EINE FALLSTUDIE ZUR GENAUIGKEIT RAUMAKUSTISCHER SIMULATIONSERGEBNISSE

Josef Lechleitner, Alexandros Andralis, Ardeshir Mahdavi

Abteilung für Bauphysik und Bauökologie; Technische Universität Wien
A1040 Wien, Karlsplatz 13

ABSTRACT

This paper deals with the accuracy of simulation models in room acoustics. Acoustical measurements were conducted in five existing lecture halls in a university. The measured parameters included reverberation time, sound level distribution, and STI (sound transmission index). Parallel to the measurements, the same parameters were computed using a detailed room acoustics simulation program. Measurements and simulation results were compared toward an objective evaluation of the simulation model's accuracy. Comparison results showed a good agreement between measured and simulated reverberation times and sound pressure levels.

KURZFASSUNG

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Genauigkeit raumakustischer Simulation. Zu diesem Zweck wurden in 5 bestehenden Räumen (Hörsälen) raumakustische Messungen durchgeführt. Dabei wurden Parameter wie Nachhallzeit, Schallpegelverteilung und STI gemessen. Parallel wurden dieselben Parameter mittels eines detaillierten raumakustischen Simulationsprogrammes ermittelt. Durch den Vergleich der gemessenen und berechneten Werte der raumakustischen Indikatoren, war es möglich, die Genauigkeit der Simulationsergebnisse zu beurteilen. Die Gegenübereinstellung von Messung und Simulation zeigte eine gute Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Nachhallzeiten und Schallpegelverteilungen.

EINLEITUNG

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Genauigkeit raumakustischer Simulation. Dabei wird der Frage nachgegangen, inwieweit die Genauigkeit der Eingangsparameter die Brauchbarkeit der Simulationsergebnisse beeinflusst. Zu diesem Zweck wurden in 5 bestehenden Räumen (Hörsälen) raumakustische Messungen durchgeführt. Dabei wurden Parameter wie Nachhallzeit, Schallpegelverteilung und STI gemessen.

METHODE

Zum Vergleich wurden 5 Hörsäle (siehe Abbildungen 1 bis 5, sowie Tabelle 1) aus zwei verschiedenen Gebäuden der Technischen Universität Wien raumakustisch mit einer detaillierten Simulationsapplikation (ODEON 2008) simuliert. Parallel wurden in denselben Hörsälen raumakustische Messungen durchgeführt. Dabei wurden die Messungen und die Simulationen an denselben Mikrophonpositionen durchgeführt. Je nach Größe des Hörsaales wurde an unterschiedlich vielen Mikrophonpositionen, entlang eines Rasters, gemessen und simuliert.

Es ist oft nicht möglich, für bestehende Räume detaillierte Schallabsorptionsgradinformationen zu erhalten. In dem vorliegenden Fall wurden die entsprechenden Annahmen aufgrund der Inspektion der Raumoberflächen und Gegenstände getroffen. Tabelle 2 fasst die Schallabsorptionsgradannahmen bezüglich der in den 5 Hörsälen vorkommenden Materialien zusammen. Tabelle 3 zeigt die Flächenanteile der Materialien in Prozent der jeweiligen gesamten Raumoberflächen.

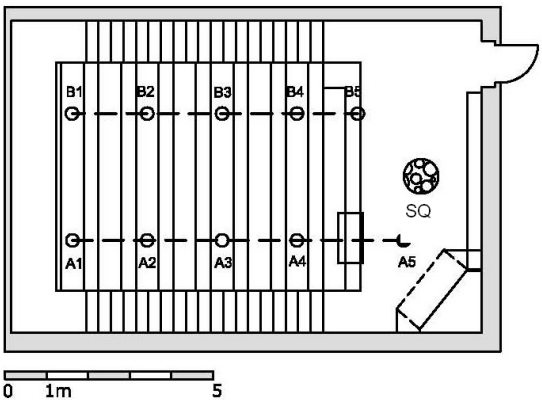

Abbildung 1 Grundriss Hörsaal HS5 mit Mikrophonpositionen und Schallquellenpositon SQ

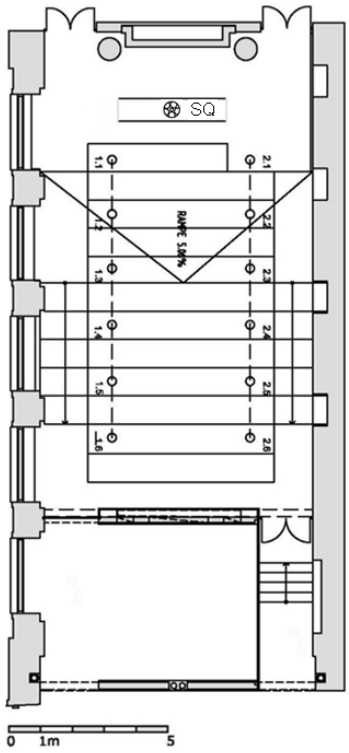

Abbildung 2 Grundriss Hörsaal HS1 mit Mikrophonpositionen und Schallquellenposition SQ

