

厅堂音质中的响度评价^①

王季卿

(同济大学声学研究所 上海, 200092)

1993年8月17日收到

摘要 厅堂音质评价的各项指标中, 响度是最重要和最基本的内容之一。但由于长期来缺乏合适的参量, 因此迄今无法在完工后的厅堂中去测量这项指标, 当然也难以在设计阶段对此参量进行估算。不少人常把仅仅适用于稳态声源和混响场的声场估算法(即以直达声加上混响声)作为厅堂内各处总声强的评价, 无论从音质设计和现场测量来看, 显然很不合适。近年 Lehmann 提出以声强指数 G (Starkemass) (dB) 作为评价参量是一个好的建议。但根据我们的研究结果来看, 鉴于早期反射声对响度起主导作用, 因此厅堂内各处的声强指数应取 50ms(语言)和 80ms(音乐)的早期反射声积分值更符合实际, 以代替 t 从 0 积分到 ∞ 的评价方法。因此 G_{50ms} 和 G_{80ms} 将分别用于评价厅堂内对语言和音乐的响度评价参量。

Criterion of the overall strength in auditorium acoustics

WANG Jiqing

(Institute of Acoustics, Tongji University Shanghai, 200092)

Received August 17, 1993

Abstract Among all the criteria used for assessing the acoustical quality of an auditorium, the overall strength, or the loudness, is one of the most essential attributes. But little had been done on this criterion in the past owing to the lack of appropriate measure to describe and quantify such a criterion, therefore it is hard to predict the overall strength in a hall during the design stage, and also cannot check it when the hall is completed. A new measure so called strength index G (Starkemass) developed by Lehmann gives a good proposal to quantify the overall strength in an auditorium. He found that the impression of the strength is not produced only by the direct sound, nor by the early 'useful' sound, but all of the reflections arriving at the listener's position. But our experience, also from other authors, shows the direct sound and early reflections playing the main role in determination of loudness impression due to the 'limit of perceptibility' or 'the inertia of hearing'. Therefore it is more reasonable to set an integrating time of the useful reflections for determining the strength index, say 50ms for speech and 80ms for music. The strength index G hence should be written as G_{50} for speech and G_{80} for music.

一、引言

厅堂音质评价的各项指标中, 响度是最重要和最基本的内容之一。如果厅内观众席上响度不够, 或厅内各处响度相差太大, 必将成为听音条件中的严重不足。作为厅内音质评价指标的响度参量, 还应避免由于声源强度变化而引起之问题。由于此项评价缺乏合适的参量, 因此长期来未能成为厅堂音质的考核内容。

大家有这样的经验, 当演奏至轻声时, 听众注意力会集中到台上; 而演奏至响声时则会注意到房间的空间感。不同响度还会影响到大厅的混响感。所以从音质欣赏角度来看也应对厅内响度

① 国家自然科学基金资助项目

有一定的要求。可是响度有其相对性,例如响度与声源条件有关,对一个大的乐队和独奏者的响度人们会有不同要求。此外,在不同噪声环境下对响度也有不同要求。这就使制订厅堂响度评价标准增加了难度。

二、问题的提出

一般估计室内各处声级 L_p ,可按一个简单公式进行计算,即

$$L_p = L_w + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right), \quad \text{dB} \quad (1)$$

由此式可知,各处声级 L_p 由声源功率级 L_w 、直达声($Q/[4\pi r^2]$)和混响声($4/R$)三者所决定。直达声随声源距离 r 的平方成反比,与声源指向性因素 Q 成正比。混响声由该室的房间常数($R = S\bar{\alpha}/[1-\bar{\alpha}]$)所决定, S 为室内总表面积(m^2), $\bar{\alpha}$ 为平均吸声系数。

这里必须强调指出这个公式的适用条件是:声源是稳态的和远处接收点处在混响声场之中。后者假定离声源临界距离之外各接收点的声级是基本上处处相同的。因此用这个公式来估计厅堂音质中的各处声强往往不符合实际情况,也不合逻辑,这一点作者早就指出过^[1]。其理由是:(1)常见声源(语言和音乐)很少属于稳态性质的;(2)在已作假定处处声级相同的声场中,再来估算该声场是否均匀,又有多大意义。不幸在一些建筑声学教科书中,以此作为计算厅堂内声场的实例,显然不妥。以北京人民大会堂为例^①,当台上用自然声讲话时,其空场的临界距离约为15 m(满场约为19 m)。试问在离声源15 m处和楼座最后一排(约离声源60 m)的声级根据(1)式计算是几乎相同的,相差不过1 dB,岂能可信?

