Entwicklung von Werkzeugen zur Untersuchung der Klassenraumakustik im Unterrichtsbetrieb

Projektarbeit

durchgeführt von

Rafael Philip Ludwig BSc

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der Technischen Universität Graz

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Kubin

Begutachter/Betreuer: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Graber

Graz, im September 2014

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

(Unterschrift)

Zusammenfassung

Lärm im Klassenzimmer ist ein Problem, das von Lehrern schon lange beklagt wird. Um die Lärmsituation in Klassenräumen noch vielseitiger untersuchen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit Werkzeuge entwickelt, die es ermöglichen, die akustische Situation in einem Klassenzimmer zu analysieren, simulieren und optimieren. Die Anwendung IntKlaSim ist die Weiterentwicklung eines bereits existierenden Tools. Diese Anwendung analysiert zum einen die Akustik in einem Klassenraum nach einer Nachhallzeitmessung. Zum anderen kann eine akustische Sanierung des Raums simuliert werden, indem aus einer Datenbank verschiedene Absorber gewählt werden, die zusätzlich in den Raum eingebracht werden. Das Augenmerk von Analyse und Simulation ist dabei auf Nachhallzeit, STI und Al_{cons} gerichtet. Außerdem wurden mit dem File Cutter und dem Noise Level Analyzer zwei neue Anwendungen entwickelt. Mit diesen Werkzeugen kann die Lärmsituation im Klassenzimmer in Abhängigkeit der gewählten Unterrichtsform an verschiedenen Positionen im Raum simultan untersucht werden. Nachdem ein Unterrichtstag oder eine Unterrichtsstunde mit mehreren im Raum verteilten Mikrofonen aufgenommen wurde, werden die einzelnen Spuren nacheinander in den File Cutter geladen. Dort erfolgt die Kategorisierung nach der Unterrichtsform. Daraufhin werden alle Abschnitte, die derselben Unterrichtsform zugeordnet wurden, in eine separate wave-Datei kopiert. Diese Dateien werden einzeln in die letzte Anwendung, den Noise Level Analyzer, geladen. Hier wird die Lärmsituation in Abhängigkeit der jeweiligen Unterrichtsform analysiert, indem unter anderem verschiedene Werte berechnet werden, die die Schalldruckpegelverteilung beschreiben. Die Innovation der letzten beiden Anwendungen liegt dabei in der Möglichkeit, einen mehrkanaligen Unterrichtsmitschnitt auswerten zu können. Somit ist es möglich, Parameter, wie den Grundgeräuschpegel, nicht nur an einem bestimmten Punkt, sondern in Abhängigkeit der raumakustischen Gegebenheiten räumlich verteilt zu erfassen.

Abstract

Noise in classrooms is a problem, teachers complain about since a long time. To investigate the noise environment in classrooms even more versatile, tools that allow the analysis, the simulation and the optimization of a classrooms' acoustical environment were developed in the context of this thesis. The application IntKlaSim is a further development of an already existing tool. On the one hand it analyzes a classrooms' acoustics after a reverberation time measurement was performed. On the other hand an acoustical restoration of this room can be simulated by selecting different absorbers from a data base, which are put in the room additionally. The attention of analysis and simulation is directed to reverberation time, STI and Al_{cons}. In addition the *File Cutter* and the *Noise Level Analyzer* are two new realized applications. These tools can be used to evaluate the noise environment at different positions in classrooms simultaneously and in dependency of the selected style of teaching. After a day or a lesson at school was recorded with several microphones that were distributed in the classroom, the single tracks are loaded into the File Cutter one after another. There the categorization according to the style of teaching takes place. Thereupon all parts that belong to the same style of teaching are copied in a separate wave file. These files are loaded into the last tool, called Noise Level Analyzer, separately. Here the noise environment is analyzed in dependency of the respective style of teaching by calculating among other things different values that describe the distribution of the sound pressure level. Thereby the innovation of the last two applications is the possibility to analyze a multichannel recording of class. Hence it is possible to evaluate parameters, like the background noise, not only at one certain position, but in dependency of room acoustical conditions spatially distributed.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

2	Das Simulationstool IntKlaSim	13
2	2.1 Bereits realisierte Möglichkeiten des Tools	
2	2.2 Erweiterungen	14
2	 2.3 Vorgehensweise bei der Simulation	
	2.3.5 Lärmsituation und Sprechaufwand	
	2.3.6 Import der Messwerte nach Sanierung	
	2.3.7 Vergleich von T30, STI und Al _{cons} bevor und nach der Sanierung	
3	Analysewerkzeuge zur Untersuchung von Lärm in Klassenräumen	25
3	3.1 Vorgehensweise bei der Analyse	
3	 3.2 Der <i>File Cutter</i>	
	3.2.2.2 Auswahl eines Abschnitts	
	3.2.2.3 Kategorisierung und Abspeichern eines Abschnitts	
	3.2.2.4 Wiedergabe eines abgespeicherten Abschnitts	
	3.2.2.5 Loschen eines abgespeicherten Abschnitte	
	3.2.2.7 Kategorisieren einer Mehrspuraufzeichnung	
	3.2.2.8 Zoomen und Scrollen im Plot-Fenster	
3	3.3 Der Noise Level Analyzer	
	3.3.1 Uberblick über die Bedienelemente	
	3.3.2 Vorgehensweise bei der Auswertung	
	3.3.2.1 Laden der Kallbrierungsdatei	
	3.3.2.2 Ladell der zu allafysterenden Datei	
	3 3 2 4 Abspeichern der Analyseergebnisse	
	3.3.2.5 Darstellung der statischen Schalldruckpegelverteilung als	
	Histogramm oder der spektralen Analyse	
	3.3.2.6 Wiedergabe der analysierten Datei	

Projektarbeit Entwicklung von Werkzeugen zur Untersuchung der Klassenraumakustik im Unterrichtsbetrieb

4	Zusammenfassung und Ausblick	39
5	Literaturverzeichnis	40
6	Anhang A: Das Blockschaltbild von IntKlaSim	41
7	Anhang B: Eigenschaften der unterschiedlichen Frequenzbewertungskurven	43
8	Anhang C: Eigenschaften der unterschiedlichen Zeitbewertungen	49
9	Anhang D: Der Signalfluss des Noise Level Analyzers	53
10	Anhang E: Dateienverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: IntKlaSim - Alte Benutzeroberfläche des Tabellenblatts Raumakustik	14
Abb. 2.2: IntKlaSim - Modifizierte Benutzeroberfläche des Tabellenblatts Raumakustik	15
Abb. 2.3: IntKlaSim - Intro	17
Abb. 2.4: IntKlaSim - Basisdaten	17
Abb. 2.5: IntKlaSim - Import der Messwerte vS; ohne Daten	18
Abb. 2.6: IntKlaSim - Import der Messwerte vS; Dialogfenster für den Messwerteimport	19
Abb. 2.7: IntKlaSim - Import der Messwerte vS; mit Daten	19
Abb. 2.8: IntKlaSim - Raumakustik	20
Abb. 2.9: IntKlaSim - Lärmsituation und Sprechaufwand	22
Abb. 2.10: IntKlaSim - Import der Messwerte nS	23
Abb. 2.11: IntKlaSim - Vorher-nachher-Vergleich	24
Abb. 3.1: Der File Cutter im Überblick	26
Abb. 3.2: Anwenderflussdiagramm des File Cutters	27
Abb. 3.3: Laden einer Datei	28
Abb. 3.4: Auswahl eines Abschnitts	29
Abb. 3.5: Kategorisieren und Abspeichern eines Abschnitts	30
Abb. 3.6: Wiedergabe eines abgespeicherten Abschnitts	30
Abb. 3.7: Löschen eines abgespeicherten Abschnitts	30
Abb. 3.8: Exportieren der abgespeicherten Abschnitte	31
Abb. 3.9: Der Noise Level Analyzer im Überblick	32
Abb. 3.10: Anwenderflussdiagramm des Noise Level Analyzers	34
Abb. 3.11: Laden der Kalibrierungsdatei	35
Abb. 3.12: Laden der zu analysierenden Datei	35
Abb. 3.13: Analyse der Datei	36

Projektarbeit	Entwicklung von Werkzeugen zur Untersuchung der Klassenraumakustik im Unterrichtsbetri	eb
Abb. 3.14: Ze	vitlicher Schalldruckpegelverlauf; Zeitbewertung: fast	36
Abb. 3.15: At	ospeichern der Analyseergebnisse	37
Abb. 3.16: Di	e Plot Selection	37
Abb. 3.17: Hi	stogramm der Schalldruckpegelverteilung	38
Abb. 3.18: sp	ektrale Oktavbandanalyse	38
Abb. 3.19: W	iedergabe der analysierten Datei	38
Abb. 6.1: Blo	ckschaltbild von IntKlaSim	41
Abb. 7.1: Die	Frequenzbewertungskurven im Vergleich	43
Abb. 7.2: Gev	wichteter Schalldruckpegel bei 500 Hz; 94 dB(SPL); Zeitbewertung: fast	45
Abb. 7.3: Gev	wichteter Schalldruckpegel bei 1 kHz; 94 dB(SPL); Zeitbewertung: fast	46
Abb. 7.4: Gev	wichteter Schalldruckpegel bei 5 kHz; 94 dB(SPL); Zeitbewertung: fast	46
Abb. 7.5: Gev Zeitbewe	vichteter Schalldruckpegelverlauf, Ausschnitt aus Beethovens 9. Sinfonie; ertung: <i>fast</i>	47
Abb. 7.6: Ver	größerung von Abb. 7.5	47
Abb. 8.1: We	llenform des Signals; Sinuston 1 kHz, Abfall von 0 dB auf -30 dB	50
Abb. 8.2: Sch dB(A)	alldruckpegelverlauf für unterschiedliche Zeitbewertungen; Frequenzkurve:	50
Abb. 8.3: We	llenform des Signals; Ausschnitt aus Beethovens 9. Sinfonie	51
Abb. 8.4: Sch dB(A)	alldruckpegelverlauf für unterschiedliche Zeitbewertungen; Frequenzkurve:	51
Abb. 8.5: Ver	größerung von Abb. 8.4	52
Abb. 9.1: Flus	ssdiagramm des Noise Level Analyzers	53
Abb. 9.2: Fen	sterfunktion window	55
Abb. 9.3: Sig	nalfensterung und Trennung der überlappenden Bereiche	56
Abb. 9.4: Syn	these des gewichteten und gefensterten Signals	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bedienelemente des File Cutters	. 27
Tabelle 2: Bedienelemente des Noise Level Analyzers	. 33
Tabelle 3: Gewichtungsfaktoren der Frequenzkurven im Terzabstand	44

1 Einleitung

Lärm in Schulen ist bereits seit vielen Jahren ein Problem, das tagtäglich auftritt. Ernsthaftes Interesse an dem Thema "Lärm in der Schule" gibt es in Österreich allerdings erst seit wenigen Jahren. Auf der Suche nach den Ursachen für das mäßige Abschneiden Österreichs bei der PISA-Studie rückte dieses Thema schließlich immer mehr in den Vordergrund. Dabei entwickelte sich auch die Arbeitsgemeinschaft Zuhören¹. Die Arge Zuhören führte im Jahr 2005 eine erste Onlinebefragung durch, die sich mit dem Thema "Lärm und Zuhören" befasste. Die Ergebnisse dieser Befragung, an der über 1200 ProbandInnen teilnahmen, waren eher beunruhigend. Allerdings konnte mit diesen Ergebnissen die Gewerkschaft Öffentlicher Dienst davon überzeugt werden, eine repräsentative Untersuchung in Österreich durchzuführen². An dieser Studie, die in den Jahren 2007 und 2008 durchgeführt wurde, nahmen 1459 LehrerInnen teil. Auf die Frage "Wie häufig erscheint Ihnen der Lärm in Ihren Klassen zu laut?" antworteten dabei 39% der Befragten mit eher oft und ca. 20% mit sehr oft. Nur 34% der TeilnehmerInnen antwortete mit manchmal und lediglich 7.4% mit eher selten oder sehr selten (1.8%). Die meisten Lehrkräfte gaben zudem an, sich in Folge von Lärm in ihrem Unterricht beeinträchtigt zu sehen. Des Weiteren fühlten sich über die Hälfte der Befragten aufgrund von Lärm in ihrem Wohlbefinden beeinträchtigt, was deutlich macht, dass der Lärm im Klassenraum auch psychologische Belastungen bei den Lehrkräften hervorruft.

Etwa zeitgleich wurde auch am damaligen Institut für Breitbandkommunikation der TU Graz damit begonnen, sich mit den Themen "Lärm in Schulen" und "Klassenraumakustik" zu beschäftigen. Im September 2009 vollendete Maurice Müller seine Diplomarbeit mit dem Titel *Klassenraumakustik*³. Diese Arbeit untersucht die Auswirkungen von Lärm und Nachhallzeit auf SchülerInnen und Lehrkräfte in einem Klassenzimmer. Zu Beginn werden die akustischen Bedingungen in einem Klassenraum recherchiert. Außerdem wird gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen der Raumakustik und dem Lärmpegel besteht. Anschließend werden unterschiedliche Messungen in verschiedenen Schulen durchgeführt. Diese Ergebnisse beweisen unter anderem, dass es möglich ist, die Akustik eines Klassenraums aufgrund des Baujahrs grob zu typisieren, und dass die laut Norm⁴ geforderten akustischen Ansprüche von den meisten Räumen nicht erfüllt werden.

¹ Siehe http://ehotter.wordpress.com/ (letzter Zugriff am 01.09.2014).

² [HOTTER]

³ [MÜLLER]

⁴ [DIN 18041]

Projektarbeit Entwicklung von Werkzeugen zur Untersuchung der Klassenraumakustik im Unterrichtsbetrieb

Der nächste Schritt an der TU Graz erfolgte durch die Diplomarbeit von Claudia Reithner⁵. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Leitfaden für die *Akustische Sanierung von Klassenräumen* entwickelt. Dieser Leitfaden soll es Laien, die sich bisher noch nicht mit Raumakustik befasst haben, ermöglichen, eine raumakustische Sanierung durchzuführen, da eine professionelle Sanierung in der Regel sehr kostspielig ist. Parallel dazu wurde die erste Version des mit Excel programmierten Tools *IntKlaSim⁶* entwickelt, mit dem eine raumakustische Sanierung simuliert werden kann.

Im Anschluss an diese Arbeit erfolgte die *Anwendung und Überarbeitung des* "*Leitfaden für die akustische Sanierung von Klassenräumen"* durch die Bachelorarbeit von Michael Flohrschütz⁷. Dabei wurde der Leitfaden auf seine Praxistauglichkeit überprüft. Außerdem wurde das Simulationstool *IntKlaSim* um eine umfassende Absorberdatenbank erweitert, um so noch mehr Optimierungsvarianten simulierbar zu machen.

An diese Historie knüpft nun die vorliegende Projektarbeit an. Im Rahmen dieser Projektarbeit wurde zum einen das schon erwähnte Tool IntKlaSim um zahlreiche Funktionen erweitert. So wurden beispielsweise die Simulationsmöglichkeiten von STI und Al_{cons} umfangreich ausgeweitet, indem bei den Ergebnissen der Grundgeräuschpegel berücksichtigt wird. Zum anderen entstanden im Hinblick auf die weitere Untersuchung der Lärmsituation in Klassenzimmern mit dem File Cutter und dem Noise Level Analyzer zwei neue Werkzeuge, die es ermöglichen, die zu untersuchenden Parameter auch räumlich verteilt zu betrachten. Beides sind Matlab-Anwendungen. Mit diesen neu entwickelten Anwendungen ist es möglich, die Lärmsituation in Klassenzimmern an verschiedenen Positionen im Raum zu analysieren, wobei die Analyse in Abhängigkeit der jeweiligen vom Lehrer gewählten Unterrichtsform erfolgt. Hierfür wird ein Unterrichtstag oder eine Unterrichtsstunde mit beliebig vielen Mikrofonen, die im Raum verteilt sind, mitgeschnitten. Die einzelnen Spuren werden im Anschluss mit dem File Cutter nach Unterrichtsform kategorisiert. Daraufhin werden diese kategorisierten Dateien mit dem Noise Level Analyzer ausgewertet. Die Analyse der Lärmsituation im Raum ist zwar auch mit einem herkömmlichen Schallpegelmessgerät möglich, allerdings misst dieses nur das Schallfeld an einem Punkt im Raum. Dadurch, dass die neuen Tools einen Mehrkanalmitschnitt analysieren können, ist es nun möglich, die Lärmsituation im Raum an mehreren Punkten zum selben Zeitpunkt zu analysieren. So können örtliche Unterschiede des Schallfeldes erkannt werden und es kann untersucht werden, an welchen Stellen im Raum die Lärmbelastung für Schüler und Lehrer besonders hoch ist. Da die Mitschnitte vor der Analyse kategorisiert werden, kann zudem untersucht werden, welchen Einfluss verschiedene Unterrichtsformen auf die Lärmausbreitung im Raum haben. Untersuchungen, zu denen die hier entwickelten Werkzeuge herangezogen werden, erfolgen in einer Masterarbeit, die an diese Projektarbeit anschließt. In dieser Masterarbeit sollen unter anderem Messungen durchgeführt werden, die untersuchen, welche Abhängigkeiten zwischen dem Grundgeräuschpegel und der Raumakustik in Klassenräumen bestehen, und die einen Bezug zwischen der Sprechlautstärke des Lehrers und dem Grundgeräuschpegel herstellen. Solche Untersuchungen wurden zwar bereits früher durchgeführt, allerdings wurde bei diesen Untersuchungen nie die räumliche Verteilung der Parameter berücksichtigt. Dies ist mit den Werkzeugen, die in dieser Arbeit entwickelt wurden, ab sofort möglich. Des Weiteren können die Parameter mit der im Raum

⁵ [REITHNER]

⁶ Kurzform für *Int*erdisziplinäres *Klassenraumakustik Sim*ulationstool.

