

Nachhallakustik langgestreckter Räume

Toningenieur Projekt

durchgeführt von

Peter Gutmann

Institut für Breitbandkommunikation
der Technischen Universität Graz

Betreuer/in:

DI Maria Fellner,
Ao. Univ. Prof. Dr. techn. DI Gerhard Graber

Graz, im Februar 2007

Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchung „Die Akustik im Dom zu St. Stephan“ [Fellner1], durchgeführt von der Technischen Universität Graz, Joanneum Research und Rohde-Jegger-Acoustics, wurden akustische Messungen und Simulationen durchgeführt. Diese Daten sollen hinsichtlich einiger Aspekte genauer untersucht werden.

Die Auswertung der Nachhallzeiten wurde nur statistisch vorgenommen. Es fällt auf, dass die unterschiedlichen Verläufe der Nachhallzeit örtlich stark schwanken, der Grund dafür soll genauer untersucht werden. Ebenso liegt die Vermutung nahe, dass ein Zusammenhang zwischen Raummodenbildung, Energieverteilung und der Nachhallzeit besteht.

Die Qualität der Auswertung der Messdaten ist dabei entscheidend; es soll dafür ein Faktor T30/EDT eingeführt werden um Aussagen über die Gültigkeit der Werte treffen zu können. Ein Vergleich zwischen zwei Softwarepaketen soll grundsätzliche Probleme und verschiedene Lösungsansätze automatischer Auswertung erfassen.

Abstract

During a study carried out by Graz University of Technology, Joanneum Research and Rohde-Jegger-Acoustics about acoustics in St. Stephan's Cathedral in Vienna, lots of data has been collected. One part of this paper deals with further examination of this data.

Reverberation time analysis has only been done statistically, local characteristics however vary greatly and the reasons for that will be explored. One may reasonably expect a connection between room-modes, energy distribution and reverberation-time.

The quality of the interpretation of the measurement-data is crucial, a new parameter should be found to evaluate results. Fundamental problems in automatic analysis will be compared by testing results in different software packages.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	11
2	Grundlagen	12
2.1	Physikalische Größen.....	12
2.1.1	Schall	12
2.1.2	Frequenz und Wellenlänge.....	13
2.1.3	Schallgeschwindigkeit.....	14
2.1.4	Schalldruck.....	14
2.1.5	Schallschnelle.....	15
2.1.6	Stehende Wellen.....	15
2.1.7	Reflexion	16
2.1.8	Beugung.....	16
2.2	Raumakustik.....	17
2.2.1	Nachhallzeit.....	17
2.2.2	Direkt- und Diffusschall.....	18
2.2.3	Hallradius	19
2.2.4	Impulsantwort.....	19
2.2.5	Signal-to-Noise-Ratio (SNR)	20
2.2.6	Effective decay range (EDR)	20
3	Messungen	21
3.1	Messmethoden.....	21
3.1.1	MLS (Maximum Length Sequence).....	21
3.1.2	Sinus-sweep.....	21
3.1.3	Das Kundtsche Rohr.....	22
3.2	Messungen im Dom zu St. Stephan in Wien.....	23
3.3	IBK Kellergang.....	26
3.3.1	Probemessung.....	26
3.3.2	Hauptmessung	27
3.4	Messungen im Kundtschen Rohr	29
3.4.1	Aufbau	29
3.4.2	Messung der Nachhallzeit T30.....	30
3.4.3	Messung mit sinusförmiger Erregung.....	30
3.5	Software	30
3.5.1	dBATI.....	31
3.5.2	WinMLS 2000 und 2004.....	33
3.5.3	CATT Acoustic	42
3.5.4	Matlab Visualisierungs Tool (MVT).....	42

3.5.5 Simulation des Kundtschen Rohres.....	43
3.5.6 Vergleich zwischen dBATI und WinMLS	43
3.5.7 Vergleich zwischen CATT und WinMLS.....	47
4 Hypothesen zu den vorhandenen Messdaten	49
4.1 Einleitung	49
4.2 Hypothesen.....	49
4.2.1 Energieverteilung	49
4.2.2 Auswertungsfehler.....	50
4.2.3 Gekoppelte Räume	53
4.2.4 Einfluss der Raummoden auf die Nachhallzeitmessung	55
5 Analyse der Auswertung der Nachhallzeit im Dom	56
5.1.1 Problemstellung.....	56
5.1.2 Faktor T30/EDT	57
5.1.3 SNR 59	
5.1.4 Säulenabschattung.....	60
5.1.5 Der Parameter EDR in der Software WinMLS 2004	63
6 Auswertung der Messdaten	79
6.1 Ergebnisse der Probemessung am IBK.....	79
6.1.1 Nachhallzeit gesamt	79
6.1.2 Nachhallzeit bei Quelle Q1	80
6.1.3 Nachhallzeit bei Quelle Q2	83
6.1.4 Energie-Zeit-Verteilung	86
6.2 Hauptmessung am IBK	88
6.2.1 Nachhallzeit gesamt	88
6.2.2 Nachhallzeit bei Quelle Q1	90
6.2.3 Nachhallzeit bei Quelle Q2	95
6.2.4 Nachhallzeitverlauf	100
6.2.5 Energie-Zeit-Verteilung bei Quelle Q1	102
6.2.6 Energie-Zeit-Verteilung bei Quelle Q2.....	105
6.3 Erkenntnisse über den Nachhallzeitverlauf.....	108
6.4 Messungen im Kundtschen Rohr	110
6.4.1 Nachhallzeit.....	110
6.4.2 Vergleich Nachhallzeit und Modenbildung	113
6.4.3 Sinusmessung im Kundtschen Rohr.....	124
6.4.4 Schlussfolgerung	127
6.4.5 Energie-Zeit-Verteilung	128
6.5 Simulation der Nachhallzeit im IBK Kellergang mit CATT Acoustic	132
6.5.1 Simulation des räumlichen Verlaufs	133

7	Zusammenfassung und Ausblick	138
8	Literaturverzeichnis	140
9	Verwendete Software	141

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Periodendauer und Wellenlänge einer Schwingung [Dickreiter]	12
Abb. 2-2: Frequenzbereiche in der Akustik [Fasold].....	13
Abb. 2-3: Normierte Band-Mittelfrequenzen f_m [Fasold].....	13
Abb. 2-4: Ausbreitung einer Schallwelle [Dickreiter]	14
Abb. 2-5: Schalldruck- und Schallschnelleverlauf, links: Kugelwelle, rechts: ebene Welle [Dickreiter]	15
Abb. 2-6: Druckverteilungen in stehenden Wellen zwischen zwei parallelen Wänden für zwei verschiedene Frequenzen [Dickreiter]	15
Abb. 2-7: Die drei Arten von Raummoden [Sengpiel]	16
Abb. 2-8: Schallreflexion an einer ebenen Fläche [Dickreiter]	16
Abb. 2-9: Schallbeugung an einem Zylinder für verschiedene Verhältnisse von Wellenlänge λ zu Zylinderdurchmesser d [Dickreiter]	17
Abb. 2-10: Zeitliche Folge der Reflexionen im Raum bei Anregung mit einem Impuls [Dickreiter]	17
Abb. 2-11: Nachhallzeit T und Early Decay Time EDT [Fasold]	18
Abb. 2-12: Überlagerung von Direkt- und Diffusschall, Hallradius [Dickreiter].....	19
Abb. 2-13: Beispiel einer Raumimpulsantwort [Fasold]	20
Abb. 3-1: Funktionsweise der MLS-Messung	21
Abb. 3-2: Einfaches Messmodell	22
Abb. 3-3: Stehende Welle im Impedanzrohr [ISO 10534-1, S.3]	22
Abb. 3-4: Skizze und Abmessungen des Rohres.....	23
Abb. 3-5: Grundriss Stephansdom	24
Abb. 3-6: Grundriss Stephansdom, Quellpunkte	24
Abb. 3-7: Grundriss Stephansdom, Messpunkte.....	25
Abb. 3-8: Probemessung, Quelle 1.....	26
Abb. 3-9: Probemessung, Quelle 2.....	26
Abb. 3-10: Messaufbau der IBK Hauptmessung, Schallquelle Q2 mit Trennwand	27
Abb. 3-11: Messaufbau.....	28
Abb. 3-12: Nummerierungsschema.....	28
Abb. 3-13: Kundtsches Rohr, Messaufbau.....	30
Abb. 3-14: Software dBBATI, automatische Berechnung des Energieabfalls	32
Abb. 3-15: Software dBBATI, manuelle Berechnung des Energieabfalls.....	33
Abb. 3-16: IBK Hauptmessung, Q1-123: Nachhallzeit T30	34
Abb. 3-17: IBK Hauptmessung Q1-123, Frequenzgang.....	34
Abb. 3-18: IBK Hauptmessung, Q1-123: SNR, EDR, T30, corr.....	35
Abb. 3-19: IBK Hauptmessung, Q1-123: Nachhallzeit T30 bei verschiedener Impulsantwortlänge.....	36
Abb. 3-20: IBK Hauptmessung, Q1-123: Impulsantwort auf 1s begrenzt.....	36
Abb. 3-21: IBK Hauptmessung, Q1-123: Normalisierte Schroeder Kurven	37
Abb. 3-22: IBK Hauptmessung, Q1: Mittelung, ohne Filter, peaks bei 53.8 Hz und ca. 101 Hz	38
Abb. 3-23: IBK Hauptmessung, Q1: Mittelung, room acoustic BP, peak 53.8 Hz	38

Abb. 3-24: IBK Hauptmessung, Q1-123: Frequenzgang mit (rot) und ohne (blau) Filter, peak bei 54 Hz	39
Abb. 3-25: dBBATI Nachhallzeit, Q2T: Sek 21, Mik.1: 500 Hz, 10 ms.....	43
Abb. 3-26: dBBATI Nachhallzeit, Q2T: Sek 21, Mik.1, 63 Hz, 10 ms.....	44
Abb. 3-27: dBBATI Nachhallzeit, Q2T: Sek 21, Mik.1: 500 Hz, 200 ms.....	44
Abb. 3-28: dBBATI Nachhallzeit, Q2T: Sek 21, Mik.1: 63 Hz, 200 ms.....	45
Abb. 3-29: Vergleich der Nachhallzeit T30 in WinMLS und dBBATI.....	45
Abb. 3-30: Nachhallzeit T30 Stephansdom, Mittelwert	46
Abb. 3-31:Nachhallzeit T30, Q2T:-Sekt.21, Mik.1, mit WinMLS und dBBATI in verschiedenen Einstellungen.....	46
Abb. 3-32: Nachhallzeit T30 und EDR, Q2T: Sekt. 16, Mik.5, mit WinMLS 2000, 2004 und dBBATI.....	47
Abb. 3-33: Nachhallzeit T30, Q2T Sekt. 21, Mik. 1: WinMLS und CATT	48
Abb. 3-34: Nachhallzeit T30, Q2T Sekt. 10, Mik. 3: WinMLS und CATT	48
Abb. 4-1: Energieabfall in Abhängigkeit von der Entfernung.....	50
Abb. 4-2: links: lineare Druckskala, rechts: logarithmische Druckskala.....	51
Abb. 4-3: Impulsantwort Sektor 2 Mik. 2	51
Abb. 4-4: Impulsantwort Sektor 8 Mik. 5	51
Abb. 4-5: Impulsantwort Sektor 16 Mik. 5	52
Abb. 4-6: Nachhallzeit T30, Sektor 2, 8, 16, Q2T	52
Abb. 4-7: Energieabfall in einem einfachen Raum.....	53
Abb. 4-8: Energieabfall in einem gekoppelten Raum.....	53
Abb. 4-9: Stephansdom: Hallradius	54
Abb. 4-10: Nachhallzeit T30, Sekt.10, Mik. 6 bei 100 Hz, Q2T	54
Abb. 4-11: Nachhallzeit T30, Sekt.18, Mik.6 bei 100 Hz, Q2T	55
Abb. 4-12: Zusammenhang Raummoden und Nachhallzeit	55
Abb. 5-1: Vergleich Gültigkeit der Werte und dazugehörige Parameter, Q2T Sekt.21-Mic4.	57
Abb. 5-2: Faktor T30/EDT bei 3160 Hz, Q2T	58
Abb. 5-3: Hallradius, Q2T.....	58
Abb. 5-4: Faktor T30/EDT bei 63 Hz, Q2T	59
Abb. 5-5: Nachhallzeit T30 bei 63 Hz, Q2T	59
Abb. 5-6: SNR bei 63 Hz, Q2T	60
Abb. 5-7: EDT: Q2T, Sekt.20, Mik.4 (direkt)	61
Abb. 5-8: EDT: Q2T, Sekt.13, Mik.3 (1 Säule).....	61
Abb. 5-9: EDT: Q2T, Sekt.20, Mik.2 (2 Säulen).....	62
Abb. 5-10: EDT, Q2T: direkt,1 Säule, 2 Säulen	62
Abb. 5-11: EDT, Q2T: direkt, 1 Säule, 2 Säulen, Vergleich zwischen WinMLS und dBBATI	63
Abb. 5-12: Nachhallzeit T30 bei 40 Hz, Q2T	64
Abb. 5-13: Nachhallzeit T30, Sektor 8, Mik.7, Q2T	65
Abb. 5-14: WinMLS 2004 Menü: Advanced Calculation Options.....	65
Abb. 5-15: WinMLS 2004: Impulsantwort mit Zeitfenster	66
Abb. 5-16: Nachhallzeit T30, Sektor 8, Mic 7 (EDR>35), Q2T.....	66
Abb. 5-17: Nachhallzeit T15, Sektor 8, Mic 7 (EDR>20), Q2T.....	67
Abb. 5-18: Berechnungen Sektor 8, Mic 7, Q2T	67
Abb. 5-19: Vergleich der Nachhallzeiten nach T30 und T15	68
Abb. 5-20: Nachhallzeit T30 bei 50 Hz, Q2T	68
Abb. 5-21: Nachhallzeit T30, Sektor 13 Mic 5, Q2T.....	69
Abb. 5-22: Berechnungen Sektor 13 Mic 5, Q2T	69
Abb. 5-23: Nachhallzeit T30 bei 100 Hz, Q2T	69

Abb. 5-24: Nachhallzeit T30 Sektor 21 Mik. 4, Q2T	70
Abb. 5-25: Berechnungen: Sektor 21 Mic 4, Q2T	70
Abb. 5-26: Zusammenhang EDR und SNR, Q2T Sekt.8 Mik. 7	71
Abb. 5-27: SNR, EDR, corr zu Nachhallzeit T30, IBK Hauptmessung, Q1 Pkt 123	71
Abb. 5-28: Nachhallzeit T30 ohne Einschränkung des EDR.....	72
Abb. 5-29: Nachhallzeit T30 ohne Einschränkung des EDR, Mittelwert.....	72
Abb. 5-30: Nachhallzeit T30 mit Berücksichtigung des EDR>35.....	73
Abb. 5-31: Nachhallzeit T15 mit Berücksichtigung des EDR>20.....	74
Abb. 5-32: Nachhallzeit T15 mit Berücksichtigung des EDR>20, Mittelwert.....	74
Abb. 5-33: Nachhallzeit T30, Q1	75
Abb. 5-34: Nachhallzeit T15, Q1	76
Abb. 5-35: Nachhallzeit T15, Q1, Mittelwert	76
Abb. 5-36: Nachhallzeit T15, Q2	77
Abb. 5-37: Nachhallzeit T15, Q2, Mittelwert.....	77
Abb. 5-38: Nachhallzeit T30, Q1, Mittelwert.....	78
Abb. 5-39: Nachhallzeit T30, Q2, Mittelwert.....	78
Abb. 6-1: Nachhallzeit T30, Q1	79
Abb. 6-2: Nachhallzeit T30, Q2	80
Abb. 6-3: Nachhallzeit T30 bei 80 Hz, Q1	80
Abb. 6-4: Nachhallzeit T30 bei 315 Hz, Q1	81
Abb. 6-5: Nachhallzeit T30 bei 800 Hz, Q1	81
Abb. 6-6: Nachhallzeit T30 bei 2.5 kHz, Q1	82
Abb. 6-7: Nachhallzeit T30 bei 5 kHz, Q1	82
Abb. 6-8: Nachhallzeit T30 bei 80 Hz, Q2 (y-Achse bis 6s)	83
Abb. 6-9: Nachhallzeit T30 bei 315 Hz, Q2	84
Abb. 6-10: Nachhallzeit T30 bei 800 Hz, Q2	84
Abb. 6-11: Nachhallzeit T30 bei 2.5 kHz, Q2	85
Abb. 6-12: Nachhallzeit T30 bei 5 kHz, Q2	85
Abb. 6-13: Nachhallzeit T30 bei 630 Hz (oben) und 2 kHz (unten) mit Quelle Q2.....	86
Abb. 6-14: EZV Breitband, 167 ms und 606 ms, Q1	87
Abb. 6-15: EZV Breitband, 188 ms und 627 ms, Q2.....	87
Abb. 6-16: EZV Oktavband um 4000 Hz, 188 ms und 585 ms, Q2	88
Abb. 6-17: Nachhallzeit T30, Q1	89
Abb. 6-18: Nachhallzeit T30, Q2	89
Abb. 6-19: Nachhallzeit T30 bei 63 Hz, Q1 (y-Achse 4s).....	90
Abb. 6-20: Nachhallzeit T30 bei 80 Hz, Q1	90
Abb. 6-21: Nachhallzeit T30 bei 160 Hz, Q1	91
Abb. 6-22: Nachhallzeit T30 bei 315 Hz, Q1	91
Abb. 6-23: Nachhallzeit T30 bei 500 Hz, Q1	92
Abb. 6-24: Nachhallzeit T30 bei 800 Hz, Q1	92
Abb. 6-25: Nachhallzeit T30 bei 1260 Hz, Q1	93
Abb. 6-26: Nachhallzeit T30 bei 2.5 kHz, Q1	93
Abb. 6-27: Nachhallzeit T30 bei 5 kHz, Q1	94
Abb. 6-28: Nachhallzeit T30 bei 80 Hz, Q2 (y-Achse 6s).....	95
Abb. 6-29: Nachhallzeit T30 bei 160 Hz, Q2	96
Abb. 6-30: Nachhallzeit T30 bei 315 Hz, Q2	96
Abb. 6-31: Nachhallzeit T30 bei 500 Hz, Q2	97
Abb. 6-32: Nachhallzeit T30 bei 800 Hz, Q2	97
Abb. 6-33: Nachhallzeit T30 bei 1260 Hz, Q2	98
Abb. 6-34: Nachhallzeit T30 bei 2.5 kHz, Q2	98

Abb. 6-35: Nachhallzeit T30 bei 5 kHz, Q2	99
Abb. 6-36: Q5: T30 bei 500 Hz.....	100
Abb. 6-37: Nachhallzeitverlauf T30 linear: Sekt.12 bis 16, Mik 2,5,8; Q2T	101
Abb. 6-38: Nachhallzeitverlauf T30 linear, Sekt. 9 bis 16, Mik.1, 5, 7; Q5	101
Abb. 6-39: EZV bei 70 ms und 139 ms, Breitband, Q1	103
Abb. 6-40: EZV bei 174 ms und 650 ms, Breitband, Q1	103
Abb. 6-41: EZV bei 163 ms und 650 ms, Oktavband 2 kHz, Q1	104
Abb. 6-42: EZV bei 650 ms und 1184 ms, Breitband, Q1	104
Abb. 6-43: EZV bei 70 ms und 139 ms, Breitband, Q2	105
Abb. 6-44: EZV bei 174 ms und 650 ms, Breitband, Q2	106
Abb. 6-45: EZV bei 650 ms und 1184 ms, Breitband, Q2	106
Abb. 6-46: EZV bei 163 ms und 650 ms, Oktavband um 250 Hz, Q2	107
Abb. 6-47: EZV bei 163 ms und 650 ms, Oktavband um 1 kHz, Q2	107
Abb. 6-48: EZV bei 163 ms und 650 ms, Oktavband um 2 kHz, Q2	108
Abb. 6-49: Energieverluste nach Erregung, geringe Entfernung zur Quelle	109
Abb. 6-50: Energieverluste nach Erregung, große Entfernung zur Quelle	109
Abb. 6-51: Nachhallzeit T30 bei 160 Hz	110
Abb. 6-52: Nachhallzeit T30 bei 250 Hz	111
Abb. 6-53: Nachhallzeit T30 bei 315 Hz	111
Abb. 6-54: Nachhallzeit T30 bei 400 Hz	112
Abb. 6-55: Nachhallzeit T30 bei 500 Hz	112
Abb. 6-56: Nachhallzeit T30 bei 160 Hz, Seitenriss.....	113
Abb. 6-57: Amplitudengang im Kundtschen Rohr bei 160 Hz.....	114
Abb. 6-58: Grafische Überlagerung bei 160 Hz	114
Abb. 6-59: Nachhallzeit T30 bei 250 Hz, Seitenriss.....	115
Abb. 6-60: Amplitudengang im Kundtschen Rohr bei 250 Hz.....	115
Abb. 6-61: Grafische Überlagerung bei 250 Hz	116
Abb. 6-62: Nachhallzeit T30 bei 315 Hz, Seitenriss.....	117
Abb. 6-63: Amplitudengang im Kundtschen Rohr bei 315 Hz.....	117
Abb. 6-64: Grafische Überlagerung bei 315 Hz	118
Abb. 6-65: Nachhallzeit T30 bei 400 Hz, Seitenriss.....	119
Abb. 6-66: Amplitudengang im Kundtschen Rohr bei 400 Hz.....	119
Abb. 6-67: Grafische Überlagerung bei 400 Hz	120
Abb. 6-68: Nachhallzeit T30 bei 500 Hz, Seitenriss.....	121
Abb. 6-69: Amplitudengang im Kundtschen Rohr bei 500 Hz.....	121
Abb. 6-70: Grafische Überlagerung bei 500 Hz	122
Abb. 6-71: Nachhallzeit T30 bei 1 kHz, Seitenriss.....	123
Abb. 6-72: Amplitudengang im Kundtschen Rohr bei 1 kHz.....	123
Abb. 6-73: Grafische Überlagerung bei 1 kHz	124
Abb. 6-74: Zeit zwischen peaks, Laufzeit im Rohr.....	125
Abb. 6-76: Sinus bei 250 Hz	125
Abb. 6-77: Sinus bei 500 Hz	126
Abb. 6-78: Sinus bei 1 kHz	126
Abb. 6-79: Sinus bei 1.6 kHz	127
Abb. 6-75: Einschwingvorgang und Abklingvorgang im Kundtschen Rohr	127
Abb. 6-80: EZV Berechnungstool, Einstellungen.....	128
Abb. 6-81: EZV, Terzband um 500 Hz, 39 ms	129
Abb. 6-82: EZV, Terzband um 500 Hz, 40 ms	129
Abb. 6-83: EZV, Terzband um 500 Hz, 54 ms	130
Abb. 6-84: EZV, Terzband um 2kHz, 27 ms	130

Abb. 6-85: EZV, Terzband um 2kHz, 41 ms	131
Abb. 6-86: EZV, Breitband, 28 ms	131
Abb. 6-87: EZV, Breitband, 39 ms	132
Abb. 6-88: 3D Darstellung des CATT-Modells.....	132
Abb. 6-89: Nachhallzeit CATT	133
Abb. 6-90: Vergleich Nachhallzeit T30 zwischen Messung Q1 und CATT Simulation.....	133
Abb. 6-91: CATT, T30 bei 125 Hz	134
Abb. 6-92: CATT, T30 bei 250 Hz	135
Abb. 6-93: CATT, T30 bei 500 Hz	135
Abb. 6-94: CATT, T30 bei 1000 Hz	136
Abb. 6-95: CATT, T30 bei 2000 Hz	136
Abb. 6-96: CATT, T30 bei 4000 Hz	137
Abb. 6-97: CATT, T30 bei 1000 Hz, Seitenriss.....	137
Abb. 6-98: CATT, T30 bei 4000 Hz, Seitenriss.....	138

1 Aufgabenstellung

Joanneum Research hat im Rahmen des Projekts „Die Akustik im Dom zu St. Stephan“ [Fellner1] gemeinsam mit der TU Graz und Rohde-Jegger-Acoustics akustische Messungen und Simulationen im Dom zu St. Stephan in Wien durchgeführt. Diese Daten sollen hinsichtlich folgender Aspekte genauer untersucht werden:

1. Die Auswertung der Nachhallzeiten wurde im genannten Projekt nur statistisch vorgenommen. Es fällt auf, dass die unterschiedlichen Verläufe der T30 örtlich stark schwanken, der Grund dafür soll genauer untersucht werden (vgl. Abschnitt 4.2.1, S.49).
2. Der Zusammenhang zwischen Raummodenbildung, Energieverteilungen und der T30 soll ebenfalls genauer betrachtet werden.
 - a. Die Energie-Zeit-Verteilung im Raum soll nun mit Hilfe der Software Matlab Visualisierungs Tool (MVT, vgl. Abschnitt 3.5.4, S.42) dargestellt und auf Besonderheiten untersucht werden. Eine Möglichkeit wäre die Untersuchung der Auswirkung von Abschattung des Direktschalls durch die Säulen (vgl. Abschnitt 5.1.4, S.60). Im Hinblick darauf wäre es möglich einen Faktor T30/EDT einzuführen, der zusätzlich Auskunft über die Gültigkeit der jeweiligen Messung, als auch über oben genannte Abschattungen gibt (vgl. Abschnitt 5.1.2, S.57). Des Weiteren könnte damit auch die tatsächliche Größe des Hallradius mit der Theorie verglichen werden.
 - b. Ein weiterer Ansatz ist der Vergleich der Raummodenbildung an entsprechenden Messpunkten, die dadurch einen zu geringen Signal-Rausch-Abstand (SNR) für die automatische Auswertung durch die Software erfahren. Eine Überprüfung mit Hilfe des 01-dB Programms (vgl. Abschnitt 3.5.1, S.31) im Vergleich zu der zuvor benutzten Software WinMLS (vgl. Abschnitt 3.5.2, S.33) könnte dabei Aufschluss geben.
3. In einem diffusen Schallfeld sollte definitionsgemäß die Schallenergie in einem geschlossenen Raum gleichverteilt sein. Wenn also örtlich unterschiedliche Nachhallzeiten gemessen werden, kann das heißen, dass das Schallfeld nicht diffus genug war, oder aber dass man von gekoppelten Räumen ausgehen muss. Diese Möglichkeit soll mit entsprechenden Daten erforscht werden (vgl. Abschnitt 4.2.3, S.53).
4. Laut einer Hypothese von Professor Graber [Graber1] könnte auch folgender Sachverhalt bewiesen werden: Die Energie baut sich zuerst im vorderen Bereich auf,

verteilt sich dann nach hinten und wird dabei „nachgeschoben“. Existiert der vermutete Zusammenhang zwischen zeitlichem Pegelverlauf und Nachhallzeitanstieg im hinteren Bereich? (vgl. Abschnitt 4.2.1, S.49)

Zunächst werden einige physikalische Zusammenhänge und raumakustische Gegebenheiten für den späteren Gebrauch erläutert.

2 Grundlagen

2.1 Physikalische Größen

2.1.1 Schall

Schall ist eine periodische Druckschwankung, die sich in einem elastischen Medium ausbreitet. Er besteht physikalisch betrachtet aus mechanischen Schwingungen der Moleküle dieses Mediums. Man unterscheidet weiters zwischen Luft- und Körperschall, in der Raumakustik wird vor allem Ersterer behandelt.

Im Vergleich zum statischen Luftdruck (ca. 100 000 Pa) ist besagter Wechseldruck zwar äußerst gering, der Dynamikbereich allerdings riesig, weshalb auch die logarithmische Darstellung üblich ist. Abb. 2-1 zeigt die Periodendauer und Wellenlänge einer Schwingung.

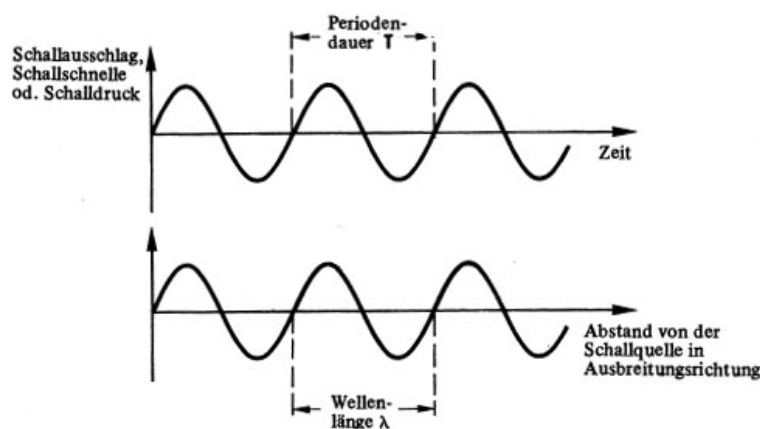


Abb. 2-1: Periodendauer und Wellenlänge einer Schwingung [Dickreiter]

2.1.2 Frequenz und Wellenlänge

Die Frequenz f bezeichnet die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde und wird in Hertz angegeben. Das menschliche Gehör nimmt Frequenzen von ca.16 Hz bis 20k Hz wahr, wir empfinden dabei verschiedene Tonhöhen – in der Raumakustik ist der relevante Frequenzbereich von ca. 63 Hz bis 4k Hz anzunehmen (Abb. 2-2).

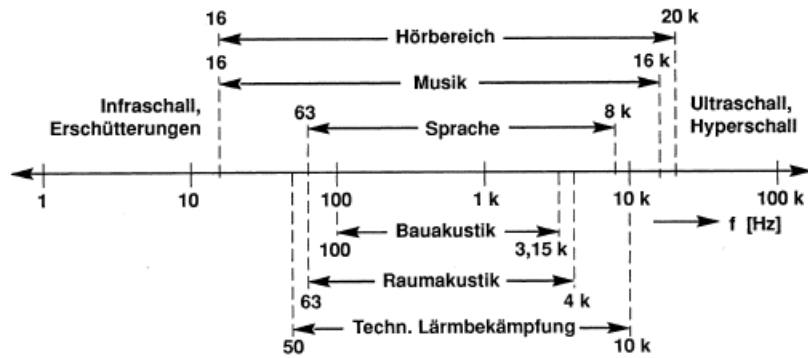


Abb. 2-2: Frequenzbereiche in der Akustik [Fasold]

Bei Messungen und Analysen wird das Schallspektrum oft in Oktav- oder Terzbereiche unterteilt, dafür gibt es genormte Band-Mittenfrequenzen wie in Abb. 2-3 dargestellt.

n	Norm-Frequenz f_m [Hz]		n	Norm-Frequenz f_m [Hz]		n	Norm-Frequenz f_m [Hz]	
	Terz	Oktave		Terz	Oktave		Terz	Oktave
12	16	*	22	160		32	1600	
13	20		23	200		33	2000	*
14	25		24	250	*	34	2500	
15	31,5	*	25	315		35	3150	
16	40		26	400		36	4000	*
17	50		27	500	*	37	5000	
18	63	*	28	630		38	6300	
19	80		29	800		39	8000	*
20	100		30	1000	*	40	10000	
21	125	*	31	1250		41	12500	

Abb. 2-3: Normierte Band-Mittenfrequenzen f_m [Fasold]

Die Wellenlänge λ entspricht der Entfernung, die eine Schallwelle während einer Schwingung zurücklegt. Die dafür benötigte Zeit wird als Periodendauer T bezeichnet.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \quad f = \frac{1}{T} \quad [1/\text{s}]$$

λ ...Wellenlänge [m]

f ...Frequenz [1/s]

c ...Schallgeschwindigkeit [m/s]

T ...Periodendauer [s]

2.1.3 Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit in idealen Gasen ist nur von der Temperatur abhängig.

$$c_{Luft} = 331,5 \cdot \sqrt{\frac{\vartheta + 273,15}{273,15}} \text{ [m/s]}$$

ϑ ...Temperatur [Grad Celsius]

Näherungsformel:

$$c_{Luft} \approx (331,5 + 0,6 \cdot \vartheta) \text{ [m/s]}$$

Die Schallgeschwindigkeit in Luft bei 20 Grad Celsius beträgt also $c = 343,42$ m/s.

Auch die Luftfeuchtigkeit beeinflusst geringfügig die Schallgeschwindigkeit.

2.1.4 Schalldruck

Der Schalldruck p bezeichnet die Amplitude der Schallschwingung, der Schalldruckpegel L_p eine logarithmische Größe, mit Referenzdruck p_0 . Die Ausbreitung einer Schallwelle und der dazugehörige Schalldruck werden in Abb. 2-4 bzw. Abb. 2-5 gezeigt.

$$L_p = 20 \log \frac{P}{p_0} \quad p_0 \dots 20 \mu Pa$$

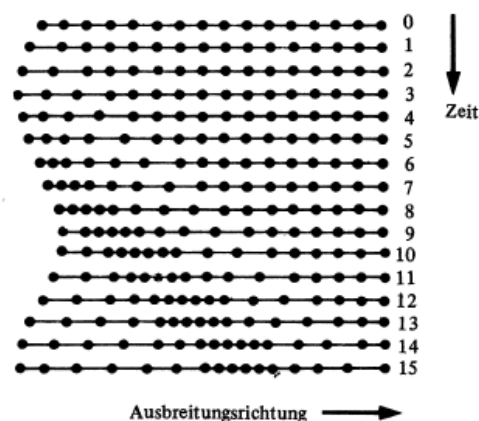


Abb. 2-4: Ausbreitung einer Schallwelle [Dickreiter]

2.1.5 Schallschnelle

Die Schallschnelle \vec{v} gibt an mit welcher Wechselgeschwindigkeit die Moleküle um ihre Ruhelage schwingen. Die Darstellung in Abb. 2-5 zeigt den Schalldruck- und Schnelleverlauf einer Kugelwelle und einer ebenen Welle.

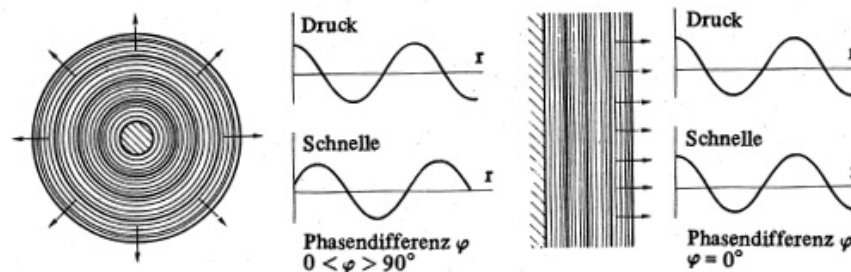


Abb. 2-5: Schalldruck- und Schallschnelleverlauf, links: Kugelwelle, rechts: ebene Welle [Dickreiter]

2.1.6 Stehende Wellen

(auch Raumresonanzen oder Raummoden genannt)

Trifft eine Schallwelle senkrecht auf eine Wand (Einfallrichtung 0°), so überlagern sich die einfallende und die reflektierte Welle. Stehen zwei Wände parallel genau im Abstand von einer halben Wellenlänge (oder Vielfachen davon) überlagern sich Direktschall und reflektierter Schall immer phasengleich. Ein stationäres Schallfeld mit Schwingungsknoten ($p=0$) und Schwingungsbäuchen ($p=\max.$) entsteht (Abb. 2-6).

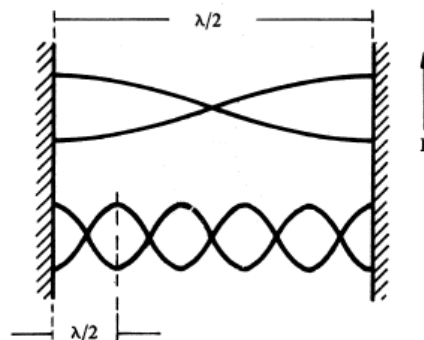


Abb. 2-6: Druckverteilungen in stehenden Wellen zwischen zwei parallelen Wänden für zwei verschiedene Frequenzen [Dickreiter]

Axiale Moden: Der Ausbreitungsvektor liegt parallel zu einer Raumkante. Zwei der Ordnungszahlen sind Null, die Resonanzüberhöhungen sind hier am ausgeprägtesten.

Tangentiale Moden: Die Ausbreitungsrichtung steht senkrecht auf einer Raumkante, eine der Ordnungszahlen ist Null, sie sind bereits schwächer ausgeprägt.

Schräge Moden: Die Welle fällt schräg auf alle drei Wandpaare, alle Ordnungszahlen sind von Null verschieden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die drei Arten von Raummoden (Abb. 2-7).

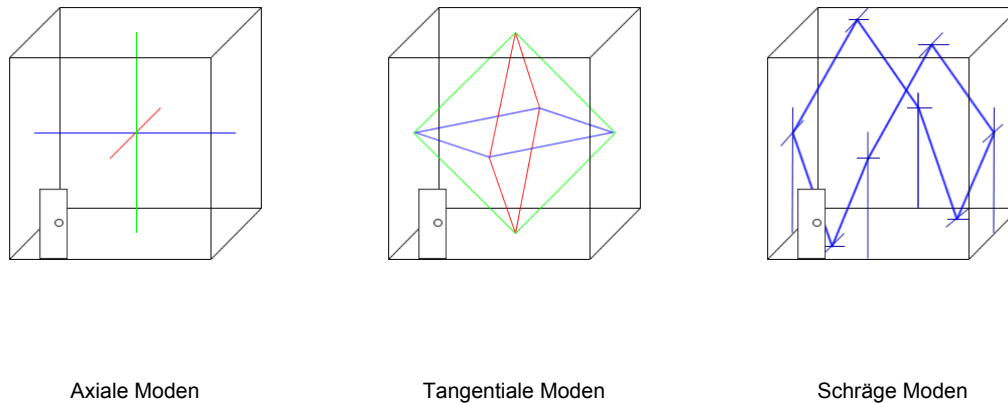


Abb. 2-7: Die drei Arten von Raummoden [Sengpiel]

2.1.7 Reflexion

Eine Schallwelle wird beim Auftreffen auf ein Hindernis, das groß im Verhältnis zur Wellenlänge ist, reflektiert. Wie in der Optik gilt das Gesetz: Einfallswinkel = Ausfallswinkel (Abb. 2-8).

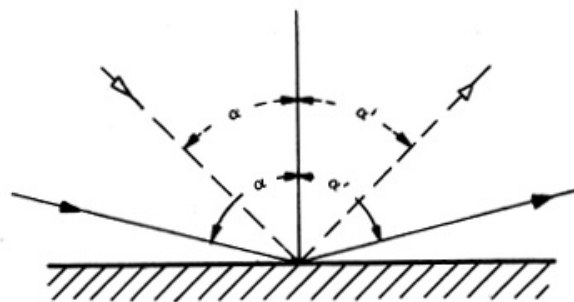


Abb. 2-8: Schallreflexion an einer ebenen Fläche [Dickreiter]

2.1.8 Beugung

Das Verhältnis zwischen Wellenlänge und Größe des Hindernisses ist von entscheidender Bedeutung. Ist das Hindernis größer als die Wellenlänge wird die Welle erwartungsgemäß aufgehalten. Ist das Hindernis hingegen klein gegenüber der Wellenlänge werden die Schallwellen gebeugt, dahinter treten kaum Abschattungswirkungen auf. Die nachfolgende Darstellung (Abb. 2-9) verdeutlicht das.

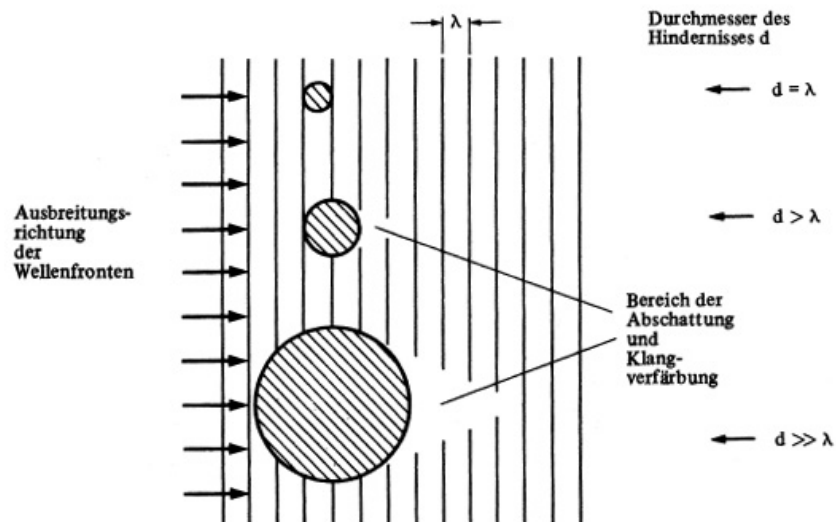


Abb. 2-9: Schallbeugung an einem Zylinder für verschiedene Verhältnisse von Wellenlänge λ zu Zylinderdurchmesser d [Dickreiter]

2.2 Raumakustik

2.2.1 Nachhallzeit

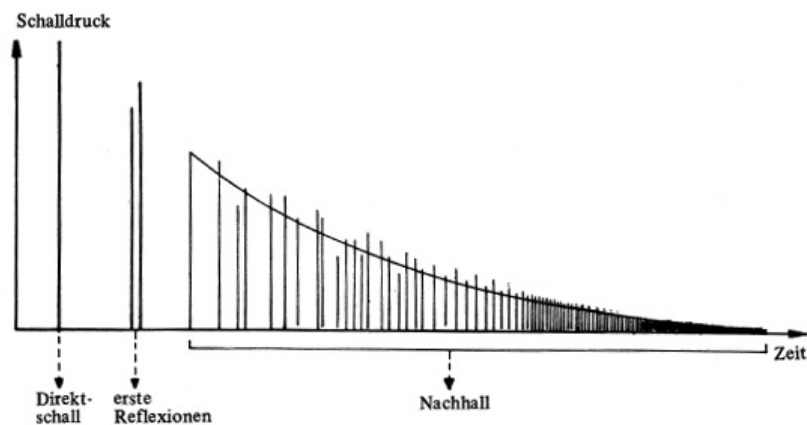


Abb. 2-10: Zeitliche Folge der Reflexionen im Raum bei Anregung mit einem Impuls [Dickreiter]

Nach dem Direktschall folgen die ersten Reflexionen an der Hörposition (Abb. 2-10). Ihre Verzögerungen und Pegel prägen den klanglichen Eindruck des Raums stark. Die Reflexionen verschmieren schließlich zum diffusen Nachhall.

Die Nachhallzeit T_{60} ist das wichtigste Kriterium zur Beschreibung der Akustik eines Raumes. Sie ist definiert als jene Zeit, in der die Schallenergie nach Abschalten der Quelle um 60 dB abnimmt. In der Praxis erfolgt die Messung von -5 dB bis -65 dB. Da es bei so großen Pegeldifferenzen oft zu Problemen bei der Messung hinsichtlich des erreichbaren SNR kommt sind auch T_{30} , T_{20} und T_{15} in Gebrauch; T_{30} beschreibt den Energieabfall von -5 dB bis -35 dB, der mit 2 multipliziert wird. T_{20} wird von -5 dB bis -25 dB gemessen und mit 3 multipliziert und T_{15} entsprechend von -5 dB bis -20 dB und mit 4 multipliziert.

Die frühe Abklingzeit EDT (early-decay-time) ist definiert als die Zeit, in welcher der Pegel des Ausgangssignals um 10 dB abnimmt.

Abb. 2-11 zeigt EDT und die Nachhallzeit.

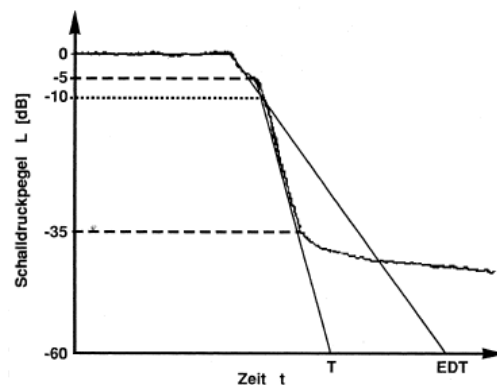


Abb. 2-11: Nachhallzeit T und Early Decay Time EDT [Fasold]

2.2.2 Direkt- und Diffusschall

Der Direktschall nimmt den direkten Weg von der Quelle zum Zuhörer und trifft als erste Wellenfront ein.

Im diffusen Schallfeld ist der Schalleinfall aus allen Richtungen gleich wahrscheinlich und gleich stark, eine Lokalisation ist nicht mehr möglich.

Die Lehrbuchmeinung besagt weiters, dass der Pegel des Diffusschallfeldes bei längeren Nachhallzeiten im gesamten Raum gleich ist, er hängt also nicht von der Entfernung zur Schallquelle ab.

In Abb. 2-12 wird die Überlagerung von Direkt- und Diffusschall wie auch der Hallradius gezeigt.

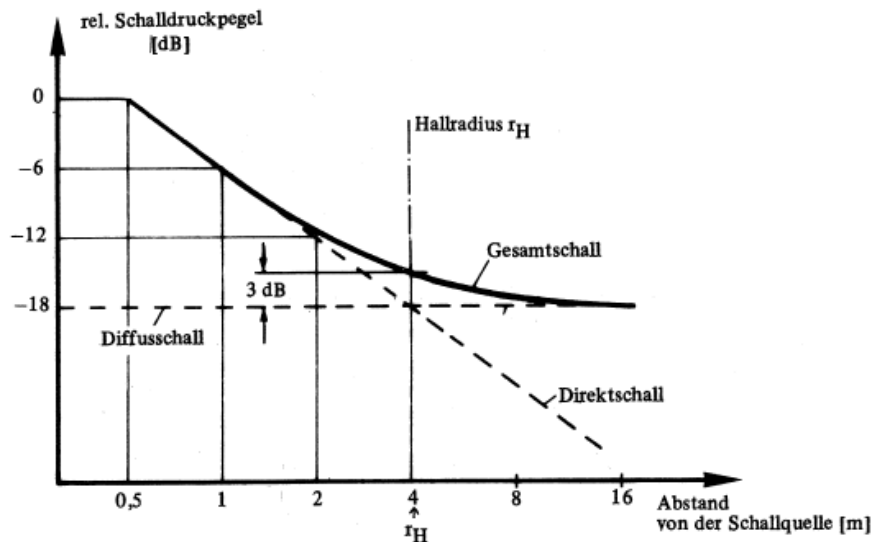


Abb. 2-12: Überlagerung von Direkt- und Diffusschall, Hallradius [Dickreiter]

2.2.3 Hallradius

Nahe der Quelle existiert ein starkes Direktschallfeld, mit größerer Entfernung steigt der Anteil des Diffusschalls. Sind beide Schallpegel gleich groß spricht man vom Hallradius.

$$r_H = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T}} \quad V \dots \text{Raumvolumen} \quad T \dots \text{Nachhallzeit}$$

Diese Näherungsformel gilt allerdings nur für Kugelquellen, der Bündelungsgrad ist hier nicht berücksichtigt.

2.2.4 Impulsantwort

Mit Hilfe der Impulsantwort (wie in Abb. 2-13) lässt sich ein System charakterisieren und zum Beispiel dessen Frequenzgang oder Übertragungsfunktion bestimmen. Diese ist bei streng stabilen Systemen die Fourier-Transformierte der Impulsantwort.

Wird also ein unbekanntes System mit einem Dirac-Impuls angeregt, lässt sich aus der Impulsantwort durch Fourier-Analyse, im Besonderen durch die Laplace-Transformation, der Amplitudenfrequenzgang des unbekanntes Systems ermitteln. Umgekehrt kann die Wirkung des Systems durch Faltung mit der Impulsantwort im Zeitbereich oder durch Multiplikation mit der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich repliziert werden.

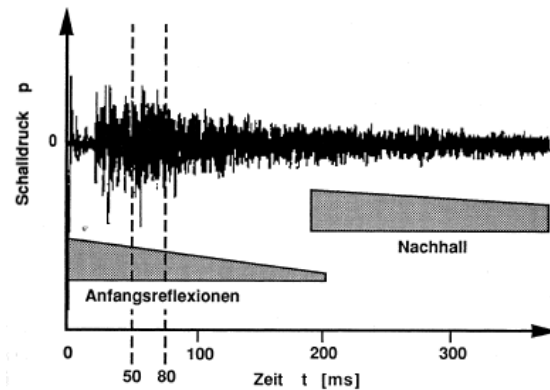


Abb. 2-13: Beispiel einer Raumimpulsantwort [Fasold]

2.2.5 Signal-to-Noise-Ratio (SNR)

Das Signal-Rausch-Verhältnis ist ein Maß für die Qualität eines aus einer Quelle stammenden Nutzsignals, das von einem Rauschsignal überlagert ist. Es ist definiert als das Verhältnis der mittleren Leistung des Nutzsignals der Signalquelle zur mittleren Rauschleistung des Störsignals derselben Signalquelle.

$$SNR = \frac{\text{Nutzsignalleistung}}{\text{Rauschleistung}}$$

2.2.6 Effective decay range (EDR)

EDR beschreibt den Bereich des Energieabfalls, der für die Analyse nutzbar ist. Dies ist ein spezieller Parameter der Software WinMLS ab Version 2004. Es handelt sich um eine Qualitätsbeschreibung der Daten, ähnlich wie der Korrelationsgrad (corr) und SNR. EDR steht in Zusammenhang mit dem Umgebungsrauschen, das aus den letzten 10% der Impulsantwort gewonnen wird, und dem Korrelationskoeffizienten. Bei einer T30 Berechnung muss für ein gültiges Ergebnis also ein Abfall von 30 dB möglich sein, genauer von -5 dB bis -35 dB. Der EDR müsste demnach mindestens 35 dB betragen.

Der Hilfetext von WinMLS 2004 [WinMLS] beschreibt EDR wie folgt:

The effective decay range is taken as the level of the decay curve at the point where the response is truncated before forming the decay curve. The resulting decay range is therefore, in addition to the physical signal-to-noise ratio in the measurement, dependent on the type and shape of the room impulse response and the chosen noise margin in the response truncation.

The decay range can be used directly to evaluate the quality of the room acoustical parameter calculations, especially the reverberation time T30.

3 Messungen

Um auf die möglichen Probleme bei akustischen Messungen rückschließen zu können, werden die Messmethoden und Programme zur automatisierten Auswertung der Daten erklärt.

3.1 Messmethoden

Da es bei der Benutzung von Impulssignalen nicht möglich ist einen hohen SNR zu erreichen, wird mit einem Trick gearbeitet. Es werden für akustische Messungen nur noch Methoden verwendet, welche die Impulsantwort nachträglich aus einer Messung mit einem breitbandigen (Pseudo-)Rauschsignal berechnen. Hierfür wird meist entweder ein „Maximum Length Sequence“ Signal mit nachfolgender Kreuzkorrelation oder eine so genannte „Dual-FFT“ Messung, also der Vergleich der Spektren des Anregungs- und des Ausgangssignals, verwendet.

3.1.1 MLS (Maximum Length Sequence)

Bei diesem Verfahren wird die Impulsantwort mit einem reproduzierbaren, energiereichen Signal, dem MLS-Signal unter Anwendung der Korrelationsmesstechnik bestimmt. Der Vorteil dabei ist, dass nur die Autokorrelationsfunktion des Erregersignals dem idealen Impuls gleichen muss, nicht aber das Signal selbst. Die Systemantwort wird gemessen, mit dem bekannten Erregersignal kreuzkorreliert und daraus die periodische Impulsantwort bestimmt (Abb. 3-1). Mittels DFT erhält man die komplexe, diskrete Übertragungsfunktion, aus der sich alle weiteren Größen bestimmen lassen.



Abb. 3-1: Funktionsweise der MLS-Messung

3.1.2 Sinus-sweep

Verwendet man einen logarithmischen Sweep als Anregungssignal, ist es möglich die lineare Impulsantwort zu bestimmen.

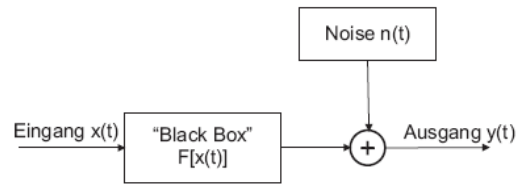


Abb. 3-2: Einfaches Messmodell

Zwischen Eingang $x(t)$ und Ausgang $y(t)$ befindet sich die so genannte „Blackbox“, deren Übertragungsverhalten durch die Messung zu bestimmen ist, sowie eine Störquelle $n(t)$, die dem gemessenen Signal eine Rauschkomponente hinzufügt (Abb. 3-2).

Das Ausgangssignal kann damit durch die Gleichung

$$y(t) = F[x(t)] + n(t)$$

beschrieben werden. Für den Fall eines linearen, zeitinvarianten Übertragungssystems, entspricht die Blackbox der Faltung des Eingangssignals $x(t)$ mit der Impulsantwort $h(t)$ des Systems.

$$y(t) = x(t) * h(t) + n(t)$$

Um die Impulsantwort $h(t)$ zu bestimmen, ist nun lediglich eine "Entfaltung" des Ausdrucks $x(t) * h(t)$ notwendig.

3.1.3 Das Kundtsche Rohr

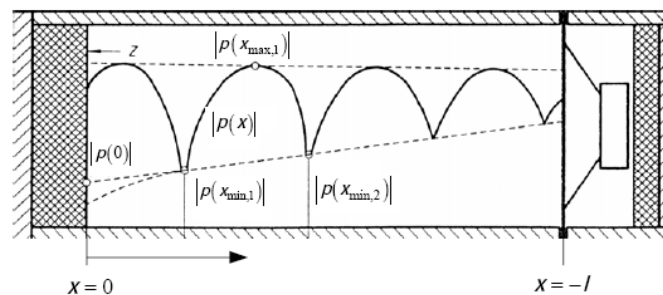


Abb. 3-3: Stehende Welle im Impedanzrohr [ISO 10534-1, S.3]

Bei der Stehwellenmethode wird über einen Schallwandler eine sinusförmige Schallwelle in das Impedanzrohr eingespeist. Diese Schallwelle breitet sich im Impedanzrohr unter bestimmten Fällen eindimensional aus und wird am Rohrende reflektiert. Die reflektierte Welle überlagert sich mit der hinlaufenden Welle und bildet eine Stehwelle im Impedanzrohr (Abb. 3-3). Da die reflektierte Welle und damit die Stehwelle vom akustischen Verhalten des Rohrabschlusses abhängig ist, kann durch das Messen der Druckminima und Druckmaxima der Reflexionsfaktor des Rohrabschlusses (der Probe) bestimmt werden. Die Druckminima und Druckmaxima werden dabei mittels einer Sonde gemessen. Die ebene Schallwellenausbreitung im Impedanzrohr ist durch die Geometrie des Rohres festgelegt. Es

ist somit der Messbereich des Impedanzrohres von seinen Abmessungen abhängig. Das erste Minimum ist im Extremfall bei schallhartem Abschluss genau um $\lambda/4$ von der reflektierenden Oberfläche entfernt.

Es wird normalerweise zur Messung des Absorptionsgrads verschiedener Materialien verwendet. Da für den Nachweis der Wechselwirkung zwischen Raummodenbildung und Nachhallmessung ein Messraum mit bekannten Moden benötigt wird, bietet sich das Kundtsche Rohr hierfür an, der Aufbau mit Abmessungen wird in Abb. 3-4 gezeigt.

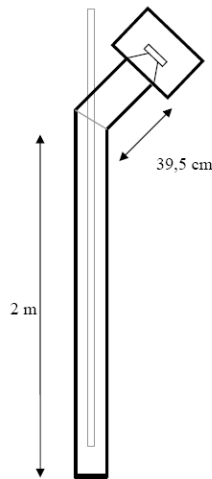


Abb. 3-4: Skizze und Abmessungen des Rohres

3.2 Messungen im Dom zu St. Stephan in Wien

Für die genaue Untersuchung der akustischen Ist-Situation wurden im Sommer 2004 umfangreiche raumakustische Messungen im Dom zu St. Stephan in Wien durchgeführt [Fellner1, Fellner2] (Abb. 3-5). Dabei wurde an insgesamt 213 gleichmäßig im Innenraum verteilten Punkten in 28 Sektoren die Raumimpulsantwort gemessen. Diese Messungen wurden mit der Software WinMLS 2000 durchgeführt. Weiters wurden 5 potentielle Quellorte (Quelle Q1, Q2tief und Q2hoch, Q3, Q4, Q5 – wie in Abb. 3-6 zu erkennen) im Dom festgelegt, wo Ensembles prinzipiell musizieren können. Für die Quelle Q2 wurden die Raumimpulsantworten aller 213 Messpunkte erfasst, für die restlichen Quellen wurde die Anzahl der Messpunkte halbiert (Abb. 3-7).

Für die im Projekt notwendige ortsabhängige Darstellung der unterschiedlichen akustischen Parameter wurde ein Matlab Visualisierungs Tool entwickelt, das in Abschnitt 3.5.4 kurz erklärt wird.

Ziel der vorgestellten Arbeit war es, ein besseres wissenschaftliches Verständnis der akustischen Situation in diesem großen Raum zu bekommen, weil zuvor noch keinerlei ausführliche Messungen vorgenommen worden waren. Auf Basis dieser Messungen und zusätzlicher raumakustischer Simulationen sollten Vorschläge für eine Verbesserung der Musiziersituation erarbeitet werden.

