

Technische Universität Berlin
Fakultät I
Institut für Sprache und Kommunikation
Fachgebiet Audiokommunikation

Exposé zur Magisterarbeit

NISTARS

Konzeption und Implementierung einer Basisstruktur zur mehrkanaligen Akquise und Analyse akustischer Signale unter MATLAB.

Robin Seiler

Abstract

Auf der Basis einer externen, mehrkanaligen Datenerfassungskarte und eines Laptops, wird ein mobiles Signalerfassungs- und Analysesystem für PC's mit Hilfe von MATLAB, inklusive Data Acquisition Toolbox, entworfen. Beide Systeme besitzen Benutzeroberflächen und sind sowohl separat, als auch in Kombination nutzbar. Die Analysesektion bietet ein Set aus Basisfunktionen, die in Form eines Postprocessings auf gespeicherte Rohdaten angewandt werden. Die Implementierung mittels strukturierter Methoden in Kombination mit objektorientierten Bestandteilen gewährleistet, durch einen modularen Aufbau, eine Erweiterung durch zusätzliche, eigens programmierte Algorithmen. Mit dem Ziel, ein hauseigenes, transparentes Messsystem zu schaffen, dass auf die akustische Forschung und Lehre am Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik zugeschnitten ist.

Akustische Messtechnik

„Die Grundlage einer jeden naturwissenschaftlichen oder ingenieurwissenschaftlichen Disziplin bildet die Messung der interessierenden Größen“ [1].

Auf das Gebiet der Akustik angewandt verbirgt sich hinter dem Begriff der „interessierenden Größen“ meist der zeitliche Verlauf des Schalldrucks oder der Auslenkung. Die elektroakustische Wandlung erfolgt dabei im Falle des Schalldrucks durch Mikrophone, im Falle der Auslenkung durch Köperschallaufnehmer. Die erhaltene Information gibt neben der Zeitstruktur, auch über die Stärke des Signal und mittels FFT über dessen Frequenzzusammensetzung Aufschluss. Anhand dieser drei Kenngrößen werden Emissions-, Transmissions- und Immissionsvorgänge beschrieben [2]. Darüber hinaus lassen sich Systeme, im Sinne der Systemtheorie, akustisch bzw. elektro-akustisch durch sie charakterisieren (Raumimpulsantwort, Übertragungsverhalten von Lautsprecher, usw.). Seit den späten sechziger Jahren werden Modelle entwickelt, um die menschliche Schallempfindung zu simulieren [2, 3, 4, 5]. Die Qualität dieser Modelle wird, damals wie heute, kontrovers diskutiert.

Einig ist man sich, dass im Zuge dessen, eine gehörgerechte Schallanalyse auch eine binaurale Kunstkopf Aufnahmetechnik benötigt. Gängige (jedoch nicht standardisierte) Modelle sind unter anderem, der Neumann KU-100 und das HMS III System von Head Acoustics [6, 7].

Hauptsächlich jedoch werden mehrkanalige Systeme eingesetzt. Dabei kann sich die Anzahl der Kanäle auf mehreren hundert Eingangskanäle, zur umfassenden Schwingungsanalyse komplexer technischer Maschinen (Triebwerke, PKWs, usw.) belaufen. Ein Beispiel hierfür ist das Vibro-Akustik-System PAK von Müller BBM [8].

Mehrkanalsysteme zur Ortung von Schallquellen, so genannte Akustische Antennen, bestehen aus Mikrofon-Array, in der Regel mit äquidistanter Mikrofon-Anordnung. Die akustische Kamera vereint Mikrofon-Array und Kamera, so dass sich Schalldruckverteilungen hochauflösend visualisieren lassen. Sie ist mit einer Markteinführung im Jahr 2001 [9] sicherlich die jüngste, viel versprechende Neuerung akustischer Messtechnik.

Einfache Schallpegelmesser sind heutzutage displaybestückt und in der Lage unterschiedliche Analysen durchzuführen, wie beispielsweise eine FFT oder eine Terz- oder Oktavanalyse. Zum Teil mit einer so hoher Rechengeschwindigkeit, dass sie nahezu in Echtzeit arbeiten.

Relevanz, Zielsetzung und Umfang der Arbeit

Berücksichtigt man, dass im Prinzip jeder Hersteller eine firmeneigene Analyse Software anbietet, ergibt sich eine große Vielzahl unterschiedlicher Messsysteme. Allen gemeinsam ist, eine (vom Hersteller gewünschte) eingeschränkte Transparenz hinsichtlich der Funktionsweise, der Komponenten und der Rechenschritten. Dies hat zur Folge, dass dem Benutzer (im besten Fall) die zugrunde liegenden generellen Arbeitsschritte bekannt sind, ergebnisbeeinflussende Details jedoch oft verborgen bleiben. Typische Beispiele dafür sind unter anderem:

- Filterordnungen und Grenzfrequenzen bei Analysen,
- Skalierungsfaktoren beim Datenexport,
- Downsampling Grenzen und Schrittgrößen,
- Kalibrierprotokolle, usw.