⁷ [FLOHRSCHÜTZ]

herrschenden akustischen Situation in Verbindung gebracht werden. Dabei kann ebenso die räumliche Streuung der Werte betrachtet werden.

In Kapitel 2 dieser Arbeit werden zunächst die Änderungen am Simulationstool *IntKlaSim* vorgestellt. Nachdem diese erläutert wurden, folgt eine Anleitung, die es dem Leser ermöglicht, das Tool selbständig zu bedienen.

In Kapitel 3 werden die Tools zur Lärmbeurteilung vorgestellt. Begonnen wird mit der Beschreibung der Vorgehensweise, die ausgeführt werden muss, wenn diese beiden Anwendungen zur Analyse herangezogen werden sollen. In den beiden folgenden Abschnitten wird zuerst der Umgang mit dem *File Cutter* und anschließend der Umgang mit dem *Noise Level Analyzer* beschrieben.

Die Anhänge enthalten ergänzende Informationen zu den Anwendungen. Anhang A zeigt ein Blockschaltbild, das beschreibt, wie im Tool *IntKlaSim* die einzelnen Werte berechnet werden. Anhang B gibt einen kurzen Überblick über die Eigenschaften der Frequenzbewertungskurven und Anhang C informiert über den Sinn verschiedener Zeitbewertungen. In Anhang D ist erklärt, auf welchem Weg der *Noise Level Analyzer* die Analyseergebnisse berechnet. Anhang E schließlich enthält ein Dateienverzeichnis über alle im Rahmen dieser Arbeit erstellten und abgegebenen Dateien.

2 Das Simulationstool IntKlaSim

Die erste Aufgabe im Rahmen dieser Projektarbeit war es, die Simulationsmöglichkeiten des Tools *IntKlaSim*, welches bereits im Rahmen der Arbeiten von Claudia Reithner⁸ und Michael Flohrschütz⁹ entwickelt und erweitert worden war, auszubauen. Mit diesem Werkzeug kann die akustische Sanierung eines Klassenraums simuliert werden, indem der Einfluss von zusätzlichen Absorbern untersucht wird.

2.1 Bereits realisierte Möglichkeiten des Tools

Mit der alten Version dieser Anwendung war es bereits möglich, die Raumbasisdaten auf dem Tabellenblatt Basisdaten einzugeben, mit denen unter anderem die optimale Nachhallzeit berechnet wird. Die Messwerte konnten auf dem Blatt Import der Messwerte aus der Software ARTA¹⁰ per Knopfdruck importiert werden. Eine Datenbank, aus der auf dem Tabellenblatt Raumakustik Decken- und Wandabsorber für die Simulation ausgewählt werden konnten, war vollständig vorhanden (vgl. Abb. 2.1 Block 1). Ebenfalls war die Möglichkeit gegeben, diese Datenbank um weitere Absorber zu ergänzen. Mit den daraus ausgewählten Absorbern konnten bereits STI und Alcons nach der simulierten Sanierung für den Besetzungszustand, der für die Nachhallzeitmessung zutraf, berechnet werden (vgl. Abb. 2.1 Block 2). Bei der Nachhallzeitsimulation ermöglichte die Anwendung, die Nachhallzeit für den jeweils anderen Besetzungszustand vor der Sanierung zu berechnen und die Auswirkung der Absorber auf die Nachhallzeit für den Besetzungszustand, der bei der Messung gegeben war, zu untersuchen. Diese Ergebnisse wurden grafisch und tabellarisch präsentiert (vgl. Abb. 2.1 Block 3). Am Ende dieses Blattes wurden dem Benutzer ebenfalls grafisch und tabellarisch die für die optimale Nachhallzeit erforderliche zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche und die äquivalente Absorptionsfläche der ausgewählten Absorber angezeigt (vgl. Abb. 2.1 Block 4). Alles in allem hatte das Tabellenblatt Raumakustik dabei vormals folgende Oberfläche:

⁸ [REITHNER]

^{9 [}FLOHRSCHÜTZ]

¹⁰ http://www.artalabs.hr/ (letzter Zugriff am 01.09.2014).





Abb. 2.1: IntKlaSim - Alte Benutzeroberfläche des Tabellenblatts Raumakustik

2.2 Erweiterungen

Das Tabellenblatt *Basisdaten* blieb weitgehend unverändert. Es wurde lediglich zusätzlich zur normalen geforderten Nachhallzeit die Berechnung der Nachhallzeit für erhöhte Anforderungen nach DIN 18041¹¹ ergänzt.

Der Inhalt des Tabellenblatts *Import der Messwerte* blieb gleich. Es wurde nur der Name des Tabellenblatts in *Import der Messwerte vS* (vor Sanierung) geändert, um Verwechslungen mit dem weiter hinten neu eingefügten Tabellenblatt *Import der Messwerte nS* (nach Sanierung) auszuschließen.

Ein Großteil der Änderungen erfolgte auf dem Tabellenblatt *Raumakustik*. Hier wurde die Simulation des STI und des Al_{cons} erweitert, sodass nun unabhängig vom Besetzungszustand diese beiden Parameter sowohl für den leeren als auch für den besetzten Zustand zum Zeit-

¹¹ Vgl. [DIN 18041, S. 12ff.]

punkt der Messung und für eine simulierte Sanierung berechnet werden können (vgl. Abb. 2.2 Block 1 und Block 2). Des Weiteren wurde die Simulation des Al_{cons} dahingehend erweitert, dass der Einfluss von sinkendem SNR auf den Al_{cons} untersucht werden kann (vgl. Abb. 2.2 Block 3). Bei dem Signal-Rauschabstand wird der Lärm der anwesenden Schüler als Rauschquelle oder Grundgeräuschpegel und die Stimme des Lehrers als Signalquelle betrachtet. Ebenso ist es bei der Nachhallzeitsimulation nun möglich, die Nachhallzeit der simulierten Sanierung unabhängig vom Besetzungszustand sowohl für den leeren als auch den besetzten Zustand zu berechnen (vgl. Abb. 2.2 Block 4). Die beiden Tabellen, die sich mit der notwendigen äquivalenten Absorptionsfläche und der äquivalenten Absorptionsfläche der gewählten Absorber befassen, blieben unverändert. Zur Vollständigkeit werden am Ende des Blatts die berechneten Absorptionskoeffizienten des Raums für alle vier Zustände angezeigt (vgl. Abb. 2.2 Block 5). Zudem wurde die Farbgebung generell vereinheitlicht, damit die Tabellenwerte mit den Linien in den Diagrammen farblich übereinstimmen und jeder Sanierungszustand durchgängig durch dieselbe Farbe dargestellt wird. Unter Berücksichtigung aller Erweiterungen erscheint das Blatt nun folgendermaßen:



Abb. 2.2: IntKlaSim - Modifizierte Benutzeroberfläche des Tabellenblatts Raumakustik

Die Absorberdatenbank (Tabellenblätter Absorberliste Decke und Absorberliste Wand) blieb unverändert. Das Tabellenblatt Lärmsituation & Sprechaufwand war in der alten Version überhaupt nicht vorhanden. Auf diesem Blatt wurden die Analysemöglichkeiten des Tools dahingehend erweitert, die Auswirkungen des Grundgeräuschpegels auf STI und Al_{cons} in besetztem Raumzustand untersuchen zu können. Außerdem wird die Verminderung des Grundgeräuschpegels durch die eingebrachten Absorber berechnet. Schlussendlich wird noch ermittelt, wie hoch der vom Lehrer aufgebrachte Sprechaufwand vor und nach der simulierten Sanierung sein muss, um im gesamten Klassenraum verstanden werden zu können. Somit wird nun ebenfalls der Einfluss der Absorber auf den Lombard-Effekt untersucht, der den Zusammenhang zwischen Umgebungsgeräusch und Lautstärke der Stimme eines Sprechers beschreibt. Genauere Informationen zum Lombard-Effekt können Müller¹² entnommen werden.

Die letzte Erweiterung des Tools sieht den Vergleich der simulierten Ergebnisse mit einer real durchgeführten Sanierung vor. Hierfür wurde das Blatt *Import der Messwerte nS* eingefügt, in das Messwerte einer Nachhallzeitmessung nach einer durchgeführten Sanierung importiert werden können. Diese Werte können auf dem darauf folgenden Blatt *Vorher-nachher-Vergleich* mit den Werten vor der Sanierung und den Ergebnissen der simulierten Sanierung verglichen werden, wobei neben der Nachhallzeit auch die Veränderung von STI und Al_{cons} betrachtet wird. Zum Vergleich werden hierbei die Werte des Besetzungszustandes herangezogen, der bei der Nachhallzeitmessung nach durchgeführter Sanierung zutraf. Die Werte des jeweils anderen Besetzungszustandes bleiben bei diesem Vergleich unberücksichtigt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass das Tool nun die Möglichkeit bietet, den Einfluss von Absorbern auf die Akustik in einem Klassenraum noch genauer zu analysieren. Der Einbau des Grundgeräuschpegels hilft dabei, die reale Arbeitssituation im Raum besser nachzubilden, wobei nun auch die Auswirkungen auf den Lombard-Effekt berücksichtigt werden. Durch den Vergleich einer realen Sanierung mit einer simulierten wird eine kritische Gegenüberstellung der Ergebnisse möglich. Selbstverständlich kann dieses Tool nicht nur auf Klassenzimmer angewendet werden, sondern auf alle Räume, in denen eine Optimierung von Nachhallzeit, STI und Al_{cons} notwendig ist. Die einzelnen Schritte, die bei der Simulation durchzuführen sind, werden im nächsten Abschnitt ausführlich beschrieben.

2.3 Vorgehensweise bei der Simulation

In diesem Kapitel wird der Umgang mit dem Excel-Tool *IntKlaSim* erläutert, sodass die Leserin/der Leser nach der Lektüre in der Lage ist, das Tool selbstständig zu bedienen und die Ergebnisse zu interpretieren. Hierbei werden die einzelnen Tabellenblätter nacheinander ihrer Reihenfolge entsprechend besprochen. Diese Reihenfolge sollte auch bei der Arbeit mit dem Tool beibehalten werden. Auf eine Erläuterung der Rechenwege wird hierbei verzichtet. Um diese für einzelne Werte nachvollziehen zu können, sei an dieser Stelle entweder auf die Tabellenblätter *Hilfswerte_Raumakustik* und *Hilfswerte_Lärmsituation*, die vorher eingeblendet werden müssen, oder auf das Blockschaltbild des Tools¹³ verwiesen.

¹² Vgl. [MÜLLER, S. 114ff.]

¹³ Siehe Anhang A: Das Blockschaltbild von IntKlaSim

2.3.1 Intro

Nachdem die Anwendung geöffnet wurde, erscheint zunächst folgendes Blatt:



Abb. 2.3: IntKlaSim - Intro

Dieses Blatt beinhaltet eine kurze Beschreibung der Möglichkeiten, die dieses Tool bietet, sowie weiterführende Literaturhinweise. Eine Eingabe von Daten ist noch nicht erforderlich.

2.3.2 Basisdaten



Abb. 2.4: IntKlaSim - Basisdaten

Die ersten Daten müssen auf dem darauf folgenden Blatt *Basisdaten* eingegeben werden. Hierbei handelt es sich um die Raumbezeichnung, das Baujahr, die maximale Anzahl der SchülerInnen, die den Raum nutzen, und die Raummaße (hellorange hinterlegte Zellen). In der Zelle F8 muss zudem die akustisch nicht nutzbare Wandfläche angegeben werden. Damit sind Oberflächen gemeint, die nicht mit Absorbern verdeckt werden können, wie beispielsweise Fenster, Türen oder Tafeln. Aus diesen Eingaben werden nun Raumvolumen und verschiedene Oberflächenabmessungen berechnet. Aus dem Raumvolumen wiederum wird für diesen Raum die optimale Nachhallzeit sowie die Sollnachhallzeit für erhöhte Anforderungen¹⁴ ermittelt. Durch die Auswahl des Baujahrs des Raums wird im Diagramm eine für das Baujahr typische Nachhallzeit dargestellt. Diese Werte entstammen der Diplomarbeit von Maurice Müller¹⁵ und sind lediglich grobe Näherungen.

2.3.3 Import der Messwerte vor Sanierung



Abb. 2.5: IntKlaSim - Import der Messwerte vS; ohne Daten

Auf diesem Blatt werden die Messwerte der Nachhallzeitmessung geladen, die mit der Software ARTA durchgeführt wurde. Zunächst muss in Zeile 3 angegeben werden, ob sich der Raum bei der Nachhallzeitmessung im leeren oder besetzten Zustand befand. Anschließend werden die Messwerte importiert. Wurden die Ergebnisse der Nachhallzeitmessung mit ARTA als csv-Datei abgespeichert, müssen hier nicht alle Messwerte einzeln eingegeben werden, sondern können per Klick auf die Schaltfläche Messwerte importieren (A5) einfach geladen werden. (Die Messergebnisse der Nachhallzeitmessung können in ARTA über Analysis \rightarrow ISO3382 – acoustical parameters \rightarrow Table presentation for 1/1 octave bands als csv-Datei exportiert werden.)

¹⁴ nach [DIN 18041, S. 12ff.]

¹⁵ Vgl. [MÜLLER, S. 266ff.]

Name	Änderungsdatum	Тур	Größe	
强 Raum006_L1_M1	08.01.2014 18:00	Microsoft Excel-C	1 KB	
Raum006_L1_M2	08.01.2014 18:00	Microsoft Excel-C	1 KB	
Raum006_L1_M3	08.01.2014 18:01	Microsoft Excel-C	1 KB	
🚯 Raum006_L1_M4	08.01.2014 18:01	Microsoft Excel-C	1 KB	
强 Raum006_L1_M5	08.01.2014 18:01	Microsoft Excel-C	1 KB	
强 Raum006_L1_M6	08.01.2014 18:02	Microsoft Excel-C	1 KB	Wählen Si
🚲 Raum006_L2_M1	08.01.2014 18:03	Microsoft Excel-C	1 KB	eine Date
🚵 Raum006_L2_M2	08.01.2014 18:03	Microsoft Excel-C	1 KB	für die Vorschau
3 Raum006_L2_M3	08.01.2014 18:03	Microsoft Excel-C	1 KB	aus.
3 Raum006_L2_M4	08.01.2014 18:04	Microsoft Excel-C	1 KB	
3 Raum006_L2_M5	08.01.2014 18:04	Microsoft Excel-C	1 KB	
3 Raum006_L2_M6	08.01.2014 18:04	Microsoft Excel-C	1 KB	
per I			- CSV	

Abb. 2.6: IntKlaSim - Import der Messwerte vS; Dialogfenster für den Messwerteimport

Hierbei ist es auch möglich, mehrere Messreihen gleichzeitig auszuwählen und simultan in das Tool zu laden. Die Werte für STI male, STI female und Al_{cons} müssen allerdings händisch aus *ARTA* übernommen werden. (Diese lassen sich in *Analysis* \rightarrow *STI* finden.) Auf eine detaillierte Einführung in die Software *ARTA* wird an dieser Stelle verzichtet. Diesbezüglich sei auf die Diplomarbeit von Claudia Reithner verwiesen¹⁶. Wurden falsche Messwerte importiert, so lassen sich diese leicht entfernen, indem in der Spalte E der entsprechende Messwert markiert wird und danach durch einen Klick auf *Messwerte entfernen* (A6) dieser Eintrag gelöscht wird. Wurden alle Messwerte korrekt importiert und eingetragen, ergibt sich abschließend folgendes Bild:

E	Datei Start Einfüg	en Seitenl	layout F	ormeln D	aten I	Überprüfen Ar	nsicht Entwickler	tools												_
	📺 🔏 Ausschneiden	Calibri	-	12 - A*	=	- 8	a Zeilenumbruch		Standa	nd				1	2	Standa	and	Gut		Ne
	Kopieren 👻	conorr			a (stantaa			-	<u> 1</u>		10					
EII	🗸 🛷 Format übertrag	gen F K	Π - 🖽	- 🔗 - 🗛	· =	≡≡∣∉∉	Verbinden und	zentrieren *	- 22	% 000	,60 ,0	Form	atierun	Als form	labelle atieren 1	Ausga	be	Bere	chnung	Ein
	Zwischenablage	G	Schriftar	t	G	Au	srichtung	G		Zahl	1							Formati	rorlagen	
	Δ2 -	(f																		
	1		-	0		0				W				0	0	0	0	0	-	
- 4	A	D	L	U						ĸ	L	M	N	0	P	ų	к	5		0
1						Import of	der Messwer	rte vor Si	anier	ung										
2		1																		
3	Raum war bei Messung:	leer				< Achtungi (
4						•		1	1											
-	Manual a lange time					[A second start	5 (U))	720 (1)		700 (-)	- 720	T40 (-)	-740	FOT (-)	coo (Ho)	or o (day	050 (01)	Televal	
5	wesswerte importieren	51		%Alcons	E Charles		Messdater	F (HZ)	130 (5)	F130	120 (s)	F120	110 (s)	1110	EDT (S)	C80 (dB)	CSU (dB)	050 (%)	is (ms)	
6	Messwerte entfemen	male	female		Status		Raum006_L1_M1	63	1,22	-1	1,22	-1	1,12	-0,99	0,97	1,49	-1,36	42,22	106,66	
7	Messdatei / Mittelwert	0,5291	0,5357	9,22%			Raum006_L1_M1	125	1,38	-1	1,26	-1	1,21	-0,99	1,32	1,17	-1,38	42,15	90,99	
8	Raum006_L1_M1	0,5505	0,5578	8,36%	OK		Raum006_L1_M1	250	1,57	-1	1,569	-1	1,45	-0,98	1,03	1,92	-1,54	41,25	86,29	
9	Raum006_L1_M2	0,5233	0,5312	9,49%	OK		Raum006_L1_M1	500	1,57	-1	1,571	-1	1,61	-0,99	1,50	0,51	-2,36	36,73	107,81	
10	Raum006_L1_M3	0,5316	0,5403	8,98%	OK		Raum006_L1_M1	1.000	1,58	-1	1,618	-1	1,68	-1	1,73	1,44	-0,62	46,45	102,49	
11	Raum006_L1_M4	0,5078	0,5120	10,24%	OK		Raum006_L1_M1	2.000	1,44	-1	1,441	-1	1,44	-1	1,41	2,1	-0,85	45,11	89,90	
12	Raum006_L1_M5	0,5207	0,5270	9,42%	OK		Raum006_L1_M1	4.000	1,05	-1	1,038	-1	1,01	-1	1,00	3,72	0,84	54,82	65,00	
15	Raum006_L1_M6	0,5264	0,5350	9,30%	OK		RaumOO6_L1_M1	8.000	0,95	-1	1,020	-1	1.29	-1	1.20	4,06	1,19	20.74	108.05	
15	Raum006_L2_M1	0,5394	0,5455	8 54%	OK		Raum006_L1_M2	125	1 29	-0,99	1,029	-0,55	1 17	-0,99	1,20	0.24	-3,55	25.49	106.76	
16	Raum006_L2_M2	0,5551	0,5433	7 98%	OK		Raum006_L1_M2	250	1.52	1	1 335	- 1	1 36	-0,55	1 24	-0.71	-4,00	36.77	102.56	
17	Raum006 L2 M4	0.5022	0.5098	10.96%	OK		Raum006 L1 M2	500	1.63	-1	1.582	-1	1.64	-1	1.69	0.51	-2.56	35.68	116.51	
18	Raum006 L2 M5	0,5294	0,5354	9,03%	OK		Raum006 L1 M2	1.000	1,56	-1	1,546	-1	1,60	-1	1,64	0,36	-2,66	35,17	117,23	
19	Raum006_L2_M6	0,5263	0,5306	9,38%	OK		Raum006_L1_M2	2.000	1,46	-1	1,405	-1	1,31	-1	1,40	-0,3	-2,74	34,71	108,86	
20)						Raum006_L1_M2	4.000	1,07	-1	1,059	-1	1,09	-1	1,10	2,93	0,32	51,82	75,08	
21							Raum006_L1_M2	8.000	0,97	-1	0,977	-1	0,98	-1	0,98	3,44	0,4	52,28	69,33	
22	1						Raum006_L1_M3	63	1,88	-0,99	1,873	-0,99	1,34	-0,99	1,16	2,14	1,36	57,78	150,86	
23	1						Raum006_L1_M3	125	1,39	-1	1,472	-1	1,51	-0,99	1,41	1,36	-1,46	41,66	107,46	
24	1						Raum006_L1_M3	250	1,42	-1	1,51	-1	1,60	-1	1,47	2,01	-1,08	43,8	97,19	
25							Raum006_L1_M3	500	1,69	-1	1,59	-1	1,50	-0,99	1,44	0,01	-2,12	38,02	115,72	
26	2 r						RaumOO6_L1_M3	1.000	1,61	-1	1,591	-1	1,58	-1	1,58	-0,52	-2,96	33,61	121,69	
20							Raumoo6_L1_MS	2.000	1,40		1,429		1,04		1,47	0,75	-2,30	50,02	67.02	
29	1						Raum006_L1_M3	8,000	0.96	-1	0.941	-1	0.88	-1	0.87	4 41	0.84	54.81	62 41	
30)						Raum006 L1 M4	63	0.89	-0.98	0.966	-0.99	1.03	-0.97	0.98	-2.39	-5.49	22.04	290 59	
31							Raum006 L1 M4	125	1,37	-1	1,292	-1	1.22	-1	1.20	1.37	-1.09	43,77	106.22	
32	1						Raum006_L1_M4	250	1,52	-1	1,458	-1	1,39	-1	1,32	-0,58	-3,78	29,54	114,55	
33	1						Raum006_L1_M4	500	1,61	-1	1,621	-1	1,50	-0,99	1,71	0,01	-3,53	30,73	123,44	
34	4						Raum006_L1_M4	1.000	1,56	-1	1,613	-1	1,55	-1	1,55	-1,07	-4,39	26,68	128,20	
35	i						Raum006_L1_M4	2.000	1,42	-1	1,385	-1	1,26	-1	1,37	-0,44	-3,91	28,9	117,19	
36	i						Raum006_L1_M4	4.000	1,04	-1	1,043	-1	1,00	-1	1,03	1,83	-1,56	41,11	86,08	
37							Raum006_L1_M4	8.000	0,95	-1	0,948	-1	0,90	-1	0,95	2,66	-0,96	44,51	77,50	
38	5						RaumOO6_L1_M5	63	1,12	-0,97	1,214	-0,98	0,92	-0,97	0,95	-2,57	-4,53	26,04	//0,93	
39							Raumoue_L1_M5	125	1,32	-1	1,31	-1	1,50	-0,99	1,12	0,05	-4,6	25,/3	109.50	
40							Raum006_L1_W5	250	1.62	1	1,42/	-1	1.30	-0.00	1,41	-1.59	-1,48	41,05	125.61	
42							Raum006 L1 M5	1 000	1.51	-1	1 487	-1	1.46	-1	1 55	-0.52	-2.66	35.14	117.90	
43							Raum006 L1 M5	2.000	1.38	-1	1.387	-1	1.38	-1	1.36	-0.45	-3,14	32.67	108.55	
44	1						Raum006_L1_M5	4.000	1,04	-1	1,042	-1	1,01	-1	1,00	2,68	-0,32	48,13	75,67	
45	i						Raum006_L1_M5	8.000	0,94	-1	0,937	-1	0,92	-1	0,90	3,49	0,1	50,55	68,38	
46	5						Raum006 L1 M6	63	1.04	-1	1.102	-0.99	1.00	-0.96	1.00	-0.18	-5.52	21.92	158.97	

Abb. 2.7: IntKlaSim - Import der Messwerte vS; mit Daten

¹⁶ Vgl. [REITHNER, S. 40ff.]

2.3.4 Raumakustik



Abb. 2.8: IntKlaSim - Raumakustik

Auf dem darauf folgenden Blatt *Raumakustik* kann mit der Simulation der akustischen Sanierung begonnen werden. Zunächst müssen dafür in den Zellen B52 bis B57 Decken- bzw. Wandabsorber aus dem Dropdown-Menü ausgewählt werden. Die genauen technischen Daten der Absorber sind den Blättern *Absorberliste Decke* und *Absorberliste Wand* zu entnehmen. Diese beiden Blätter müssen vorher gegebenenfalls eingeblendet werden. Die gewünschte Quadratmeterzahl ist in den Zellen I52 bis I57 anzugeben. Die maximal zulässigen Abmessungen der Absorber, die aus den Raumabmessungen berechnet wurden, sind in Zelle M52 für die Decke und in Zelle M54 für die Wand benannt. Sollten die gewählten Größen der Absorber im Konflikt mit diesen Maximalwerten stehen, ändert sich die Schriftfarbe in rot und es muss eine kleinere Quadratmeterzahl angegeben werden, um fortfahren zu können.

Unterhalb dieser Tabelle ist der Einfluss der gewählten Absorber auf die Nachhallzeit zu erkennen (vgl. Abb. 2.8 Block 1). Im Diagramm ist ebenfalls das Toleranzband der Nachhallzeit und die Nachhallzeit für erhöhte Anforderungen angegeben, die beide aus den *Basisdaten* berechnet wurden. Bei der Auswahl der Absorber ist nun darauf zu achten, dass die Werte der *Nachhallzeit im besetzten Zustand simulierte Sanierung* den Werten der *Nachhallzeit für erhöhte Anforderungen* möglichst nahe kommen. Eine Unterschreitung der Werte ist allerdings auch nicht wünschenswert, da die Akustik sonst zu trocken würde. Dadurch würde die Sprachverständlichkeit im Raum verschlechtert und der Lehrer müsste mit einem größeren Stimmaufwand sprechen, um im gesamten Raum verstanden werden zu können. Alle Kurven im Diagramm lassen sich wahlweise ausblenden, indem das Häkchen bei der jeweiligen Datenreihe entfernt wird. Soll die Kurve wieder eingeblendet werden, genügt es, eine beliebige Eingabe in der jeweiligen Zelle zu tätigen.

Oberhalb der Absorbertabelle wird die Auswirkung der eingebrachten Absorber auf den STI, den Al_{cons} und den Al_{cons} in Abhängigkeit vom SNR simuliert (vgl. Abb. 2.8 Block 2). Die schwarzen Werte beziehen sich dabei auf den Zustand des Raums bei der Nachhallzeitmessung. Bei den blauen Werten wird der Einfluss der ausgewählten Absorber berücksichtigt. Bei der Auswahl der Absorber ist darauf zu achten, dass der STI bei der Simulation einen möglichst großen Wert und der Al_{cons} einen möglichst kleinen Wert erreicht. Bei dem Vergleich von Al_{cons} zu SNR sind die Werte bei 10 und 15 dB SNR besonders wichtig, da diese dem gewöhnlichen SNR von Grundgeräuschpegel der Schüler zur Lehrerstimme in einem normalen Klassenzimmer entspricht. Hierbei ist ebenfalls eine möglichst große Senkung der Werte anzustreben.

Unter der Nachhallzeit sind zwei Tabellen und eine Grafik zu sehen, die sich mit der erforderlichen äquivalenten Absorptionsfläche beschäftigen (vgl. Abb. 2.8 Block 3). Die obere Tabelle, bzw. rote Kurve, enthält die Absorptionsfläche, die in den Raum eingebracht werden muss, um die optimale Nachhallzeit zu erreichen. Die untere Tabelle, bzw. blaue Kurve, beinhaltet die äquivalente Absorptionsfläche der ausgewählten Absorber. Zeigt die blaue Kurve näherungsweise denselben Verlauf wie die rote Kurve, ist die optimale Nachhallzeit erreicht. Zur Vollständigkeit sind am Ende des Blattes die Absorptionskoeffizienten des Raums im jeweiligen Besetzungszustand mit und ohne Absorber angeführt (vgl. Abb. 2.8 Block 4).

2.3.5 Lärmsituation und Sprechaufwand



Abb. 2.9: IntKlaSim - Lärmsituation und Sprechaufwand

Auf dem Blatt Lärmsituation und Sprechaufwand muss in Zelle J3 der Grundgeräuschpegel des leeren Raums vor der Sanierung eingetragen werden, sodass dieser in die Simulation miteinbezogen wird. Der Grundgeräuschpegel wird idealerweise ebenfalls bei der Nachhallzeitmessung mit einem Schallpegelmessgerät gemessen. Zudem muss in Zelle C3 die Anzahl der tatsächlich anwesenden Schüler eingegeben werden. Sollte versehentlich eine größere Schülerzahl, als die in den Basisdaten als maximal zulässig definierte, eingegeben worden sein, ändert sich die Schriftfarbe wiederum in rot und eine geringere Zahl muss eingetragen werden. Nun wird der Grundgeräuschpegel des Raums im besetzten Zustand vor der Sanierung, der mithilfe des Grundgeräuschpegels des leeren Raums und der Anzahl der Schüler ermittelt wird, und der Grundgeräuschpegel nach der simulierten Sanierung berechnet, indem der Einfluss der Absorber berücksichtigt wird. Daraufhin wird untersucht, welchen Einfluss dieser Grundgeräuschpegel auf den STI und den Al_{cons} nimmt (vgl. Abb. 2.9 Block 1 und Block 2). In der linken unteren Grafik werden die verschiedenen Grundgeräuschpegel miteinander verglichen (vgl. Abb. 2.9 Block 3). Zuletzt wird anhand des Grundgeräuschpegels der Schalldruckpegel berechnet, mit dem der Lehrer sprechen muss, um von der gesamten Klasse verstanden werden zu können (vgl. Abb. 2.9 Block 4). Studien haben dabei bewiesen, dass die Lehrerstimme den Grundgeräuschpegel um ca. 11 dB übertrifft¹⁷. Für diesen notwendigen Schalldruckpegel wird ebenfalls ein Wert nach der simulierten Sanierung berechnet, der den durch die eingebrachten Absorber veränderten Grundgeräuschpegel berücksichtigt.

¹⁷ Vgl. [SATO, S. 2073.]