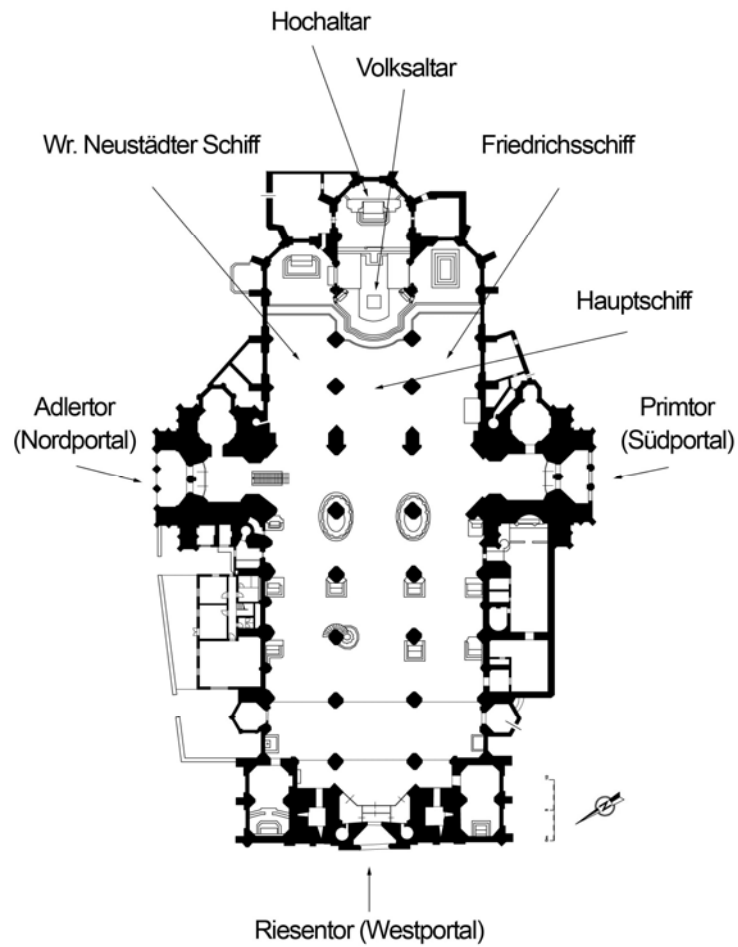


Abb. 3-5: Grundriss Stephansdom

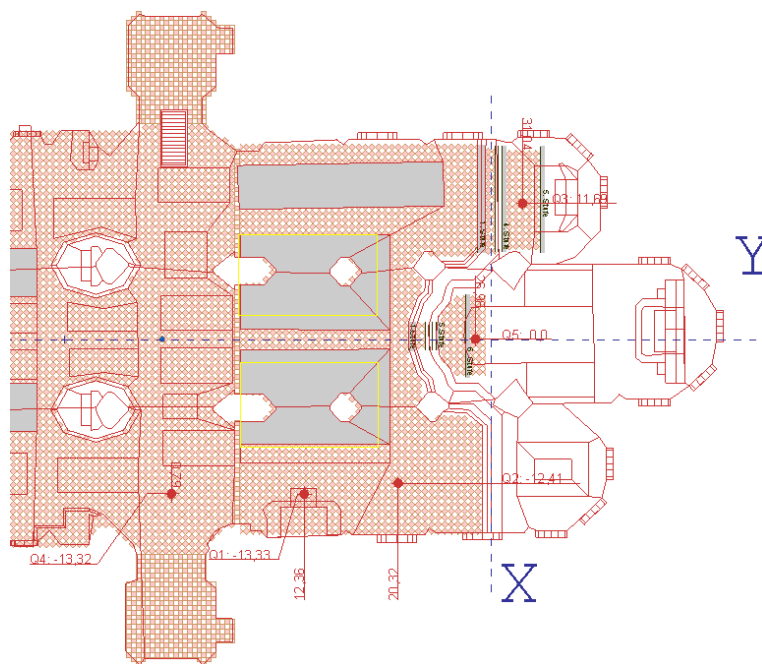


Abb. 3-6: Grundriss Stephansdom, Quellpunkte

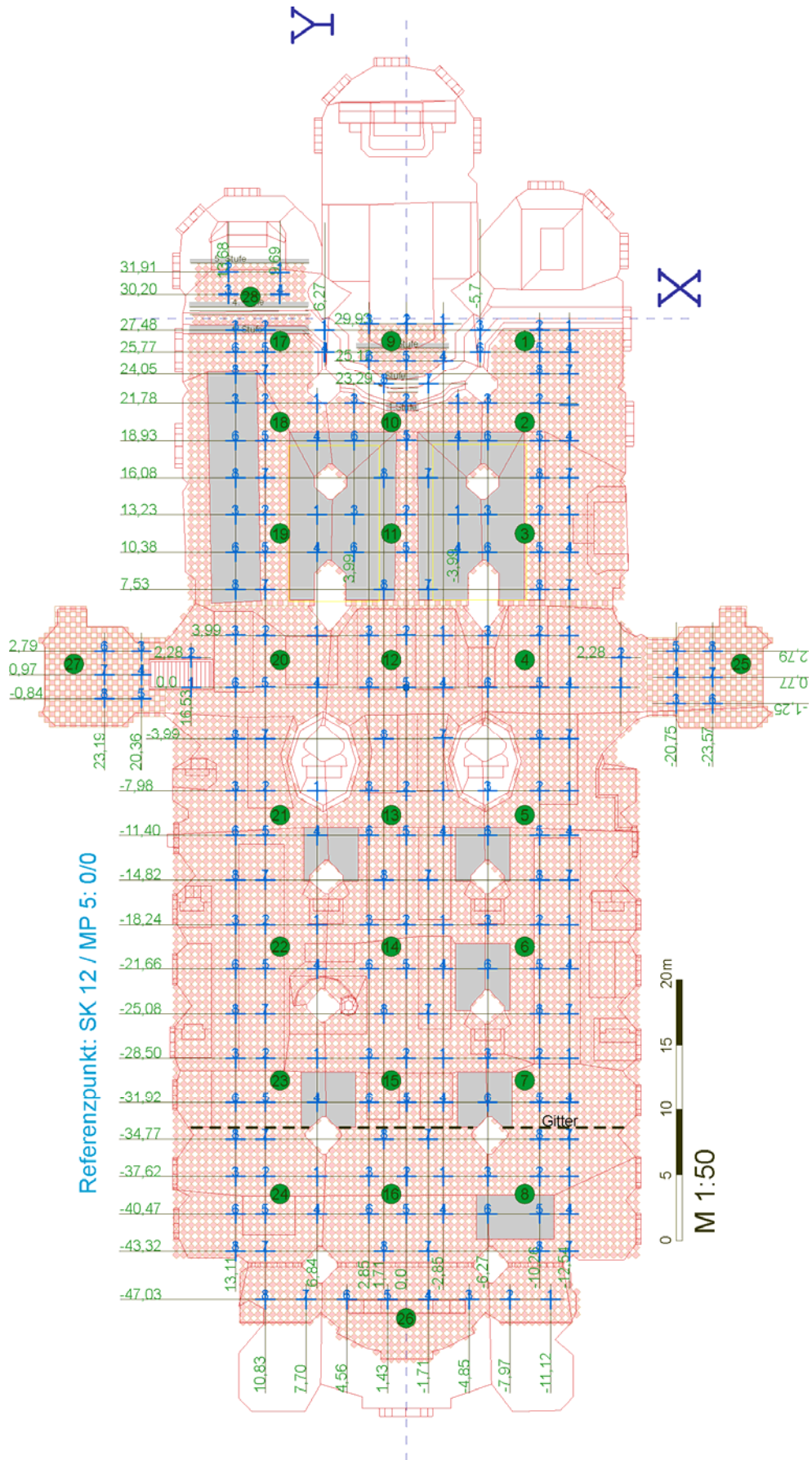


Abb. 3-7: Grundriss Stephansdom, Messpunkte

3.3 IBK Kellergang

3.3.1 Probemessung

Da anscheinend einige Auffälligkeiten der Messdaten nur bei großen Laufzeiten zum Tragen kommen, wird ein langer Gang im Keller des Instituts für Breitbandkommunikation (IBK) der Technischen Universität Graz zunächst mit einer Probemessung erkundet.

Eine örtliche Auswertung der Daten mit derselben Software, die im Stephansdomprojekt verwendet wurde, soll zeigen, ob sich die Besonderheiten der Messdaten vom Dom (vgl. Kapitel 5, S.56) bei einer Messung in einem beliebigen, langgestreckten Raum wiederholt feststellen lassen.

3.3.1.1 Aufbau

Für die Probemessung wird der Abstand der Messpunkte mit 5 m gewählt, die Messung in beiden Richtungen durchgeführt. Die Quelle wird jeweils 2,30 m von der Rückwand entfernt positioniert (Abb. 3-8 und Abb. 3-9).

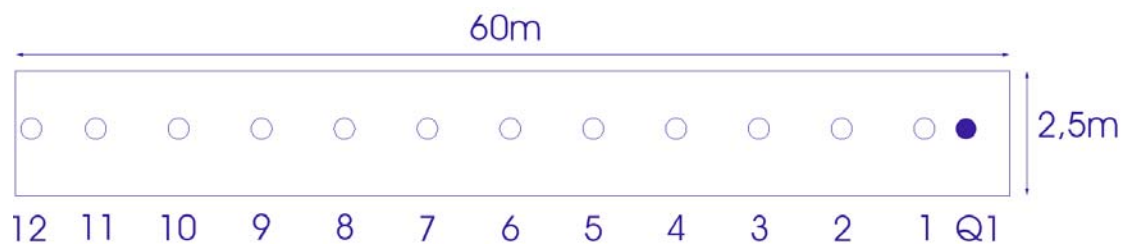


Abb. 3-8: Probemessung, Quelle 1

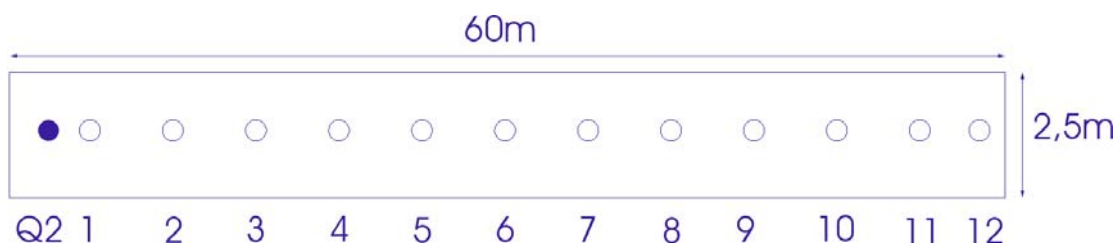


Abb. 3-9: Probemessung, Quelle 2

3.3.1.2 Technik

Für die Messung wurden folgende Geräte verwendet:

- 3 Lautsprecher vom Typ Genelec 1030 auf einem Stativ (0° , -90° , $+90^\circ$; $h=1,20$)

- DAP-Mikrofon auf Stativ ($h=1,20$)
- Swissonic A/D Umsetzer
- RME Audio Interface (Firewire)
- Notebook mit WinMLS 2004, Sinussweeps zur Impulsantwortbestimmung

Nachhallzeit:

Die Berechnung der T30 in Terzbändern erfolgt mittels WinMLS 2004.

Energie-Zeit-Verteilung

Für die Auswertung der Energie-Zeit-Verteilung wird das Matlab Visualisierungs Tool benutzt, die Berechnung erfolgt über Geometriedaten und Impulsantworten.

Die Ergebnisse dieser Messung sind in Abschnitt 6.1, S.79 nachzulesen.

3.3.2 Hauptmessung

Da die Ergebnisse der Probemessung zwar vielversprechend aussehen, allerdings viel zu ungenau sind, wird eine weitere, bedeutend aufwändigere Messung durchgeführt.

3.3.2.1 Aufbau



Abb. 3-10: Messaufbau der IBK Hauptmessung, Schallquelle Q2 mit Trennwand

Da bei der Probemessung der Unterschied zwischen den Quellen Q1 und Q2 auffällig war, wird nun versucht den Aufbau zu optimieren.

Die Probleme auf der linken Seite, also an der Stelle der Quelle Q2, (in Abschnitt 6.1, S.79 erläutert) sind einerseits auf einen Seitengang, andererseits auf die sich dort befindliche Klimaanlage zurückzuführen.

Eine Trennwand wird installiert (Abb. 3-10, rechts), um der Energie möglichst keinen Ausweg zu bieten und die Klimaanlage wird für die Dauer der Messung abgeschaltet.

Die Anzahl der Messpunkte wird auf 162 erhöht, im Abstand von 1 m der Länge nach bzw. 73 cm der Breite nach (Abb. 3-11).

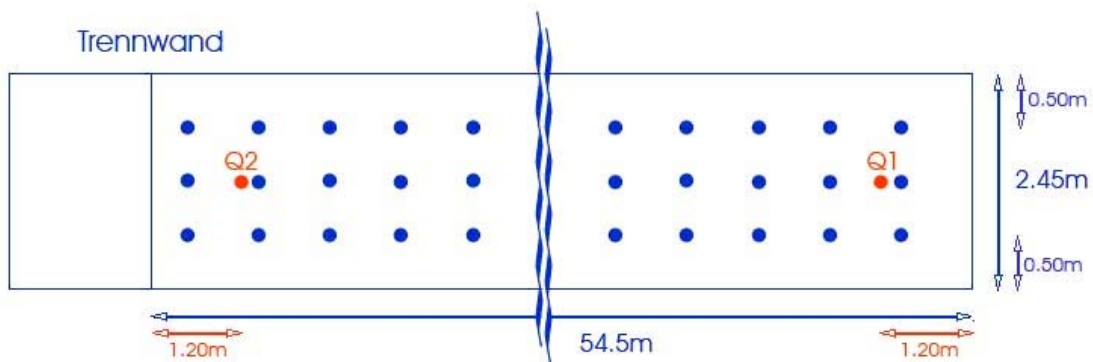


Abb. 3-11: Messaufbau

Da wegen der Abschaltung der Klimaanlage die Messung möglichst schnell durchzuführen war, wurde die Nummerierung für den bestmöglichen Messablauf optimiert. Um bei der späteren Verwendung der Impulsantworten keine Verwirrung zu stiften hier eine genaue Skizze (Abb. 3-12).

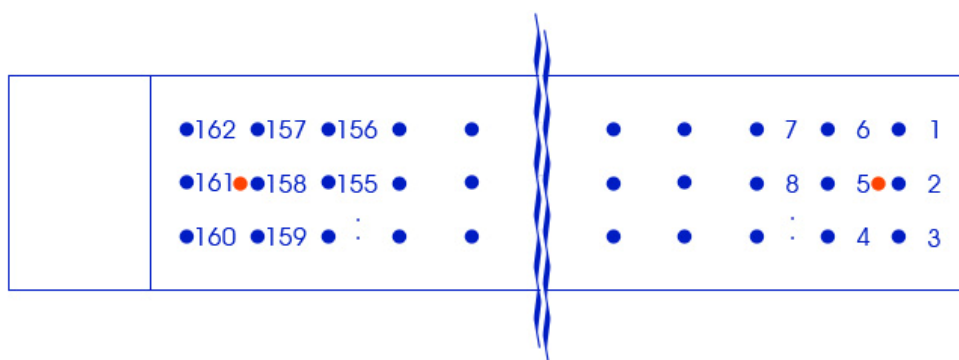


Abb. 3-12: Nummerierungsschema

3.3.2.2 Technik

Für die Messung wurden folgende Geräte verwendet:

- 3 Lautsprecher vom Typ Genelec 1030 auf Stativ (0° , -90° , $+90^\circ$; $h=1,50$)
- DAP-Mikrofon auf Stativ ($h=1,50$)
- Swissonic A/D Umsetzer
- RME Audio Interface (Firewire)
- Notebook mit WinMLS 2004, Sinussweeps zur Impulsantwortbestimmung, zweikanalige Messung

Nachhallzeit:

Die Berechnung der T30 in Terzbändern erfolgt mittels WinMLS 2004.

Energie-Zeit-Verteilung

Für die Auswertung der Energie-Zeit-Verteilung wird das „Matlab Visualisierungstool“ benutzt, die Berechnung erfolgt über Geometriedaten und Impulsantworten.

Die Ergebnisse dieser Messung sind in Abschnitt 6.2, S.88 nachzulesen.

3.4 Messungen im Kundtschen Rohr

Um den Zusammenhang zwischen Raummodenbildung und Nachhallzeit gezielt zu erforschen wurde das Kundtsche Rohr als Messraum gewählt.

Es soll hierbei erforscht werden, ob die Nachhallzeitmessung von der Ausbildung von Raummoden beeinflusst wird oder sogar ein direkter Zusammenhang besteht. Der Hypothese folgend (vgl. Abschnitt 4.2.4, S.55) müsste die Nachhallzeit in einem Druckmaximum gemessen am kleinsten sein, da der Energieabfall hier am schnellsten vonstatten geht.

In zahlreichen früheren Versuchen wurden diverse Simulationsdaten mit entsprechenden Messreihen überprüft, diese Daten lagen vor [Hiebel].

3.4.1 Aufbau

Das Kundtsche Rohr wurde mit schallhartem Abschluss versehen und den Notwendigkeiten entsprechend verkabelt (Abb. 3-13).

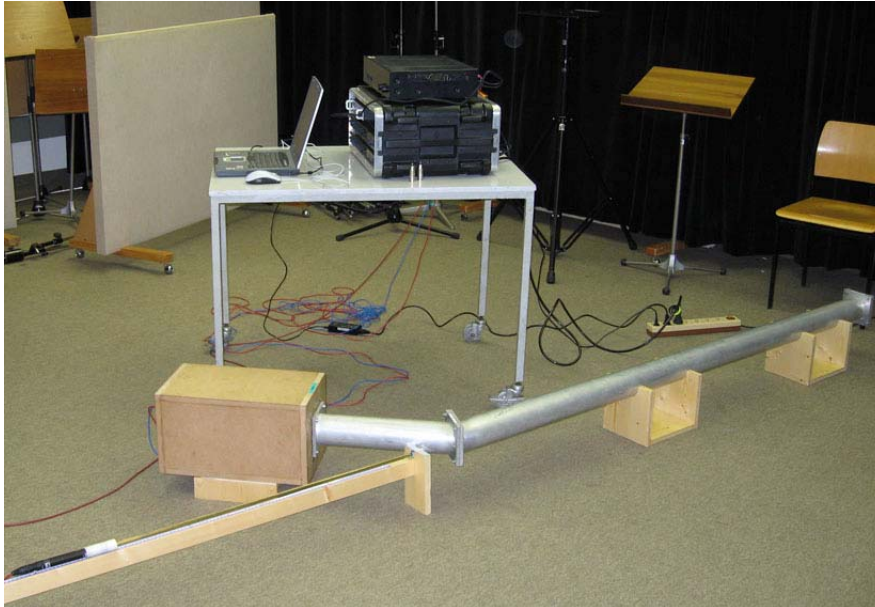


Abb. 3-13: Kundtsches Rohr, Messaufbau

3.4.2 Messung der Nachhallzeit T30

Die Software WinMLS 2004 wird zur Impulsantwortbestimmung an insgesamt 181 Messpunkten mit einem Abstand von 1cm verwendet. Aus diesen Impulsantworten können die raumakustischen Parameter berechnet werden.

Die Ergebnisse sind in Abschnitt 6.4.1, S.110 zu finden.

3.4.3 Messung mit sinusförmiger Erregung

Um besser zu verstehen wie sich Stehwellen während der Ausklingzeit verhalten, wurde noch eine weitere Messung durchgeführt.

Das Kundtsche Rohr wurde durch Sinusschwingungen bei verschiedenen Frequenzen angeregt. Mit Hilfe eines Messmikrofons (Druckempfänger) wurden Druckmaxima bzw. Druckminima der stehenden Welle im Rohr gesucht und der empfangene Schalldruck beim Abschalten der Quelle (mit sehr kurzem Fade-out, um Verzerrungen des Lautsprechers zu verhindern) aufgezeichnet.

Die Ergebnisse dieser Messung sind in Abschnitt 6.4.3, S.124 zu finden.

3.5 Software

Alle genannten Versuche benötigen eine Software zur Berechnung der relevanten Daten. Eine automatische Auswertung großer Datenmengen ist nicht unproblematisch, da manuelle

Kontrolle praktisch nicht mehr möglich ist. Die Qualität dieser Programme soll verglichen werden und entscheidende Unterschiede und mögliche Fehlerquellen bei der Auswertung sollen aufgezeigt werden.

Es werden nun zwei Softwarepakete zur Berechnung raumakustischer Parameter vorgestellt, des Weiteren eine akustische Simulationsumgebung und das Matlab Visualisierungstool sowie ein Tool das Kundtsche Rohr betreffend.

Die Impulsantworten an bestimmten Messpunkten dienen zur Bestimmung der raumakustischen Größen. Bei dieser Berechnung ist eine Vielzahl an Parametern zu berücksichtigen. Um entsprechend umfangreiche Messungen mit vielen Messpunkten rasch auswerten zu können, ist vor allem die Qualität der automatischen Auswertung von Interesse.

3.5.1 dBBATI

dBBATI nennt sich das Softwarepaket von 01dB [01dB] zur Berechnung der Raumakustik. Es enthält unter anderem ein Programm zur Messung und Auswertung der Nachhallzeit in Gebäuden.

3.5.1.1 Berechnung

Die Nachhallzeit wird in dBBATI wie folgt berechnet:

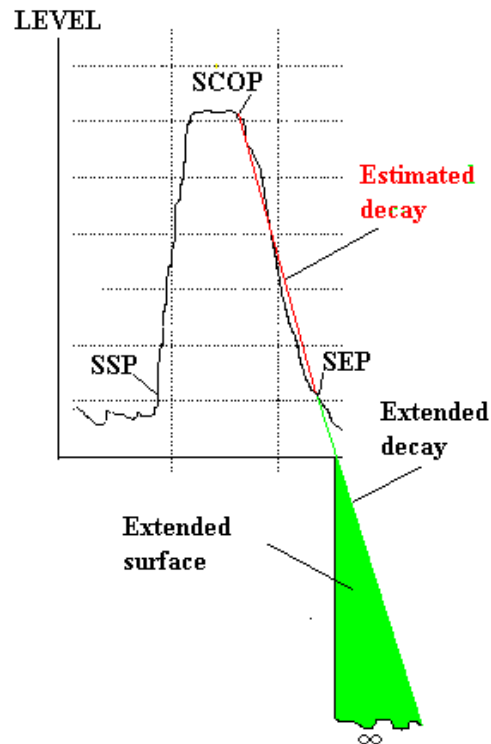
Automatischer Modus

Abb. 3-14: Software dBBATI, automatische Berechnung des Energieabfalls

Der „Sequence starting point“ (SSP) wird gesucht (frequenzunabhängig). Der SCOP „Sequence cut-off point“ ist jener Punkt an dem die Anregung abgeschaltet wurde (frequenzunabhängig). Eine geschätzte Abfallgerade wird als lineare Regression zwischen den Punkten SCOP und SEP („Sequence ending point“) definiert (Abb. 3-14). Diese Gerade wird ins Unendliche extrapoliert („extended surface“). Dadurch ist nun die Abfallkurve komplett definiert und die Nachhallzeit kann berechnet werden.

User Modus

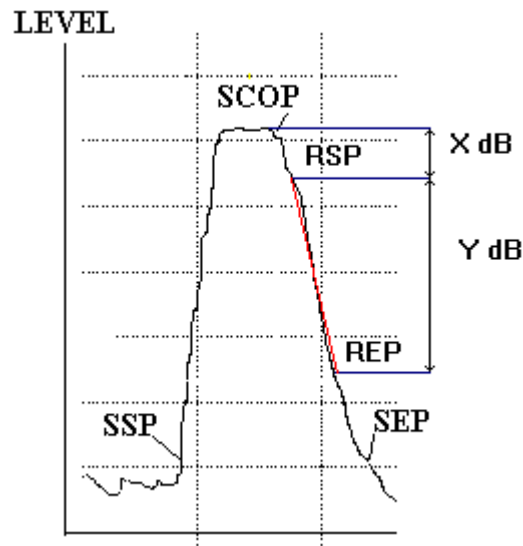


Abb. 3-15: Software dBATI, manuelle Berechnung des Energieabfalls

Ein Startwert (X [dB]) kann gesetzt werden. Er definiert den „regression starting point“ (RSP) als Punkt der Abfallgerade, an dem man sich X dB unter SCOP befindet (frequenzabhängig).

Weiters existiert der Parameter Y [dB], der für den „regression ending point“ (REP) verantwortlich ist, der sich wiederum Y dB unter RSP befindet (frequenzabhängig).

Die Option „strict“ verhindert eine Berechnung in einem bestimmten Band, wenn der REP Punkt nicht definiert werden kann, also die Dynamik des Abfalls kleiner Y-X ist. Ist „strict“ nicht gesetzt, wird die Nachhallzeit zwischen RSP und SEP berechnet (Abb. 3-15).

Die Software zeigt schließlich die Korrelation zwischen linearer Regression und der Abfallkurve.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist „time step of decays [ms]“. Er bestimmt die Zeitbasis für die Berechnung des Nachhallzeit-Abfalls. Genauere Werte erhält man mit kleiner Zeitbasis, allerdings erhöht sich auch die Berechnungszeit.

3.5.2 WinMLS 2000 und 2004

Ein weiteres Softwarepaket für akustische Messungen ist WinMLS [WinMLS].

Die Möglichkeiten der manuellen Parametereingabe im Vergleich zur automatischen Auswertung sollen an Hand eines Beispiels erläutert werden.

3.5.2.1 WinMLS 2004 Softwareeinstellungen am Beispiel IBK Hauptmessung Q1 123 (vgl. 6.2.2, S. 90)

Als Beispiel dient hier ein Messpunkt der IBK Kellermessung mit einem ausgeprägten Fehler bei 50 Hz (Abb. 3-16). Der EDR beträgt hier nur 26.1 statt mindestens 35 für die T30 Auswertung, die Nachhallzeit bei dieser Frequenz wird sicherlich falsch berechnet.

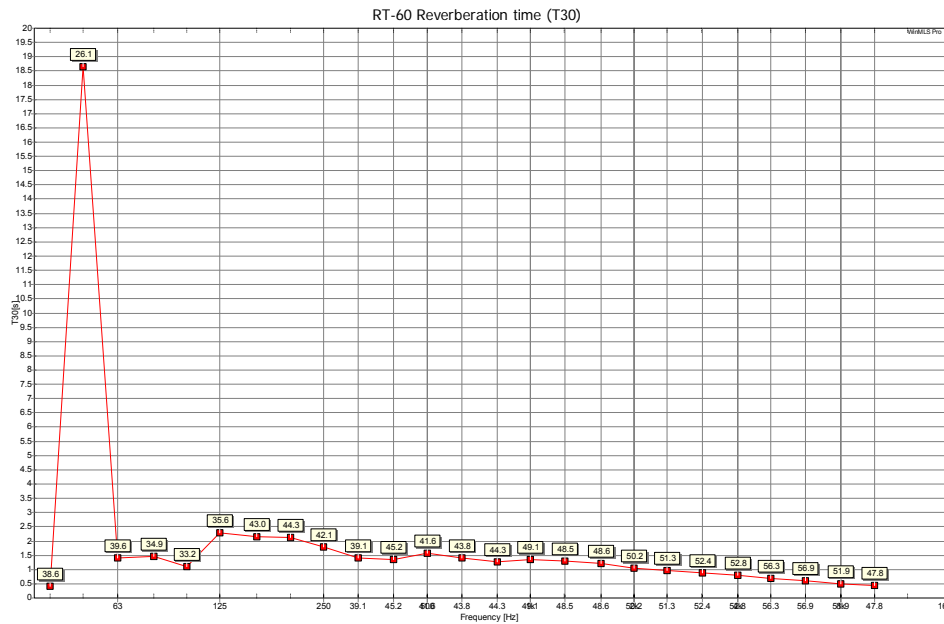


Abb. 3-16: IBK Hauptmessung, Q1-123: Nachhallzeit T30

Die numerische Auswertung im Frequenzbereich bis 250 Hz wird in der folgenden Tabelle dargestellt.

f [Hz]	40	50	63	80	100	125	160	200	250
snr[dB]	19.6	29.8	28.3	24.7	22.3	30.6	33.1	38.5	34.7
edr[dB]	38.6	26.1	39.6	34.9	33.2	35.6	43	44.3	42.2
T30[s]	0.43	18.66	1.4	1.46	1.09	2.29	2.16	2.12	1.8
corr	-0.963	-0.733	-0.993	-0.992	-0.992	-0.988	-0.988	-0.98	-0.993
T20(s)	0.57	7.67	1.36	1.58	1.05	1.89	1.9	1.68	1.55
corr	-0.94	-0.808	-0.979	-0.978	-0.991	-0.98	-0.977	-0.979	-0.992
r[m]	2.1								

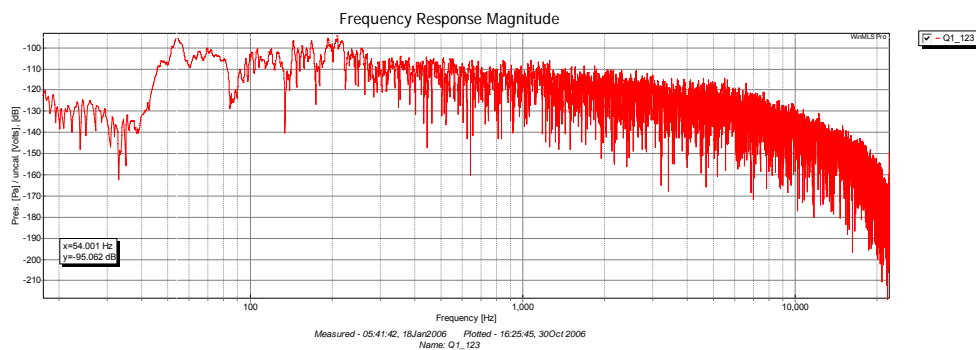


Abb. 3-17: IBK Hauptmessung Q1-123, Frequenzgang

Bei der Betrachtung des Frequenzgangs (Abb. 3-17) fällt auf, dass er bei 54 Hz eine Spitze aufweist, was auf einen Zusammenhang mit der Raummodenbildung schließen lässt, auf die in Abschnitt 6.4.2, S.113 noch genauer eingegangen wird.

Interessant ist hier, dass es anscheinend zwischen EDR und SNR doch größere Unterschiede gibt, da der SNR bei 50 Hz eigentlich ausreichend wäre, der EDR hingegen unzureichend ist (Abb. 3-18). In diesem Fall liegt ein Zusammenhang mit dem Korrelationsgrad („corr“) nahe.

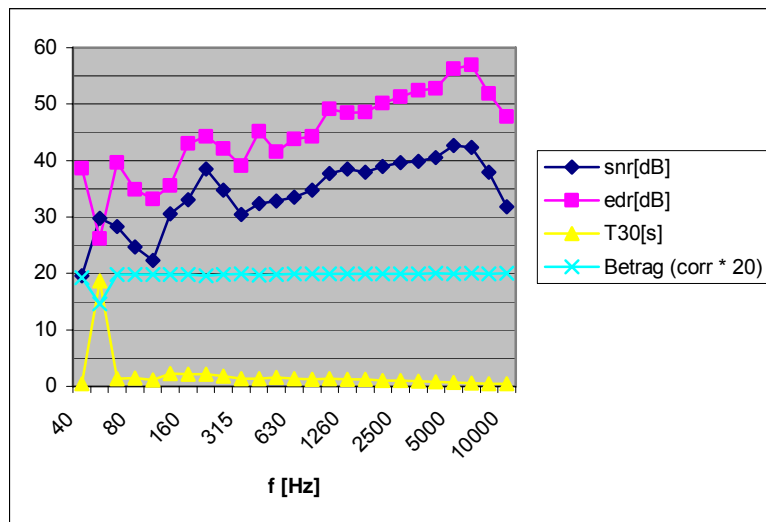


Abb. 3-18: IBK Hauptmessung, Q1-123: SNR, EDR, T30, corr

Eine weitere Möglichkeit in die Berechnungen händisch einzugreifen ist der betrachtete Zeitabschnitt der Impulsantwortmessung. Wird er zu lange gewählt ist im hinteren Abschnitt keine Information mehr vorhanden, nur mehr Rauschen, das allerdings mit aufintegriert wird.

Ein Vergleich der gesamten Impulsantwort mit 3 s, mit 2.2 s, 1.6 s und 1 s in Abb. 3-19 zeigt die Unterschiede in der Auswertung der T30, Abb. 3-20 stellt die zeitbegrenzte Impulsantwort dar.

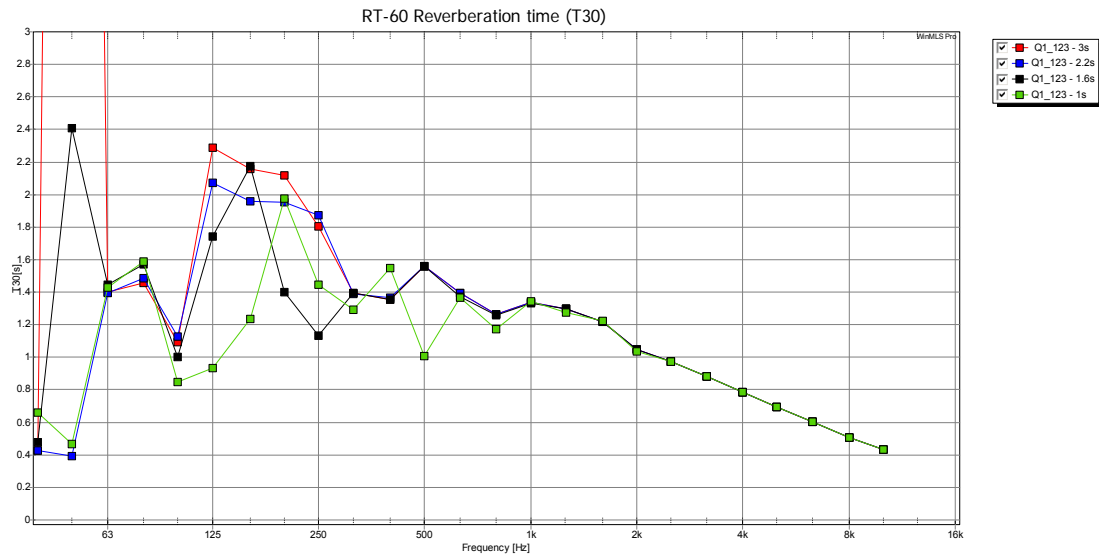


Abb. 3-19: IBK Hauptmessung, Q1-123: Nachhallzeit T30 bei verschiedener Impulsantwortlänge

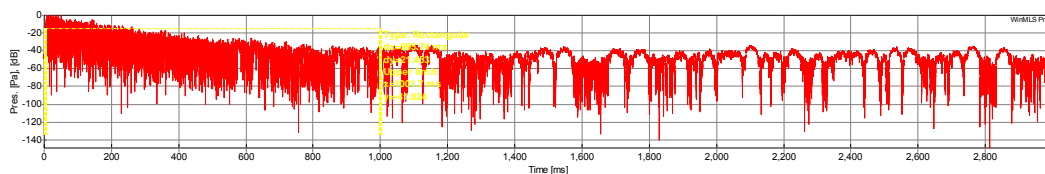


Abb. 3-20: IBK Hauptmessung, Q1-123: Impulsantwort auf 1s begrenzt

Die Rückwärtsintegration kann ungefiltert oder gefiltert aus der Impulsantwort berechnet werden. Diese sogenannte „Schroeder Kurve“ wird anschließend noch auf 0 dB normalisiert.

Bei problematischen Impulsantworten, auch abhängig von der Qualität der Messung, ist es möglich das Abschneiden („truncation“) und die Kompensation („compensation“) abzuschalten, um schließlich die gefilterte Kurve weiter zu analysieren (Abb. 3-21).

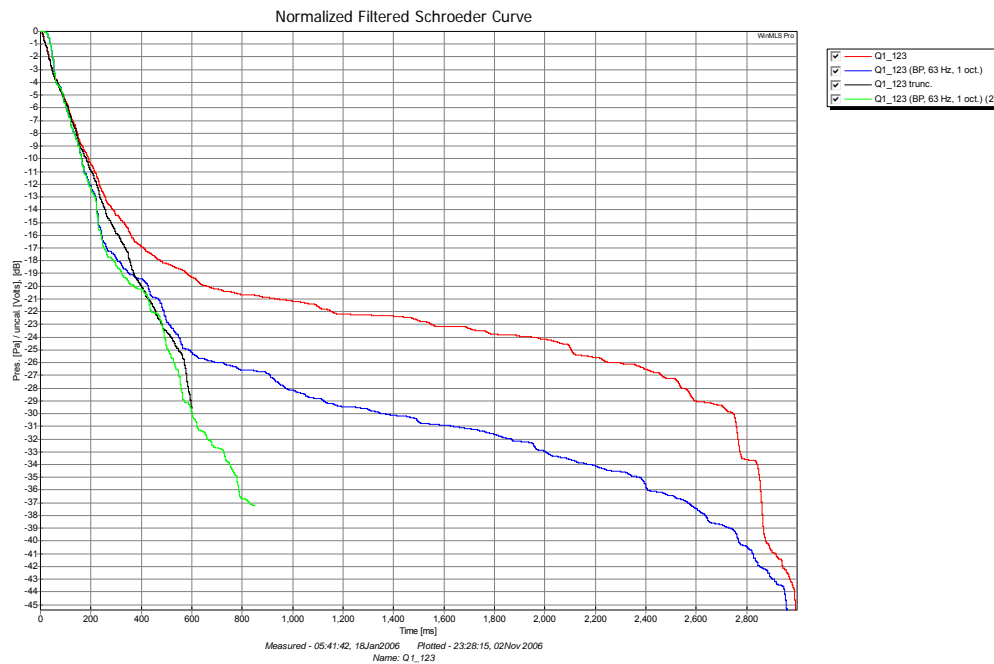


Abb. 3-21: IBK Hauptmessung, Q1-123: Normalisierte Schroeder Kurven

Die ungefilterte abgeschnittene Kurve produziert hier einen Energieabfall von 30dB, also zuwenig für eine T30 Berechnung.

Um die Auswirkung möglicher Filtereinstellungen noch näher zu beleuchten hier noch weitere Beispiele:

Um bestimmte Frequenzbereiche genauer zu untersuchen erfolgt eine einfache Filterung wie im nächsten Beispiel (Abb. 3-22). Die Mittelung über alle Punkte von Q1 zeigt zwei Spitzen im unteren Frequenzbereich bei 53,8 Hz und ca.101 Hz.

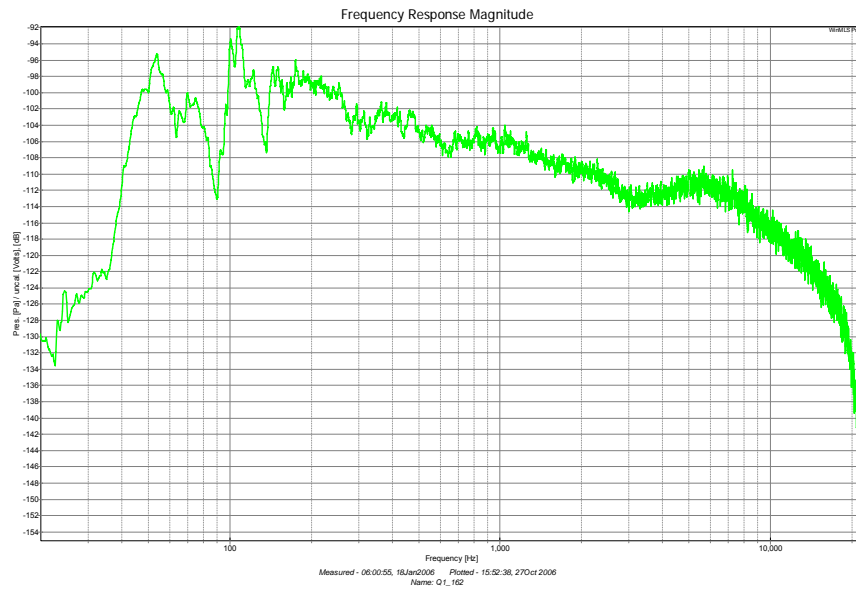


Abb. 3-22: IBK Hauptmessung, Q1: Mittelung, ohne Filter, peaks bei 53.8 Hz und ca. 101 Hz

Noch einmal der Frequenzgang am Punkt 123, diesmal mit der integrierten „room acoustic“ Bandpassfilter bei 40 Hz und 1/3 Oktav Breite (Abb. 3-23).

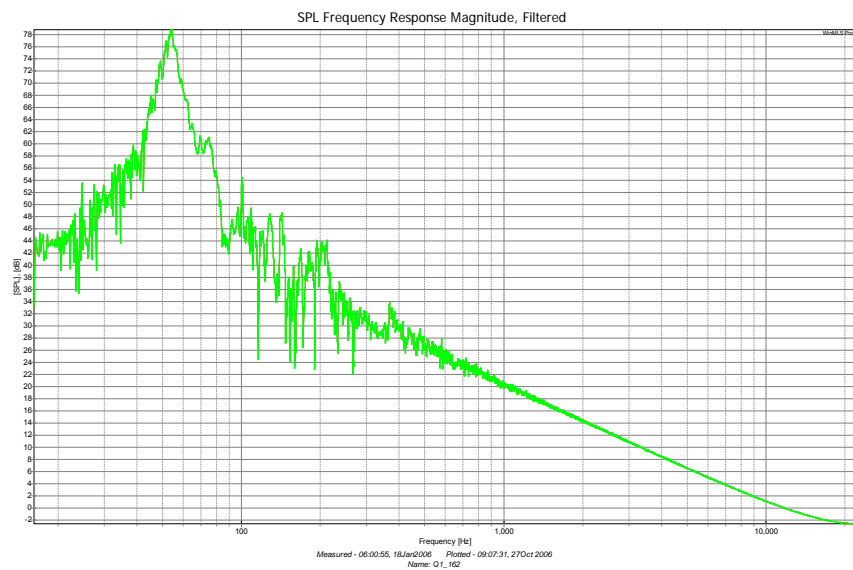


Abb. 3-23: IBK Hauptmessung, Q1: Mittelung, room acoustic BP, peak 53.8 Hz

In Abb. 3-24 noch einmal der direkte Vergleich zwischen gefilterter und ungefilterter Version.

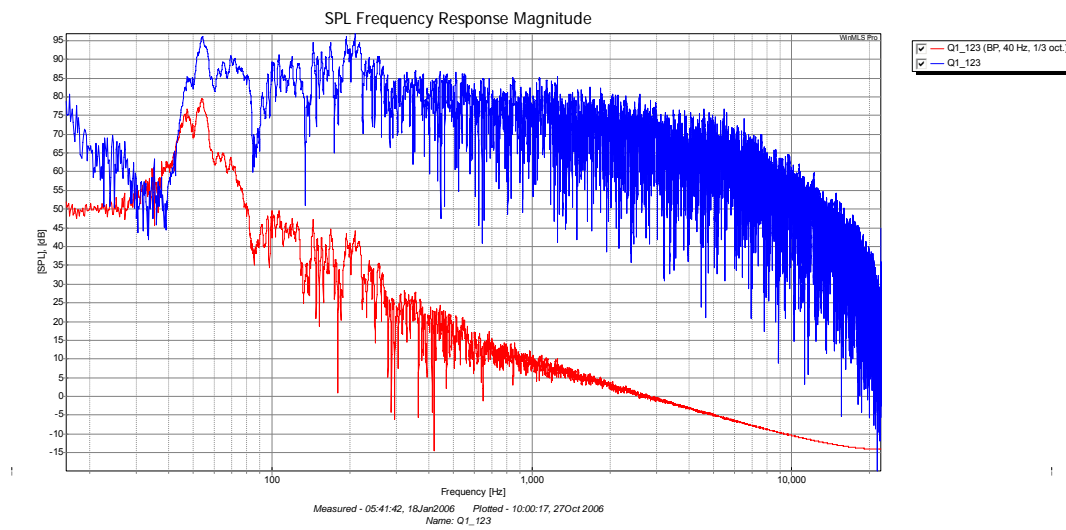


Abb. 3-24: IBK Hauptmessung, Q1-123: Frequenzgang mit (rot) und ohne (blau) Filter, peak bei 54 Hz

Diese deutliche Spitze bei 54 Hz hängt wahrscheinlich mit der Raummodenbildung im entsprechenden Raum zusammen. Nachfolgend eine Tabelle mit errechneten Moden für den IBK Kellergang:

Axial Modes

Length	Width	Height
Mode Frequency	Mode Frequency	Mode Frequency
1 0 0	0 1 0	0 0 1
3.155	68.8	50.58
2 0 0	0 2 0	0 0 2
6.311	137.6	101.1
3 0 0	0 3 0	0 0 3
9.467	206.4	151.7
4 0 0	0 4 0	0 0 4
12.62	275.2	202.3
5 0 0	0 5 0	0 0 5
15.77	344	252.9
6 0 0	0 6 0	0 0 6
18.93	412.8	303.5
7 0 0	0 7 0	0 0 7
22.09	481.5	354.1
8 0 0	0 8 0	0 0 8
25.24	550.4	404.7
9 0 0	0 9 0	0 0 9
28.40	619.2	455.2

Tangential Modes

Length & Width		Length & Height		Width & Height	
Mode	Frequency	Mode	Frequency	Mode	Frequency
1 1 0	68.87	1 0 1	50.68	0 1 1	85.39
1 2 0	137.6	1 0 2	101.2	0 1 2	122.3
1 3 0	206.4	1 0 3	151.7	0 1 3	166.6
1 4 0	275.2	1 0 4	202.3	0 1 4	213.7
2 1 0	69.08	2 0 1	50.98	0 2 1	146.6
2 2 0	137.7	2 0 2	101.3	0 2 2	170.7
2 3 0	206.4	2 0 3	151.8	0 2 3	204.8
2 4 0	275.2	2 0 4	202.4	0 2 4	244.7
3 1 0	69.44	3 0 1	51.46	0 3 1	212.5
3 2 0	137.9	3 0 2	101.6	0 3 2	229.8
3 3 0	206.6	3 0 3	152.0	0 3 3	256.1
3 4 0	275.3	3 0 4	202.5	0 3 4	289.0
4 1 0	69.94	4 0 1	52.13	0 4 1	279.8
4 2 0	138.1	4 0 2	101.9	0 4 2	293.2
4 3 0	206.7	4 0 3	152.2	0 4 3	314.2
4 4 0	275.4	4 0 4	202.7	0 4 4	341.5

Oblique Modes

Mode	Frequenc y	Mode	Frequenc y	Mode	Frequenc y	Mode	Frequenc y
1 1 1	85.45	1 1 2	122.3	1 2 1	146.6	2 1 1	85.62
2 2 2	170.9	2 2 1	146.7	2 1 2	122.5	1 2 2	170.8

Man erkennt aus der Tabelle eine axiale Mode bei 50,58 Hz, sowie tangentielle Moden bei 50,68 Hz, 50,98 Hz, 51,46 Hz und 52,13 Hz. Die vermutete Raummodenbildung um 50 Hz kann also rechnerisch bestätigt werden.

Bei nicht optimalen Messergebnissen in Bezug auf Störungen und damit verbundene zu niedrige Werte bei SNR bzw. EDR ist das Ergebnis mit händischer Nachbearbeitung verbesserungsfähig. Auf Grund der großen Datenmenge bei derartigen Messungen ist jedoch eine möglichst genaue automatische Auswertung wünschenswert.

3.5.3 CATT Acoustic

CATT-Acoustic [CATT] ist eine raumakustische Simulationssoftware, die akustische Vorhersagen mit hoher Genauigkeit erlaubt. Dabei ist die Verwendung beliebiger Oberflächen und Quellen möglich. Streugrade von Oberflächen können mit einbezogen werden; dies ist sehr wichtig für die realistische Auralisation, eine Besonderheit der Software.

3.5.4 Matlab Visualisierungs Tool (MVT)

Das Visualisierungstool (MVT) [Weber] wurde in Matlab entwickelt und bietet zwei Hauptpunkte:

- räumliche Darstellung von Messparametern
- Berechnung des Energie-Zeit-Verlaufs (EZV) aus den Impulsantworten und räumliche Darstellung der Energieverhältnisse in Abhängigkeit von der Zeit

Die Daten werden in einer Excel-Tabelle mit den räumlichen Koordinaten und den Namen der Impulsantworten eingegeben. Die Darstellungsfeatures umfassen im Wesentlichen 3D-Darstellung der Messdaten, Vergleich von Messdaten und das Erstellen von Animationen der Veränderung von Messparametern, wie z.B. die Änderung der Nachhallzeit im Raum in Abhängigkeit von der Frequenz.

3.5.5 Simulation des Kundtschen Rohres

Dieses Simulationsprogramm [Hiebel] wurde ebenfalls in Matlab erstellt und ermöglicht die Darstellung und den Vergleich von Mess- und Simulationsdaten im Kundtschen Rohr.

3.5.6 Vergleich zwischen dBATI und WinMLS

Die folgenden Beispiele wurden aus der Stephansdommessung gewählt.

Die Auswertung mit Standardeinstellungen in dBATI (Default: 10 ms) für den Punkt Q2T, Sekt.21, Mik.1 ergibt bei 500 Hz eine Nachhallzeit von 5,48 s (Abb. 3-25) in guter Übereinstimmung zu WinMLS mit 5,47 s. Die automatische Erkennung funktioniert sehr gut.

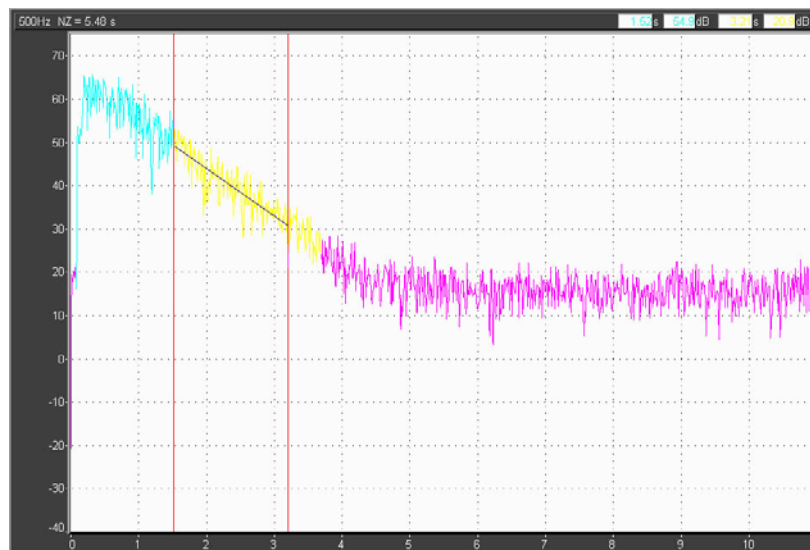


Abb. 3-25: dBATI Nachhallzeit, Q2T: Sek 21, Mik.1: 500 Hz, 10 ms

Bei 63 Hz sind deutliche Probleme bei der Erkennung ersichtlich, eine Nachhallzeit von 25,23 s (Abb. 3-26) bzw. mit WinMLS 12,38 s wird berechnet.



Abb. 3-26: dBATI Nachhallzeit, Q2T: Sek 21, Mik.1, 63 Hz, 10 ms

Der Parameter „time step of decays [ms]“ wird nun auf 200 ms eingestellt und die Auswertung wiederholt. Bei 500 Hz ändert sich nichts, dBATI errechnet 5,47 s, WinMLS 5,47 s; die Kurve erscheint allerdings deutlich geglättet (Abb. 3-27).

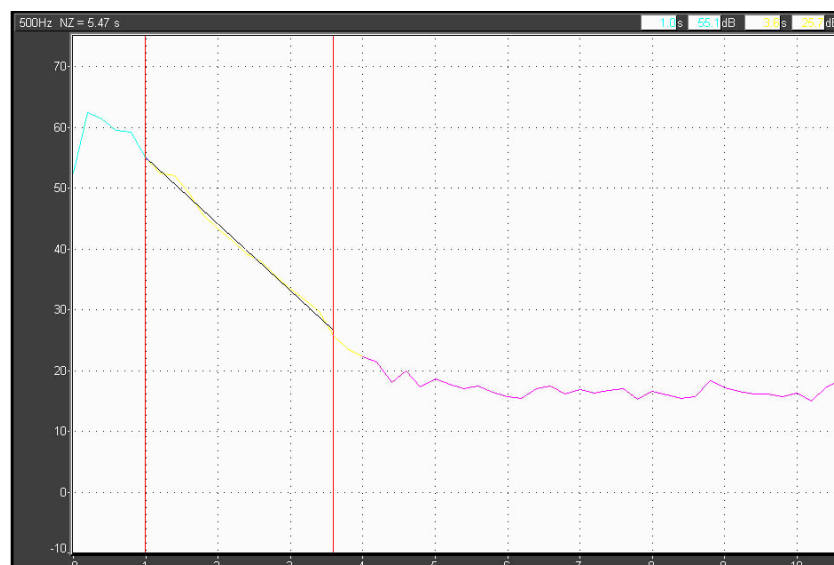


Abb. 3-27: dBATI Nachhallzeit, Q2T: Sek 21, Mik.1: 500 Hz, 200 ms

Auch die Kurve der 63 Hz Berechnung erscheint viel glatter (Abb. 3-28), die Nachhallzeit ergibt nun mit dBATI 6,93s, mit WinMLS 12,38s. Der unglaubliche Wert von vorher wird somit durch einen deutlich niedrigeren ersetzt, WinMLS scheint allerdings nun zu hoch zu liegen, oder aber die Glättung verfälscht auch das Ergebnis.

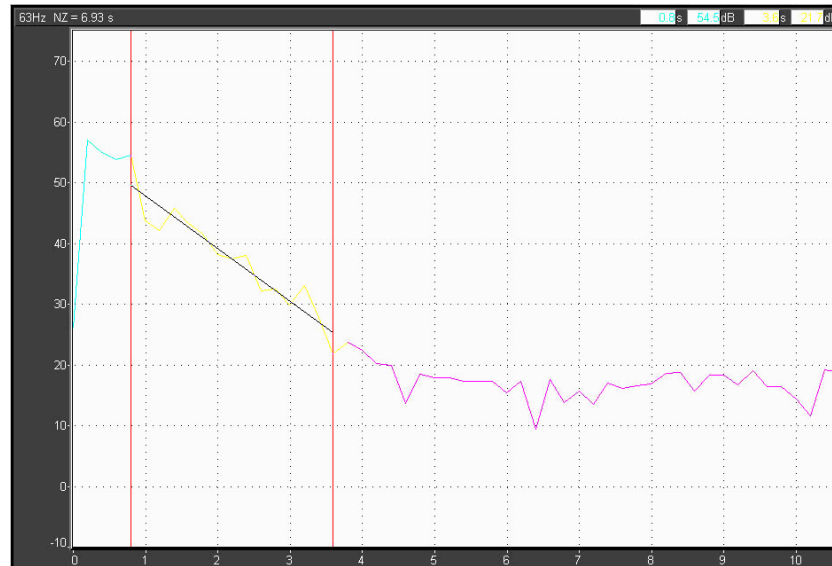


Abb. 3-28: dBBATI Nachhallzeit, Q2T: Sek 21, Mik.1: 63 Hz, 200 ms

Abb. 3-29 zeigt den Vergleich zwischen der Auswertung mit WinMLS und zweier Einstellungen von dBBATI.

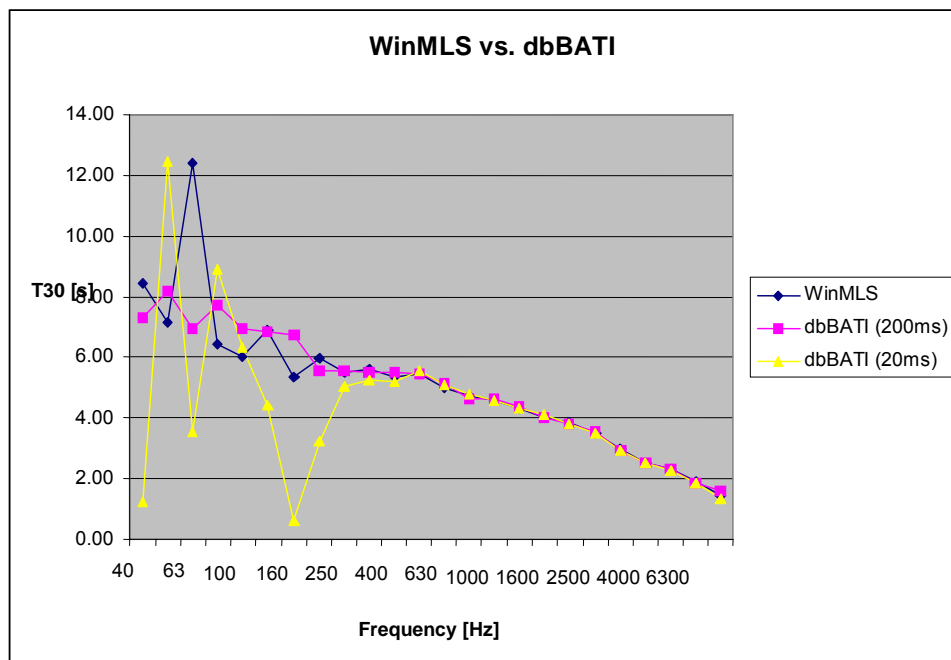


Abb. 3-29: Vergleich der Nachhallzeit T30 in WinMLS und dBBATI

Durch die zeitliche Mittelung bzw. Glättung der Kurve ist ein verändertes Detektionsverhalten der Software zu erkennen; es ist allerdings sehr schwierig zu bestimmen, ab wann es sich um eine „Verschönerung“ der Auswertung handelt und in wieweit es tatsächlich vorhandene Spitzen im tieffrequenten Bereich des jeweiligen Raumes sind.

Die Stephansdommessung zeigt einen ungewöhnlichen Anstieg bei 63 Hz (Abb. 3-30). Eine mögliche Erklärung dafür könnte das soeben erklärte Auswerteproblem der Software sein.

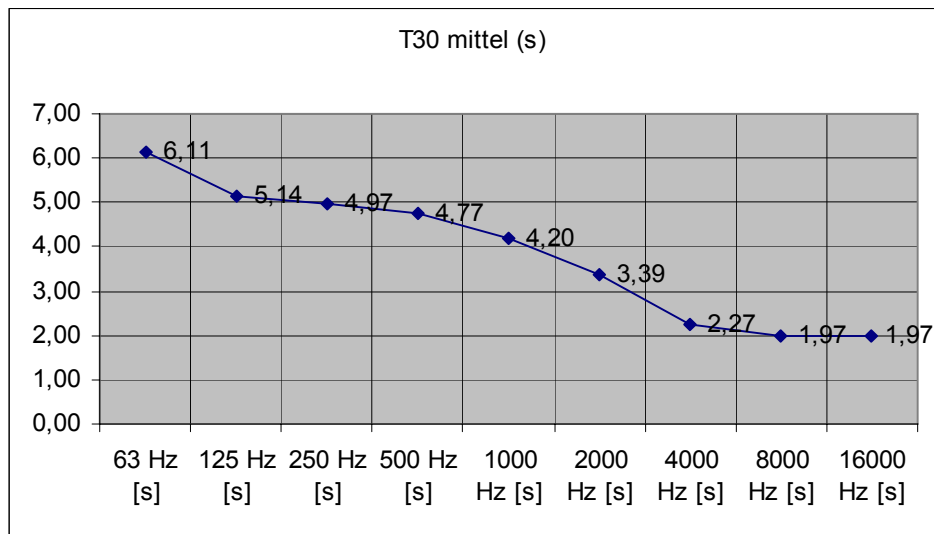


Abb. 3-30: Nachhallzeit T30 Stephansdom, Mittelwert

Zur Verdeutlichung noch einmal der Vergleich zwischen WinMLS und dBATI, diesmal mit allen möglichen Zeitparametern der 01dB Software.

An diesem Messpunkt (Q2T, Sekt.21, Mik.1) scheint es so, dass die Auswertung mit größerem Zeitparameter immer besser wird (Abb. 3-31).

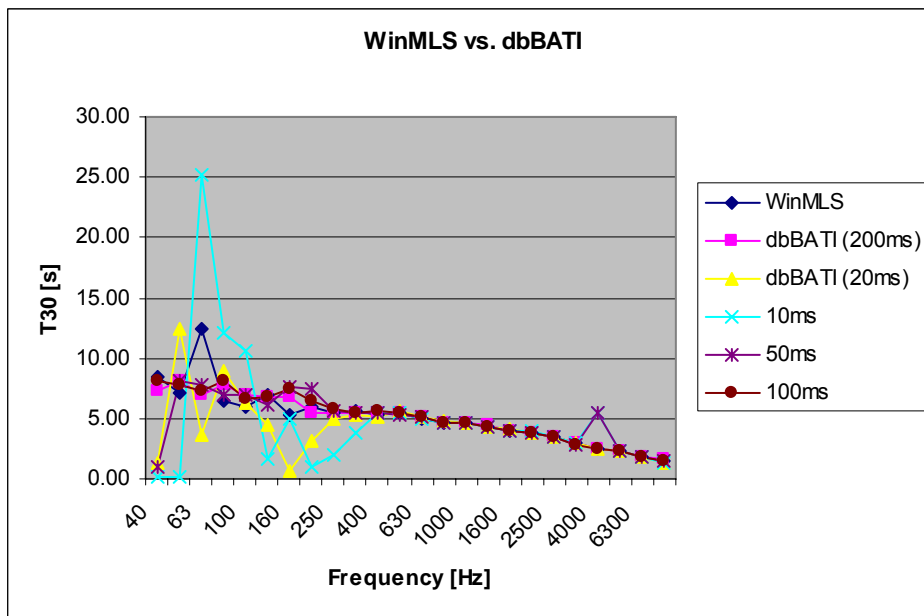


Abb. 3-31: Nachhallzeit T30, Q2T:-Sekt.21, Mik.1, mit WinMLS und dBATI in verschiedenen Einstellungen

An einem anderen Punkt hingegen (Q2T, Sekt.16, Mik.5) wird im schwierig auszuwertenden Bereich, nämlich bei ca.160 Hz bis 315 Hz klar, dass eine Erhöhung dieses Parameters nicht immer die Lösung sein kann.