Gade 和 Rindel^[2]、Barron^[3]等人根据实测资料,指出传统的声场分布计算公式(1)是大大地估计过高了。Barron 的实测结果还表明厅内声压级随声源/接收者距离的衰减因厅而异。可见厅堂内观众席上的响度固然与声源强度和混响有关,还应注意到与厅堂形状、声源所在位置及其周围声学条件有关,对非稳态声源更是如此,而这些因素在(1)式中毫无反映。

厅堂现场测量中,也存在着类似的问题。例如国家标准 GB4959“厅堂扩声特性测量方法”^[4]中对声场不均匀度规定测量听众席稳态声压级,在广播电视部部级标准“扩声系统声学特性指标”^[5]中并规定中频(语言扩声)的声场不均匀度不超过8 dB(一级标准)和10 dB(二级标准)。在国家标准 GB/T 13156-91“电影院观众厅建筑声学的技术要求”^[6]中则规定声场不均匀度不得超过6 dB。鉴于这些测量方法均采用稳态声源,所以上述规定的限值在一般厅堂中均易得到满足,但并不足以说明该厅堂实际使用中声场均匀的满意程度。因此这些标准应予修改。

三、总声能级的评价

60年代初,Beraneck^[7]提出18个音质评价指标时,对响度的评价认为直达声和混响声均对厅堂内音乐响度起作用,因此要把直达声和混响声的声级合在一起考虑。但是前者的贡献比后者略大,其比例约为5:3。故原则上未脱出传统计算公式的概念。他认为直达声(包括35 ms以内的早期反射声)响度取决于演奏者至听者距离和其间有无听众头部的介入(如楼座前排比正厅同距离的座位好)、大厅发声端的反射表面性质以及演奏乐队的规模大小。直达声太轻,会被听众噪声或混响声所掩蔽,清晰度变差。Beraneck 提出大厅座席至声源的平均距离作为考核直达声响度是否合适的辅助指标。因此可认为响度与听众席大小有关,也与早期反射声有关,厅越大响度就要下降。至于混响除了增加活跃度以外,他认为对响度也有一定作用。但大厅容积对音乐响度的关

①北京人民大会堂容座1万人,总体积91000 m^3 ,总表面积19200 m^2 ,中频空场和满场混响时间分别为3.0 s和1.6 s。

系, 只有一些经验性结论。Beranek 引用 Cremer^[8]提出的室内混响声的响度与体积和声源能量有关的简单关系式, 即不论稳态声或断奏声均与 NT/V 有关, 式中 N 为音的能量, T 为混响时间, V 为大厅容积(m^3)。混响越长、容积越小的大厅, 音乐的响度越高; 反之亦然。因此对具有一定强度音的混响声响度 L 与 T/V 有关。Beranek 的经验是当 $L = T/V \times 28300$ 时, 如 L 在 2.5 和 3.5 之间, 则可认为混响声响度很好, 可得该项指标 6 分的满分。反之如一个厅的混响时间很短, 也许听来还好, 但称不上是优等。Beranek^[9]在最近(1992)著作中仍认为厅内响度还与混响时间有关, 因它随容积与听众席面积之比而成比例地下降。

Ando^[10]在其所著“音乐厅声学”一书中, 提到了合适的听音声级。他认为对较慢型音乐的合适峰值范围在 77—79 dBA, 对活泼轻快型音乐为 79—80 dBA。Beranek^[11]认为声源的强度还取决于演出乐队的规模大小, 以及演奏时的力度, 而不是大厅本身的设计。声学顾问可以做到的最佳设计是厅内避免用吸声表面、乐队发出的声能得以均匀地分布给全部听众席。这些条件做到以后, 则中型大厅(1500 座)将比 Tanglewood 之类大型音乐棚(5000 座)的平均声级可高出 5 dB; 对后座来说, 则相差更大些。

厅内响度还可用一个称为强度指数 G 的客观测量值来说明, Lehmann^[12]把到达声能的强度指数 G 定义为:

$$G = 10 \log \left[\frac{\int_0^\infty p^2(t) dt}{\int_0^\infty p_0^2(t) dt} \right], \text{ dB} \quad (2)$$

