

Akustische Analyse der Liebfrauenkirche in Eisenerz

Toningenieur-Projekt

von

Roland Wetzl



Graz University of Technology

Institut für Signalverarbeitung + ...

Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot KUBIN

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Graf

Graz, Juni 2011

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine akustische Analyse einer Kirche vorgenommen und darauf aufbauende physikalische Umbauten simuliert.

Die Aufgabe dieser Arbeit bestand darin, die Vor- und Nachteile der Akustik der Liebfrauenkirche festzustellen und durch Simulation baulicher Maßnahmen zu verbessern.

Zuerst wurde der Istzustand der Kirche (die Liebfrauenkirche befindet in Eisenerz) anhand einiger akustischer Parameter gemessen. Die Ausarbeitung eines Messkonzeptes unter Verwendung von Grundrissplänen war die Basis dafür.

Die Messung der akustischen Parameter selbst wurde mit dem Programm WinMLS festgehalten. Danach wurde von der Kirche mit der Software CATT-Acoustic v8 ein detailliertes 3D-Modell erstellt. Mit Hilfe dieses 3D-Modells und der gemessenen akustischen Parameter, wurden die verwendeten Baumaterialien der Kirche so weit wie möglich zu rekonstruieren.

Nach der Kalibrierung des Modells konnte mit der Simulation baulicher sowie materialtechnischer Veränderungen begonnen werden. Dabei wurde jeweils speziell ein akustischer Parameter wie z.B. das Klarheitsmaß hergenommen und versucht einerseits mittels Veränderungen der Geometrie des Modells, andererseits durch Veränderungen verwendeter Materialien zu maximieren. Die Ergebnisse wurden mit der Software CATT-Acoustic ausgewertet und verglichen. Besonders die Maßnahme des Auflegens eines losen Teppichs auf den Steinboden brachte eine klare Verbesserung der Nachhallzeit aber auch der anderen Kennwerte.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung.....	4
1.1 Aufgabenstellung	
2 Geometrie der Kirche.....	5
2.1 Pläne	
2.2 Inneneinrichtung	
2.3 Grafische Darstellung durch ein 3D-Modell mit CATT-Acoustic	
3 Akustische Beschreibung der Kirche.....	12
3.1 Messung in der Kirche	
4 Ermittlung der Materialkomponenten.....	16
4.1 Berechnete akustische Kennwerte des 3D-Modells	
5 Simulationen zur Verbesserung der Akustik.....	18
5.1. Simulation 1	
5.1.1 Erzielte Verbesserungen	
5.2 Simulation 2	
5.2.1 Erzielte Verbesserungen	
6 Zusammenfassung und Interpretation.....	24
7 Abbildungsverzeichnis.....	24
8 Tabellenverzeichnis.....	25
9 Literaturverzeichnis.....	25

1 Einführung

Der Schall den unsere Ohren wahrnehmen, wird, abgesehen von der Schallquelle, in erster Linie von den geometrischen Gegebenheiten des umgebenden Raumes bestimmt. Im Freien gibt es praktisch keine Reflexionen und die Akustik wird rein vom Direktschall bestimmt. In einem Gebäude hingegen verhält sich die Akustik komplett anders. Die Reflexionen des Direktschalls sind nun nicht mehr ignorierbar und üben, je nach Abstand zur Schallquelle und Art des Raumes, einen großen Einfluss auf die Akustik aus.

Diese Reflexionen werden größtenteils durch die geometrischen Formen des Raumes und seines Inhalts sowie durch deren Materialien bzw. die akustischen Eigenschaften derer bestimmt.

Das in dieser Arbeit verwendete Verfahren zur akustischen Analyse eines Raumes kann man beinahe auf jeden beliebigen Raum anwenden.

1.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung dieses Projekts wurde in folgende Punkte gegliedert:

- Vermessen und Darstellen der Kirche in CATT-Acoustic
- Messung der akustischen Parameter der Kirche
- Auswertung der Messung in WinMLS
- Simulation der akustischen Parameter der Kirche in CATT-Acoustic und somit Feststellung der Materialparameter der Kirche
- Vorschläge zur Verbesserung der Akustik der Kirche durch bauliche Maßnahmen

2 Geometrie der Kirche



Abbildung 1: Foto der Liebfrauenkirche

Das Objekt der akustischen Analyse ist die Liebfrauenkirche Mariageburt in der Lindmoserstraße 3, in 8790 Eisenerz. Die Kirche, erstmals genannt im Jahre 1453, ist auch heute noch das geistliche Zentrum des Marktes. Benutzt wird sie allerdings hauptsächlich in den Wintermonaten zwischen Advent und Ostern da in dieser Zeit der Zugang zur wesentlich größeren Oswaldikirche versperrt ist.

2.1 Pläne

In den Abbildungen 2, 3 und 4 sind der Grundriss, Querschnitt und Längsschnitt des Messobjekts zu sehen. Das Volumen des Hauptraums der Kirche ist mit rund 500m^3 relativ klein.

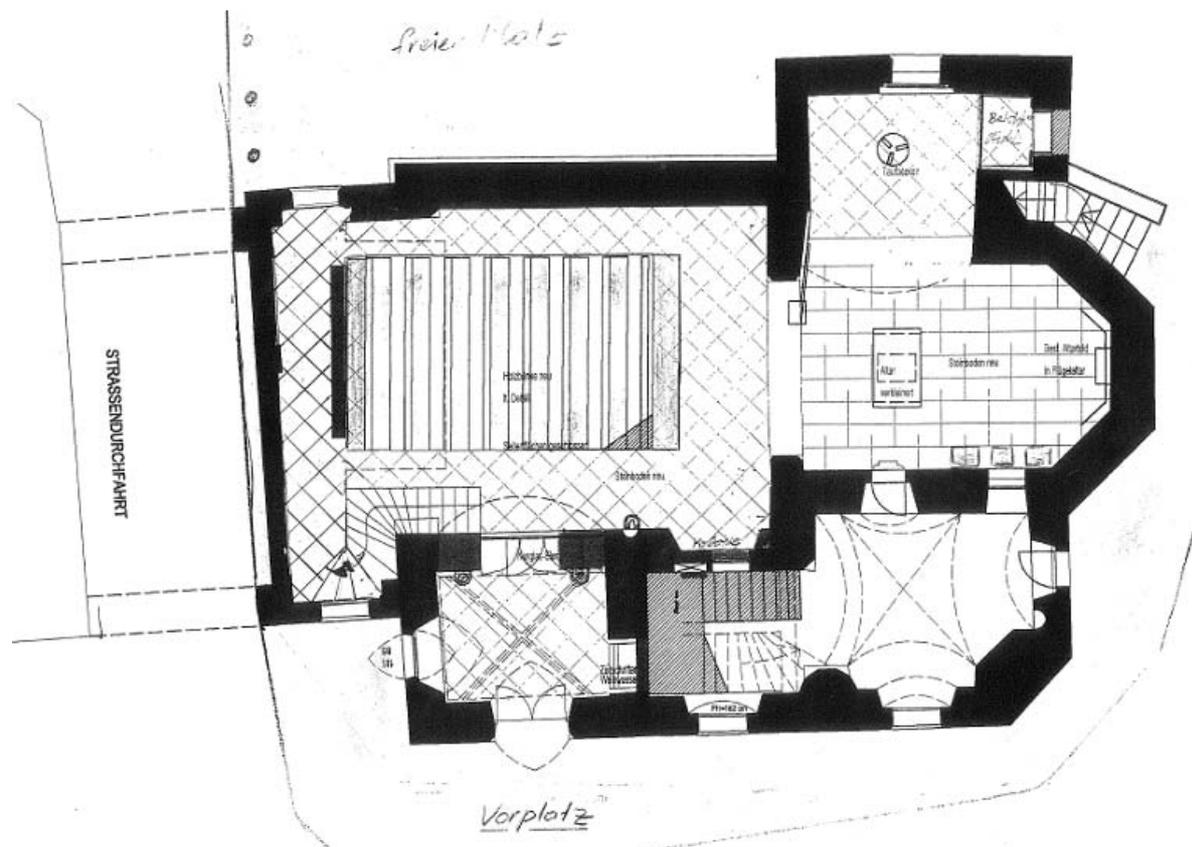


Abbildung 2: Grundriss der Liebfrauenkirche [1]

