Erstellung und Verwendung eines Matlab-Werkzeugs zur Schallmessung und -analyse mit Laptop und darin enthaltener Sensorik und Messtechnik

Prof. Dr.-Ing. Markus Messer

Geb. am 7.8.1975 in Lich, 1995 Abitur, 1995 - 1996 Grundwehrdienst, 1996 - 2001 Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der TU Darmstadt (Abschluß: Dipl.-Ing.), 1999 - 2000 Studium an der University at Buffalo (NY, USA) im Department of Mechanical and Aerospace Engineering (Abschluß: Master of Science), 2001 - 2006 wissenschaftl. Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. H. P. Wölfel (Fachgebiet Maschinendynamik, TU Darmstadt), 2007 Promotion zum Dr.-Ing., 2007 - 2013 Heidelberger Druckmaschinen AG (ab 2007 Entwicklungsingenieur, ab 2011 Leiter Fachgebiet Strukturdynamik), seit 2008 nebenberuflich Lehrbeauftragter (TH Mittelhessen), seit 2008 Mitglied des VDD, seit 2013 Professor an der TH Mittelhessen. (markus.messer@m.thm.de)

Kurzfassung

Dieser Artikel behandelt die Erstellung und Verwendung eines Matlab-Werkzeugs zur Schallmessung und -analyse mit Laptop und darin enthaltener Sensorik und Messtechnik. Zunächst werden Beispiele „klassischer“ Messungen (Einsatz von Sensorik, Verbindungskabeln, Messdatenerfassungsgerät, etc.) vorgestellt. Dabei geht es um Schallmessungen an einer Bogenoffsetdruckmaschine sowie Schwingungs- und Schallmessungen an einem Klavier. Anschließend wird detailliert auf das Matlab-Werkzeug „Smua“ eingegangen, das nur die in einem Laptop vorhandene Sensorik und Messtechnik nutzt. Als Beispiel wird eine Schallmessung an einem Klavier betrachtet. Zeitsignale und Amplitudenspektren werden diskutiert. Mit Hilfe von Spektrogrammen werden Ein- und Ausschwingvorgänge verschiedener Teiltöne analysiert. Der große Vorteil eines solchen Matlab-Werkzeugs, bei dem nur die in einem Laptop enthaltene Sensorik und Messtechnik verwendet wird, liegt darin, daß man sehr schnell und ohne viel Aufwand Schallmessungen und -analysen durchführen kann.

1. Einleitung

Im Druckmaschinenbau, wie natürlich auch in anderen Bereichen des Maschinenbaus, spielt das Thema Messtechnik eine wichtige Rolle. Viele Fragestellungen lassen sich nur durch den kombinierten Einsatz von Messung und Rechnung sinnvoll bearbeiten.

Messungen werden beispielsweise bei der Entwicklung neuer Maschinen durchgeführt. Aber auch bei der Optimierung bestehender Maschinensysteme oder bei der Fehlersuche bzw. Problembehebung auffälliger Maschinen oder Komponenten können Messungen und anschließende Auswertungen der Daten wichtige Erkenntnisse liefern.

Die seit Jahren wachsende Bedeutung von Sensorik und Messtechnik wird deutlich, wenn man sich die Zahlen zur wirtschaftlichen Entwicklung dieser Branche anschaut. Der AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V. befragt regelmäßig seine Mitglieder zur wirtschaftlichen Entwicklung. Im Jahr 2014 verzeichnete die Branche ein Umsatzwachstum von acht Prozent, für das Jahr 2015 wird ein Umsatzwachstum von fünf Prozent prognostiziert. Die Investitionen wurden im Jahr 2014 um fünf Prozent gesteigert, für 2015 wird sogar mit einem beeindruckenden Investitionsanstieg von 24 Prozent gerechnet. Die folgende Abbildung aus [1] zeigt die wirtschaftliche Branchenentwicklung der Jahre 2005 bis 2014 und einen Ausblick für 2015.

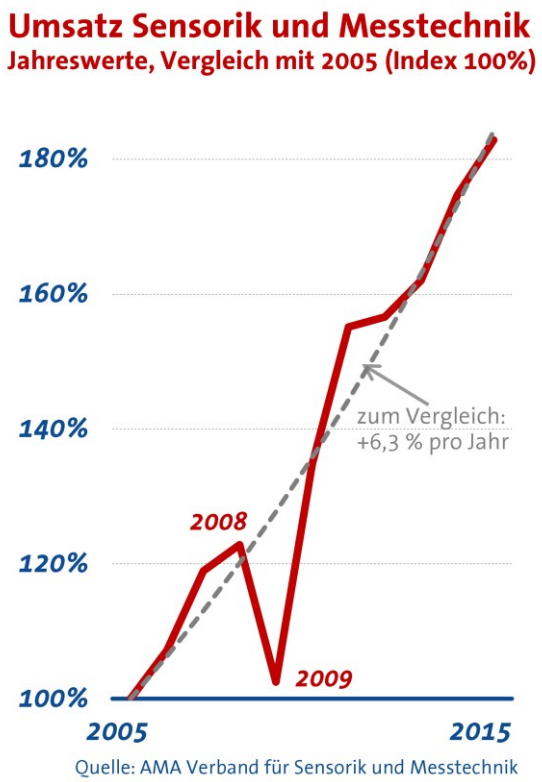


Abb. 1: Umsatzentwicklung im Bereich Sensorik und Messtechnik (Abb. aus [1])