式中, $p(t)$ 为听众席某位置上的声压, $p_0(t)$ 为该声源在消声室内 10 m 处测得的声压量值。 G 还应是频率的函数, 故又应按各倍频带进行测量。这一客观参量避开了因声源强弱而引起的问题, 而是与一个参数值作比较得出的。所以即可用于确定整个厅内各处声场的均匀性, 同时也可确定在某些频率下传输的声能是否不足的问题。Lehmann 根据许多大厅的实验结果表明实测的强度指数与人们主观反应的声音强弱感有很好的相关性, 且为他所考虑的各项评价参量中相关系数最高者。

四、响度的有效积分时间

近年来强度指数 G 已被大多数人认为是评价响度的一个很有价值的参量, 而且不少作者也同意总声级中应包括早期反射声和混响声两部分^[3, 7], 也就是说同意取接收的脉冲信号声能的全部积分时间。但无论从客观测量结果和主观响度判断来看, 这是一个值得商榷的问题。

1. 客观测量

Toyota 等人^[13]在厅堂测量中提出了反射声能累计曲线(RECC), 从中可以看出厅内各处在不同积分时间下的总声级分布。该曲线表达了总反射声级与时间的关系, 其关系式为:

$$\text{RECC}(T) = 10 \log \left[\int_{0.005}^T p^2(t) dt \right], \text{ dB} \quad (3)$$

式中反射声压的平方是从低限 50 ms 起(以避开直达声)积分到时间 T 。图 1 所示之 RECC 曲线(不包括直达声)为某厅堂四个位置上墙面作不规则处理前后的变化。可以看到在 50—70 ms 之前, 不论处理前或后的四个位置上的总声级随积分时间均有较大起伏; 在此时间之后, 总声级的变化趋小, 而且处理前后的变化也趋于不明显。随着积分时间 T 的增大, 这种差异在缩小。

事实上, 当积分时间 T 很大时, 也就是把全部混响声能包括在内了, 早期反射声能所占比重

反而相应缩小。尤其对于混响半径之外的座席在厅内又占了最大部分, 主要将由混响声能起主导作用。这样的评价又接近于传统计算公式的范畴了。所以取一定的积分时间限值很有必要, 这就涉及人耳的惯性有多大的问题。

Bradley^[14](1991)对三个著名古典音乐厅内各处的 G 值测量结果表明, 声源位置对 G 值无多大影响, 而对 G_{80} 值(即积分时间取 80 ms 的 G 值)则会有较大变化。而且 G_{80} 值随声源/接收者的距离而下降的斜率也比 G 值的为大, 也就是说 G_{80} 更灵敏地反映出厅内响度受早期反射声的影响。

2. 主观响度感受

人耳有一定的惯性, 所以在主观响度感受上会有一些的时间常数。早在 1929 年, Bekesy^[15, 16]就发现短音的响度随延续时间而增加, 至 200 ms 左右响度级便达到和稳态声一样了。

短延迟声对原始声有增加响度的作用是早为人所知的事实。问题是其有效积分时间常数为多少。Schwarze^[16, 17](1962)所作单个反射声会增加响度的实验中, 得到这样的结果, 即延迟时间 10 ms 时, 响度增量约相当于 3 dB, 相应于理想的能量相加情况, 这种相加作用在延迟时间 50 ms 时明显下降, 在 100 ms 时则几乎完全消失。

作者(1992 年)也曾对早期反射声对响度影响作过一些实验研究^[18, 19]。对单个早期反射声也获得类似的结论, 不过实验中发现反射声的入射角与原始声级大小等均会影响到主观响度感受。同时还对多个早期反射声也作了实验, 发现即使延迟时间在 30—60 ms 之内, 其作用响度均小于能量相加规律。由此可认为对早期反射声取一定的积分时间限值是适宜的。

Toyota(1990)^[20, 9]认为, 开始的 30 ms 有助于突出音质; 30 至 60 ms 这一段关系到响度; 60 至 90 ms 这一段则有助于建立起总的主观印象。

其实, 类似的情况也存在于混响感的判断上, 声源停止后衰变 10 dB 所经历的早期衰变时间(EDT)比之经典衰变 60 dB 的时间更符合主观感受, 就是一个很好的例子。再说, 一般言语速度约为 5 音节每秒, 从音节持续时间和音节间隔时间来看, 取无限长积分时间的 G 值是不合适的。