2.3.6 Import der Messwerte nach Sanierung

	📲 💑 Ausschneiden	Calibri	÷	12 * A	Ă,	=	= >	Zeilenumbruch		Standa	d			≤₹		1	Standa	rd	Gut	
Einfü	igen	F K	U - 99	- 3-	Α-	= 3	≡ 健 €	Verbinden und zei	ntrieren -	<u>م</u>	% 000	*.0 .00	Be	dingte	Als 1	Tabelle	Ausgal	е	Bere	chnu
	 Format übertrag 	en			-					~		,00 -,0	Form	atierung	r * forma	atieren *				
	Zwischenablage	G 6	Schriftar	t	19			Ausrichtung	Gi .		Zahi	6							Formati	/orlag
4	A2 .	R	C	D	F	F	6	н	1	1	ĸ	1	M	N	0	P	0	R	s	
-			-				mnart	der Messworte	nach (anio							u.		0	
1							проге	uer messwerte	nach s	same	rung									
2	in the later way	loor				. 7														
2	aum war bei messung: j	leel			_				ites massen	nuon tes										
4	Messwerte importieren	STI			5			Messdatei	F (Hz)	T30 (s)	rT30	T20 (s)	rT20	T10 (s)	rT10	EDT (s)	C80 (dB)	C50 (dB)	D50 (%)	Ts (
6	Messwerte entfernen	male	female	%Alcons	fern	Status		Raum006 L1 M1	63	1.25	-0.99	1.084	-1	1.08	-0.99	1.01	2.6	.0.33	48.09	10
7 1	Aessdatei / Mittelwert	0.5786	0.5804	7.08%	E.			Raum006 L1 M1	125	0.99	-1	0.895	-0.99	0.80	-0.98	0.75	2.87	-3.41	31 32	7
8 R	aum006 L1 M1	0.5912	0.5909	6.85%		ОК		Raum006 L1 M1	250	0.99	-1	0.967	-0.99	0.86	-0.99	1.04	2.36	-0.44	47.45	7
9 R	aum006 L1 M2	0.5855	0.5897	6.85%		OK		Raum006 L1 M1	500	1.10	-1	1.028	-1	1.19	-0.99	1.22	4.39	1.93	60.94	e
10 R	aum006 L1 M3	0,5832	0,5843	7,18%		ОК		Raum006 L1 M1	1.000	1,14	-1	1,137	-1	1,16	-1	1,19	3,33	0,82	54.7	7
11 R	aum006 L1 M4	0.5725	0.5775	7.12%		OK		Raum006 L1 M1	2.000	1.17	-1	1.2	-1	1.26	-1	1.11	3.78	0.48	52.74	7
12 R	aum006_L1_M5	0,5463	0,5458	8,20%		ОК		Raum006_L1_M1	4.000	0,93	-1	0,951	-1	1,01	-1	0,97	3,57	0,22	51,26	7
13 R	aum006 L1 M6	0,5616	0,5641	7,45%		ОК		Raum006 L1 M1	8.000	0,87	-1	0,865	-1	0,91	-1	0,85	4,12	0,53	53,07	6
14 R	aum006_L2_M1	0,5907	0,5922	6,93%		ОК		Raum006_L1_M2	63	0,95	-1	0,958	-1	0,96	-0,99	0,97	-0,84	-3,07	33,04	23
15 R	aum006_L2_M2	0,5798	0,5801	6,66%		ОК		Raum006_L1_M2	125	1,02	-0,99	0,87	-1	0,82	-0,99	0,91	3,33	-1,72	40,21	7
16 R	aum006_L2_M3	0,6088	0,6118	6,11%		OK		Raum006_L1_M2	250	1,02	-1	0,966	-1	1,03	-0,99	0,94	5,04	-0,19	48,89	6
17 R	aum006_L2_M4	0,5686	0,5694	7,69%		OK		Raum006_L1_M2	500	1,16	-1	1,093	-1	1,09	-1	0,87	3,75	-1,16	43,38	7
18 R	aum006_L2_M5	0,5792	0,5831	6,67%		OK		Raum006_L1_M2	1.000	1,16	-1	1,181	-1	1,21	-1	1,09	2,76	-1,07	43,88	7
19 R	aum006_L2_M6	0,5759	0,5756	7,28%		OK		Raum006_L1_M2	2.000	1,13	-1	1,165	-1	1,13	-1	1,17	3,28	0,32	51,83	7
20								Raum006_L1_M2	4.000	0,95	-1	0,922	-1	0,90	-1	0,96	4,02	1,69	59,62	5
21								Raum006_L1_M2	8.000	0,85	-1	0,841	-1	0,85	-1	0,89	5,37	2,67	64,89	4
22								Raum006_L1_M3	63	1,00	-0,99	1,094	-1	1,20	-0,99	1,21	0,48	-1,86	39,46	17
23								Raum006_L1_M3	125	0,99	-1	1,036	-0,99	0,89	-0,99	0,89	1,14	-2,38	36,62	8
24								Raum006_L1_M3	250	1,03	-1	1,011	-1	0,92	-0,99	0,93	2,81	-1,25	42,83	8
25								Raum006_L1_M3	500	1,13	-1	1,065	-1	1,06	-1	1,21	2,65	1,13	56,47	7
26								Raum006_L1_M3	1.000	1,17	-1	1,159	-1	1,21	-1	1,18	2,1	-1,06	43,9	8
27								Raum006_L1_M3	2.000	1,16	-1	1,157	-1	1,25	-1	1,20	2,01	-0,51	47,1	8
28								Raum006_L1_M3	4.000	0,96	-1	0,959	-1	0,96	-1	0,88	2,77	-0,65	46,26	7
29								Raum006_L1_M3	8.000	0,88	-1	0,851	-1	0,85	-1	0,82	3,54	0,25	51,46	6
sU								Raum006_L1_M4	63	0,87	-0,99	0,97	-0,99	0,76	-0,96	0,84	-0,68	-4,38	26,73	24
51								Raum005_L1_M4	125	0,94	-1	0,975	-0,99	1,20	-0,98	0,82	1,98	-1,52	41,36	8
2								RaumOO5_L1_M4	250	1,07	-1	1,078	-1	1,15	-1	1,13	3,/7	1,36	57,78	7
24								Raum005_L1_M4	1 000	1,12	-1	1,073	-1	1,08	-1	0,97	1,02	-1,08	43,8	8
94 95								Raumouo_L1_M4	1.000	1,10	-1	1,095	-1	1,13	-1	1,17	-0,09	-3,23	32,2	9
20								ReumODE L1_M4	2.000	1,10	-1	1,14/	-1	1,19	-1	1,20	2,05	-0,78	45,55	8
87								Raum006_L1_M4	4.000	0,94	-1	0,949	-1	0,90	-1	0.87	3,44	0,18	52.44	6
28								Raum006 L1 M5	63	0,60	-0.04	0.761	-1	0,67	-1	0,07	-0.49	-1.9	39.22	1 20
20								Raum006 L1 M5	125	0,77	-0,54	0.871	-0.00	0,00	-0.99	0,50	-0,49	-1,9	46.28	1.29
10								Raum006 L1 M5	250	1.07	-1	1.082	-0.00	1.15	-0.97	0.80	-0.01	-2.83	34.26	
11								Raum006 L1 M5	500	1.11		1,092	-1	1.14	-0.90	1.18	1.44	-2,65	36.73	0
12								Raum006 L1 M5	1 000	1 17	-1	1 168	-1	1.14	-1	1.21	1.15	-1.3	42 54	8
43								Raum006 L1 M5	2.000	1.15	-4	1.159	1	1.10	-1	1.15	0.42	-2.82	34.34	9
44								Raum006 L1 M5	4.000	0.96	-1	0.952	-1	0.90	-1	0.99	1.94	-1.73	40.15	8
15								Raum006 L1 M5	8.000	0.88	-1	0.874	-1	0.85	-1	0.90	2.72	-0.95	44.53	7
																		1 A 1 A 1 A 1 A 1 A 1 A 1 A 1 A 1 A 1 A	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	

Abb. 2.10: IntKlaSim - Import der Messwerte nS

Wurde eine reale Sanierung des Raums durchgeführt, so ist es mit diesem Tool ebenfalls möglich, diese mit dem simulierten Resultat und dem Zustand davor zu vergleichen. Hierfür müssen auf dem Tabellenblatt *Import der Messwerte nS* zunächst wieder die Messwerte nach der durchgeführten Sanierung in Analogie zum Blatt *Import der Messwerte vS* in das Tool importiert werden.

2.3.7 Vergleich von T30, STI und $\mathrm{Al}_{\mathrm{cons}}$ bevor und nach der Sanierung



Abb. 2.11: IntKlaSim - Vorher-nachher-Vergleich

Auf dem letzten Tabellenblatt *Vorher-nachher-Vergleich* werden nun die jeweiligen Veränderungen von Nachhallzeit, STI und Al_{cons} miteinander verglichen. Bei STI und Al_{cons} beziehen sich die schwarzen Werte auf den Zustand vor der Sanierung, die blauen Werte beschreiben die simulierte Sanierung und die grünen Werte stellen den Zustand nach der durchgeführten Sanierung dar. Ob die Ergebnisse der durchgeführten Sanierung mit den Simulationen im leeren oder besetzten Zustand verglichen werden, ist abhängig vom Besetzungszustand, in dem sich der Raum bei der Nachhallzeitmessung nach der durchgeführten Sanierung befand. Im Diagramm lassen sich einzelne Kurven auf dieselbe Weise, wie auf dem Blatt *Raumakustik*, aus- und einblenden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass das Simulationstool um zahlreiche Erweiterungen ergänzt wurde, die es möglich machen, die Akustik des Raums nach einer Sanierung noch genauer und vielseitiger zu simulieren. Durch die Einbeziehung des Grundgeräuschpegels in die Simulation ist es möglich, die reale Arbeitssituation im Raum noch besser nachzubilden. Im folgenden Kapitel werden die zwei Matlab-Anwendungen präsentiert, mit denen die Lärmsituation im Klassenraum untersucht werden kann.

3 Analysewerkzeuge zur Untersuchung von Lärm in Klassenräumen

3.1 Vorgehensweise bei der Analyse

In diesem Kapitel werden die Punkte beschrieben, nach denen vorgegangen werden muss, um die Lärmsituation in einem Klassenraum mit dem *File Cutter* und dem *Noise Level Analyzer* untersuchen zu können.

Vor der eigentlichen Analyse ist es zunächst notwendig, einen Unterrichtstag oder eine Unterrichtsstunde mit mehreren Mikrofonen mitzuschneiden. Herkömmliches Aufnahmeequipment ist hierfür ausreichend. Lediglich bei der Mikrofonauswahl sollte beachtet werden, dass Mikrofone mit Kugelcharakteristik zum Einsatz kommen. Die Mikrofone werden dabei an verschiedenen Stellen im Raum positioniert, an denen das Schallfeld analysiert werden soll. Vor der Aufnahme müssen die Mikrofone einzeln kalibriert werden. Es ist unerlässlich, bereits die Kalibrierung aufzuzeichnen, da der Noise Level Analyzer später den zeitlichen Schalldruckpegelverlauf berechnet und daher ein Referenzsignal benötigt. Nachdem die Kalibrierung abgeschlossen ist, darf an den Vorverstärkern keine weitere Veränderung vorgenommen werden, da andernfalls die Analyse verfälscht würde. Nun kann der eigentliche Mitschnitt gestartet werden. Während des Unterrichts muss hierbei eine Liste angefertigt werden, auf der notiert wird, zu welchem Zeitpunkt der Lehrer welche Unterrichtsform gewählt hat (z. B. Lehrervortrag oder Gruppenarbeit). Nachdem der Unterricht beendet worden ist, müssen die aufgenommenen Spuren einzeln als wave-Dateien exportiert werden. Zu jeder Spur muss dabei auch eine wave-Datei erstellt werden, die das zugehörige Signal des Kalibrators enthält. Daraufhin werden die Spuren einzeln in die erste Matlab-Anwendung, den File Cutter, geladen. Dort erfolgt die Kategorisierung des Unterrichtmitschnitts nach den gewählten Unterrichtsformen. Nachdem dies abgeschlossen ist, kopiert die Anwendung alle Abschnitte, die zu derselben Unterrichtsform gehören, in eine separate wave-Datei. Diese Dateien werden zusammen mit ihrer jeweiligen Kalibrierungsdatei in die zweite Matlab-Anwendung, den Noise Level Analyzer, geladen. Der Noise Level Analyzer berechnet daraufhin zunächst den zeitlichen Schalldruckpegelverlauf. Von diesem Schalldruckpegelverlauf wird anschließend das Histogramm berechnet, mit dem eine Pegelstatistik berechnet wird, die auf Wunsch exportiert werden kann. Dieses Histogramm kann zusammen mit der kumulierten Summe angezeigt werden. Abschließend besteht die Möglichkeit, die geladene Datei spektral zu analysieren. Alle Darstellungen können als jpeg-Datei exportiert werden.

Eine Anleitung für das Arbeiten mit dem *File Cutter* liefert das nächste Kapitel, der Umgang mit dem *Noise Level Analyzer* wird in Kapitel 3.3 erläutert.

3.2 Der File Cutter



3.2.1 Überblick über die Bedienelemente

Abb. 3.1: Der *File Cutter* im Überblick

1	Plot-Fenster	Zeigt den zeitlichen Verlauf des Signals und die selektierten Bereiche an.
2	Marker	Kennzeichnen die selektierten Bereiche farbspezifisch nach Unterrichtsform.
3	Schaltfläche	Durch Drücken dieses Knopfes kann die Datei, die bearbeitet werden soll, geladen
	Load File	werden.
4	Informationsfenster	Gibt Rückmeldung über den Fortschritt beim Laden.
	1	
5	Informationsfenster	Zeigt den Namen der geladenen Datei an.
	2	
6	Informationsfenster	Auflösung der zeitlichen Darstellung des Mitschnitts; pro Sekunde wird standard-
	Plot Resolution	mäßig ein Sample dargestellt.
7	Schaltfläche Select	Durch einen Klick auf diese Schaltfläche kann in (1) ein beliebiger Bereich mar-
	File Sequence	kiert werden.
8	Audio Player	Wiedergabe des mit (7) selektierten oder in (12) ausgewählten Bereichs.
9	Informationsfenster	Zeigt die Start- und Endzeit des mit (7) selektierten Abschnitts an.
	3	
10	Schaltfläche Undo	Löscht den mit (7) selektierten Bereich.
11	Popup-Menü	Ordnet dem mit (7) selektierten Abschnitt eine Unterrichtsform zu.
	Unterrichtsform	

Projektarbeit	Entwicklung von W	erkzeugen zur	Untersuchung der	Klassenraumakustik im	Unterrichtsbetrieb
---------------	-------------------	---------------	------------------	-----------------------	--------------------

12	Tabelle	Zeigt die abgespeicherten kategorisierten Abschnitte an.
	Stored Data	
13	Schaltfläche	Speichert den mit (7) ausgewählten Abschnitt mit der durch (11) zugeordneten Un-
	Store Selected Data	terrichtsform in (12) ab.
	in List	
14	Schaltfläche	Löscht einen gespeicherten Abschnitt, der in (12) angewählt wurde.
	Delete selected Se-	
	quence	
15	Schaltfläche	Speichert die kategorisierten Abschnitte in Abhängigkeit von der Unterrichtsform
	Save Files	in separaten wave-Dateien.
16	Informationsfenster	Gibt Rückmeldung über den Fortschritt beim Speichern.
	4	
17	Informationsfenster	Zeigt die zeitliche Länge der mit (15) gespeicherten Dateien an.
	5	
18	Schaltflächen	Vergrößert oder verkleinert die Darstellung in (1).
	Zoom In / Zoom	
	Out	
19	Schaltflächen	Verschiebt die Darstellung in (1) nach links oder rechts, wenn der Zoom mit (18)
	Scroll left / Scroll	aktiviert wurde.
	right	

Tabelle 1: Bedienelemente des File Cutters

3.2.2 Vorgehensweise bei der Kategorisierung



Abb. 3.2: Anwenderflussdiagramm des File Cutters

Abb. 3.2 zeigt die Schritte an, nach denen bei der Kategorisierung vorgegangen wird. Die dicken Pfeile kennzeichnen dabei den Hauptpfad, dem gefolgt werden muss. Die restlichen Pfeile beschreiben zusätzliche Möglichkeiten und können gegebenenfalls auch weggelassen werden. Zu Beginn muss vom Benutzer eine Datei geladen werden. In dieser Datei werden nacheinander einzelne Abschnitte selektiert, die daraufhin einer Unterrichtsform zugeordnet und in einer Liste abgespeichert werden. Diese Kategorisierung ist beliebig oft wiederholbar. Ist dieser Schritt abgeschlossen, werden die abgespeicherten Abschnitte je nach Unterrichtsform in separate wave-Dateien kopiert. Daraufhin kann der Benutzer das Programm wieder verlassen. Daneben bietet die Anwendung noch weitere praktische Funktionen. Beispielsweise können Abschnitte vor dem Abspeichern über den integrierten Audio Player wiedergegeben oder wieder gelöscht werden. Eine ausführliche Anleitung zur Vorgehensweise liefern die nun folgenden Kapitel.

3.2.2.1 Laden einer Datei

Nach dem Start des Tools muss zunächst die Datei geladen werden, die editiert werden soll. Dies geschieht über die Schaltfläche Load File (3). Während die Datei geladen wird, zeigt das Informationsfenster 1 (4) "Loading File..." an. Die gewünschte Datei muss dabei im selben Ordner abgespeichert sein, in dem sich auch die matlab-Datei des File Cutters befindet. Dateien in anderen Ordnern können nicht geladen werden. Bei der Datei, die geladen werden soll, muss es sich um eine wave-Datei handeln; andere Dateiformate können nicht bearbeitet werden. Sobald die komplette Datei geladen ist, erscheint im Informationsfenster 1 (4) der Hinweis "File is Loaded". Zudem wird im Informationsfenster 2 (5) der Name der geladenen Datei angezeigt. Beim Laden der Datei gilt: je größer die Datei, umso länger dauert der Ladevorgang. Da es sich bei den Unterrichtsmitschnitten um Dateien handelt, die durchaus eine Länge von über einer Stunde haben können, kann der Ladevorgang längere Zeit in Anspruch nehmen. Im Plot-Fenster (1) wird daraufhin die datenreduzierte Wellenform der geladenen Datei angezeigt. Pro Sekunde wird dabei jeweils das erste Sample dargestellt. Dies ist nötig, da anderenfalls die nun folgende Auswahl der Start- und Endpunkte der Abschnitte zu rechenintensiv wäre und sehr lange dauern würde. Dass ausgerechnet diese Darstellung gewählt wurde, hat mehrere Gründe: Würde man über eine Sekunde den Mittelwert der Samples bilden, ist das Ergebnis im schlechtesten Fall Null. Daher wurde diese Variante nicht gewählt. Der Vorteil, wenn pro Sekunde nur das erste Sample dargestellt wird, liegt darin, dass bei großen Dateien die Wellenform erkennbar bleibt und laute Passagen klar von leisen unterschieden werden können. Die Datenreduktion um den Faktor der Samplefrequenz ist ausreichend genug, sodass Abschnitte in großen Dateien genauso schnell selektiert werden können wie in kleinen Dateien. Aufgrund der Datenreduktion ist daher nur eine sekundengenaue Kategorisierung möglich, was allerdings bei der zu erwartenden Länge der Dateien von mindestens einer Unterrichtsstunde kein Problem darstellt. Die Anzahl der dargestellten Samples pro Sekunde werden auch im Informationsfenster Plot Resolution (6) angezeigt.