Diese Grafik (Abb. 3-32) zeigt auch den Vergleich mit WinMLS 2004, der neueren Version der Software. Eine wesentliche Neuerung ist die Einführung eines Wertes zur Darstellung der Gültigkeit der Auswertung, genannt EDR, vgl. Abschnitt 2.2.6, S.20. Für die T30 Auswertung müsste der EDR mindestens 35 dB betragen. (aus Gründen der besseren Darstellung zeigt Abb. 3-32 den EDR Wert dividiert durch 10)

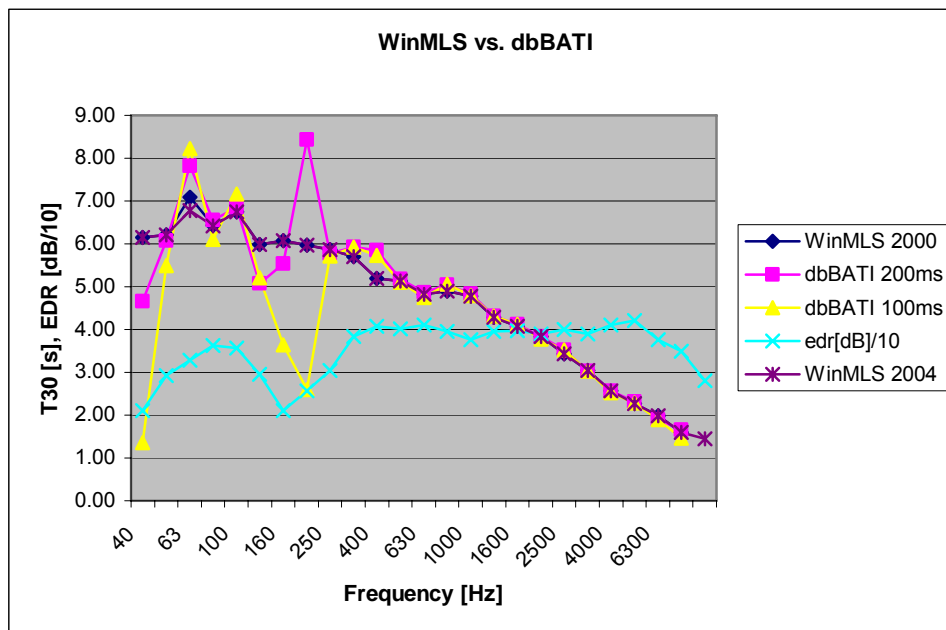


Abb. 3-32: Nachhallzeit T30 und EDR, Q2T: Sekt. 16, Mik.5, mit WinMLS 2000, 2004 und dbBATI

3.5.7 Vergleich zwischen CATT und WinMLS

Die Simulation mit der Software CATT 8.0 entspricht nach einigen Anpassungsschritten im Großen und Ganzen gut den Messdaten, bis auf eine deutliche Abweichung bei tiefen Frequenzen (Abb. 3-33).

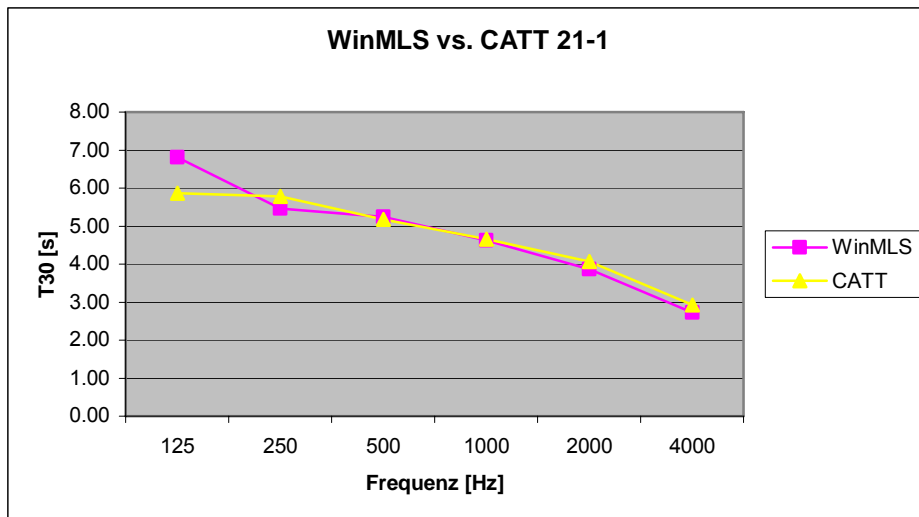


Abb. 3-33: Nachhallzeit T30, Q2T Sekt. 21, Mik. 1: WinMLS und CATT

Als Beispiel noch ein zweiter Vergleichspunkt (Abb. 3-34).

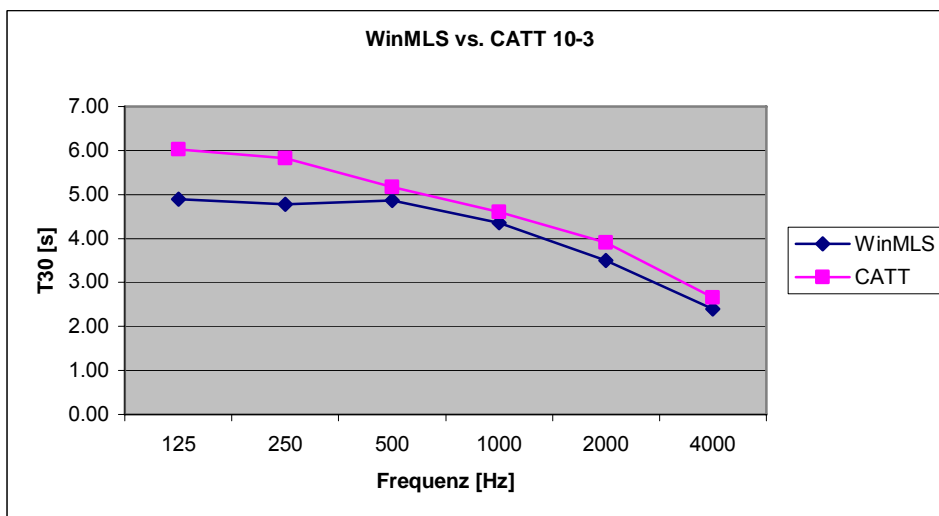


Abb. 3-34: Nachhallzeit T30, Q2T Sekt. 10, Mik. 3: WinMLS und CATT

4 Hypothesen zu den vorhandenen Messdaten

4.1 Einleitung

Bei der Analyse der Stephansdommessung fallen zwei Besonderheiten auf: Zum einen ist ein Anstieg der Nachhallzeit mit zunehmender Entfernung festzustellen, des Weiteren gibt der Energie-Zeit-Verlauf zu denken. Hier wird deutlich, dass die Energie in Quellennähe schneller abfällt als in einiger Entfernung.

In beiden Fällen gibt die Literatur wenig Auskunft, da normalerweise (nach ISO-3382) die Nachhallzeitmessung örtlich gemittelt wird um das akustische Verhalten eines Raumes zu beschreiben. Ebenso sollte die Energie - sobald man nur mehr das Diffusfeld betrachtet – gleich verteilt sein, also nach vollendeter Ausbreitung würde man ein gleichmäßiges Abnehmen erwarten. Um diesen Phänomenen auf den Grund zu gehen wurden einige Messungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.3, S.26).

Weiters kann bei der Betrachtung der vorhandenen Daten, vor allem im tieffrequenten Bereich, starke „Welligkeit“ festgestellt werden. Ein Zusammenhang zwischen Raummodenbildung und den Messdaten soll mit einem weiteren Versuch (vgl. Abschnitt 3.4, S.29) gezeigt werden.

4.2 Hypothesen

4.2.1 Energieverteilung

Die vorhandenen Messdaten zeigen, dass die Nachhallzeit mit zunehmender Entfernung von der Quelle ansteigt.

Hypothese: Die Energie in Quellennähe nimmt schneller ab als in größerer Entfernung. [Graber1] (Abb. 4-1)

Mit Hilfe des MVT-Tools lässt sich die räumliche und zeitliche Energieverteilung sehr detailliert darstellen. Es soll nun untersucht werden, ob sich aus diesen Daten eine plausible Lösung ableiten lässt (vgl. Abschnitt 6.2.5, S. 102).

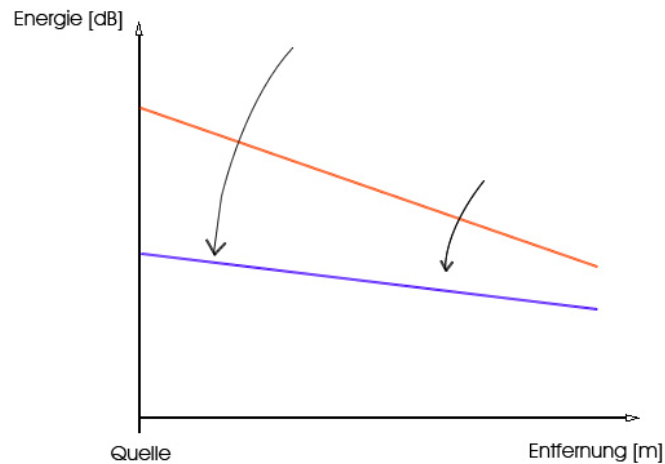


Abb. 4-1: Energieabfall in Abhängigkeit von der Entfernung

4.2.2 Auswertungsfehler

Laut persönlicher Aufzeichnungen von Professor Graber ist nun die Hypothese zu überprüfen, ob die nach hinten ansteigende Nachhallzeit ein messsystemspezifischer Fehler in der Berechnung der Nachhallgeraden ist.

Direkt neben der Quelle entsteht ein starker Impuls mit sehr kurzem Anhall und langem Nachhall. Die Impulsantwort weit von der Quelle entfernt besitzt praktisch keinen Direktschallimpuls mehr, stattdessen ist ein besonders langer Anhall festzustellen (Abb. 4-2).

Für die Detektion in der Software könnte die Erkennung des Anfangs des Pulses Probleme bereiten, da der Pegelanstieg nicht mehr dem Impuls entspricht. Damit würde die rote Nachhallgerade zur Auswertung herangezogen werden, bei der die eigentliche Nachhallzeit um die Anhallzeit verlängert ist.

Das wäre eine mögliche Erklärung dafür, warum im hinteren Dombereich die Nachhallzeit ansteigt.

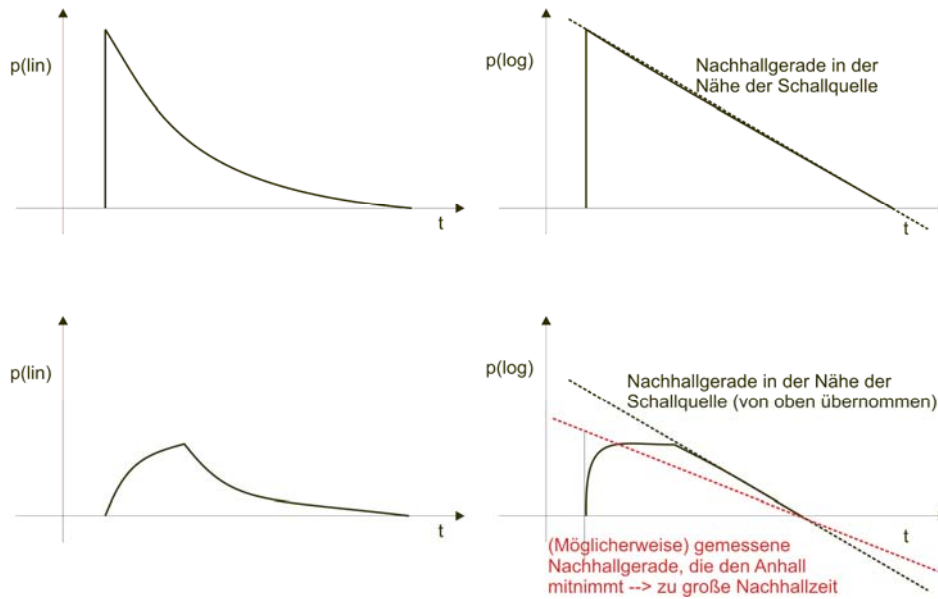


Abb. 4-2: links: lineare Druckskala, rechts: logarithmische Druckskala

Eine Impulsantwort direkt in der Nähe der Quelle (Sektor 2, Mik. 2, Abstand ca. 3m) zeigt bei einer Laufzeit von 8 ms einen steilen Anstieg und nachfolgend den gleichmäßigen Ausklang des Nachhalls (Abb. 4-3).

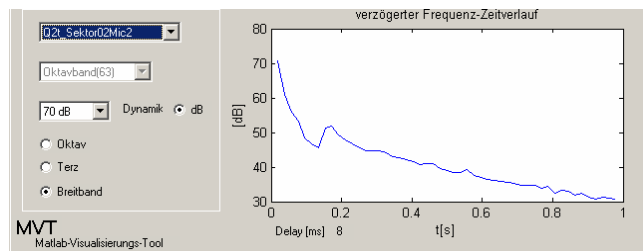


Abb. 4-3: Impulsantwort Sektor 2 Mik. 2

Eine Messung im Friedrichsschiff ganz hinten (Sektor 8, Mik 5, Abstand ca.60m) zeigt einen Anstieg des Direktschalls mit ca. 38 dB und ist daher noch erkennbar und für die Software auch auswertbar (Abb. 4-4).

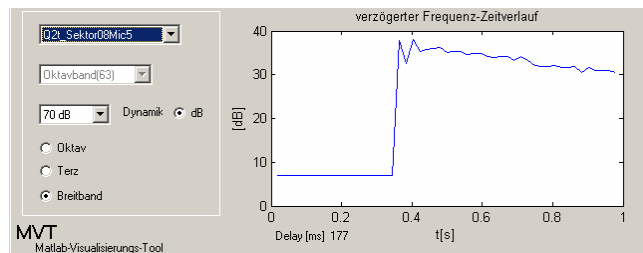


Abb. 4-4: Impulsantwort Sektor 8 Mik. 5

Dagegen zeigt sich bei der Impulsantwort im Hauptschiff ganz hinten (Sektor 16 Mik 5, Abstand ca.60m), dass der Anstieg des Direktschalls mit ca. 27 dB deutlich kleiner als das Nachhallmaximum (35 dB) und daher nicht mehr erkennbar ist (Abb. 4-5) – und für die Software auch nicht richtig auswertbar.

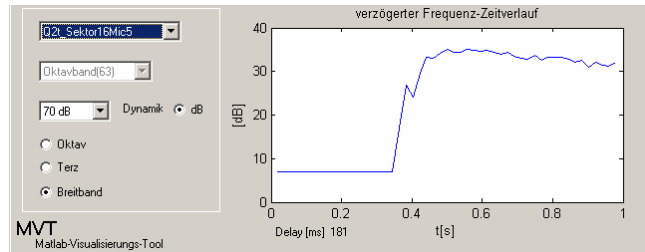


Abb. 4-5: Impulsantwort Sektor 16 Mik. 5

Im Gegensatz zu dieser Darstellung stellt WinMLS 2004 gerade den problematischen Punkt am schönsten dar, auch die Werte für den EDR sind großteils gültig (Abb. 4-6).

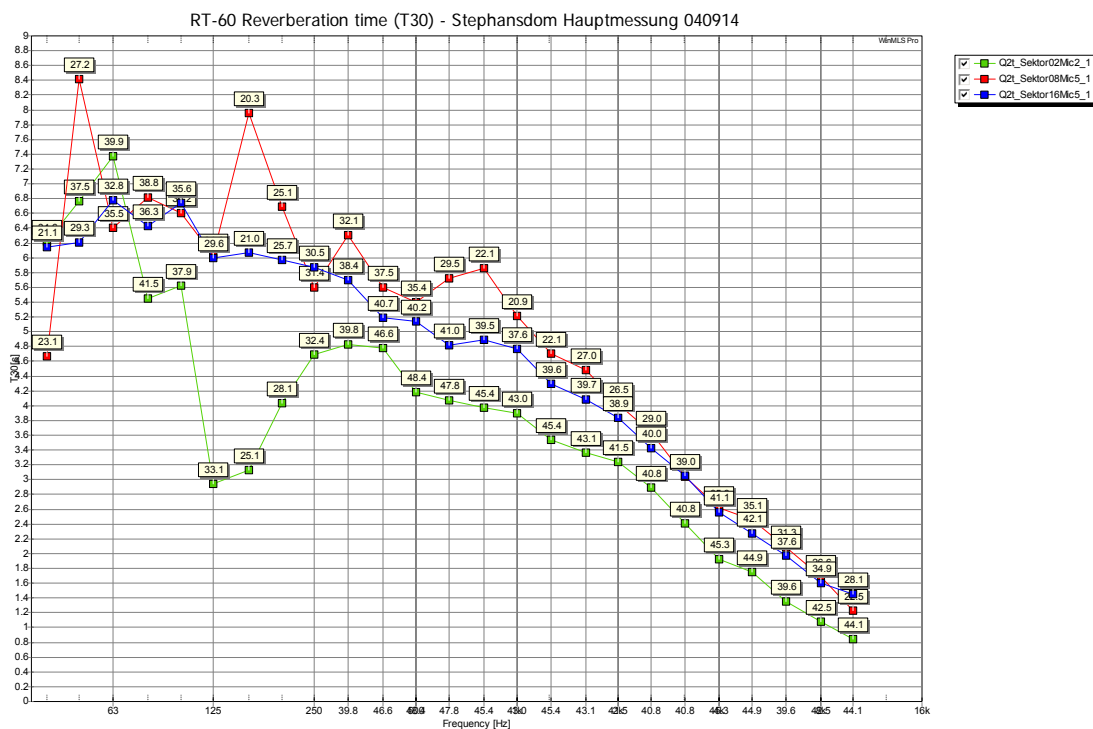


Abb. 4-6: Nachhallzeit T30, Sektor 2, 8, 16, Q2T

Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Entfernung keinen direkten Einfluss auf die Messergebnisse hat. Tatsächliche mögliche Probleme der Auswertung werden in Kap.5 erläutert.

4.2.3 Gekoppelte Räume

Es könnte auch sein, dass gekoppelte Räume, entstanden durch die Anbindung der Seitenkapellen, einen Einfluss auf die Nachhallzeit im Dom haben.

In einem einfachen Raum sieht der Schallpegelabfall üblicherweise folgendermaßen aus (Abb. 4-7):

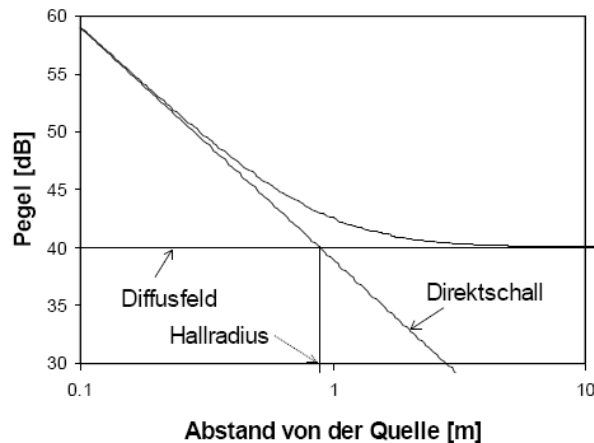


Abb. 4-7: Energieabfall in einem einfachen Raum

Wird nun von gekoppelten Räumen ausgegangen, so müsste ein Knick im Energieabfall hervortreten (Abb. 4-8).

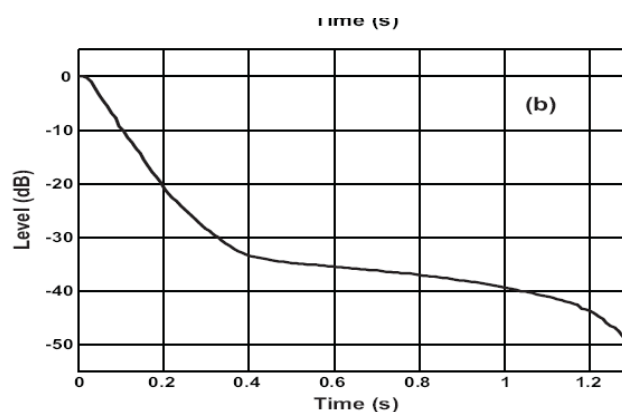


Abb. 4-8: Energieabfall in einem gekoppelten Raum

Diese „durchhängende Nachhallkurve“ (double-slope decay) entsteht bei zwei unterschiedlich stark bedämpften Räumen, die über eine relativ kleine Fläche gekoppelt sind. In der Praxis handelt es sich zum Beispiel um Kirchen mit angehängten Kapellen oder Seitenschiffen, um einen Saal, der mit dem Foyer über offene Türen verbunden ist oder um absichtlich angekoppelte „Nachhallreservoirs“, wie im „Nouvel“ Konzertsaal in Luzern.

Im Stephansdom könnten die kleinen Seitenkapellen als gekoppelte Räume wirken. Die räumliche Darstellung des Hallradius zeigt diese Möglichkeit auf (Abb. 4-9).

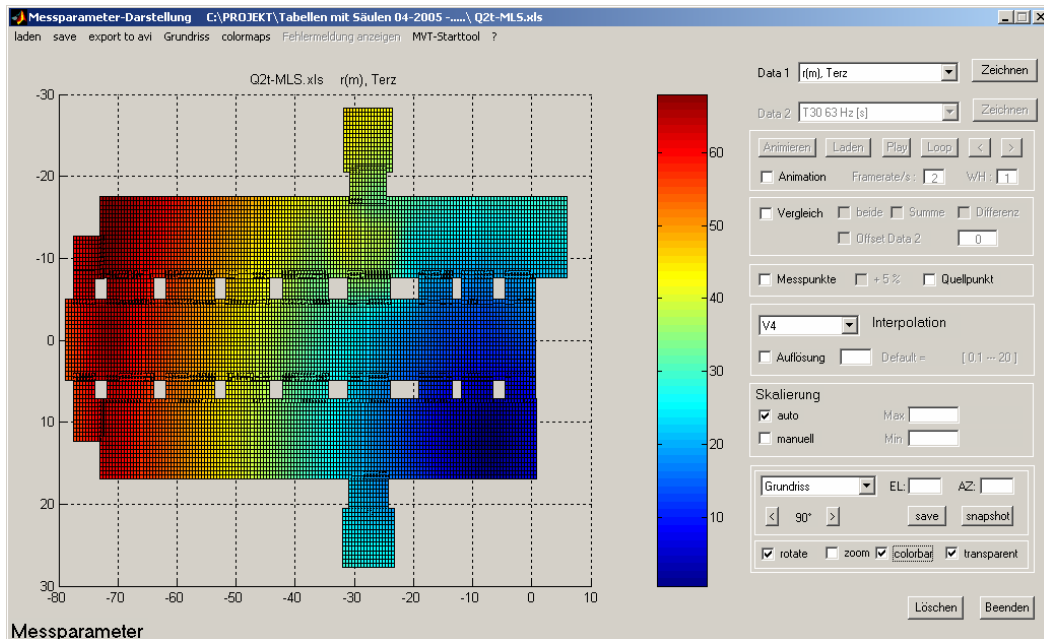


Abb. 4-9: Stephansdom: Hallradius

Die Betrachtung in Frage kommender Punkte, hier also beispielsweise die Sektoren 20 und 27 zeigen trotzdem keine Auffälligkeiten (Abb. 4-10, Abb. 4-11).

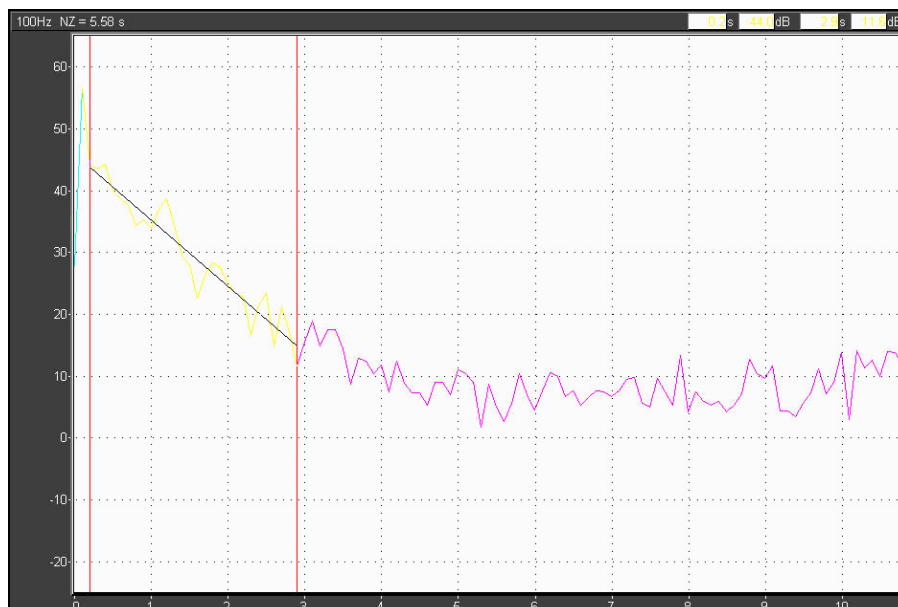


Abb. 4-10: Nachhallzeit T30, Sekt.10, Mik. 6 bei 100 Hz, Q2T

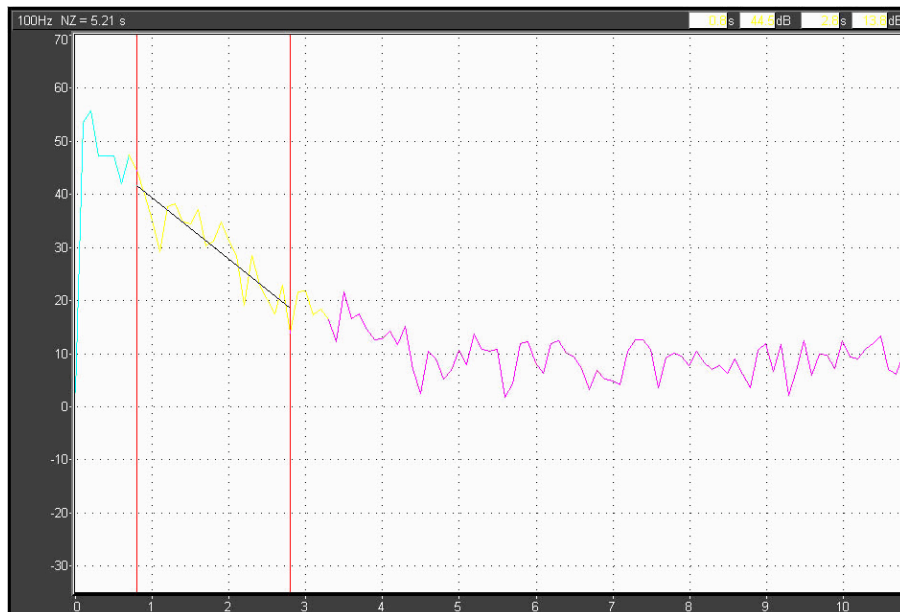


Abb. 4-11: Nachhallzeit T30, Sekt.18, Mik.6 bei 100 Hz, Q2T

Es ist also davon auszugehen, dass es sich im Stephansdom nicht um relevante gekoppelte Räume handelt.

Die Simulationsumgebung CATT-Acoustic wäre in der Lage gekoppelte Räume (ein oder mehrere Räume, die über offene Türen oder Korridore verbunden sind) zu berechnen. Auch die Simulation zeigt keine Auffälligkeiten in dieser Richtung.

4.2.4 Einfluss der Raummoden auf die Nachhallzeitmessung

Hypothese: Es existiert ein direkter Zusammenhang zwischen der Raummodenbildung und der gemessenen Nachhallzeit, abhängig vom Ort der gewählten Messpunkte (Abb. 4-12).

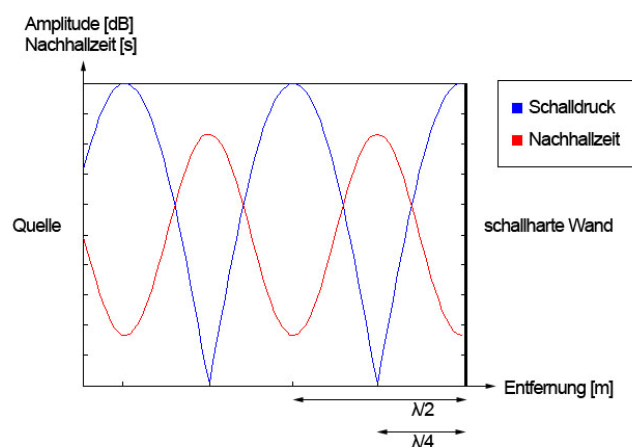


Abb. 4-12: Zusammenhang Raummoden und Nachhallzeit

Die Ausbildung von stehenden Wellen ist nur bei einer Überlagerung der hin- und rücklaufenden Welle möglich (Interferenzerscheinung). Druckmaxima können nur entstehen, wenn sich die Wellen gleichphasig überlagern.

Wird das Anregungssignal abgeschaltet, fällt die Stehwelle sofort zusammen, da die Gleichphasigkeit verloren geht. Dadurch entsteht an diesen Stellen ein plötzlicher, starker Energieabfall, der ja bei der Nachhallzeit gemessen wird. Die Auswertung der Nachhallzeit liefert auffällig kurze Werte.

An den Schwingungsknoten hingegen besitzt die Energie im eingeschwungenen Zustand bereits ihr Minimum. Wird die Erregung entfernt, kommt es sogar noch zu einem Anstieg des Schalldrucks vor dem anschließenden Energieabfall. Für die Nachhallzeitauswertung bedeutet das, dass der Energieabfall sehr langsam erfolgt, und damit auch eine ungewöhnlich lange Nachhallzeit berechnet wird.

Für die Stephansdommessung würde dieser Sachverhalt die Probleme bei einigen Punkten im tieffrequenten Bereich erklären. Ein Versuch zu dieser Thematik wird in Abschnitt 6.4.2, S.113 vorgestellt.

5 Analyse der Auswertung der Nachhallzeit im Dom

5.1.1 Problemstellung

Bei der Auswertung der Daten der Stephansdommessung fällt auf, dass an einigen Punkten deutliche Überhöhungen auftreten. Diese sind allerdings keine Messfehler im Sinn einer Störung während der Messung, sondern ergeben sich erst bei der Auswertung der Daten.

Grund dafür ist ein unzureichender Abfall der Energiekurve. Bei der Messung der T30 sollten mindestens 35 dB für eine gültige Auswertung zur Verfügung stehen, da laut Definition vom Startpunkt bei -5 dB der Abfall um 30 dB, also bis -35 dB gesucht wird. Ist das nicht möglich, kann beispielsweise auf eine T15 Auswertung ausgewichen werden, bei der nur mehr 20 dB Energieabfall nötig sind (von -5 dB bis -20 dB), oder die Messung muss wiederholt werden bzw. ist als ungültig einzustufen.

5.1.2 Faktor T30/EDT

Laut Professor Graber soll der Faktor T30/EDT untersucht werden. Es soll gezeigt werden, ob sich daraus systematische Zusammenhänge ableiten lassen, die für das Verständnis der Akustik im Stephansdom relevant sind.

Bei der automatischen Auswertung mit WinMLS 2000, wie beim ursprünglichen Projekt geschehen, erfolgt keine Bewertung. Das führt wahrscheinlich zu einer Abweichung in problematischen Frequenzbereichen, auch bei der Mittelung der Daten. Es liegt nun die Idee nahe einen Parameter zu finden, der darüber Auskunft gibt.

Es wird also versucht T30/EDT einzuführen, um die Nachhallzeitauswertung an die frühe Nachhallzeit (EDT, 0 dB bis -10 dB) zu koppeln. Betrachtungen des SNR alleine zeigen sich als zu ungenau, die Problematik beim T30/EDT Wert ist es, eine Definition des Gültigkeitsbereichs zu finden. Werte um 1 scheinen plausibel, die Abgrenzung gestaltet sich jedoch als schwierig.

Abb. 5-1 zeigt, dass an der auffälligen Stelle der T30 bei ca. 100 Hz sowohl SNR als auch EDR eigentlich gut erscheinen, der neue Faktor jedoch stark springt und somit auf einen möglichen Fehler aufmerksam machen könnte.

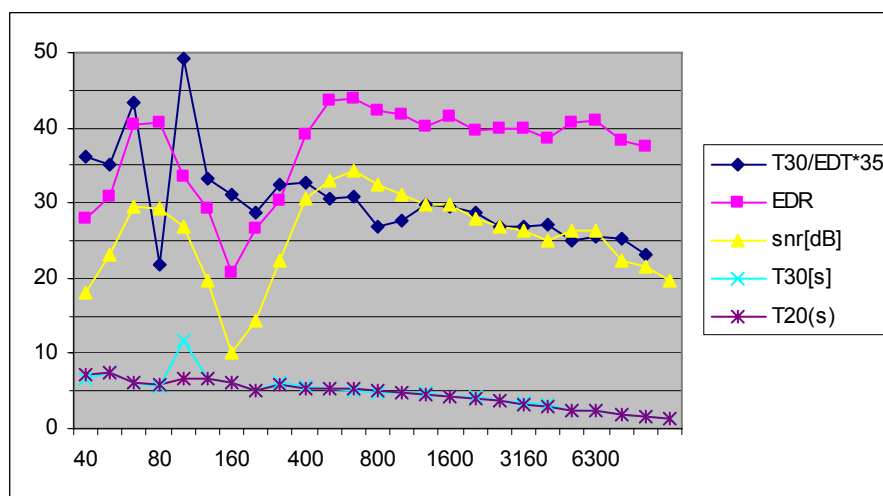


Abb. 5-1: Vergleich Gültigkeit der Werte und dazugehörige Parameter, Q2T Sekt.21-Mic4

Die räumliche Darstellung des neuen Parameters T30/EDT ergibt erwartungsgemäß im Direktschallfeld Werte größer 1, im Diffusfeld dagegen Werte um oder unter 1 und ist damit eng mit der Darstellung des Hallradius verbunden, mit dem Unterschied dass der neue Faktor frequenzabhängig betrachtet werden kann und beispielsweise Abschattungseffekte des Direktschalls durch die Säulen sichtbar werden.

5.1.2.1 T30/EDT: räumliche Darstellung

Die Messung der Nachhallzeit ist nur im diffusen Schallfeld gültig. Das heißt aber auch, dass Punkte mit dem Faktor $T30/EDT \gg 1$ für die Nachhallzeitbestimmung nicht zulässig sind. Hier der Vergleich von T30/EDT in Abb. 5-2 und Hallradius in Abb. 5-3.

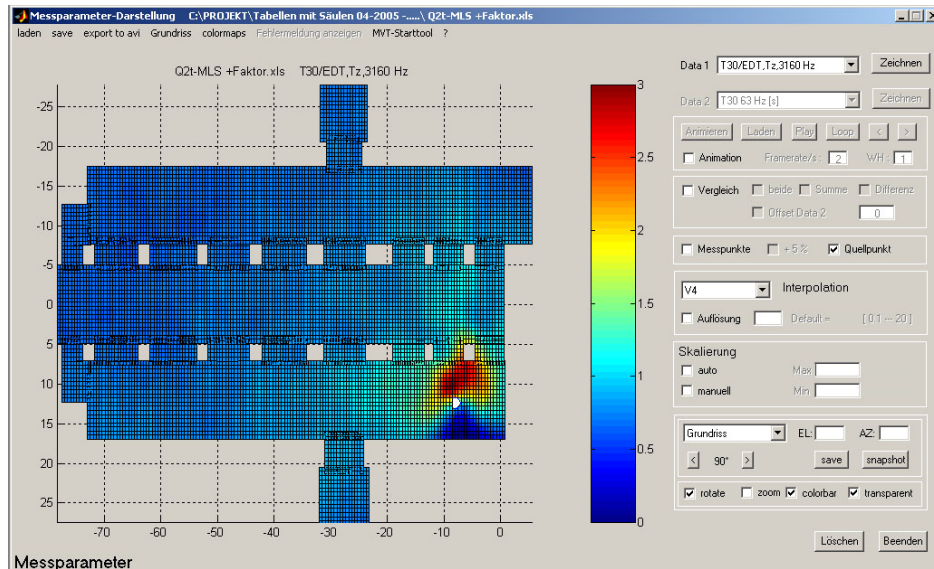


Abb. 5-2: Faktor T30/EDT bei 3160 Hz, Q2T

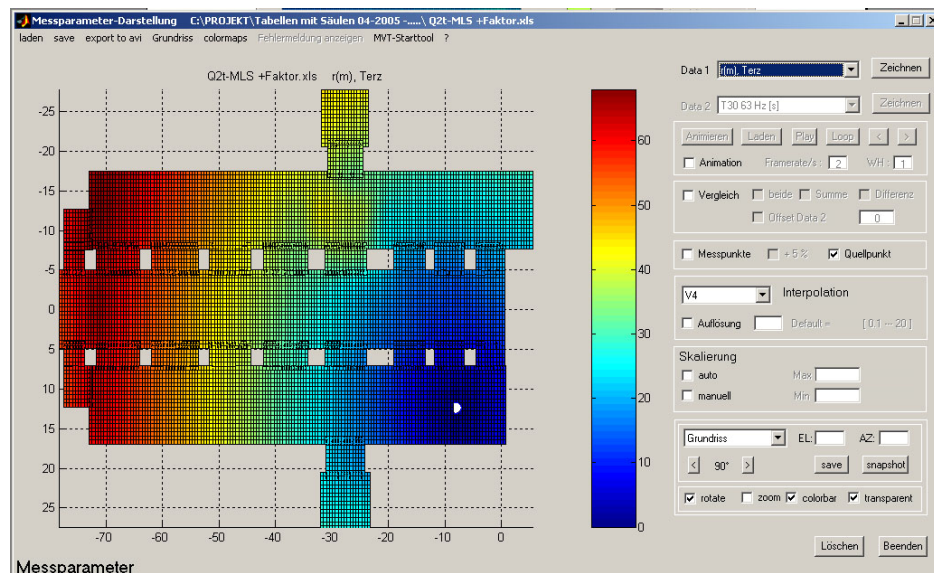


Abb. 5-3: Hallradius, Q2T

Betrachtet man nun T30/EDT bei 63 Hz (Abb. 5-4), erkennt man, außer in der Umgebung der Quelle, noch weitere Punkte wo der Wert auffällig ist. Diese Punkte entsprechen wiederum den Stellen an denen die Auswertung der Impulsantworten und somit die Berechnung der Nachhallzeit Probleme macht (Abb. 5-5).

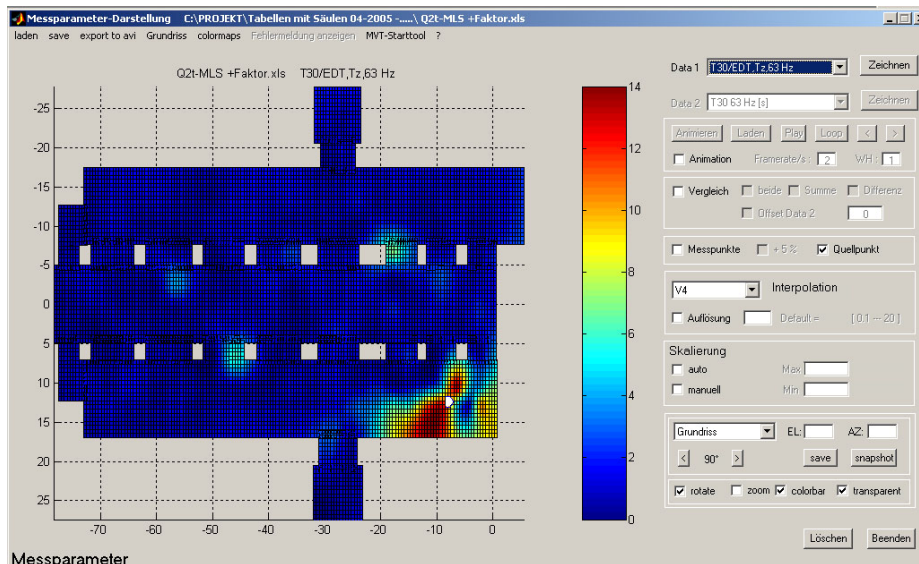


Abb. 5-4: Faktor T30/EDT bei 63 Hz, Q2T

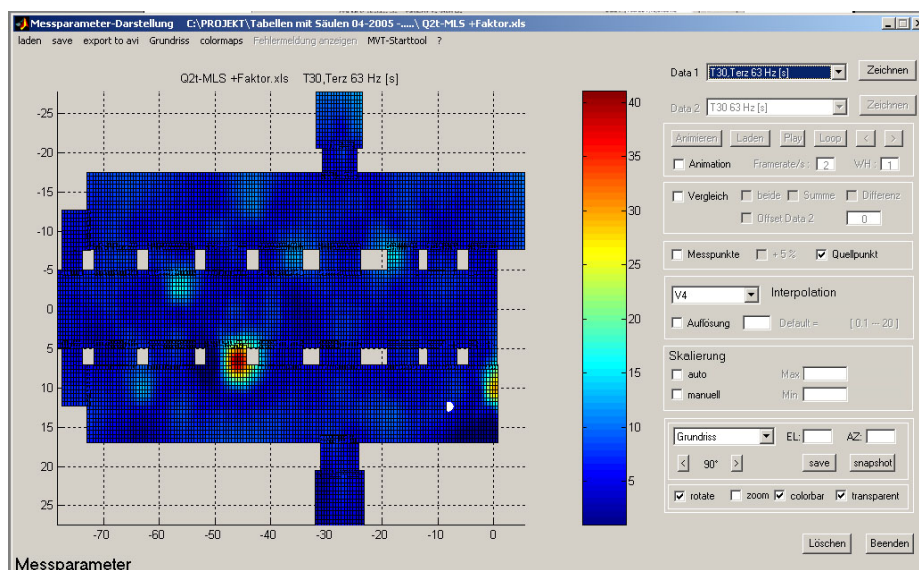


Abb. 5-5: Nachhallzeit T30 bei 63 Hz, Q2T

5.1.3 SNR

Ein weiterer Zusammenhang wird mit der Darstellung des SNR deutlich. Die auffälligen Stellen von vorher zeichnen sich auch durch einen geringen SNR aus (Abb. 5-6).

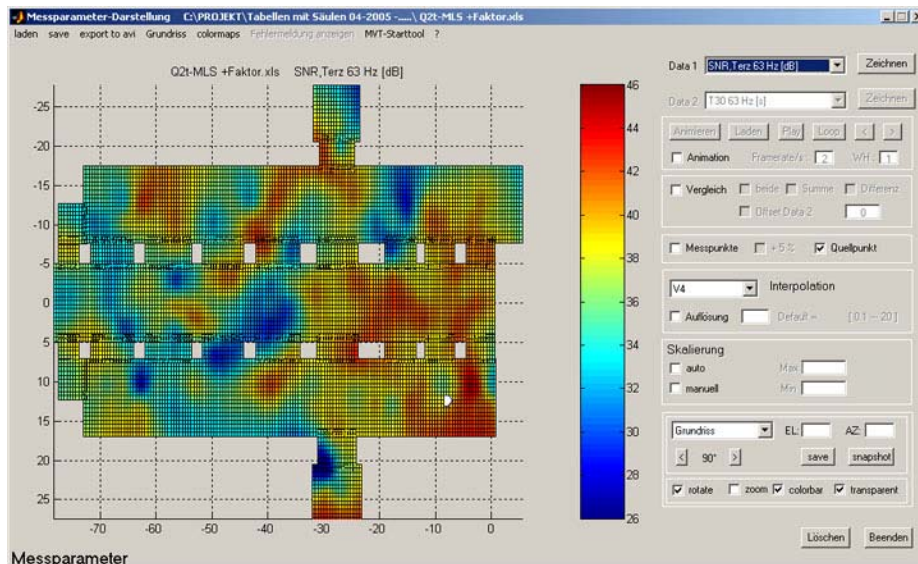


Abb. 5-6: SNR bei 63 Hz, Q2T

Dieser neue Faktor erscheint vorerst als brauchbares Kriterium um die Nachhallberechnung zu bewerten, es wird aber noch gezeigt werden, dass an einigen Punkten die Grenzwerte des Faktors für gültige Messungen nicht so einfach zu finden sind.

5.1.4 Säulenabschattung

Es wird nun die EDT für einen Punkt mit Sichtverbindung zur Quelle (Sekt. 20, Mik. 4) bestimmt, weiters für einen hinter einer Säule (Sekt. 13, Mik. 3) und schließlich für einen Messpunkt hinter zwei Säulen gelegen (Sekt. 20, Mik. 2), alle in ähnlicher Entfernung zur Schallquelle.

Zunächst erfolgt die grafische Darstellung der EDT in Terzbändern mittels der Funktion aus dBBATI für den direkten Fall (Abb. 5-7), die Abschattung durch eine Säule (Abb. 5-8) und die Abschattung durch zwei Säulen (Abb. 5-9).

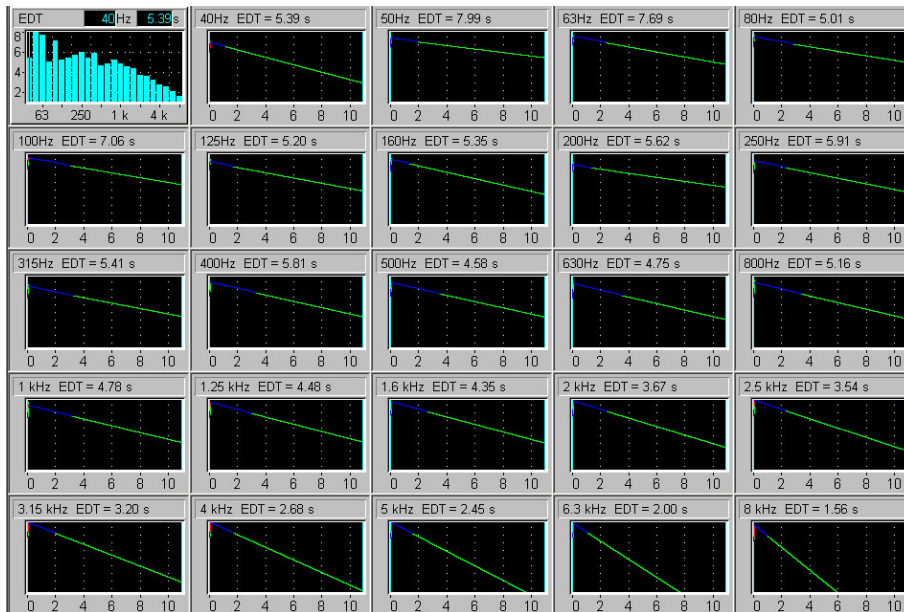


Abb. 5-7: EDT: Q2T, Sekt.20, Mik.4 (direkt)

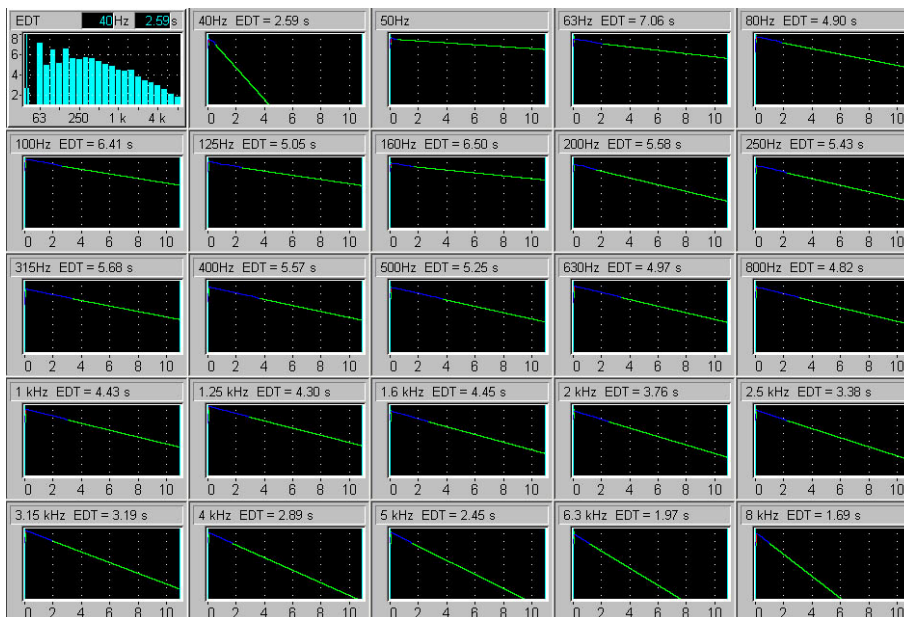


Abb. 5-8: EDT: Q2T, Sekt.13, Mik.3 (1 Säule)

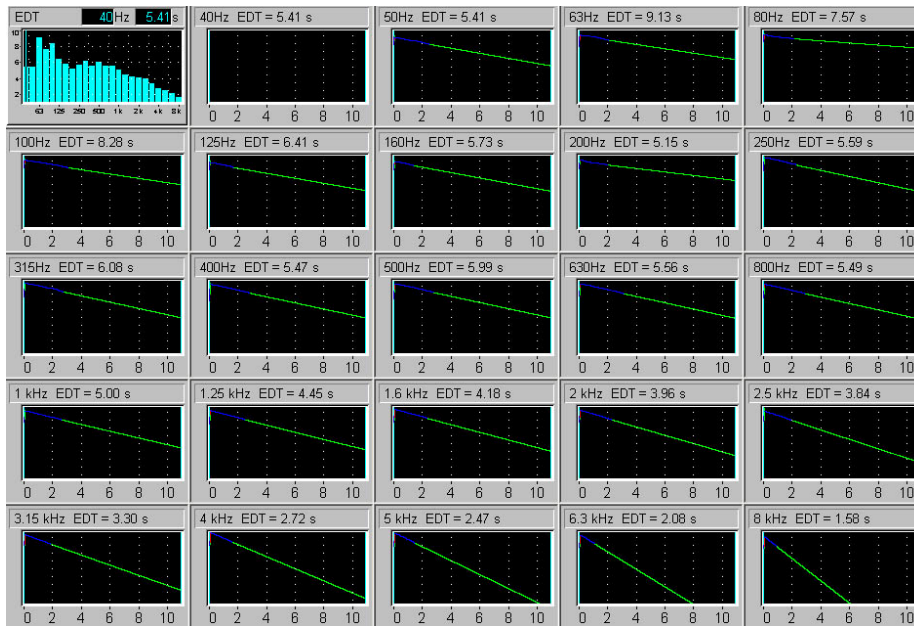


Abb. 5-9: EDT: Q2T, Sekt.20, Mik.2 (2 Säulen)

Wie schon des Öfteren sind außer den bekannten Problemen bei tiefen Frequenzen keine Auffälligkeiten festzustellen.

Zur besseren Übersicht noch ein Bild (Abb. 5-10) mit zusammengefasster Darstellung.

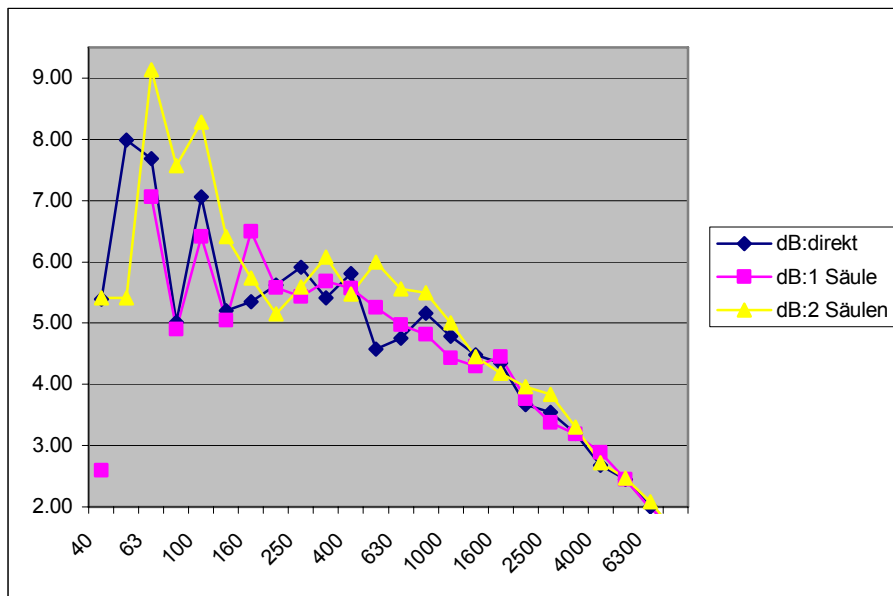


Abb. 5-10: EDT, Q2T: direkt,1 Säule, 2 Säulen

Wären Abschattungseffekte hier relevant, würde die Darstellung bei höheren Frequenzen hinter zwei Säulen am niedrigsten sein.

Anschließend (Abb. 5-11) folgt der Vergleich zwischen dBBATI und WinMLS bei der Berechnung der EDT.

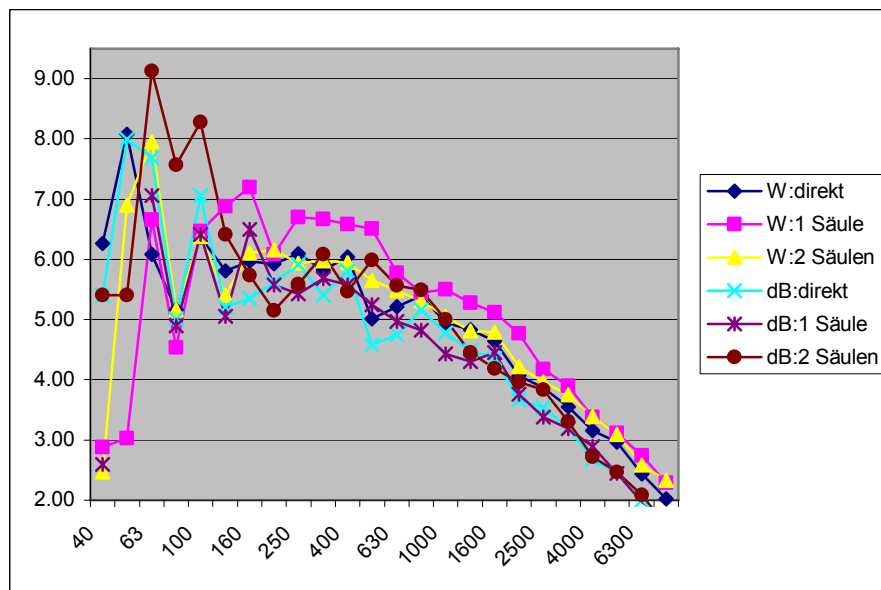


Abb. 5-11: EDT, Q2T: direkt, 1 Säule, 2 Säulen, Vergleich zwischen WinMLS und dBBATI

Ein gemeinsamer Trend ist erkennbar, die EDT scheint jedoch nicht in Abhängigkeit von der Säulenabschattung zu stehen.

5.1.5 Der Parameter EDR in der Software WinMLS 2004

5.1.5.1 Einleitung

WinMLS 2004 bietet die neue Möglichkeit die errechneten Werte auch gleich einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen. Hierzu ist speziell für raumakustische Betrachtungen der Parameter EDR oder „effective-decay-range“ zu betrachten.

Der SNR einer Impulsantwortmessung wird aus der Impulsantwort geschätzt, wobei das Grundrauschen aus den letzten 10% der Impulsantwort gewonnen wird. Die Genauigkeit der Angabe hängt also davon ab, ob hier wirklich nur das Grundrauschen gemessen wurde. Dem SNR allein kommt bei raumakustischen Betrachtungen keine große praktische Bedeutung zu, meint dazu die Hilfesektion von WinMLS 2004.

Viel interessanter ist der so genannte EDR, der direkt den Bereich des Abfalls der Impulsantwort erfasst, nämlich vom Maximalpegel der Impulsantwort bis zum Grundrauschen. Während also SNR ein rein physikalischer Parameter der Messung ist, steht der EDR auch in Beziehung zum Raum und dessen Impulsantwort.

Diese Bewertung der Gültigkeit soll im Folgenden für einige problematische Punkte im Stephansdom analysiert werden.

5.1.5.2 Analyse einiger Problempunkte im Stephansdom

Ein willkürlicher Punkt (Sektor 8, Mik. 7) der Stephansdommessung mit offensichtlichen Problemen bei der Auswertung wurde gewählt und genauer untersucht.

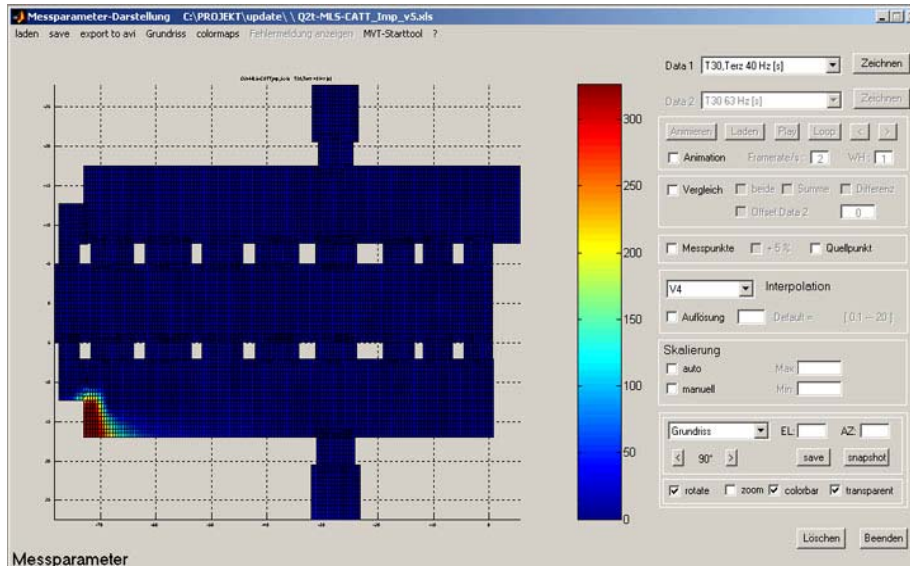


Abb. 5-12: Nachhallzeit T30 bei 40 Hz, Q2T

Der rote Bereich links unten (Abb. 5-12) zeigt eine große lokale Abweichung und lässt auf einen Fehler schließen. Die Betrachtung der Nachhallzeitberechnung zeigt auch sofort einen großen Sprung bei 40 Hz.

Die folgenden Berechnungen wurden bereits in WinMLS 2004 ausgeführt (Abb. 5-13). Die Nachhallzeit entspricht in der Standardeinstellung zwar den Werten der alten Version, zusätzlich wird in den gelben Kästchen der EDR angezeigt, der hier über 35 liegen sollte, diesen Wert allerdings nur stellenweise erreicht. Der EDR ist generell zu niedrig, besonders schlecht allerdings bei 40 Hz (EDR=8.4). An diesem sehr weit von der Quelle entfernten Punkt reicht der SNR nicht mehr für eine Auswertung nach den Vorgaben der T30.

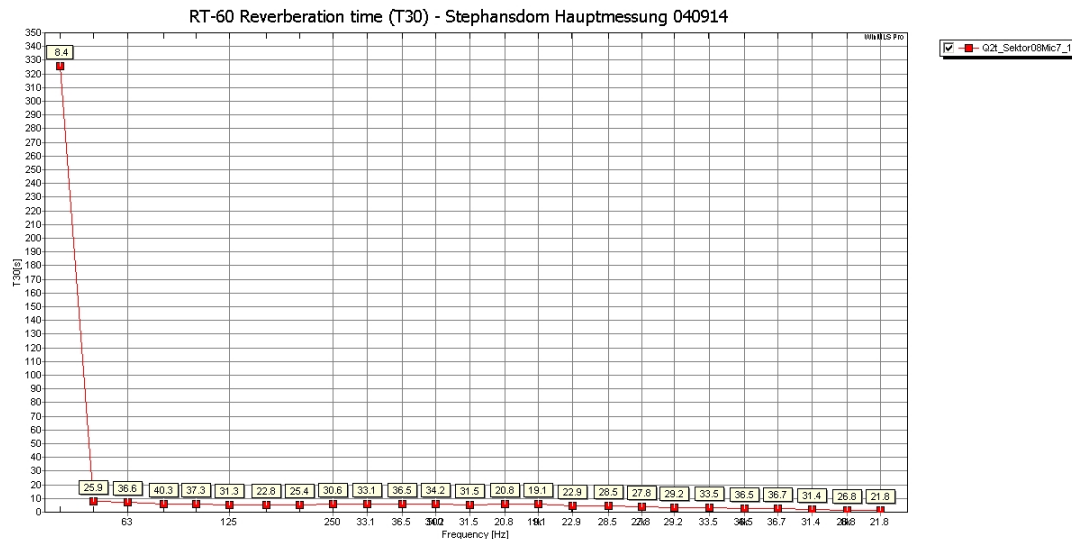


Abb. 5-13: Nachhallzeit T30, Sektor 8, Mik.7, Q2T

Das „Preset“ Raumakustik in WinMLS 2004 arbeitet mit folgenden Einstellungen (siehe Abb. 5-14 und Abb. 5-15): Der Anfangspunkt der Impulsantwort wird automatisch detektiert. Ein Endpunkt wird nicht manuell vorgegeben, sondern automatisch bestimmt wenn der Grundrauschpegel erreicht ist. Um die Energiebetrachtung damit nicht zu beeinflussen wird eine Kompensation durchgeführt.