考虑早期和后期的声能比评价参量时, 对有用(早期)声能部分的积分时间也只取 50 ms(语言)^[20]和 80 ms(音乐)^[21]。对强度指数 G 也以取 50 ms 的 G_{50} (语言)^[20]和 80 ms 的 G_{80} (音乐)比较合理, 符合主观响度感受。

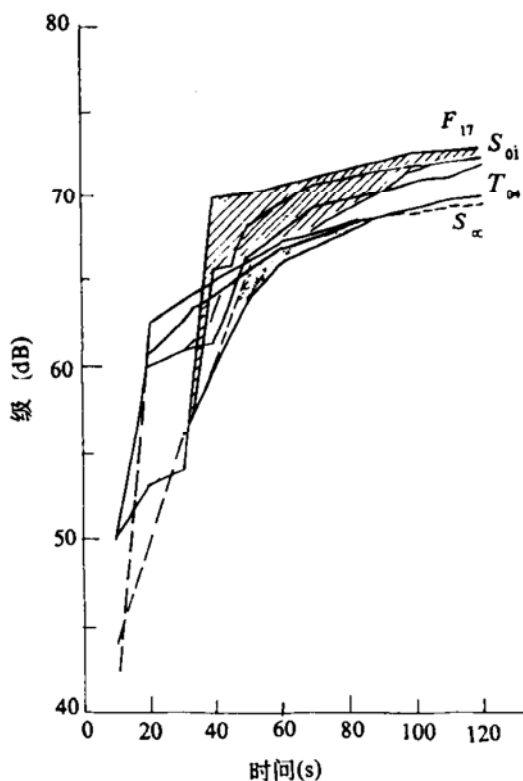


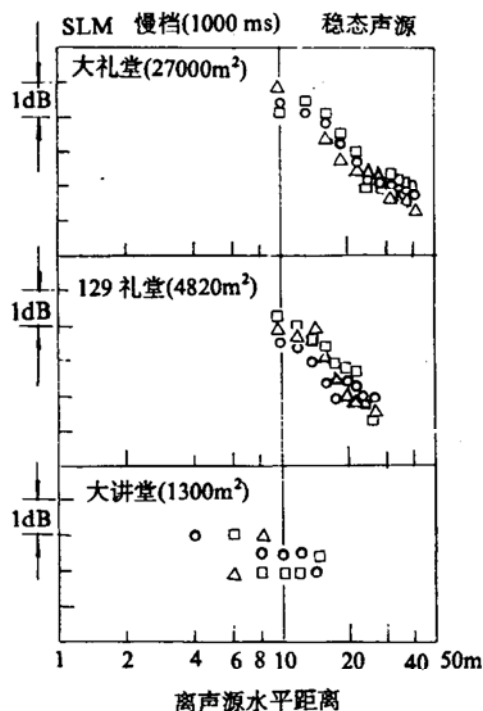
图 1 (引自 Toyota[13])

五、用声级计测量总声级分布

通常测量厅内声场分布是采用一个十二面扬声器组在舞台上发出白噪声或粉红噪声, 然后在厅内各处利用声级计读测其总声级(或频带声压级)。由于是稳态声源, 所以用快档或慢档读的结果是相同的。图 2 所示为用此法在同济大学三个不同容积的大厅中空场测量的结果。这些大厅是: (1) 3700 座大礼堂, 容积 27000 m³; (2) 900 座 129 礼堂, 容积 4820 m³; (3) 362 座文远楼大讲学, 容积 1300 m³。从图 2 中可知声级在临界距离之外随声源/接收者距离的衰减是很小的。例如大礼堂中 10 m 处和 40 m 处平均只相差 3 dB 左右, 129 礼堂中 10 m 处和 20 m 处平均只相差 1.7 dB 左右, 大讲学中 4 m 处和 14 m 处平均只相差 1 dB 左右。在离声源临界距离之外的全

