Hz}} + T_{250\text{Hz}}) / (T_{500\text{Hz}} + T_{1000\text{Hz}})$$

Der anzustrebende optimale Wertebereich für Musikdarbietung liegt zwischen 1,0 und 1,3. Für Räume mit einer Nachhallzeit unter 1,8 s kann nach BERANEK das Bassverhältnis Werte bis 1,45 annehmen.

Für die objektive Bewertung der Klangfärbung hat SCHMIDT das Klangfärbungsmaß definiert. Es basiert auf den Schallenergiekomponenten in Oktavbandbreite für tiefe Frequenzen  $K_T$  (Wärme) und hohe Frequenzen  $K_H$  (Brillanz):

$$K_T = 10 \lg (E_{100\text{Hz}} / E_{500\text{Hz}}) \text{ dB}$$

$$K_H = 10 \lg (E_{3150\text{Hz}} / E_{500\text{Hz}}) \text{ dB}$$

Optimale Werte werden von SCHMIDT mit  $K_T, K_H = (-3..+3) \text{ dB}$  angegeben, 2.

Da die relevanten Energiekomponenten E für die Konzertsäle in der o.g. Literatur nicht vorliegen, würde in Anlehnung an das BR und die Klangfärbungsmaße ein äquivalentes Maß abgeleitet und als Brillanzverhältnis TR1 (Timbre Ratio) bezeichnet. Es stellt kein neues raumakustisches Kriterium dar, sondern soll nur zur Auswertung der vergleichenden Fragestellung bezüglich der Brillanz dienen:

$$TR1 = (T_{2000\text{Hz}} + T_{4000\text{Hz}}) / (T_{125\text{Hz}} + T_{250\text{Hz}})$$

Dieses Zahlenverhältnis soll den Anteil der Nachhallzeit bei hohen gegenüber den tiefen Frequenzen in bezug auf die Klangfärbung bewerten. Es stellt gegenüber dem Bassverhältnis ein breitbandigeres Unterscheidungsmerkmal dar. Der Wert  $TR1 > 1$  bedeutet somit eine größere Nachhallzeit bei hohen als bei tiefen Frequenzen und somit in dem betrachteten Sinne eine höhere Brillanz des Klangbildes.

Für die vorliegende Untersuchungen wurde die Primärstruktur der betrachteten Räume in die vier Grundformen:

- (1) Rechteck (Schuhkarton),
- (2) Polygon,
- (3) Kreis und
- (4) diverse Trapezform (einschließlich Tortenstück)

eingeordnet. Des weiteren wurden aus dem Datenmaterial aus (BERANEK 1) 40 bezüglich dieser Einteilung relevante Konzertsäle ausgewählt.

Für die von BERANEK in der Kategorie A+ und A ausgewählten Konzertsäle lassen sich folgende Wertepaare für den besetzten Raumzustand ermitteln:

Raum (alphabetisch)	T <sub>30,mid</sub> in s	BR	TR1	Primärstruktur
Amsterdam Concertgebouw	2,0	1,09	0,77	Rechteck
Basel, Stadt-Casino	1,8	1,18	0,74	Rechteck
Berlin, Konzerthaus	2,05	1,08	0,79	Rechteck
Boston, Symphony Hall	1,85	1,03	0,78	Rechteck
Cardiff, David's Hall	1,95	0,98	0,87	Polygon
New York, Carnegie Hall	1,8	1,14	0,78	Rechteck
Tokio, Hamarikyu Asahi	1,7	0,93	1,04	Rechteck
Wien, Musikvereinssaal	2,0	1,11	0,77	Rechteck
Zürich, Tonhalle	2,05	1,32	0,58	Rechteck

Für 12 typische Vertreter der Schuhkartonform und für 10 Konzertsäle mit typisch polygonaler Grundrissform wurde der Vergleich der Wertepaare BR und TR1 durchgeführt, siehe Figure 1:

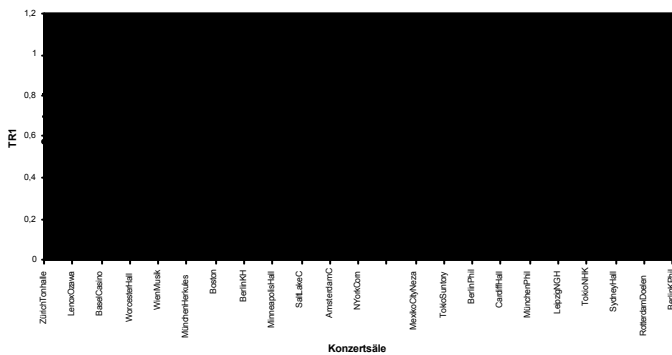


Figure 1: TR1: Schuhkarton (links) und Polygon (rechts)