Ein Messsystem, das nicht in einen Wertschöpfungsprozess eingebunden ist, hat dem gegenüber den Vorteil das Software-Backend explizit offen legen zu können und erlangt dadurch ein hohes Maß an Transparenz. Transparenz wiederum gewährleistet Softwarequalität, dadurch dass der

Anwender die Korrektheit des Programm, im Sinne von Übereinstimmung zwischen dem beobachteten und dem gewünschten Verhalten, prüfen kann¹ [10]. Letztendlich erhöht dies die Reliabilität der erzielten Ergebnisse.

Zum Anderen besteht innerhalb des Instituts am Fachbereich Technische Akustik seit langer Zeit der Wunsch (und der Bedarf) eines mobilen, hauseigenen Messsystems, welche von den Mitarbeiter genutzt und durch eigenen Beitrag weiterentwickelt werden kann.

Außerdem besitzen die am Institut hauptsächlich genutzten Messsysteme Oros 34 und Oros 38 [11] eine MAT-File Exportfunktionen, so dass mit einem MATLAB basierten Analysesystem eine Kompatibilität zwischen den Systemen bestehen würde.

Die Arbeit umfasst, neben dem Verfassen der Reinschrift, die Konzeption des Messsystems und dessen Software Realisierung. Hierzu gehört:

Die Entwicklung und Implementierung graphischer Benutzeroberflächen, das Programmieren der Ablaufsteuerung, die Fehlerprävention, die Implementierung wichtiger Basisfunktion zur Signalanalyse, sowie die Prüfung des Komplettsystems durch Tests und Systemverifikation durch einen Vergleich mit anderen Messsystemen.

Der vorläufige Arbeitstitel des Programms setzt sich aus den Abkürzungen des Kartenherstellers National Instruments, des Instituts für Strömungsmechanik und Technischer Akustik (ISTA), sowie den Initialen des Autors und Entwicklers zusammen.

Entwicklungsrahmen

Als Entwicklungsumgebung steht MATLAB R13 Release 2006 b in Verbindung mit der Data Acquisition Toolbox [12] zur Verfügung. Weitere Toolboxes werden nicht genutzt.

MATLAB besitzt mit GUIDE ein **G**raphical **U**ser **I**nterface **D**esign **E**nvironment, welches die gängigen UI-Control Elemente (Pushbutton, Buttongroup, etc.) für das grafische Layout bereitstellt. Nach Anfertigung des GUI, wird ein Figure-File und ein M-File Template mit vorbereiteten Callback-Funktionen generiert. Die Betätigung eines UI-Control Objekts führt, wenn nicht anders deklariert, seine Callback-Funktion aus. Die spätere Programmierung erfolgt in hohem Maße entlang dieser Callback-Funktionen.

Die Toolbox schreibt die erfassten Daten nicht direkt auf die Festplatte sondern nutzt einen Teil des RAM als Zwischenspeicher, aus dem die Daten nach der Aufzeichnung ausgelesen werden müssen. Als Speicherziel stehen der MATLAB Workspace und/oder die Festplatte zur Verfügung. Somit ist die maximale Aufnahmedauer durch den zur Verfügung stehenden RAM limitiert. Je nach Systemauslastung wird zwischen 25-30% des RAM reserviert.

Sind die bereitgestellten Kapazitäten ausgereizt, wird die Datenaufzeichnung automatisch durch auslösen der Toolboxeigenen Data Missed Function gestoppt, eine Fehlermeldung ausgegeben und alle im RAM befindlichen Rohdaten verworfen (!).

Das Herzstück (und gleichzeitig die große Unbekannte) der DAQ-Toolbox sind die DAQ-Adapter. Dahinter verbergen sich Software Interface Tools, mit deren Hilfe sich USB und PCI basierte Messmodule direkt aus MATLAB konfigurieren lassen. Damit ist es möglich Daten aufzuzeichnen und abzuspielen. Die DAQ-Adapter steuern dabei die Kommunikation zwischen Hard- und Software.

¹ Sicherlich richtig ist, dass sich Korrektheit auch mittels Systemvergleich kontrollieren lässt. Dies wiederum aber die Kenntnis der Fehlerfreiheit des Vergleichssystems erfordert.

MathWorks bietet unter anderem DAQ-Adapter für National Instruments, Agilent Technologies und Windows kompatible Soundkarten an. Allerdings ist bei letzteren zu beachten, dass der Winsound DAQ-Adapter maximal zwei Eingangskanäle unterstützt.

Eine DAQ-Session, so wie von MathWorks vorgesehen, umfasst 5 Arbeitsschritte [13]:

- 1) Initialisierung der Messkarte durch den jeweiligen DAQ-Adapter.
Hierdurch wird der Hardware ein so genanntes Analoginput Objekt zugewiesen.
- 2) Initialisierung der virtuellen Eingangskanäle.
- 3) Starten der Aufzeichnung.
- 4) Stoppen der Aufzeichnung.
- 5) Extrahieren der Daten aus dem RAM.