厅最大差别也是很小的, 分别为 3.5 dB、2.3 dB 和 1.0 dB。离声源相同距离处的最大差别均在 1 dB 之内(见表 1)。

图 3 所示为这三个大厅的空场混响时间。



□、○、△ 为同距离的不同测点

图 2

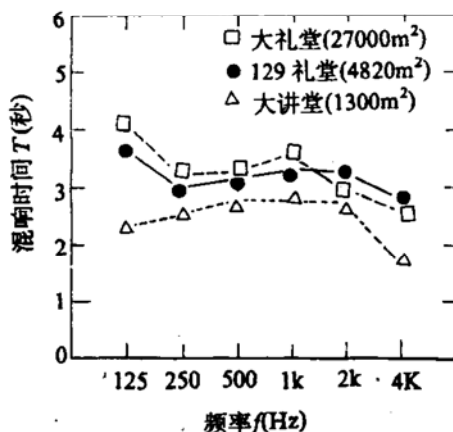


图 3

表 1 三个大厅用不同声源和不同时间常数的表头测量各处声级的结果

厅堂名称	容 积 (m^3)	声 源	声 级 计 时间常数	临界距离之外全 厅最大差别(dB)	离声源同距离处 最大差别(dB)
大 礼 堂	27000	稳 态	慢、快档	3.5	0.7
		脉 冲	脉冲保持	11.0	4.0
			峰值保持	14.0	4.4
129 礼 堂	4820	稳 态	慢、快档	2.3	1.0
		脉 冲	脉冲保持	7.0	3.5
			峰值保持	6.8	3.5
文远楼 大讲堂	1300	稳 态	慢、快档	1.0	1.0
		脉 冲	脉冲保持	6.0	4.5
			峰值保持	9.0	3.5

注: 表头所取平均时间: 慢档 1000 ms, 快档 125 ms, 脉冲保持 35 ms, 峰值保持 30 μ s。

为了模拟语言和音乐的非稳态性质, 我们采用电火花发生器作为测试声源。如果选用声级计上时间常数很短的(30 μ s)峰值保持档来读测, 则基本上只反映了脉冲信号的直达声部分, 这样全厅各处的声级差别就很大(见图 4 和表 1)。如果选用声级计上时间常数为 35 ms 的脉冲保持档来读测, 则所得总声级大致能反映出包括 35 ms 之内早期反射声的总声级(见图 5 和表 1)。从而可