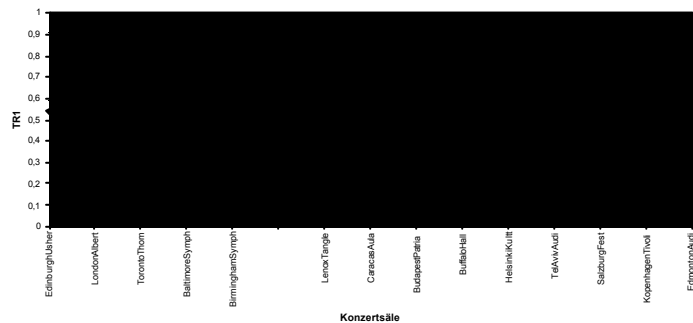


Figure 2: TR1: Kreis (links) und Trapez (rechts)

Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass bei Räumen mit Schuhkartonform gegenüber denen mit polygonaler Grundform die Brillanz kleiner ist. Dagegen ist bezüglich des Brillanzverhältnisses TR1 zwischen Räumen mit annähernd kreisförmigen Grundriss (5 Säle) und mit diverser trapezförmiger Grundform (9 Säle) kein signifikanter Unterschied feststellbar, siehe Figure 2.

Aus diesen Werten wurde der Mittelwert und der Vertrauensbereich mit 95% statistischer Sicherheit berechnet. Die Ergebnisse sind in Figure 3 dargestellt:

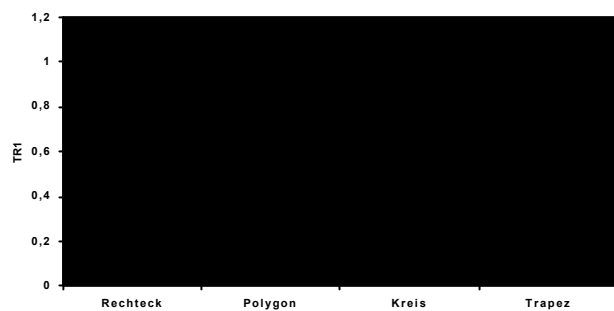


Figure 3: Mittelwert für TR1 und Vertrauensbereich bei 95% stat. Sicherheit

Raumform	Anzahl der Säle	Mittelwert TR1	Vertrauensbereich	Grenzwerte
Rechteck	12	0,75	0,05	0,70.. 0,80
Polygon	10	0,91	0,05	0,86.. 0,97
Kreis	5	0,75	0,16	0,59.. 0,91
Trapez	9	0,75	0,15	0,63.. 0,86

Hieraus ist ersichtlich, dass es nur zwischen Rechteck- und Polygonform einen signifikanten Unterschied in der Zugehörigkeit der Brillanzverhältnisses TR1 gibt. Räume mit polygonalem Grundriss haben gegenüber der Schuhkartonform eine höhere Brillanz.

Nun besteht die Frage, ob bezüglich dieser hohen Brillanz auch andere Raumformen geeignet sind. Die diesbezügliche Qualität eines Schuhkartonraumes ist mit der vorliegenden Konzertsalauswahl nur durch einen (von 10) polygonalen Raum, durch 3 von 5 kreisförmige Räume und durch 5 (von 9) trapezförmige Räume erzielbar. Dagegen ist ein Wert von TR1 in der Kategorie der polygonalen Räume durch keinen der aufgeführten Schuhkartonräume, nur durch einen (von 5) kreisförmigen und 2 (von 9) trapezförmige Räume zu erreichen. Daraus wird ersichtlich, dass er im Prinzip möglich ist, die spezifischen Eigenschaften bezüglich der frequenzabhängigen Nachhallzeit unabhängig von der Primärstruktur des Raumes zu gestalten, es aber mit einigen Grundformen sehr schwer oder fast unmöglich erscheint. Da die Eigenmodendichte unabhängig von der Raumgeometrie ist, kann als Ursache nur eine unterschiedliche Schallenergieverteilung herangezogen werden. Bei Rechteckräumen scheint in den tiefen Moden weniger Schallenergie im Verlauf der Ausbreitung verloren zu gehen, als in polygonalen Raumformen. Eine rein geometrische Betrachtung der Raumform kommt dem schon sehr nahe. So kann man z. B. bezüglich der zeitabhängigen Schallenergiekomponenten zwischen typischen Beispielen dieser beiden Raumgruppen einen größeren Wert des Hallmaßes H (BERANEK 2) in Schuhkartonräumen gegenüber den Räumen mit polygonalem Grundriss feststellen (Konzerthaus Berlin (Rechteck): 4,1 dB, Gewandhaus Leipzig (Polygon): 2,3 dB). Diese Überlegungen sollen vielleicht als Anlass für weiterführende Simulationsuntersuchungen am physikalischen und mathematischen Modell dienen.

## Literatur

1 Beranek, L.: Concert and Opera Halls. Acoustical Society of America, 1966

2 Ballou, G. M.: Handbook für Sound Engineers, Third Edition. Focal Press Boston, Oxford, Auckland, Johannesburg, Melbourne, New Delhi 2002