Heutige Mobiltelefone (Smartphones) verfügen über eine Vielzahl an Sensoren (z.B. Beschleunigungssensor, Gyroskop, usw.). Es existieren verschiedene kostenfreie Anwendungen, um z.B. Schwingungen zu messen. ContiTech bietet beispielsweise die kostenlose App ViProtect an. Damit können Schwingungsmessungen und vereinfachte Auslegungen elastischer Lagerungen durchgeführt werden. Das Smartphone wird dazu fest an die zu messende Struktur angelegt. [2]

Eine andere App von ContiTech erlaubt die Messung von Riemenvorspannungen. Dabei wird die Eigenfrequenz eines Antriebsriemens gemessen. Der Riemen muss dazu lediglich in Schwingungen versetzt werden, und mit dem Mikrophon des Smartphones wird der Luftschall gemessen. [3]

Schallmessungen sind natürlich auch im Druckmaschinenbau wichtig. So werden beispielsweise Emissionsmessungen an vorgeschriebenen Messpunkten bei definierten Betriebsbedingungen durchgeführt, und es werden regelmäßig Maßnahmen zur Geräuschminderung ergriffen (siehe z. B. [4]).

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für Schallmessungen an Bogenoffsetdruckmaschinen. Hierfür wurden mit einem Mikrofon Schallmessungen an einem Druckwerk ohne Papierlauf für die beiden Fälle mit/ohne Pressung, also mit/ohne Kanalschlag, durchgeführt. In Abbildung 2 ist die Differenz dieser beiden Messreihen zu sehen, d.h. der durch den Kanalschlag verursachte Schalldruck. Bei Abbildung 2 handelt es sich um ein Spektrogramm. Die Farben (Blau nach Rot) entsprechen dabei den Amplituden der gemessenen Schalldruckdifferenz. Bei einem Spektrogramm werden die Amplituden über einer Zeitachse (x-Achse) und über einer Frequenzachse (y-Achse) dargestellt. Die Maxima in Abbildung 2 entsprechen Biegeschwingungen der Zylinder und lassen sich den Ereignissen Druckanfang und Druckende zwischen Platten- und Gummizylinder zuordnen.

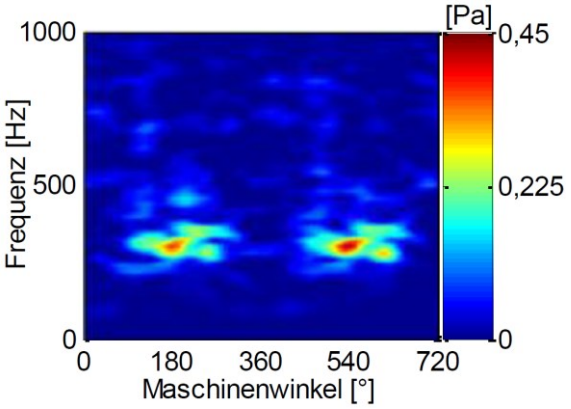


Abb. 2: Spektrogramm (Differenz gemessener Schalldrücke, Abb. aus [5])

Für die Durchführung „klassischer“ Messungen benötigt man selbstverständlich geeignete Sensorik, diverse Verbindungskabel, ein Gerät zur Messdatenerfassung sowie in der Regel dazugehörige Software mit Lizenz und evtl. auch Hardkey (Dongle).

Das Vorgehen bei „klassischen“ Messungen wird im folgenden kurz erläutert. Als Beispiel wird dabei die Schall- und Schwingungsmessung an einem Klavier betrachtet. Zum Einsatz kam dabei ein Mikrofon des Typs „MI 17“ des Herstellers AVM (AVM Mess- und Prüfgeräte für Akustik und Vibration, siehe Abbildung 3).

Abb. 3: Mikrofon des Typs „MI 17“ (Hersteller: AVM Mess- und Prüfgeräte für Akustik und Vibration), Abb. aus [6]

Sucht man bei Musikinstrumenten (oder Maschinen) die Ursachen für störende Nebengeräusche, so empfiehlt es sich, zusätzlich zur Schall- eine Beschleunigungsmessung am Instrument (bzw. an der Maschine) selbst durchzuführen. Denn ein störendes Geräusch kann auch entstehen, wenn Gegenstände im Raum durch den Luftschall zu Schwingungen angeregt werden. Zeigen aber die Signale von Mikrofon und Beschleunigungssensor die gleichen Auffälligkeiten, so wird das Problem im Instrument (oder in der Maschine) selbst zu finden sein. Abbildung 4 zeigt den verwendeten Beschleunigungssensor des Typs „KS 95B-100“ des Herstellers MMF (Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.) im Inneren eines Klaviers.

Bei dem hier beispielhaft betrachteten Instrument traten Auffälligkeiten beim Spielen des Tons a‘‘ auf (erster Teilton: ca. 880 Hz; eine Oktave über dem Kammerton a‘). Daher wurde der Beschleunigungssensor in der Nähe der Saitenbefestigung von a‘‘ plaziert (siehe Abbildung 4).