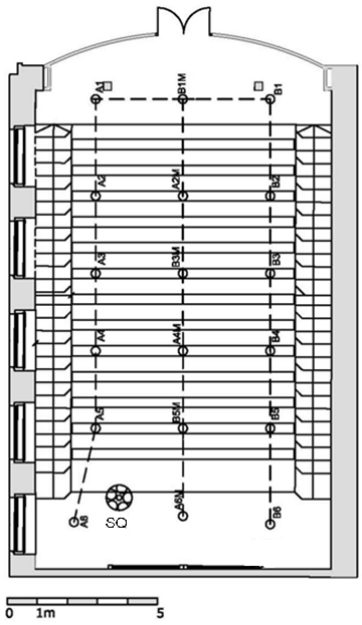

Abbildung 3 Grundriss von Hörsaal HS2 mit Mikrophonpositionen und Schallquellenposition SQ

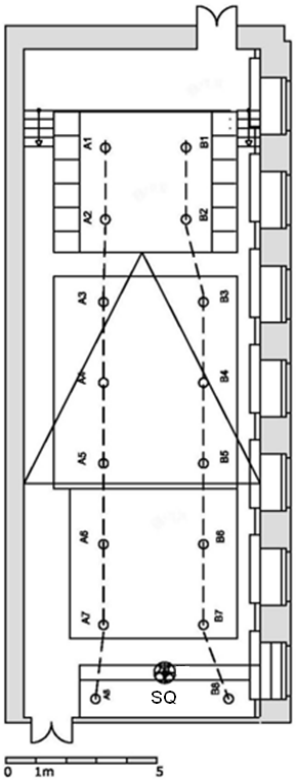

Abbildung 4 Grundriss Hörsaal HS3 mit Mikrophonpositionen und Schallquellenposition SQ

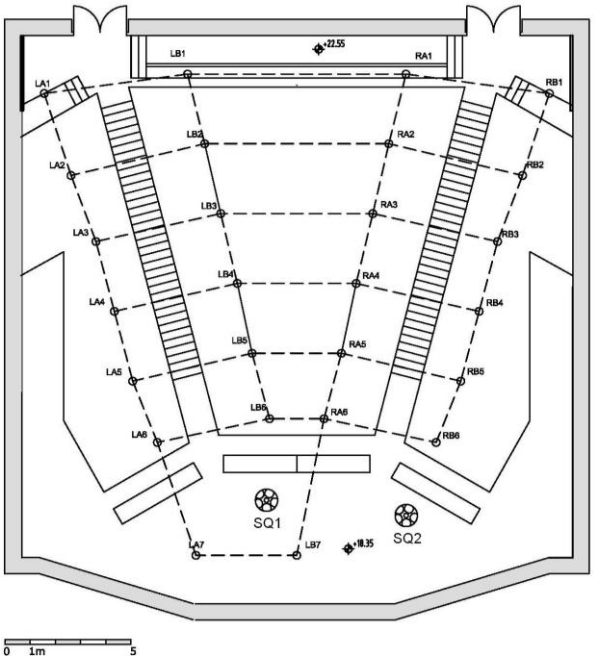

Abbildung 5 Grundriss Hörsaal HS4 mit Mikrophonpositionen und Schallquellenpositionen SQ1 und SQ2

Tabelle 1 allgemeine Daten der Hörsäle

	HS1	HS2	HS3	HS4	HS5
Anzahl der Sitzplätze	143	200	196	412	69
Raumvolumen [m³]	1013	1230	676	3000	400
Gesamtinnenoberfläche [m²]	954	985	870	1665	374

Tabelle 2 Schallabsorptionsgrade der vorkommenden Bauteile

		Oktavbandmittenfrequenz [Hz]							
Nr.	**Bauteil**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
1	Ziegelmauerwerk verputzt	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03
2	Schallwand, Nutplatte	0.2	0.3	0.85	1.0	0.85	0.7	0.65	0.4
3	Gipskartonplatte 100mm Luftabstand	0.3	0.28	0.14	0.09	0.06	0.05	0.01	0.01
4	Metallpaneeldecke	0.23	0.56	0.60	0.60	0.63	0.40	0.35	0.35
5	Ceiling plasterboard	0.20	0.20	0.15	0.10	0.08	0.04	0.02	0.02
6	Akustikdecke Metalllochkassette	0.25	0.55	0.90	0.85	0.85	0.80	0.60	0.30
7	Gipskartonplatte	0.30	0.20	0.10	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05
8	Gipskartonlochplatte	0.39	0.39	0.81	0.68	0.44	0.25	0.20	0.20
9	Zellwollstoff	0.02	0.02	0.03	0.03	0.1	0.15	0.15	0.15
10	Sperrholzplatten	0.18	0.18	0.28	0.12	0.07	0.04	0.04	0.04
11	Türe Holz	0.14	0.14	0.1	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10
12	Zweifachverglasung, 30 mm Abstand	0.15	0.15	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
13	Doppelfenster geschlossen	0.10	0.10	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
14	Fensterglas	0.35	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04	0.04
15	Einfachverglasung	0.08	0.08	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
16	Kastenfenster	0.5	0.25	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
17	Linoleum	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
18	Klappstühle Holz	0.03	0.05	0.09	0.20	0.21	0.20	0.10	0.06