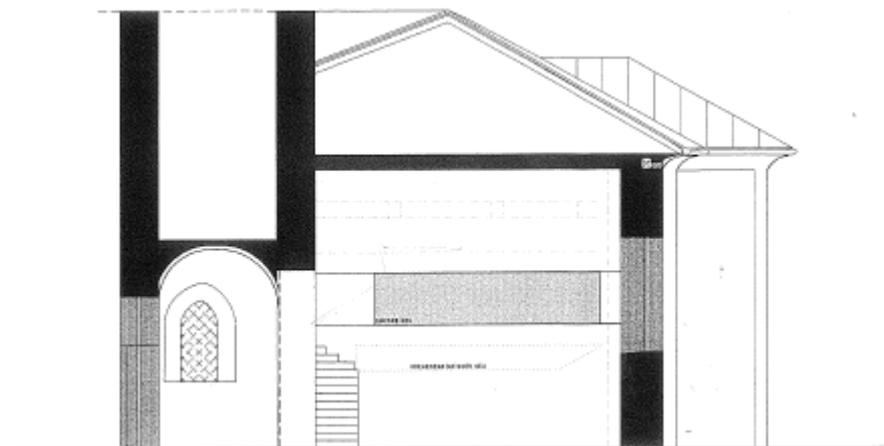


Abbildung 3: Querschnitt der Liebfrauenkirche [2]

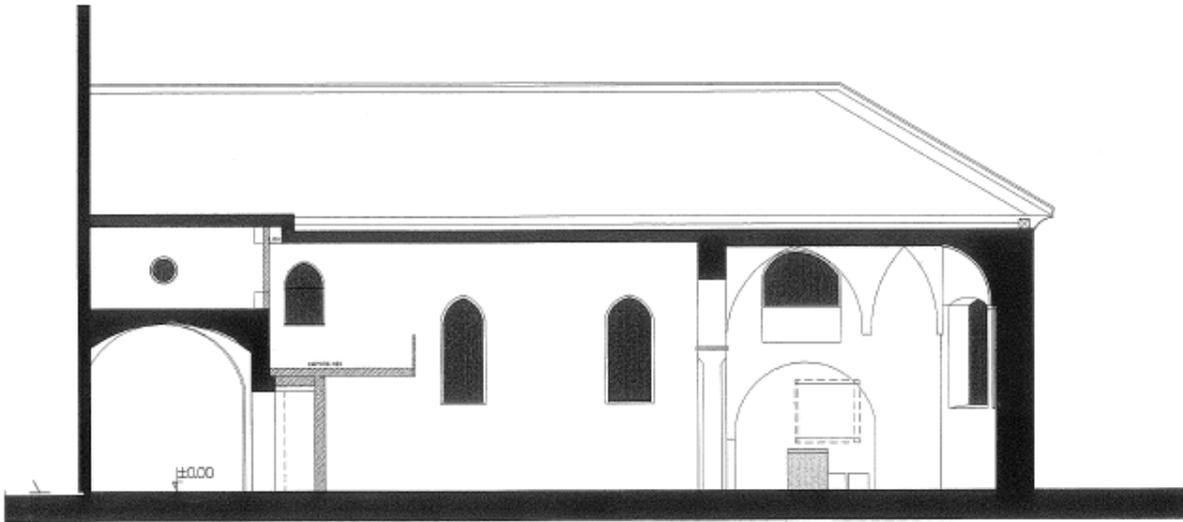


Abbildung 4: Längsschnitt der Liebfrauenkirche [3]

Die Kirche besteht aus 3 abgeschlossenen Räumen: dem Eingangsraum, dem Altarnebenraum und dem Hauptraum. Der für die Akustik interessante Hauptraum teilt sich auf in den Besucherbereich in der Mitte, dem Altarbereich vorne, dem Bereich neben dem Altar vorne links, der Empore hinten mit der Stiege und dem Emporenhinterraum. Es gibt 12 Fenster unterschiedlicher Größe und Bauart nach außen, die 2 Fenster bei der Stiege sind von dieser allerdings größtenteils verdeckt und daher wenig relevant.

2.2 Inneneinrichtung

Folgende Inneneinrichtung wurde als relevant erachtet und für das 3D-Modell berücksichtigt:
Altar, Altarbild, Redepult, Nebenaltarraumkasten, Nebenaltarraumbesucherbänke, Beichtstuhl, Taufbecken, Besucherraumbänke, Emporenbänke, Orgel, Emporenhinterbaubänke, Emporenhinterbaukasten,

Die Abbildungen 5 bis 10 zeigen Fotos von den für die Akustik relevanten Innenräumen bzw. der Einrichtung.



Abbildung 5: Vorderansicht des Hauptraumes



Abbildung 6: rechte Seitenansicht des Hauptraumes



Abbildung 7: Hinteransicht des Hauptraumes



Abbildung 8: Empore mit Orgel



Abbildung 9: Emporenhinterraum



Abbildung 10: Seitenschiff des Altarraumes

2.3 Grafische Darstellung durch ein 3D-Modell mit CATT-Acoustic

Anhand der Pläne, Fotos und eigener Messungen wurde mit dem Programm CATT-Acoustic ein 3D-Modell erstellt. Dafür mussten gut 600 Punkte und rund 380 Flächen in das Programm eingegeben werden. In Abbildung 11 sind der Grundriss, Aufriss, Seitenriss und eine 3D-Ansicht zu sehen.

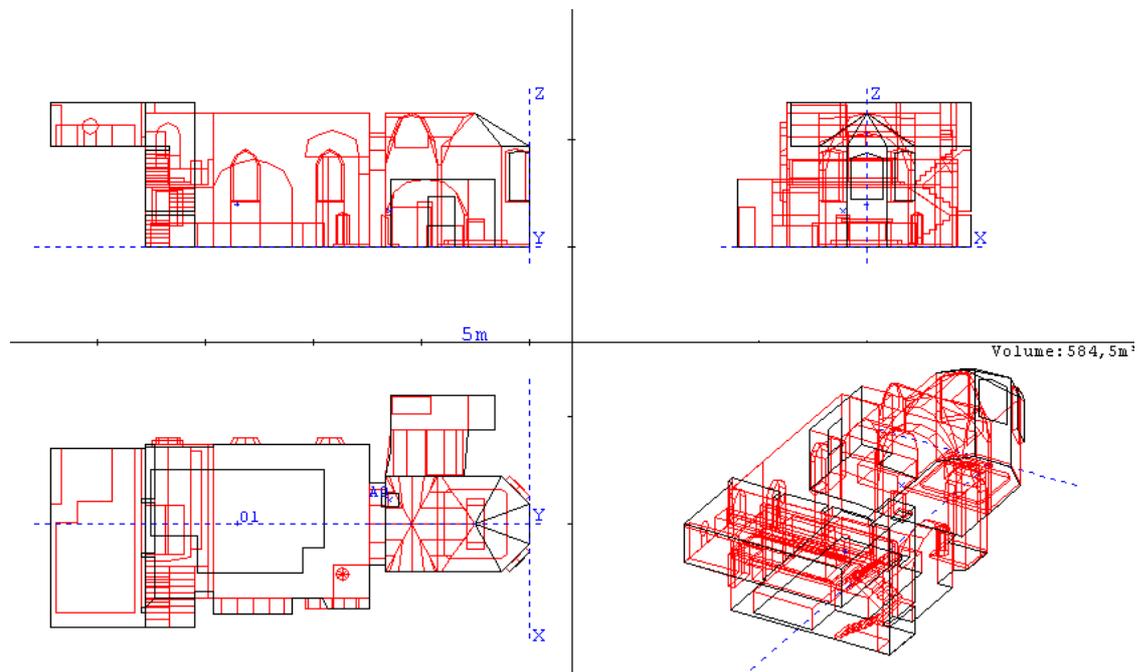


Abbildung 11: 3D-Modell der Liebfrauenkirche

Abbildung 12 zeigt eine farbige 3D-Ansicht, bei der gleiche Farben gleichen Materialien entsprechen.