Abb. 4: Beschleunigungssensor des Typs „KS 95B-100“ (Hersteller: Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.) im Inneren eines Klaviers

Für die Messdatenerfassung wurde das mehrkanalige Messdatenerfassungssystem MEDA verwendet (Hersteller: Wölfel Meßsysteme · Software, siehe Abbildung 5). An Kanal 1 ist bei dem hier betrachteten Beispiel das verwendete Mikrofon angeschlossen (Abbildung 3). Eingangskanal 2 ist mit dem Beschleunigungssensor verbunden (Abbildung 4). Über ein USB-Kabel ist das Messdatenerfassungsgerät in diesem Fall an einen Laptop angeschlossen, auf dem die dazugehörige Software installiert wurde. Als Abtastfrequenz wurden 51,2 kHz eingestellt, so daß der gesamte vom Menschen hörbare Frequenzbereich (20 Hz bis 20 kHz) betrachtet werden kann.

Abb. 5: Mehrkanaliges Messdatenerfassungssystem MEDA (Hersteller: Wölfel Meßsysteme · Software)

Mit der MEDA-Analysesoftware können die Messdaten im Zeit- und Frequenzbereich analysiert werden. Bei dem hier vorgestellten Beispiel wurden die Messdaten mit der MEDA-Software lediglich aufgenommen, gespeichert und anschließend als Textdateien exportiert. Die weitere Analyse erfolgte dann mit der Software Matlab.

Schlägt man am Klavier den Ton a‘‘ einmal an, so sieht der gemessene Schalldruck als Zeitsignal folgendermaßen aus (siehe Abbildung 6).

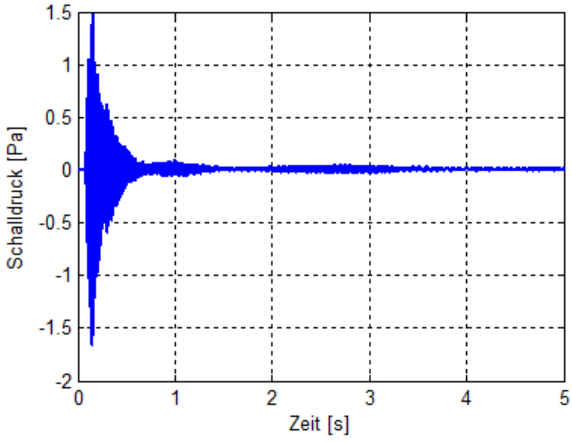


Abb. 6: Gemessenes Zeitsignal (a‘‘)

In dem in Abbildung 6 dargestellten Zeitsignal ist eine Schwebung erkennbar. Dies sieht man am An- und Abschwellen des Schalldrucks. Die Ursache für die Schwebung wird im Frequenzbereich sichtbar. Führt man eine FFT (fast Fourier transform) durch und stellt die Amplituden über der Frequenz im Bereich des ersten Teiltons dar, so ergibt sich folgendes Bild (siehe Abbildung 7).

Wie man in Abbildung 7 sieht, sind die drei Saiten des Tons a‘‘ ein wenig verstimmt, so daß die Frequenz des ersten Teiltons je nach Saite zwischen ca. 880 Hz und ca. 881 Hz liegt. Dies führt zu der im Zeitsignal beobachteten Schwebung, welche man auch hören kann. Solch eine Schwebung kann im Rahmen einer Stimmung schnell behoben werden.

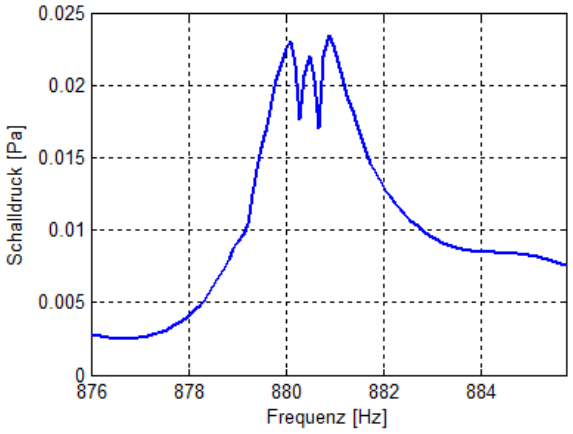


Abb. 7: Darstellung im Frequenzbereich (a‘‘)

Weitere Auffälligkeiten zeigen sich in Spektrogrammen. Hierfür wurde während der Messung mit der rechten Hand mehrfach eine C-Dur-Tonleiter auf- und absteigend gespielt. Die dabei angeschlagenen Tasten waren: c‘‘ (erster Teilton: ca. 523 Hz) bis c‘‘‘ (erster Teilton: ca. 1047 Hz).

Erstellt man das Spektrogramm des Schalldrucks im Frequenzbereich 0 Hz bis 2000 Hz, so sieht man deutlich die ersten Teiltöne der angeschlagenen Tasten. Ebenfalls sichtbar sind die zweiten Teiltöne der meisten gespielten Töne (siehe Abbildung 8). Die größten Amplituden treten beim ersten Teilton von a‘‘ (ca. 880 Hz) auf. Auch die beiden Töne darunter zeichnen sich im Spektrogramm durch relativ große Amplituden der ersten Teiltöne aus (g‘‘: ca. 784 Hz, f‘‘: ca. 698 Hz).