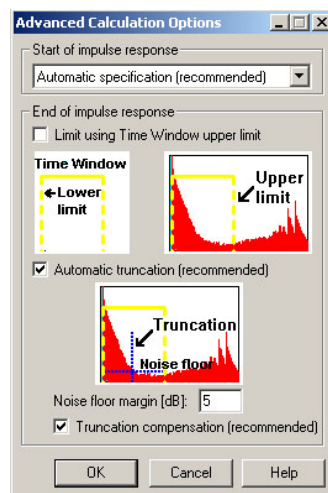


Abb. 5-14: WinMLS 2004 Menü: Advanced Calculation Options

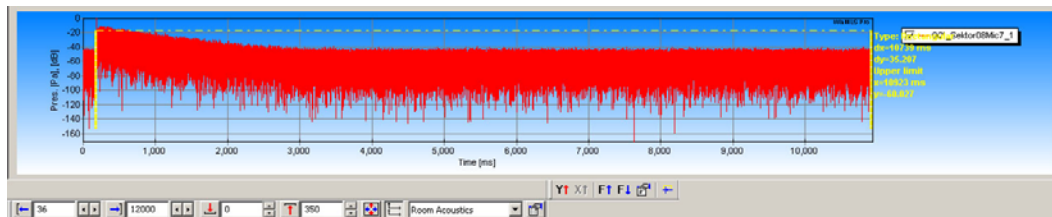


Abb. 5-15: WinMLS 2004: Impulsantwort mit Zeitfenster

Weiters besteht die Möglichkeit nur gültige Werte der T30 (z.B.:EDR > 35) darzustellen (Abb. 5-16), was in diesem Fall nicht zielführend ist, allerdings die vorher genannten Probleme verdeutlicht:

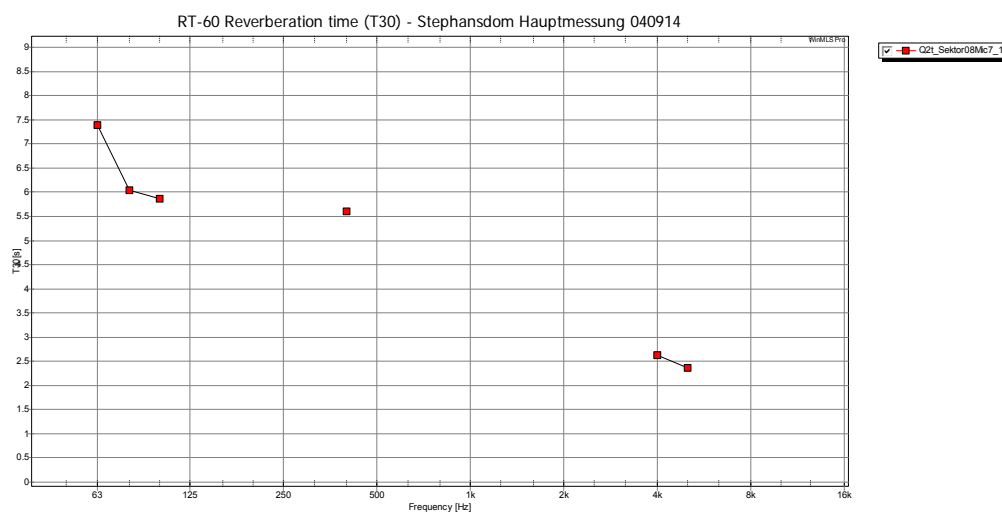


Abb. 5-16: Nachhallzeit T30, Sektor 8, Mic 7 (EDR>35), Q2T

Eine Möglichkeit um gültige Werte zu erhalten ist z.B. die Verwendung der T15 statt der T30, hier reicht bereits ein EDR ab 20. Die Darstellung in Abb. 5-17 zeigt wiederum nur gültige Werte.

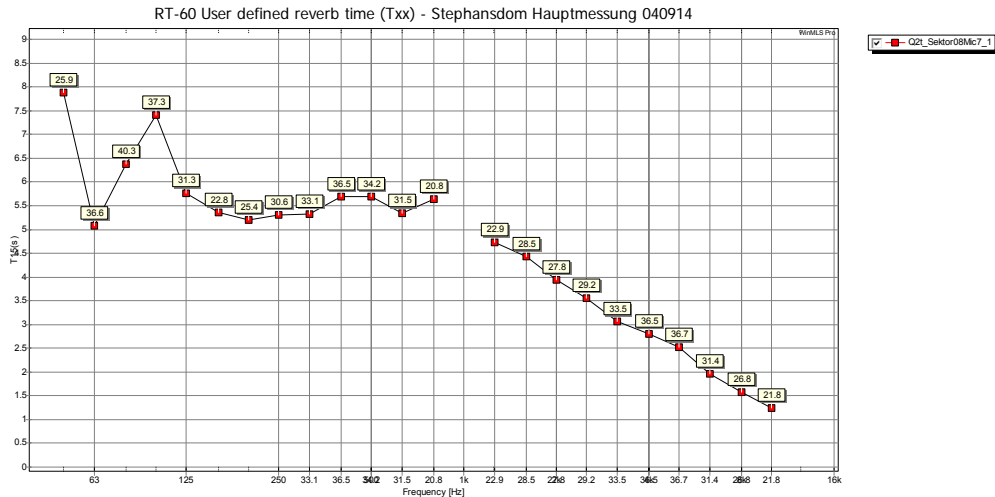


Abb. 5-17: Nachhallzeit T15, Sektor 8, Mic 7 (EDR>20), Q2T

Die Zusammenfassung der Berechnungen für diesen Punkt zeigt die Tabelle in Abb. 5-18, wobei rot dargestellte Werte ungültig, oder zumindest nicht mehr mit Sicherheit gültig sind. Diese Qualitätsprüfung stützt sich auf den zuvor erwähnten EDR.

Q2t_Sektor08Mic7_1 (Room acoustics parameters)																								
F[Hz]	40	50	63	90	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1260	1600	2000	2500	3160	4000	5000	6300	8000
snr[dB]	9.5	17.5	31.2	29.0	25.2	20.1	10.5	13.9	22.5	24.5	26.8	24.9	20.5	11.8	10.0	12.4	17.0	16.1	16.9	20.6	22.9	22.4	16.7	11.4
edr[dB]	8.4	25.9	36.6	40.3	37.3	31.3	22.8	25.4	30.6	33.1	36.5	34.2	31.5	20.8	19.1	22.9	28.5	27.8	29.2	33.5	36.5	36.7	31.4	26.8
T30[s]	325.92	7.91	7.38	6.04	5.97	5.50	5.31	5.00	5.66	5.89	5.60	5.72	5.13	5.63	6.18	4.74	4.41	3.89	3.51	3.09	2.63	2.36	1.95	1.58
corr	-0.951	-0.996	-0.990	-0.997	-0.994	-0.996	-0.998	-0.998	-0.998	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	-0.999	-0.999	-1.000	-1.000	-0.999	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
T15[s]	325.92	7.89	5.09	6.37	7.40	5.75	5.37	5.21	5.31	5.33	5.70	5.69	5.35	5.64	6.18	4.73	4.44	3.94	3.56	3.07	2.91	2.52	1.97	1.58
corr	-0.951	-0.992	-0.994	-0.988	-0.992	-0.996	-0.996	-0.998	-0.999	-0.995	-0.998	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	-0.999	-0.999	-1.000	-0.999	-0.999	-1.000	-1.000	-0.999	-0.999
f[Hz]	62.9																							

Abb. 5-18: Berechnungen Sektor 8, Mic 7, Q2T

Obwohl einige Werte der T30 fraglich sind, erkennt man keine großen Unterschiede zwischen T15 und T30 (Abb. 5-19). Bei 40 Hz haben beide Probleme, der EDR ist derart niedrig dass eventuell doch auf eine äußere Störung geschlossen werden kann.

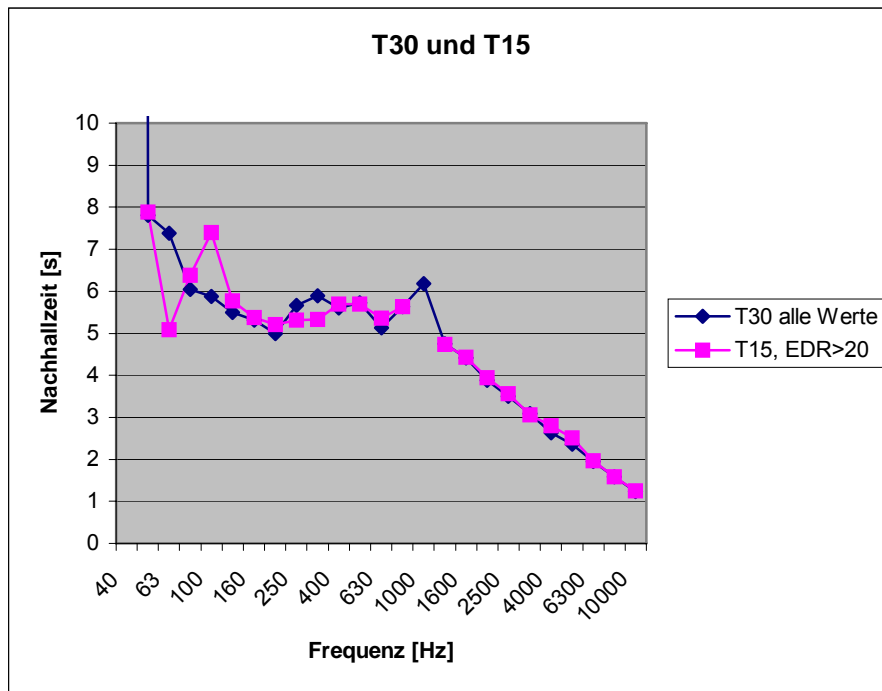


Abb. 5-19: Vergleich der Nachhallzeiten nach T30 und T15

Ein weiteres Beispiel aus der Stephansdommessung tritt bei 50 Hz auf, die Überhöhung in Abb. 5-20 entspricht dem Messpunkt in Sektor 13 Mik. 5.

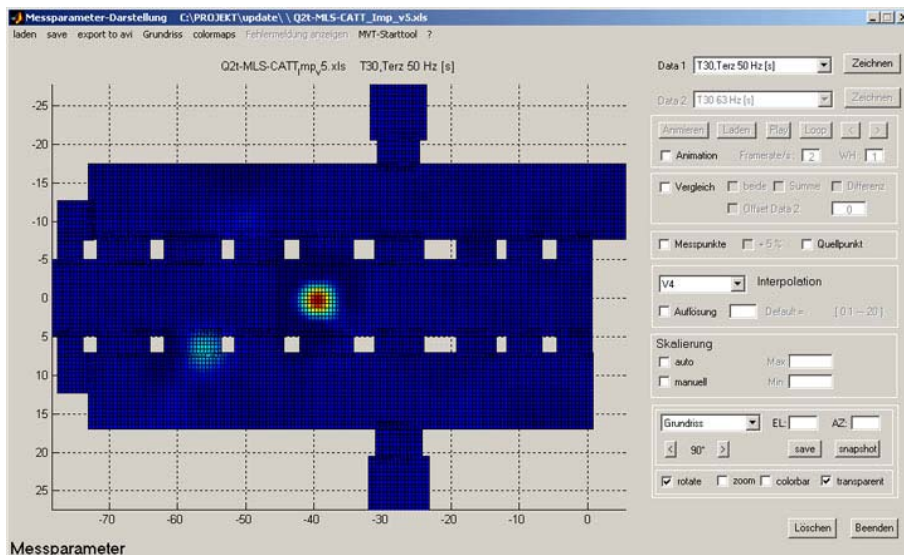


Abb. 5-20: Nachhallzeit T30 bei 50 Hz, Q2T

Auch hier wieder die Darstellung mit den EDR Werten (Abb. 5-21), welche eigentlich auf gültige Daten schließen lassen, außer bei 50 Hz (EDR=6.8). Dieselben Werte noch einmal in tabellarischer Form in Abb. 5-22.

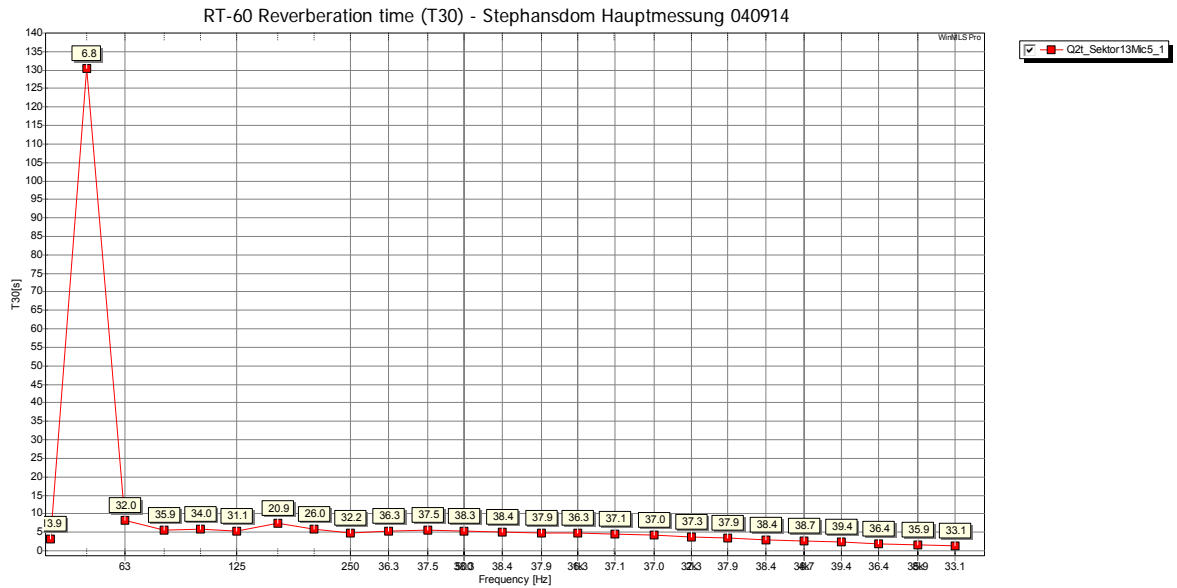


Abb. 5-21: Nachhallzeit T30, Sektor 13 Mic 5, Q2T

f[Hz]	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1260	1600	2000	2500	3160	4000	5000	6300	8000
str[dB]	3.8	2.8	22.5	25.1	24.0	19.9	10.0	15.1	20.9	25.9	27.9	28.4	29.1	27.2	26.0	25.8	25.9	25.0	24.8	24.5	25.2	25.1	21.2	20.0
ed[dB]	13.9	6.8	32.0	35.9	34.0	31.1	20.9	26.0	32.2	36.3	37.5	38.3	38.4	37.9	36.3	37.1	37.0	37.3	37.9	38.4	38.7	39.4	36.4	35.9
T30[s]	3.31	130.32	8.30	5.63	5.74	5.33	7.48	5.97	4.67	5.40	5.47	5.38	5.10	4.85	4.70	4.42	4.17	3.80	3.45	2.98	2.56	2.33	1.90	1.53
cor	-0.995	-0.992	-0.997	-0.999	-0.998	-0.996	-0.993	-0.993	-0.994	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	-1.000	-0.999	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
T20[s]	3.31	130.32	7.96	5.58	5.74	5.45	7.48	6.05	4.90	5.04	5.19	5.29	4.92	4.77	4.44	4.38	4.02	3.77	3.51	2.97	2.52	2.34	1.85	1.52
cor	-0.995	-0.992	-0.996	-0.997	-0.995	-0.994	-0.993	-0.994	-0.998	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	-1.000	-0.999	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
f[m]	33.5																							

Abb. 5-22: Berechnungen Sektor 13 Mic 5, Q2T

Ein weiteres Beispiel findet sich dann bei 100 Hz, nämlich in Sektor 21, Mik. 4.

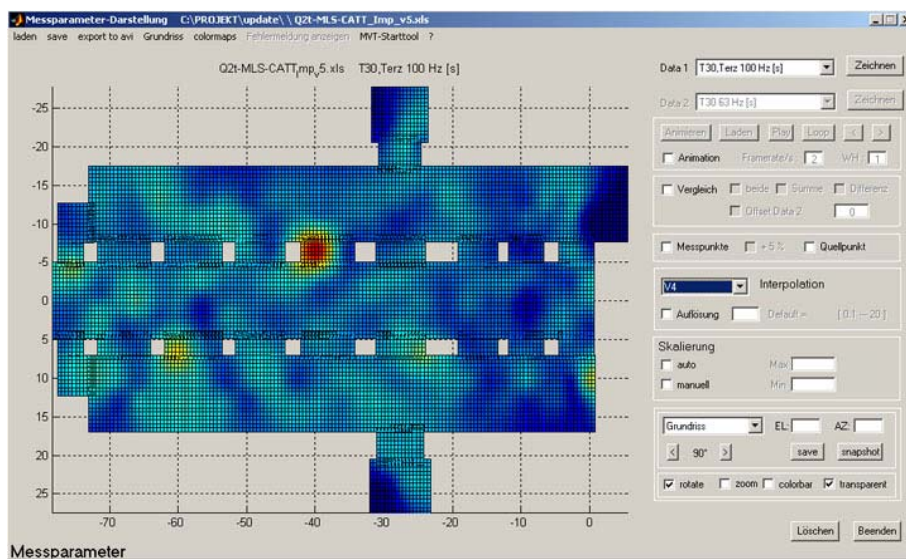


Abb. 5-23: Nachhallzeit T30 bei 100 Hz, Q2T

Obwohl es sich anscheinend um einen Ausreißer handelt, lässt der EDR Wert mit 33.6 schon fast ein gültiges Ergebnis erkennen. Man erkennt also, dass eine strikte Abgrenzung der Gültigkeit der berechneten Werte nicht möglich ist, wohl aber ein Richtwert erkennbar ist ob das Ergebnis noch stimmen kann. Es folgt wiederum die Darstellung der Nachhallzeit mit EDR im Diagramm (Abb. 5-24) und in der Tabelle (Abb. 5-25).

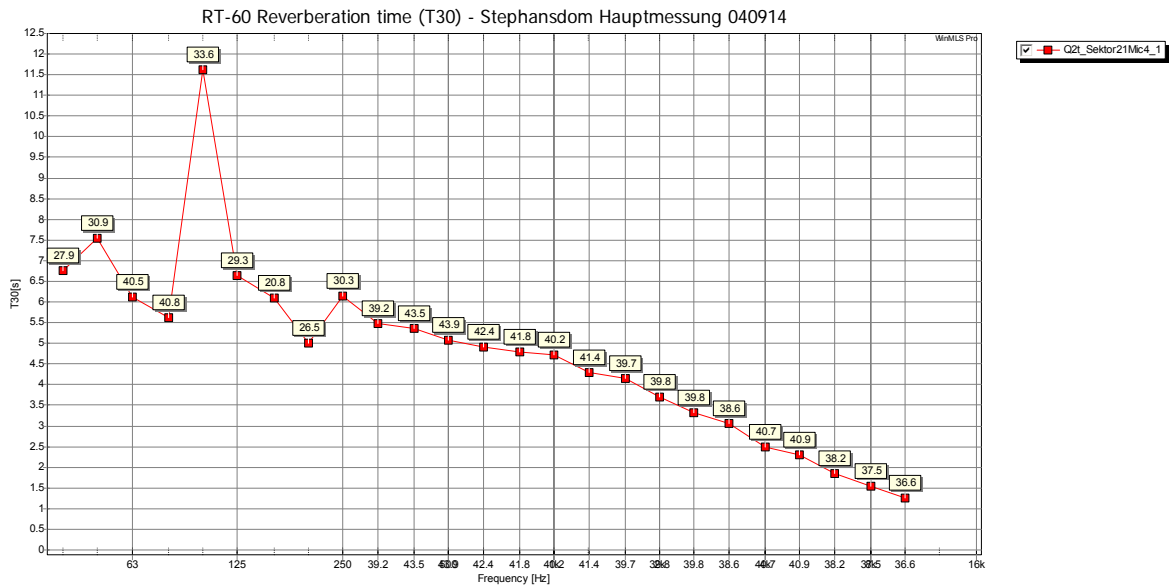


Abb. 5-24: Nachhallzeit T30 Sektor 21 Mik. 4, Q2T

F[Hz]	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1260	1600	2000	2500	3160	4000	5000	6300	8000	
mi[dB]	18.0	23.1	29.5	23.2	25.8	19.6	10.1	14.4	22.4	30.7	33.0	34.2	32.4	31.2	29.8	29.7	27.9	25.9	25.4	25.1	26.4	26.4	22.4	21.6	
edf[dB]	27.9	30.9	40.5	40.8	33.6	29.3	20.8	26.5	30.3	39.2	43.5	43.9	42.4	41.8	40.2	41.4	39.7	39.8	39.8	38.6	40.7	40.9	38.2	37.5	
T30[s]	6.77	7.95	6.13	5.62	11.62	6.63	6.10	5.01	6.14	5.48	5.37	5.08	4.92	4.80	4.71	4.30	4.15	3.69	3.33	3.07	2.50	2.30	1.86	1.54	
cor	-0.995	-0.996	-0.996	-0.998	-0.945	-0.997	-0.996	-0.992	-0.999	-0.999	-0.999	-0.998	-0.999	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-0.999	-1.000
T20[s]	7.08	7.43	6.04	5.75	6.78	6.67	6.10	5.13	5.96	5.28	5.38	5.43	4.96	4.79	4.57	4.29	4.10	3.63	3.31	3.02	2.52	2.29	1.92	1.51	
cor	-0.994	-0.996	-0.989	-0.996	-0.992	-0.997	-0.996	-0.992	-0.999	-0.998	-0.998	-0.997	-0.998	-0.999	-1.000	-0.999	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-0.999	-1.000
r[m]	36.1																								

Abb. 5-25: Berechnungen: Sektor 21 Mic 4, Q2T

An diesem Punkt entspricht der EDR ziemlich genau dem SNR, wie in Abb. 5-26 gezeigt wird.

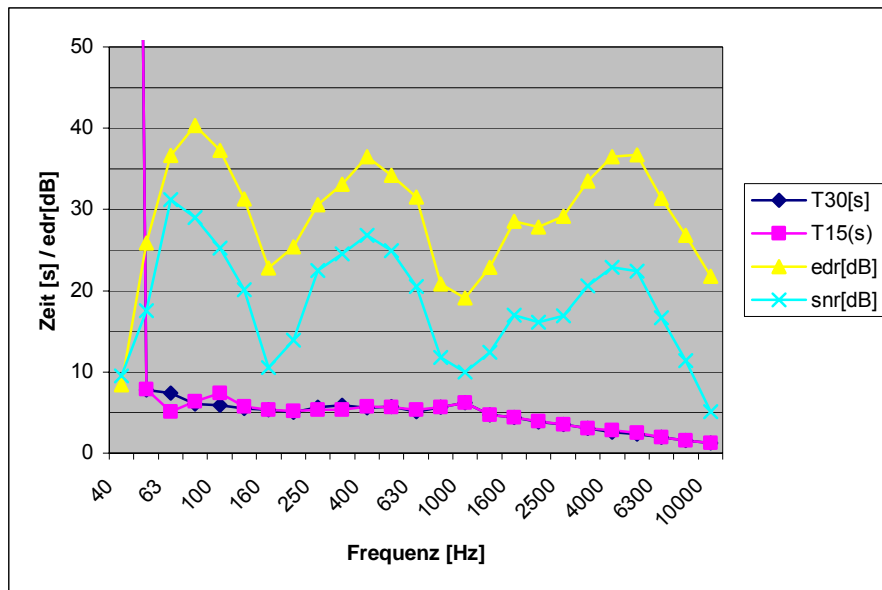


Abb. 5-26: Zusammenhang EDR und SNR, Q2T Sekt.8 Mik. 7

Bei anderen Beispielen wiederum zeigen sich doch kompliziertere Verhältnisse, wie bei der IBK Messung im Punkt 123 (vgl. Abschnitt 3.3.2, S.27).

Bei dieser Berechnung wäre die Gültigkeit der T30 bei 50 Hz, sowie von 100 Hz bis 250 Hz anzuzweifeln, da der EDR hier niedere Werte aufweist (<35 dB). Die T20 behält außer bei 160 Hz (EDR=20.8 dB, sollte 25 dB betragen) durchgehend ihre Gültigkeit. Der SNR erscheint bei 50 Hz in Ordnung, bei 100 Hz ist dieser am kleinsten.

Die folgende Darstellung (Abb. 5-27) zeigt, dass die EDR Auswertung viel eher Probleme bei der Nachhallzeitberechnung aufzeigen kann, als es der SNR alleine könnte.

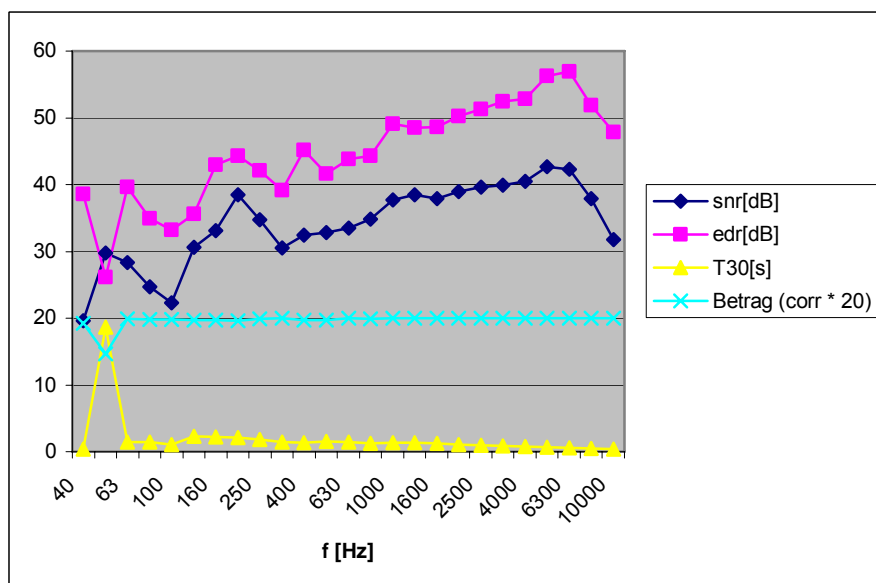


Abb. 5-27: SNR, EDR, corr zu Nachhallzeit T30, IBK Hauptmessung, Q1 Pkt 123

5.1.5.3 EDR (Stephansdom Q2T)

Die T30 Auswertung wie in Abb. 5-28 bzw. deren Mittelung in Abb. 5-29 dargestellt ist im tieffrequenten Bereich unbrauchbar.

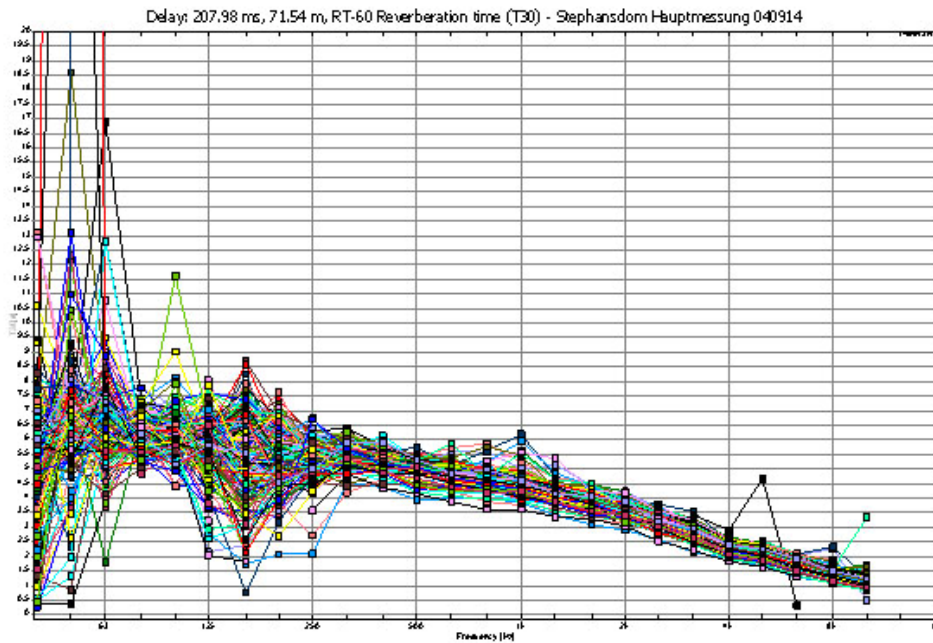


Abb. 5-28: Nachhallzeit T30 ohne Einschränkung des EDR

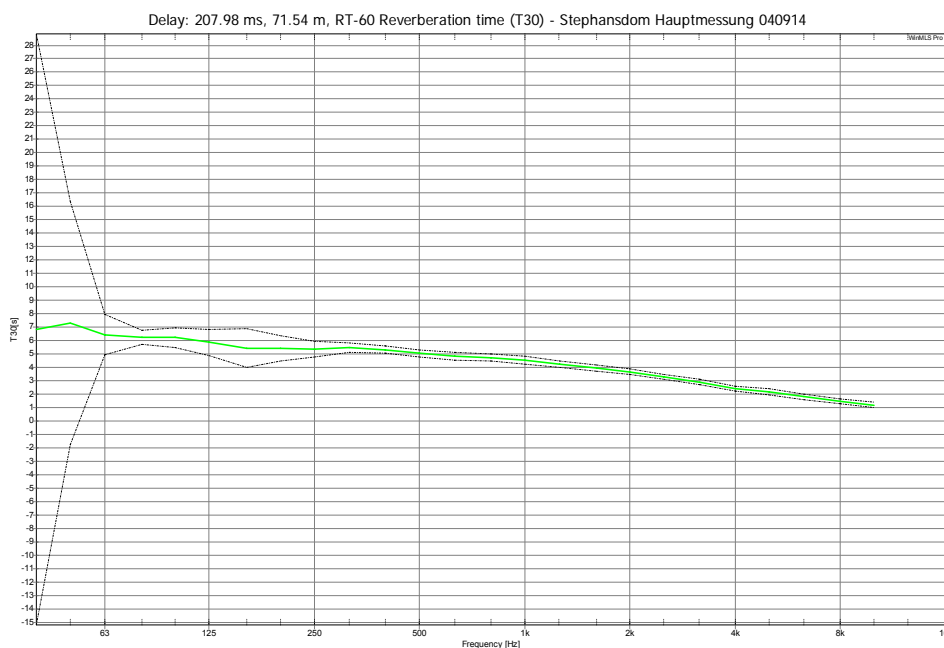


Abb. 5-29: Nachhallzeit T30 ohne Einschränkung des EDR, Mittelwert

Versuchsweise wurde die Berechnung unter Einbeziehung des EDR als Gültigkeitskriterium wiederholt: Im Bereich von ca. 100 Hz bis 300 Hz kommen gar keine gültigen Werte zustande (Abb. 5-30).

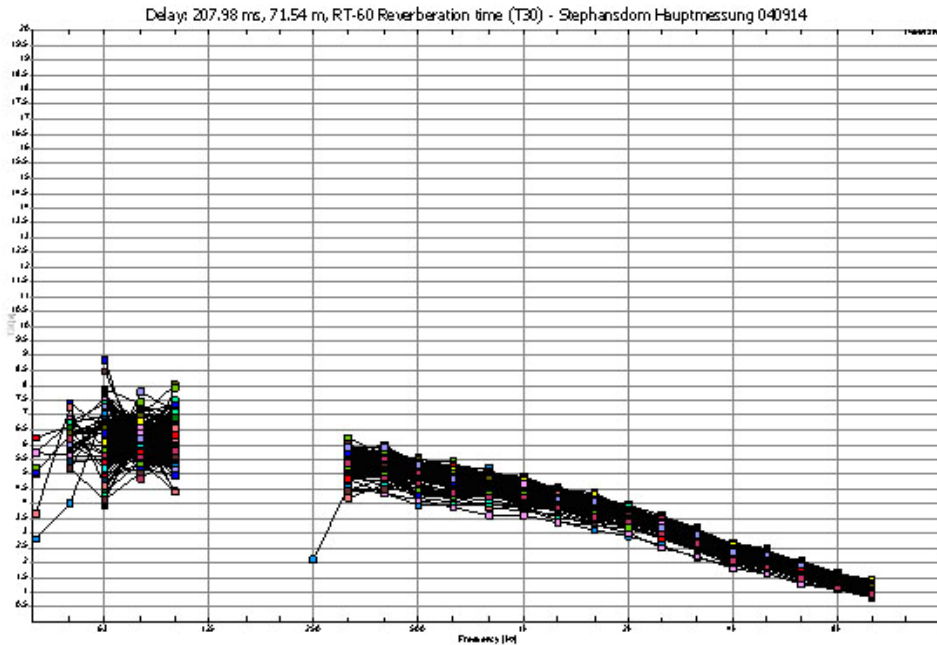


Abb. 5-30: Nachhallzeit T30 mit Berücksichtigung des $EDR > 35$

Als weiterer Versuch nun die T15 Auswertung derselben Impulsantworten (Abb. 5-31) bzw. deren Mittelung (Abb. 5-32).

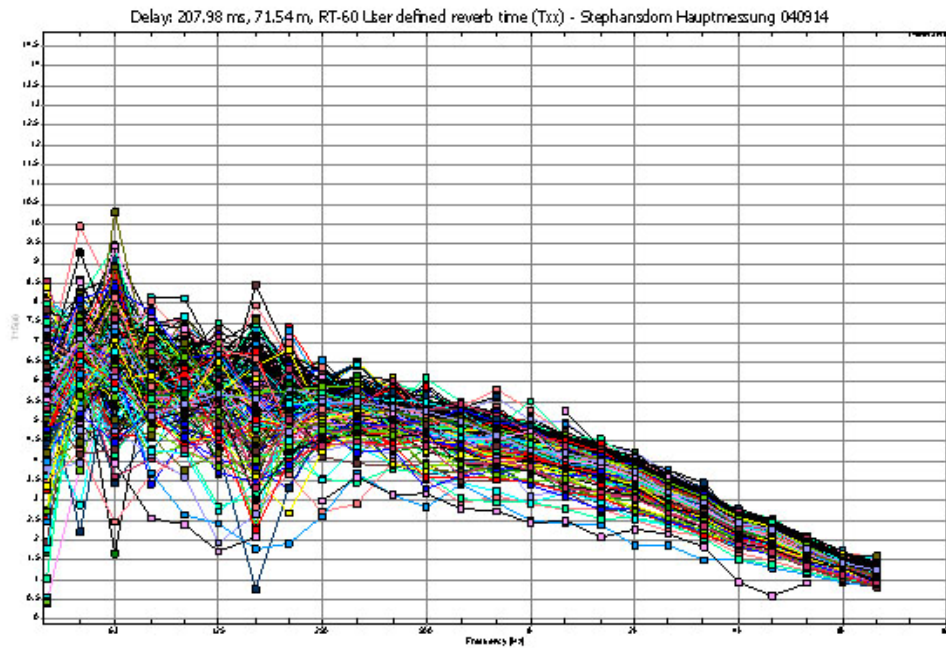


Abb. 5-31: Nachhallzeit T15 mit Berücksichtigung des EDR>20

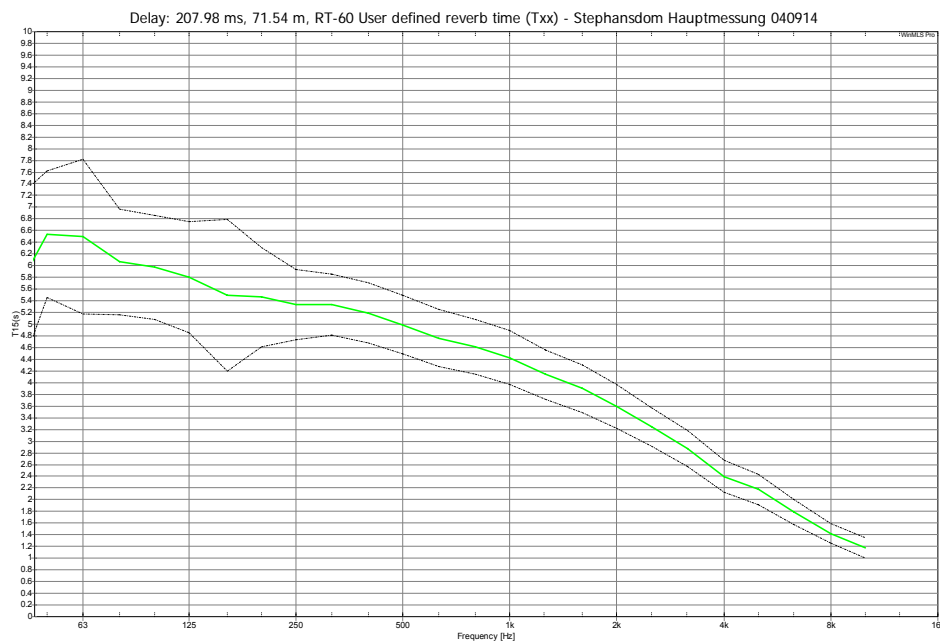


Abb. 5-32: Nachhallzeit T15 mit Berücksichtigung des EDR>20, Mittelwert

Abschließend kann bemerkt werden, dass vor allem bei weit von der Quelle entfernten Punkten oder bei Frequenzen in der Nähe starker Raummoden (vgl. Abschnitt 6.4.2) der SNR bzw. EDR für eine gültige Auswertung oft nicht mehr ausreicht und im Bassbereich oft falsche Werte ausgegeben werden. Eine Möglichkeit wäre z.B. auf T20 auszuweichen,

allerdings mit eingeschränkter Genauigkeit im bereits vorher gültigen Bereich, aber auch einer Erweiterung des gültigen Wertebereichs.

5.1.5.4 Vergleichsweise Analyse der IBK Messung

Auch bei der Messung im IBK Kellergang sind Probleme aufgetreten. Im tieffrequenten Bereich sind deutliche Ausreißer zu erkennen (Abb. 5-33).

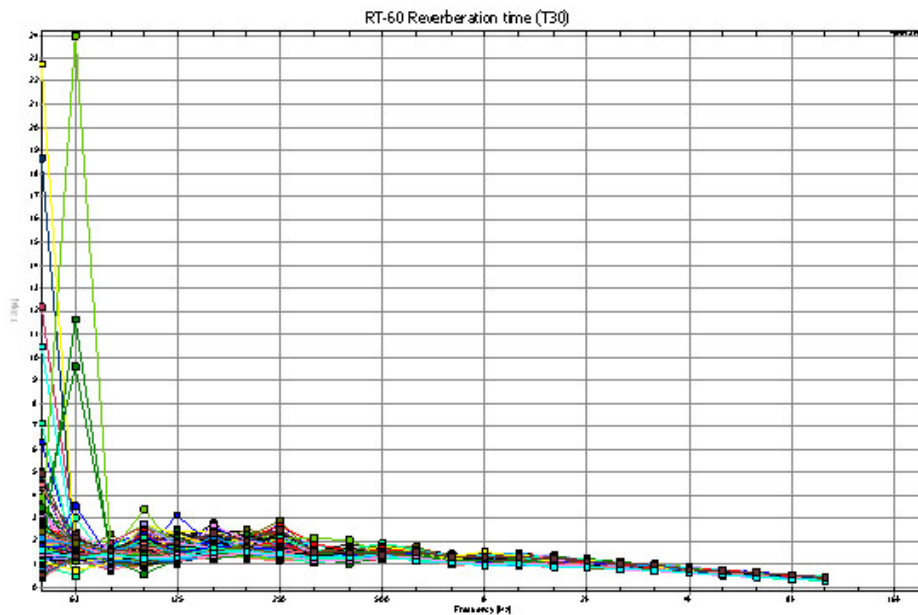


Abb. 5-33: Nachhallzeit T30, Q1

Im Vergleich dazu die T15 Auswertung derselben Impulsantworten (Abb. 5-34) und deren Mittelwert (Abb. 5-35).

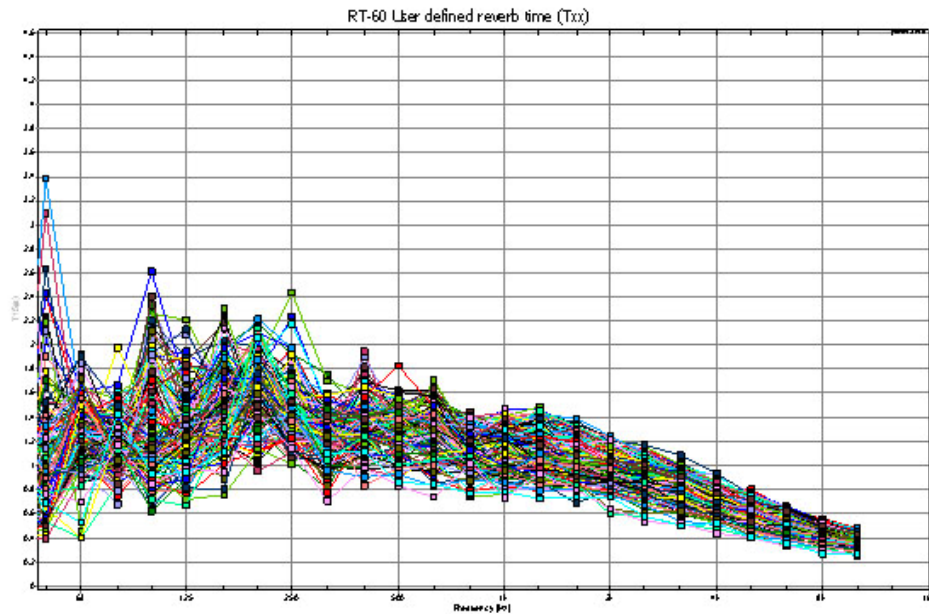


Abb. 5-34: Nachhallzeit T15, Q1

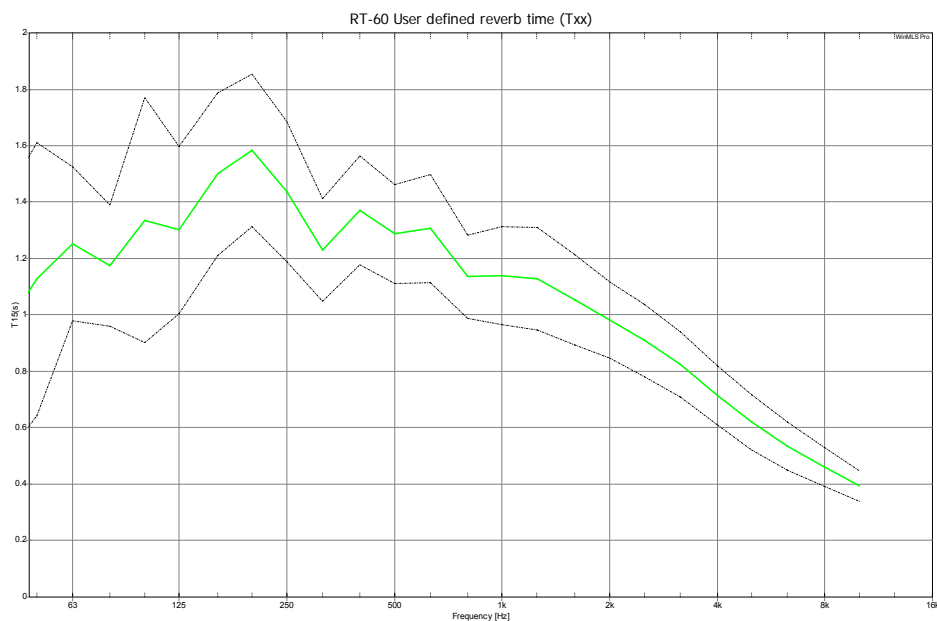


Abb. 5-35: Nachhallzeit T15, Q1, Mittelwert

Bei der zweiten Quelle ist selbst bei der T15 Auswertung noch ein ungültiger Wert bei 50 Hz erkennbar (Abb. 5-36), der EDR liegt hier allerdings bei 21.4, das sollte theoretisch reichen. Die Darstellung des Mittelwerts (Abb. 5-37) macht nun den Einfluss einzelner falscher Werte auf die Gesamtmessung deutlich, somit auch die Wichtigkeit der Eingrenzung der Gültigkeit.

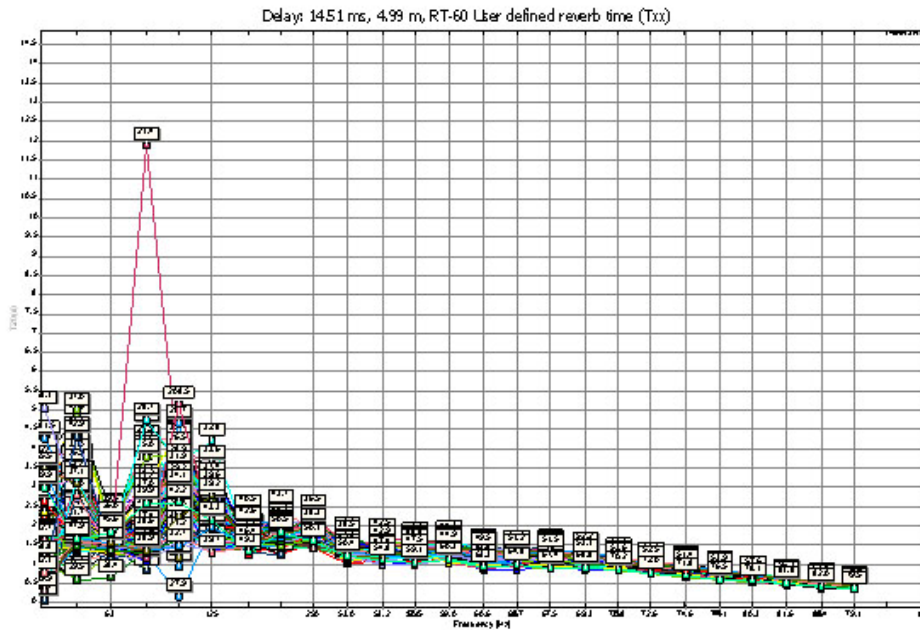


Abb. 5-36: Nachhallzeit T15, Q2

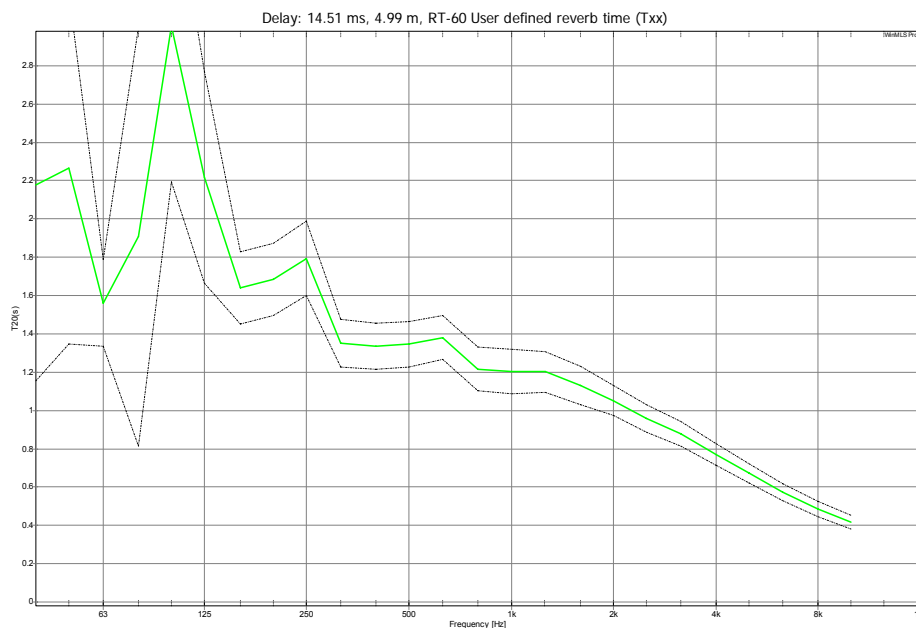


Abb. 5-37: Nachhallzeit T15, Q2, Mittelwert

Für die T30 Berechnung wurde also ein EDR größer 35 als Kriterium für eine gültige Messung gewählt. Mit dieser Methode konnte die Zahl der „Ausreißer“ bei der Messung reduziert werden, allerdings sind immer noch Störungen erkennbar. Im Mittel ergibt sich für die Messungen im IBK Gang die in Abb. 5-38 dargestellte Nachhallzeit für die erste Quelle (Q1) bzw. in Abb. 5-39 die mittlere Nachhallzeit für Q2.

Es fällt auf dass im Bereich unter 150 Hz die Übereinstimmung der Messungen von Q1 und Q2 zu Wünschen übrig lässt. Da die Bedingungen nicht ideal waren und anscheinend die „künstliche Wand“ eine unzureichende Trennung erbrachte, ist eine Abweichung auch gerechtfertigt.

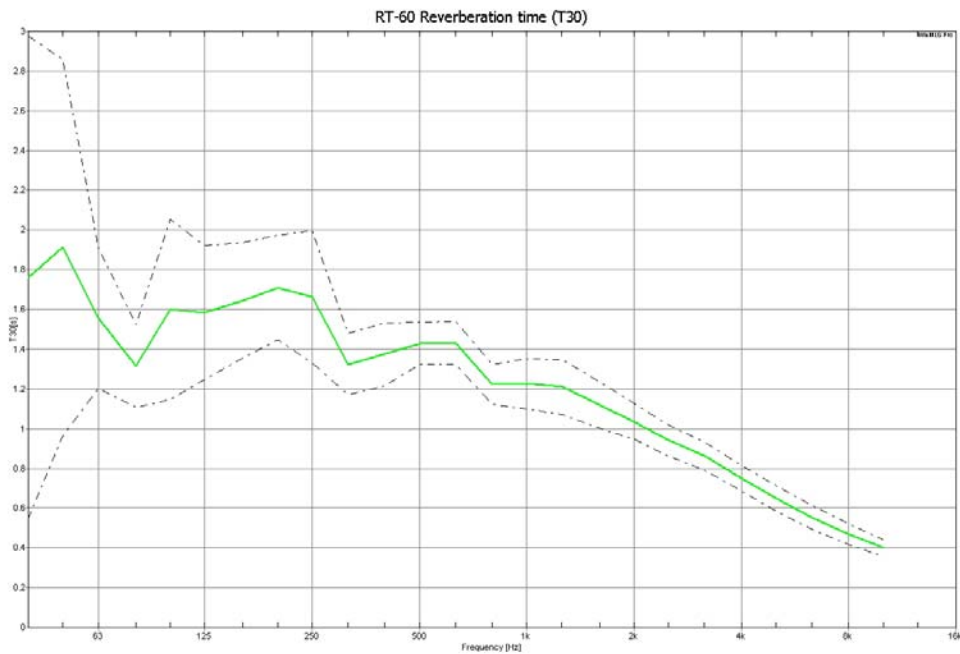


Abb. 5-38: Nachhallzeit T30, Q1, Mittelwert

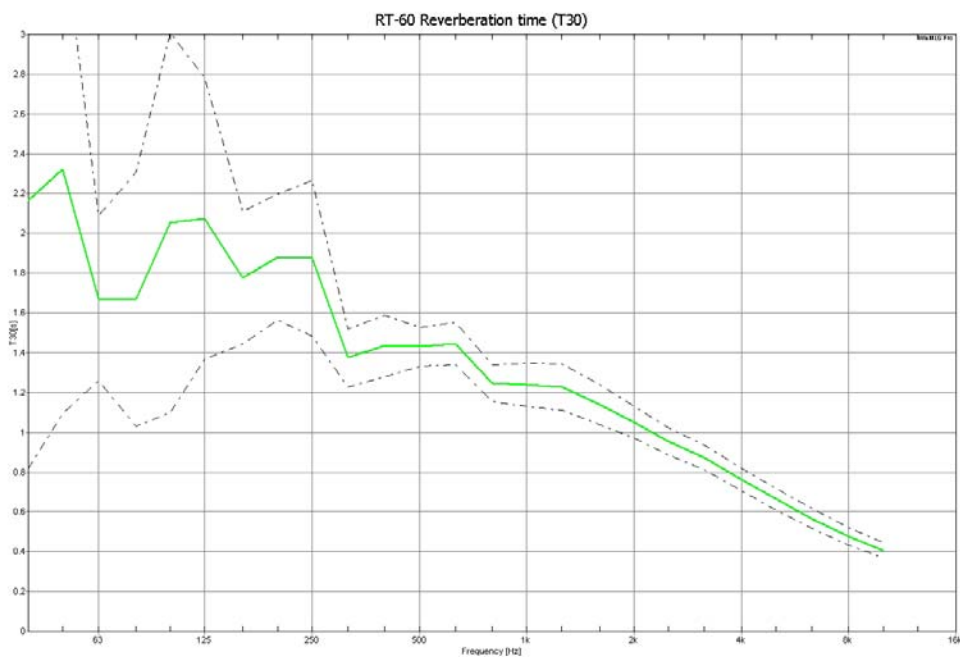


Abb. 5-39: Nachhallzeit T30, Q2, Mittelwert

6 Auswertung der Messdaten

6.1 Ergebnisse der Probemessung am IBK

(Messaufbau siehe Abschnitt 3.3.1, S.26)

6.1.1 Nachhallzeit gesamt

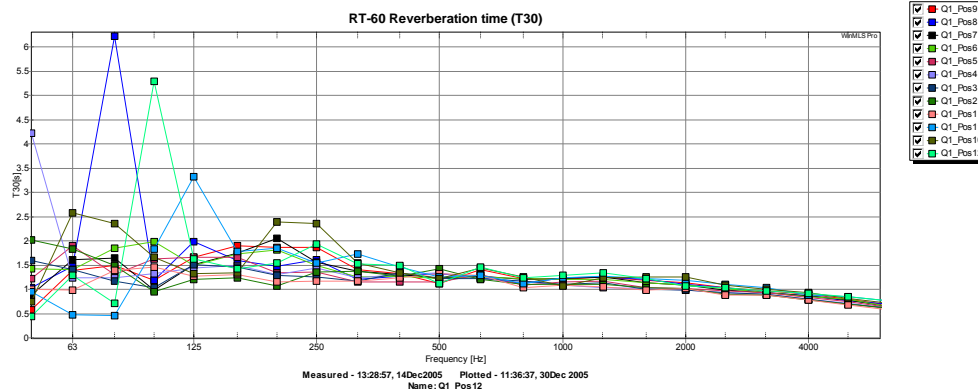


Abb. 6-1: Nachhallzeit T30, Q1

Bei der ersten Messreihe (Abb. 6-1) fallen einige Ausreißer auf. Die Sweeps werden aus Zeitgründen ohne Wiederholungen durchgeführt, bei der zweiten Messreihe (Abb. 6-2) werden unplausible Ergebnisse wiederholt. Im Keller wurde zur selben Zeit in der Werkstätte gearbeitet und anscheinend wurden dadurch die Messungen leicht beeinflusst. Am linken Ende des Gangs (Nähe Q2) war außerdem das Geräusch der Klimaanlage nicht zu vernachlässigen, darum scheint die zweite Messreihe (Q2) brauchbarere Ergebnisse zu liefern, was durch einen besseren SNR erklärt werden kann, da die Störungen in Quellennähe die Messung weniger stark beeinflussen.

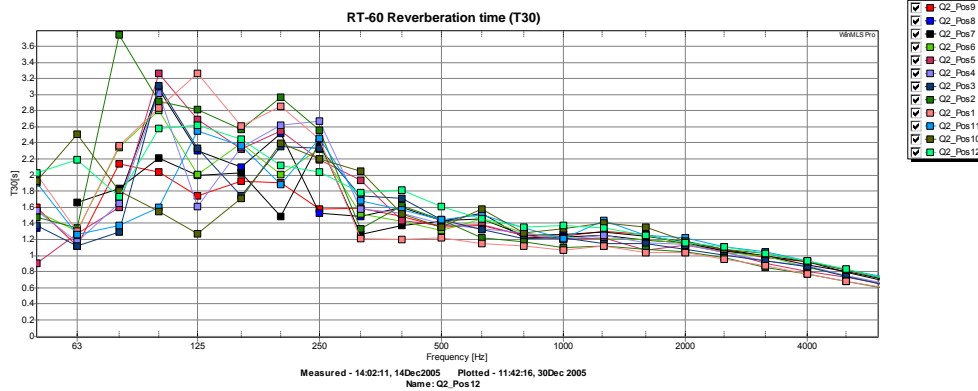


Abb. 6-2: Nachhallzeit T30, Q2

Das Verhalten der Messdaten bezüglich äußerer Störungen und die auffällige Verbesserung bei einer Wiederholung lassen eventuell den Schluss zu, dass es sich auch bei der Stephansdommessung bei extremen Ausreißern um äußere Störungen handeln könnte.

6.1.2 Nachhallzeit bei Quelle Q1

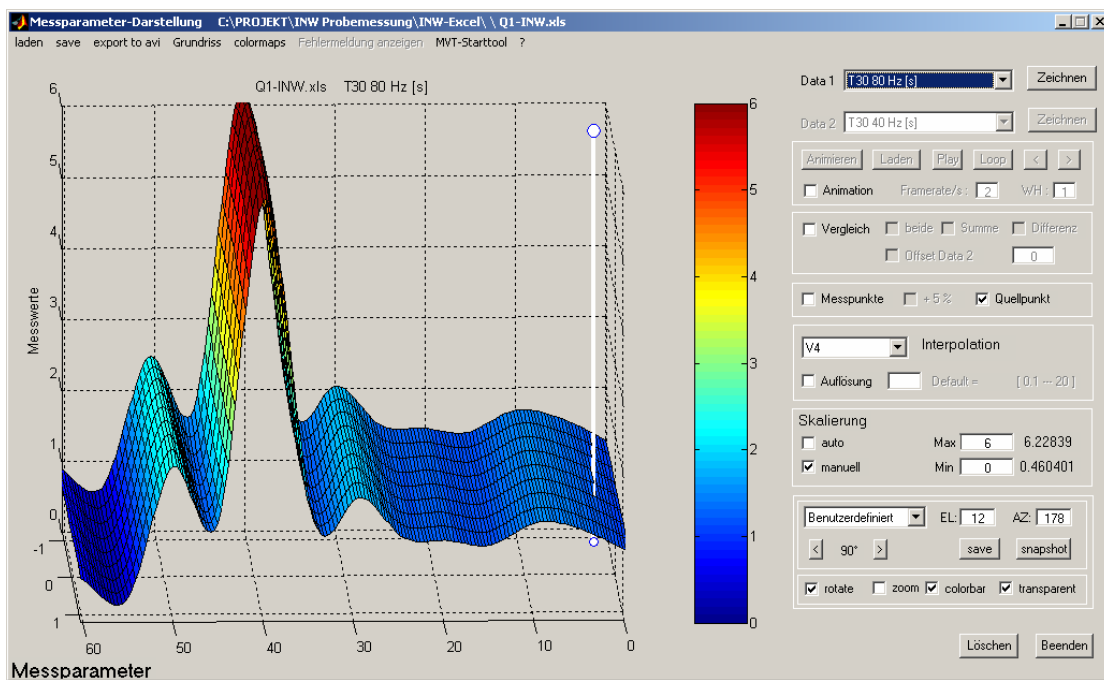


Abb. 6-3: Nachhallzeit T30 bei 80 Hz, Q1

Im tieffrequenten Bereich (Abb. 6-3, 80 Hz) erkennt man zu starke Welligkeit für brauchbare Ergebnisse, dies wird in Abschnitt 6.4.2 noch näher behandelt.