Als Messmodul wird ein Gerät der Firma National Instruments namens NI cRio 9233 verwendet. Das Frontend besitzt 4 BNC bestückte IEPE versorgte Eingangskanäle, arbeitet mit 24 Bit Wortbreite, bei einer maximalen Abtastrate von 50 kHz. Die gelieferte Ausgangsspannung liegt bei $\pm 5V$ [14]. Zur Datenübertragung via USB 2.0 wird zusätzlich ein USB 9162 Carrier benötigt.

Aufbau

Die folgende Abbildung (Abbildung 1) zeigt die benötigten Systemkomponenten.

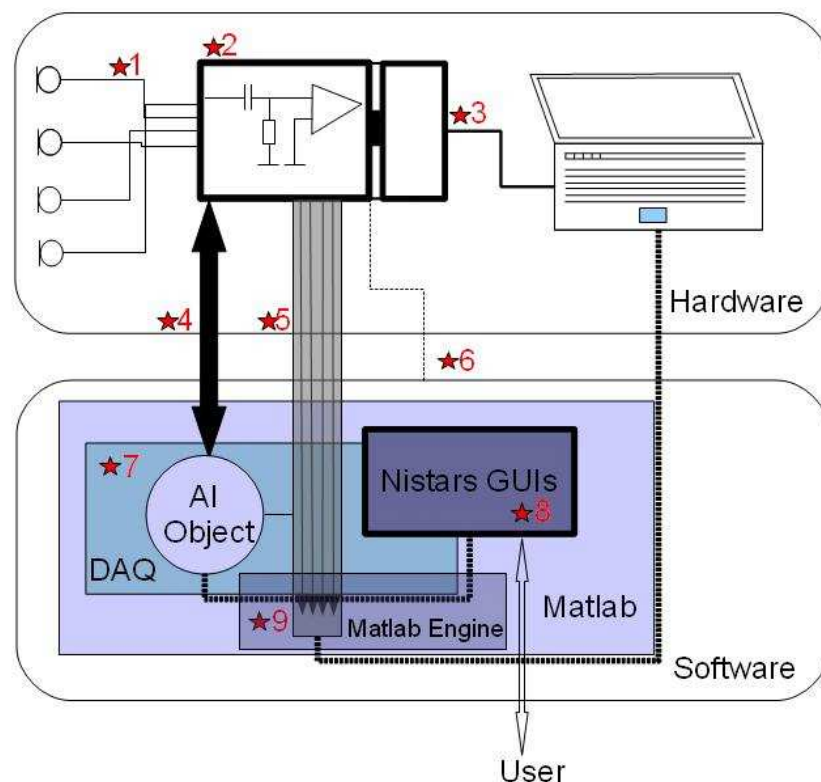


Abbildung 1: Messsystem-Komponenten und Funktionsschema

Im Einzelnen sind dies:

- 1) IEPE versorgte elektro-akustische Wandler
- 2) NI cRio 9233
- 3) USB 9162 Carrier zur Datenübertragung via USB 2.0

- 4) Nidaq DAQ-Adapter
- 5) Virtuelle Eingangskanäle
- 6) Hardware Treiber
- 7) Data Acquisition Toolbox
- 8) Die entwickelte Software NISTARS
- 9) MATLAB/DAQ -Engine

Wie ersichtlich ist das Setup des Messsystems äußerst einfach, da nur wenige Hardware-Komponenten benötigt werden. Durch die IEPE Versorgung entfällt eine zusätzliche Signalkonditionierung in Form von Vorverstärkern oder ähnlichem. Somit ist die Forderung nach einer mobilen Analyseeinheit quasi von vorne rein erfüllt.

Anforderungskatalog und Entwicklungskonzept der Software

Für die Datenanalyse lässt die Arbeitsweise der DAQ-Toolbox konzeptionell nur die Option des Postprocessings zu (siehe Abschnitt: Entwicklungsrahmen). Das heißt sämtliche Analysefunktion werden nachträglich auf die aus dem RAM extrahierten Rohdaten angewandt.

Im jetzigen Planungsstadium sind vier Benutzeroberflächen vorgesehen: Den Rekorder, das Monitoringsystem, eine gemeinsame Kalibrieroberfläche und das Data Analyse System. Akquise- und Analysesystem lassen sich in Kombination, als auch separat nutzen.

Die Zielvorgaben des Softwarerekorders ergaben sich auf Basis der im Vorfeld durchgeführten Benchmarktests (siehe Abschnitt: Geleistete Vorarbeiten). Nachfolgend aufgelistet sind die gewünschten Leistungsmerkmale:

- Auswahl zwischen manueller und vordefinierter Aufnahmelängen
- Datenspeicherung als Mat-File [Variablen: data, time und fs] und/oder Wav-File mit wählbarer Wortbreite
- Aussteuerungsanzeige zur Kontrolle der Signalstärke (auch vor der Aufnahme)
- Wahl des Speicherziels
- Chronologische Listung der generierten Files
- Möglichkeit der zeitversetzten Signalerfassung
- Automatische Indexierung und eine Overwrite-Funktion
- Wahl der Kanalanzahl und der Samplerate