Wahrscheinlich wurde die Taste von a‘‘ unbewußt stärker angeschlagen, da es sich bei a‘‘ um den Ton mit störenden Geräuschen handelte. Dieser Ton wurde vor der Messung über einen längeren Zeitraum als sehr störend empfunden.

Im Spektrogramm kann man ablesen, daß a‘‘ während der Messung zu folgenden Zeiten angeschlagen wurde:
1,8 s; 3,0 s; 5,9 s; 7,0 s.

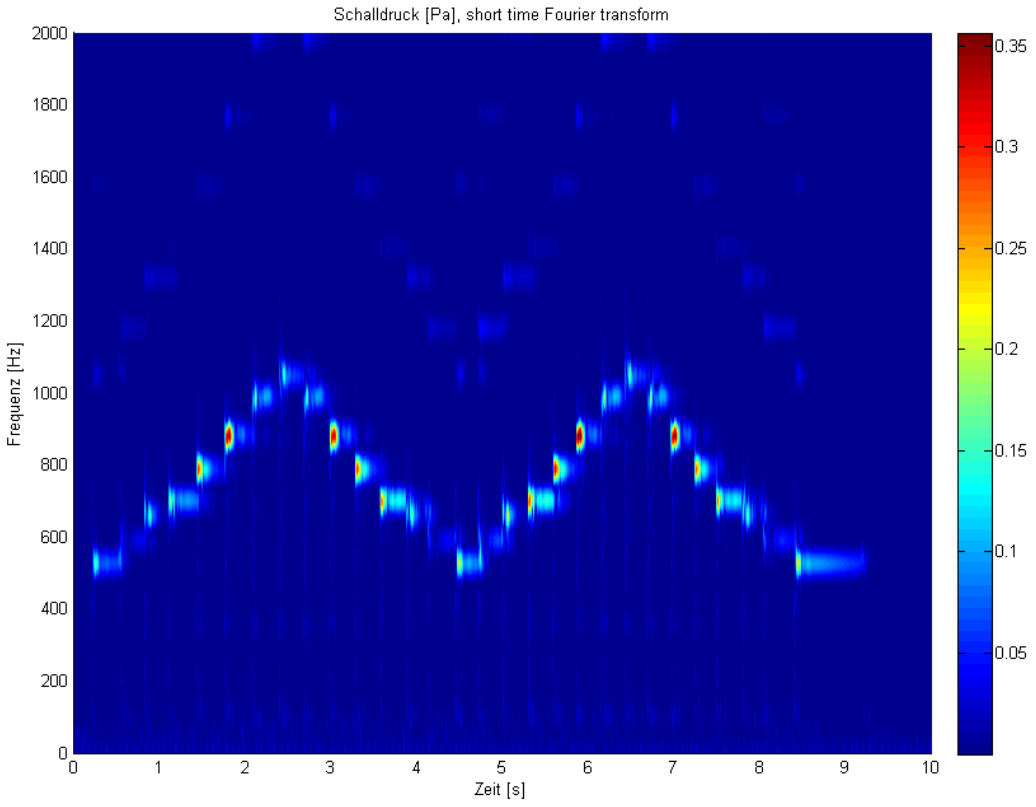


Abb. 8: Spektrogramm des Schalldrucks im Frequenzbereich 0 Hz bis 2000 Hz

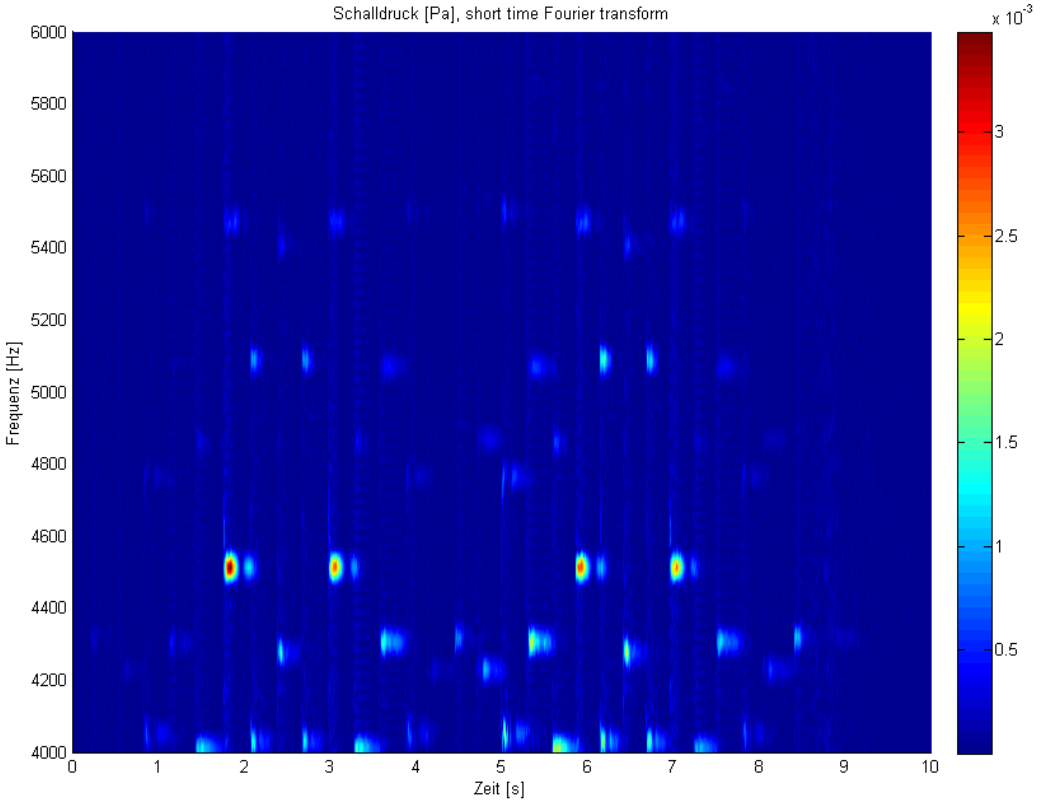


Abb. 9: Spektrogramm des Schalldrucks im Frequenzbereich 4000 Hz bis 6000 Hz

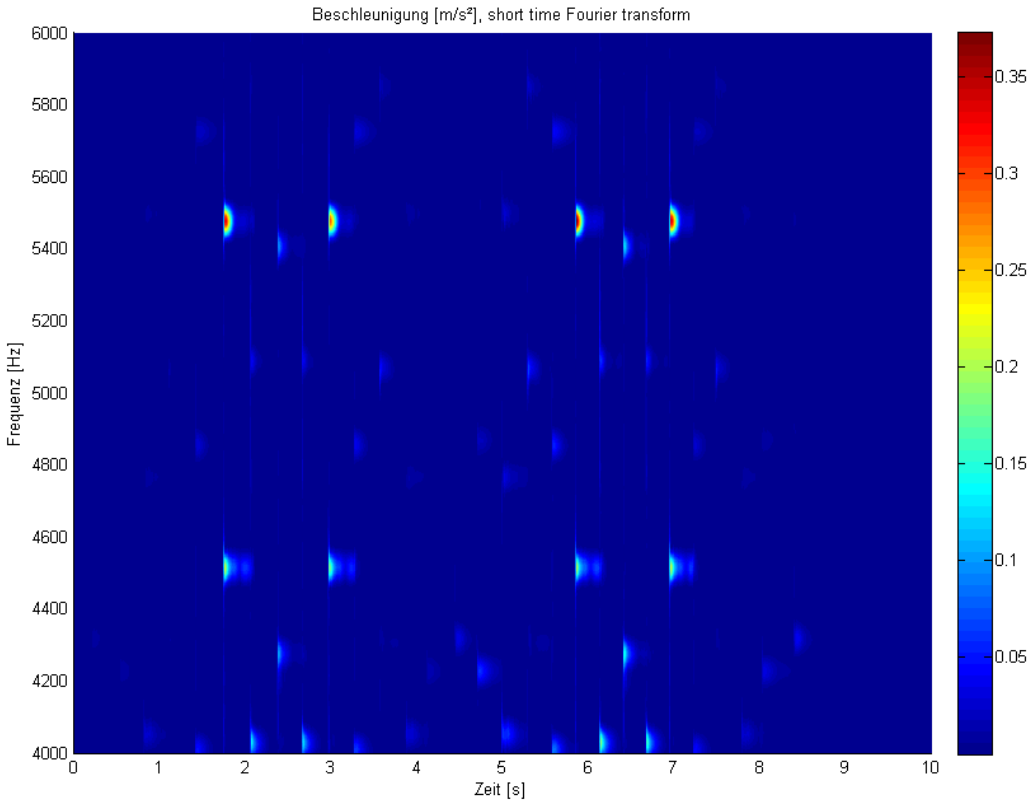


Abb. 10: Spektrogramm der Beschleunigung im Frequenzbereich 4000 Hz bis 6000 Hz

Auffälligkeiten zeigen sich im Frequenzbereich 4000 Hz bis 6000 Hz. Hier sieht man im Spektrogramm des Schalldrucks (siehe Abbildung 9) sehr deutlich den fünften Teilton von a‘‘ (ca. 4500 Hz). Schwach zeigt sich auch der sechste Teilton von a‘‘ (ca. 5500 Hz). Die fünften und sechsten Teiltöne der anderen Töne (z.B. g‘‘ und f‘‘) sind im Vergleich dazu im Spektrogramm des Schalldrucks kaum erkennbar.

Im Spektrogramm der Beschleunigung sticht der sechste Teilton von a‘‘(ca. 5500 Hz) sehr deutlich hervor (siehe Abbildung 10).

Da sich beim Spielen des Tons a‘‘ Auffälligkeiten sowohl im Schall- als auch im Beschleunigungssignal zeigen, muß die Ursache der störenden Geräusche im Instrument selbst zu finden sein.

Beim Überprüfen verschiedener Schrauben im Inneren des Klaviers wurde schließlich festgestellt, daß sich eine Schraubenverbindung gelockert hatte (siehe Abbildung 11). Nach dem Anziehen der Schraube, waren die störenden Nebengeräusche verschwunden.