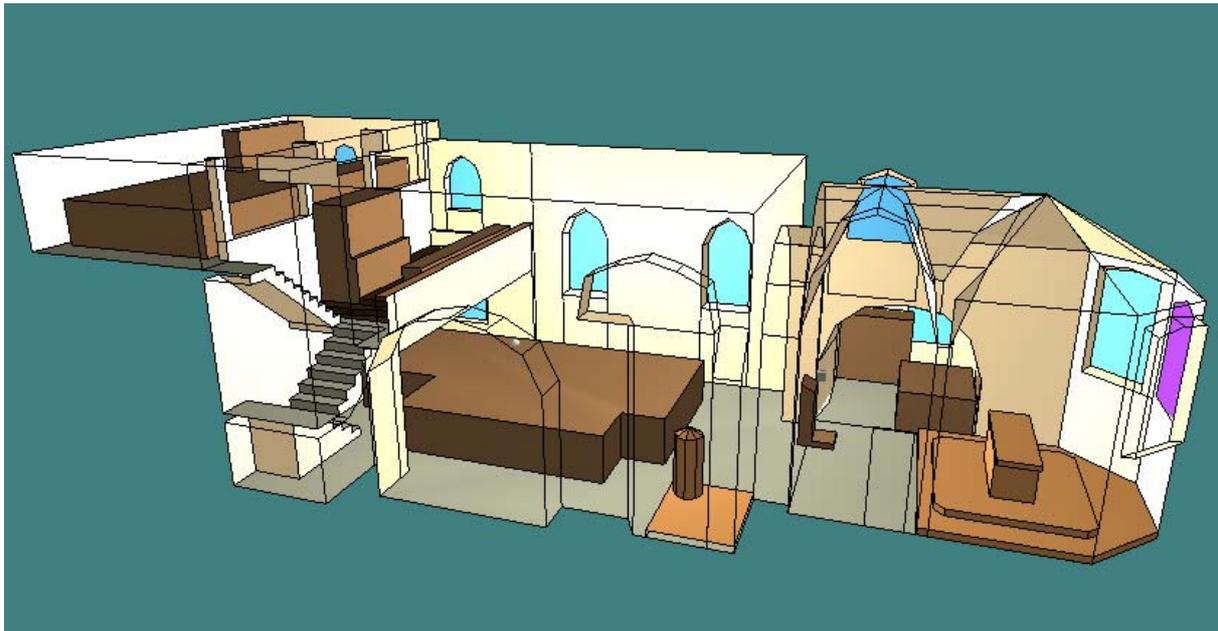


Abbildung 12: Färbige Ansicht des 3D-Modells

3 Akustische Beschreibung der Kirche

Als akustische Kennwerte wurden für die Analyse der Kirche folgende Parameter hergenommen:

Nachhallzeit:

Unter der Nachhallzeit versteht man jenes Zeitintervall, innerhalb dessen der Schalldruck in einem Raum bei plötzlichem Verstummen der Schallquelle um 60 dB abnimmt. In diesem Fall wird die Nachhallzeit aufgrund der Abnahme von 60 dB T_{60} benannt. Sollte eine Messung von 60 dB Pegelabnahme nicht möglich sein, wird oft eine geringere Pegeldifferenz wie z.B. 15/20/30 dB gemessen und extrapoliert.

Deutlichkeitsgrad D-50:

Der Deutlichkeitsgrad D-50 ist die Schallenergie innerhalb der ersten 50 ms bezogen auf die gesamte Schallenergie, gemessen in %. Er misst die Deutlichkeit der Sprache und sollte im Idealfall höher als 50% sein.

Klarheitsmaß C-80:

Das Klarheitsmaß C-80 ist die logarithmisch bewertete Schallenergie innerhalb der ersten 80 ms bezogen auf die gesamte Schallenergie. Es beschreibt die Durchsichtigkeit der Musik und liegt

optimalerweise zwischen -1 und +3 dB.

RASTI - Rapid Speech Transmission Index:

Der Rapid Speech Transmission Index berücksichtigt als Berechnungsmethode den Nachhall, die Störgeräusche, die Raumreflexionen und die Richtcharakteristik der Schallquelle. Der Sprachverständlichkeitsindex sollte zumindest 45% betragen, ab 60% spricht man von guter Sprachverständlichkeit.

3.1 Messung in der Kirche

Um die Kirche auch akustisch beschreiben zu können, wurde eine Messung vor Ort durchgeführt in der unter anderem die oben beschriebenen Parameter gemessen wurden.

Messort: Liebfrauenkirche Mariageburt, Lindmoserstraße 3, 8790 Eisenerz.

Raumvolumen: ~490 m³

Temperatur und rel. Feuchte: 10,8° Celsius bei 62% rel. Luftfeuchtigkeit

Verwendete Schallquelle: Dodekaeder Lautsprecher Norsonic 170

Verwendete Mikrofone: 4 Funkmikrophone (AKG Kugel CK92)

Messaufbau: Als kugelförmige Quelle diente ein Dodekaeder Lautsprecher, welcher einmal am Pult stand um den sprechenden bzw. singenden Pfarrer zu simulieren und einmal direkt vor der Orgel platziert wurde um die Schallabstrahlung der Orgel zu simulieren. Als Messempfänger wurde eine Mikrofonaufstellung mit 16 Mikrofonen verwendet (Anordnung siehe Abbildung 13). Die 16 Mikrofone wurden so verteilt, dass 12, im Abstand von jeweils 2 m zueinander, die Kirchenbänke im Hauptraum abdecken, 2 decken die Kirchenbänke auf der Empore ab und 2 weitere wurden im Altarraum installiert. Sie haben jeweils die Höhe von 1,2 m was ungefähr der Ohrhöhe eines sitzenden Erwachsenen entspricht. Die Quelle 1 (am Pult) wurde auf einer Höhe von 1,65 m installiert, was ungefähr der Ohrhöhe eines stehenden Erwachsenen entspricht.

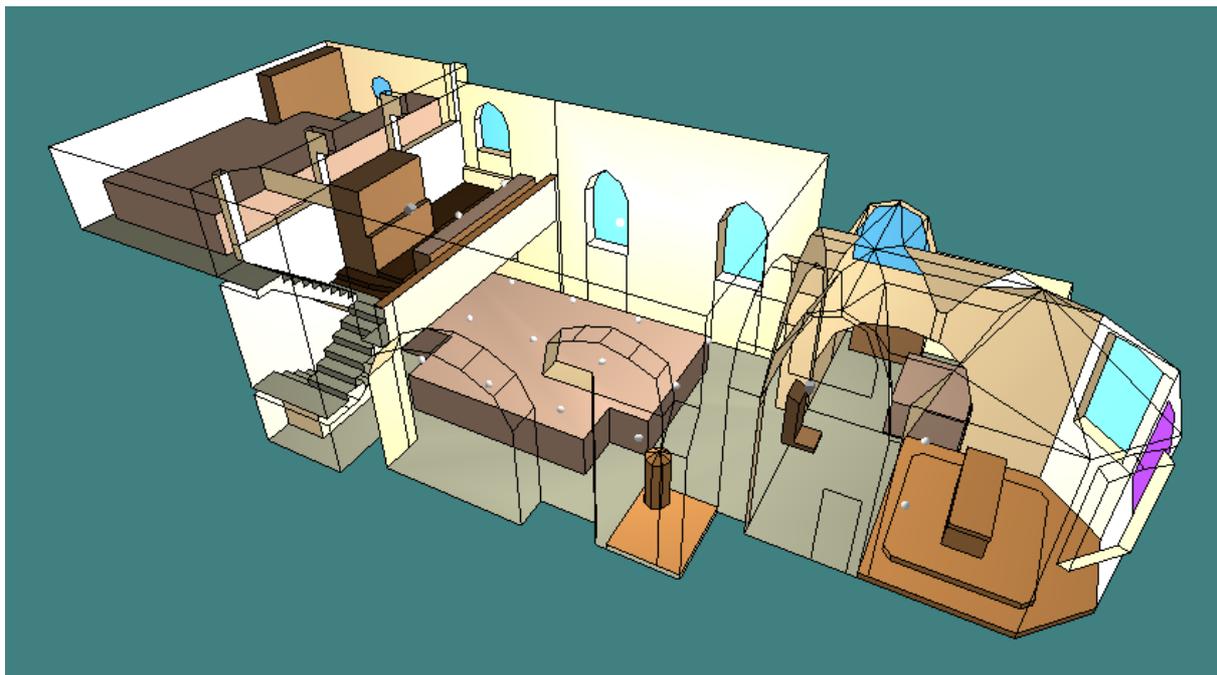


Abbildung 13: Anordnung der Quellen bzw. des Mikrofonaufstellung

Messdurchführung: Da nur 4 Funkmikrofone zur Verfügung standen, wurden jeweils vier Messungen pro Quelle durchgeführt um ein das ganze Mikrofonfeld von 16 Mikrofonen abbilden zu können. Um auch die akustischen Werte einer besetzten Kirche messen zu können wurde ein Bühnenmolton auf den Besucherbänken im Hauptraum und der Empore aufgelegt. Zur Messung des unbesetzten und des besetzten Zustandes waren also gesamt 16 Messungen notwendig.