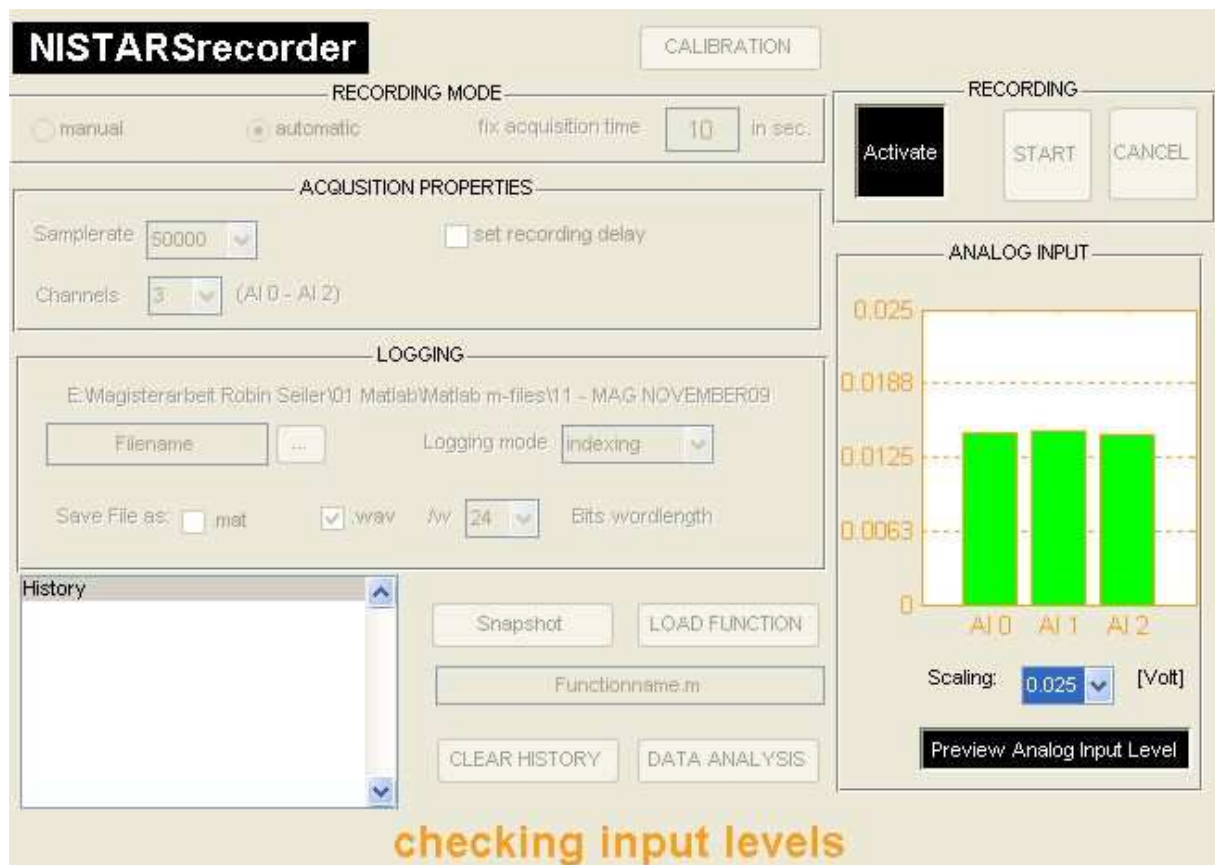


Abbildung 2: Rekorderoberfläche

Das Monitoring System wird hauptsächlich die verschiedenen Triggerfunktionen der DAQ-Toolbox nutzen, da aufgrund der begrenzten Speicherkapazität mit sequentiell aufeinander folgenden Datenblöcken gearbeitet werden muss. Im Gegensatz zur Rekordereinheit werden die Rohdaten nicht auf die Festplatte, sondern in den MATLAB Workspace, extrahiert. Die gewünschte Analyse und die Sequenzlänge der Rohdaten wird im Vorfeld vom Benutzer im GUI festgelegt. Stehen $k = f_s \cdot C_{Kanal} \cdot t_s$ Samples im RAM zur Verfügung, wird die Akquise automatisch gestoppt und die Daten in den Workspace geladen.

Dabei ist:

- f_s die Samplerate,
- C_{Kanal} die Anzahl der verwendeten Eingangskanäle und
- t_s die Sequenzlänge in Sekunden.

Der Neustart der Aufzeichnung erfolgt sobald keine Daten mehr im RAM zur Verfügung stehen. Während die nächsten k -Samples aufgezeichnet werden, wird die ausgewählte Analysefunktion auf die Daten im Workspace ausgeführt, und die nächsten k -Samples in den Workspace geladen. Diese Vorgehensweise führt zu einer diskontinuierlichen Datenaufzeichnung. Die zeitliche Lücke zwischen den einzelnen Sequenzen liegt jedoch fast immer unter 100ms und ist abhängig von der Menge an Samples.

Zur Kalibrierung des Systems wird eine separate Benutzeroberfläche entworfen, die aus dem Rekorder oder dem Monitoring System aufgerufen werden kann. Sie stellt die gängigen Kalibrierpegel und Frequenzen zur Auswahl. Da der ermittelte Wert den Gewichtungsfaktor aller

später erhobenen Daten darstellt, bedarf es verschiedener Instrumentarien zur Fehlerdetektion, um die Validität der Kalibrierung zu gewährleisten.