Abb. 3.3: Laden einer Datei

3.2.2.2 Auswahl eines Abschnitts

Durch Drücken der Schaltfläche *Select File Sequence* (7) kann der Start- und Endpunkt eines Abschnitts ausgewählt werden, der kategorisiert werden soll. Nachdem auf die Schaltfläche geklickt wurde, erscheint im Plot-Fenster (1) ein Fadenkreuz, mit dem durch einen Klick auf die gewünschte Stelle in der Darstellung jeweils Start- und Endpunkt des gewünschten Bereichs ausgewählt werden kann. Der erste markierte Punkt wird mit einem roten Kreuz markiert, bis zusätzlich ein zweiter Punkt ausgewählt wurde. Dabei ist es unerheblich, ob zuerst der Start- oder der Endpunkt ausgewählt wird. Der Punkt mit der kleineren Zeitangabe wird automatisch als Startpunkt definiert. Der selektierte Bereich wird rot hervorgehoben. Zudem

sind die sekundengenauen Zeiten der beiden Punkte im Informationsfenster 3 (9) zu finden. Zur Kontrolle kann der Bereich vor dem Abspeichern über den integrierten Audio Player (8) abgespielt werden. Die Wiedergabe kann dabei über die Schaltfläche *Play* gestartet werden. Sollte versehentlich ein falscher Bereich selektiert worden sein, so lässt sich dieser durch einen Klick auf die Schaltfläche *Undo* (10) wieder löschen.



Abb. 3.4: Auswahl eines Abschnitts

3.2.2.3 Kategorisierung und Abspeichern eines Abschnitts

Der ausgewählte Bereich kann anschließend kategorisiert und abgespeichert werden. Um ihn zu kategorisieren, muss im Popup-Menü *Unterrichtsform* (11) die zutreffende Unterrichtsform ausgewählt werden. Hierbei stehen acht verschiedene Unterrichtsformen zur Verfügung: Klassenunterricht, Lehrervortrag, Einzelarbeit, Partnerarbeit, Gruppenarbeit, Referat, Prüfung und Sonstiges. Im Anschluss daran wird dieser kategorisierte Abschnitt durch einen Klick auf die Schaltfläche *Store Selected Data in List* (13) abgespeichert. Daraufhin sind Start- und Endzeit des Abschnitts sowie die ihm zugeordnete Unterrichtsform in der Tabelle *Stored Data* (12) zu sehen. Außerdem wird der abgespeicherte Bereich im Plot-Fenster farbspezifisch nach Unterrichtsart markiert. Der Farbcode der jeweiligen Unterrichtsform kann dem Informationsfenster 5 (17) entnommen werden. Damit ist dieser Abschnitt abgespeichert und es kann mit der Auswahl und Kategorisierung eines neuen Teils begonnen werden. Neue Abschnitte werden dabei stets am Ende der Tabelle *Stored Data* (12) angefügt. Diese Schritte können beliebig oft wiederholt werden, bis die gesamte Datei kategorisiert ist. Es ist zudem möglich, einen Teil eines bereits kategorisierten Abschnitts nochmals zu markieren und ihn einer anderen Unterrichtsform zuzuordnen, falls sich keine eindeutige Zuordnung treffen lässt.

Projektarbeit Entwicklung von Werkzeugen zur Untersuchung der Klassenraumakustik im Unterrichtsbetrieb



Abb. 3.5: Kategorisieren und Abspeichern eines Abschnitts

3.2.2.4 Wiedergabe eines abgespeicherten Abschnitts

Alle abgespeicherten Abschnitte können über den Audio Player (8) abgespielt werden. Hierfür wird die gewünschte Passage in der Tabelle *Stored Data* (12) angewählt. Der gewählte Bereich ist nun grün im Plot-Fenster (1) hervorgehoben (siehe auch Abb. 3.7). Die Wiedergabe kann durch einen Klick auf die Schaltfläche *Play* gestartet werden.



Abb. 3.6: Wiedergabe eines abgespeicherten Abschnitts

3.2.2.5 Löschen eines abgespeicherten Abschnitts

Sollte bei der Kategorisierung ein Fehler aufgetreten sein, kann der jeweilige Abschnitt in der Tabelle *Stored Data* (12) angewählt und durch einen Klick auf die Schaltfläche *Delete selec-ted Sequence* (14) wieder gelöscht werden.



Abb. 3.7: Löschen eines abgespeicherten Abschnitts

3.2.2.6 Exportieren der abgespeicherten Abschnitte

Wurde die gesamte Datei kategorisiert, werden alle Abschnitte, die derselben Unterrichtsform zugeordnet wurden, in eine separate wave-Datei exportiert. Dies erfolgt über einen Klick auf die Schaltfläche Save Files (15). Über den Fortschritt informiert das darunterliegende Informationsfenster 4 (16). Nachdem alle Dateien generiert wurden, erscheint im Informationsfenster 4 (16) der Hinweis "Files are Saved". Im Informationsfenster 5 (17) sind die zeitlichen Längen der einzelnen Dateien zu finden. Wurde mehreren Abschnitten dieselbe Unterrichtsform zugeordnet, so werden diese nacheinander in zeitlicher Reihenfolge in derselben wave-Datei gespeichert. Diese Dateien erscheinen in dem gleichen Ordner, in dem sich auch die zu bearbeitende Datei befindet, und tragen den Namen der geladenen Datei, dem die jeweilige Unterrichtsform angefügt wurde (z. B. "Dateiname Klassenunterricht"). Parallel dazu wird eine Textdatei generiert, in der sich die Start- und Endzeiten sowie die Unterrichtsformen der einzelnen Abschnitte finden lassen. Diese Datei heißt "Dateiname Dokumentation". Zuletzt wird eine matlab-Datei erzeugt, in die matlab-Variablen, in denen unter anderem Startzeit, Endzeit und Unterrichtsform abgespeichert sind, kopiert werden. Diese Datei trägt den Namen "Dateiname Background Data". Beim Laden einer Datei wird stets überprüft ob eine solche matlab-Datei vorhanden ist und gegebenenfalls geladen. Somit ist es möglich, die Kategorisierung einer Datei zwischenzeitlich zu unterbrechen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder fortzusetzen, wenn einmal auf die Schaltfläche Save Files (15) geklickt wurde.



Abb. 3.8: Exportieren der abgespeicherten Abschnitte

3.2.2.7 Kategorisieren einer Mehrspuraufzeichnung

Soll eine weitere Spur desselben Unterrichtmitschnitts kategorisiert werden, so ist es nicht nötig, diese Datei nochmals neu zu kategorisieren. Es muss lediglich die matlab-Datei mit den Hintergrunddaten, die durch die vorherige Kategorisierung bereits generiert wurde, in den Ordner eingefügt werden, in welchem sich die neue Datei befindet, und so benannt werden, dass sie denselben Dateinamen wie die noch zu bearbeitende Datei trägt (z.B. "*Dateiname_2* Background Data"). Diese matlab-Datei wird zu Beginn, sofern sie vorhanden ist, synchron mit der neuen Datei geladen und übernimmt sofort alle Start- und Endzeiten der Abschnitte sowie die zugeordneten Unterrichtsformen. Demnach muss lediglich die Schaltfläche *Save Files* (15) angeklickt werden, um die kategorisierten wave-Dateien des zweiten Mitschnitts zu exportieren. Selbstverständlich ist vorher dennoch eine Modifikation möglich.

3.2.2.8 Zoomen und Scrollen im Plot-Fenster

Um einen Abschnitt präziser auswählen zu können, kann die Wellenform im Plot-Fenster (1) mit den Schaltflächen *zoom in / zoom out* (18) gezoomt und mit den Schaltflächen *Scroll left / Scroll right* (19) verschoben werden. Eine Zoomstufe beträgt dabei immer das Zweifache der vorherigen; maximal sind vier Zoomstufen verfügbar, es steht also ein 16-facher Zoom zur Verfügung. Wurde die Wellenform vergrößert, kann die Wellenform daraufhin verschoben werden. Beim Verschieben beträgt die Überlappung zweier nebeneinanderliegender Darstellungen stets ein Viertel.

3.3 Der Noise Level Analyzer



3.3.1 Überblick über die Bedienelemente

Abb. 3.9: Der Noise Level Analyzer im Überblick

1	Plot-Fenster	Hier wird der zeitliche Schalldruckpegelverlauf, dessen Histogramm, oder die FFT dargestellt
2	Schaltfläche	Lädt die Datei die das Signal des Kalibrators enthält
2	Load Calibration	Ladt die Datei, die das Signal des Kanorators enthält.
	File	
3	Fingabefenster	Fingabefenster für den Schalldrucknegel des verwendeten Kalibrators (standard-
5	Calibration Volume	mäßig 94 dB)
4	Informationsfenster	Zeigt den Namen der Kalibrierungsdatei an
-	1	
5	Schaltfläche	Durch Drücken kann die Datei geladen werden, die analysiert werden soll.
	Load File	
6	Informationsfenster	Zeigt den Namen der Datei an, die analysiert werden soll.
	2	
7	Schaltfläche	Durch einen Klick auf diese Schaltfläche wird der zeitliche Schalldruckpegelver-
	Analyze File	lauf der Datei berechnet; für mögliche Analyseoptionen siehe (9), (10), (11), (12).
8	Informationsfenster	Gibt Rückmeldung über den Fortschritt beim Laden und Analysieren der Dateien.
	3	
9	Eingabefenster	Optional kann hier eine Startzeit eingegeben werden, ab der die Datei analysiert
	start at	werden soll (standardmäßig: 00:00:00).
10	Eingabefenster	Optional kann hier eine Endzeit eingegeben werden, bis zu der die Datei analysiert
	stop at	werden soll (standardmäßig: Ende der Datei).
11	Popup-Menü	Auswahl einer Frequenzbewertungskurve (standardmäßig: dB(A))
	weighting curve	
12	Popup-Menü	Auswahl einer Zeitbewertung (standardmäßig: fast)
	average time	
13	Audio Player	Spielt die analysierte Datei ab.
14	Ausgabefenster	Hier wird der energieäquivalente Dauerschallpegel angezeigt.
	Leq	
		Ilian wind dan Sahalldmaalmagal dan in 10/ dan Magazait jihangahmittan wind anga
15	Ausgabefenster	Hier wird der Schandruckpeger, der in 1% der Messzeit überschnitten wird, ange-
15	Ausgabefenster L1	zeigt.
15 16	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster	zeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, ange-
15 16	Ausgabefenster L1 Ausgabefenster L95	 Hier wird der Schalldruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, ange- zeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, ange- zeigt.
15 16 17	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche	 Hier wird der Schaltdruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Hier wird der Schaltdruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei.
15 16 17	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche <i>Export Data</i>	 Hier wird der Schalldruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei.
15 16 17 18	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche <i>Export Data</i> Schaltflächen	 Hier wird der Schalldruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei. Hier kann ausgewählt werden, ob in (1) der Schalldruckpegelverlauf, dessen His-
15 16 17 18	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche <i>Export Data</i> Schaltflächen <i>Lp, Hist, FFT</i>	 Hier wird der Schalldruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei. Hier kann ausgewählt werden, ob in (1) der Schalldruckpegelverlauf, dessen Histogramm oder die FFT der analysierten Datei dargestellt werden soll.
15 16 17 18 19	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche <i>Export Data</i> Schaltflächen <i>Lp, Hist, FFT</i> Popup-Menü	 Hier wird der Schalldruckpegel, der in 1% der Messzeit überschintten wird, ängezeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei. Hier kann ausgewählt werden, ob in (1) der Schalldruckpegelverlauf, dessen Histogramm oder die FFT der analysierten Datei dargestellt werden soll. Bei der FFT ist es möglich, eine Oktavband-, Terzband- oder Zwölftel-
15 16 17 18 19	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche <i>Export Data</i> Schaltflächen <i>Lp, Hist, FFT</i> Popup-Menü <i>FFT Options</i>	 Hier wird der Schaltdruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei. Hier kann ausgewählt werden, ob in (1) der Schalldruckpegelverlauf, dessen Histogramm oder die FFT der analysierten Datei dargestellt werden soll. Bei der FFT ist es möglich, eine Oktavband-, Terzband- oder Zwölftel-Oktavbandanalyse auszuwählen.
15 16 17 18 19 20	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche <i>Export Data</i> Schaltflächen <i>Lp, Hist, FFT</i> Popup-Menü <i>FFT Options</i> Informationsfenster	 Hier wird der Schaltdruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei. Hier kann ausgewählt werden, ob in (1) der Schalldruckpegelverlauf, dessen Histogramm oder die FFT der analysierten Datei dargestellt werden soll. Bei der FFT ist es möglich, eine Oktavband-, Terzband- oder Zwölftel-Oktavbandanalyse auszuwählen. Zeigt den Fortschritt der Berechnung an, die mit (18) ausgewählt wurde.
15 16 17 18 19 20	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche <i>Export Data</i> Schaltflächen <i>Lp, Hist, FFT</i> Popup-Menü <i>FFT Options</i> Informationsfenster 4	 Hier wird der Schaltdruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, ängezeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei. Hier kann ausgewählt werden, ob in (1) der Schalldruckpegelverlauf, dessen Histogramm oder die FFT der analysierten Datei dargestellt werden soll. Bei der FFT ist es möglich, eine Oktavband-, Terzband- oder Zwölftel-Oktavbandanalyse auszuwählen. Zeigt den Fortschritt der Berechnung an, die mit (18) ausgewählt wurde.
15 16 17 18 19 20 21	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche <i>Export Data</i> Schaltflächen <i>Lp, Hist, FFT</i> Popup-Menü <i>FFT Options</i> Informationsfenster 4 Schaltfläche	 Hier wird der Schaltdruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, ängezeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei. Hier kann ausgewählt werden, ob in (1) der Schalldruckpegelverlauf, dessen Histogramm oder die FFT der analysierten Datei dargestellt werden soll. Bei der FFT ist es möglich, eine Oktavband-, Terzband- oder Zwölftel-Oktavbandanalyse auszuwählen. Zeigt den Fortschritt der Berechnung an, die mit (18) ausgewählt wurde. Speichert die aktuelle Oberfläche des GUI als jpeg-Datei ab.
15 16 17 18 19 20 21	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche <i>Export Data</i> Schaltflächen <i>Lp, Hist, FFT</i> Popup-Menü <i>FFT Options</i> Informationsfenster 4 Schaltfläche <i>Store Figure</i>	 Hier wird der Schaltdruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, ängezeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei. Hier kann ausgewählt werden, ob in (1) der Schalldruckpegelverlauf, dessen Histogramm oder die FFT der analysierten Datei dargestellt werden soll. Bei der FFT ist es möglich, eine Oktavband-, Terzband- oder Zwölftel-Oktavbandanalyse auszuwählen. Zeigt den Fortschritt der Berechnung an, die mit (18) ausgewählt wurde. Speichert die aktuelle Oberfläche des GUI als jpeg-Datei ab.
15 16 17 18 19 20 21 22	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche <i>Export Data</i> Schaltflächen <i>Lp, Hist, FFT</i> Popup-Menü <i>FFT Options</i> Informationsfenster 4 Schaltfläche <i>Store Figure</i> Zoom in	 Hier wird der Schaltdruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei. Hier kann ausgewählt werden, ob in (1) der Schalldruckpegelverlauf, dessen Histogramm oder die FFT der analysierten Datei dargestellt werden soll. Bei der FFT ist es möglich, eine Oktavband-, Terzband- oder Zwölftel-Oktavbandanalyse auszuwählen. Zeigt den Fortschritt der Berechnung an, die mit (18) ausgewählt wurde. Speichert die Abbildung in (1).
15 16 17 18 19 20 21 22 23	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche <i>Export Data</i> Schaltflächen <i>Lp, Hist, FFT</i> Popup-Menü <i>FFT Options</i> Informationsfenster 4 Schaltfläche <i>Store Figure</i> Zoom in Zoom out	 Hier wird der Schaltdruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei. Hier kann ausgewählt werden, ob in (1) der Schalldruckpegelverlauf, dessen Histogramm oder die FFT der analysierten Datei dargestellt werden soll. Bei der FFT ist es möglich, eine Oktavband-, Terzband- oder Zwölftel-Oktavbandanalyse auszuwählen. Zeigt den Fortschritt der Berechnung an, die mit (18) ausgewählt wurde. Speichert die Abbildung in (1). Vergrößert die Abbildung in (1).
15 16 17 18 19 20 21 22 23 24	Ausgabefenster <i>L1</i> Ausgabefenster <i>L95</i> Schaltfläche <i>Export Data</i> Schaltflächen <i>Lp, Hist, FFT</i> Popup-Menü <i>FFT Options</i> Informationsfenster 4 Schaltfläche <i>Store Figure</i> Zoom in Zoom out Pan	 Hier wird der Schaltdruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird, ängezeigt. Hier wird der Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird, angezeigt. Speichert die Daten, die bei der Analyse ermittelt wurden, in einer Textdatei. Hier kann ausgewählt werden, ob in (1) der Schalldruckpegelverlauf, dessen Histogramm oder die FFT der analysierten Datei dargestellt werden soll. Bei der FFT ist es möglich, eine Oktavband-, Terzband- oder Zwölftel-Oktavbandanalyse auszuwählen. Zeigt den Fortschritt der Berechnung an, die mit (18) ausgewählt wurde. Speichert die aktuelle Oberfläche des GUI als jpeg-Datei ab. Vergrößert die Abbildung in (1). Verkleinert die Abbildung in (1).