以大致上看出厅内声场分布均匀情况, 也比较符合听众实际响度感受的差别。因此这种简易法可用来替代目前常用的测量声场方法。

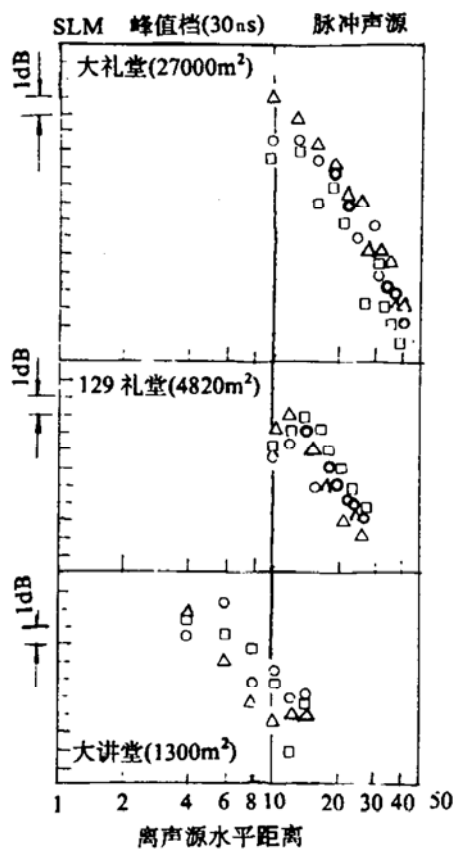


图 4

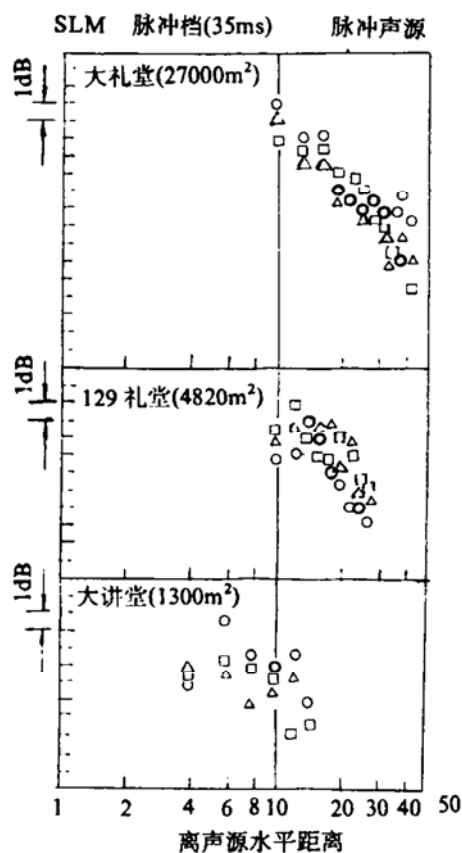


图 5

六、结束语

响度及其在厅内分布均匀程度是厅堂音质评价中很重要的内容, 但这方面长期来缺乏明确的评价方法和定量判据。从本文所作之评述中可以看出, 近年来这方面已有所突破, 有关早期反射声对响度的贡献和混响声对响度究竟起多少作用等心理和生理声学评价还值得作深入一步之研究。积累强度指数 G 或 G_{50} 、 G_{80} 的现场实测资料和经验很重要, 而且要与主观评价结合起来提出其最佳范围, 这样才更有实用价值。另外, 如何从大厅音质设计上来控制和满足这一指标, 也是大家颇感兴趣和关心的问题。

附记: 本文中提供的大厅实测数据是由钟祥瑞、梁华和蒋国荣等一起完成的。

参 考 文 献

- [1] 王季卿. 阶梯教室声学设计的一些意见, 建筑学报, 1964(1): 27.
- [2] Gade A C and Rindel J H. Die abstandsalhangigkeit von schallieggel in konzertsalen, *Fortschritte der Akustik*, 1985, DAGA 85: 434—438.
- [3] Barron M and Lee L J. Energy relations in concert auditoriums, I, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1988, 84(2): 418—428.
- [4] 国家标准 GB4959—1985 厅堂扩声特性测量方法.
- [5] 广播电影电视部部标准 GYJ25—86 扩声系统声学特性指标.
- [6] 国家标准 GB/T 13156—91 电影院观众厅建筑声学的建筑要求.

- [7] Beranek L L. Music, Acoustics and Architecture, *John Wiley and Sons. Inc.*, 1962.
- [8] Cremer L. Statistische raumakustik, *S. Hirgel, Stuttgart*, 1961: 231.
- [9] Beranek L L. Concert hall acoustics—1992, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992, **92**: 1—39.
- [10] Ando Y. 音乐厅声学, 1985, 中译本, 戴根华译, 1989.
- [11] Beranek L L. Concert hall acoustics, *International symposium on environmental acoustics*, Kobe. Japan, 1989, **15**—**16**: 1—18.
- [12] Lehmann P. Über die ermittlung raum akustischer kriterien and deren zusammenhang mit subjektiven beurteilungen der horsamkeit, *Dessertation*, 1976, TU Burlin.
- [13] Toyota Y et al. A study on the characteristics of early reflections in concert Hall, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1988, **84** Suppl. 1. 130.
- [14] Bradley J S. A comparison of three classical concert halls, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991, **89**(3): 1176—1192.
- [15] Bekesy G *Phys Z.* 1929, **30**: 118.
- [16] Cremér L and Muller H A. Principles and applications of room acoustics, 1982(1).
- [17] Schwarz D. Dissertation, TU Burlin, 1963.
- [18] Wang J Q and Jiang G R. Loudness evaluation of early reflections, *Proc. 14th ICA*, 3—10, 1992, F6—3.
- [19] 王季卿、蒋国荣. An experimental study on loudness evaluation of early reflections, *Chinese J. Acoustics*, 1994, **13**(3): 243—248; 声学学报, 1994, **19**(2): 110—116.
- [20] Toyota Y et al. A study of shoe-box hall's room shape in consideration of directional characteristics of orchestral instruments, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1990, **88**, Suppl. 1., S111.
- [21] Thiele R. Richtungsverteilung and zeitfolge der schallruck wurfe in raumen, *Acustica*, 1953, **3**: 291—302.
- [22] Reichard W and Lehmann U. Optimie ung von raumeindruck und durchsichtigkeit von musikdarbietungen dusch auswertung von impuls-schalltests, *Acustica*, 1981, **48**: 174—185.