Tabelle 3 Vorkommende Bauteile in den untersuchten Hörsälen in Prozent der gesamten Innenoberfläche

Bauteil Nr.	**HS1**	**HS2**	**HS3**	**HS4**	**HS5**
1	48.7	25.9	27.1	7.9	13.3
2				7.1	5.0
3		15.3			
4	12.3		20.1		
5		13.8			
6		10.9			
7				31.0	23.7
8		1.1			
9				7.7	12.5
10				4.5	11.7
11	1.9	1.5	8.0	3.3	1.2
12	2.8	0.6			
13			4.3		
14		4.0		0.3	
15			1.6		
16	4.2				
17	17.9	10.7	23.6	18.2	14.7
18	12.1	16.2	15.3	20.1	18.0

Raumakustische Simulationen

Die Simulationen wurden sowohl für die leeren als auch in die besetzen Hörsäle durchgeführt. Der Ablauf der Simulationen gestaltet sich folgendermaßen:

1) Das geometrische Gebäudemodell wurde mit einem CAD-Programm erstellt (Form-Z 2009). Das so konstruierte DXF File wurde in das akustische Simulationsprogramm importiert.

2) Den Oberflächen werden (in Odeon) Materialien zugewiesen. Die Materialdaten bestehen aus Name, Schallabsorptionsgrade (in Oktavbändern zwischen 63 Hz und 8000 Hz) und dem Schallstreuungsgrad.

3) Die Schallquelle und die Empfänger (Zuhörerpositionen) wurden an denselben

Positionen eingegeben, wie sie bei der Messung verwendet wurden. Die simulierte Schallquelle erhielt dieselben Schallleistungs-einstellungen, wie sie bei der Messung verwendet wurden.

4) Die meisten Simulationsparameter wurden automatisch, nach Auswahl einer Genauigkeitsstufe, gesetzt. Nur die „Impulse Response Length“ (Simulationslänge) wurde eingegeben.

5) Nach Ausführung von Simulationsläufen wurden die Resultate numerisch und graphisch dargestellt.

Raumakustische Messungen

Die Messungen erfolgtem im leeren Zustand. Nur im Hörsaal HS2 wurde sowohl im leeren als auch im besetzten Zustand gemessen. Im Hörsaal HS4 wurden die Messungen mit 2 verschiedenen Schallquellen-positionen (SQ1 und SQ2) durchgeführt. In den anderen Hörsälen wurde eine Schallquellenposition verwendet. Für die Nachhallzeitmessung wurden die Schallpegelabfälle (rosa Rauschen) mit dem "Time data recorder" aufgezeichnet. Die Auswertungen der Nachhallzeiten (in den Oktavbändern zwischen 63 Hz und 8000 Hz) erfolgten nachher. Zur Messung der Schallpegelverteilung wurde von einem Kugellautsprecher ein rosa Rauschen mit einer definierte Schallleistung abgestrahlt. Bei gleichbleibender Schallleistung wurden die Schallspektren (in den Oktavbändern zwischen 63 Hz und 8000 Hz) gemessen. Die Messung und Auswertung der STI-Werte wurde mit einem Sinus-sweep Signal über einen omnidirektionalen Kugellautsprecher durchgeführt.

RESULTATE

Gemessene und simulierte Nachhallzeiten

Die Abbildungen 6 bis 11 zeigen den Vergleich von gemessenen und simulierten Nachhallzeiten der Hörsäle im leeren Zustand (im HS2 wurden die Nachhallzeiten auch bei einem Besetzungsgrad von 75% gemessen). Dabei wurden die Messwerte aller Mikrophonpositionen (Empfänger) eines Hörsaales gemittelt. Im Hörsaal HS4 wurden die Nachhallzeitmessungen für beide Schallquellen-positionen (SQ1 und SQ2) gemittelt. Weiters sind Simulationen von 3 Besetzungszuständen dargestellt.