Auswertung der Messergebnisse: Die Messwerte wurden jeweils für die gesamte Mikrofonaufstellung bei den Frequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz und 4 kHz arithmetisch gemittelt. Die daraus ermittelten Messwerte wurden nun über den ganzen Frequenzbereich arithmetisch gemittelt. So ergibt sich jeweils ein Durchschnittswert pro Kennwert pro Quelle.

	T20	T30	RASTI	D50	C80
Quelle 1, unbesetzt, gemessen	2,2 s	2,2 s	42,56%	28,24%	-1,75 dB
Quelle 2, unbesetzt, gemessen	2,2 s	2,2 s	41,88%	23,90%	-2,40 dB
Quelle 1, besetzt, gemessen	1,8 s	1,8 s	47,19%	33,32%	-0,44 dB
Quelle 2, besetzt, gemessen	1,8 s	1,8 s	46,06%	28,24%	-1,29 dB

Tabelle 1: Auswertung der gemessenen Werte

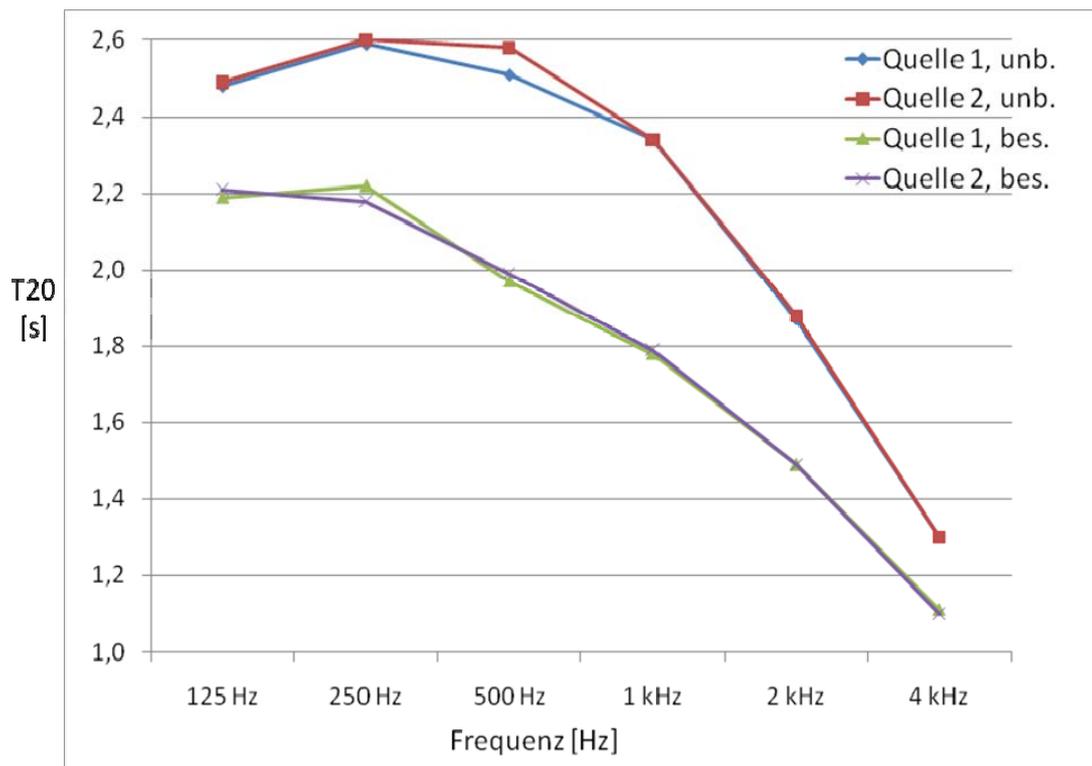


Abbildung 14: Gemessene Nachhallzeit T20

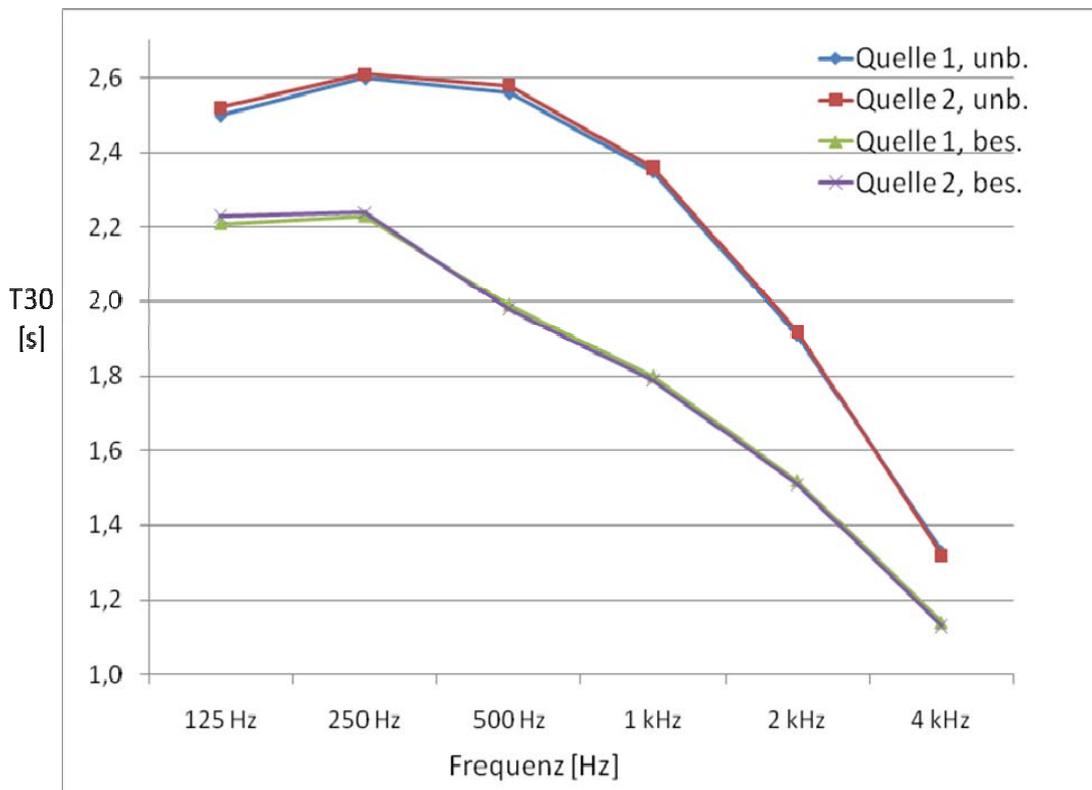


Abbildung 15: Gemessene Nachhallzeit T30

Die Quelle 1 in Tabelle 1 befindet sich beim Pult, Quelle 2 bei der Orgel auf der Empore. Die Nachhallzeiten sind für einen Raum dieser Größe relativ hoch. Bezüglich des Sprachverständlichkeitsindex RASTI schneidet die Akustik der Kirche eher mäßig ab, die Deutlichkeit der Sprache ist sehr schlecht. Die Durchsichtigkeit der Musik hingegen ist nicht so schlecht und vor allem mit besetzten Bänken knapp im akzeptablen Bereich. Deutliche Unterschiede sind auf jeden Fall zwischen besetztem und unbesetztem Zustand zu erkennen. Dies hat vor allem damit zu tun, dass der Raum zu hallig ist und das Publikum mit seinem hohen Absorptionskoeffizienten dem etwas entgegenwirkt.