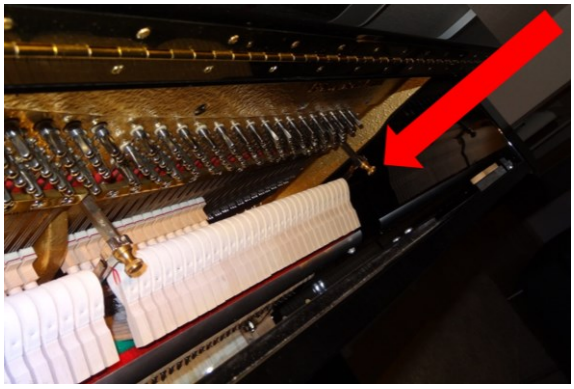


Abb. 11: Ursache der Nebengeräusche (gelockerte Schraubenverbindung)

Dieses Beispiel zeigt, daß man durch Messungen und Analysen den Ursachen von Schall- bzw. Schwingungsproblemen auf die Spur kommen kann. Auch wenn es sich bei dem Beispiel um Messungen an einem Musikinstrument handelt, so ist das Vorgehen bei Schall- bzw. Schwingungsproblemen an Maschinen selbstverständlich ähnlich.

2. „Guitar Tuner“

Einige Zeit nachdem obiges Beispiel in der Maschinendynamikvorlesung gezeigt wurde, kam der Studierende Hamza Kamergi mit Gitarre und Laptop in die Sprechstunde. Da fast jeder Laptop über eine webcam und ein eingebautes Mikrofon verfügt, hatte der Student die Idee, mit Matlab auf den Mikrofoneingang des Laptops zuzugreifen und so den Schall zu messen und anschließend zu analysieren. Im Rahmen eines Projekts für die Vorlesung Sensorsignalverarbeitung (Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Kuznietsov) im Masterstudiengang Maschinenbau Mechatronik (Technische Hochschule Mittelhessen, Campus Friedberg) erstellten die beiden Studierenden Ahmad Hoda und Hamza Kamergi das Matlab-Werkzeug „Guitar Tuner“ (siehe Abbildung 12). [7]

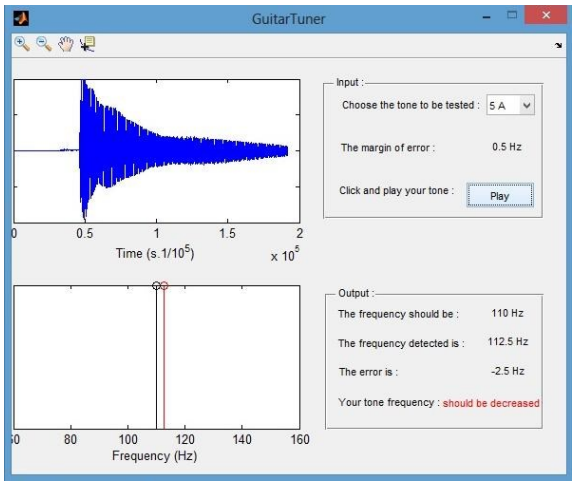


Abb. 12: „Guitar Tuner“ (Abb. aus [7])

Wie der Name schon sagt, unterstützt dieses Matlab-Werkzeug das Stimmen einer Gitarre. Das Vorgehen ist dabei wie folgt: Man legt zunächst fest, welcher Gitarrenton getestet werden soll. Anschließend wird dieser Ton auf der Gitarre gespielt und gleichzeitig aufgenommen. Schließlich erfolgt ein Vergleich von Soll- und Ist-Frequenz. Bei dem in Abbildung 12 gezeigten Beispiel hatte der gespielte Ton eine Frequenz von 112,5 Hz (Soll-Frequenz: 110 Hz).

Es existieren zwei verschiedene Versionen dieses Matlab-Werkzeuges. Für die erste Version („Guitar Tuner“) wird FFT (fast Fourier transform) verwendet. Bei der zweiten Version („Guitar Tuner Professional“) erfolgt die Frequenzanalyse mittels Chirp-Z-Transformation.

3. „Smua“ (Schallmessung und -analyse)

Im Rahmen seiner Bachelorarbeit [6] erstellte der Student Pascal König die erste Version eines weiteren Matlab-Werkzeugs zur Schallmessung und -analyse. Nach einigen Änderungen und Erweiterungen erhielt dieses Matlab-Werkzeug schließlich den Namen „Smua“ (Schallmessung und -analyse, siehe Abbildung 13).

Im Vergleich zum „Guitar Tuner“ [7] von Ahmad Hoda und Hamza Kamergi zeichnet sich das Matlab-Werkzeug „Smua“ durch eine Vielzahl weiterer nützlicher Funktionen aus. Einige dieser Funktionen werden im folgenden näher beschrieben.

In Abbildung 13 ist die Bedienoberfläche von „Smua“ zu sehen. Dabei handelt es sich um eine sogenannte Matlab-GUI (graphical user interface). Abbildung 13 zeigt Zeitsignal, Amplitudenspektrum und Spektrogramm der zuletzt durchgeführten Messung. Zum Starten einer neuen Messung ist lediglich der Text „Aufnahmedauer [s]“ durch einen Zahlenwert (z.B.: 6) zu ersetzen, und anschließend ist auf die rötliche Schaltfläche „Aufnahme“ zu drücken. Klickt man später auf die grünliche Schaltfläche „Abspielen“, so wird der gemessene Schall über Lautsprecher (bzw. Kopfhörer) wiedergegeben.

Über die Bedienoberfläche können unter „1. Parameter“ (siehe Abbildung 13) verschiedene Parameter (Abtastfrequenz, Fensterfunktion, usw.) eingestellt werden. Es muß jeweils auf die Schaltfläche „Aktualisieren“ gedrückt werden, um Einstellungen zu ändern bzw. auf die Messdaten anzuwenden.