Tabelle 2: Bedienelemente des Noise Level Analyzers



3.3.2 Vorgehensweise bei der Auswertung

Abb. 3.10: Anwenderflussdiagramm des Noise Level Analyzers

Abb. 3.10 zeigt wiederum zunächst eine Übersicht über die Schritte, nach denen bei der Analyse vorgegangen werden kann. Die wichtigsten Schritte sind mit dicken Pfeilen gekennzeichnet. Zunächst muss die Kalibrierungsdatei und danach die Datei mit den kategorisierten Abschnitten geladen werden. Daraufhin kann die Datei analysiert werden. Die dabei gewonnenen Daten können über die Schaltfläche *Export Data* (17) exportiert werden. Anschließend kann wahlweise noch das Histogramm oder eine spektrale Analyse der Datei berechnet werden. Die geplotteten Ergebnisse können über einen Klick auf die Schaltfläche *Store Figure* (21) als jpeg-Datei exportiert werden. Daraufhin kann die Datei nochmals mit anderen Optionen analysiert werden oder eine neue Datei geladen werden. Eine detaillierte Erläuterung der Schritte erfolgt in den nachstehenden Kapiteln.

3.3.2.1 Laden der Kalibrierungsdatei

Zu Beginn muss die Datei geladen werden, die das aufgezeichnete Signal des Kalibrators enthält. Aus diesem Signal wird der Referenzschalldruckpegel ermittelt, der für die Berechnung des zeitlichen Schalldruckpegelverlaufs benötigt wird. In das Eingabefenster *Calibration Volume* (3) muss zunächst der Referenzschalldruckpegel des verwendeten Kalibrators eingegeben werden. Standardmäßig enthält dieses Fenster den Wert 94 dB, da die meisten Kalibratoren auf diesen Schalldruckpegel geeicht sind. Nachdem dieser Wert gegebenenfalls geändert worden ist, kann durch einen Klick auf die Schaltfläche *Load Calibration File* (2) die gewünschte Datei ausgewählt und geladen werden. Diese Datei muss sich dabei im selben Ordner befinden, in dem sich auch die matlab-Datei des *Noise Level Analyzers* befindet. Dateien in anderen Ordnern können nicht geladen werden. Die Datei muss zudem im wave-Format abgespeichert worden sein, da der *Noise Level Analyzer* lediglich wave-Dateien verarbeiten kann. Wenn die Datei vollständig geladen wurde, erscheint im Informationsfenster 3 (8) der Hinweis "*Calibration File is Loaded*". Im Informationsfenster 1 (4) wird zudem der Name der geladenen Datei ausgegeben.



Abb. 3.11: Laden der Kalibrierungsdatei

3.3.2.2 Laden der zu analysierenden Datei

Die zu analysierende Datei kann durch einen Knopfdruck auf die Schaltfläche *Load File* (5) geladen werden. Dabei gilt wie auch bei der Kalibrierungsdatei: die Datei muss sich in demselben Ordner befinden, der auch die matlab-Datei des *Noise Level Analyzers* enthält, und sie muss im wave-Format vorliegen. Über den Fortschritt des Ladevorgangs gibt das Informationsfenster 3 (8) Auskunft. Nachdem die Datei komplett geladen wurde, erscheint der Name der Datei im Informationsfenster 2 (6). Dabei gilt wiederum: Je größer die ausgewählte Datei ist, desto mehr Zeit benötigt der Ladevorgang.



Abb. 3.12: Laden der zu analysierenden Datei

3.3.2.3 Analyse der geladenen Datei

Nun kann die geladene Datei analysiert werden, indem auf die Schaltfläche *Analyze File* (7) geklickt wird. Daraufhin wird die Datei mit den standardmäßigen Analyseoptionen bewertet. D. h., die gesamte Datei wird mit einer dB(A)-Kurve und der Zeitbewertung *fast* analysiert. Für die Analyse gilt ebenso wie für den Ladevorgang, dass die Analyse umso länger dauert, je größer die Datei ist. Soll die Datei mit anderen Optionen analysiert werden, können die gewünschten Parameter vor dem Analysestart im Kästchen *Analysis Options* geändert werden. Hier können im Popup-Menü *weighting curve* (11) die Frequenzbewertungskurven dB(A), dB(B), dB(C), oder flat (linear) gewählt werden¹⁸. Bei den Zeitkonstanten kann im Popup-Menü *average time* (12) zwischen *fast* (125 ms), *slow* (1 s) oder *impulse* (Anstiegszeit: 35 ms, Abfallzeit: 1.5 s) ausgewählt werden¹⁹. Soll nur ein Ausschnitt der geladenen Datei ausgewer-

¹⁸ Näheres zu den unterschiedlichen Frequenzbewertungskurven ist in Anhang B: Eigenschaften der unterschiedlichen Frequenzbewertungskurven zu finden.

¹⁹ Näheres zu den unterschiedlichen Zeitbewertungen ist in Anhang C: Eigenschaften der unterschiedlichen Zeitbewertungen zu finden.

tet werden, so muss im Eingabefenster start at (9) lediglich der gewünschte Anfangszeitpunkt und im Eingabefenster stop at (10) der gewünschte Endzeitpunkt im Format hh:mm:ss eingegeben werden. Ist das Fenster (9) leer, so wird vom Beginn der Datei an analysiert. Ist im Fenster (10) kein Eintrag vorhanden, wird die Datei stets bis zum Schluss analysiert. Über den Status der Analyse gibt das Informationsfenster 3 (8) Auskunft. Ist die Analyse vollständig abgeschlossen, wird dort der Hinweis "*File is Analyzed*" ausgegeben. Außerdem ist im Plot-Fenster (1) der zeitliche Verlauf des Schalldruckpegels dargestellt. Soll die Datei daraufhin erneut mit anderen Optionen analysiert werden, müssen diese lediglich im Fenster *Analyze File* (7) startet die neue Analyse. Nach dem Abschluss einer Analyse kann natürlich jederzeit eine neue Datei und eine neue Kalibrierungsdatei geladen werden.



Abb. 3.13: Analyse der Datei



Abb. 3.14: Zeitlicher Schalldruckpegelverlauf; Zeitbewertung: fast

3.3.2.4 Abspeichern der Analyseergebnisse

Nachdem die Analyse abgeschlossen ist, können über die Schaltfläche *Export Data* (17) die ermittelten Werte der statistischen Schallpegelverteilung in einer Textdatei abgespeichert werden. Der L_{eq} (energieäquivalenter Dauerschalldruckpegel), der $L_{1.0}$ (Schalldruckpegel, der in 1% der Messzeit überschritten wird) und der $L_{95.0}$ (Schalldruckpegel, der in 95% der Messzeit überschritten wird) können bereits direkt nach der Analyse in den Fenstern (14), (15) und

(16) abgelesen werden²⁰. Zudem werden in der Textdatei folgende statistische Schalldruckpegel gespeichert: $L_{0.1}$, $L_{10.0}$, $L_{33.3}$, $L_{50.0}$, $L_{66.6}$, $L_{90.0}$, $L_{99.0}$ und $L_{99.9}^{21}$. Als ergänzende Information enthält die Textdatei ebenfalls die gewählten Analyseoptionen, mit denen diese Werte berechnet wurden. Diese Datei trägt dabei den Dateinamen der analysierten Datei, dem "*Dokumentation*" angefügt wird, also "*Dateiname* Dokumentation". Wird dieselbe Datei mehrmals mit verschiedenen Optionen analysiert, werden die Ergebnisse einer neuen Analyse stets am Ende der Textdatei angefügt. Des Weiteren ist es möglich, die Darstellung des zeitlichen Schalldruckpegelverlaufs durch einen Klick auf die Schaltfläche *Store Figure* (21) als jpeg-Datei zu exportieren. Um bei einer mehrmaligen Analyse derselben Datei nicht versehentlich eine bereits vorhandene jpeg-Datei zu überschreiben, enthält der Dateiname der jpeg-Datei zusätzlich die gewählten Analyseoptionen (z.B. "2014_06_30_0900_-_0921 Lehrervortrag Lp dB(A) fast 00 00 00 - 00 06 26"). Sowohl die Textdatei als auch die jpeg-Datei werden in demselben Ordner abgespeichert, in dem sich auch die geladene Datei befindet.



Abb. 3.15: Abspeichern der Analyseergebnisse

3.3.2.5 Darstellung der statischen Schalldruckpegelverteilung als Histogramm oder der spektralen Analyse

Soll im Plot-Fenster (1) anstelle des zeitlichen Schalldruckpegelverlaufs dessen Histogramm oder die spektrale Analyse der frequenzgewichteten geladenen Datei angezeigt werden, kann dies über die Schaltflächen der *Plot Selection* (18) ausgewählt werden. Bei der spektralen Analyse der Datei kann zudem zwischen einer Oktavband-, einer Terzband- und einer Zwölf-tel-Oktavbandanalyse gewählt werden. Die gewünschte Auflösung kann über das Popup-Menü *FFT Options* (19) festgelegt werden.



Abb. 3.16: Die Plot Selection

²⁰ Diese Pegel sind in [ÖNORM S 5004] in Kapitel 2.4 definiert.

²¹ Die exportierte Pegelstatistik ist der des Schallpegelmessers *XL2* der Firma *NTi Audio* nachempfunden: www.nti-audio.com/de/news/erweiterte-funktionalitaet-des-xl2-data-explorer.aspx (letzter Zugriff am 01.09.2014).





Abb. 3.17: Histogramm der Schalldruckpegelverteilung



Abb. 3.18: spektrale Oktavbandanalyse

Um die jeweilige Grafik abzuspeichern, muss lediglich auf die Schaltfläche *Store Figure* (21) geklickt werden, und die aktuelle Oberfläche des GUI wird als jpeg-Datei abgespeichert. Um wiederum den zeitlichen Schalldruckpegelverlauf zu sehen, muss auf die Schaltfläche *Lp* (18) in der *Plot Selection* geklickt werden. Über den Berechnungsfortschritt der ausgewählten Darstellung gibt das Informationsfenster 4 (20) Auskunft.

3.3.2.6 Wiedergabe der analysierten Datei

Über den integrierten Audio Player (13) kann der Abschnitt der Datei, der analysiert wurde, unter Berücksichtigung der ausgewählten Frequenzbewertungskurve wiedergegeben werden.



Abb. 3.19: Wiedergabe der analysierten Datei

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Projektarbeit wurden zusätzliche Werkzeuge entwickelt, die eine noch genauere und vielseitigere Analyse der akustischen Gegebenheiten und der Lärmsituation in Klassenräumen zulassen. Die Simulationsmöglichkeiten der Anwendung IntKlaSim wurden umfangreich ausgebaut. Mit diesem Werkzeug ist es nun auch möglich, die raumakustische Situation nach einer simulierten Sanierung im besetzten Zustand zu untersuchen, selbst wenn die Nachhallzeitmessung im leeren Raum erfolgt ist. Durch die Berücksichtigung des Grundgeräuschpegels im Raum lässt sich die reale Arbeitssituation im Raum noch besser simulieren. Dadurch, dass ebenfalls die Nachhallzeitmessung nach einer realen Sanierung in die Anwendung geladen werden kann, bietet das Tool die Möglichkeit, die Ergebnisse von simulierter und realer Sanierung kritisch gegenüberzustellen. Mit dem File Cutter und dem Noise Level Analyzer wurden zwei Werkzeuge entwickelt, die die Lärmanalyse eines mehrkanaligen Unterrichtsmitschnitts in Abhängigkeit der Unterrichtsform ermöglichen. Durch die umfangreiche Pegelstatistik lassen sich detaillierte Rückschlüsse auf die Lärmsituation im Klassenraum ziehen. Darüber hinaus kann mit diesen Anwendungen, da für die Analyse ein Mehrkanalmitschnitt vorliegt, die räumliche Verteilung der Schalldruckpegel, die mit dem Noise Level Analyzer berechnet werden, untersucht und die Streuung dieser Werte im Raum betrachtet werden. Selbstverständlich ist der Anwendungsbereich dieser Werkzeuge nicht nur auf Klassenräume beschränkt.

Im Anschluss an diese Arbeit werden im Rahmen einer Masterarbeit diese Analysewerkzeuge angewendet. Dabei soll unter anderem untersucht werden, welchen Einfluss die Raumakustik in Klassenräumen auf den Grundgeräuschpegel und den Lehrersprachpegel hat, und wie stark der Grundgeräuschpegel von der Nachhallzeit abhängt. Derartige Untersuchungen können ab dem Schuljahr 2014/15 hervorragend am BRG Kepler in Graz unternommen werden. Zu diesem Zeitpunkt wird die akustische Sanierung von etwa der Hälfte der Klassenzimmer abgeschlossen sein. Die restlichen Räume befinden sich dann noch in demselben akustischen Zustand, wie bei der Eröffnung des Schulgebäudes zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Unter diesen Bedingungen lassen sich solche Untersuchungen, die sich mit dem Grundgeräuschpegel und dem Stimmaufwand des Lehrers in Abhängigkeit der raumakustischen Gegebenheiten befassen, sehr gut durchführen. Des Weiteren sollen Messungen, die den Tageslärm-Expositionspegel für Lehrer betreffen, vorgenommen werden. Dieser Pegel beschreibt den durchschnittlichen Lärmpegel, dem Arbeitnehmer bei einer Arbeitszeit über acht Stunden ausgesetzt sind. Im Rahmen dieser Untersuchungen soll herausgefunden werden, wie stark der Tageslärm-Expositionspegel von der Raumakustik abhängig ist. Dabei sollen die Fragen beantwortet werden, ob der maximal zulässige Wert für den Tageslärm-Expositionspegel in einem Raum mit schlechter Raumakustik überschritten wird und wie weit dieser Wert durch kürzere Nachhallzeiten gesenkt werden kann.

5 Literaturverzeichnis

[DIN 18041] DIN 18041: *Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen*. Deutsches Institut für Normung 2004.

[EN IEC 61672-1] EN IEC 61672-1: *Elektroakustik – Schallpegelmesser, Teil 1: Anforderungen.* Europäische Norm, Brüssel 2005.

[FLOHRSCHÜTZ] FLOHRSCHÜTZ, Michael: Anwendung und Überarbeitung des "Leitfaden für die akustische Sanierung von Klassenräumen". Bachelorarbeit, Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der Technischen Universität Graz, September 2013.

[HOTTER] HOTTER, Erich; ZOLLNERITSCH, Josef: Lärm in der Schule. Ein Arbeitsbuch. Verlag Leykam, Graz 2008.

[MÜLLER] MÜLLER, Maurice: *Klassenraumakustik*. Diplomarbeit, Institut für Breitbandkommunikation der Technischen Universität Graz, September 2009.

[ÖNORM S 5004] ÖNORM S 5004: *Messung von Schallimmissionen*. Österreichisches Normungsinstitut, Wien 1985.

[REITHNER] REITHNER Claudia: *Akustische Sanierung von Klassenräumen*. Diplomarbeit, Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der Technischen Universität Graz, Jänner 2013.

[SATO] SATO, Hiroshi; BRADLEY, John: *Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms*. In: JASA 2008, 123 (4), S. 2064-2077.

[SENGPIEL] SENGPIEL, Eberhard: *Berechnung der Bewertungsfilter-Kurven*. Berlin 2002. http://www.sengpielaudio.com/BerechnungDerBewertungsfilter.pdf (letzter Zugriff am 01.09.2014).

[TRINK] TRINK, Andreas: *Entwicklung und Bau eines intelligenten, mikroprozessorgesteuerten Lärmparameterrekorders*. Diplomarbeit, Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung der Technischen Universität Graz, August 1991.

[WEINZIERL] WEINZIERL, Stefan u.a. (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Springer-Verlag, Berlin 2008.

[WESELAK] WESELAK, Werner: *Skriptum zur Vorlesung Akustische Messtechnik*. Version 6.0, TU Graz, Graz 2011.

6 Anhang A: Das Blockschaltbild von *Int-KlaSim*



Abb. 6.1: Blockschaltbild von IntKlaSim

Anmerkungen:

Haben Kästchen einen farbigen Hintergrund, müssen diese Werte vom Benutzer selbst eingegeben werden. Die jeweilige Farbe kennzeichnet dabei das Tabellenblatt, auf dem die Eingabe erfolgt. Dabei gilt folgender Farbcode:

Die Eingabe erfolgt auf dem Tabellenblatt Basisdaten

Die Eingabe erfolgt auf dem Tabellenblatt Import der Messwerte vS

Projektarbeit Entwicklung von Werkzeugen zur Untersuchung der Klassenraumakustik im Unterrichtsbetrieb

Die Eingabe erfolgt auf dem Tabellenblatt Raumakustik

Die Eingabe erfolgt auf dem Tabellenblatt Lärmsituation und Sprechaufwand

Die Eingabe erfolgt auf dem Tabellenblatt Import der Messwerte nS

Werte, die in einem Kästchen mit grauem Hintergrund stehen sind vordefiniert, und Werte, die in einem Kästchen mit weißem Hintergrund stehen, werden berechnet. Um die Übersichtlichkeit zu verbessern haben Pfeile dieselbe Farbe wie der Rahmen des Kästchens, dem sie entspringen.