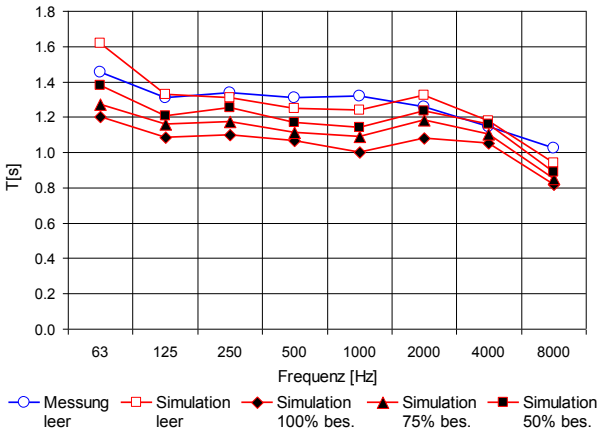

Abbildung 6 HS1, gemessene und simulierte Nachhallzeiten im leeren und besetzten Zustand

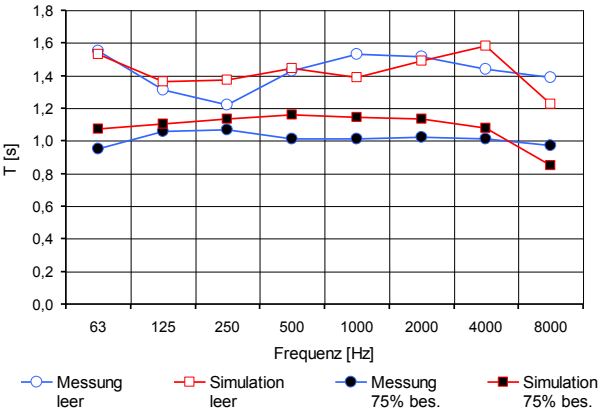

Abbildung 7 HS2, gemessene und simulierte Nachhallzeiten im leeren und bestzen Zustand (75%, entspricht 150 Personen)

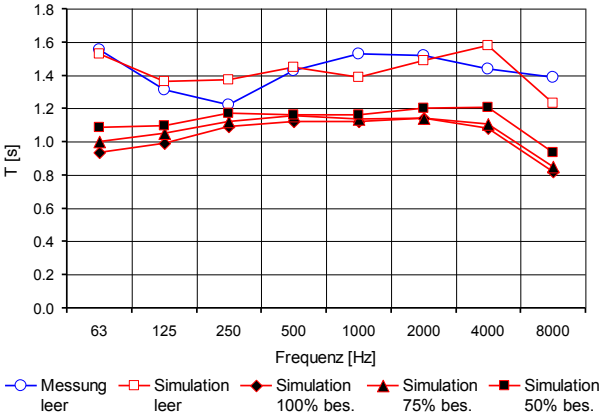

Abbildung 8 HS2, Simulierte Nachhallzeiten für unterschiedliche Besetzungsdichten (zusammen mit Messresultaten für den leeren Zustand)

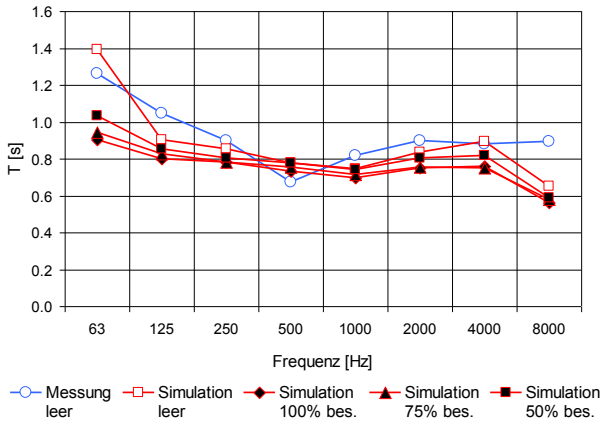

Abbildung 9 HS3, gemessene und simulierte Nachhallzeiten im leeren und besetzten Zustand

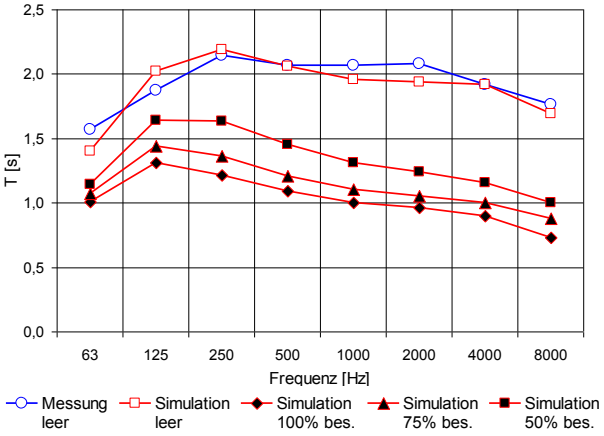

Abbildung 10 HS4, gemessene und simulierte Nachhallzeiten im leeren und besetzten Zustand (SQ1 und SQ2)