4 Ermittlung der Materialkomponenten

Um eine richtige Simulation von baulichen bzw. materialtechnischen Veränderungen mit Hilfe des in CATT-Acoustic erstellten 3D-Modells zu ermöglichen, müssen davor die Absorptionswerte der in der Kirche vorkommenden Materialien bestimmt werden.

4.1 Berechnete akustische Kennwerte des 3D-Modells

Zur Ermittlung dieser Werte wurden zuerst Standardwerte für die Baumaterialien der im 3D-Modell verwendeten Flächen verwendet und diese daraufhin geringfügig verändert. Die

	T15/20	T30	RASTI	D50	C80
Quelle 1, unbesetzt, gemessen	2,2 s	2,2 s	42,56%	28,24%	-1,75 dB
Quelle 1, unbesetzt, berechnet	2,3 s	2,3 s	40,06%	26,76%	-1,97 dB
Quelle 2, unbesetzt, gemessen	2,2 s	2,2 s	41,88%	23,90%	-2,40 dB
Quelle 2, unbesetzt, berechnet	2,2 s	2,3 s	43,88%	27,43%	-1,84 dB
Quelle 1, besetzt, gemessen	1,8 s	1,8 s	47,19%	33,32%	-0,44 dB
Quelle 1, besetzt, berechnet	1,8 s	1,8 s	45,00%	32,06%	-0,79 dB
Quelle 2, besetzt, gemessen	1,8 s	1,8 s	46,06%	28,24%	-1,29 dB
Quelle 2, besetzt, berechnet	1,8 s	1,8 s	47,81%	32,18%	-0,63 dB

Tabelle 2: Vergleich der gemessenen Werte mit den mittels 3D-Modells berechneten Werten

Durchschnittswerte wurden beim 3D-Modell auf die gleiche Weise ermittelt wie die gemessenen Durchschnittswerte in der Kirche. Der Vergleich der Berechnung der im Kapitel 3 besprochenen Kennwerte in CATT-Acoustic mit den gemessenen Werten ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Nachhallzeiten sind hierbei beinahe identisch, die anderen Werte stimmen zumindest einigermaßen überein. Die erhöhten RASTI-, D50- und C80-Werte des 3D-Modells bei Quelle 2 sind darauf zurückzuführen, dass in der Berechnung die Werte der Mikrofone 13 und 14 (beide auf der Empore stehend) etwas aus dem Rahmen gefallen sind (sie waren zu hoch). Scheinbar bewertet das Programm die Situation ganz in der Nähe stehender Mikrofone anders als die Wirklichkeit.

Im Wissen, dass sich dieses Problem auch bei einer anderen Wahl der Absorptionswerte nicht vermeiden lassen würde, habe ich beschlossen mit diesen Absorptionswerten zu arbeiten.

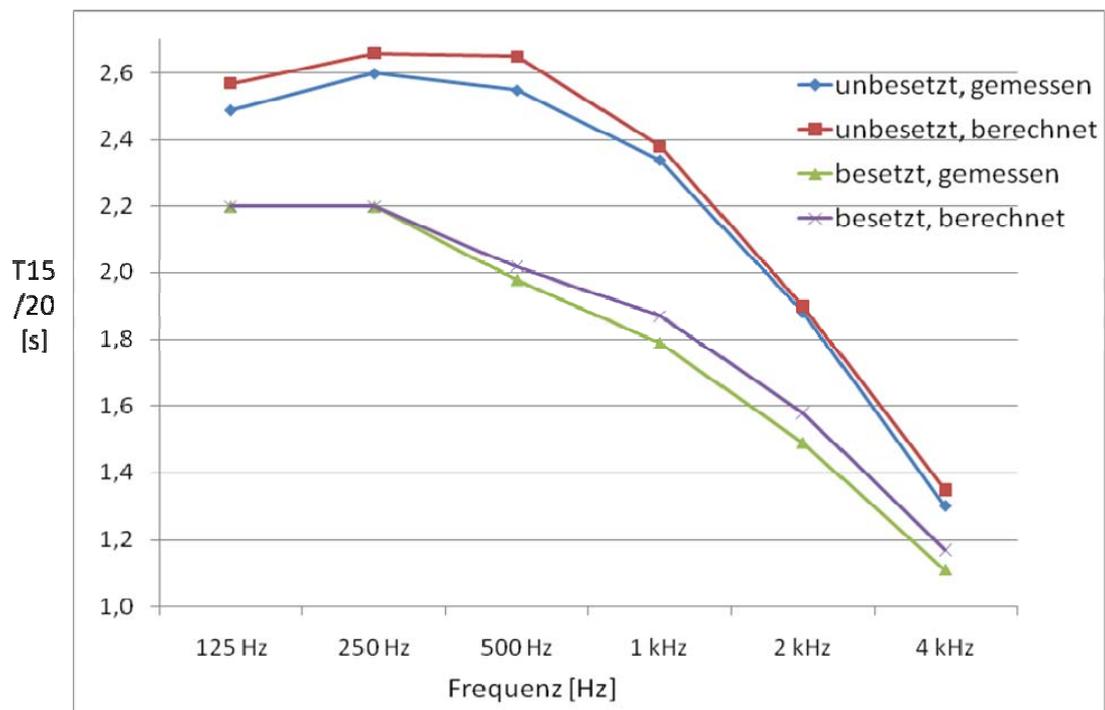


Abbildung 16: Vergleich gemessene und berechnete Nachhallzeit T15/20

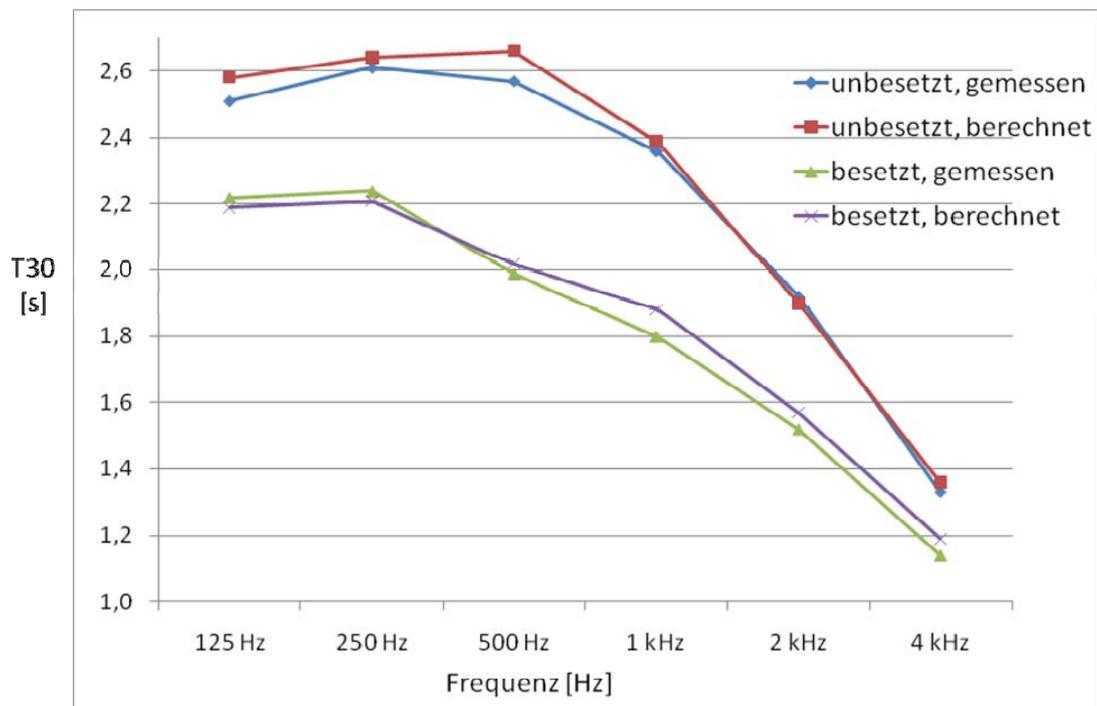


Abbildung 17: Vergleich gemessene und berechnete Nachhallzeit T30

5 Simulationen zur Verbesserung der Akustik

Bei diesem Projekt geht es nicht nur um die Analyse der Akustik der Liebfrauenkirche, sondern insbesondere auch um Vorschläge zur Verbesserung dieser.