7 Anhang B: Eigenschaften der unterschiedlichen Frequenzbewertungskurven

Im folgenden Abschnitt werden die Eigenschaften der verschiedenen Frequenzbewertungskurven erläutert und anhand von Beispielen der Einfluss auf den Schalldruckpegel gezeigt.

Zu Beginn der Analyse kann eine Frequenzbewertungskurve ausgewählt werden, mit der das Signalspektrum bei der Analyse gewichtet werden soll. Dabei kann zwischen einer dB(A)-, dB(B)-, dB(C)- oder einer linearen Kurve gewählt werden. Die dB(A)-, dB(B)- und dB(C)-Kurve weisen einen Verlauf auf, der invers zu den Kurven gleicher Lautstärkepegel, den Phonkurven, ist. Genauere Informationen zu den Phonkurven können beispielsweise bei Weinzierl²² nachgelesen werden. Die A-Bewertung sollte dabei für niedrige Schalldruckpegel (30 phon), die B-Bewertung für mittlere Schalldruckpegel (60 phon) und die C-Bewertung für hohe Schalldruckpegel (90 phon) verwendet werden. Allerdings findet in der Messtechnik fast ausschließlich die dB(A)-Kurve Anwendung, ohne auf die Lautstärke zu achten, da die dB(B)- und dB(C)-Kurve bei subjektiven Tests nicht gut genug mit den Eigenschaften des Gehörs übereinstimmen. Denn die Phonkurven wurden mit Experimenten ermittelt, bei denen nur Sinustöne und keine tonalen oder geräuschhaften Klänge verwendet. Die dB(C)-Kurve wird gelegentlich zur Ermittlung von Spitzenschallpegeln verwendet. Die dB(B)-Kurve wird in der Messtechnik faktisch nicht mehr verwendet²³. Der Verlauf der Kurven ist der folgenden Abbildung zu entnehmen:



Abb. 7.1: Die Frequenzbewertungskurven im Vergleich

²³ Vgl. [WESELAK, S. 7.]

²² Vgl. [WEINZIERL, S. 53ff.]

Wird die lineare Frequenzbewertung ausgewählt, erfolgt keine frequenzabhängige Gewichtung des Signals. Eigenheiten des Gehörs werden in diesem Fall nicht berücksichtigt und es erfolgt eine rein physikalische Beurteilung des Schalldruckpegelverlaufs. Die jeweiligen Gewichtungsfaktoren können der folgenden Tabelle entnommen werden. Die Frequenzabstände entsprechen dabei einer Terz:

Nennfrequenz		Frequenzbew	ertungen [dB]	
[Hz]	dB(A)	dB(B)	dB(C)	Linear
10	-70.4	-88.2	-14.3	0.0
12.5	-63.4	-33.2	-11.2	0.0
16	-56.7	-28.5	-8.5	0.0
20	-50.5	-24.2	-6.2	0.0
25	-44.7	-20.4	-4.4	0.0
31.5	-39.4	-17.1	-3.0	0.0
40	-34.6	-14.2	-2.0	0.0
50	-30.2	-11.6	-1.3	0.0
63	-26.2	-9.3	-0.8	0.0
80	-22.5	-7.4	-0.5	0.0
100	-19.1	-5.6	-0.3	0.0
125	-16.1	-4.2	-0.2	0.0
160	-13.4	-3.0	-0.1	0.0
200	-10.9	-2.0	0.0	0.0
250	-8.6	-1.3	0.0	0.0
315	-6.6	-0.8	0.0	0.0
400	-4.8	-0.5	0.0	0.0
500	-3.2	-0.3	0.0	0.0
630	-1.9	-0.1	0.0	0.0
800	-0.8	0.0	0.0	0.0
1000	0.0	0.0	0.0	0.0
1250	+0.6	0.0	0.0	0.0
1600	+1.0	0.0	-0.1	0.0
2000	+1.2	-0.1	-0.2	0.0
2500	+1.3	-0.2	-0.3	0.0
3150	+1.2	-0.4	-0.5	0.0
4000	+1.0	-0.7	-0.8	0.0
5000	+0.5	-1.2	-1.3	0.0
6300	-0.1	-1.9	-2.0	0.0
8000	-1.1	-2.9	-3.0	0.0
10000	-2.5	-4.3	-4.4	0.0
12500	-4.3	-6.1	-6.2	0.0
16000	-6.6	-8.4	-8.5	0.0
20000	-9.3	-11.1	-11.2	0.0

Tabelle 3: Gewichtungsfaktoren der Frequenzkurven im Terzabstand²⁴

²⁴ Die Werte für die B-Bewertung sind der Homepage von Eberhard Sengpiel entnommen: http://www.sengpielaudio.com/Rechner-dba-spl.htm (Letzter Zugriff am 01.09.2014). Die übrigen Werte entstammen [EN IEC 61672-1, S. 16.].

Die Ermittlung der Frequenzkurven erfolgt nach folgenden Formeln²⁵:

A:
$$Ra(f) = \frac{12200^2 * f^4}{(f^2 + 20.6^2) * (f^2 + 12200^2) * \sqrt{f^2 + 107.7^2} * \sqrt{f^2 + 737.9^2}}$$

B: $Rb(f) = \frac{12200^2 * f^3}{(f^2 + 20.6^2) * (f^2 + 12200^2) * \sqrt{f^2 + 158.5^2}}$
C: $Rc(f) = \frac{12200^2 * f^2}{(f^2 + 20.6^2) * (f^2 + 12200^2)}$

Die Ergebnisse dieser Formeln müssen nun noch logarithmiert und auf 0 dB normalisiert werden:

 $A = 20 * \log(Ra(f)) dB + 2.00 dB$ $B = 20 * \log(Rb(f)) dB + 0.17 dB$ $C = 20 * \log(Rc(f)) dB + 0.06 dB$

Der Einfluss von Frequenzbewertungskurven auf den Schalldruckpegel kann im Folgenden anhand mehrerer Beispiele beobachtet werden. Als Zeitbewertung wurde bei jeder Analyse die Konstante *fast* gewählt.

Sinuston 500 Hz:



Abb. 7.2: Gewichteter Schalldruckpegel bei 500 Hz; 94 dB(SPL); Zeitbewertung: fast

Bei einem Sinuston mit der Frequenz 500 Hz weist die dB(A)-Kurve den niedrigsten Schalldruckpegel auf. Ihre Dämpfung beträgt dort -3.2 dB. Die dB(B)-Kurve hat bei dieser Frequenz nur geringen Einfluss, da der Dämpfungsfaktor lediglich -0.3 dB beträgt. Der Schall-

²⁵ Vgl. [SENGPIEL, S. 1.]

druckpegelverlauf der dB(C)-Kurve entspricht bei 500 Hz dem Linearen, da diese Frequenz bei der dB(C)-Bewertung mit 0.0 dB gewichtet wird.

Sinuston 1 kHz:



Abb. 7.3: Gewichteter Schalldruckpegel bei 1 kHz; 94 dB(SPL); Zeitbewertung: fast

Bei einem Sinuston mit der Frequenz 1 kHz weisen alle Kurven denselben Verlauf auf. Dies ist die einzige Frequenz, bei dem alle Kurven dieselbe Gewichtung von 0.0 dB besitzen.

Sinuston 5 kHz:



Abb. 7.4: Gewichteter Schalldruckpegel bei 5 kHz; 94 dB(SPL); Zeitbewertung: fast

Der Schalldruckpegelverlauf der dB(A)-Kurve weist bei diesem Sinuston mit der Frequenz 5 kHz einen höheren Wert auf, als der Verlauf der linearen Kurve, da hier eine Verstärkung von +0.5 dB erfolgt. Der Verlauf der dB(B)- und dB(C)-Kurven ist annähernd gleich, die Dämpfungen entsprechen -1.2 bzw. -1.3 dB.

Ausschnitt aus Beethovens 9. Sinfonie:



Abb. 7.5: Gewichteter Schalldruckpegelverlauf, Ausschnitt aus Beethovens 9. Sinfonie; Zeitbewertung: fast

Bei breitbandigen Signalen ist beim Vergleich der Kurven kein großer Unterschied zu erkennen. Tendenziell kann festgehalten werden, dass die dB(A)-Kurve einen etwas geringeren Schalldruckpegelverlauf als die anderen beiden Kurven hat. Die dB(C)-Kurve liefert an den meisten Stellen die lautesten Schalldruckpegel. Der Verlauf der dB(B)-Kurve ist nur an wenigen Stellen zu erkennen und befindet sich zwischen denen der dB(A)- und dB(C)-Kurve. Betrachtet man den Frequenzverlauf der einzelnen Kurven, ist dies logisch schlüssig, da die dB(A)-Kurve – besonders bei den tiefen Frequenzen – die mit Abstand stärksten Dämpfungen aufweist. Der Verlauf der dB(C)-Kurve dagegen weist die geringsten Dämpfungen auf. Der rein physikalische Schalldruckpegel wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit bei dieser Abbildung ignoriert. Vergrößert man Abb. 7.5, ist sehr gut zu erkennen, dass die dB(A)-Kurve die leisesten Schalldruckpegel liefert, der Verlauf der dB(B)- Kurve stets zwischen den beiden anderen Kurven liegt und die dB(C)-Kurve in der Regel den lautesten Verlauf aufweist:



Abb. 7.6: Vergrößerung von Abb. 7.5

Da, wie bereits erwähnt, die dB(A)-Kurve auch bei höheren Pegeln am besten mit den Eigenheiten des Gehörs übereinstimmt, wird an dieser Stelle empfohlen, pro Datei zumindest eine Analyse mit der dB(A)-Kurve durchzuführen.

Neben unterschiedlichen Frequenzbewertungen kann bei der Analyse zusätzlich zwischen unterschiedlichen Zeitbewertungen gewählt werden. Die Gründe hierfür werden im nächsten Abschnitt erläutert.

8 Anhang C: Eigenschaften der unterschiedlichen Zeitbewertungen

Die Auswahl von unterschiedlichen Zeitbewertungen dient dazu, unterschiedliche Signaleigenschaften, besser erkennbar zu machen. Welche Vor- und Nachteile die einzelnen Zeitbewertungen dabei bieten, wird im Folgenden erklärt²⁶.

Slow (1 s):

Die Zeitbewertung *slow* hat vor allem bei Messgeräten aufgrund der hohen Zeitkonstante von einer Sekunde den Vorteil, starke Pegelschwankungen zu glätten und so das Ablesen eines Pegels zu erleichtern. Gleichzeitig ist es mit dieser Zeitbewertung einfacher möglich, einen wirkungsäquivalenten Langzeitbeurteilungswert zu ermitteln.

Fast (125 ms):

Um schnell aufeinanderfolgende Pegelschwankungen zu berücksichtigen kann diese Zeitbewertung gewählt werden. Ein sicheres Ablesen der Pegel ist bei dieser Zeitbewertung nicht so leicht möglich wie bei der Zeitbewertung *slow*, da sich die Pegel schneller ändern. Auch die Weiterverarbeitung zu einem wirkungsäquivalenten Langzeitbeurteilungswert ist hier aufwendiger.

Impulse (35 ms, 1.5 s):

Soll bei der Beurteilung die Kurzzeitwahrnehmung des Menschen miteinbezogen werden, kann die Zeitbewertung *impulse* gewählt werden. Aufgrund der schnellen Anstiegszeit von 35 Millisekunden werden impulsartige Schallpegel sehr gut berücksichtigt. Dank der langen Abfallzeit von 1.5 Sekunden ist es mit dieser Zeitkonstante wiederum gut möglich, diese Pegel anzuzeigen und einen Langzeitpegel zu berechnen. (Hierbei sei angemerkt dass Geräusche, die kürzer als eine Sekunde dauern, impulsartig genannt werden.)

Die einzelnen Zeitbewertungen sind also auf gegensätzliche Eigenschaften abgestimmt. Die Zeitbewertung sollte daher nach dem Kriterium ausgewählt werden, auf welches bei der Analyse besonders geachtet werden soll. Für eine genaue Analyse unter Berücksichtigung aller Signaleigenschaften sollte dasselbe Signal stets mit verschiedenen Zeitkonstanten bewertet werden.

²⁶ Vgl. [WESELAK, S. 9.]

Im Folgenden ist der Einfluss der verschiedenen Zeitbewertungen auf einige Signale exemplarisch dargestellt.



Sinuston 1 kHz, Abfall von 0 dB auf -30 dB:

Abb. 8.1: Wellenform des Signals; Sinuston 1 kHz, Abfall von 0 dB auf -30 dB



Abb. 8.2: Schalldruckpegelverlauf für unterschiedliche Zeitbewertungen; Frequenzkurve: dB(A)

Betrachtet man hier den Anstieg des Schalldruckpegels am Anfang des Signals, so erkennt man, dass der Schalldruckpegel umso schneller ansteigt je kürzer die Zeitkonstante gewählt wurde. Mit der Zeitbewertung *impulse* wird am schnellsten ein konstanter Schalldruckpegel erreicht, mit der Zeitbewertung *slow* dauert dies am längsten. Wird das Signal abrupt leiser, sind auch hier deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Zeitbewertungen zu sehen. Dabei gilt: Der Schalldruckpegel braucht umso länger, um auf den neuen Wert abzufallen, je größer die gewählte Zeitkonstante ist. Mit der Zeitbewertung *fast* fällt der Schalldruckpegelverlauf daher am schnellsten auf den nächsten konstanten Wert ab, da diese im vorliegenden Fall die kürzeste Zeitkonstante bietet. Der Schalldruckpegelverlauf, der mit der Zeitkonstante *impulse* ermittelt wurde, braucht hier am längsten, um einen konstanten Wert zu erreichen, da diese Zeitbewertung die längste Abfallzeitkonstante besitzt.

Ausschnitt aus Beethovens 9. Sinfonie:



Abb. 8.3: Wellenform des Signals; Ausschnitt aus Beethovens 9. Sinfonie



Abb. 8.4: Schalldruckpegelverlauf für unterschiedliche Zeitbewertungen; Frequenzkurve: dB(A)

Vergleicht man nun bei diesem Signal die Unterschiede der einzelnen Zeitbewertungen, ist erkennbar, dass die Zeitbewertung *impulse* die Schallpegelspitzen am besten darstellt. Beim Wechsel von lauten zu leisen Passagen braucht diese aufgrund der langen Zeitkonstante von 1.5 Sekunden Abfallzeit am längsten bis die Kurve abgefallen ist. Betrachtet man die Zeitbewertung *slow*, ist zu sehen, dass diese den gleichmäßigsten Verlauf aufweist und am langsamsten auf Schwankungen reagiert. Die Kurve der Zeitbewertung *fast* zeigt hier den Verlauf an, der am meisten schwankt. Eine Vergrößerung dieses Ausschnitts bestätigt dies:



Abb. 8.5: Vergrößerung von Abb. 8.4

9 Anhang D: Der Signalfluss des Noise Level Analyzers



Abb. 9.1: Flussdiagramm des Noise Level Analyzers

Die unterschiedlichen Farben im Flussdiagramm weisen darauf hin, wann die jeweiligen Schritte berechnet werden. Die Rechenvorgänge, die pink markiert sind, erfolgen beim Betätigen der Schaltfläche *Load Calibration File*. Hellblau gefärbte Berechnungen werden bei einem Klick auf die Schaltfläche *Load File* durchgeführt. Hellgrün markierte Schritte werden gerechnet, wenn die Schaltfläche *Analyze File* betätigt wurde. Die dunkelgrün eingerahmte FFT wird berechnet, wenn in der *Plot Selection* auf die Schaltfläche *FFT* geklickt wurde. Die dunkelblauen Größen stellen die Analyseergebnisse dar.

Im Folgenden werden die Berechnungsschritte erläutert, mit denen der *Noise Level Analyzer* die Analyseergebnisse berechnet.

Zuerst wird aus dem Kalibrierungssignal (kin) der Referenzschalldruckpegel p_0 ermittelt. Hierbei sei angemerkt, dass die Anwendung prinzipiell für die Verarbeitung von Monosignalen ausgelegt ist. Sollte es sich bei dem Signal dennoch um eine Stereodatei handeln, wird bei den weiteren Berechnungen nur noch der linke Kanal berücksichtigt. Ist das Kalibrierungssignal bereits eine Monodatei, wird dieser Schritt übersprungen und der Vektor kin wird in den Vektor k kopiert. Aus diesem Monosignal wird der Effektivwert (keff) des Signals nach folgender Formel berechnet:

$$x_{eff} = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

Mit dem Effektivwert und dem eingegebenen Schalldruckpegel des verwendeten Kalibrators kann daraufhin der Referenzschalldruckpegel (p0) berechnet werden, indem die Formel für den Schalldruckpegel²⁷

$$L_p = 10 * \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 * \log \frac{p}{p_0} [dB]$$

nach p_0 aufgelöst wird:

$$p_0 = \frac{p}{10^{\frac{L_p}{20}}}$$

Der Matlab-Code für diese Berechnung sieht folgendermaßen aus, wobei die Variable keff den Schalldruck p beschreibt und kvol die vom Benutzer eingegeben Referenzlautstärke ist, die in obigen Formeln L_p gleicht²⁸:

```
klen = length(k); % Length of calibration signal
keff = sqrt((1/klen)*sum(k.^2)); % RMS value of the calibration value
clear k;
% Derive p0
p0 = keff/(10^(kvol/20));
```

²⁷ Vgl. [ÖNORM S 5004] Kapitel 2.4.