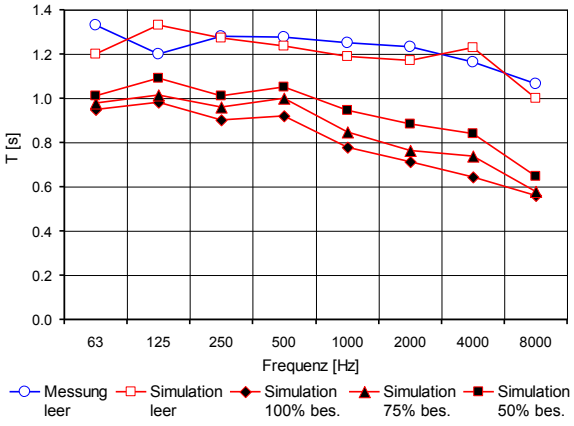

Abbildung 11 HS5, gemessene und simulierte Nachhallzeiten im leeren und besetzten Zustand

Gemessene und simulierte Schallpegelverteilungen

Die Abbildungen 12 bis 17 zeigen den Vergleich von gemessenen und simulierten Schallpegeln in Abhängigkeit von der Distanz zur Schallquelle. Die Messungen und Simulationen erfolgten für die leeren Hörsäle.

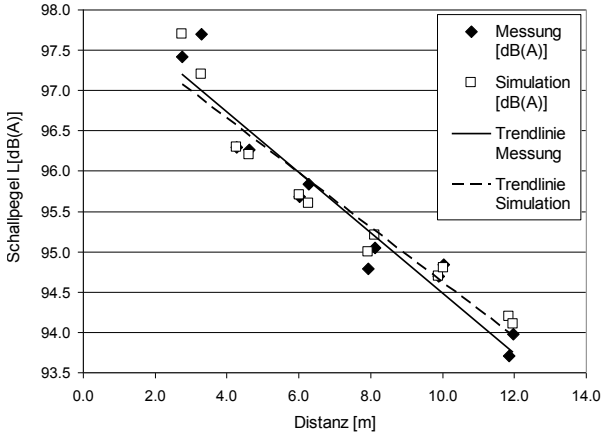

Abbildung 12 HS1, gemessene und simulierte A-bewertete Schallpegelverteilung

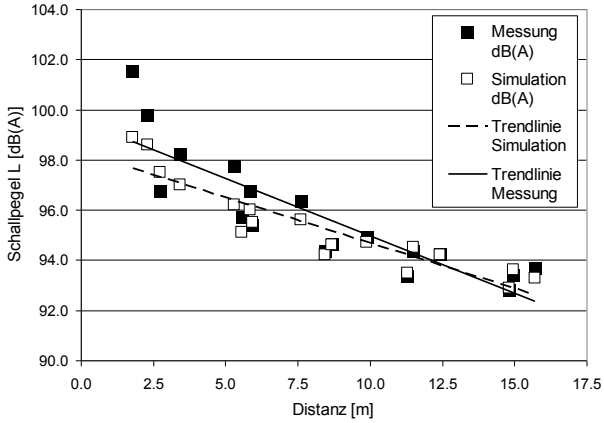

Abbildung 13 HS2, gemessene und simulierte A-bewertete Schallpegelverteilung

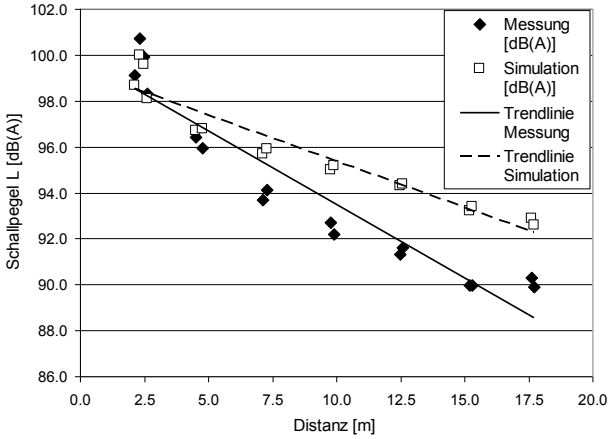

Abbildung 14 HS3, gemessene und simulierte A-bewertete Schallpegelverteilung

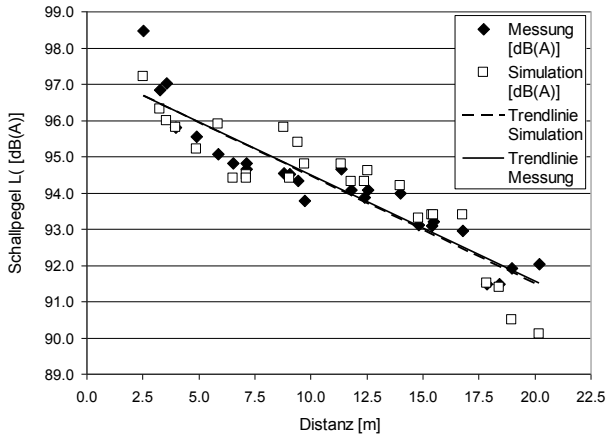

Abbildung 15 HS4, gemessene und simulierte A-bewertete Schallpegelverteilung (SQ1)