Die folgenden Bilder (Abb. 6-4 bis Abb. 6-7) zeigen deutlich die Tendenz der Verlängerung der Nachhallzeit mit zunehmendem Abstand zur Schallquelle.

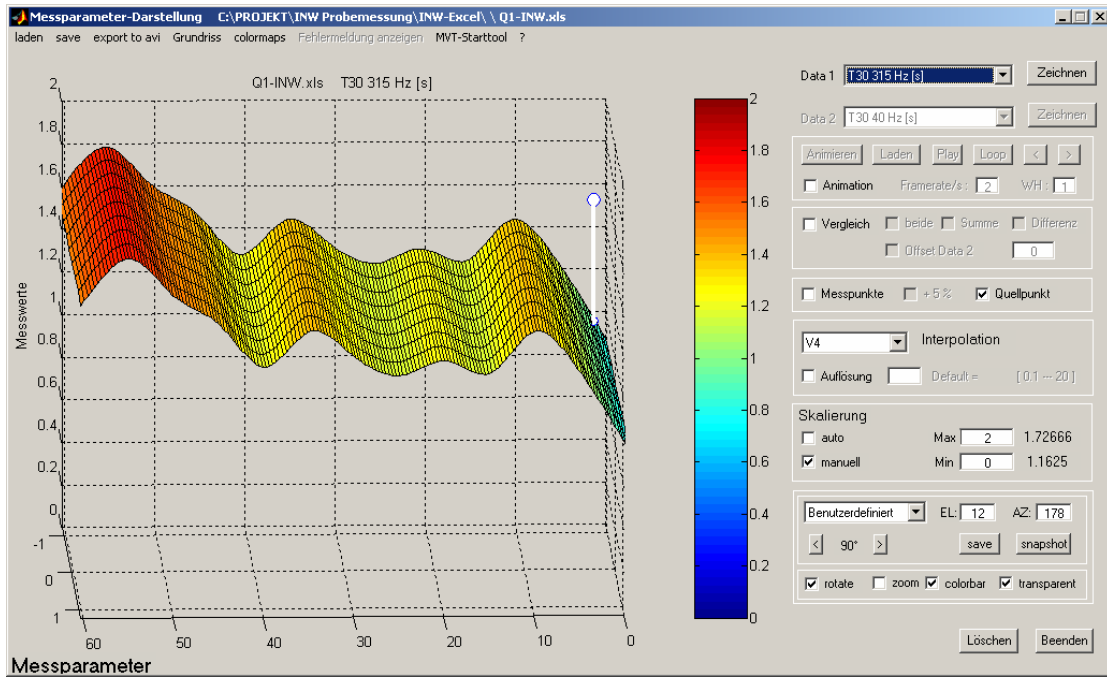


Abb. 6-4: Nachhallzeit T30 bei 315 Hz, Q1

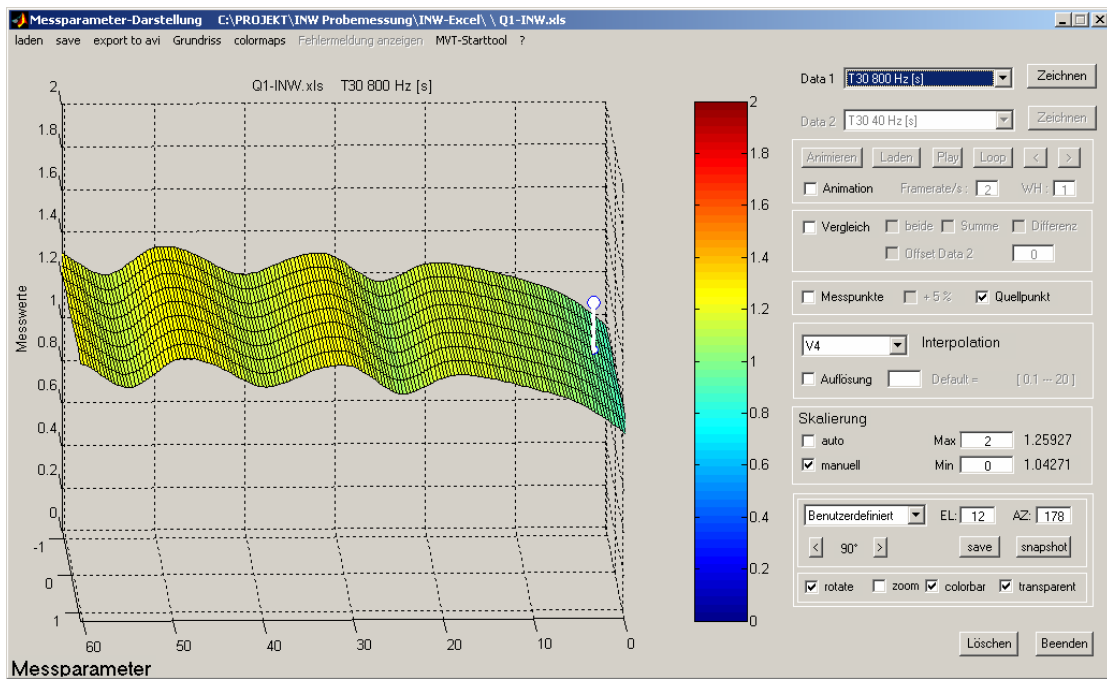


Abb. 6-5: Nachhallzeit T30 bei 800 Hz, Q1

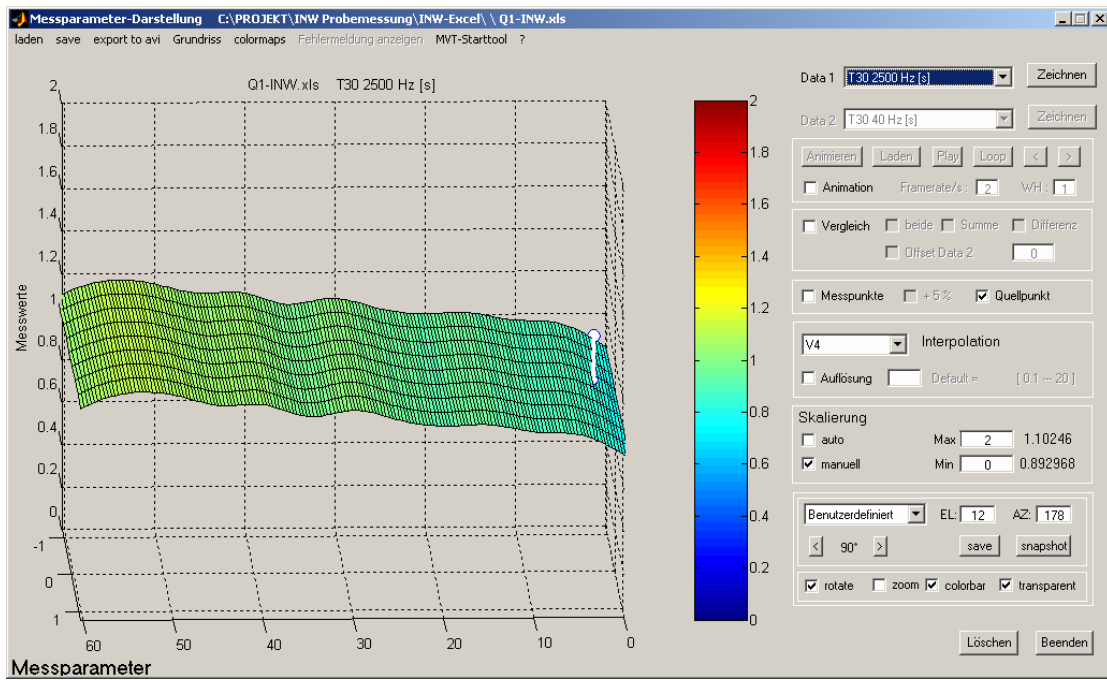


Abb. 6-6: Nachhallzeit T30 bei 2.5 kHz, Q1

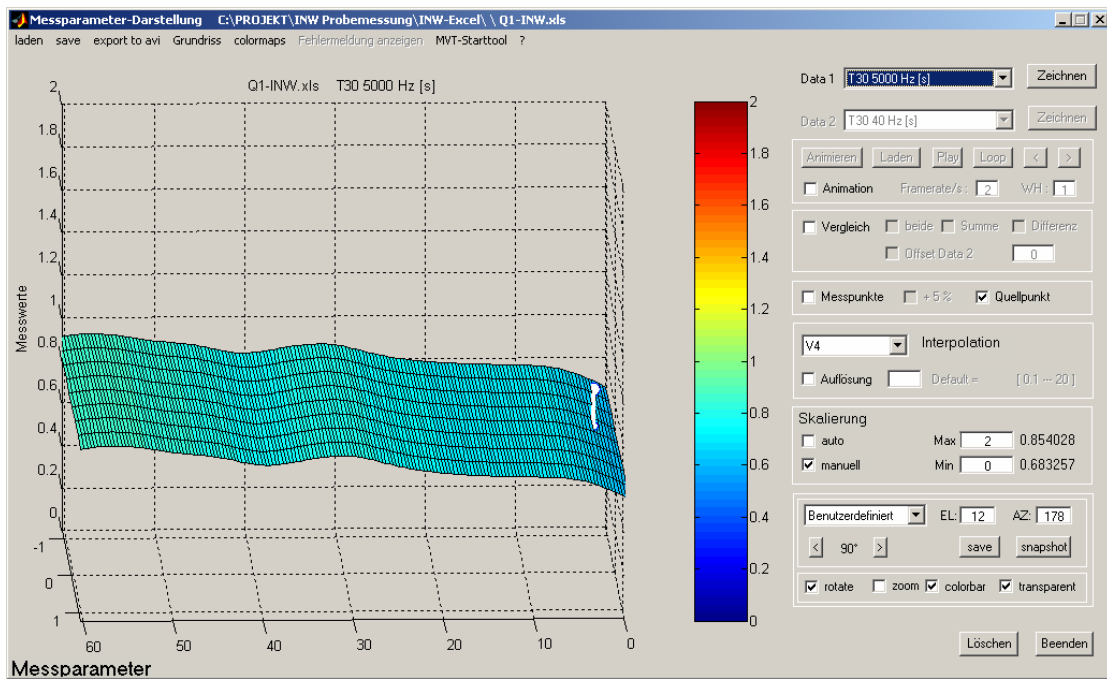


Abb. 6-7: Nachhallzeit T30 bei 5 kHz, Q1

6.1.3 Nachhallzeit bei Quelle Q2

Wie schon erwähnt traten bei der Messung mit Q2 anscheinend weitere Störungen auf, die Messergebnisse unterscheiden sich leicht von denen bei Q1.

Die Quelle befindet sich nun am linken Bildrand.

Abb. 6-8 zeigt auch eine starke Modenausbildung (Achtung: die Skalierung wurde hier zur besseren Darstellung gegenüber den restlichen Bildern verändert), Abb. 6-9 ebenfalls, noch stärker ausgeprägt als bei der Messung mit Q1.

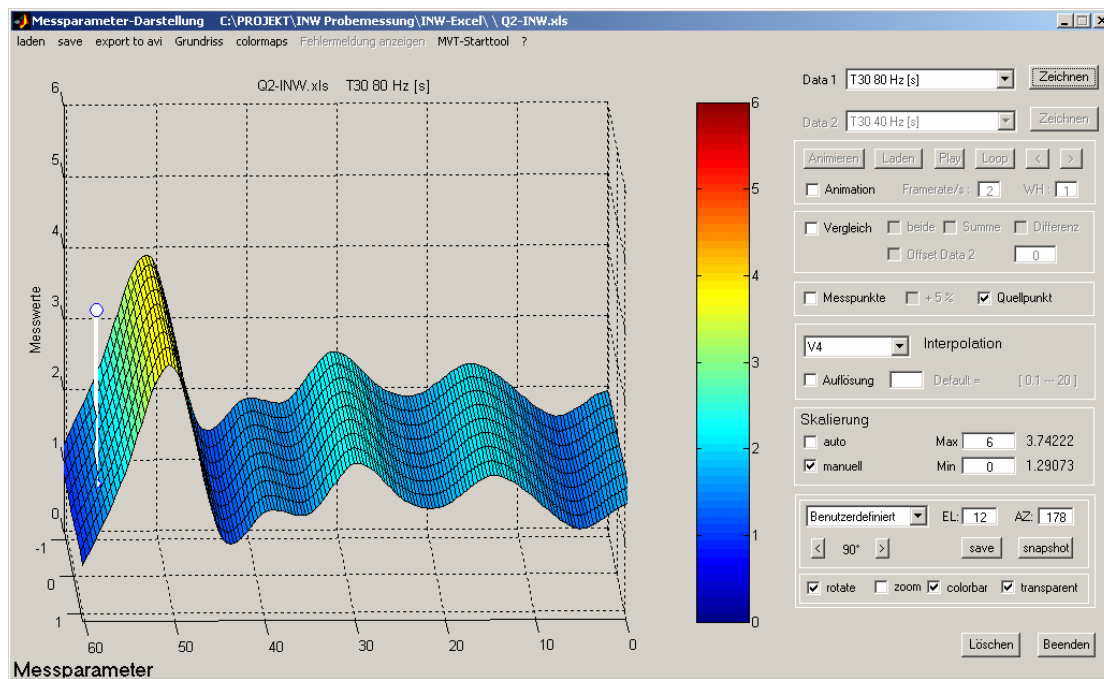


Abb. 6-8: Nachhallzeit T30 bei 80 Hz, Q2 (y-Achse bis 6s)

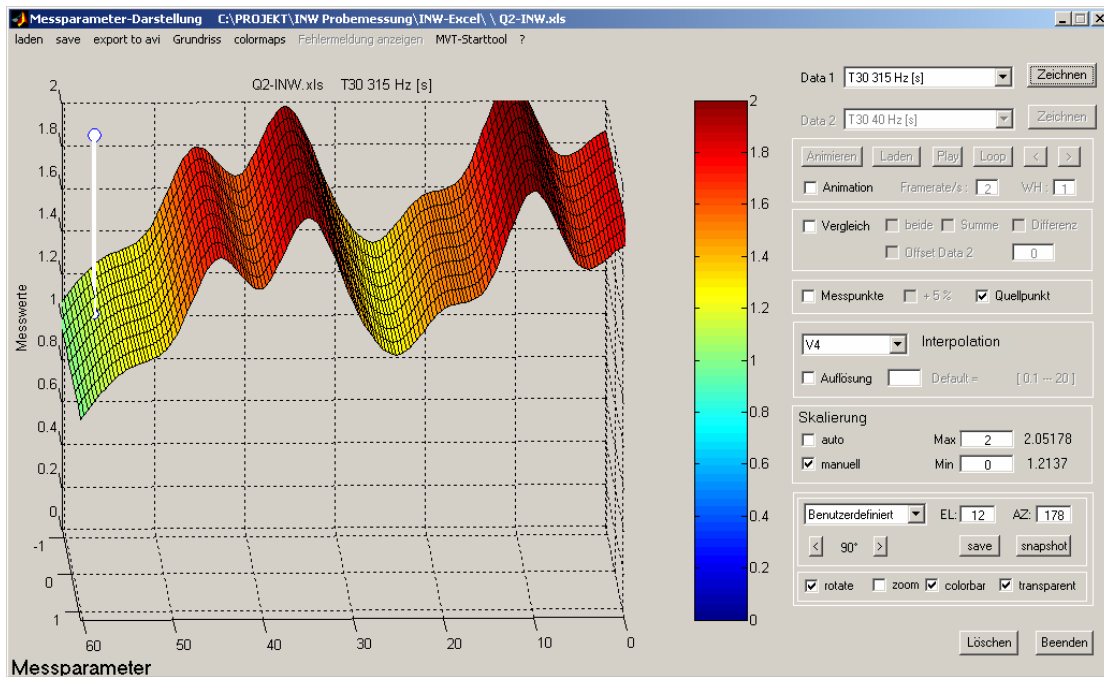


Abb. 6-9: Nachhallzeit T30 bei 315 Hz, Q2

Abb. 6-10 bis Abb. 6-12 zeigen wiederum den erwarteten Anstieg der Nachhallzeit.

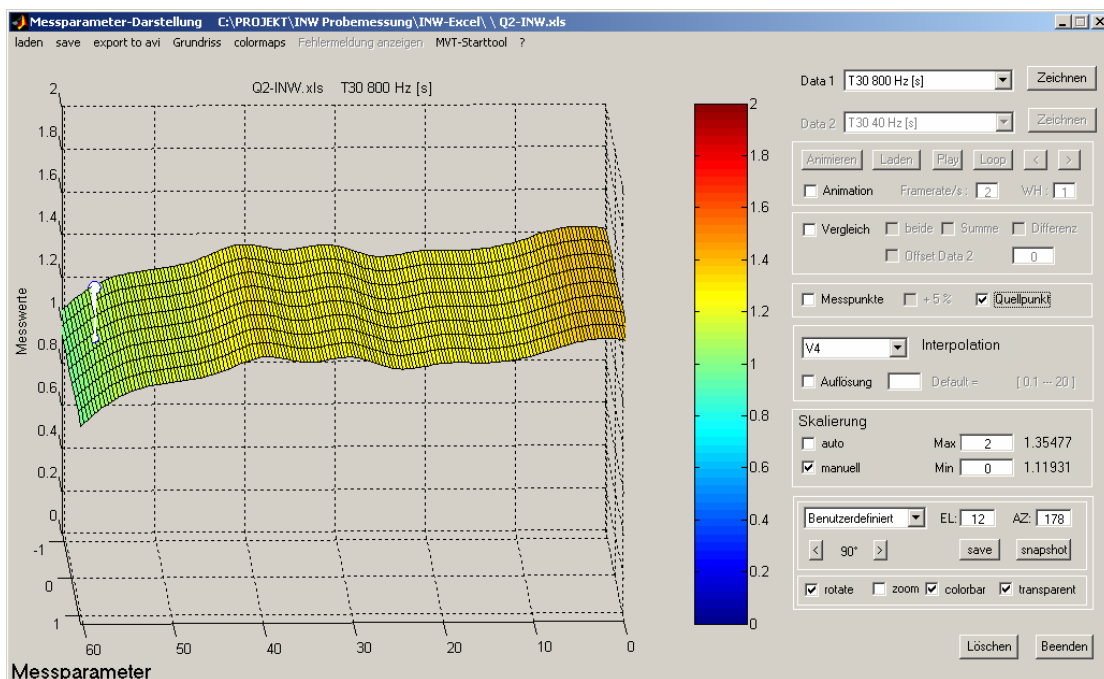


Abb. 6-10: Nachhallzeit T30 bei 800 Hz, Q2

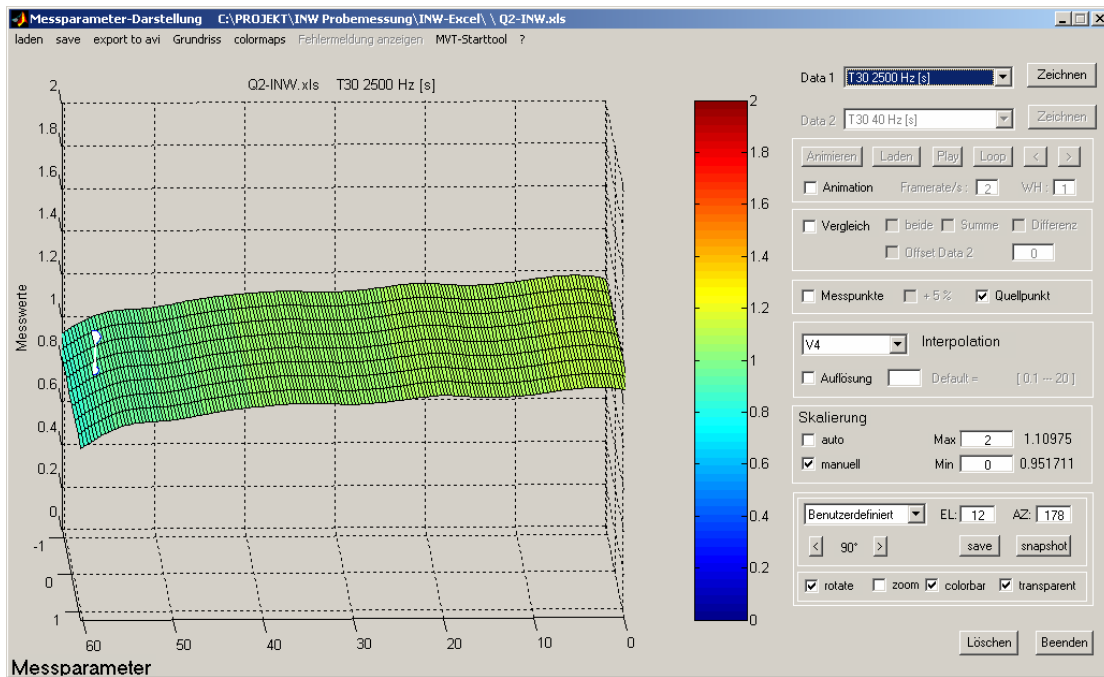


Abb. 6-11: Nachhallzeit T30 bei 2.5 kHz, Q2

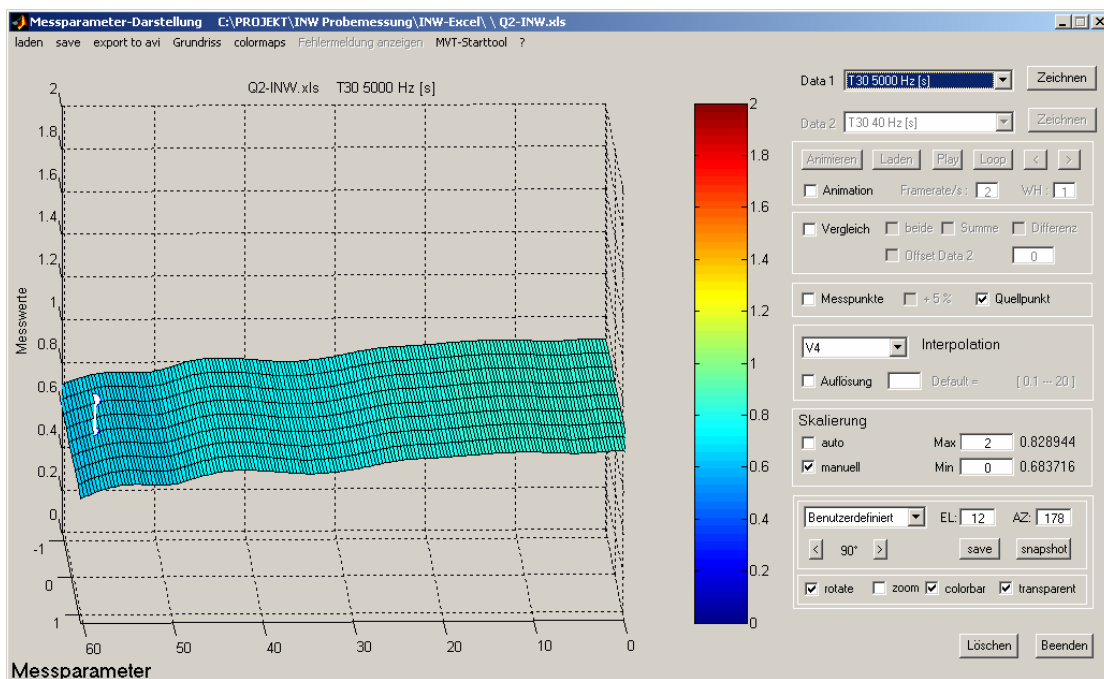


Abb. 6-12: Nachhallzeit T30 bei 5 kHz, Q2

Zusammenfassend kann bemerkt werden, dass ein Anstieg der Nachhallzeit mit zunehmender Entfernung von der Quelle deutlich zu sehen ist. Im Bereich bis ca. 400 Hz dominieren die Raummoden und weitere Auswertungen sind nur eingeschränkt möglich.

Der direkte Vergleich der Nachhallzeit bei 630 Hz (Abb. 6-13, obere Kurve) und 2 kHz (Abb. 6-13, untere Kurve) zeigt zwar eine Frequenzabhängigkeit, aber auch einen kontinuierlichen Anstieg mit zunehmendem Quellenabstand.

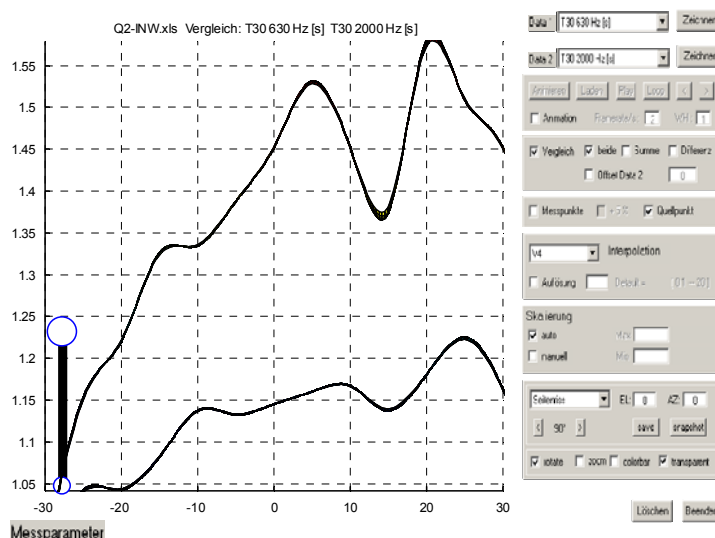


Abb. 6-13: Nachhallzeit T30 bei 630 Hz (oben) und 2 kHz (unten) mit Quelle Q2

6.1.4 Energie-Zeit-Verteilung

Die Energie-Zeit-Verteilung (EZV) wird mit Hilfe des MVT (vgl. Abschnitt 3.5.4, S.42) grafisch dargestellt.

Es soll die Hypothese überprüft werden, ob die Energie in Quellennähe schneller abnimmt als in größerer Entfernung.

Abb. 6-14 zeigt den Energie-Zeit-Verlauf für Q1 (Quelle links) bei 167 ms und 606 ms. Trotz breitbandiger Darstellung ist der erwartete Trend zu erkennen.

Problematischer verläuft die Darstellung für Q2 (Quelle rechts). Durch bereits erwähnte Störungen wie z.B. starke Modenbildung bis 400 Hz und der geringen Anzahl an Messpunkten gelingt es in der breitbandigen Darstellung (Abb. 6-15) nicht einen klaren Verlauf zu zeigen, wohl aber im störungsfreien Oktavband um 4 kHz (Abb. 6-16).

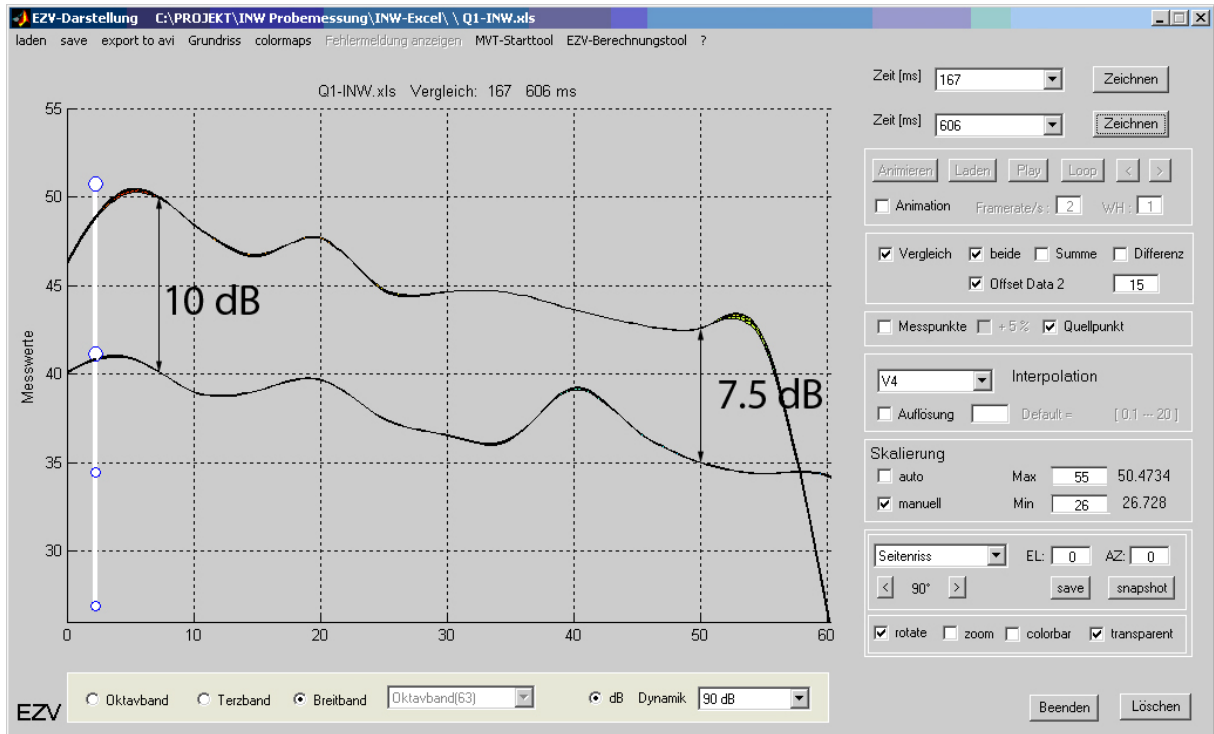


Abb. 6-14: EZV Breitband, 167 ms und 606 ms, Q1

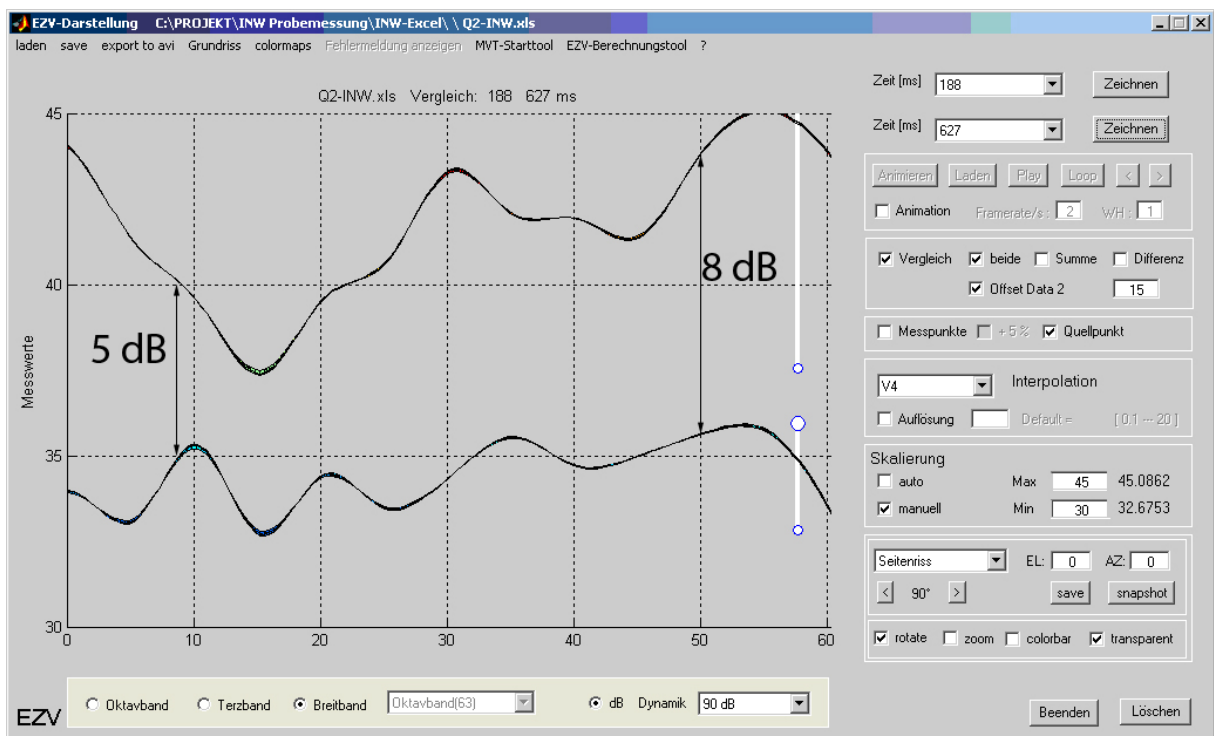


Abb. 6-15: EZV Breitband, 188 ms und 627 ms, Q2

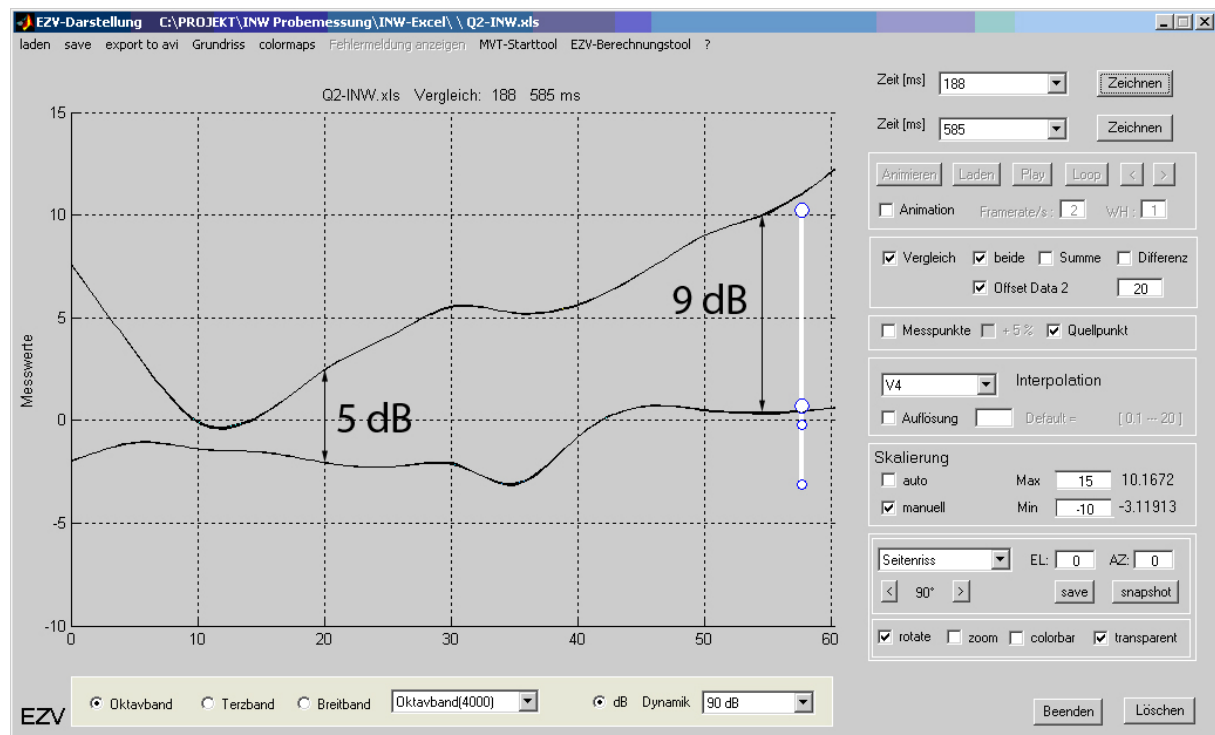


Abb. 6-16: EZV Oktavband um 4000 Hz, 188 ms und 585 ms, Q2

6.2 Hauptmessung am IBK

Für genauere Analysen sind mehr Daten nötig. Die Gangmessung wird mit ca. 160 Messpunkten wiederholt.

Um Störungen zu vermeiden wird das untere Ende des Gangs bzw. der Seitengang mit Hilfe einer Trennwand abgeschlossen und die Klimaanlage ausgeschaltet. Wegen der Abschaltung der Klimaanlage konnte nicht in der Nacht gemessen werden und geringfügige äußere Störungen waren unvermeidlich.

6.2.1 Nachhallzeit gesamt

Trotz dieser Maßnahmen gab es weiterhin Ausreißer im tieffrequenten Bereich (Abb. 6-17). Auch bleiben die Unterschiede zwischen Q1 und Q2 leider deutlich spürbar, der künstliche Abschluss scheint nicht perfekt und somit sind die Ergebnisse für Q2 durchwegs schlechter (Abb. 6-18).

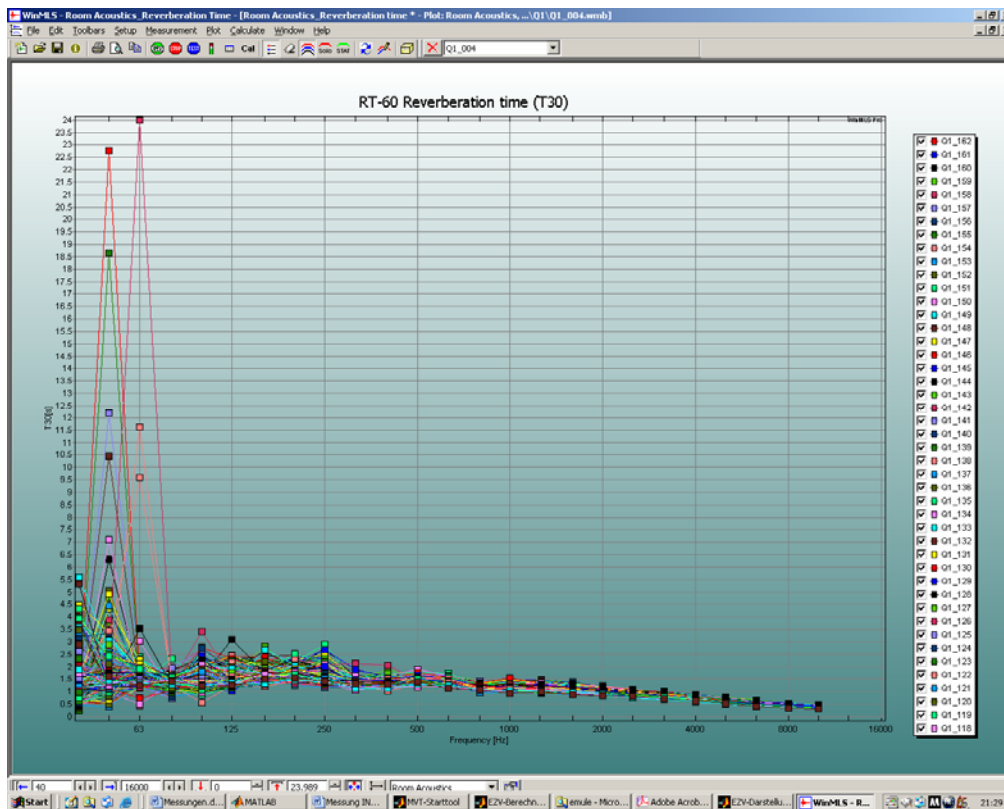


Abb. 6-17: Nachhallzeit T30, Q1

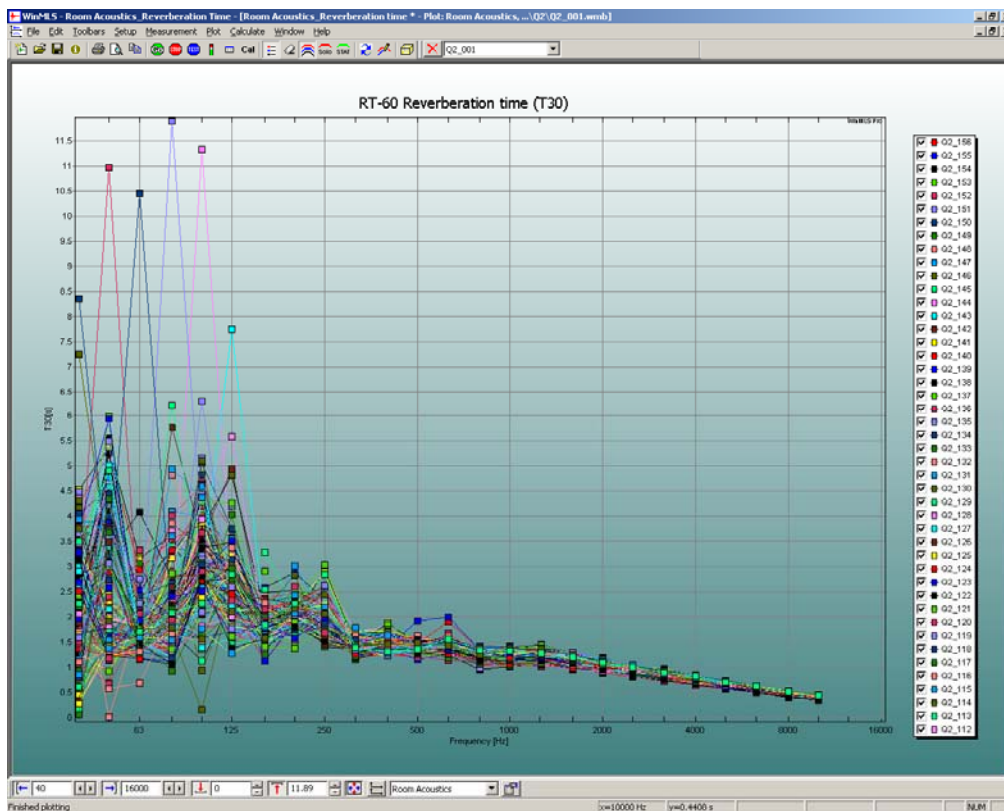


Abb. 6-18: Nachhallzeit T30, Q2

6.2.2 Nachhallzeit bei Quelle Q1

Wie schon in der Probemessung festgestellt dominieren bis ca. 400 Hz die Raummoden (Abb. 6-19 bis Abb. 6-22). Die folgenden Bilder (Abb. 6-23 bis Abb. 6-27) zeigen wiederum den Anstieg der Nachhallzeit mit zunehmender Entfernung von der Quelle.

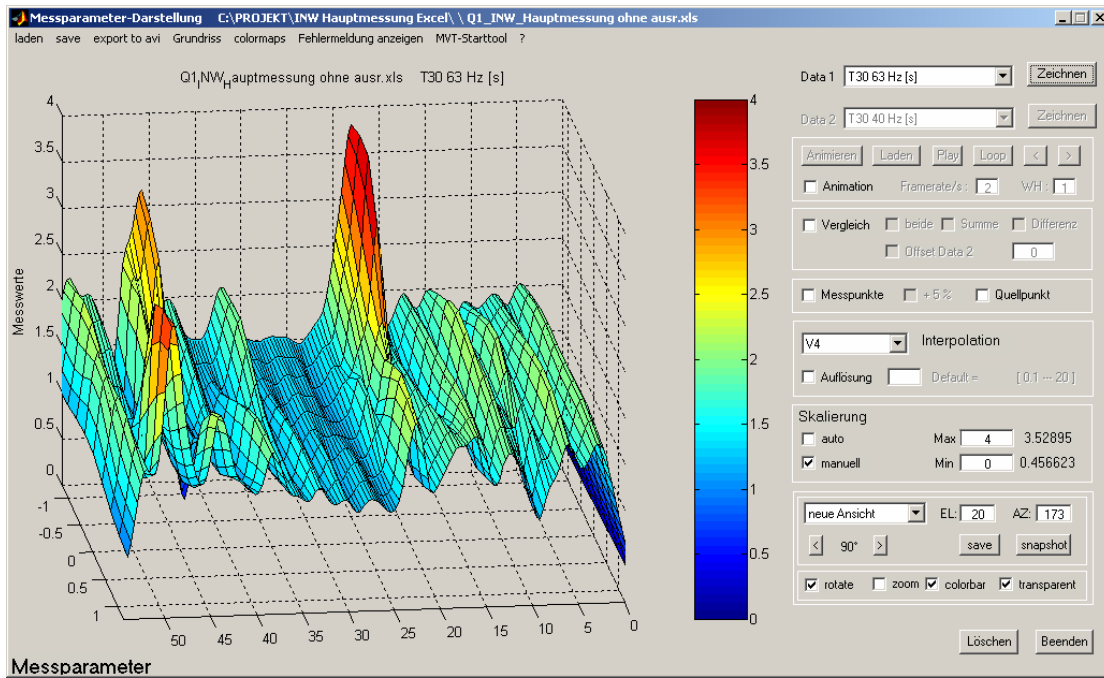


Abb. 6-19: Nachhallzeit T30 bei 63 Hz, Q1 (y-Achse 4s)

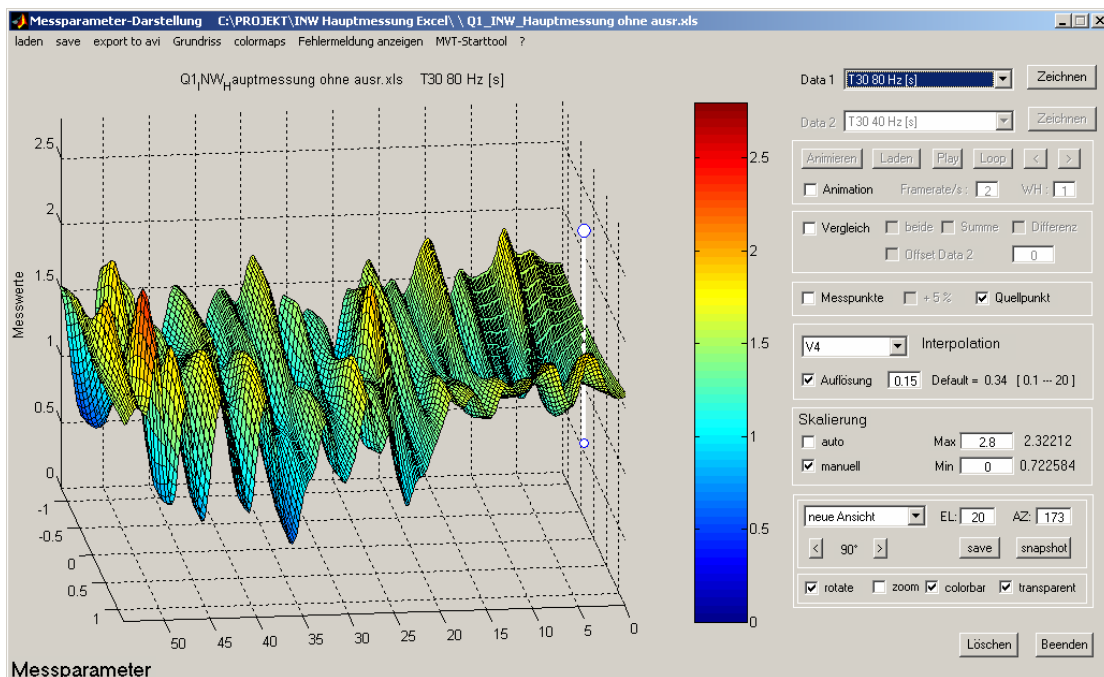


Abb. 6-20: Nachhallzeit T30 bei 80 Hz, Q1

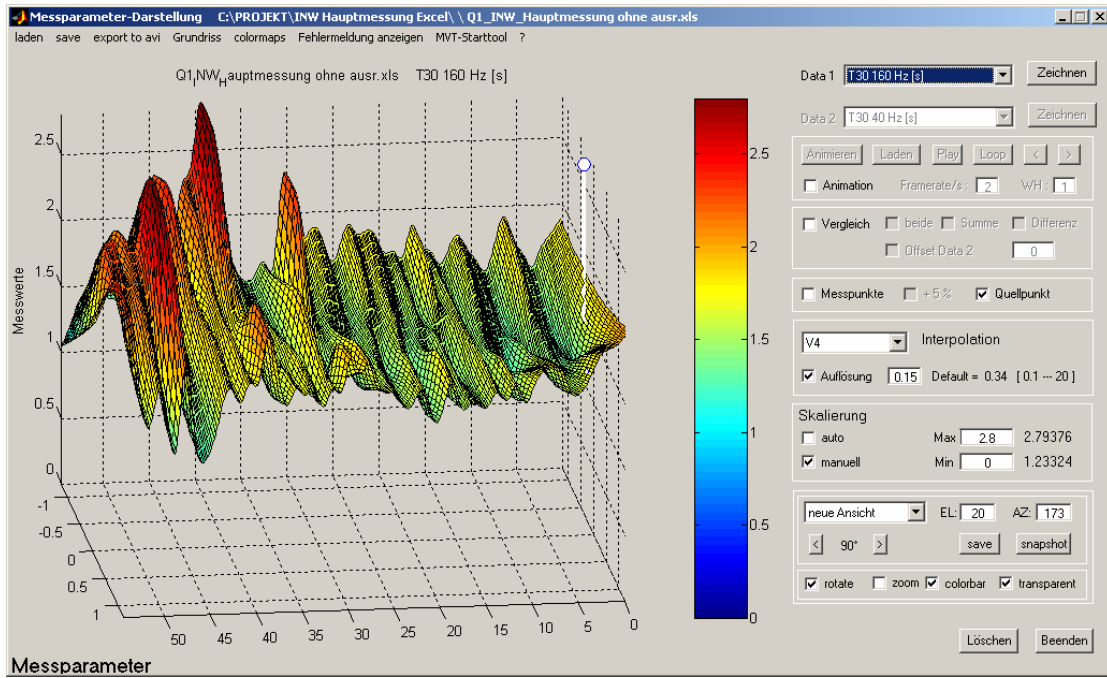


Abb. 6-21: Nachhallzeit T30 bei 160 Hz, Q1

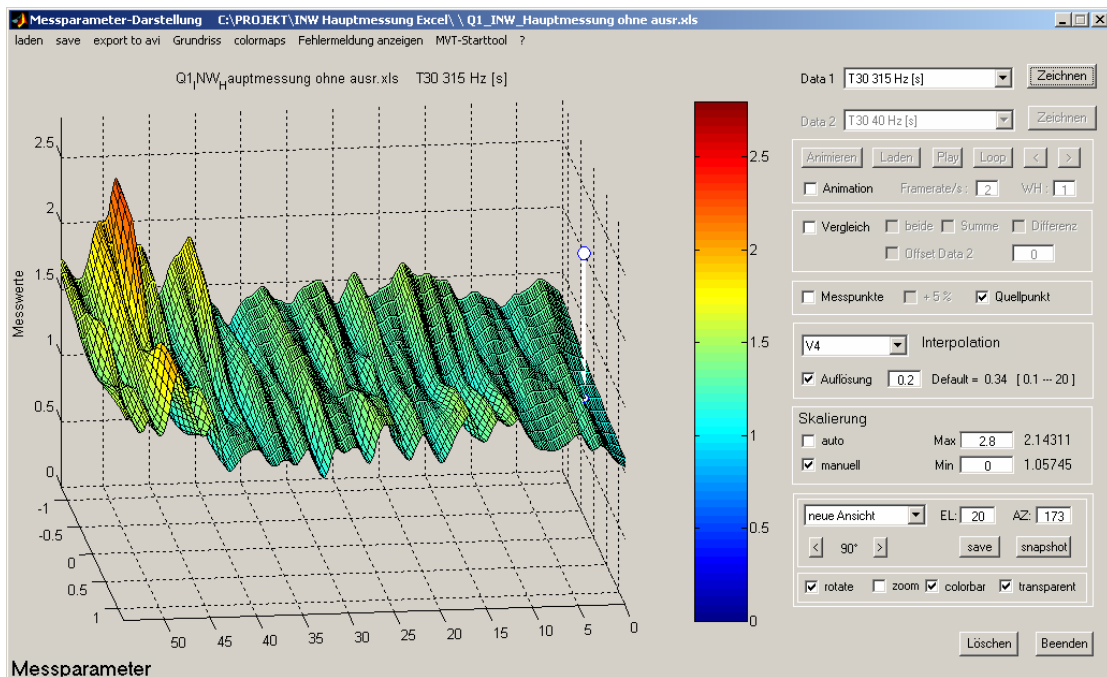


Abb. 6-22: Nachhallzeit T30 bei 315 Hz, Q1

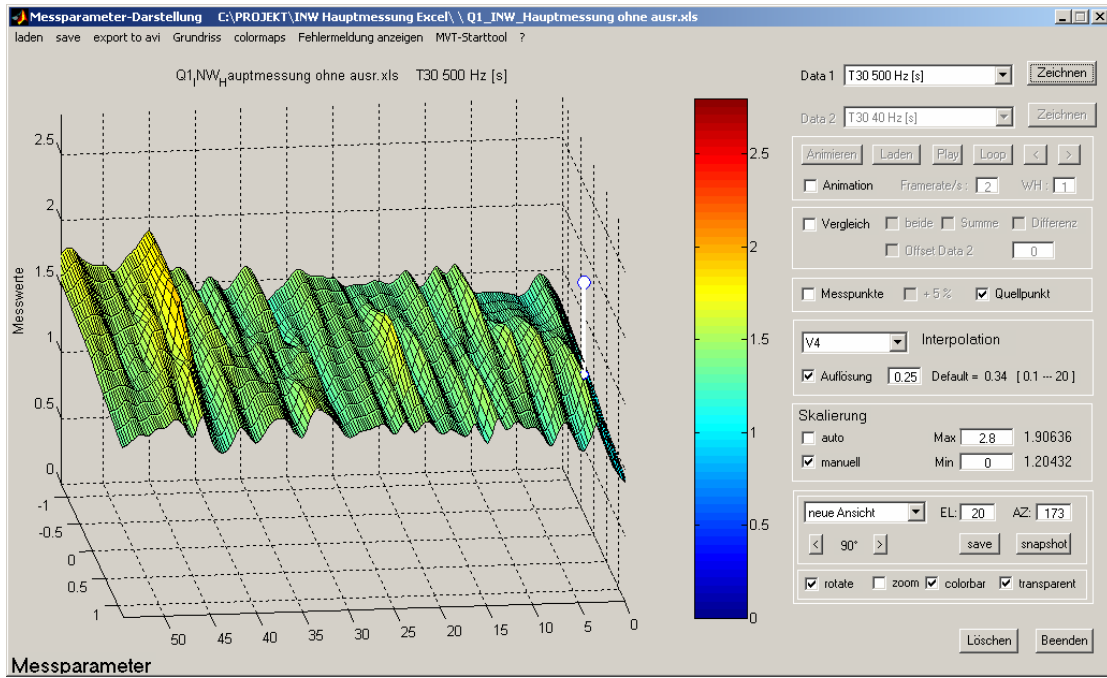


Abb. 6-23: Nachhallzeit T30 bei 500 Hz, Q1

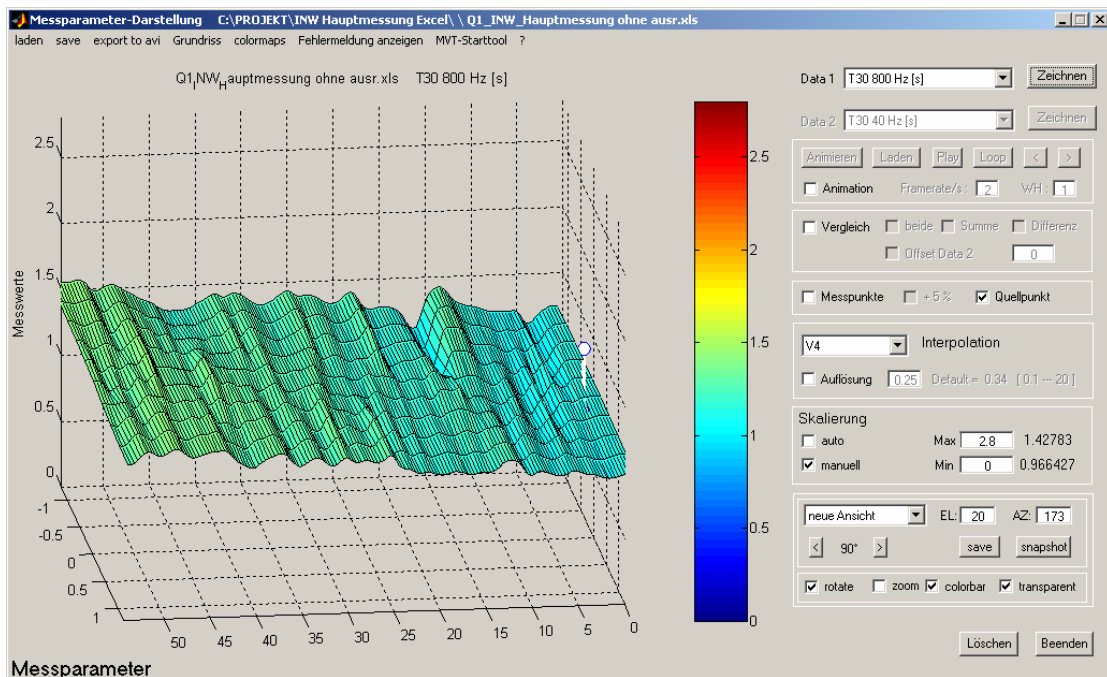


Abb. 6-24: Nachhallzeit T30 bei 800 Hz, Q1

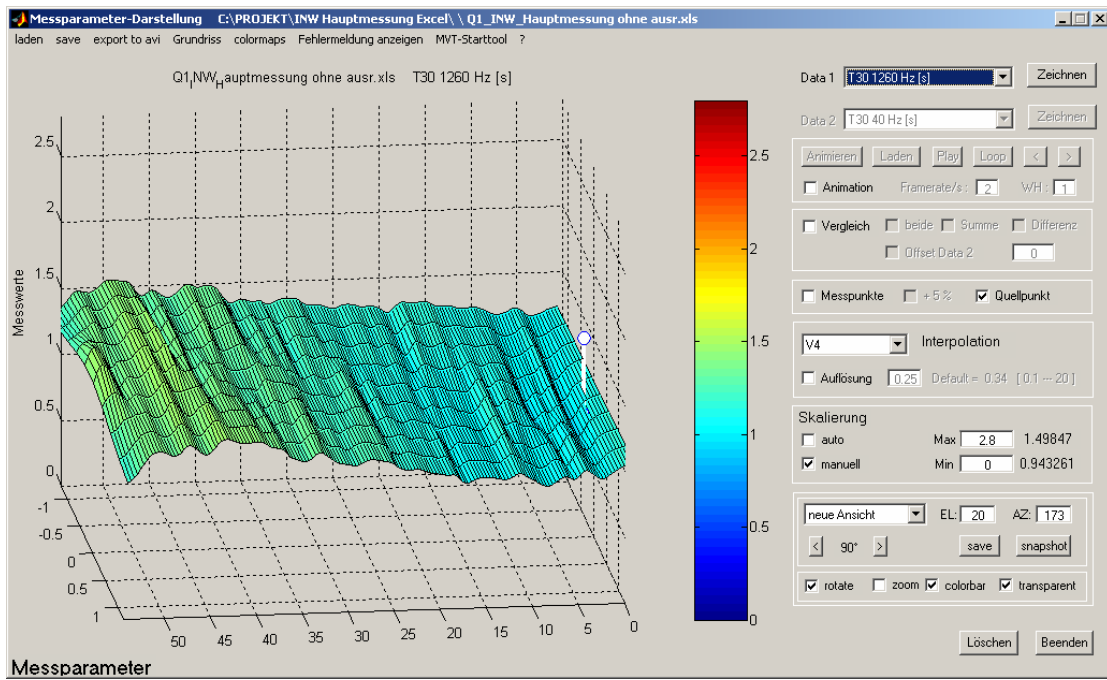


Abb. 6-25: Nachhallzeit T30 bei 1260 Hz, Q1

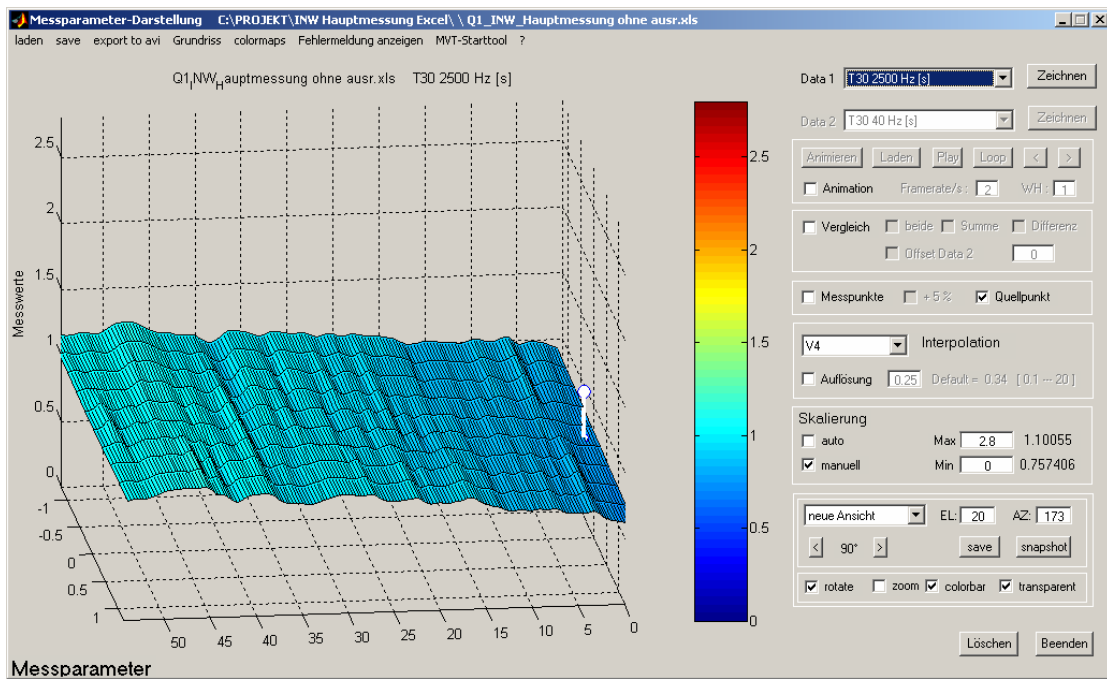


Abb. 6-26: Nachhallzeit T30 bei 2.5 kHz, Q1

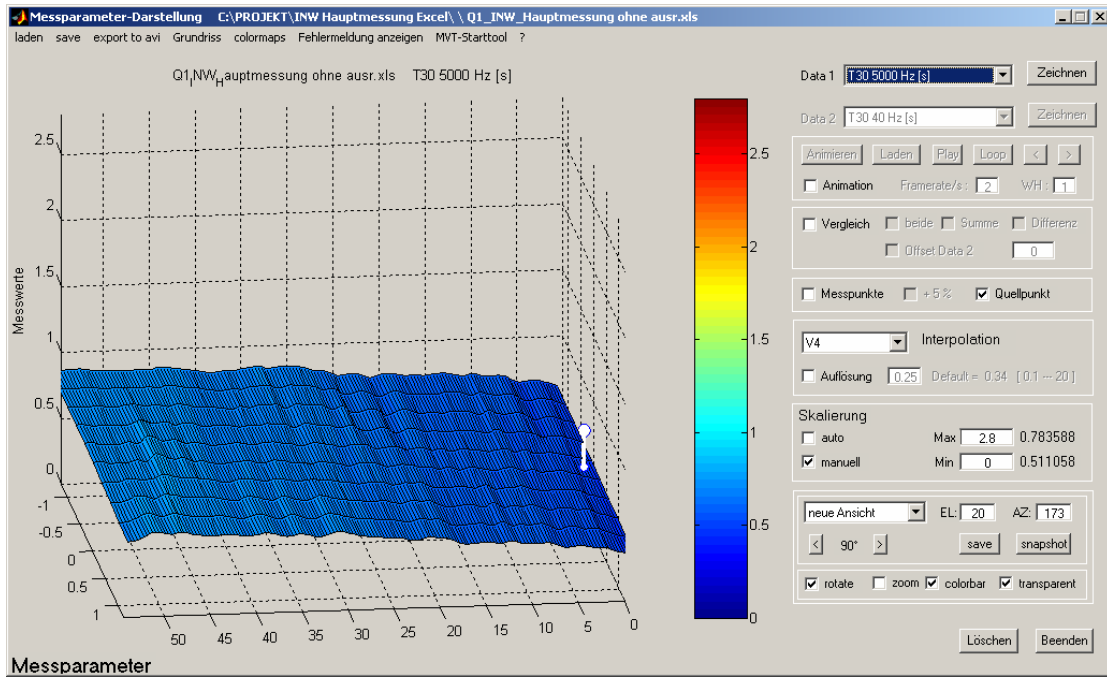


Abb. 6-27: Nachhallzeit T30 bei 5 kHz, Q1

6.2.3 Nachhallzeit bei Quelle Q2

Dieselbe Messung wurde mit Q2 wiederholt, wie schon erwähnt mit ähnlichen aber schlechteren Ergebnissen. Die Welligkeit bei tiefen Frequenzen ist stärker als vorher (Abb. 6-28 bis Abb. 6-30), der Anstieg der Nachhallzeit ist allerdings auch hier deutlich (Abb. 6-31 bis Abb. 6-35).