Die Analyse Sektion enthält ein Set aus fundamentalen, modular strukturierten Funktionen. Die Umsetzung ist dabei darauf ausgerichtet, den Fundus der Funktionen erweitern zu können. Als Schlüsselproblematik stellt sich die Frage nach der konzeptionellen und methodischen Realisierung des Programms, inklusive Benutzeroberfläche (auch hinsichtlich des grafischen Layouts), in einem sukzessiv wachsenden System.

Bei der grafischen Gestaltung ist daher der Anwender selbst gefragt. Mit Hilfe des dafür entwickelten Master Tools wird das GUI (zu neudeutsch) „customized“. Eingebundene Module lassen sich aus einem UI-Popupmenu im Master wählen und einem UI-Panel zuordnen, je nach Modulname lassen sich die im zugehörigen Funktionen selektieren und im Panel befindlichen Pushbuttons zuordnen. Diese Tragen dann als String den Namen der Analysefunktion und werden durch Betätigen des Objekts ausgeführt.

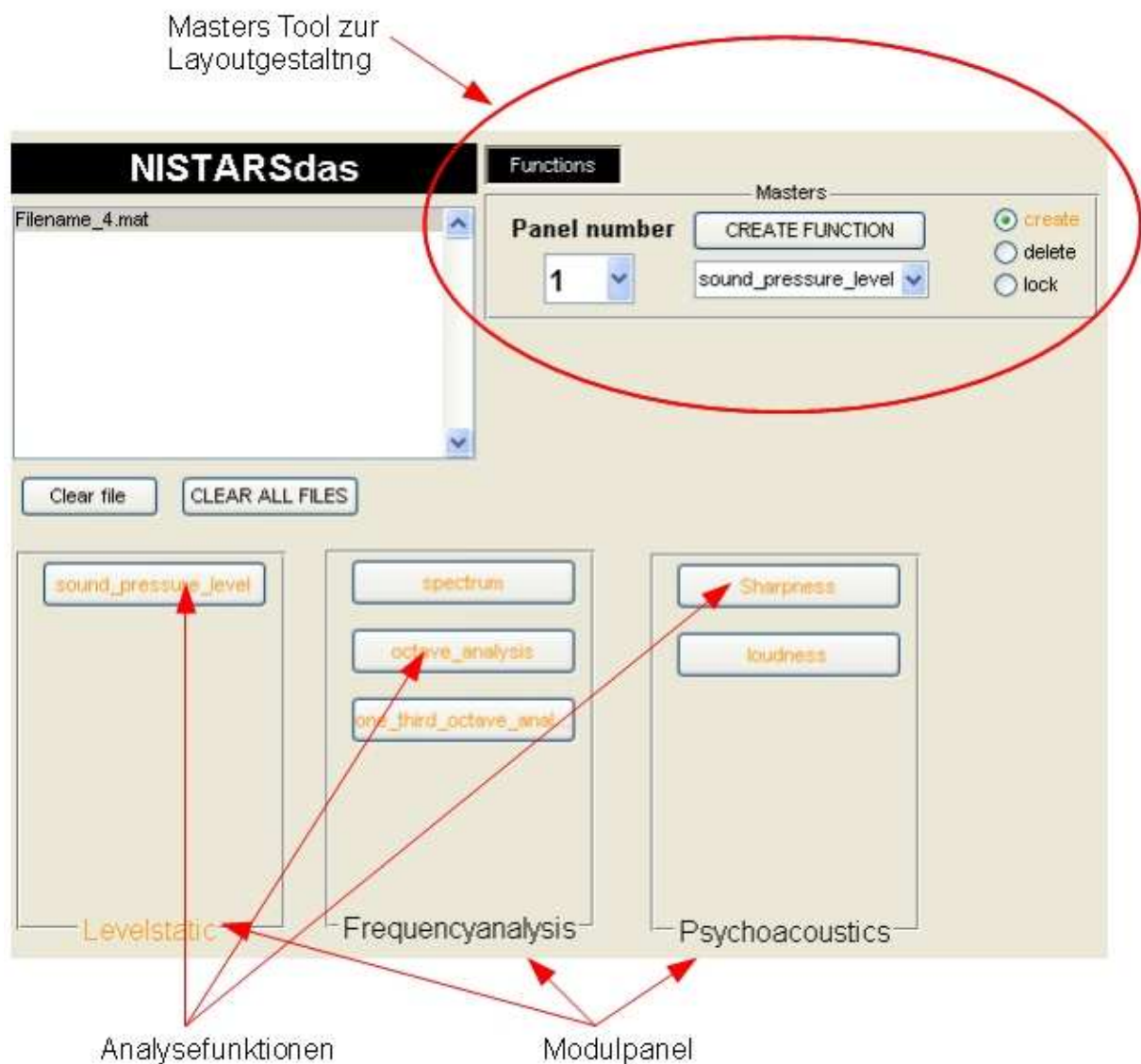


Abbildung 3: NISTARS – Data Analysis System – GUI (Testversion)