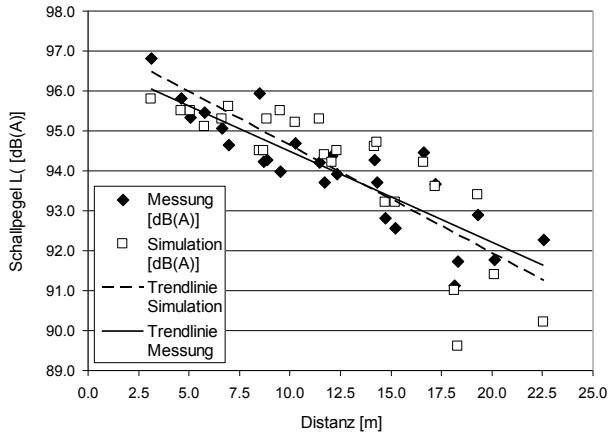

Abbildung 16 HS4, gemessene und simulierte A-bewertete Schallpegelverteilung (SQ2)

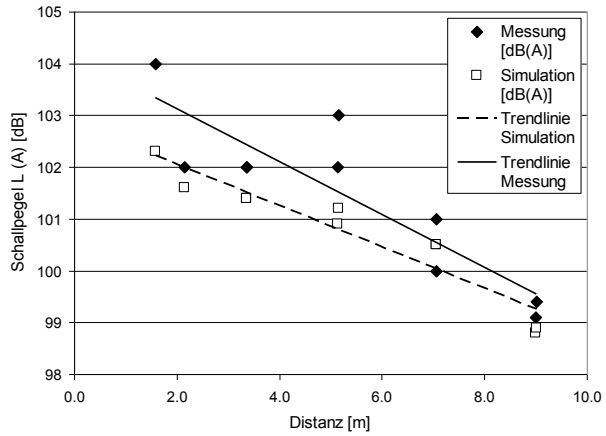

Abbildung 17 HS5, gemessene und simulierte A-bewertete Schallpegelverteilung

Gemessene und simulierte Sprachverständlichkeiten (STI-Werte)

In den Abbildungen 18 bis 23 sind die Sprachverständlichkeiten in Abhängigkeit von der Entfernung von der Schallquelle dargestellt. Die Messungen wurden in den leeren Hörsälen durchgeführt. Die Simulationen erfolgten sowohl im leeren Zustand als auch in 3 verschiedenen Besetzungszuständen. Die in diesen Abbildungen enthaltenen qualitativen Attribute beruhen auf den Angaben der Tabelle 4.

Tabelle 4 Richtwerte für die Sprachverständlichkeit (Fasold und Veres 2003)

STI	Verständlichkeit
0-0.3	unverständlich
0.3-0.45	schlecht
0.45-0.6	genügend
0.6-0.75	gut
0.75-1.0	ausgezeichnet