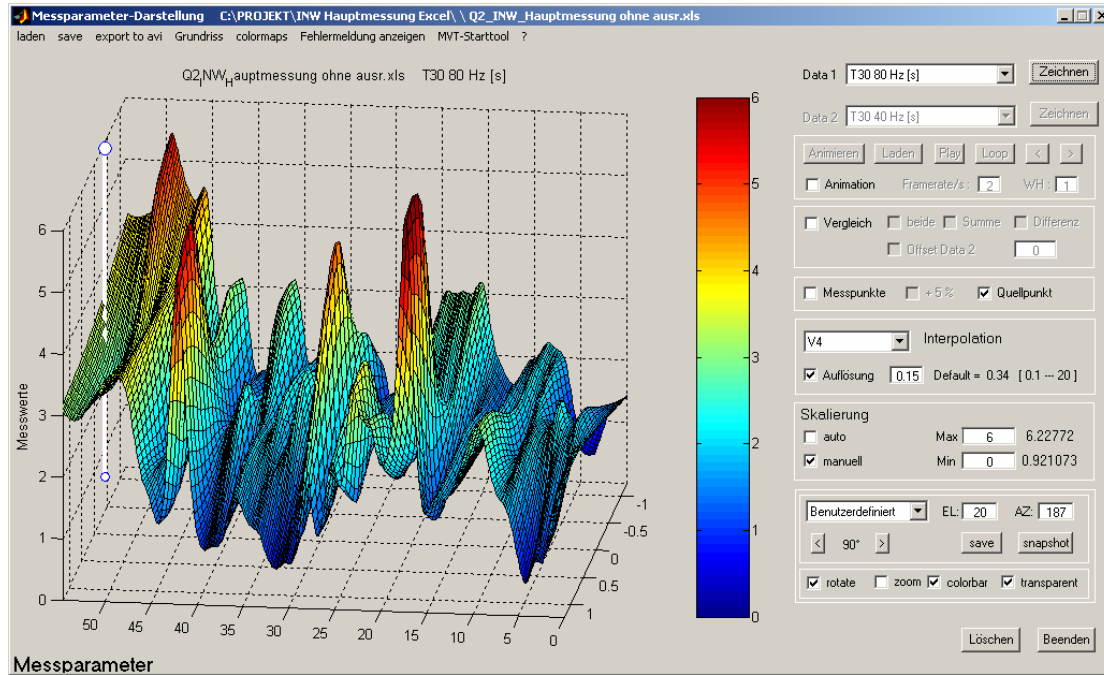


Abb. 6-28: Nachhallzeit T30 bei 80 Hz, Q2 (y-Achse 6s)

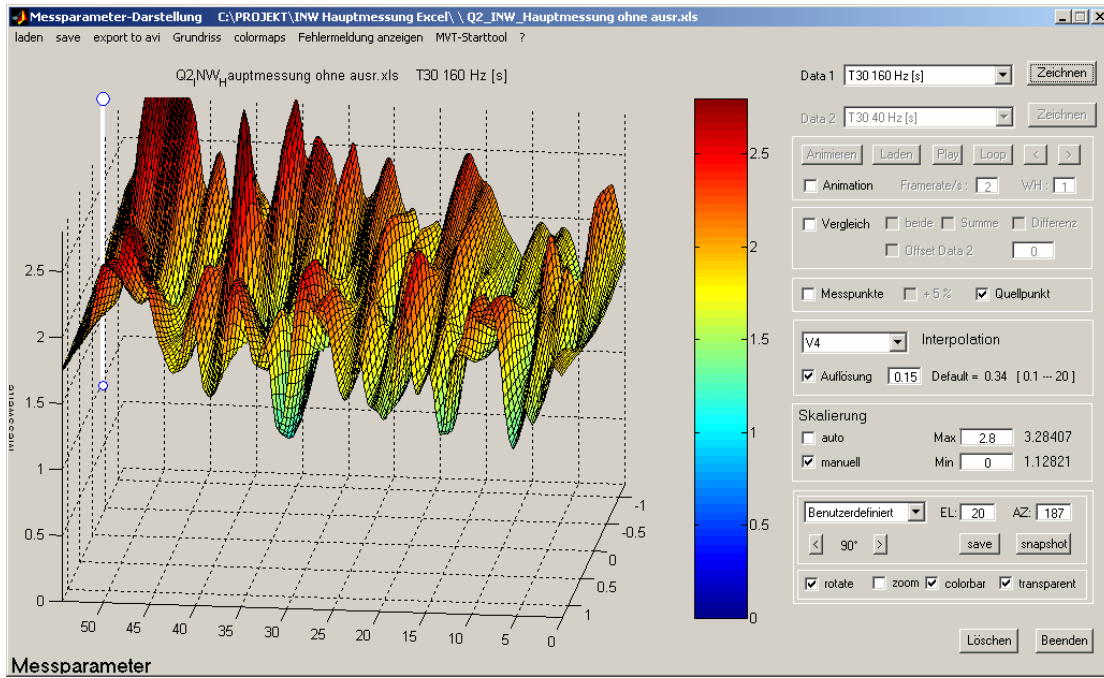


Abb. 6-29: Nachhallzeit T30 bei 160 Hz, Q2

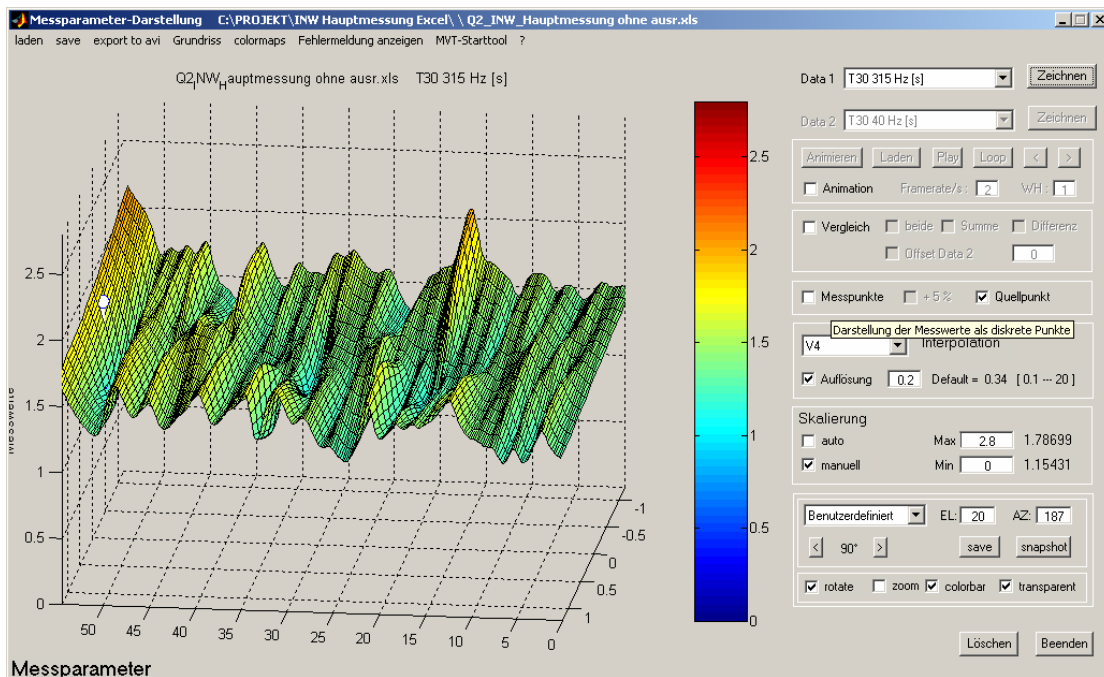


Abb. 6-30: Nachhallzeit T30 bei 315 Hz, Q2

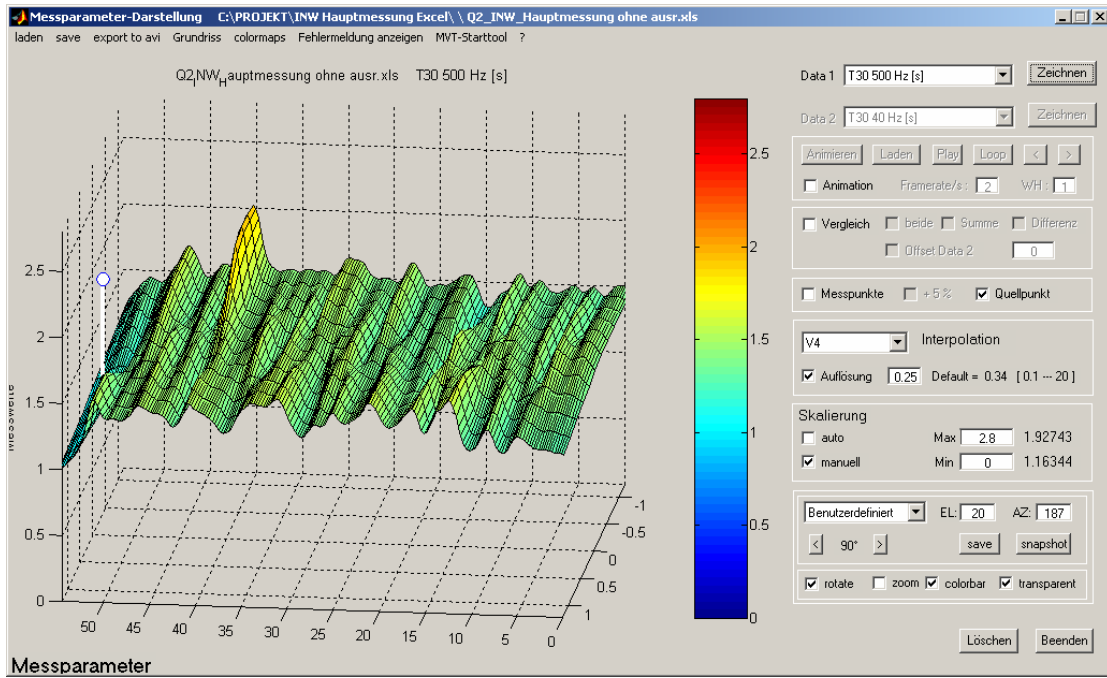


Abb. 6-31: Nachhallzeit T30 bei 500 Hz, Q2

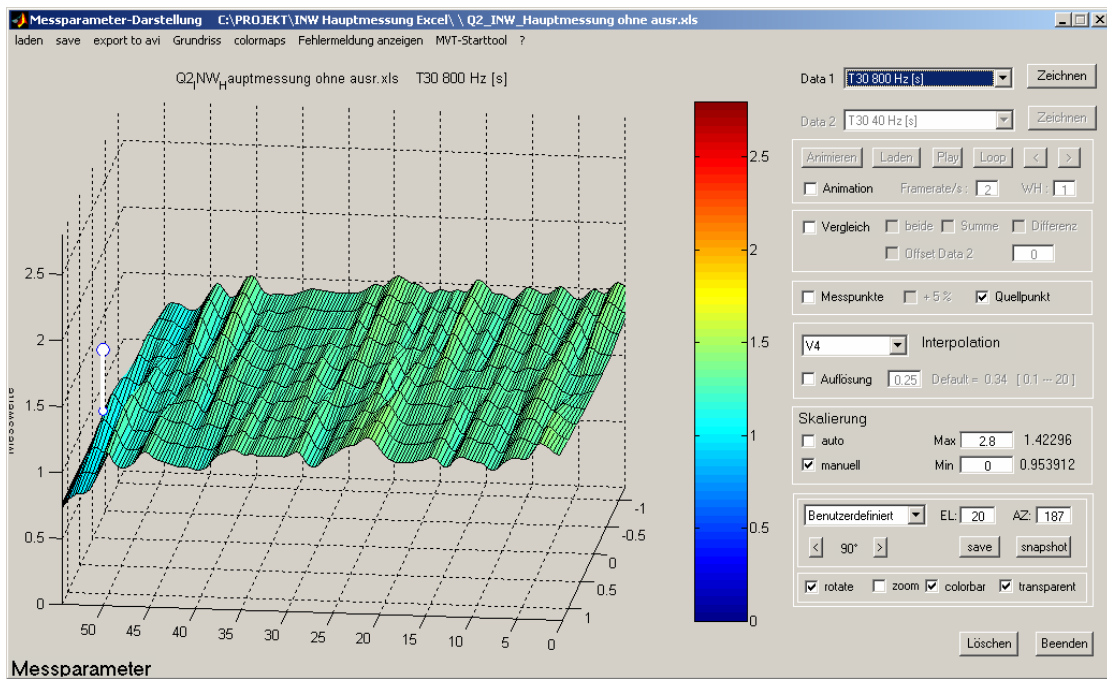


Abb. 6-32: Nachhallzeit T30 bei 800 Hz, Q2

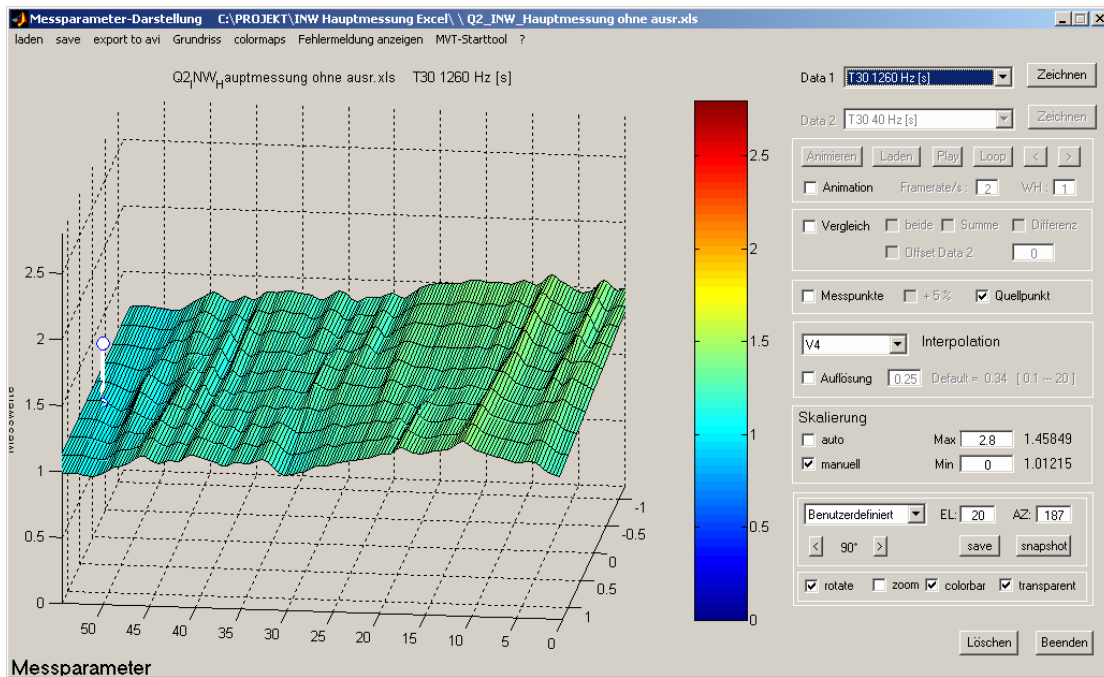


Abb. 6-33: Nachhallzeit T30 bei 1260 Hz, Q2

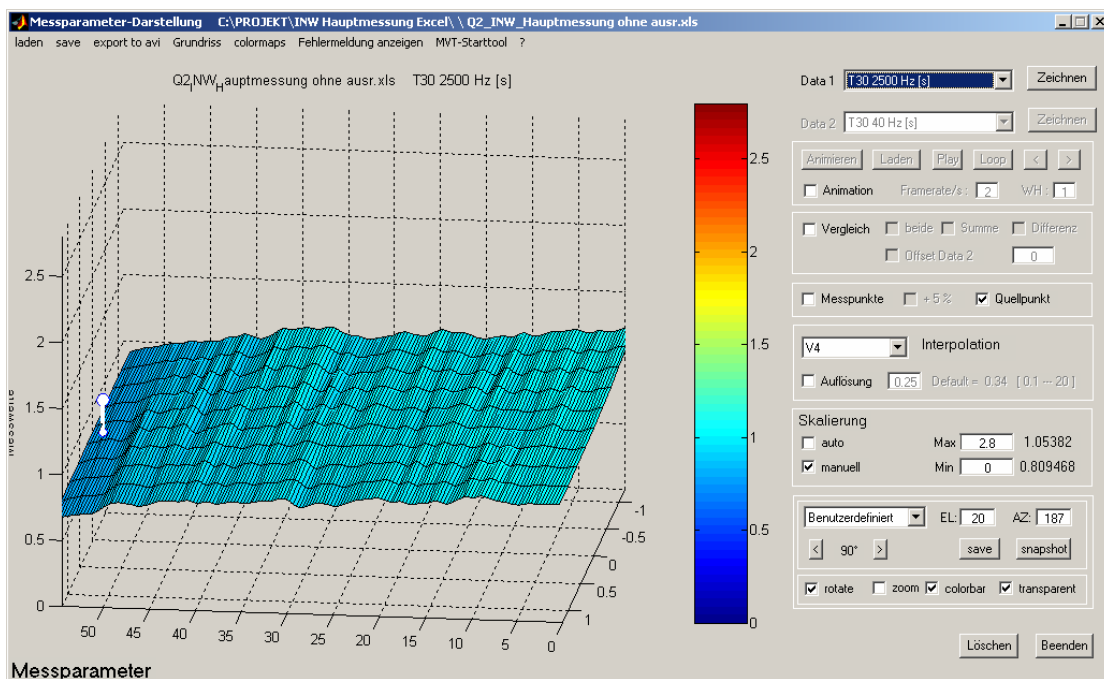


Abb. 6-34: Nachhallzeit T30 bei 2.5 kHz, Q2

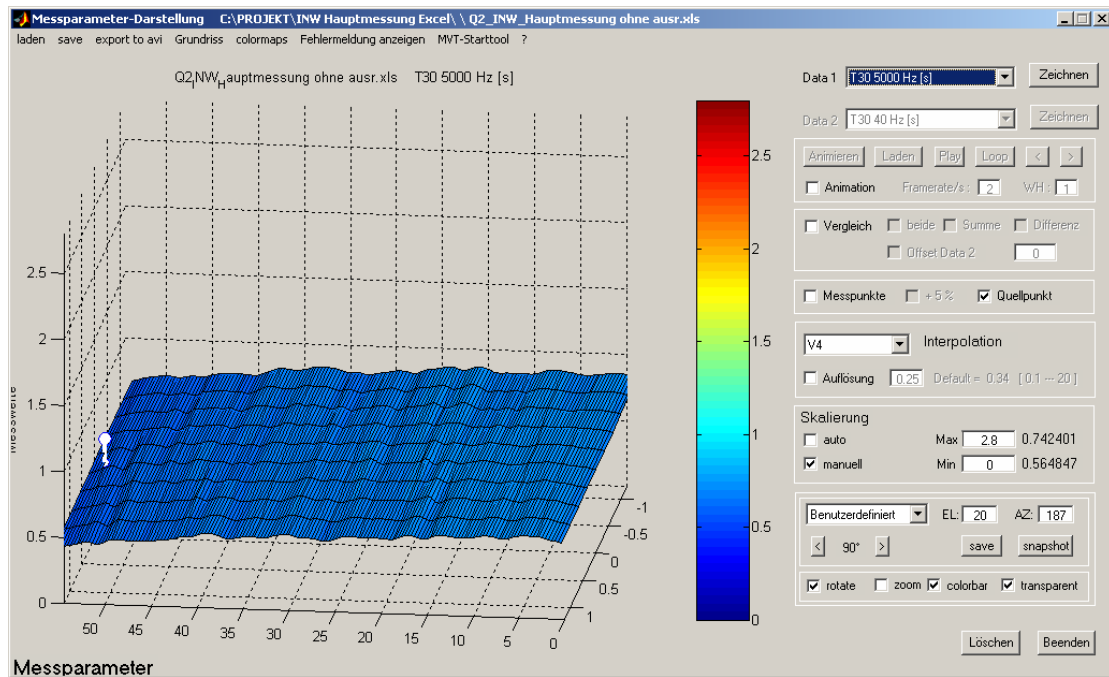


Abb. 6-35: Nachhallzeit T_{30} bei 5 kHz, Q2

Auch in der Hauptmessung zeigen sich im tieffrequenten Bereich starke Modenbildung und teilweise Störungen. Außerdem scheint die Trennwand die Reflexionen negativ zu beeinflussen, vor allem der untere Frequenzbereich zeigt Unterschiede zwischen Q1 und Q2.

Die Messung zeigt allerdings sehr deutlich den Anstieg der Nachhallzeit mit zunehmender Entfernung zur Quelle.

6.2.4 Nachhallzeitverlauf

Um den Verlauf der Nachhallzeit in Bezug auf die Entfernung genauer zu beschreiben wird ein Beispiel aus der Stephansdommessung gewählt, nämlich Q5 bei 500 Hz. Die Quelle befindet sich auf der rechten Seite (Abb. 6-36), der Anstieg erscheint linear.

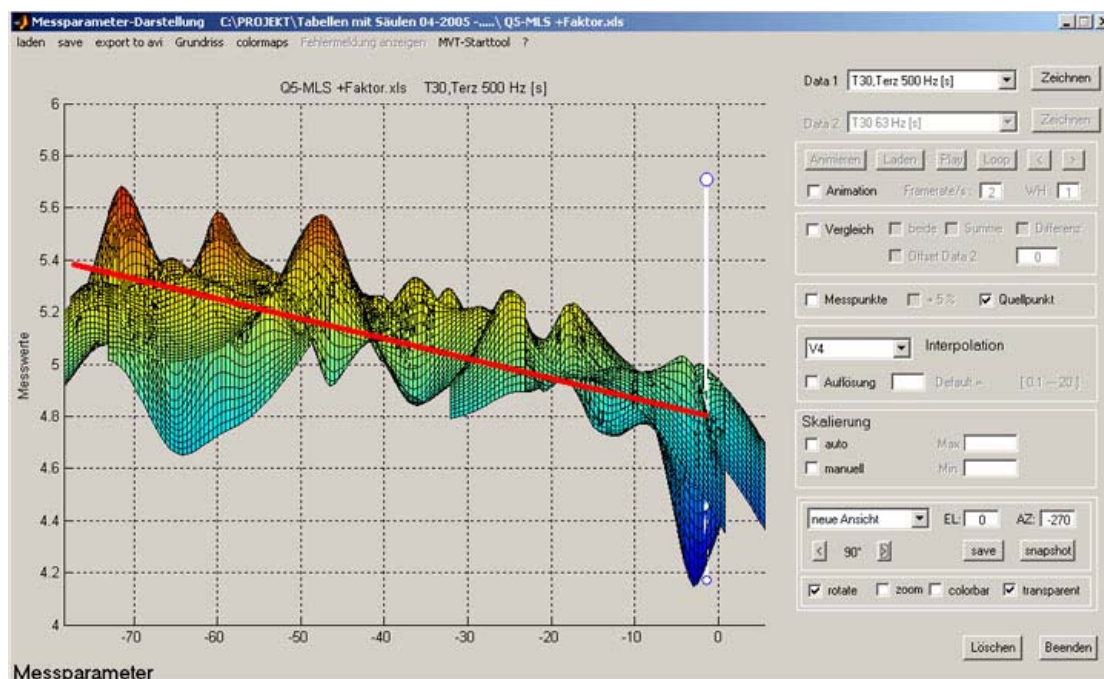


Abb. 6-36: Q5: T30 bei 500 Hz

Um zu untersuchen, ob es sich tatsächlich um lineares Verhalten handelt, werden zwei Nachhallverläufe erstellt. Für das erste Beispiel werden für die Quelle Q2T Messpunkte außerhalb des Hallradius und entlang des Hauptschiffs ausgewählt (Sekt.12-16, jeweils Mik. 2, Mik. 5 und Mik. 8), in Bezug auf die Entfernung zur Quelle aufgetragen und zum Vergleich mittels linearer Regression linearisiert (Abb. 6-37). Das zweite Beispiel beinhaltet die Sektoren 9-16, mit jeweils Mik. 1, Mik 5 und Mik 7 für den Quellpunkt Q5, Abb. 6-38 zeigt wiederum den Vergleich mit der linearisierten Version des Nachhallzeitverlaufs.

Außer bei tiefen Frequenzen ist der Anstieg der Nachhallzeit mit der Entfernung als linear anzusehen.

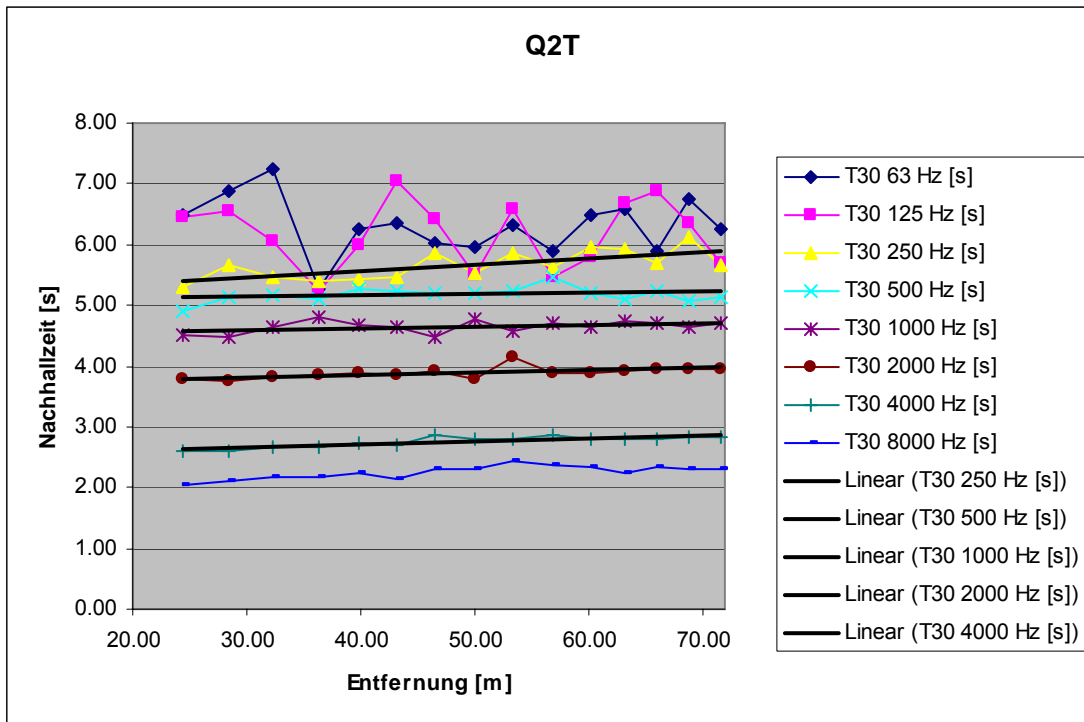


Abb. 6-37: Nachhallzeitverlauf T30 linear: Sekt.12 bis 16, Mik 2,5,8; Q2T

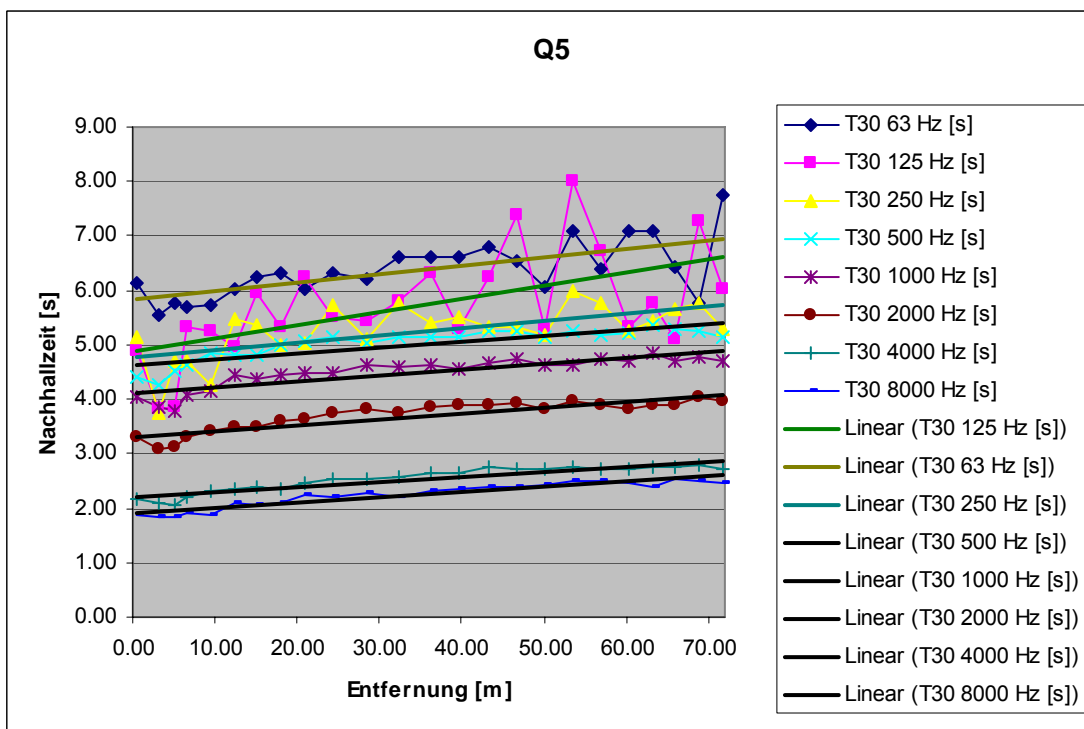


Abb. 6-38: Nachhallzeitverlauf T30 linear, Sekt. 9 bis 16, Mik.1, 5, 7; Q5

Um eine Beschreibung zu ermöglichen, um wie viel die Nachhallzeit in großer Entfernung zunimmt, wurde bei den entsprechenden Frequenzen der Verlauf von Quellnähe bis großer

Entfernung entlang des Hauptschiffs erfasst und gemittelt. Bei der Annahme von linearem Verhalten ergibt sich im Mittel der Faktor 1,36, das bedeutet dass die Nachhallzeit in maximaler Entfernung um ungefähr ein Drittel höher ist.

f [Hz]	Verhältnis der Nachhallzeiten Q2T Sek.16 bis 7 zu Q5 Sek. 9 bis 5
63	1.40
125	1,58
250	1,41
500	1,21
1000	1,23
2000	1,29
4000	1,31
8000	1,32
16000	1,48

6.2.5 Energie-Zeit-Verteilung bei Quelle Q1

Nach einer Laufzeit von ca. 160 ms sollte die Energieausbreitung bis zur Rückwand vorangeschritten sein, danach würde man eine gleichmäßige Abnahme erwarten. Abb. 6-39 zeigt die Energieausbreitung bei 70 ms und 139 ms, Abb. 6-40 jene bei 174 ms und 650 ms. Die Quelle befindet sich auf der rechten Seite und man kann schon einen unterschiedlichen Abfall zwischen Quellnähe und weiterer Entfernung ausmachen. Noch deutlicher wird dieser Sachverhalt bei Eingrenzung des betrachteten Frequenzbands auf das Oktavband um 2 kHz nach 163 ms und 650 ms (Abb. 6-41). Der weitere Verlauf bis zum Grundrauschen erfolgt schließlich wieder gleichmäßig, Abb. 6-42 zeigt die breitbandige Darstellung.

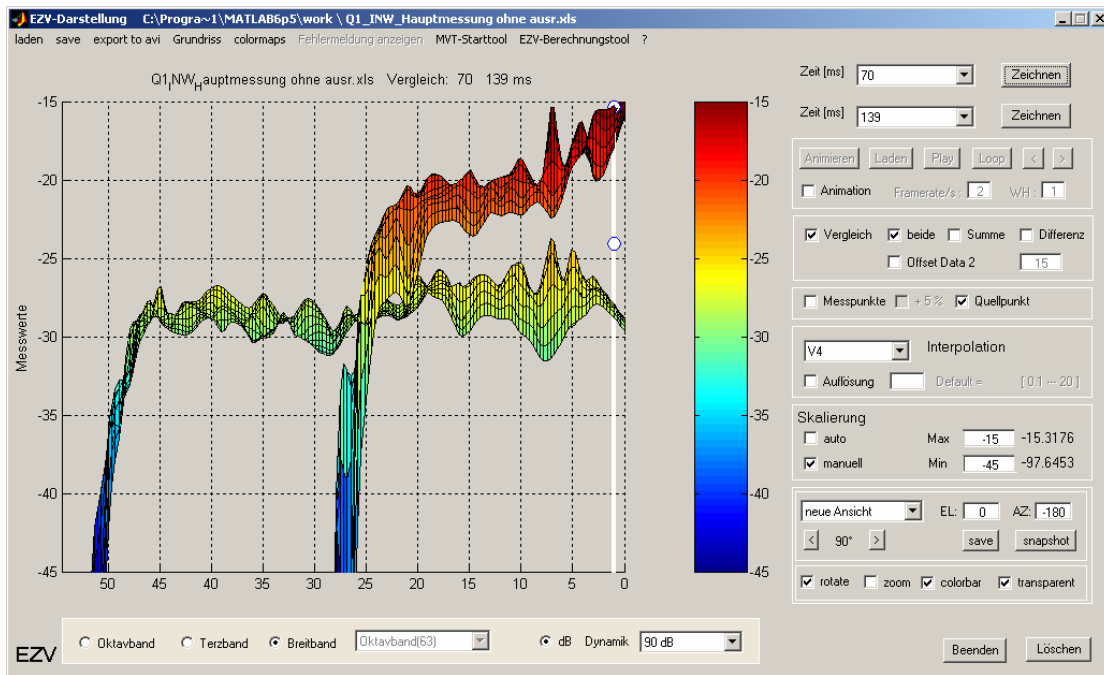


Abb. 6-39: EZV bei 70 ms und 139 ms, Breitband, Q1

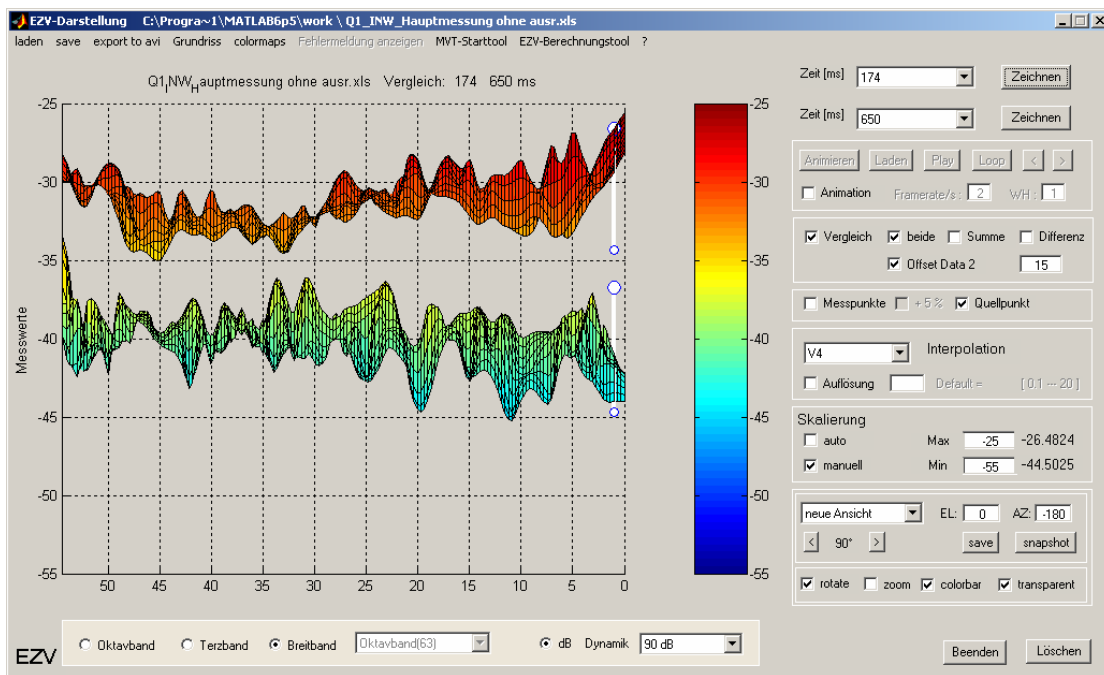


Abb. 6-40: EZV bei 174 ms und 650 ms, Breitband, Q1

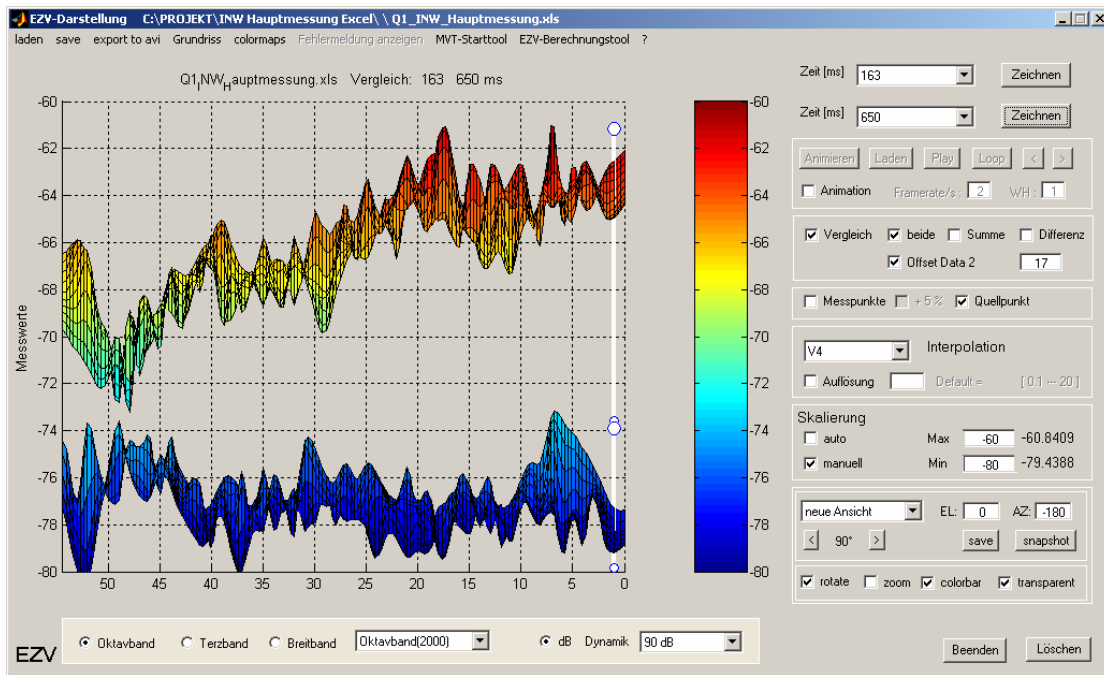


Abb. 6-41: EZV bei 163 ms und 650 ms, Oktavband 2 kHz, Q1

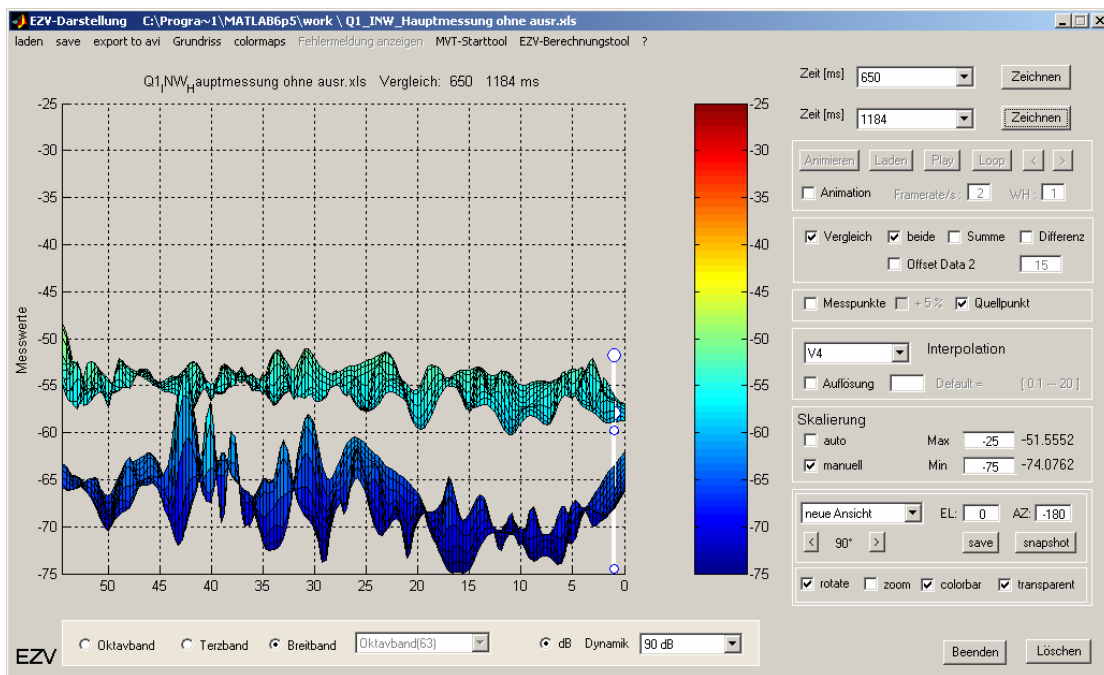


Abb. 6-42: EZV bei 650 ms und 1184 ms, Breitband, Q1

6.2.6 Energie-Zeit-Verteilung bei Quelle Q2

Auch diese Messung wurde mit der zweiten Quellposition wiederholt. Die Quelle befindet sich jetzt auf der linken Seite im Diagramm.

Nach der Ausbreitung bis zur Rückwand (Abb. 6-43 mit 70 ms und 139 ms) scheint der Energieabfall fast gleichförmig, der raschere Rückgang in Quellennähe ist nur schlecht sichtbar (Abb. 6-44 und Abb. 6-45). Anscheinend werden durch die unzureichende Trennwand die tieffrequenten Anteile nicht entsprechend reflektiert, Energie geht verloren. Um diese Tatsache genauer zu untersuchen werden die Oktavbänder hier einzeln betrachtet. Im Oktavband um 250 Hz (Abb. 6-46) erscheint nun nach 163 ms die Energie der Quelle geringer als an der reflektierenden Wand. Ich führe das direkt auf die oben nicht schließende Trennwand zurück. Dieses Ergebnis beeinflusst natürlich auch die breitbandige Darstellung enorm. In Abb. 6-47 im Oktavband um 1 kHz und in Abb. 6-48 um 2 kHz, jeweils nach 163 ms und 650 ms, wird der erwartete Effekt wieder deutlich sichtbar.

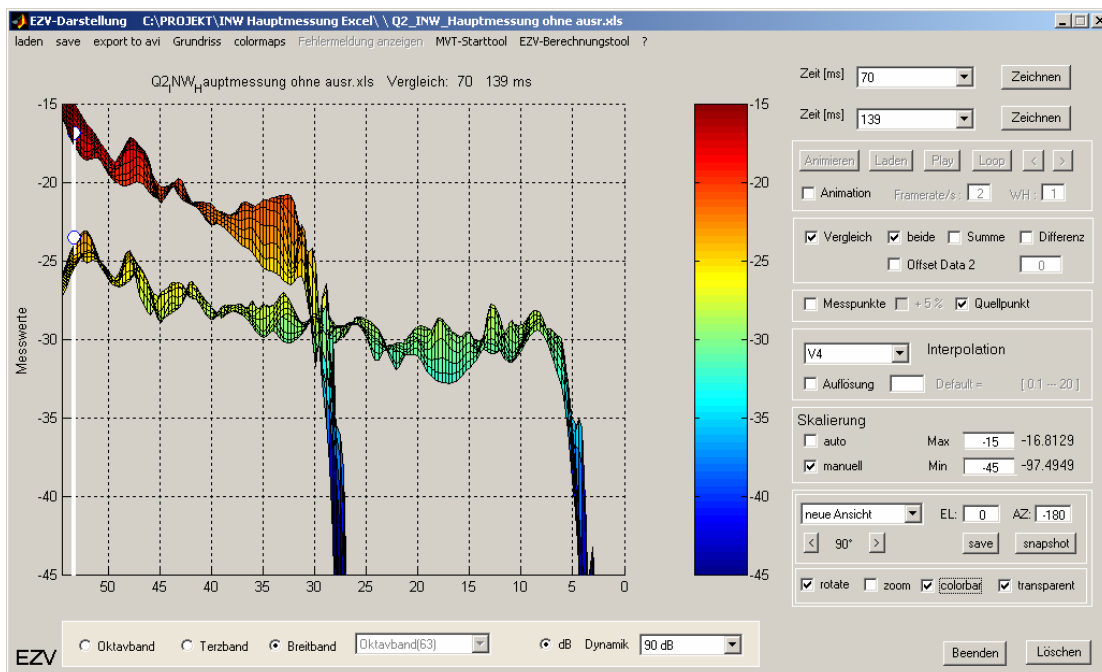


Abb. 6-43: EZV bei 70 ms und 139 ms, Breitband, Q2

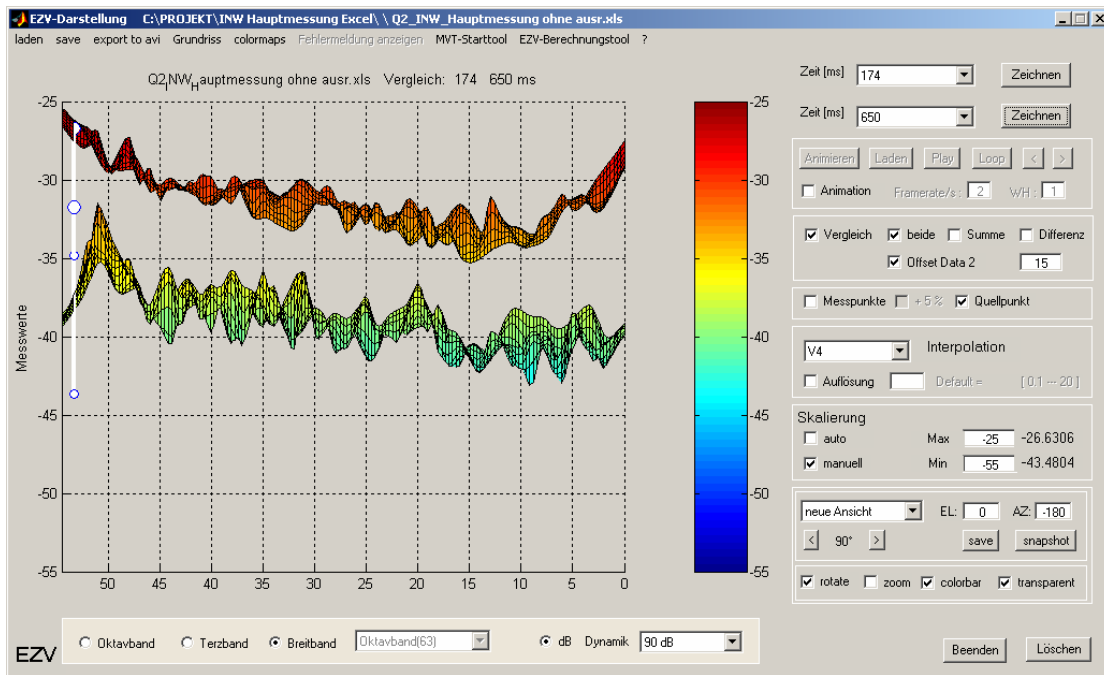


Abb. 6-44: EZV bei 174 ms und 650 ms, Breitband, Q2

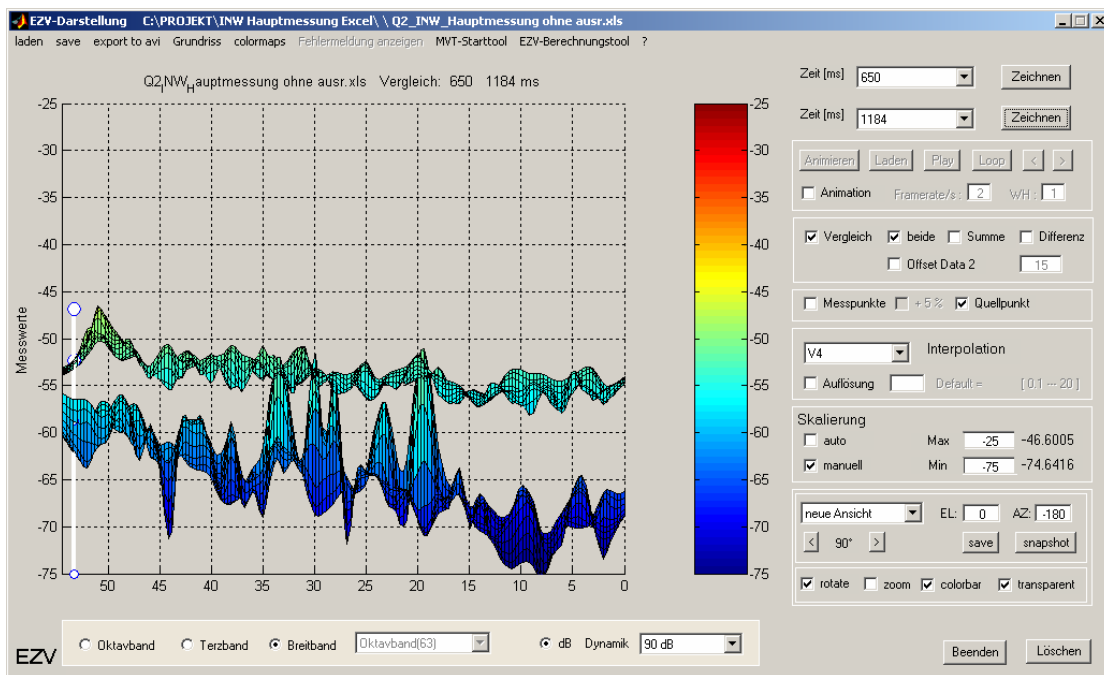


Abb. 6-45: EZV bei 650 ms und 1184 ms, Breitband, Q2

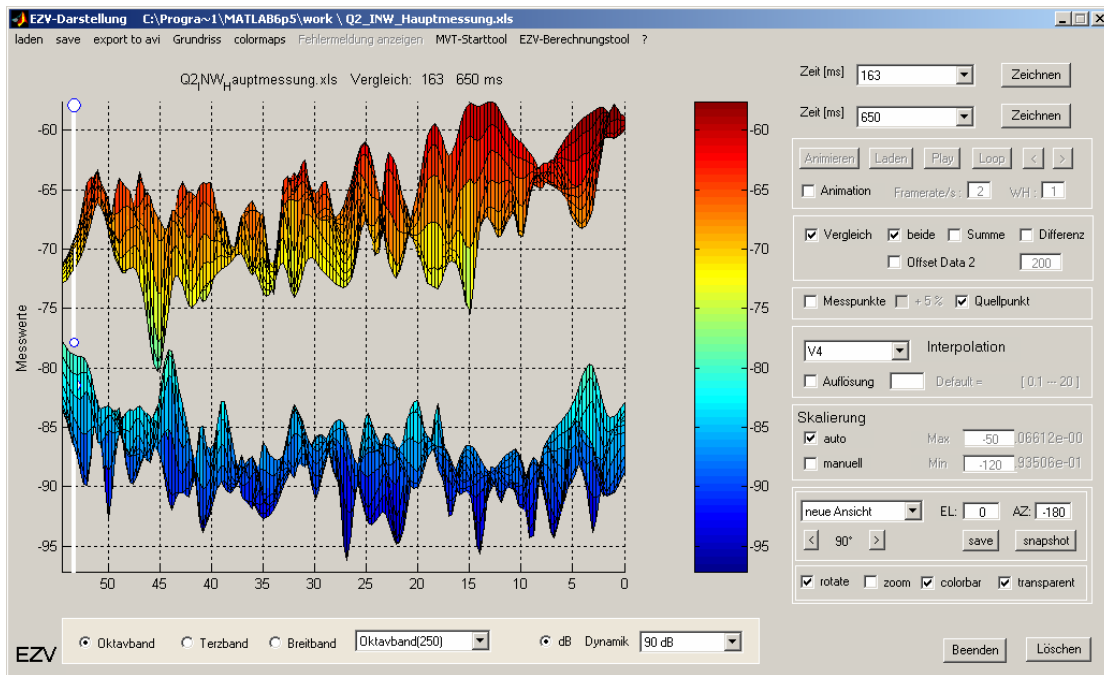


Abb. 6-46: EZV bei 163 ms und 650 ms, Oktavband um 250 Hz, Q2

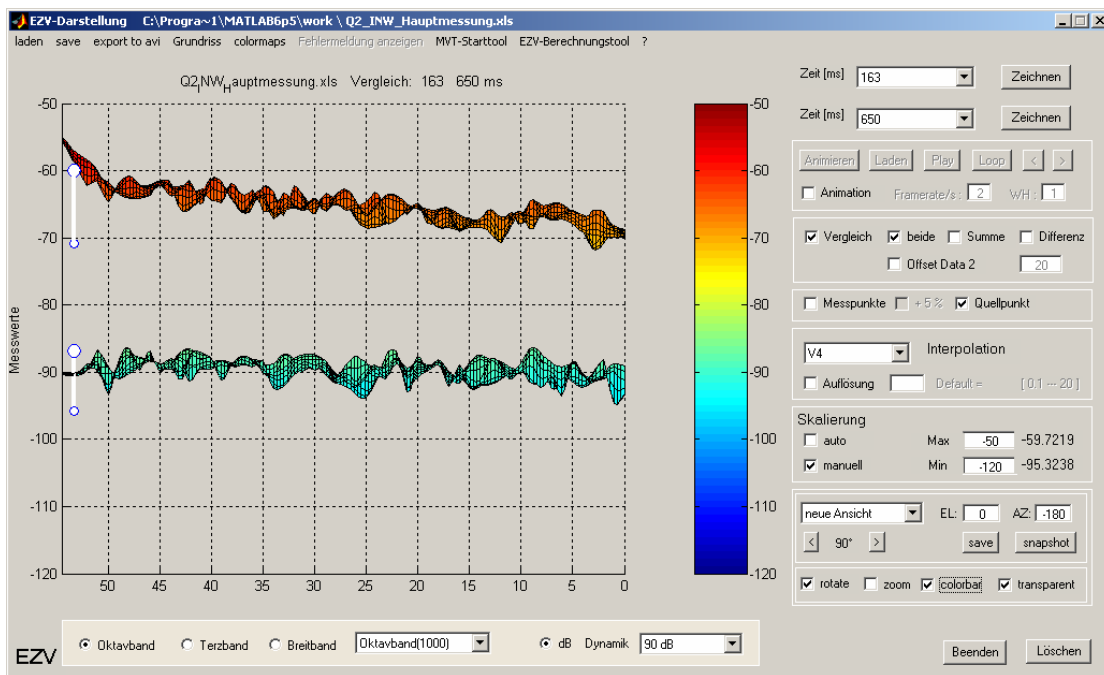


Abb. 6-47: EZV bei 163 ms und 650 ms, Oktavband um 1 kHz, Q2

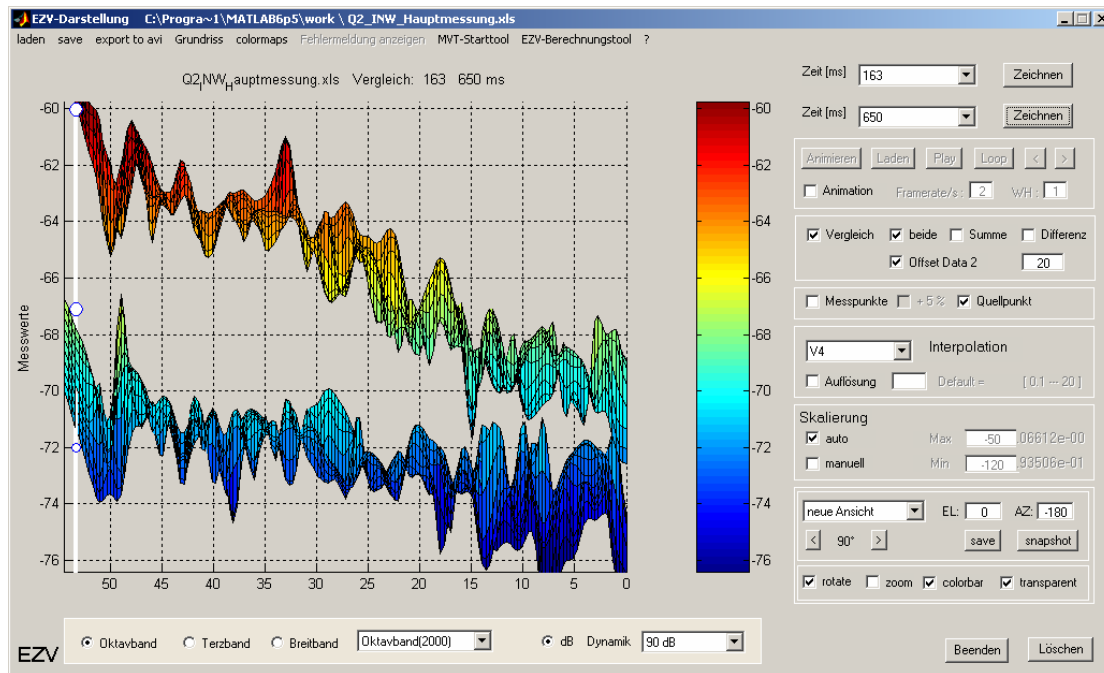


Abb. 6-48: EZV bei 163 ms und 650 ms, Oktavband um 2 kHz, Q2

Die Darstellung der Energieausbreitung zeigt für beide Fälle, von der Beeinflussung durch Raummoden und eventuellen Störungen im tiefen Frequenzband abgesehen, eine deutlich schnellere Abnahme der Energie in Quellennähe als in größerer Entfernung bei zunehmender Diffusität des Schallfeldes.