²⁸ Siehe Matlab-Datei analyze_calibration.m Zeile 25ff.

Nachdem die Datei (x1), die analysiert werden soll, vollständig geladen ist, wird wiederum zunächst überprüft, ob es sich um eine Monodatei handelt. Sollte es sich bei der Datei um eine Stereodatei handeln, wird bei der folgenden Auswertung ebenfalls lediglich der linke Kanal berücksichtigt und in den Vektor x2 kopiert. Soll anstatt der gesamten Datei lediglich ein Ausschnitt davon analysiert werden, wird dieser Ausschnitt nun ausgewählt und im Vektor x3 gespeichert. Wenn die gesamte Datei analysiert werden soll, wird der gesamte Vektor kopiert. Daraufhin werden gegebenenfalls einige Samples am Ende dieses Vektors gelöscht. Dies sind Samples, die bei der nun folgenden Signalfensterung über das letzte Fenster hinausragen. Die Länge eines Fensters beträgt dabei 8192 Samples. Am Ende werden also maximal 8191 Samples gelöscht, was bei einer Abtastrate von 44.1 kHz in etwa 0.2 Sekunden entspricht und somit keinen nennenswerten Einfluss auf die Analyseergebnisse hat. Falls bei der gewünschten Frequenzbewertung eine lineare Bewertung ausgewählt wurde, werden die nächsten Schritte (Fensterung und Bearbeitung im Frequenzbereich) übersprungen und es folgt sogleich die lineare Mittelung. Wurde dagegen eine Frequenzbewertungskurve selektiert, wird der Signalvektor x nun mit der angesprochenen Fensterfunktion (window) multipliziert. Dieses Fenster gleicht einem Rechteckfenster, das jedoch keine senkrechten Flanken besitzt, sondern Flanken, die einer Sinus-, bzw. Kosinusviertelwelle gleichen (siehe Abb. 9.2). Die gesamte Fensterlänge beträgt, wie schon erwähnt, 8192 Samples. Die linke und rechte Flanke haben dabei eine Länge von jeweils 512 Samples.



Abb. 9.2: Fensterfunktion window

Bei der Fensterung beträgt die Überlappung zwischen den einzelnen Fensterblöcken ebenfalls 512 Samples. Die nun folgende Fourier-Transformation kann allerdings leichter implementiert werden, wenn das zu transformierende Signal keine überlappenden Blöcke besitzt. Daher werden die einzelnen Blöcke nun hintereinander ohne Überlappung in einen neuen Vektor kopiert (xwin) (siehe Abb. 9.3).





Abb. 9.3: Signalfensterung und Trennung der überlappenden Bereiche

Dieses Signal xwin wird daraufhin in den Frequenzbereich transformiert. Dabei wird jeweils ein Fensterblock, also 8192 Samples, simultan transformiert. Im Frequenzbereich wird das Signal (xf) nun mit der gewünschten Frequenzbewertungskurve gewichtet. Wiederum 8192 Punkte werden gleichzeitig gewichtet. Anschließend wird das bewertete Signal (xfweight) mit derselben Blocklänge in den Zeitbereich zurücktransformiert (xweightwin). Verbleibende imaginäre Signalanteile, die durch die Berechnungen im Frequenzbereich zusätzlich entstanden sind, werden bei weiteren Berechnungen nicht berücksichtigt. Daraufhin wird das Signal nochmals mit der Fensterfunktion (window) multipliziert. Wegen dieser zweiten Multiplikation ist es sodann durch Addition leicht möglich, die sich überschneidenden Bereiche des gefensterten Signals wieder zum ursprünglichen Signal (xweight) zusammenzusetzen, da nun $sin^2x + cos^2x = 1$ gilt (siehe Abb. 9.4).



Abb. 9.4: Synthese des gewichteten und gefensterten Signals

Nun erfolgt in Form einer linearen Mittelung eine Datenreduktion. Dabei wird von jeweils 1024 Samples der Effektivwert gebildet (xlinmean). Es werden also die Samples von jeweils etwa 23 Millisekunden zusammengefasst (wenn die Abtastrate 44.1 kHz beträgt), für die später ein gemeinsamer Schalldruckpegel berechnet wird. Die Berechnung des Effektivwerts erfolgt nach derselben Formel mit der auch schon der Effektivwert des Kalibrierungssignals berechnet wurde:

$$x_{eff} = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

Dieser Schritt hat in Matlab programmiert folgenden Code²⁹:

```
%% Calculation of the linear mean values, length: 1024 samples
lenlinmean = 1024; % The RMS value of each 1024 samples is derived
lenlinmean1 = fix(lenx/lenlinmean); % Number of RMS value calculations
display('Calculating the linear mean value per 1024 samples');
xlinmean = zeros(1,lenlinmean1+1); % Empty vector where RMS values are
stored
for i = 1:lenlinmean1
    xlinmean(i) = sqrt((1/lenlinmean)*sum((xweight(lenlinmean*(i-
1)+1:lenlinmean*i).^2)));
end
```

Der Grund für die Datenreduktion liegt in der Länge der zu analysierenden Dateien. Die Dateien können eine Länge von über einer Stunde haben. Bei großen Dateien würde die nun folgende exponentielle Mittelung und Schalldruckpegelberechnung sehr viel Zeit in Anspruch nehmen. Um dies zu beschleunigen, wurde in der Analyse an dieser Stelle die lineare Mittelung eingebaut. Dass ausgerechnet 1024 Samples zusammengefasst werden, liegt zum einen daran, dass dies ein Achtel der Fensterlänge ist und so am Ende des Signals keine Samples übrig bleiben, weil sie über den letzten 1024er-Block hinausragen. Zum anderen ist eine Datenreduktion um den Faktor 1000 ausreichend, um auch größere Dateien in einer angemessenen Zeitspanne analysieren zu können. Werden die Werte von ca. 23 Millisekunden zusammengefasst, ist das Risiko, dass Daten verloren gehen und Ereignisse übersehen werden, außerdem verschwindend gering. Aus diesen linear gemittelten Werten wird der exponentielle Mittelwert berechnet (xexpmean). Dabei wird die gewählte Zeitbewertung miteinbezogen. Das exponentiell gemittelte Sample x_{exp} zum Zeitpunkt *i* lässt sich dabei mithilfe des exponentiell gemittelten Samples x_{exp} zum Zeitpunkt *i-1* und des linear gemittelten Samples x_{lin} zum Zeitpunkt *i* berechnen³⁰:

$$x_{exp,i} = g_1 * x_{exp,i-1} + g_2 * x_{lin,i}$$

 g_1 und g_2 sind dabei Gewichtungsfaktoren, die sich folgendermaßen berechnen lassen:

 $g_1 = e^{\frac{-T}{\tau}}$ $g_2 = 1 - g_1$

T... Abtastintervall τ... gewählte Mittelungskonstante

Wurde die Mittelungskonstante *impulse* gewählt, muss in einem zusätzlichen Schritt noch überprüft werden, ob das aktuelle Sample einen größeren oder kleineren Wert besitzt als das vorherige, damit korrekt entschieden werden kann, ob für τ die Zeitkonstante für den Anstieg oder für den Abfall verwendet wird. Dieser Schritt ist nicht notwendig, wenn als Mittelungs-

²⁹ Siehe Matlab-Datei sound_pressure_level.m Zeile 206ff.

³⁰ Vgl. [TRINK, S. 66.]

konstante *fast* oder *slow* gewählt wurde, da diese dieselben Anstiegs- und Abfallzeiten besitzen. Die folgenden Zeilen zeigen den Matlab-Code dieser Berechnung³¹:

```
%% Calculation of the exponential mean values
display('Calculating the exponential mean value per sample');
xlinmean(lenxlinmean+1) = 0; % For exponential mean value calculation one
extra sample is required
xexpmean = zeros(1,lenxlinmean+1); % Default vector where exponential mean
values are stored
% Check which time constant is selected
if strcmpi(avmode, 'impulse') == 1 % Impulse-weighting
    for i = 1:lenxlinmean
        % Calculation of the weighting factors for the first and second
        % sample
        if xlinmean(i+1) > xexpmean(i) % Second sample is larger than first
one (increase), q1 = 35ms
            g1 = exp(-lenlinmean/(fs*avtime));
            g2 = 1-g1;
        else % First sample is larger than second one (decrease), g1 = 1.5s
            g1 = exp(-lenlinmean/(fs*avtime2));
            g2 = 1-g1;
        end
        xexpmean(i+1) = g1*xexpmean(i) + g2*xlinmean(i+1);
    end
else % Fast or slow-weighting
    % Calculation of the weighting factors for the first and second sample
    g1 = exp(-lenlinmean/(fs*avtime));
    g2 = 1-g1;
    for i = 1:lenxlinmean
        xexpmean(i+1) = g1*xexpmean(i) + g2*xlinmean(i+1);
    end
```

end

Nun sind im Signal alle Optionen, die für die Analyse ausgewählt werden können, berücksichtigt und unter Einbeziehung des Referenzschalldruckpegels (p0) kann nach folgender Formel der zeitliche Schalldruckpegelverlauf berechnet werden (Lp):

$$L_p = 20 * \log \frac{p}{n} [dB]$$

In Matlab-Code geschrieben hat diese Formel folgende Gestalt (p gleicht dabei xexpme-an)³²:

```
Lp = 20.*log10(xexpmean./p0); % Deriving Lp
Lp = round(Lp*10)/10; % Round Lp to one decimal
```

³¹ Siehe Matlab-Datei sound_pressure_level.m Zeile 221ff.

³² Siehe Matlab-Datei sound_pressure_level.m Zeile 276f.

Aus dem zeitlichen Schalldruckpegelverlauf wird zunächst der energieäquivalente Dauerschallpegel L_{eq} (Leq) ermittelt. Die Formel dafür lautet³³:

$$L_{eq} = 10 * \log(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} 10^{\frac{L_{pi}}{10}}) \text{ [dB]}$$

Diese Berechnung sieht im Matlab-Code folgendermaßen aus³⁴:

Leq = 10*log10((1/lenLp)*sum(10.^(Lp/10))); % Deriving Leq Leq = round(Leq*10)/10; % Round it to one decimal

Daraufhin wird das Histogramm des Schalldruckpegelverlaufs berechnet, mithilfe dessen die Werte für die Pegelstatistik, die exportiert wird, ermittelt werden. Für die spektrale Analyse des Signals wird das frequenzbewertete Signal xweight im Ganzen nochmals in den Frequenzbereich transformiert. Dort wird je nach gewählter Genauigkeit entweder eine Oktavband-, Terzband- oder Zwölftel-Oktavbandanalyse berechnet.

³³ Vgl. [ÖNORM S 5004] Kapitel 2.4.

³⁴ Siehe Matlab-Datei sound_pressure_level.m Zeile 285f.

10 Anhang E: Dateienverzeichnis

Datei-Name	Beschreibung
PA_Ludwig.docx	Word-Dokument, das die gesamte schriftliche Arbeit enthält
PA_Ludwig.pdf	pdf-Dokument, das die gesamte schriftliche Arbeit enthält

Schriftliche Projektarbeit (*.docx, *.pdf):

IntKlaSim (*.xlsm):

Datei-Name	Beschreibung
IntKlaSim_V8.xlsm	Excel-Datei, die die Anwendung IntKlaSim enthält

File Cutter (*.*fig*, *.*jpg*, *.*m*):

Datei-Name	Beschreibung
File_Cutter.fig	Matlab-Figure, die die grafische Benutzeroberfläche der An- wendung <i>File Cutter</i> enthält
File_Cutter.m	Matlab-Datei, die den Code der Anwendung File Cutter enthält
TUGraz_logo.jpg	Logo der TU Graz, das in der rechten oberen Ecke der Anwen- dung angezeigt wird

Noise Level Analyzer (*.fig, *.jpg, *.m):

Datei-Name	Beschreibung
analyze_calibration.m	Matlab-Funktion, die aus der Kalibrierungsdatei den Referenz- schalldruckpegel p0 berechnet
convert_file_to_mono.m	Matlab-Funktion, die die geladenen Dateien gegebenenfalls in Mono konvertiert

fft_analysis.m	Matlab-Funktion, die die Oktavband-, Terzband- oder Zwölftel- Oktavbandanalyse berechnet
Noise_Level_Analyzer.fig	Matlab-Figure, die die grafische Benutzeroberfläche der An- wendung Noise Level Analyzer enthält
Noise_Level_Analyzer.m	Matlab-Datei, die den Code der Anwendung Noise Level Analy- zer enthält
sound_pressure_level.m	Matlab-Funktion, die die Schalldruckpegelwerte berechnet
time_intervall.m	Matlab-Funktion, die gegebenenfalls einen Ausschnitt aus der geladenen Datei auswählt
TUGraz_logo.jpg	Logo der TU Graz, das in der rechten oberen Ecke der Anwen- dung angezeigt wird

Bilddateien(*.dia, *.fig, *.jpeg, *.jpg, *.png):

AbbNr.	Dateiname
Abb. 3.2	Kap3_Anwenderflussdiagramm_File_Cutter.dia
	Kap3_Anwenderflussdiagramm_File_Cutter.jpeg
	Kap3_Anwenderflussdiagramme_Hilfsgrafik_1.jpg (Hilfsgrafik für Kap3_Anwenderflussdiagramm_File_Cutter.dia und Kap3_Anwenderflussdiagramm_Noise_Level_Analyzer.dia)
	Kap3_Anwenderflussdiagramme_Hilfsgrafik_2.jpg (Hilfsgrafik für Kap3_Anwenderflussdiagramm_File_Cutter.dia und Kap3_Anwenderflussdiagramm_Noise_Level_Analyzer.dia)
Abb. 3.10.	Kap3_Anwenderflussdiagramm_Noise_Level_Analyzer.dia
	Kap3_Anwenderflussdiagramm_Noise_Level_Analyzer.png
Abb. 6.1	Anhang_A_Blockschaltbild_IntKlaSim.dia
	Anhang_A_Blockschaltbild_IntKlaSim.jpeg
Abb. 7.1	Anhang_B_Frequenzkurven.fig
	Anhang_B_Frequenzkurven.jpg
Abb. 7.2	Anhang_B_Lp_500_Hz.fig
	Anhang_B_Lp_500_Hz.jpg

Abb. 7.3	Anhang_B_Lp_1_kHz.fig
	Anhang_B_Lp_1_kHz.jpg
Abb. 7.4	Anhang_B_Lp_5 kHz.fig
	Anhang_B_Lp_5 kHz.jpg
Abb. 7.5	Anhang_B_Lp_Beethoven.fig
	Anhang_B_Lp_Beethoven.jpg
Abb. 7.6	Anhang_B_Lp_Beethoven_vergrößert.fig
	Anhang_B_Lp_Beethoven_vergrößert.jpg
Abb. 8.1	Anhang_C_Wellenform_Sinus_1_kHz_Abfall_030dB.fig
	Anhang_C_Wellenform_Sinus_1_kHz_Abfall_030dB.jpg
Abb. 8.2	Anhang_C_Lp_Sinus_1_kHz_Abfall_030dB.fig
	Anhang_C_Lp_Sinus_1_kHz_Abfall_030dB.jpg
Abb. 8.3	Anhang_C_Wellenform_Beethoven.fig
	Anhang_C_Wellenform_Beethoven.jpg
Abb. 8.4	Anhang_C_Lp_Beethoven.fig
	Anhang_C_Lp_Beethoven.jpg
Abb. 8.5	Anhang_C_Lp_Beethoven_vergrößert.fig
	Anhang_C_Lp_Beethoven_vergrößert.jpg
Abb. 9.1	Anhang_D_Berechnung_L.dia
	Anhang_D_Berechnung_L.jpeg
	Anhang_D_Berechnung_L_Hilfsgrafik_1.jpg (Hilfsgrafik für Anhang_D_Berechnung_L.dia)
	Anhang_D_Berechnung_L_Hilfsgrafik_2.jpg (Hilfsgrafik für Anhang_D_Berechnung_L.dia)
	Anhang_D_Berechnung_L_Hilfsgrafik_3.jpg (Hilfsgrafik für Anhang_D_Berechnung_L.dia)
Abb. 9.2	Anhang_D_Window.fig
	Anhang_D_Window.jpg

Abb. 9.3	Anhang_D_Windowing_1.fig
	Anhang_D_Windowing_1.jpg
	Anhang_D_Windowing_2.fig
	Anhang_D_Windowing_2.jpg
Abb. 9.4	Anhang_D_DE-Windowing_1.fig
	Anhang_D_DE-Windowing_1.jpg
	Anhang_D_DE-Windowing_2.fig
	Anhang_D_DE-Windowing_2.jpg