Aufgrund des großen Aufwands zur Ermittlung der Durchschnittswerte der fünf Kennwerte (für jede Simulation mussten 1920 Werte ausgewertet werden), wurde jedoch auf eine große Anzahl an Simulationen innerhalb dieses Toningenieurprojektes verzichtet. Letztendlich wurde je eine bauliche und eine materialbedingte Simulation durchgeführt.

5.1 Simulation 1

In der Liebfrauenkirche befinden sich hinter der Orgel weitere Besucherbänke (siehe Abbildung 9) welche bisher nicht berücksichtigt wurden. Bei diesem Änderungsvorschlag wurde versucht die

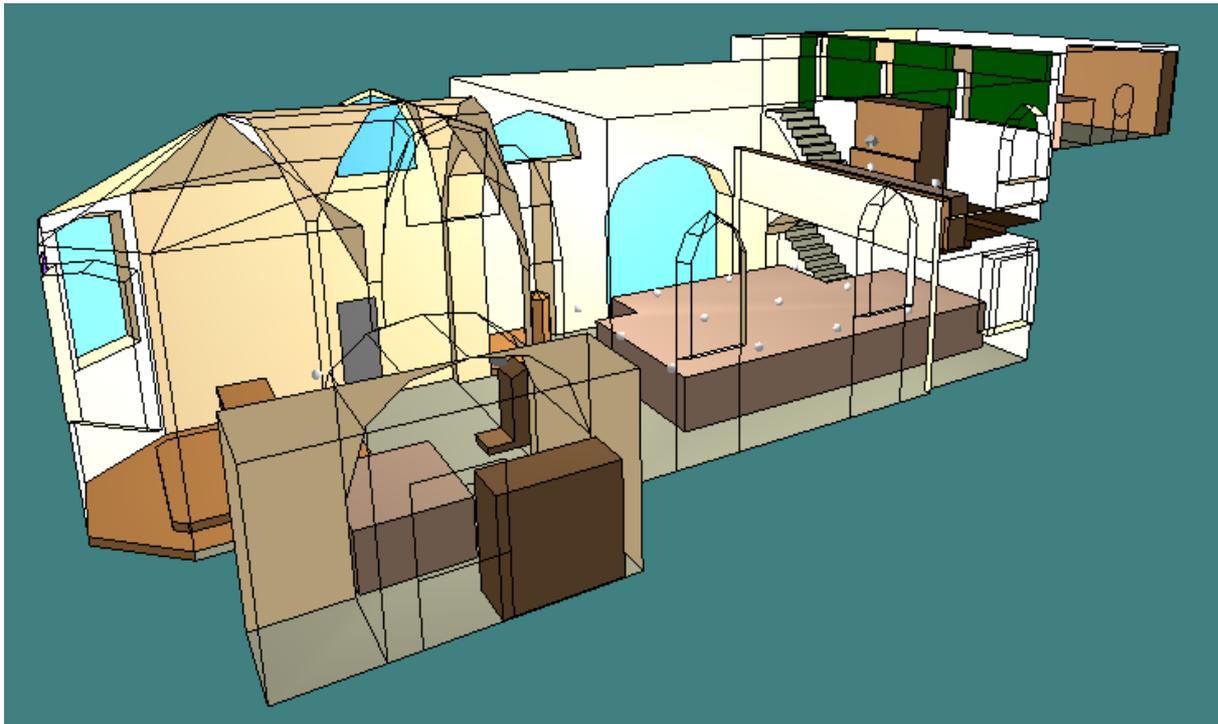


Abbildung 18: 3D-Modell der Simulation 1

Situation der Besucher auf diesen Plätzen zu verbessern, indem eine Glaswand direkt hinter der Orgel eingebaut und der damit abgeteilte hintere Raum extra mit Lautsprechern beschallt wird. In Abbildung 18 sind diese Isolierglasscheiben grün dargestellt.

5.1.1 Erzielte Verbesserungen

Nachdem die Qualität der Beschallung durch die Lautsprecher außer Frage steht, war es interessant wie sich diese bauliche Maßnahme auf die Akustik der anderen Besucherplätze auswirkt.

Leider ist in Tabelle 3 deutlich zu sehen, dass sich insbesondere die Nachhallzeit, welche ohnehin schon recht hoch ist, um 0,2 s erhöht. Damit verschlechtert sich auch die Sprachverständlichkeit, Deutlichkeit der Sprache sowie die Durchsichtigkeit der Musik – insbesondere dann wenn die Orgel spielt. Eine Verbesserung könnte eine zweite Glasscheibe im Abstand von einigen Zentimetern bringen, ob dies aber ausreicht um die Akustik dieser Simulation deutlich zu verbessern ist fraglich.

	T15/20	T30	RASTI	D50	C80
Quelle 1, unbesetzt, Sim 1	2,5 s	2,4 s	38,63%	25,56%	-2,34 dB
Quelle 1, unbesetzt, berechnet	2,3 s	2,3 s	40,06%	26,76%	-1,97 dB
Quelle 2, unbesetzt, Sim 1	2,5 s	2,4 s	40,69%	24,55%	-2,56 dB
Quelle 2, unbesetzt, berechnet	2,2 s	2,3 s	43,88%	27,43%	-1,84 dB
Quelle 1, besetzt, Sim 1	2 s	2 s	43,25%	30,44%	-1,17 dB
Quelle 1, besetzt, berechnet	1,8 s	1,8 s	45,00%	32,06%	-0,79 dB
Quelle 2, besetzt, Sim 1	2 s	2 s	45,06%	28,15%	-1,49 dB
Quelle 2, besetzt, berechnet	1,8 s	1,8 s	47,81%	32,18%	-0,63 dB

Tabelle 3: Kennwerte der Simulation 1 im Vergleich zur Berechnung

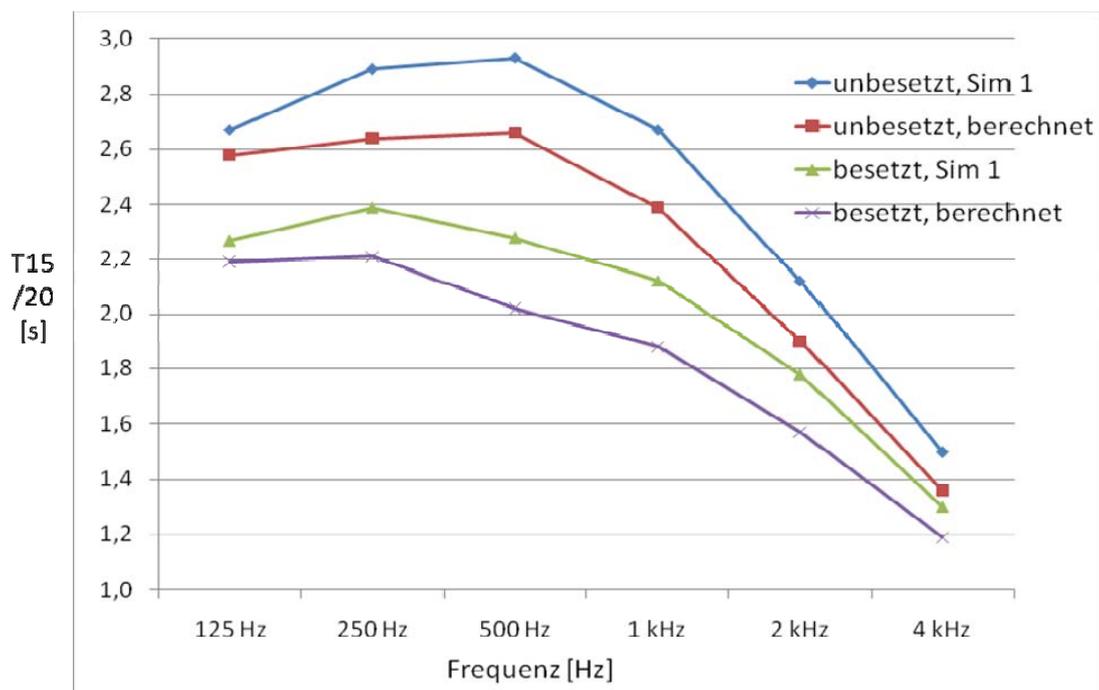


Abbildung 19: Vergleich der Nachhallzeit T15/20 der Simulation 1 mit der Berechnung