6.3 Erkenntnisse über den Nachhallzeitverlauf

Nach der energetischen Anregung durch die Quelle sind zwei unterschiedliche Arten von Verlusten für das Abklingen der Energie verantwortlich:

1. Abklingen durch Absorption (mit AA bezeichnet):

Natürliche Reflexionen und die damit verbundenen Dämpfungen entnehmen dem Schallfeld Energie.

2. Energieverlust durch Energieausgleich (mit ZEA bzw. AEA gekennzeichnet):

Bei Anregung durch die Quelle entsteht lokal ein Energiemaximum. Dieser unausgeglichene Zustand besitzt niedrige Entropie und erstrebt daher einen Energieausgleich. Die Anregungsenergie breitet sich also mit fortschreitender Zeit aus und ermöglicht damit ein Energieausgleich im gesamten Raum.

In langgestreckten Räumen passiert nun folgendes:

Im vorderen Bereich (Abb. 6-49) nimmt die Energie nicht nur durch Absorption ab (AA), auch der abnehmende Energieausgleich wirkt zusätzlich (AEA), bis der Ausgleich abgeschlossen ist und nur mehr die natürliche Absorption wirksam bleibt.

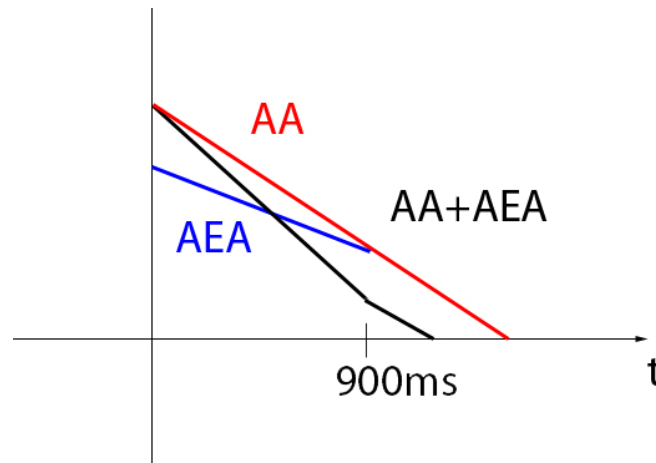


Abb. 6-49: Energieverluste nach Erregung, geringe Entfernung zur Quelle

Im quellfernen Bereich (Abb. 6-50) wirkt der zunehmende Energieausgleich (ZEA) dem Abklingvorgang durch Absorption (AA) zunächst entgegen, da die Energie praktisch vom quellnahen Bereich „nachgeschoben“ wird, damit ein Energieausgleich stattfinden kann. Die Energieabnahme fällt zunächst also geringer aus, als sie durch die Abnahme durch Absorption eigentlich schon sein müsste, erst nach erfolgtem Energieausgleich entspricht die Abnahme der Absorption.

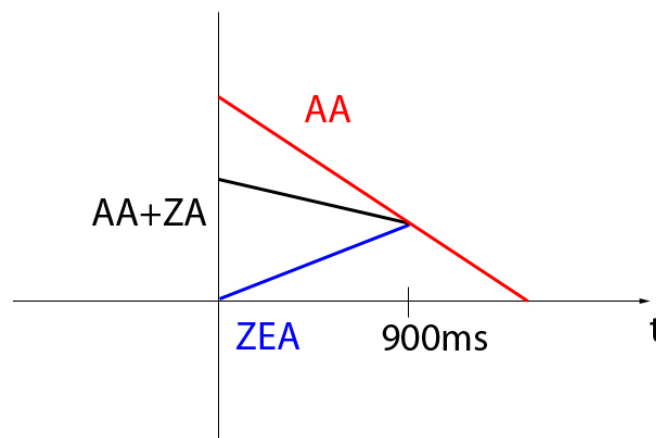


Abb. 6-50: Energieverluste nach Erregung, große Entfernung zur Quelle

Für die Berechnung der Nachhallzeit bedeutet dies nun, dass in Quellennähe ein sehr starker Energieabfall detektiert wird (AA+AEA) und somit beispielsweise für eine T30 Messung der Abfall um 30 dB schnell erreicht wird. Die ermittelte Nachhallzeit ist zu kurz. In großer Entfernung zur Quelle hingegen nimmt die Energie zunächst sehr langsam ab, die benötigte Zeit bis zum 30 dB Abfall wird länger und somit auch die gemessene Nachhallzeit.

6.4 Messungen im Kundtschen Rohr

Um der Wirkung von Raummodenbildung auf die Nachhallzeitmessung auf den Grund zu gehen wird das Kundtsche Rohr als gut bekannter Messraum mit bekannten Raummoden gewählt.

Es soll die Hypothese (vgl. Abschnitt 4.2.4, S.55) überprüft werden, welche Auswirkungen es für die Nachhallzeitmessung hat, wenn stark ausgeprägte Raummoden vorhanden sind. Die Idee war hierbei, dass an Punkten maximaler Interferenz der Energieabfall viel schneller erfolgt, als an Stellen der Minima, wo die Energie während des Ausklingvorgangs sogar noch kurz zunimmt, um danach langsam abzunehmen. Die Nachhallzeitmessung beruht ja auf der Berechnung des Energieabfalls um einen bestimmten Betrag (bei T30 um 30 dB), somit sollte ein direkter Zusammenhang und davon ausgehender Fehler feststellbar sein.

6.4.1 Nachhallzeit

Die Darstellung der Nachhallzeit in den Oktavbändern um 160 Hz, 250 Hz, 315 Hz, 400 Hz und 500 Hz (Abb. 6-51 bis Abb. 6-55) zeigt starke Welligkeit. Es könnte sich demnach tatsächlich um Raummoden bei der Nachhallzeitmessung handeln.

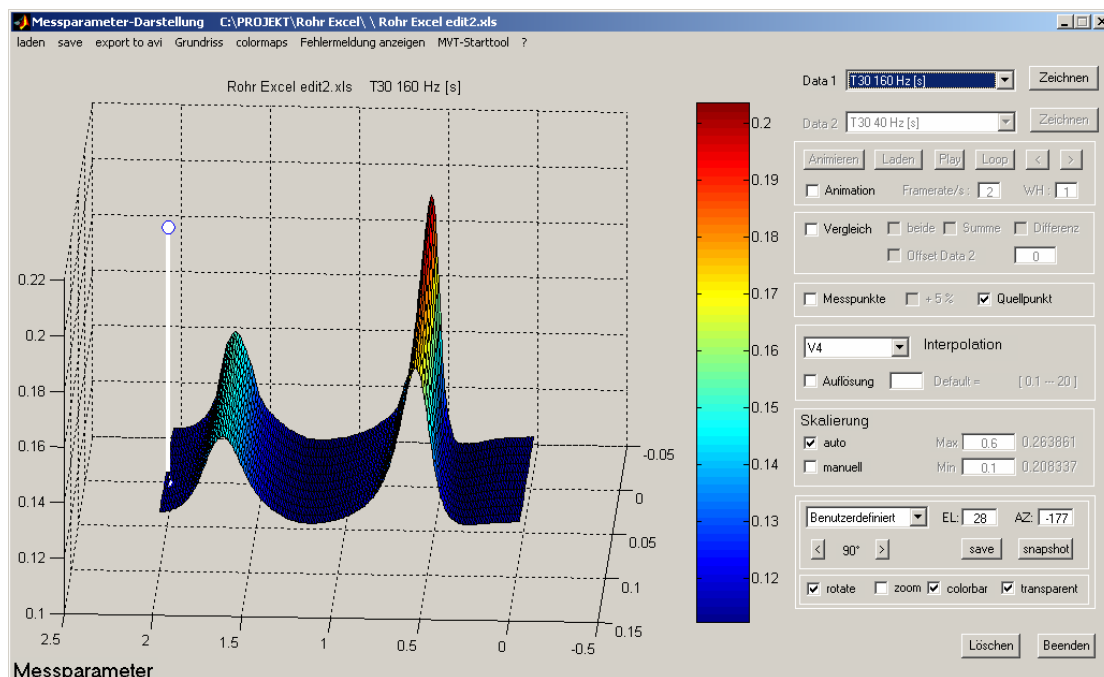


Abb. 6-51: Nachhallzeit T30 bei 160 Hz

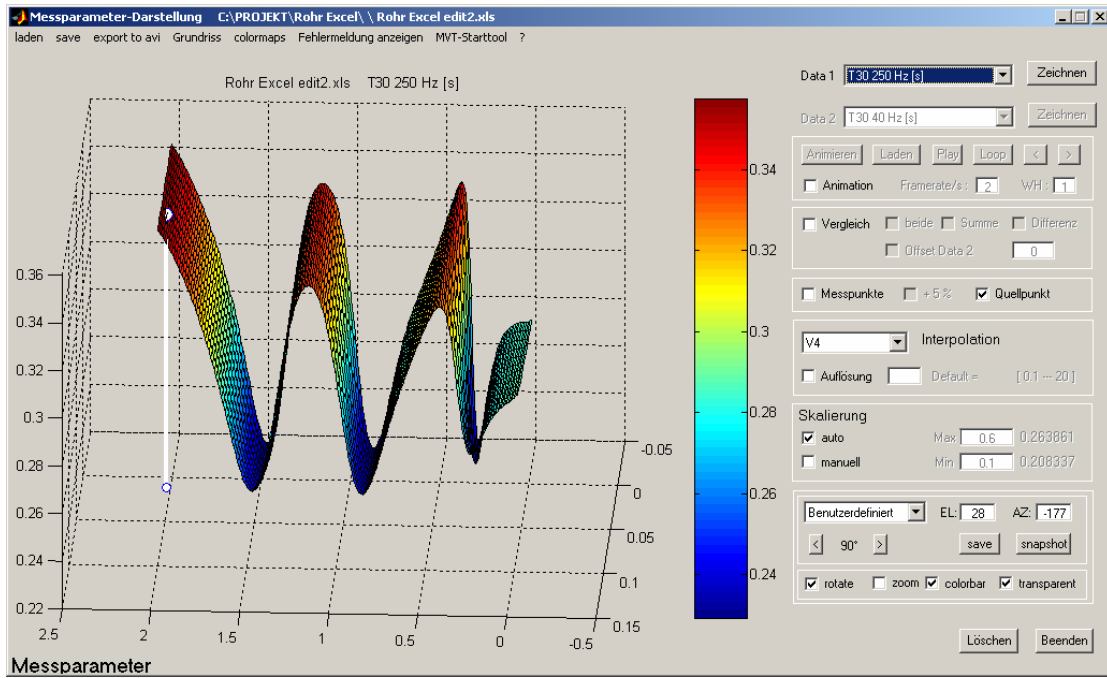


Abb. 6-52: Nachhallzeit T30 bei 250 Hz

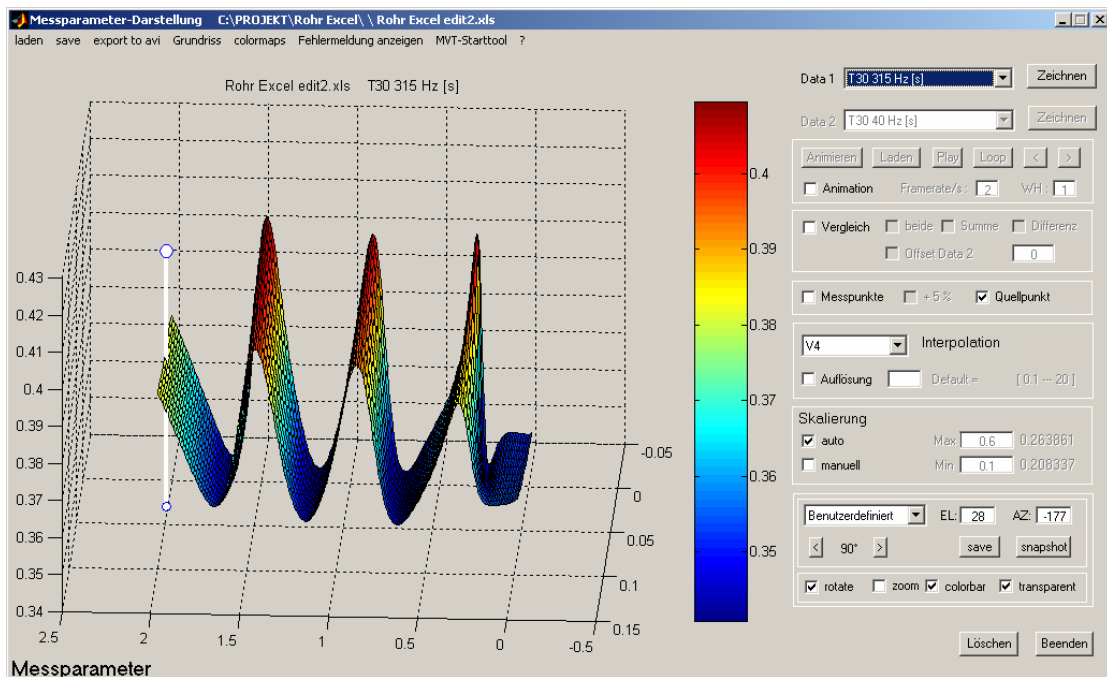


Abb. 6-53: Nachhallzeit T30 bei 315 Hz

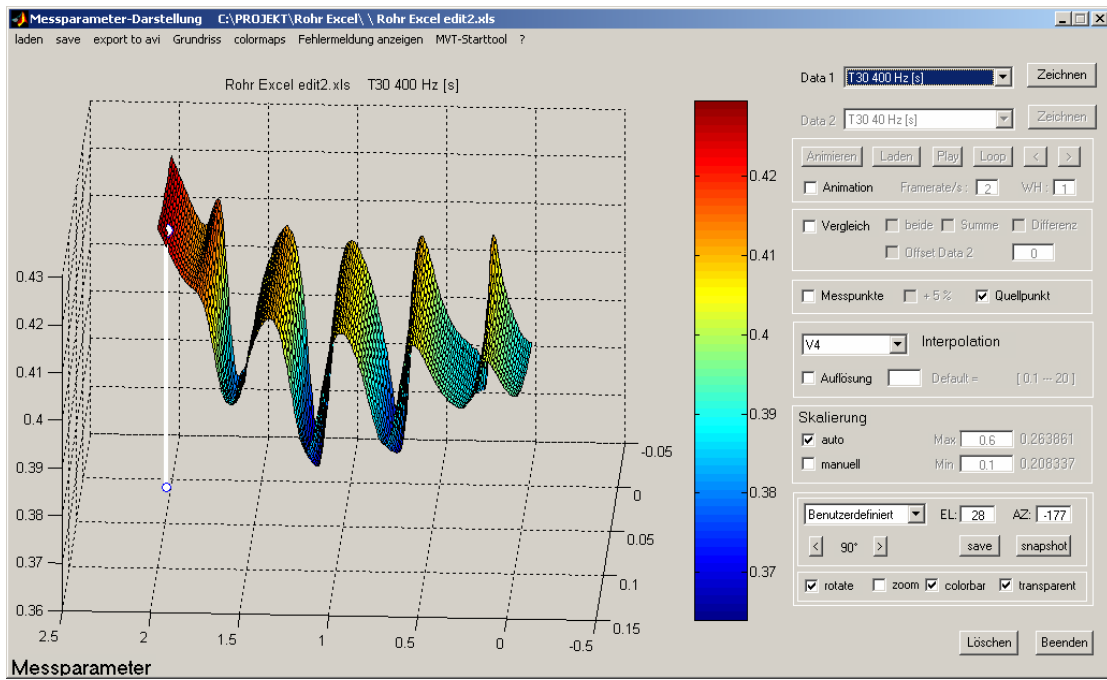


Abb. 6-54: Nachhallzeit T30 bei 400 Hz

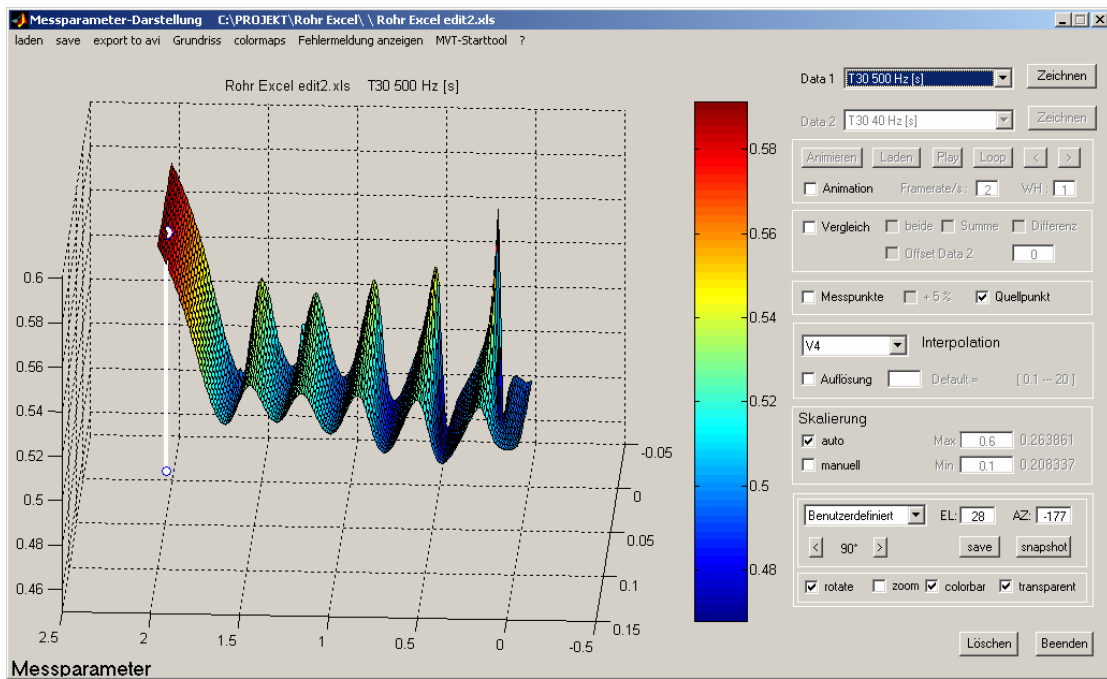


Abb. 6-55: Nachhallzeit T30 bei 500 Hz

6.4.2 Vergleich Nachhallzeit und Modenbildung

Um den Zusammenhang mit der bereits bekannten Modenbildung im Rohr herzustellen, wird nun die Darstellung des Nachhallzeitverlaufs der Vorgabe durch das Simulations-Tool des Kundtschen Rohres angepasst.

Die Quelle befindet sich nun bei 0 m, der Abschluss bei 2.4 m, die Darstellung erfolgt wegen besserer Vergleichbarkeit nun im Seitenriss.

Bei 160 Hz entstehen Spitzen der Nachhallzeit bei ca. 70 cm und 180 cm (Abb. 6-56). Das Software-Tool wird nun für die Darstellung der Stehwellenbildung bei 160 Hz im Rohr eingestellt (Abb. 6-57). In Abb. 6-58 wird schließlich der Beweis für den direkten Zusammenhang durch grafische Überlagerung erbracht.

Ebenso wird bei den übrigen Frequenzen verfahren, wie aus den Abb. 6-59 bis Abb. 6-73 ersichtlich wird.

Der Vergleich der Nachhallzeit und des Amplitudenganges bei bestimmten Frequenzen zeigt einen starken Zusammenhang. Im Idealfall entspricht die Darstellung nun der zu Beginn aufgestellten Hypothese; Genau an den Stellen der Druckminima erreicht die Nachhallzeit ein Maximum und umgekehrt.

Die Hypothese (vgl. Abschnitt 4.2.4, S.55) scheint zu stimmen.

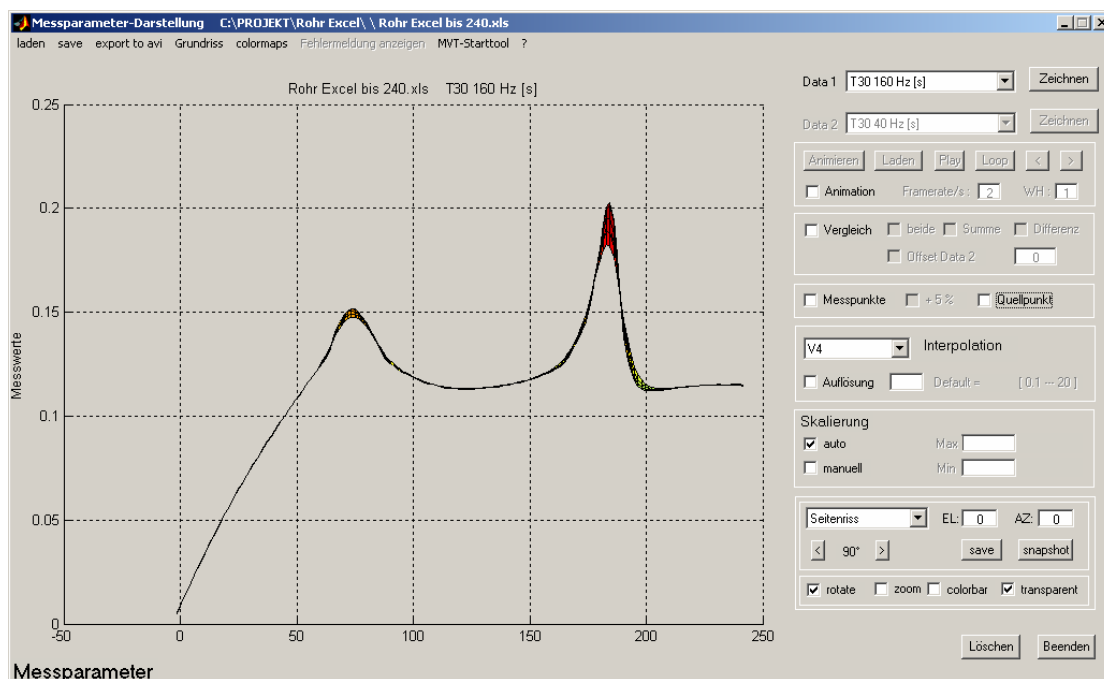


Abb. 6-56: Nachhallzeit T30 bei 160 Hz, Seitenriss

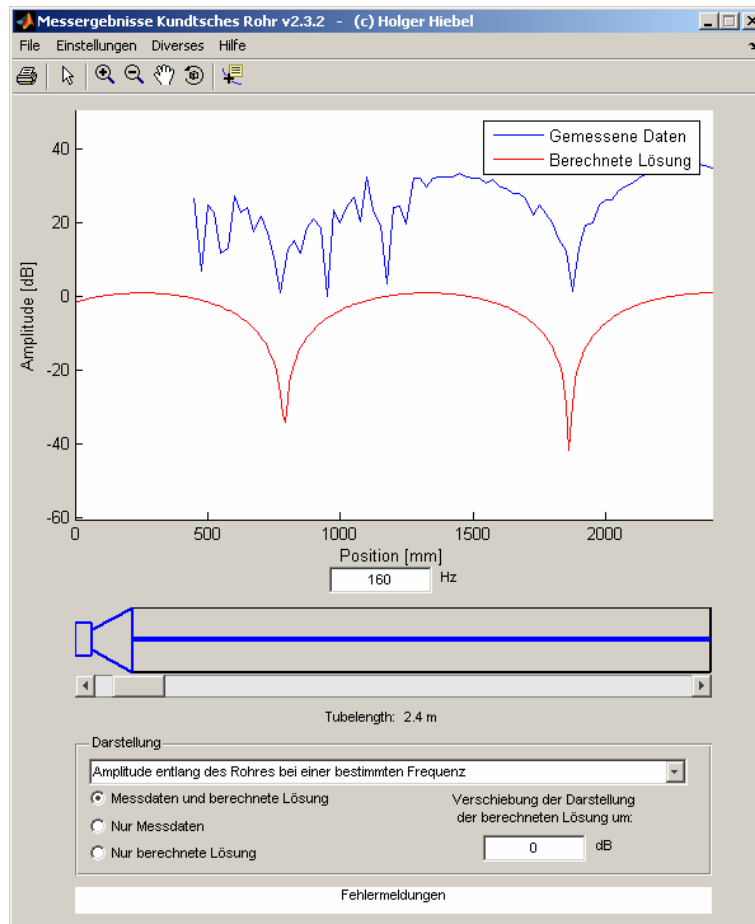


Abb. 6-57: Amplitudengang im Kundtschen Rohr bei 160 Hz

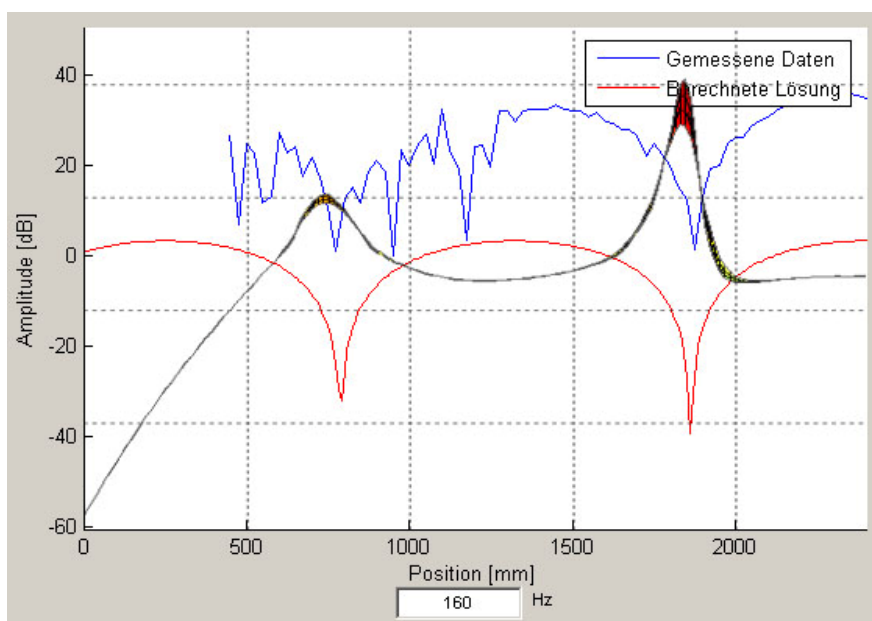


Abb. 6-58: Grafische Überlagerung bei 160 Hz

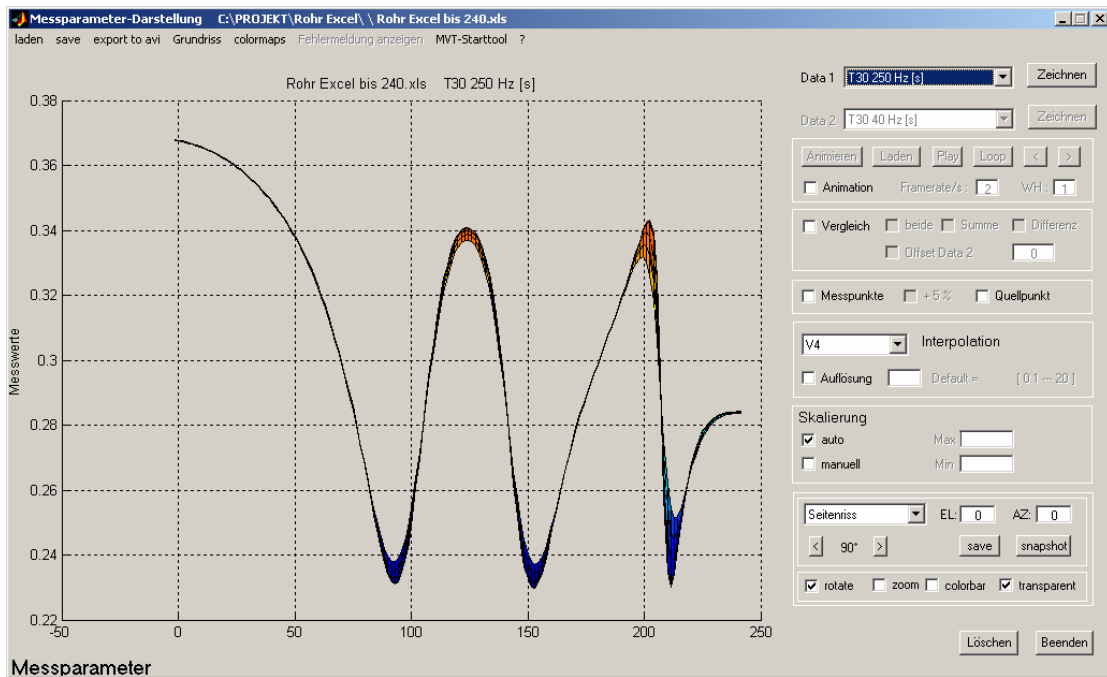


Abb. 6-59: Nachhallzeit T30 bei 250 Hz, Seitenriss

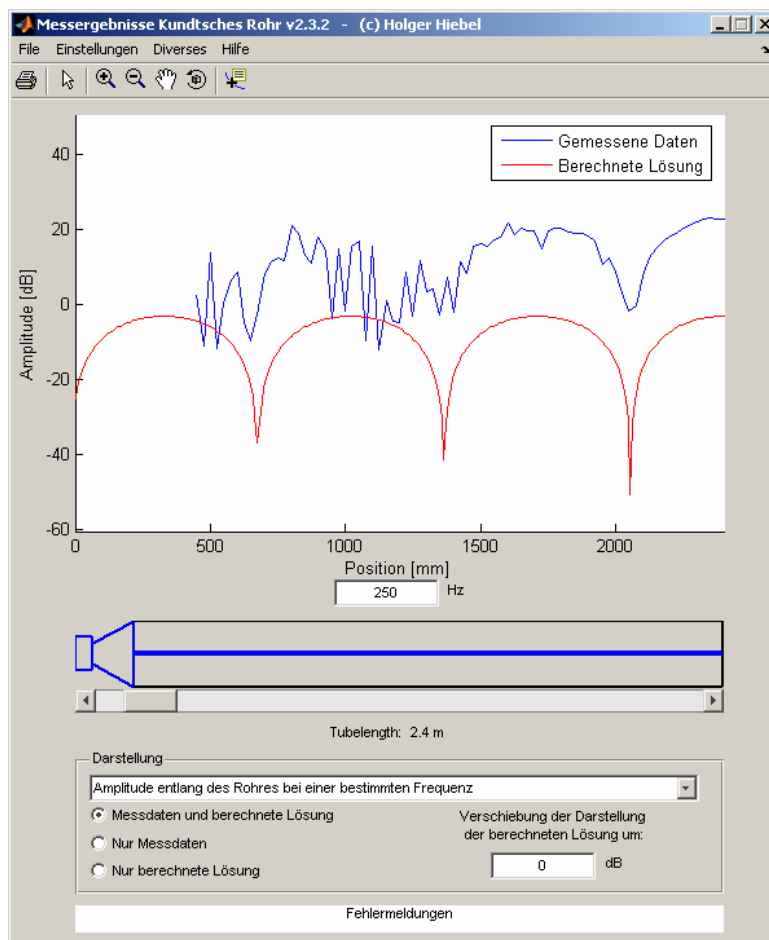


Abb. 6-60: Amplitudengang im Kundtschen Rohr bei 250 Hz

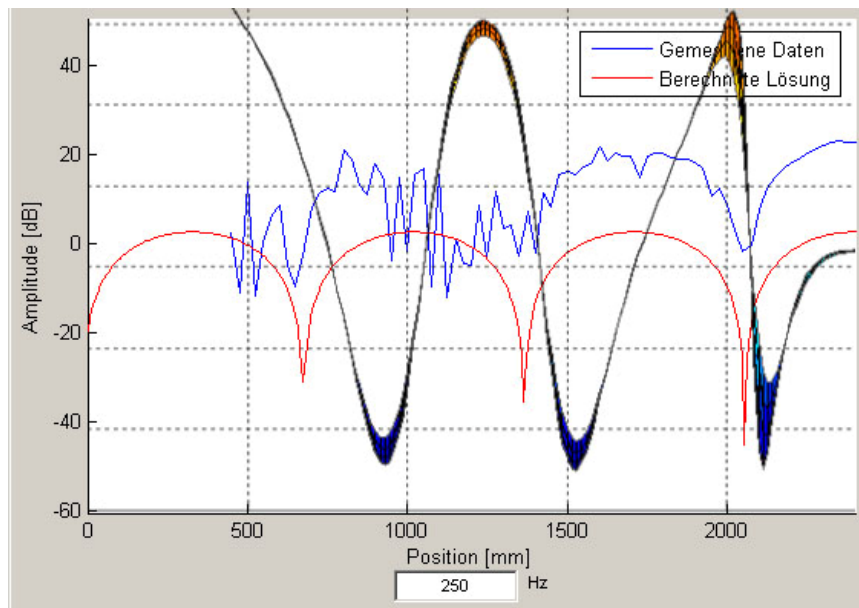


Abb. 6-61: Grafische Überlagerung bei 250 Hz

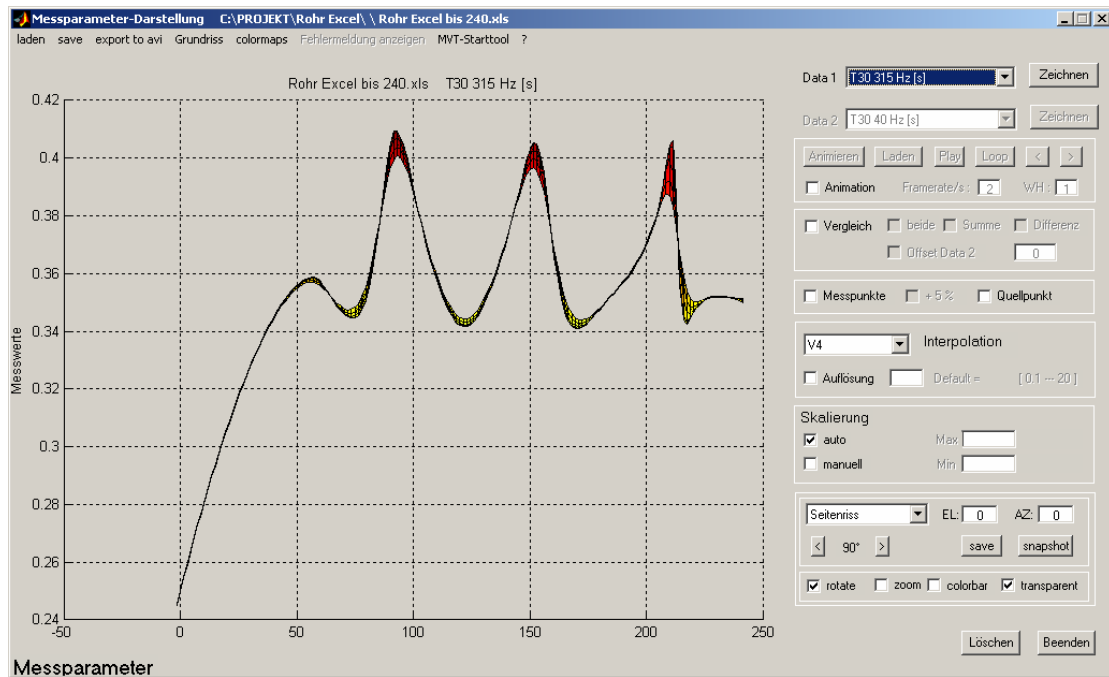


Abb. 6-62: Nachhallzeit T30 bei 315 Hz, Seitenriss

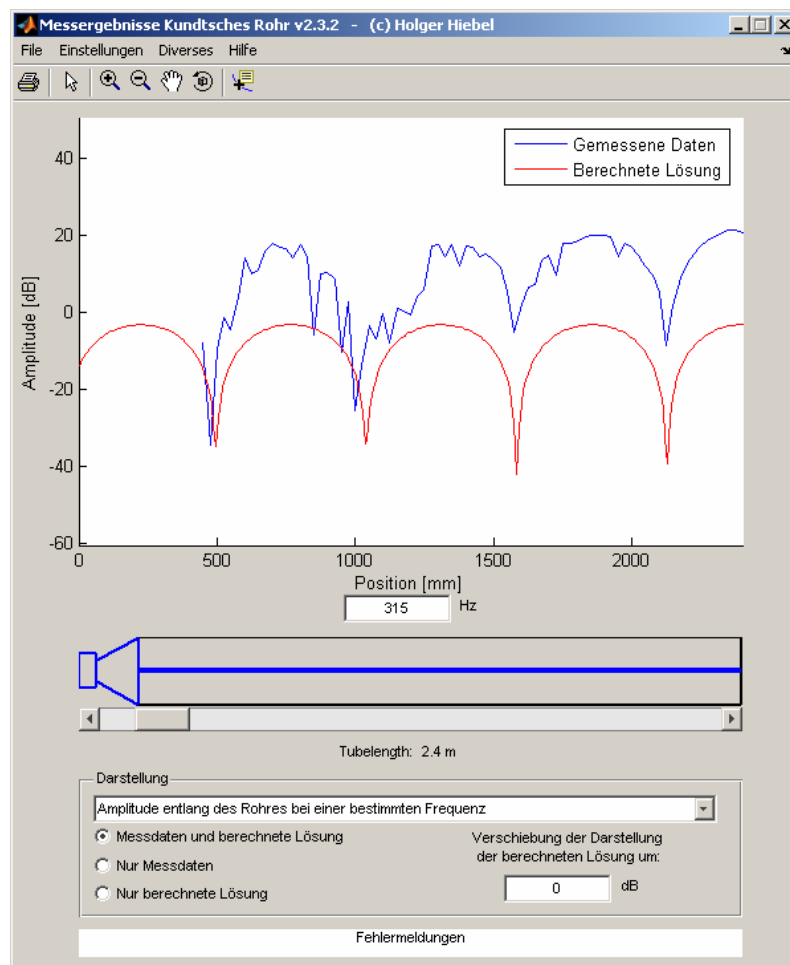


Abb. 6-63: Amplitudengang im Kundtschen Rohr bei 315 Hz

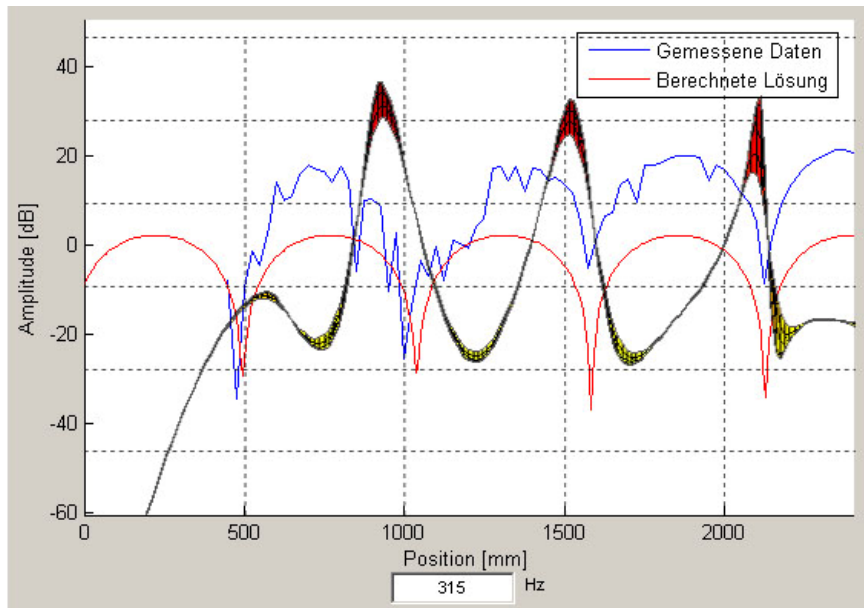


Abb. 6-64: Grafische Überlagerung bei 315 Hz

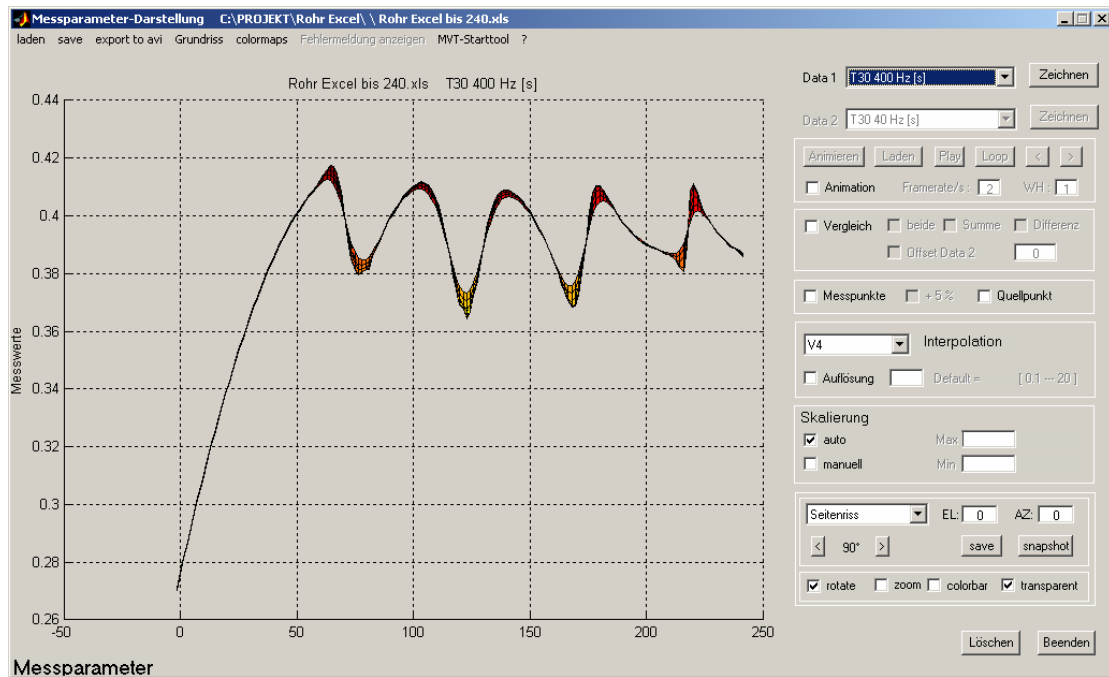


Abb. 6-65: Nachhallzeit T30 bei 400 Hz, Seitenriss

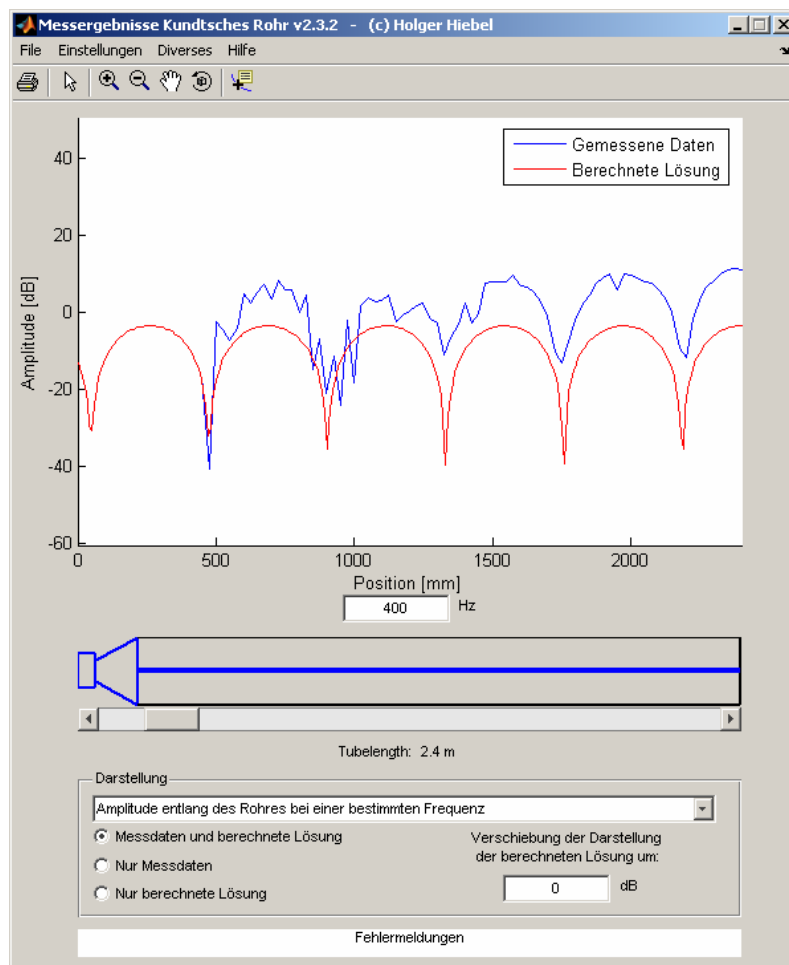


Abb. 6-66: Amplitudengang im Kundtschen Rohr bei 400 Hz

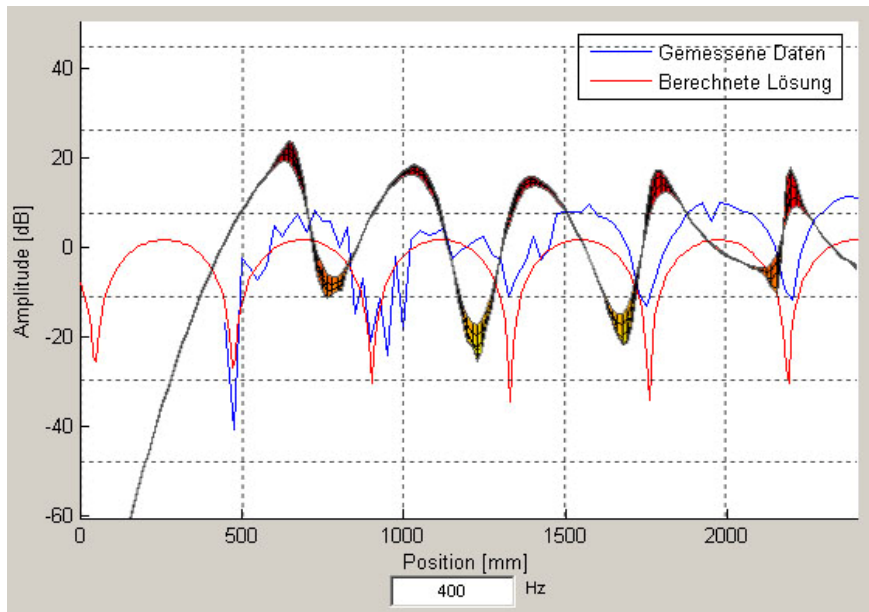


Abb. 6-67: Grafische Überlagerung bei 400 Hz

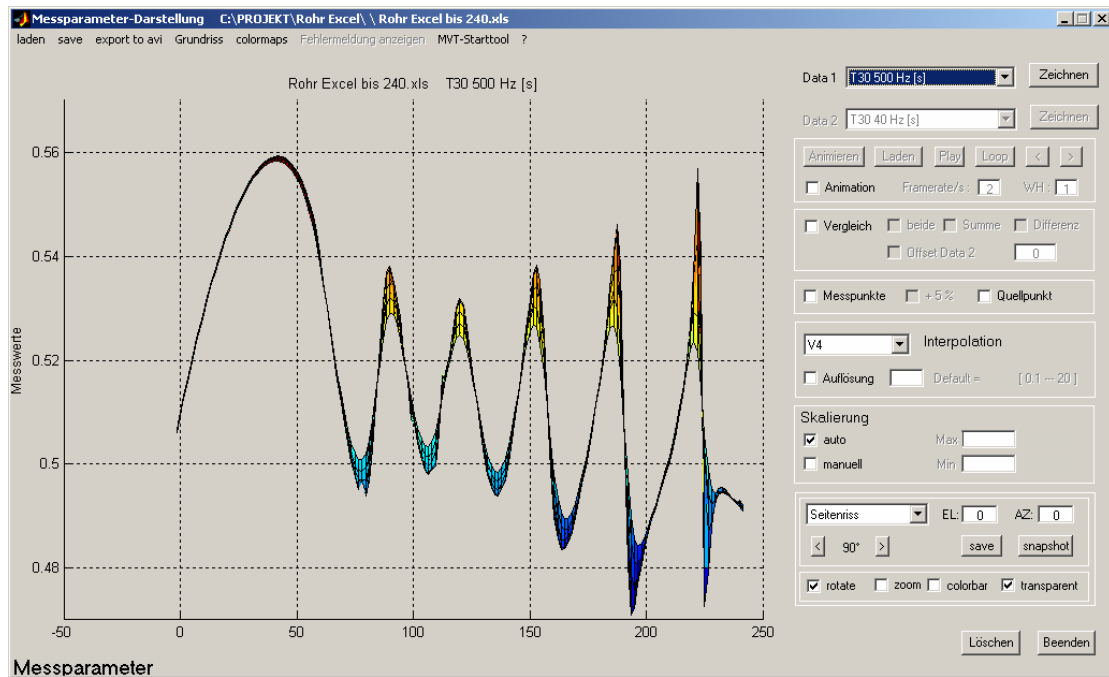


Abb. 6-68: Nachhallzeit T30 bei 500 Hz, Seitenriss

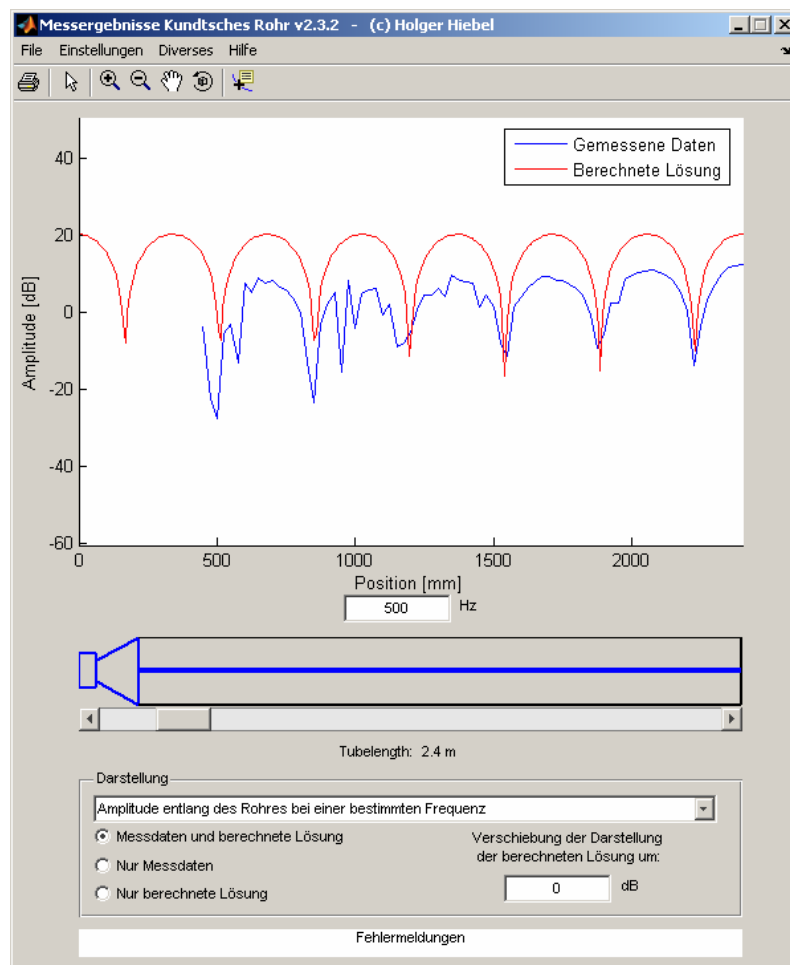


Abb. 6-69: Amplitudengang im Kundtschen Rohr bei 500 Hz

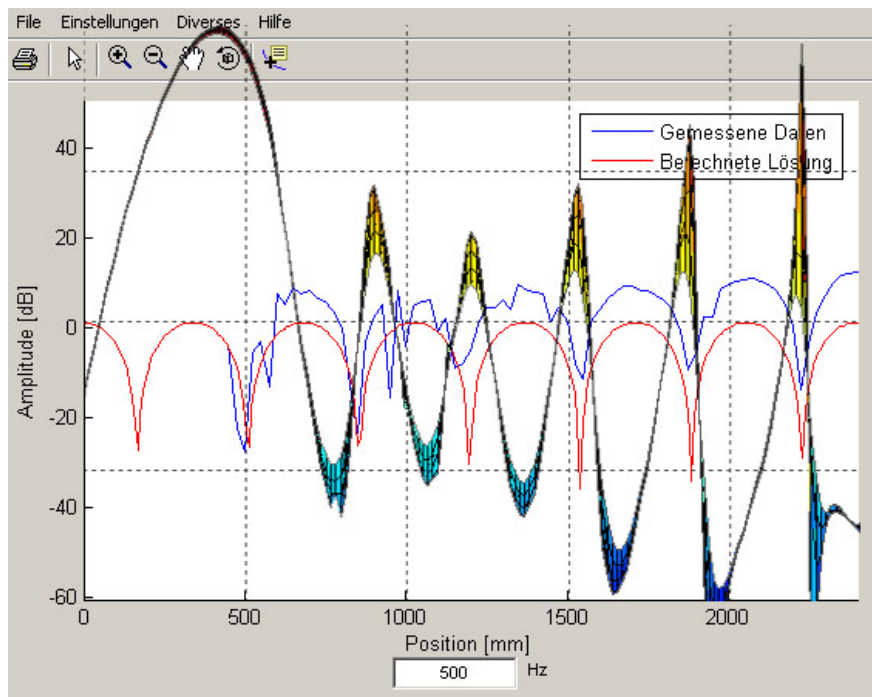


Abb. 6-70: Grafische Überlagerung bei 500 Hz

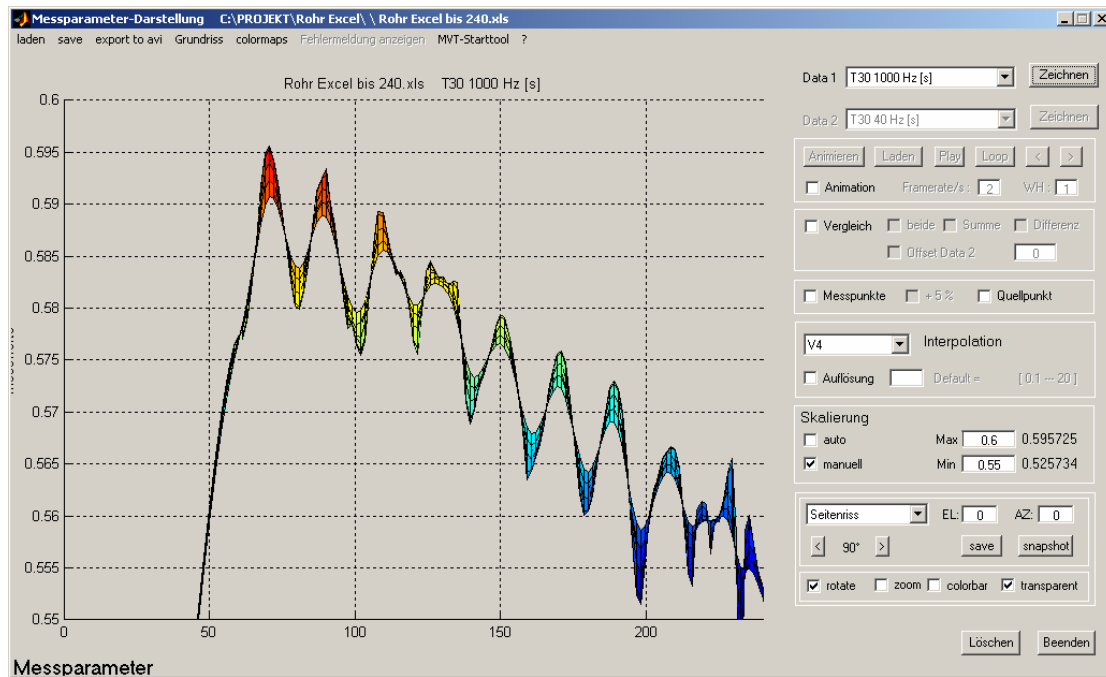


Abb. 6-71: Nachhallzeit T30 bei 1 kHz, Seitenriss

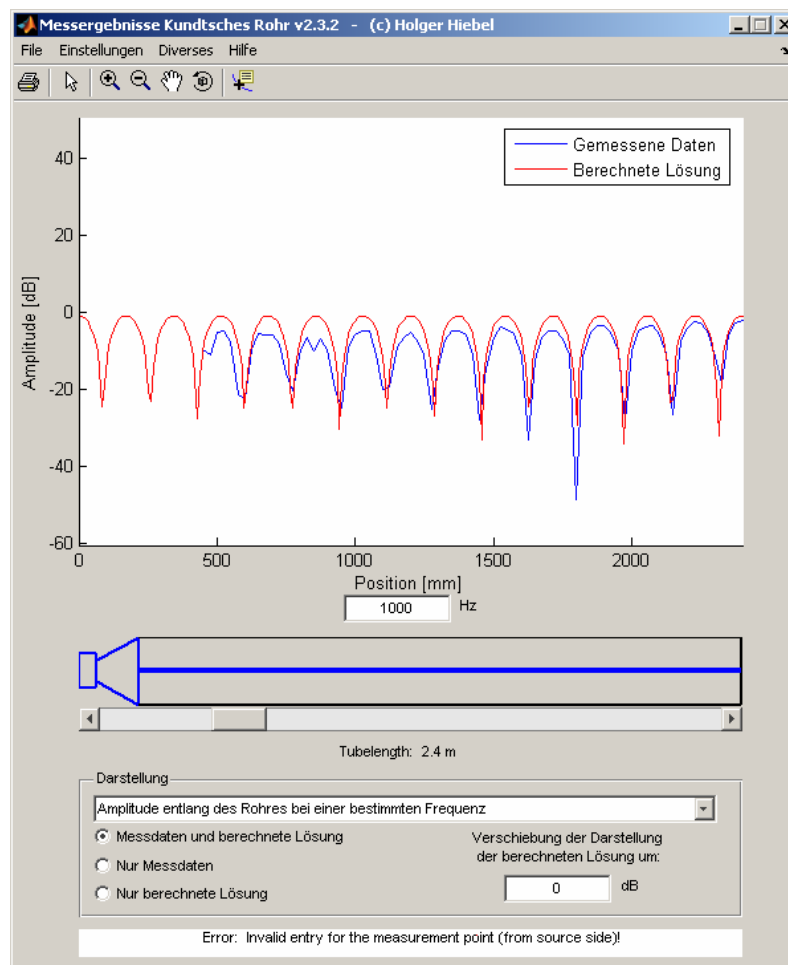


Abb. 6-72: Amplitudengang im Kundtschen Rohr bei 1 kHz

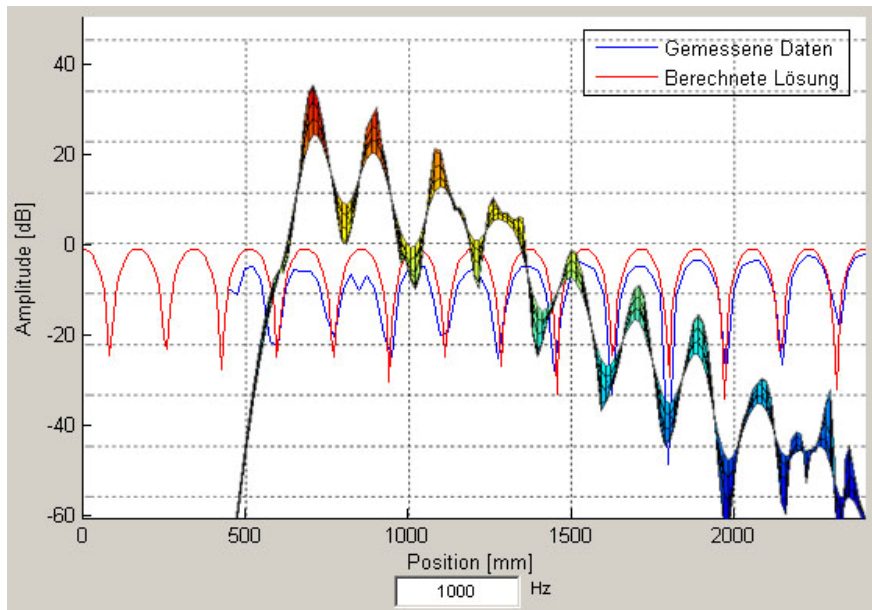


Abb. 6-73: Grafische Überlagerung bei 1 kHz

6.4.3 Sinusmessung im Kundtschen Rohr

Um das Verhalten bei einer Nachhallmessung direkt in Druckminima oder -maxima besser zu verstehen wird eine weitere Messung im Kundtschen Rohr durchgeführt. Ein Sinuston bestimmter Frequenz (250 Hz, 500 Hz, 1k Hz, 1,6k Hz) wird eingespeist und es wird jeweils bei einem Druckmaximum und Druckminimum das Audiosignal aufgezeichnet.