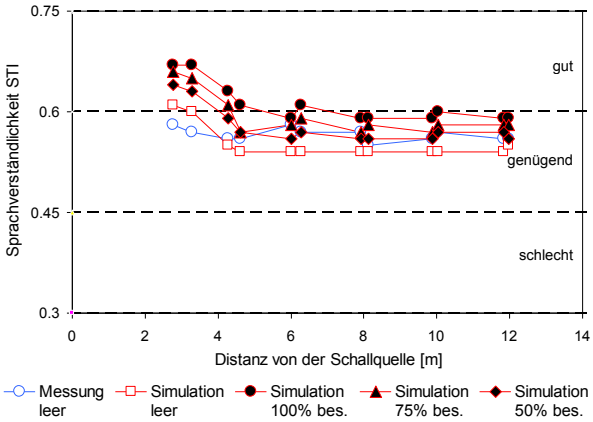

Abbildung 18 HS1, gemessene und simulierte Sprachverständlickeit

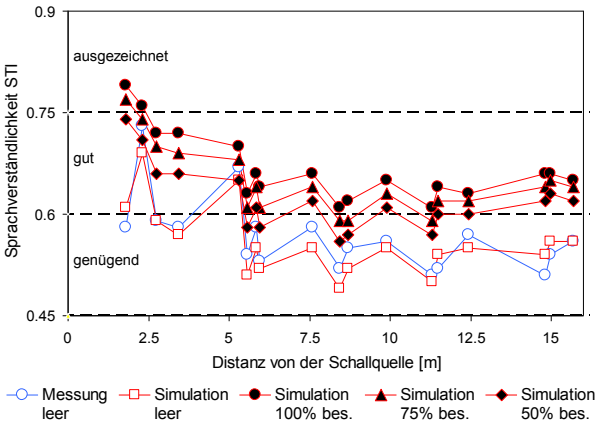

Abbildung 19 HS2, gemessene und simulierte Sprachverständlickeit

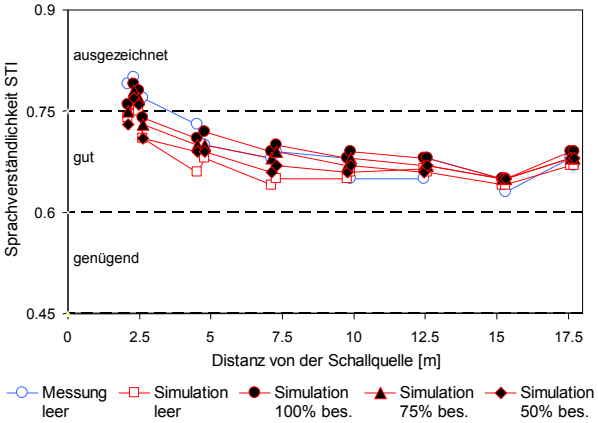

Abbildung 20 HS3, gemessene und simulierte Sprachverständlichkeit

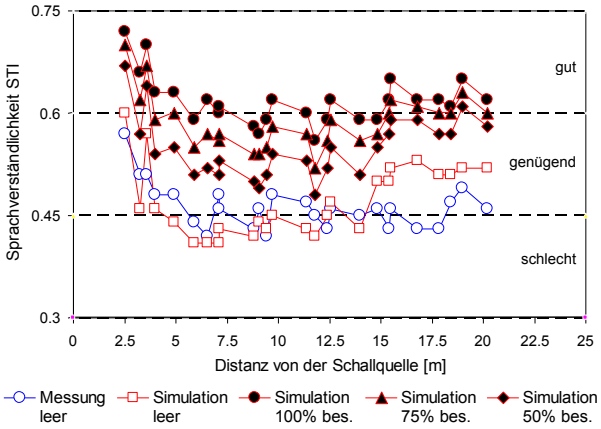

Abbildung 21 HS4, gemessene und simulierte Sprachverständlichkeit mit (SQ1)

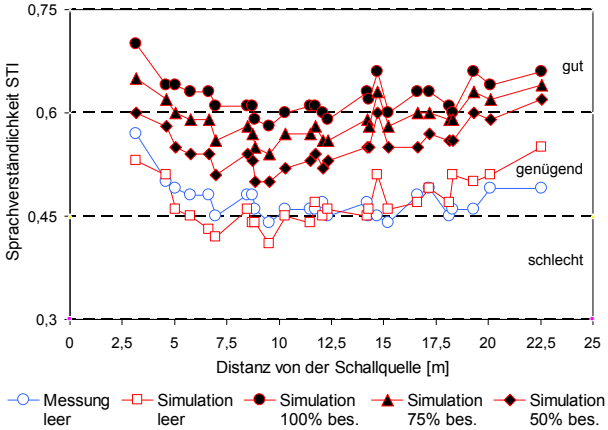

Abbildung 22 HS4, gemessene und simulierte Sprachverständlichkeit (SQ2)

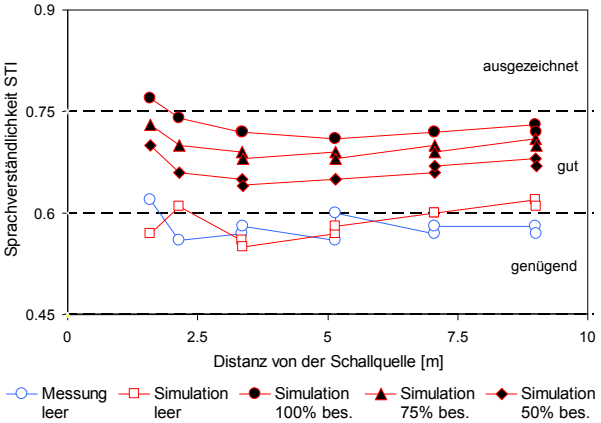

Abbildung 23 HS5, gemessene und simulierte Sprachverständlichkeit

DISKUSSION

Wie das Ergebnis der Gegenübereinstellung von Messung und Simulation (siehe Abbildung 24) deutlich zeigt, gibt es eine gute Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Nachhallzeiten der Hörsäle. Die frequenzabhängigen mittleren relativen Fehler der Simulation von allen Hörsälen übersteigen nicht 20%. Tabelle 5 zeigt, dass die größten Abweichungen bei 63Hz, 125Hz und 8000Hz sind.