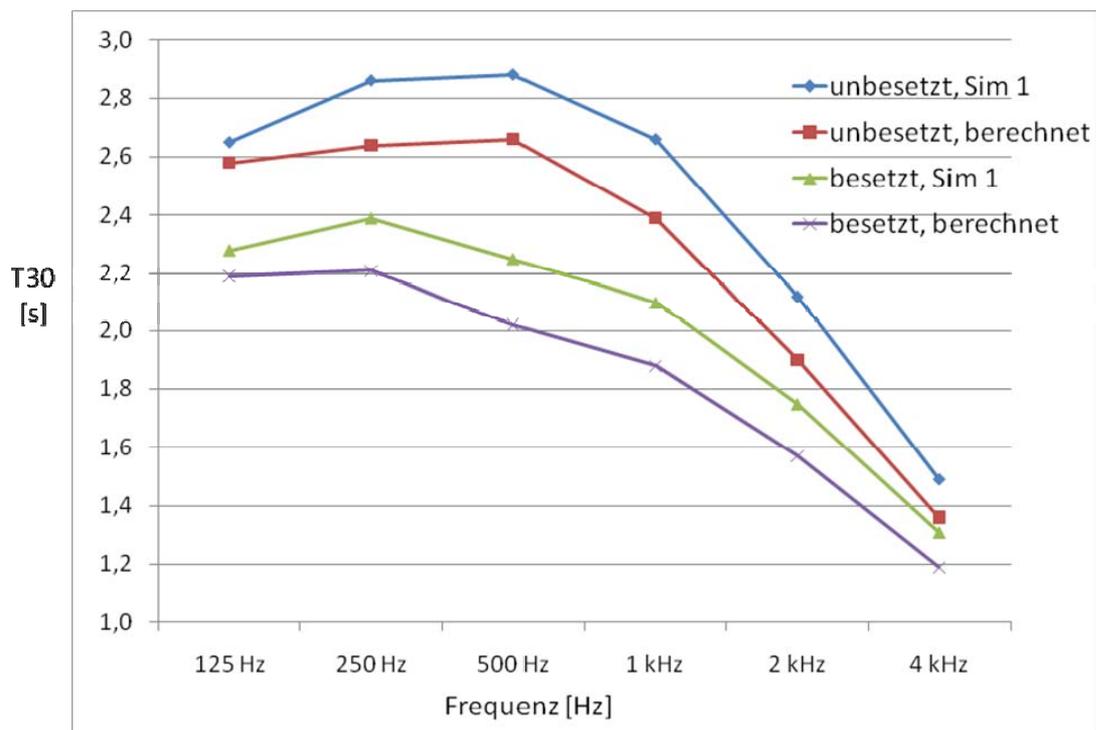


Abbildung 20: Vergleich der Nachhallzeit T30 der Simulation 1 mit der Berechnung

5.2 Simulation 2

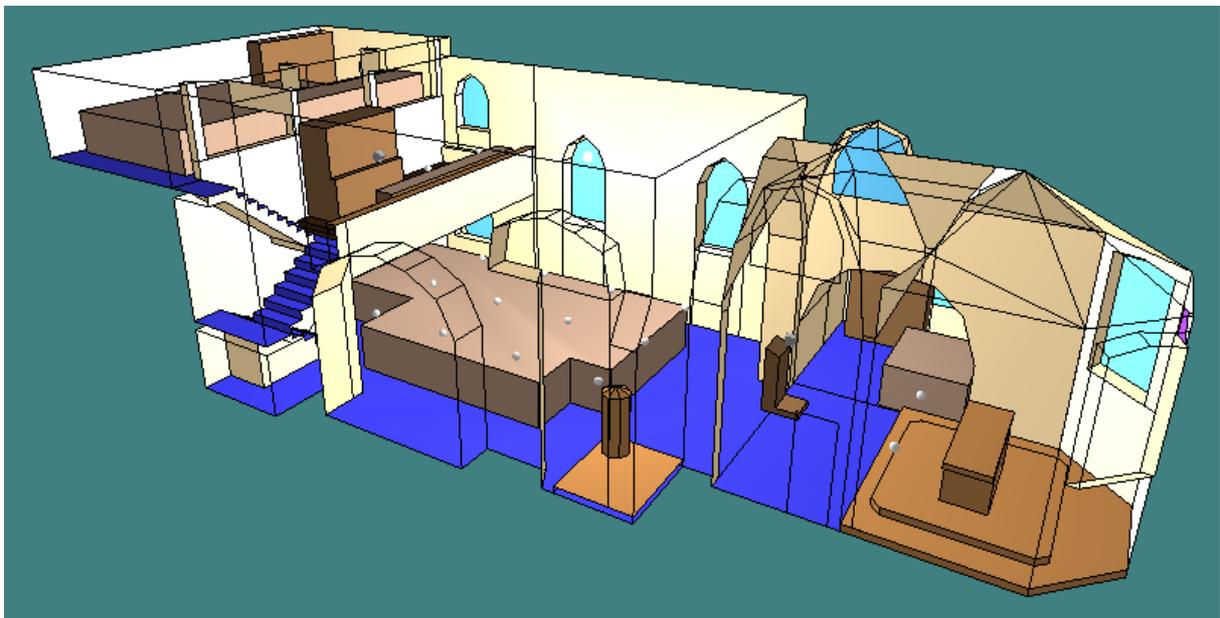


Abbildung 21: 3D-Modell der Simulation 2

Als zweite Simulation wurde eine kleine Änderung am verwendeten Material vorgesehen. Genauer gesagt wird hier vorgeschlagen, auf den Steinböden einen 8mm dicken Teppich lose aufzulegen. Dieser Teppich wird in Abbildung 21 dunkelblau abgebildet.

Durch diese Maßnahme wird versucht den Absorptionsgrad zu erhöhen und damit die Reflexionen zu verringern.

5.2.1 Erzielte Verbesserungen

Im Vergleich zu den Ergebnissen von Simulation 1 konnte hier trotz eigentlich relativ einfach umzusetzenden Änderungen ein recht großer, positiver Effekt erzielt werden. Wie aus Tabelle 4 ersichtlich ist, werden alle Kennwerte deutlich verbessert.

	T15/20	T30	RASTI	D50	C80
Quelle 1, unbesetzt, Sim 2	1,8 s	1,8 s	46,81%	34,26%	-0,33 dB
Quelle 1, unbesetzt, berechnet	2,3 s	2,3 s	40,06%	26,76%	-1,97 dB
Quelle 2, unbesetzt, Sim 2	1,8 s	1,8 s	49,94%	33,31%	-0,40 dB
Quelle 2, unbesetzt, berechnet	2,2 s	2,3 s	43,88%	27,43%	-1,84 dB
Quelle 1, besetzt, Sim 2	1,6 s	1,6 s	50,31%	38,78%	0,66 dB
Quelle 1, besetzt, berechnet	1,8 s	1,8 s	45,00%	32,06%	-0,79 dB
Quelle 2, besetzt, Sim 2	1,6 s	1,6 s	53,50%	37,45%	0,61 dB
Quelle 2, besetzt, berechnet	1,8 s	1,8 s	47,81%	32,18%	-0,63 dB

Tabelle 4: Kennwerte der Simulation 2 im Vergleich zur Berechnung

Auffallend ist auch, dass diese Maßnahme zur Verbesserung der Akustik besonders in unbesetztem Zustand einen größeren Effekt erzielt. In vollbesetztem Zustand erreicht die Akustik dann bei der Nachhallzeit und Durchsichtigkeit für diese Raumgröße akzeptable Werte. Zu guten Werten im Bereich der Sprachdeutlichkeit und -verständlichkeit fehlt zwar noch einiges, in einer Kirche kann man dies aber auch nicht erwarten bzw. ist dies auch nicht unbedingt von höchster Priorität.