Die Bilder (Abb. 6-75 bis Abb. 6-78) zeigen jeweils in der Mitte das Anregungssignal, oben die Messung beim Stehwellenmaximum und unten beim Stehwellenminimum.

An der Stelle des Druckmaximums erkennt man natürlich sofort einen Abfall, allerdings auch ein periodisches Nachschwingen. Beim Druckminimum entsteht hingegen ein periodisches Aufschwingen. Die Periode beträgt jeweils 14 ms, was der Gesamtlaufzeit im Rohr bis zurück zum Ausgangspunkt entspricht (Reflexion an schallhartem Abschluss und Reflexion am Lautsprecher bis zurück zur Ausgangsposition, siehe Abb. 6-74). Es sollte noch erwähnt werden dass dieses Schwingen nur von der Laufzeit im Rohr abhängt, nicht jedoch von der betrachteten Frequenz.

$$c = 344 \text{ m/s} = 0,34 \text{ m/ms}$$

$$\frac{2,4 \text{ m}}{0,34 \text{ m/ms}} = 7 \text{ ms}$$

$$7 \text{ ms} * 2 = 14 \text{ ms}$$

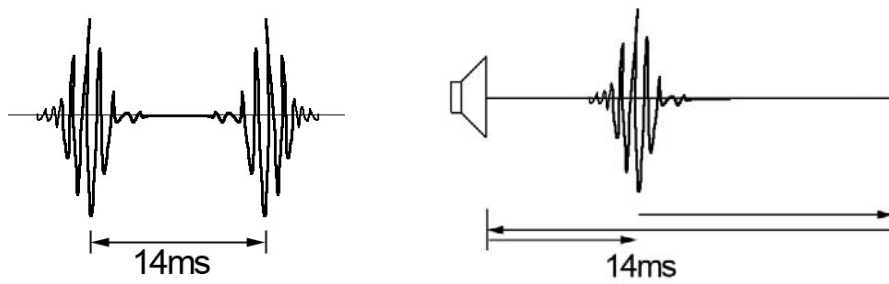


Abb. 6-74: Zeit zwischen peaks, Laufzeit im Rohr

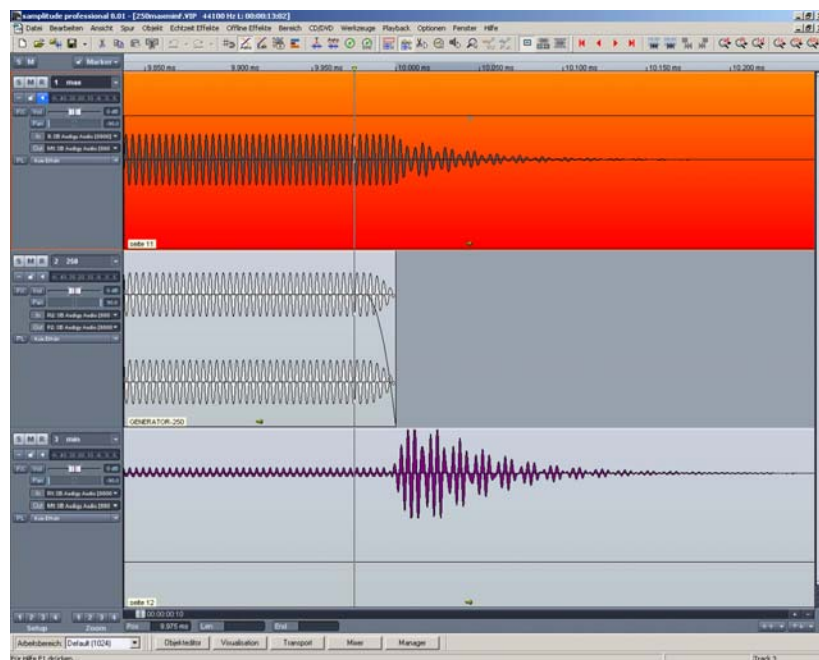


Abb. 6-75: Sinus bei 250 Hz

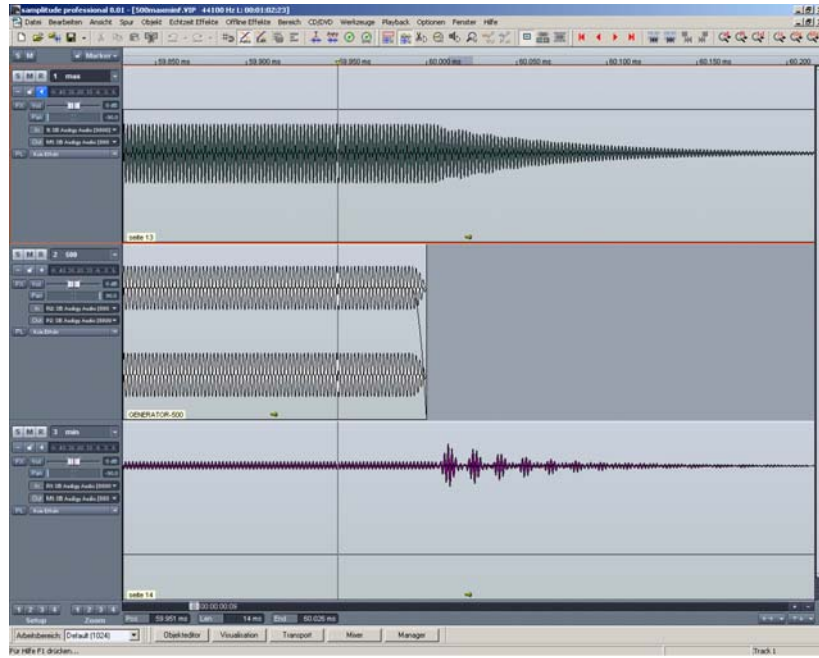


Abb. 6-76: Sinus bei 500 Hz

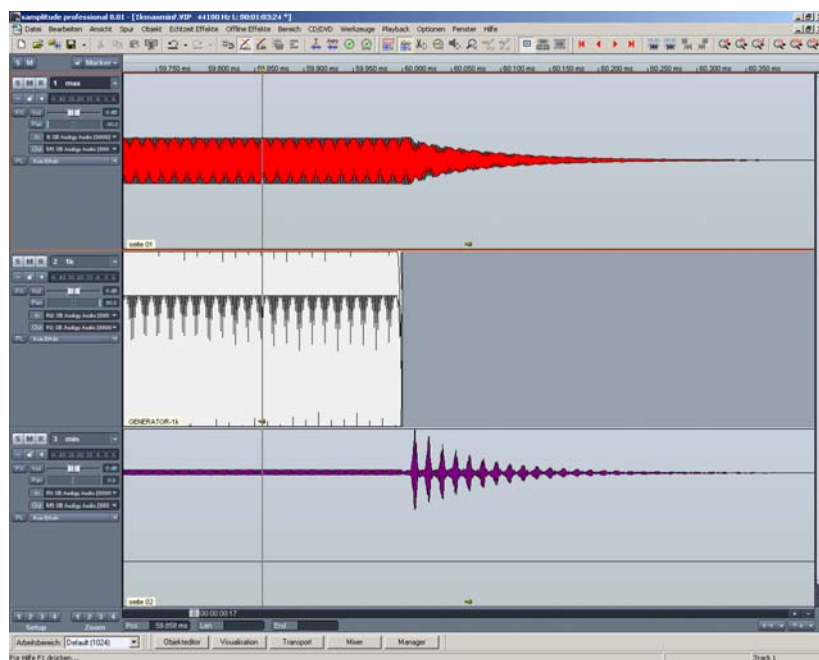


Abb. 6-77: Sinus bei 1 kHz

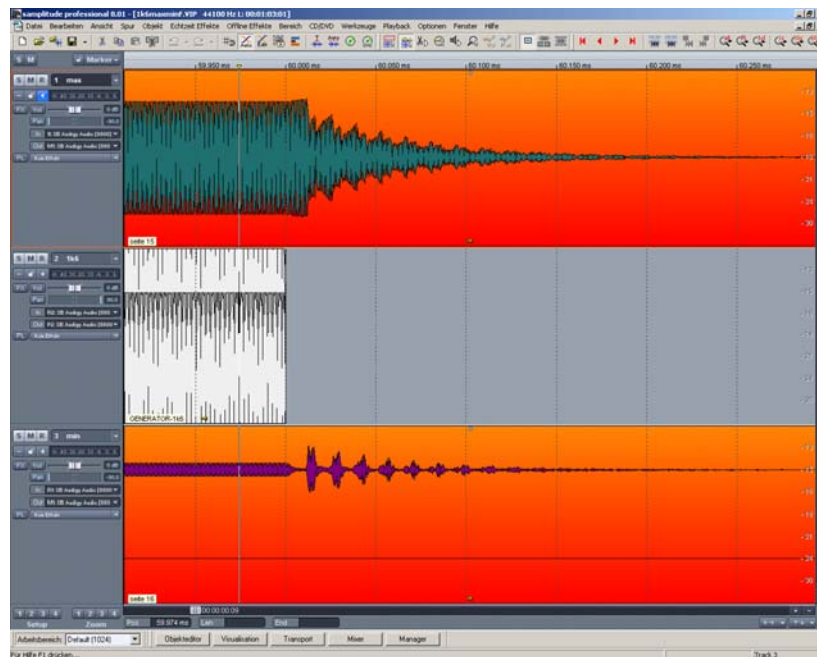


Abb. 6-78: Sinus bei 1.6 kHz

6.4.4 Schlussfolgerung

Der Einschwingvorgang im Rohr entsteht durch die hinlaufende Welle und eine „endliche“ Anzahl von rücklaufenden Reflexionen (r_e). Ab einer großen Anzahl an Reflexion (r_∞) stellt sich ein quasistationärer Zustand ein; die stehende Welle bildet sich optimal aus, Minima und Maxima sind nun optimal ausgeprägt. Beim Abklingen fehlt die hinlaufende Welle der Quelle, die Reflexionen laufen sich langsam tot und die stehende Welle verschwindet. Dabei brechen die Maxima rasch zusammen und die Minima wachsen zunächst schnell an (Abb. 6-79).

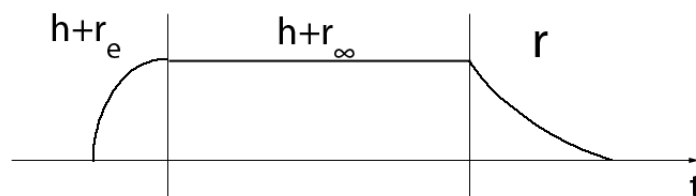


Abb. 6-79: Einschwingvorgang und Abklingvorgang im Kundtschen Rohr

Für die Berechnung der Nachhallzeit heißt das wiederum, dass im Bereich eines Maximums die Energie sehr rasch abnimmt und eine kurze Nachhallzeit gemessen wird. Am Ort eines Minimums dagegen, steigt die Energie sogar kurzzeitig an, bevor sie abnimmt, der Energieabfall dauert länger und die Nachhallzeit wird somit als länger erkannt.

Dasselbe Phänomen wird bereits in Abschnitt 6.3, S.108 erklärt.

6.4.5 Energie-Zeit-Verteilung

Die Darstellung der Energie-Zeit-Verteilung im Kundtschen Rohr ist nicht ganz einfach, da die Software eigentlich auf raumakustische Dimensionen optimiert wurde, soll heißen, dass zur Darstellung von 180 Messpunkten auf 1,80m die höchstmögliche Auflösung (Blocksize 256, overlap 90%) gewählt werden musste, was zu einer Rechenzeit von ca.4 Stunden führte (Abb. 6-80).

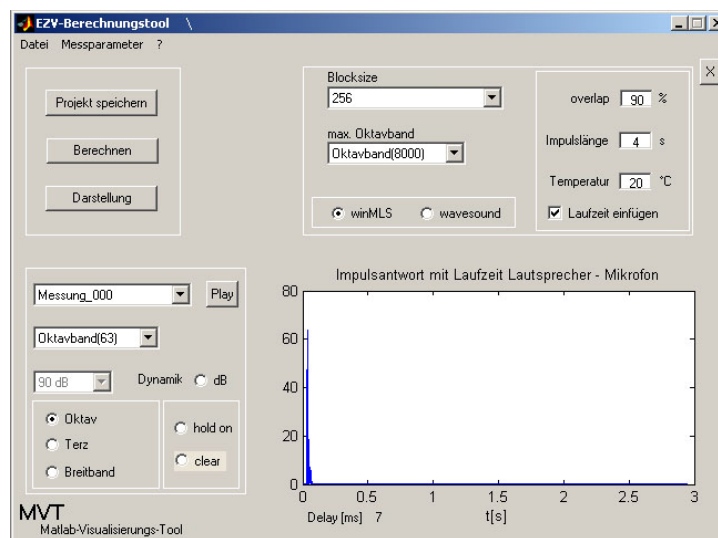


Abb. 6-80: EZV Berechnungstool, Einstellungen

Trotz dieses Aufwands ist die Darstellung ungenau, da ja bereits nach 7 ms das Rohr einmal durchlaufen wurde und erste Reflexionen am Abschluss auftreten. Die quasi breitbandige Anregung führt somit nicht zu einer beobachtbaren Energieausbreitung, sondern zeigt von Beginn an Energiespitzen an Stellen ausgeprägter Moden.

Auch bringt die Darstellung verschiedener Frequenzbänder keine großen Unterschiede, es werden starke Moden angezeigt, deren Pegel sich zeitlich verändert.

Es folgen Darstellungen bei 500 Hz (Abb. 6-81 bis Abb. 6-83), 2 kHz (Abb. 6-84 und Abb. 6-85) sowie die breitbandige Darstellung des Energie-Zeit-Verhaltens (Abb. 6-86 und Abb. 6-87).

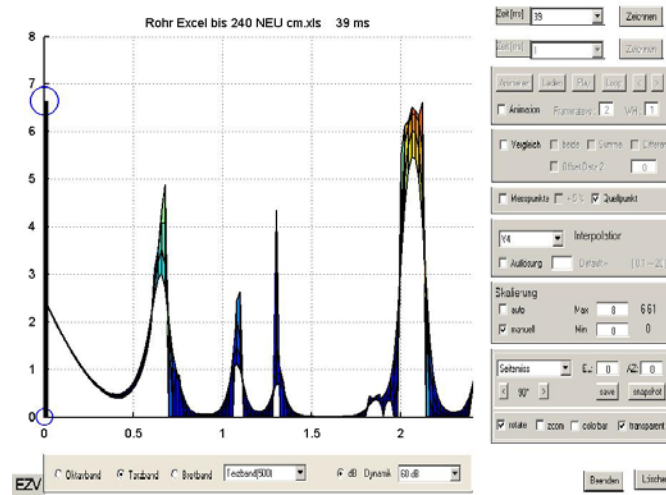


Abb. 6-81: EZV, Terzband um 500 Hz, 39 ms

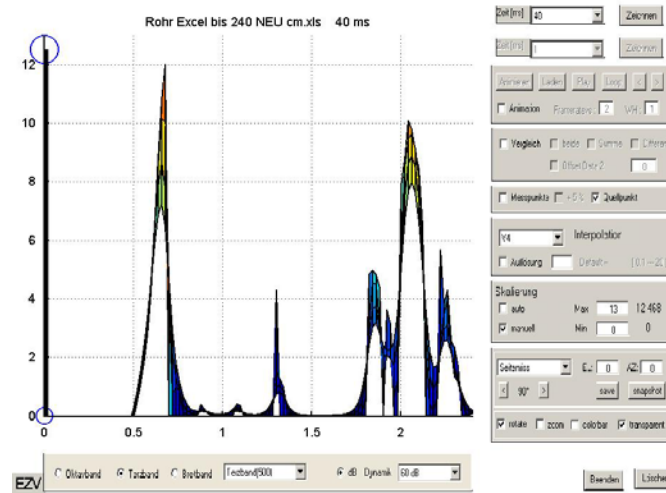


Abb. 6-82: EZV, Terzband um 500 Hz, 40 ms

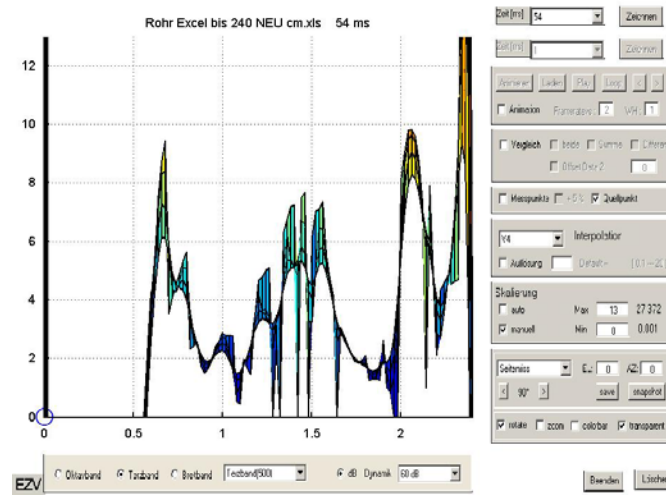


Abb. 6-83: EZV, Terzband um 500 Hz, 54 ms

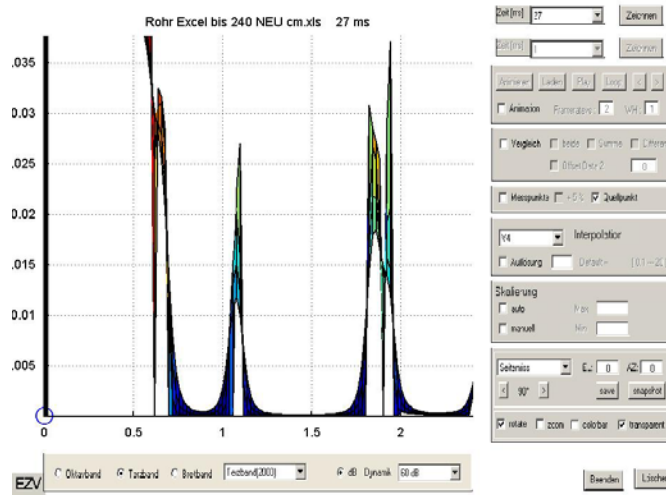


Abb. 6-84: EZV, Terzband um 2kHz, 27 ms

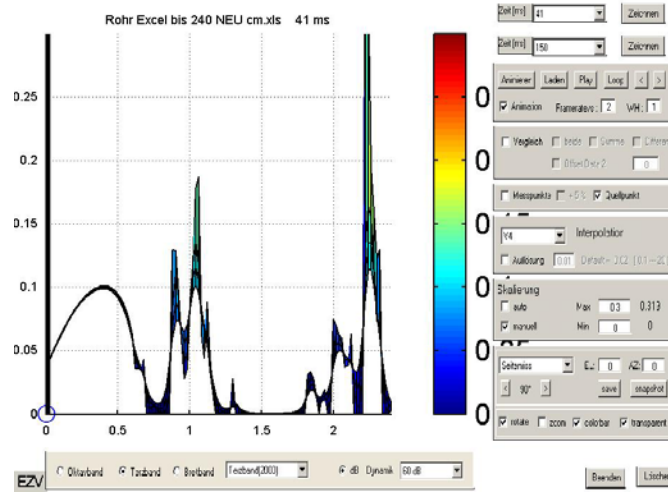


Abb. 6-85: EZV, Terzband um 2kHz, 41 ms

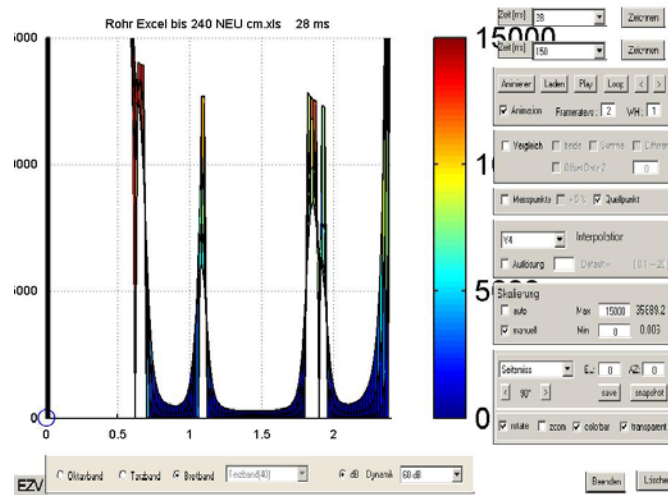


Abb. 6-86: EZV, Breitband, 28 ms

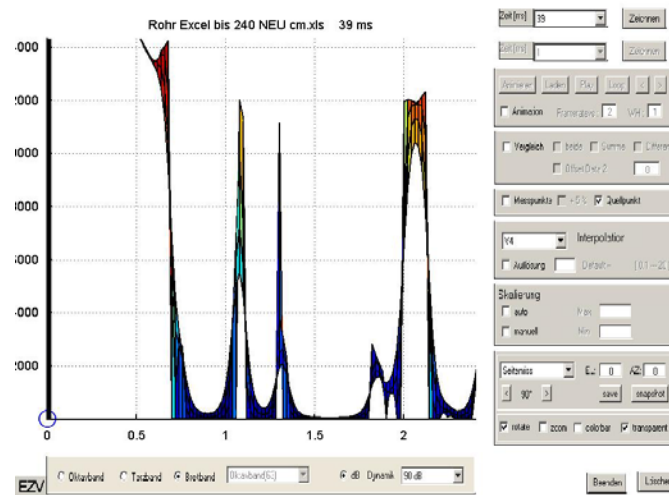


Abb. 6-87: EZV, Breitband, 39 ms

Die Interpretation dieser Messauswertung ist als nicht abgeschlossen zu betrachten, da der Grund für die ungewöhnlichen Ergebnisse nicht weiter verfolgt wurde. Höchstwahrscheinlich handelt es sich um Zusammenhänge mit Rohrresonanzen, die aber für die hier notwendigen Betrachtungen nicht relevant sind.

6.5 Simulation der Nachhallzeit im IBK Kellergang mit CATT Acoustic

Der IBK-Kellergang wurde in CATT-Acoustic eingegeben. Die Geometrie im Deckenbereich wurde dabei etwas vereinfacht (Abb. 6-88), da im Gang Rohrleitungen und Kabeltrassen entlang der Decke verlaufen.

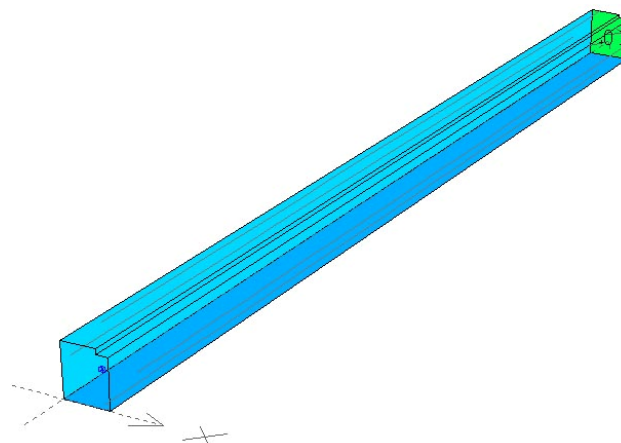


Abb. 6-88: 3D Darstellung des CATT-Modells

Nach der Überprüfung auf Richtigkeit der Geometriedaten wurde die Nachhallzeit simuliert, dies geschieht automatisch nach allen der Simulation bekannten Verfahren (Abb. 6-89).

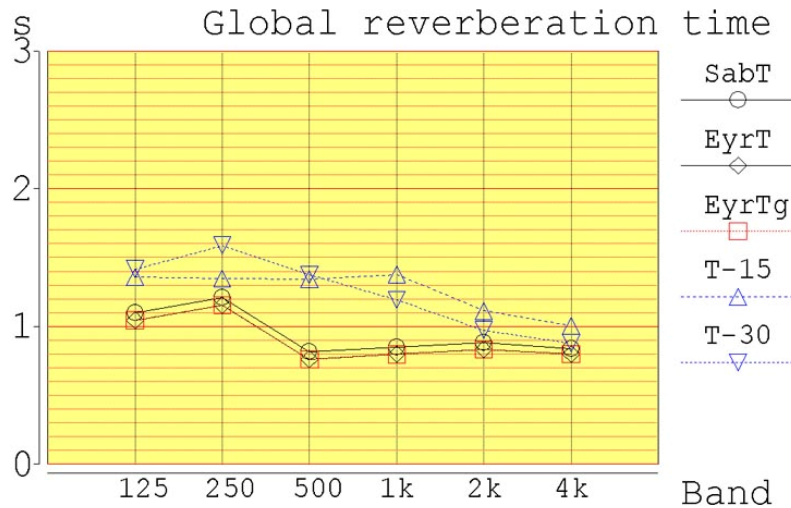


Abb. 6-89: Nachhallzeit CATT

Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen wurde nun noch die eigene Messung in den jeweiligen Frequenzbändern dargestellt (Abb. 6-90):

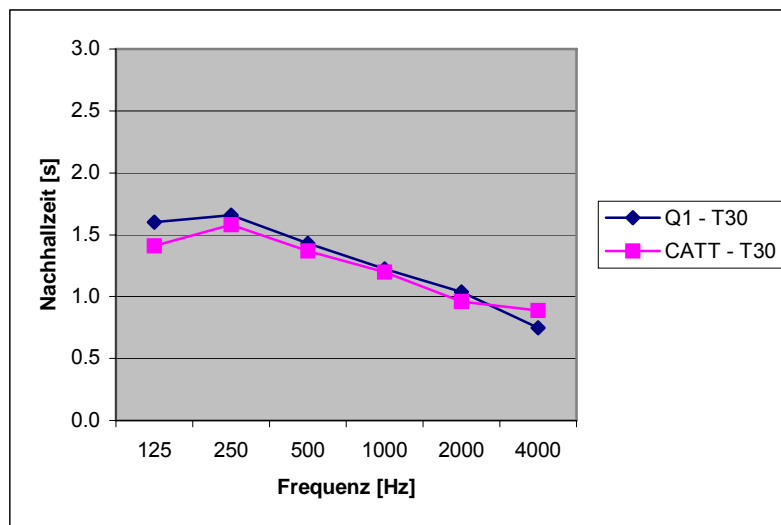


Abb. 6-90: Vergleich Nachhallzeit T30 zwischen Messung Q1 und CATT Simulation

Die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation ist als sehr gut einzustufen.

6.5.1 Simulation des räumlichen Verlaufs

Um herauszufinden, wie sich die Simulationssoftware bei langgestreckten Räumen genau verhält, wurde nun wie bei den praktischen Messungen (vgl. Abschnitt 3.3, S.26) die Nachhallzeit im Abstand von einem Meter simuliert und wiederum mit Hilfe des MVT-Tools dargestellt.

Die Quelle befindet sich auf der rechten Seite der Bilder (Abb. 6-91 bis Abb. 6-98). Der plötzliche Einbruch nach 30 Metern könnte dadurch zustande kommen, dass die Anzahl der Reflexionen in der Simulation für diesen besonderen Raum nicht ausreichend waren. Trotz dieser Abweichung von der Realität wird deutlich, dass in der Software das Phänomen der ansteigenden Nachhallzeit mit zunehmender Entfernung nicht berücksichtigt wird.

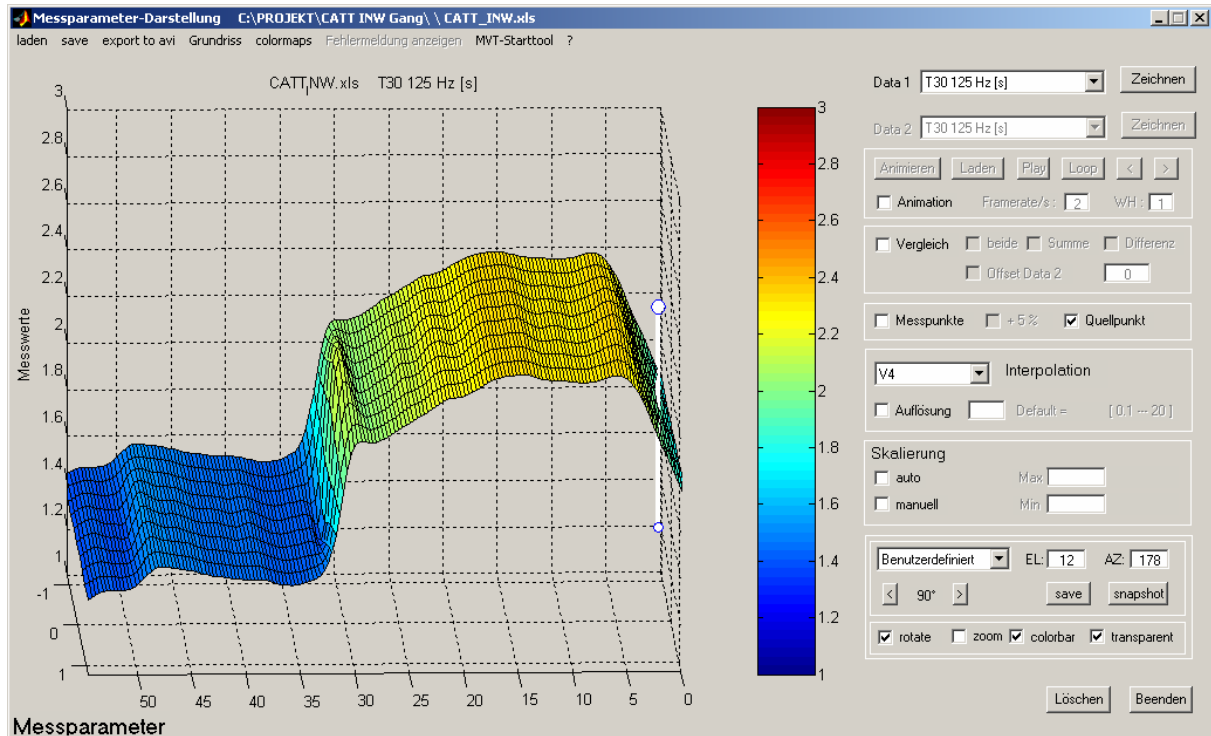


Abb. 6-91: CATT, T30 bei 125 Hz

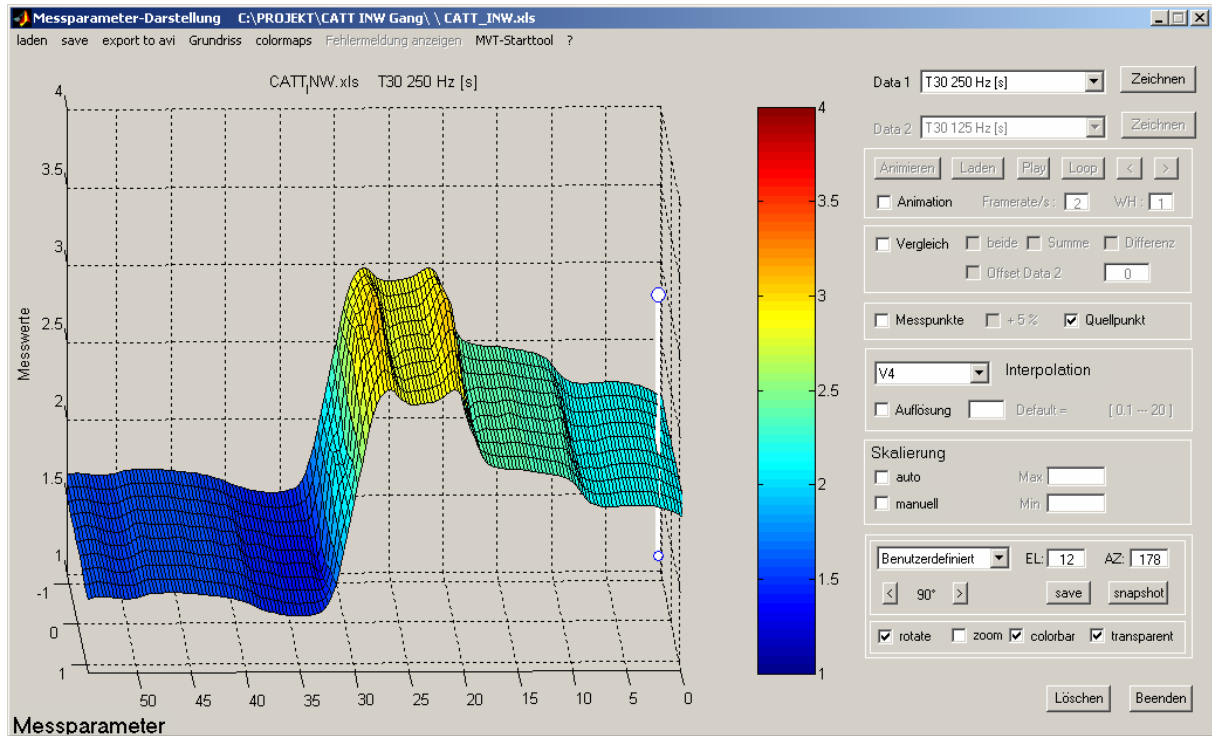


Abb. 6-92: CATT, T30 bei 250 Hz

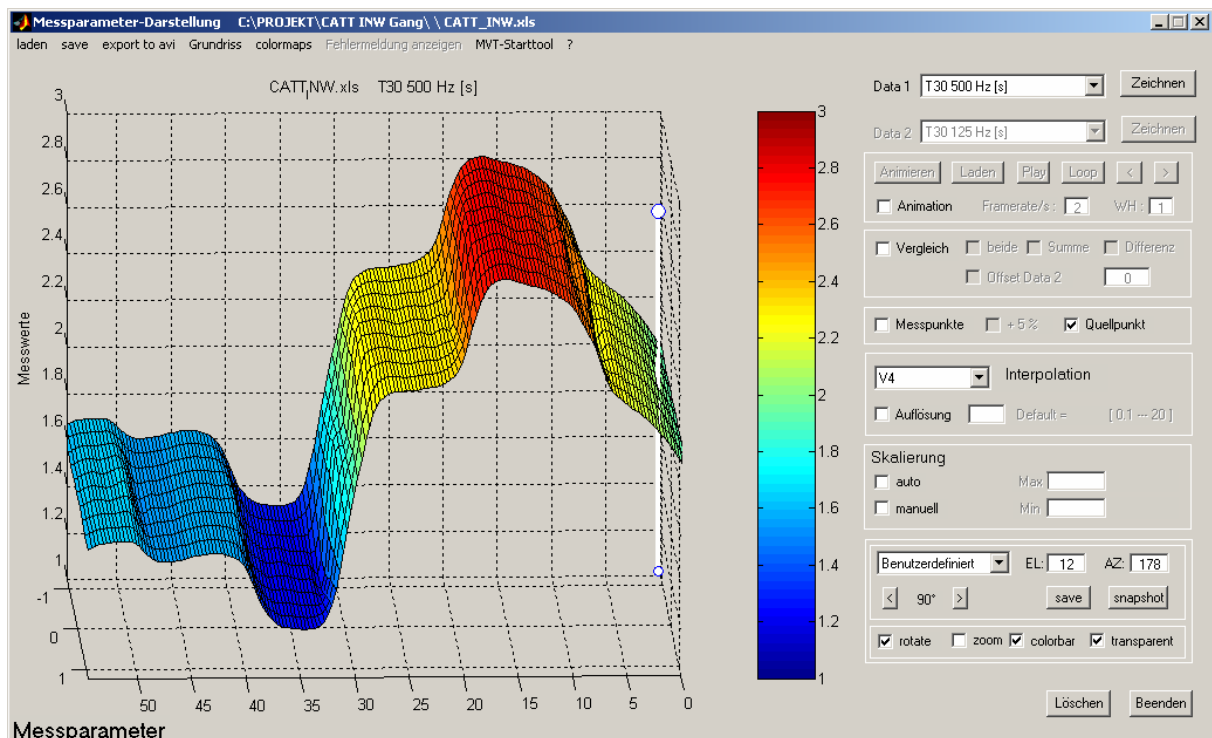


Abb. 6-93: CATT, T30 bei 500 Hz

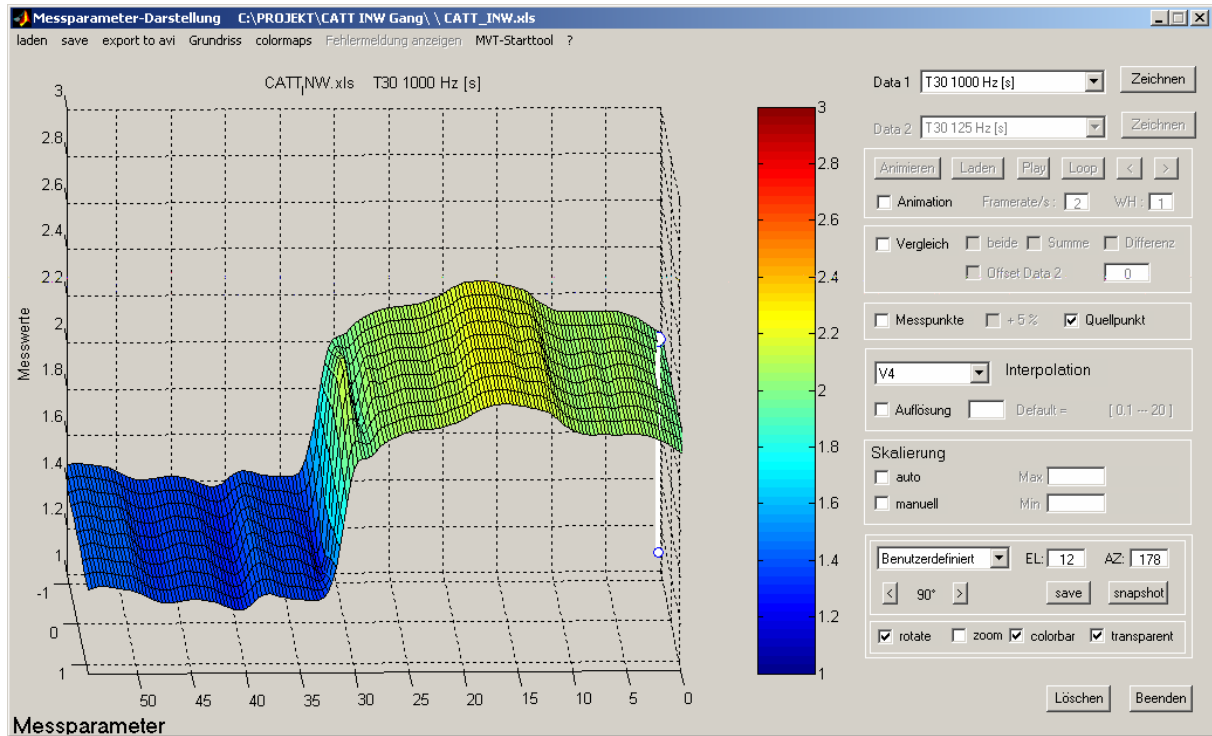


Abb. 6-94: CATT, T30 bei 1000 Hz

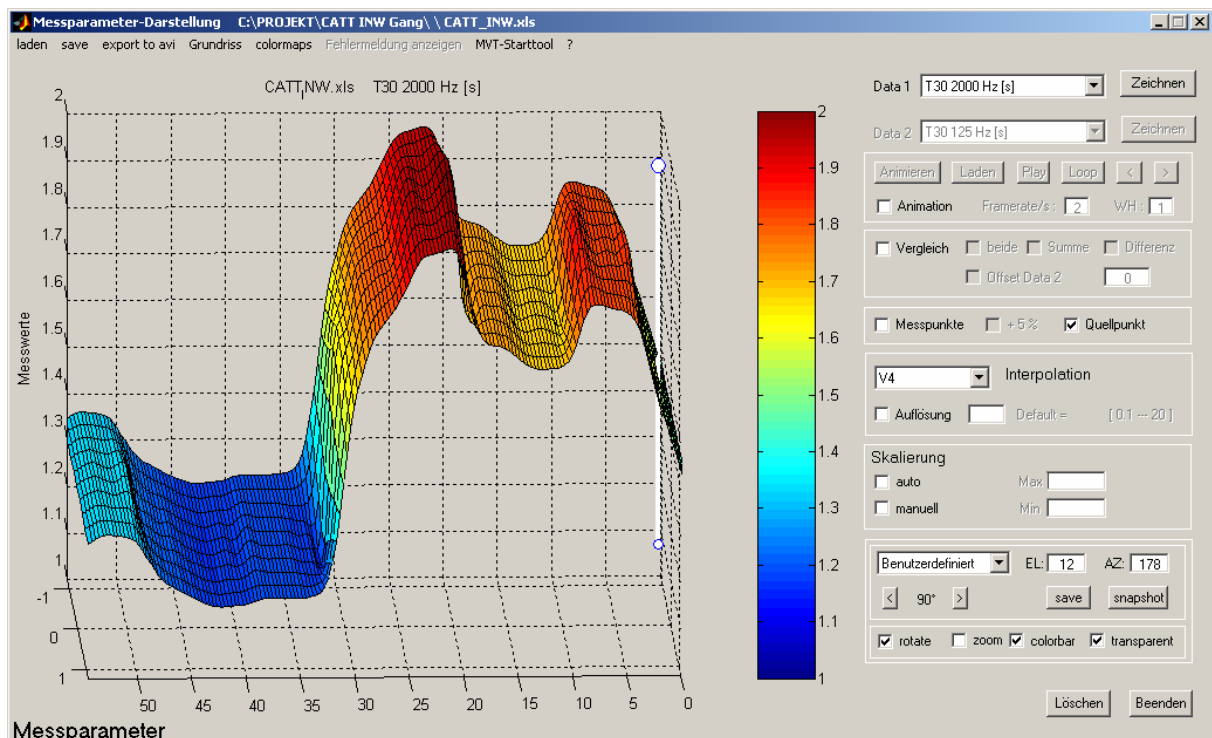


Abb. 6-95: CATT, T30 bei 2000 Hz

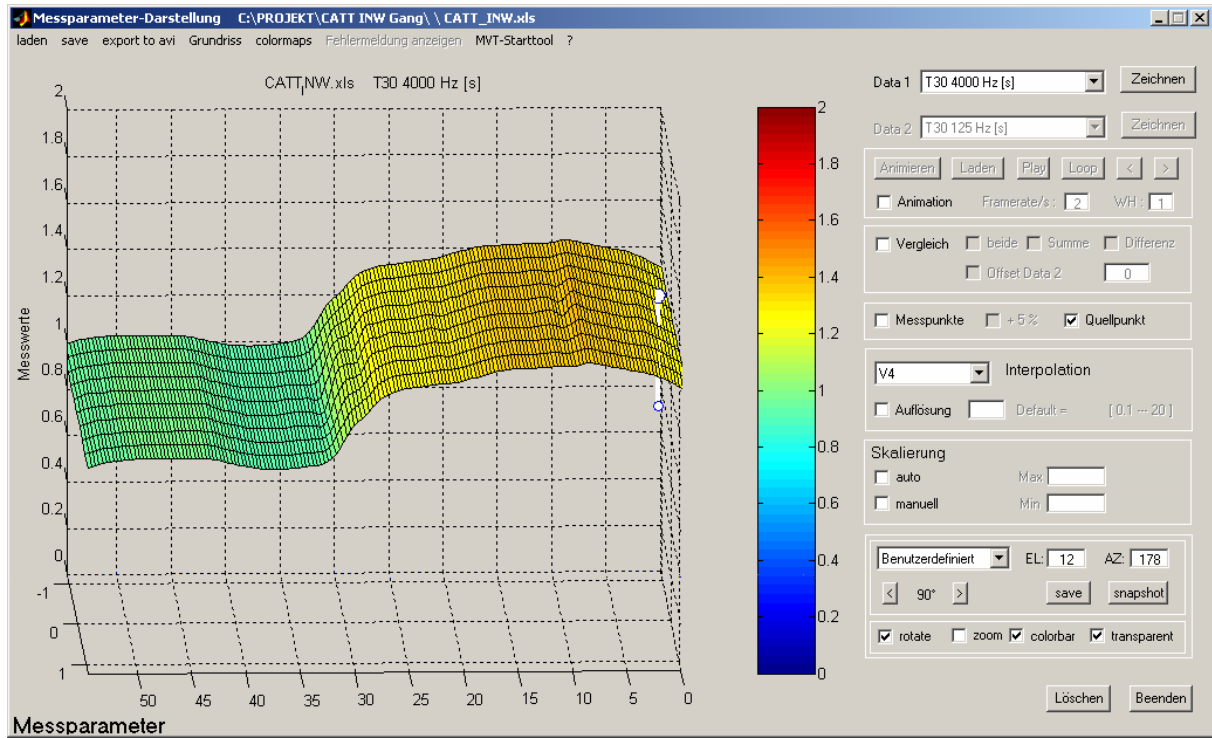


Abb. 6-96: CATT, T30 bei 4000 Hz

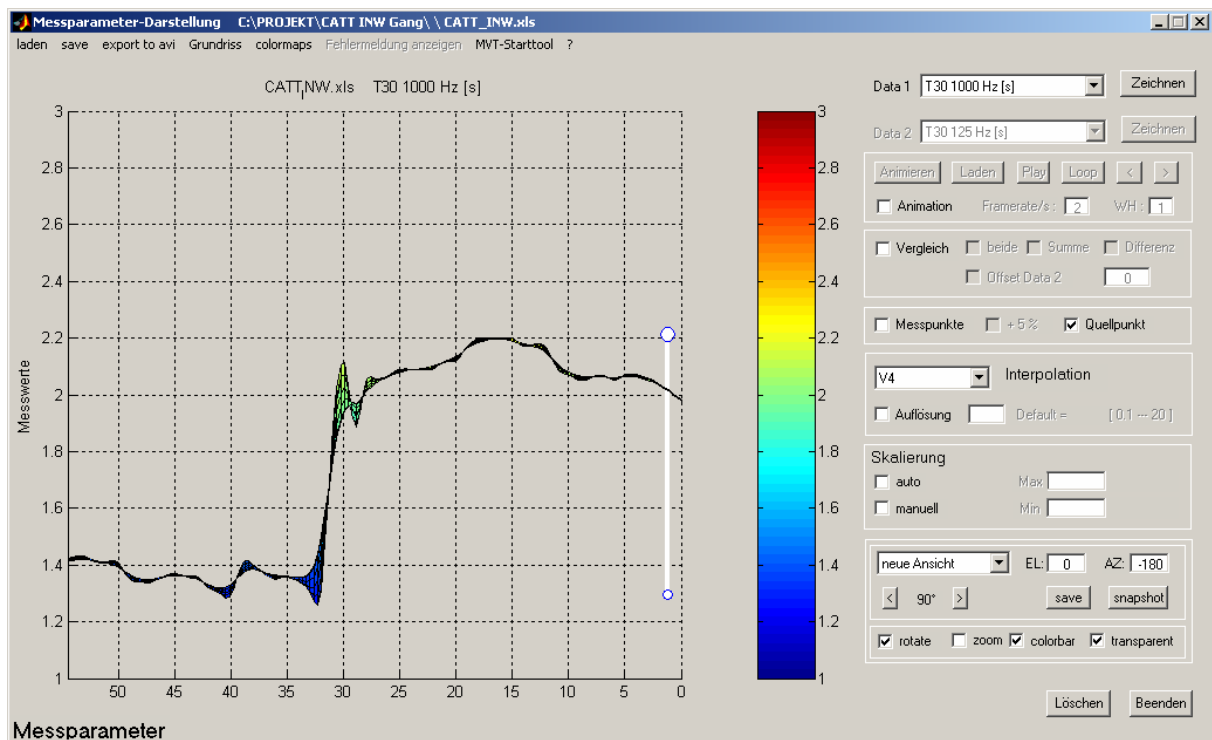


Abb. 6-97: CATT, T30 bei 1000 Hz, Seitenriss

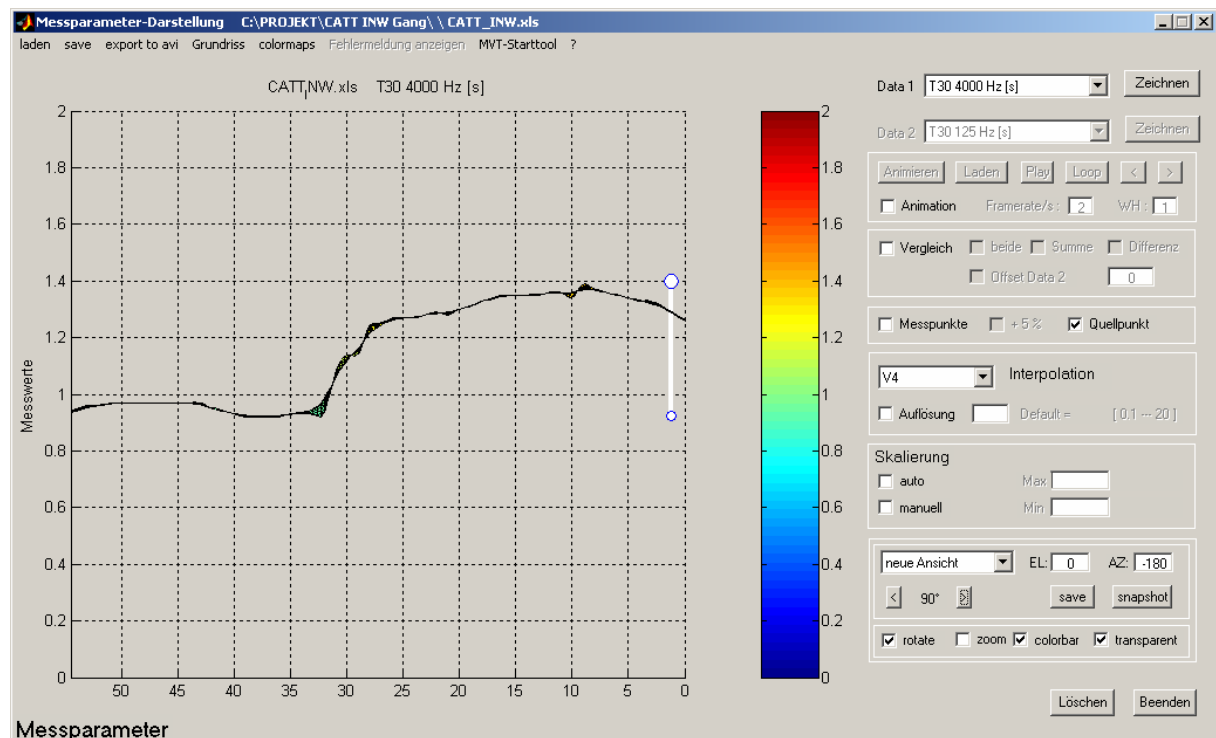


Abb. 6-98: CATT, T30 bei 4000 Hz, Seitenriss

7 Zusammenfassung und Ausblick

Nach einer eingehenden Analyse der vorhandenen Daten aus der Stephansdommessung und weiteren Überlegungen in Bezug auf Auffälligkeiten der Messauswertung konnten Hypothesen entwickelt werden (vgl. Kapitel 4, S.49), die besagte Probleme (vgl. Abschnitt 4.2, S.49) erklären. Nach zusätzlichen raumakustischen Messungen zur Verifikation konnten einige Vermutungen bestätigt werden, andere wurden verworfen.

Es scheint nun so, als wäre es allgemeingültig, dass die Nachhallzeit in langgestreckten Räumen mit zunehmender Entfernung ansteigt (vgl. Abschnitt 6.3, S.108). Mit Hilfe des Visualisierungstools konnte gezeigt werden, dass sich in langgestreckten Räumen, mit der Quelle an einem Raumende, zunächst an der Quelle eine höhere Energiedichte einstellt als am gegenüberliegenden Raumende. Während des darauffolgenden Ausgleichsvorgangs bleibt der Nachhallpegel am quellfernen Raumende nahezu konstant, was dazu führt, dass die Nachhallzeit im Raum mit zunehmender Entfernung von der Quelle ansteigt.

Von generellen Auswertungsfehlern - sei es durch das verwendete Messsystem oder auch die automatisierte Auswertung in der Software - kann nicht ausgegangen werden (vgl. Kapitel 5, S.56 bzw. Abschnitt 3.5, S.30). Es bleiben Fragen offen, in wieweit die Messung der

Impulsantwort selbst durch äußere Störungen beeinflusst wird und welche Probleme erst in der Software entstehen. Jedenfalls bereitet der tieffrequente Bereich bei raumakustischen Messungen, hier natürlich vor allem bei der Messung der Nachhallzeit, immer Probleme.

Es wurden weiters zwei Programme verglichen (vgl. Abschnitt 3.5.7, S.47), vor allem bei Messpunkten mit Problemen bei der Auswertung. Ein Parameter zur Qualitätsüberprüfung (T30/EDT) wurde eingeführt und mit dem EDR Wert aus WinMLS 2004, der ebenfalls Auskunft über die Gültigkeit der berechneten Daten gibt, verglichen (vgl. Abschnitt 5.1.2, S.57). Es stellte sich als schwierig heraus eine Bewertung einzuführen, da der Grenzwert zwischen gültiger und ungültiger Auswertung nicht leicht zu bestimmen ist, der Wert EDR macht es allerdings immerhin möglich, automatisch unrealistische Werte zu entfernen und beispielsweise in einer Mittelung nicht zu berücksichtigen.

Auch an die Möglichkeit des Vorhandenseins von gekoppelten Räumen wurde gedacht (vgl. Abschnitt 4.2.3, S.53). Diese Vorstellung konnte allerdings widerlegt werden, da bei genauerer Betrachtung keine Anzeichen darauf hin deuten, dass bei der Stephansdommessung gekoppelte Räume einen relevanten Beitrag zu den Messergebnissen liefern.

Ein letzter großer Punkt war schließlich die Untersuchung des Zusammenhangs von Raummodenbildung und der Auswertung der Nachhallzeit (vgl. Abschnitt 4.2.4, S.55). Auch hier konnte gezeigt werden, dass ein deutlicher Zusammenhang besteht und mögliche Probleme im tieffrequenten Bereich bei der Auswertung darauf zurückzuführen sind.

Es wäre nun wünschenswert weitere Untersuchungen durchzuführen um eine quantitative Beschreibung des Anstiegs der Nachhallzeit zu erhalten. Des Weiteren sollte bei zukünftigen Messungen die Auswahl der Messpunkte unter Berücksichtigung der Raummodenbildung getroffen werden.

All diese Forschungsergebnisse können in zukünftige Simulationsumgebungen einfließen, um deren Genauigkeit weiter zu verbessern.

8 Literaturverzeichnis

- [Cirillo] CIRILLO E., MARTELOTTA F.: *Sound propagation and energy relations in Churches*. JASA Vol. 118, S232-248, 2005
- [Dickreiter] DICKREITER M.: *Handbuch der Tonstudioteknik*. K.G.Saur München, 5.Auflage, 1987
- [Fasold] FASOLD W. / VERES E.: *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. Verlag für Bauwesen – Berlin, 1.Auflage, 1998
- [Fellner1] FELLNER M., GRAF F., et. al: *Untersuchungen und wissenschaftliche Forschungen zur Akustik und musikalischen Aufführungspraxis des Domes zu St. Stephan in Wien mit dem Ziel der Ausarbeitung von Verbesserungsmöglichkeiten*. Österreichische Nationalbank, Wien, 2005
- [Fellner2] FELLNER M., GRAF F., et. al: *Zur Akustik im Dom zu St.Stephan in Wien*. DAGA2006, Braunschweig, 2006
- [Fellner3] FELLNER M. / GRAF F.: *Raumakustik, Labor*. Vorlesungsskript IBK/TU Graz, 2002
- [Graber1] GRABER G.: *Die Nachhallakustik großer langgestreckter Räume*. DAGA 2006, Braunschweig, 2006
- [Graber2] GRABER G. / WESELAK W.: *Raumakustik*. Vorlesungsskript IBK/TU Graz, 2002
- [Heutschi] HEUTSCHI K.: *Akustik I*. Vorlesungsskript, URL: http://www.isi.ee.et Hz.ch/education/lectures/ak1/ak1_link/va1-9.pdf (22.11.2006)
- [Hiebel] HIEBEL H.: *Das Kundtsche Rohr*. Projektarbeit IBK/TU Graz, 2005
- [Meyer] MEYER J.: *Kirchenakustik*. Bochinski Frankfurt am Main, 2003
- [Sengpiel] SENGPIEL E.: *Raum-Moden - Stehende-Wellen-Berechnung*. URL: <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-raum-moden.htm> (22.11.2006)
- [Weber] WEBER G.: *MVT - Matlab Visualisierungs Tool*. Projektarbeit, IBK/TU-Graz, 2005
- [Webers] WEBERS J.: *Tonstudioteknik: Handbuch der Schallaufnahme und –wiedergabe bei Rundfunk, Fernsehen, Film und Schallplatte*. Franzis Verlag München, 2. neu bearb. und erw. Aufl., 1987

9 Verwendete Software

[01dB] <http://www.01db.com>

[WinMLS] <http://www.winmls.com>

[CATT] <http://www.catt.se>