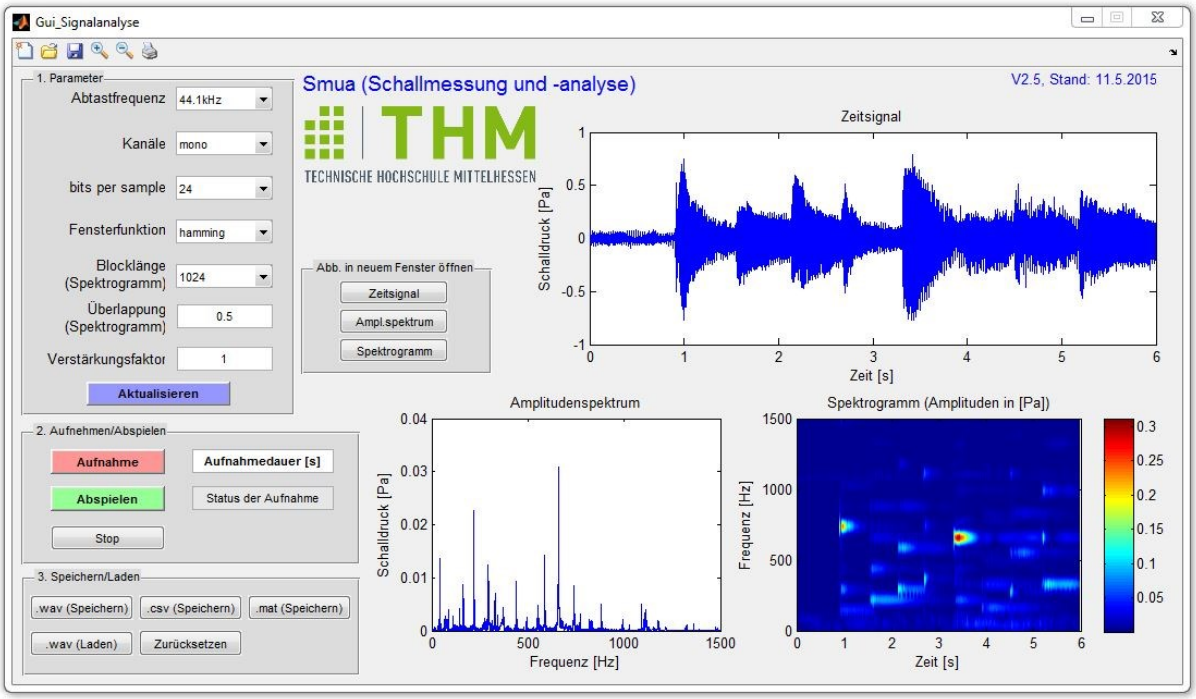


Abb. 13: Bedienoberfläche des Matlab-Werkzeugs „Smua“

Unter „3. Speichern/Laden“ (siehe Abbildung 13) können Messdaten als .wav-Datei bzw. .csv-Datei bzw. .mat-Datei (Matlab) gespeichert werden. Außerdem bietet „Smua“ in seiner aktuellen Version die Möglichkeit, Messdaten aus .wav-Datei einzulesen.

Unter dem Punkt „Abb. in neuem Fenster öffnen“ können Zeitsignal, Amplitudenspektrum und Spektrogramm jeweils in einem neuen Matlab-Fenster geöffnet werden. Dort lassen sich dann auch die Achsenbegrenzungen verändern, man kann zoomen, die Abbildungen speichern, usw.

4. Beispiel einer Schallmessung und -analyse mit „Smua“

Abbildung 13 zeigt Zeitsignal, Amplitudenspektrum und Spektrogramm einer Beispielmessung. Hierfür wurde auf einem Klavier ein Takt aus einer Klavierbearbeitung des Kanons in D-Dur des Barockkomponisten Johann Pachelbel (1653 - 1706) gespielt. Die Originalbezeichnung dieses Kanons lautet: „Canon per 3 Violini e Basso“. Dies ist der einzige von Pachelbel komponierte Kanon. Von diesem Kanon in D-Dur gibt es unterschiedliche Versionen und Bearbeitungen. Die hier verwendete Klavierbearbeitung findet sich im Internet unter folgendem Link.
http://www.free-sheet-music.de/pachelbel/Pachelbel%20Kanon.pdf
Bei dem gespielten Takt handelt es sich um Takt Nr. 5 der oben erwähnten Klavierbearbeitung. Abbildung 14 zeigt diesen Takt.