Module und Funktionen werden eingebunden und dadurch automatisch zur Auswahl bereitgestellt, indem Sie in die vorgeschriebene Ordnerstruktur kopiert werden. Eine mögliche Ordnerstruktur könnte wie folgt aussehen:

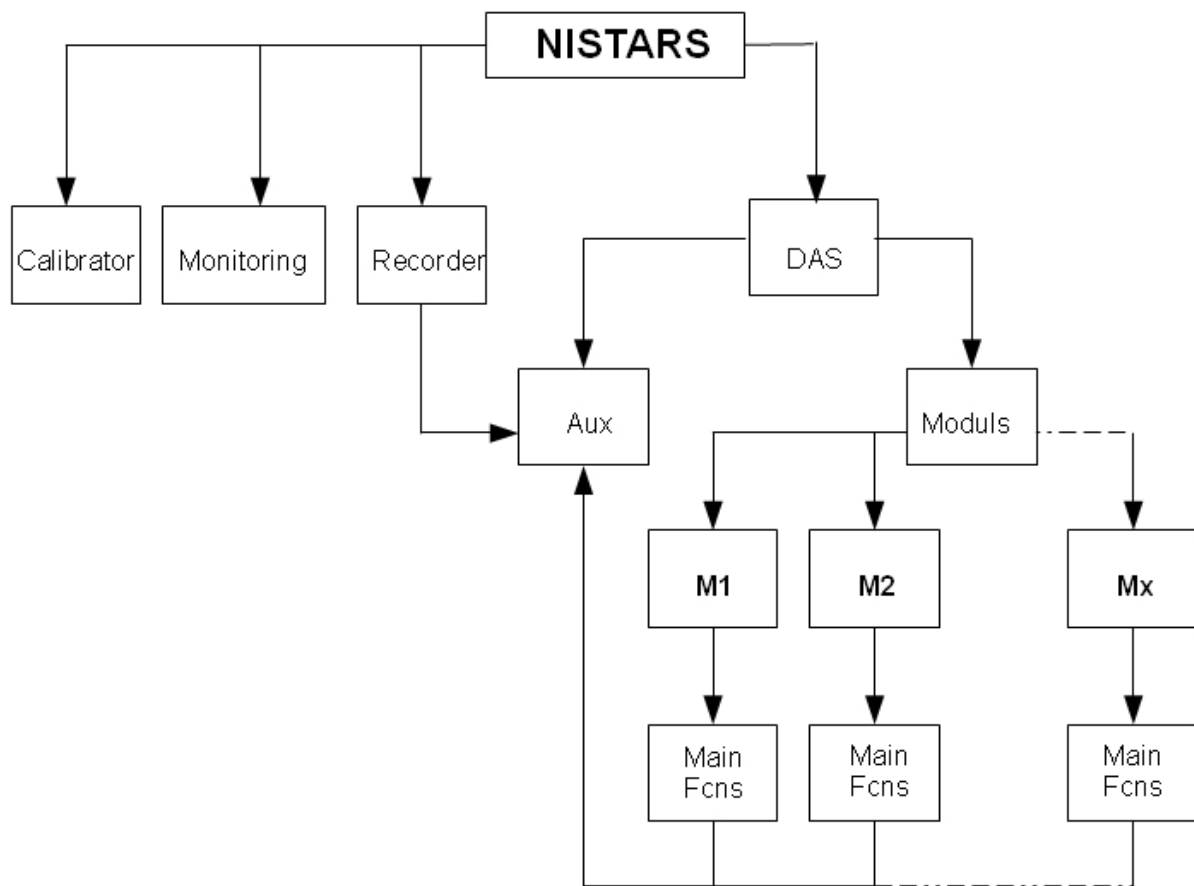


Abbildung 4: Potenzielle Ordnerstruktur des NISTARS-Komplettsystems

Softwaremethode NISTARS-das

Das Analysesystem basiert auf einer hybriden Softwaremethode - einer Kombination aus strukturierten Methoden (Funktionen) und objektorientierten Bestandteilen (Callbacks). Der Objekt-Callback wird durch die linke Maustaste ausgelöst und ruft die Funktion auf, mit der das Objekt (in der Regel sind dies Pushbuttons) vorher vom Anwender belegt wurde. Die rechte Maustaste löst die Button-Down-Funktion aus. Sie liest ebenfalls den String aus, ruft jedoch das zur Analysefunktion gehörende Property-Window auf. Bei den Property-Windows handelt es sich um kleine GUIs, es existieren also Figure-Files und M-Files, in denen die Benutzereinstellung zur jeweiligen Analyse vorgenommen werden. Dabei übergibt die Button-Down-Funktion den Handle des Objekts an das M-File des Property-Window. Mit Hilfe der Handles werden die Benutzereinstellungen dem Objekt zugeordnet, indem sie in die User Data des (aufrufenden) Objekts gespeichert werden. Dies geschieht durch den Callback des Save&Exit-Button im Property-Window. Da die Benutzereinstellung jetzt im Objekt selbst gespeichert sind, können sie von der Callback-Funktion ausgelesen und an die Analysefunktion übergeben werden.