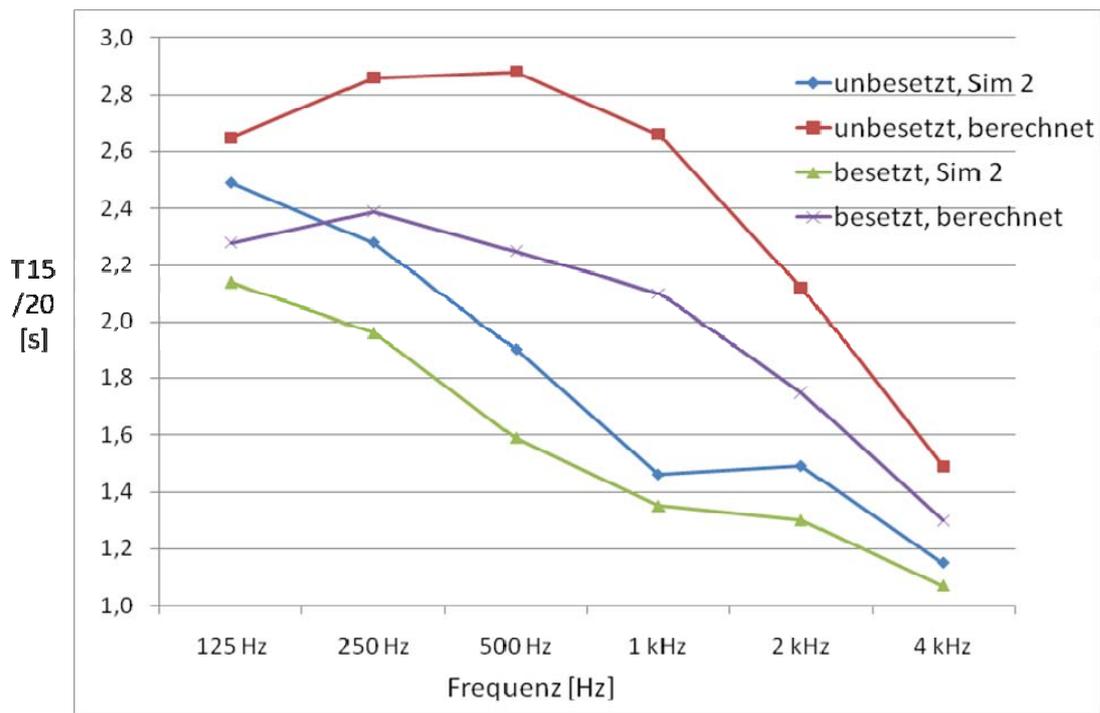


Abbildung 22: Vergleich der Nachhallzeit $T_{15/20}$ der Simulation 2 mit der Berechnung

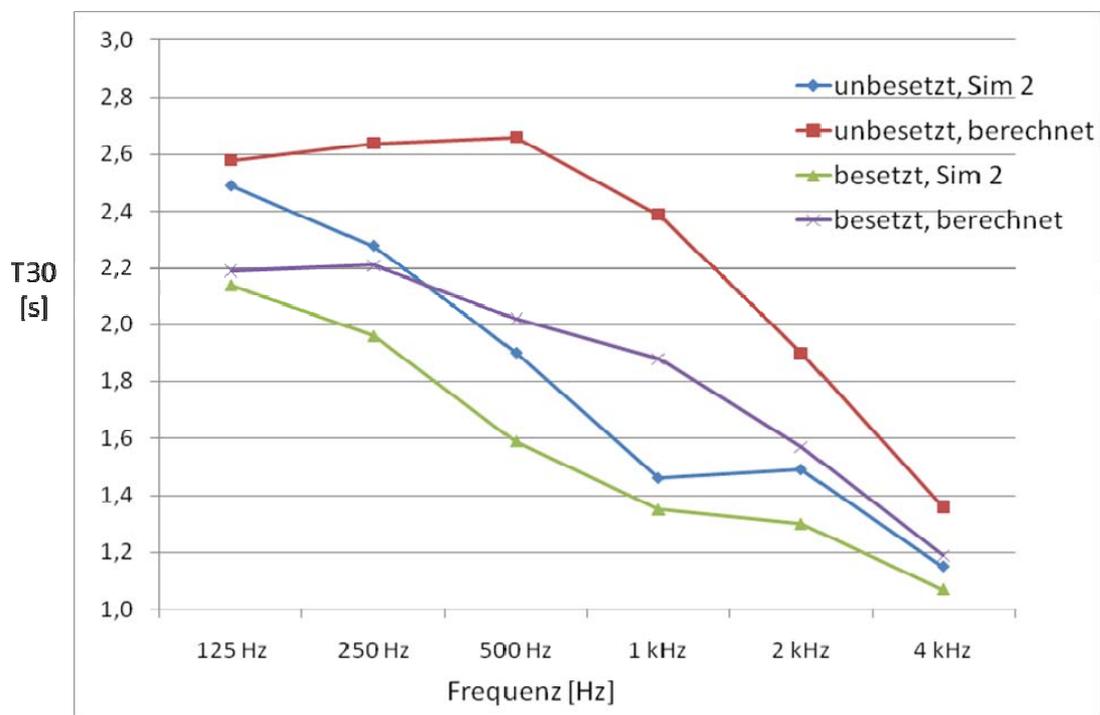


Abbildung 23: Vergleich der Nachhallzeit T_{30} der Simulation 2 mit der Berechnung

6 Zusammenfassung und Interpretation

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die Analyse der Akustik der Liebfrauenkirche in Eisenerz derzeit keine besonders gute Akustik vorweisen kann. Keiner der ausgewählten Parameter erzielt bei besetztem Zustand gute Werte, in unbesetztem Zustand nehmen die Reflexionen zunehmend überhand und es wird hallig.

Mit CATT-Acoustic konnte ein 3D-Modell erstellt werden, mit welchem durch Simulation der Baumaterialien annehmbare Vergleichswerte erzielt werden konnten. Dies ergab die Basis für Simulationen von Veränderungen welche zu Verbesserungen der Akustik führen sollen. Zwei solcher Simulationen mit unterschiedlichen Auswirkungen wurden hier näher besprochen und ausgewertet. Dabei sollte man darauf hinweisen, dass gut durchdachte Änderungen mit großem Effekt nicht unbedingt teuer sein müssen.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Foto der Liebfrauenkirche.....	5
Abbildung 2: Grundriss der Liebfrauenkirche.....	6
Abbildung 3: Querschnitt der Liebfrauenkirche.....	6
Abbildung 4: Längsschnitt der Liebfrauenkirche.....	7
Abbildung 5: Vorderansicht des Hauptraumes.....	8
Abbildung 6: rechte Seitenansicht des Hauptraumes.....	8
Abbildung 7: Hinteransicht des Hauptraumes.....	9
Abbildung 8: Empore mit Orgel.....	9
Abbildung 9: Emporenhinterraum.....	10
Abbildung 10: Seitenschiff des Altarraumes.....	10
Abbildung 11: 3D-Modell der Liebfrauenkirche.....	11
Abbildung 12: Färbige Ansicht des 3D-Modells.....	12
Abbildung 13: Anordnung der Quellen bzw. des Mikrofonaufstellung.....	14
Abbildung 14: Gemessene Nachhallzeit T20.....	15

Abbildung 15: Gemessene Nachhallzeit T30.....	15
Abbildung 16: Vergleich gemessene und berechnete Nachhallzeit T15/20.....	17
Abbildung 17: Vergleich gemessene und berechnete Nachhallzeit T30.....	18
Abbildung 18: 3D-Modell der Simulation 1.....	19
Abbildung 19: Vergleich der Nachhallzeit T15/20 der Simulation 1 mit der Berechnung.....	20
Abbildung 20: Vergleich der Nachhallzeit T30 der Simulation 1 mit der Berechnung... 	21
Abbildung 21: 3D-Modell der Simulation 2.....	21
Abbildung 22: Vergleich der Nachhallzeit T15/20 der Simulation 2 mit der Berechnung.....	23
Abbildung 23: Vergleich der Nachhallzeit T30 der Simulation 2 mit der Berechnung....	23

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswertung der gemessenen Werte.....	14
Tabelle 2: Vergleich der gemessenen Werte mit den mittels 3D-Modells berechneten Werten.....	16
Tabelle 3: Kennwerte der Simulation 1 im Vergleich zur Berechnung.....	20
Tabelle 4: Kennwerte der Simulation 2 im Vergleich zur Berechnung.....	22

9 Literaturverzeichnis

[1] Entwurf-Studie, Architekten Certov & Morianz, 2006.....	6
[2] Entwurf-Studie, Architekten Certov & Morianz, 2006.....	6
[3] Entwurf-Studie, Architekten Certov & Morianz, 2006.....	7