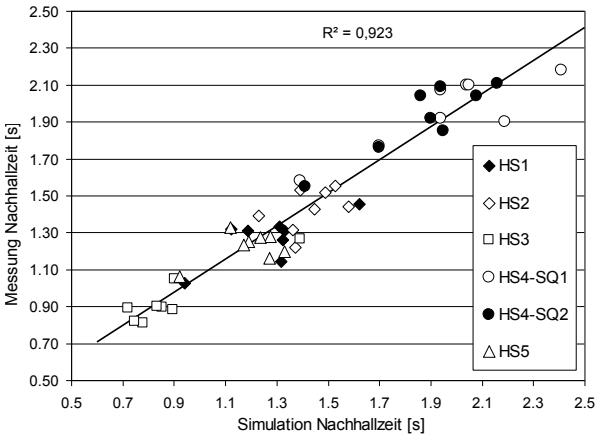

Abbildung 24 gemessene versus simulierte Nachhallzeiten aller Mikrophonpositionen in allen 5 Hörsälen

Tabelle 5 relativer Fehler (in %) der simulierten Nchhallzeiten im Vergleich zu den Messungen

	Oktavbandmittenfrequenz [Hz]							
Hörsaal	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
HS1	11.0	1.5	-2.2	-9.2	-15.0	4.8	15.4	-8.7
HS2	-1.5	3.6	12.3	1.3	-9.2	-2.0	9.7	-11.5
HS3	10.3	-18.2	-9.0	-4.9	-10.2	12.2	-9.1	-19.1
HS4	-11.7	7.4	2.0	-0.5	-5.7	-7.4	0.03	-4.1
HS5	-15.0	10.8	-0.5	-3.1	-4.8	-4.9	9.4	-13.6

Der Vergleich zwischen gemessener und simulierter Schallpegelverteilung zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung (siehe Abbildung 26). Die größte Abweichung zwischen simulierter und gemessener A-bewerteter Schallpegelverteilung von allen Hörsälen und allen Mikrophonpositionen liegt zwischen 1 bis 3dB. Beim Hörsaal HS3 wurden die Reflexionen überschätzt und die Absorptionen unterschätz. Anders sieht es im Hörsaal HS5 aus. Da wurden die Absorptionen überschätzt und die Reflexionen unterschätzt. Die Fehler der Simulationen sind wahrscheinlich auf Ungenauigkeiten in der Abschätzung der Materialeigenschaften zurück-zuführen.

Betrachtet man die gemessenen und simulierten Sprachverständlichkeitswerte aller Räume (siehe Abbildung 25), so findet man ebenfalls eine gute Übereinstimmung.
Die Resultate legen generell den Schluss nahe, dass raumakustische Simulation mit detaillierten Modellen relativ gute Annäherungen an die Messwerte erlaubt. Sollten allerdings (im Falle der bestehenden Räume), keine genauen Informationen zu den raumakustischen Eigenschaften der Raumoberflächen und Gegenständen vorliegen, wäre es unbedingt notwendig, die Simulationsmodelle zunächst mit Hilfe von gemessenen Werten zu kalibrieren.

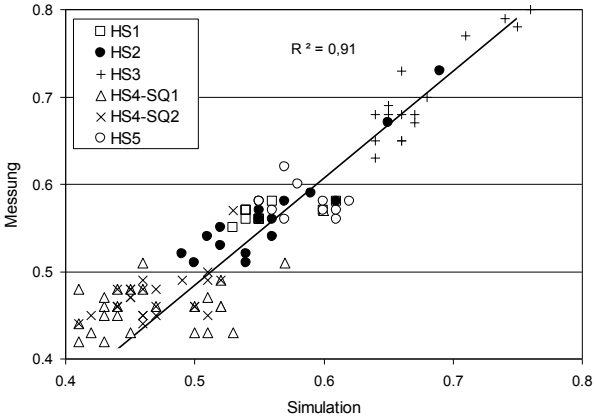

Abbildung 25 gemessene versus simulierte Sprachverständlichkeit aller 5 Hörsäle

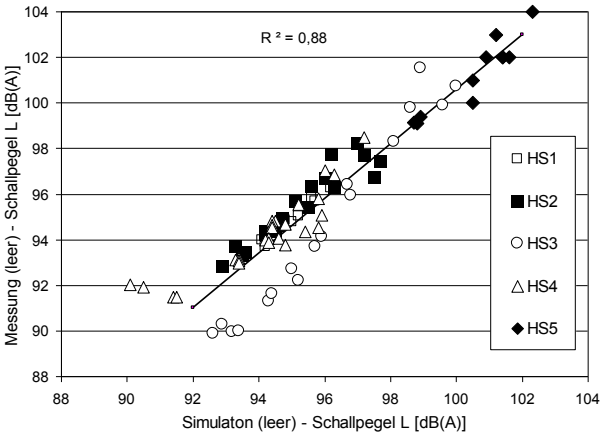

Abbildung 26 Messung versus Simulation der Schallpegelverteilung aller 5 Hörsäle

LITERATUR

Fasold, W. und Veres, E. 2003.Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. 2.Auflage. Huss-Medien.GmbH Berlin.

FORM-Z, 2009. Form-Z v4.0.1, (http://form Z.com).

ODEON, 2008. Odeon v.9.10, A/S Dänemark. (http://www.odeon.dk).