Die folgende Abbildung visualisiert das beschriebene Funktionsschema.

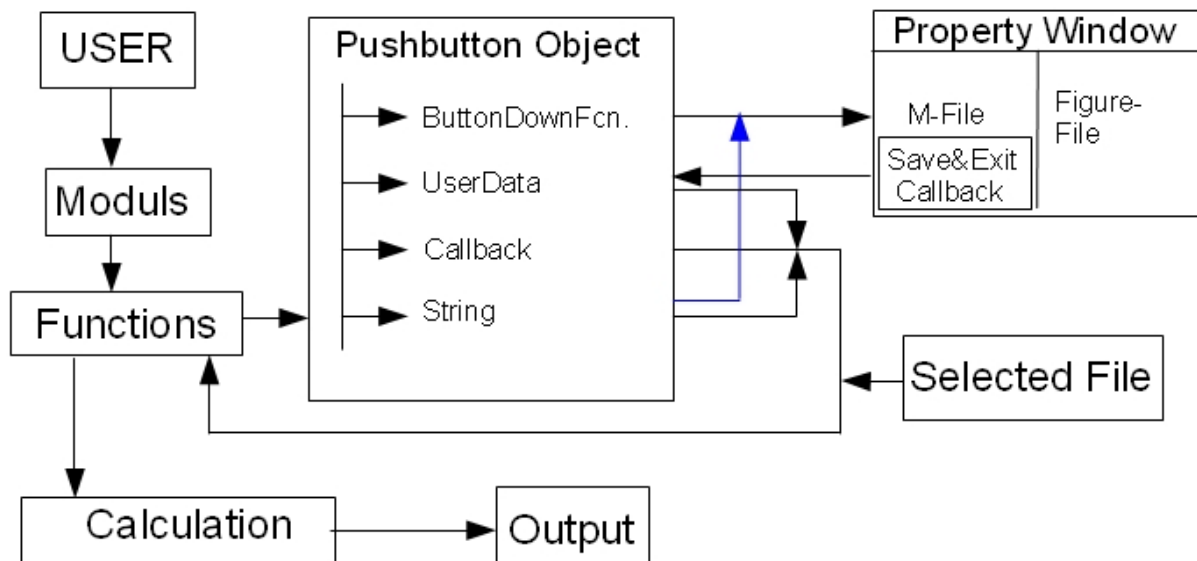


Abbildung 5: NISTARSDas – Funktionsschema (blau -> rechte Maustaste)

Geleistet Vorarbeiten

Bei der Vorbereitung zur Masterarbeit wurden vom Autor folgende Schwerpunkte gesetzt:

Zunächst wurde sich intensiv mit den GUI-Möglichkeiten unter MATLAB und deren Programmierung auseinandergesetzt. Vor allem mit Hilfe von [15] und [16]. Da unter anderem der Austausch von Variablen zwischen unterschiedlichen Oberflächen benötigt wird (siehe vorherigen Abschnitt), war es zudem wichtig zu klären, welche Möglichkeiten sich in dieser Hinsicht bieten und welche Variante die günstigste Lösung darstellt. Hier wurde hauptsächlich Internet-Recherche betrieben.

Ferner war es vonnöten sich mit der Arbeitsweise der MATLAB Data Acquisition Toolbox und deren Funktionsumfang vertraut zu machen, besonders die Kommunikation zwischen Toolbox und Frontend. Diesbezüglich wurden Tests mit Fokus auf die Leistungsfähigkeit des Pakets durchgeführt, die letztendlich darüber Aufschluss gaben, was innerhalb eines überschaubaren Rahmens umsetzbar ist und somit für die Formulierung der Zielsetzung mitentscheidend waren.

Zum dritten besteht die Vorleistung in umfassender Literaturrecherche in Bezug auf die zu entwickelnden Analysealgorithmen verbunden mit den in Normen und Richtlinien vorgeschriebenen Berechnungsverfahren, sowie eine Repetition mathematischer Grundlagen verschiedener Filterentwurfsverfahren [17, 18].

Vorläufiges Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung (Umfang 5-8 Seiten)
 - 1.1 Allgemeines
 - 1.2 Akustisches Messen
 - 1.3 Die akustische Messtechnik heute

2. Konzeption des Messsystems (Umfang 8-12 Seiten)
 - 2.1 Entwicklungsrahmen
 - 2.2 Beschreibung der Komponenten
 - 2.3 Anforderungen
 - 2.4 Funktionsprinzip
 - 2.5 Softwaremethodik

3. Beschreibung der Benutzeroberflächen (Umfang 12-20 Seiten)
 - 3.1 Rekorder – Layout/Methode
 - 3.2 Monitoring – Layout/Methode
 - 3.3 Kalibrierung – Layout/Methode
 - 3.4 Analyse Oberfläche – Layout/Methode

4. Beschreibung der Analysefunktionen (Umfang 20-25 Seiten)
 - 4.1 FFT und Fensterung
 - 4.2 Terz- und Oktavanalyse
 - 4.3 Das Zwicker-Lautheit-Modell
 - 4.4 Simulation der Hörempfindung Schärfe nach DIN 45692
 - 4.5 Pegelanalysen (Zeit- u. Frequenzbewertungen)

5. Softwareerweiterung (Umfang 3-5 Seiten)
 - 5.1 Möglichkeiten und Grenzen
 - 5.2 Vorgehensweise

6. Ergebnisdiskussion (Umfang 3-5 Seiten)
 - 6.1 Experimentelle Systemverifikation
 - 6.2 Vergleich mit anderen Systemen
 - 6.3 Fazit

Arbeits- und Zeitplan

Woche	Entwicklung	Dokumentation
1	Entwurf der Benutzeroberflächen (4 Wochen)	
2		
3		Rohentwurf I (2 Wochen)
4		~ Rohentwurf Kapitel 1 u. 2 verfassen
5	Ablaufsteuerung des Rekorders	
6	inkl. Fehlerprävention (2 W)	
7	Implementierung der wichtigsten Analysefunktionen (6 Wochen)	Rohentwurf II (3 Wochen)
8		~ Überarbeiten Rohentwurf I
9		~ Rohentwurf Kapitel 3 verfassen
10		
11		

12		Rohentwurf III (3 Wochen)
13	Überarbeitung der Funktionen (1W)	~ Überarbeiten Rohentwurf II
14	Software Test	~ Rohentwurf Kapitel 4 verfassen
15	Fehlersuche	Erstellung und Sichtung der Reinschrift (6 Wochen)
16	Programmoptimierung (3W)	
17		
18		
19		
20		

Literatur und Links

Themengebiet: Digitale Signalverarbeitung

- [17] ORGLMEISTER R., Köhler, B.-U.: *Signalverarbeitung*. Fachgebiet Elektronik und Medizinische Signalverarbeitung, Technische Universität Berlin, 2004
- [18] STEARNS, Samuel D.: *Digitale Verarbeitung analoger Signale*. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage, Oldenbourg Verlag, 1994
- HARRIS; Frederic J.: *On the use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transformation*. Paper, IEEE Proceedings Vol 66 No.1, 1978
- OPPENHEIM, Alan V., et al.: *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. 2., überarbeitete Auflage Pearson Studium, 2004

Themengebiet: Software und Programmierung

- [10] LIGGESMEYER, Peter: *Software-Qualität*. 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 2009
- [13] THE MATHWORKS, Inc.: *Data Acquisition Toolbox, Users Guide, Version 2*. The MathWorks Inc., 2001
- [15] MARCHAND, Patrick; Holland O. Thomas: *Graphics and GUIs with MATLAB*. Chapman and Hall CRC, 2003
- [16] SCHWEIZER, Wolfgang: *MATLAB kompakt*. 4. Auflage, Oldenbourg Verlag 2009
- MEYER, Betrand: *Objektorientierte Softwareentwicklung*, 1. Auflage, Hanser Verlag, 1990
- RECHENBERG, Peter; POMBERGER, Gustav: *Informatik Handbuch*. 3. aktualisierte und erweiterte Auflage, Hanser Verlag, 2002

Themengebiet: Technische Akustik

- [1] MÖSER, Michael: *Technische Akustik*. 8. Auflage, Springer Verlag, 2009
<http://www.springerlink.com/content/x67634/?p=8e919fc0d6e54693b5af23ddc4c89018&pi=10>
- [2] MÖSER, Michael (Hrsg.): *Messtechnik der Akustik*. Springer Verlag, 2009

<http://www.springerlink.com/content/h67mv3/?p=cc4e306754d640f8932aa7b04838a70d&pi=4>

- [3] ZWICKER, Eberhard; FASTL, Hugo: *Psychoacoustics Facts and Models*, Second Updated Edition. Springer Verlag, 1999

MÜLLER, Gerhard MÖSER, Michael; (Hrsg.): *Taschenbuch der Technischen Akustik*. 3., erweiterte und überarbeitete Auflage, Springer Verlag, 2003

WEINZIERS, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Springer Verlag, 2008

<http://www.springerlink.com/content/x6127j/?p=a1643bdcffbb4aa8b29bb1a748c37698&pi=0>

Normen

- [4] Norm DIN 45631: 1991. *Berechnung des Lautstärkenpegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum - Verfahren nach E. Zwicker*, Beuth Verlag

- [5] Norm DIN 45692: 2009. *Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe*, Beuth Verlag

Norm DIN EN 61260: 2003. *Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven*, Beuth Verlag

Norm DIN EN 61672-1: 2003. *Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen*, Beuth Verlag

Norm DIN 45641: 1990. *Mittelung von Schallpegeln*, Beuth Verlag

URLs

- [6] http://www.neumann.com/?lang=de&id=current_microphones&cid=ku100_description

- [7] http://www.head-acoustics.de/eng/nvh_hsu_III_3.htm

- [8] <http://www.muellerbbm-vas.com/>

- [9] <http://www.acoustic-camera.com/de/acoustic-camera>

- [11] <http://www.oros-deutschland.com/go.to/modix/now/main.html>

- [12] <http://www.mathworks.de/products/daq/>

- [14] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/202556>