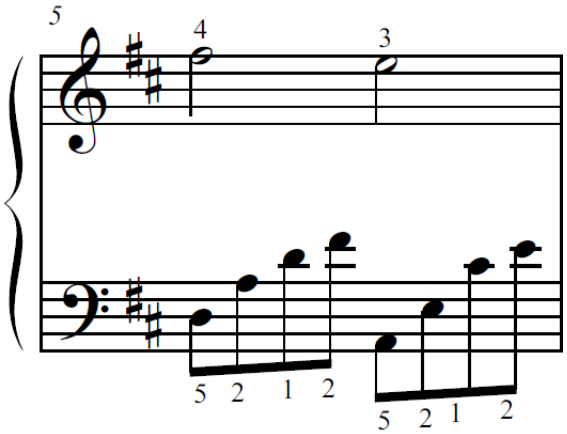


Abb. 14: Takt Nr. 5 aus Johann Pachelbels Kanon in D-Dur (Klavierbearbeitung)

Die rechte Hand spielt dabei zwei halbe Noten, zunächst fis‘‘ (ca. 740 Hz) und danach e‘‘ (ca. 659 Hz) an. Die linke Hand spielt durchgehend Achtelnoten. Dies sind: d (ca. 147 Hz), a (ca. 220 Hz), d‘ (ca. 294 Hz), fis‘ (ca. 370 Hz), A (ca. 110 Hz), e (ca. 165 Hz), cis‘ (ca. 277 Hz), e‘ (ca. 330 Hz).

Abbildung 15 zeigt das Zeitsignal (Schalldruck) der Beispielmessung. Im Signal erkennt man zunächst nur, daß während der sechs Sekunden Messdauer zu acht Zeitpunkten Tasten angeschlagen wurden. Durch Vergrößern können die Anschlagzeitpunkte genauer bestimmt werden.

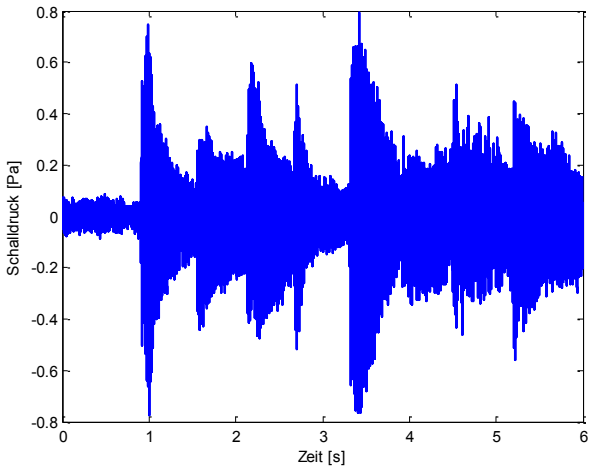


Abb. 15: Zeitsignal

In Abbildung 16 ist das Amplitudenspektrum der Beispielmessung zu sehen. Das Amplitudenspektrum wurde mit FFT (fast Fourier transform) ermittelt. FFT liefert neben den Amplituden natürlich auch die Phasenwinkel, auf welche hier aber nicht näher eingegangen wird.

Für die Darstellung in Abbildung 16 wurde der Frequenzbereich auf 0 Hz bis 1000 Hz beschränkt, da die Grundtöne (ersten Teiltöne) der angeschlagenen Tasten zwischen 110 Hz und 740 Hz lagen. Da die Abtastfrequenz 44,1 kHz betrug, könnte man sich das Amplitudenspektrum bis 22,05 kHz (halbe Abtastfrequenz) anschauen.

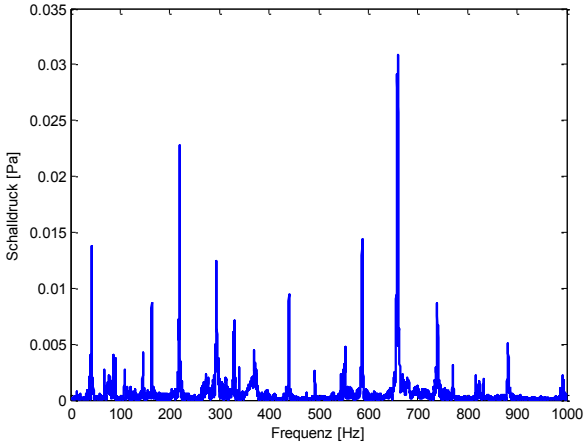


Abb. 16: Amplitudenspektrum

Die beiden größten Amplituden in Abbildung 16 gehören zu den Frequenzen 660 Hz (e‘‘) und 220 Hz (a). Im Amplitudenspektrum tauchen viele Frequenzen auf, da beim Anschlagen einer Klaviertaste nicht nur die Grundfrequenz (Grundton, erster Teilton) zu hören ist, sondern auch sogenannte Obertöne (zweiter Teilton, dritter Teilton, etc.).

Jörg Gedan erklärt dieses Phänomen in [8] folgendermaßen: „Teiltöne entstehen dadurch, daß die Saite nicht nur als ganzes, sondern auch in Teilen schwingt, nämlich beim zweiten Teilton in zwei halben Saitenlängen, beim dritten in drei Dritteln usw. Je kürzer jedoch ein Saitenabschnitt ist, umso steifer wird er, und die Frequenz des Teiltons steigt an, und zwar umso mehr, je höher er liegt: Der zweite Teilton weicht deutlicher ab als der erste, der dritte deutlicher als der zweite, der vierte deutlicher als der dritte usw., die Abweichung nimmt mit zunehmender Teilton-Nummer exponentiell zu.“ D.h.: Der zweite Teilton ist höher als die doppelte Grundfrequenz, und der dritte Teilton ist höher als die dreifache Grundfrequenz, etc.

Ein klareres Bild liefert das Spektrogramm (Abbildung 17). Hier wird anhand der dargestellten Amplitudenverläufe sichtbar, welche Frequenzen zu welchen Zeiten im gemessenen Signal vorhanden sind.

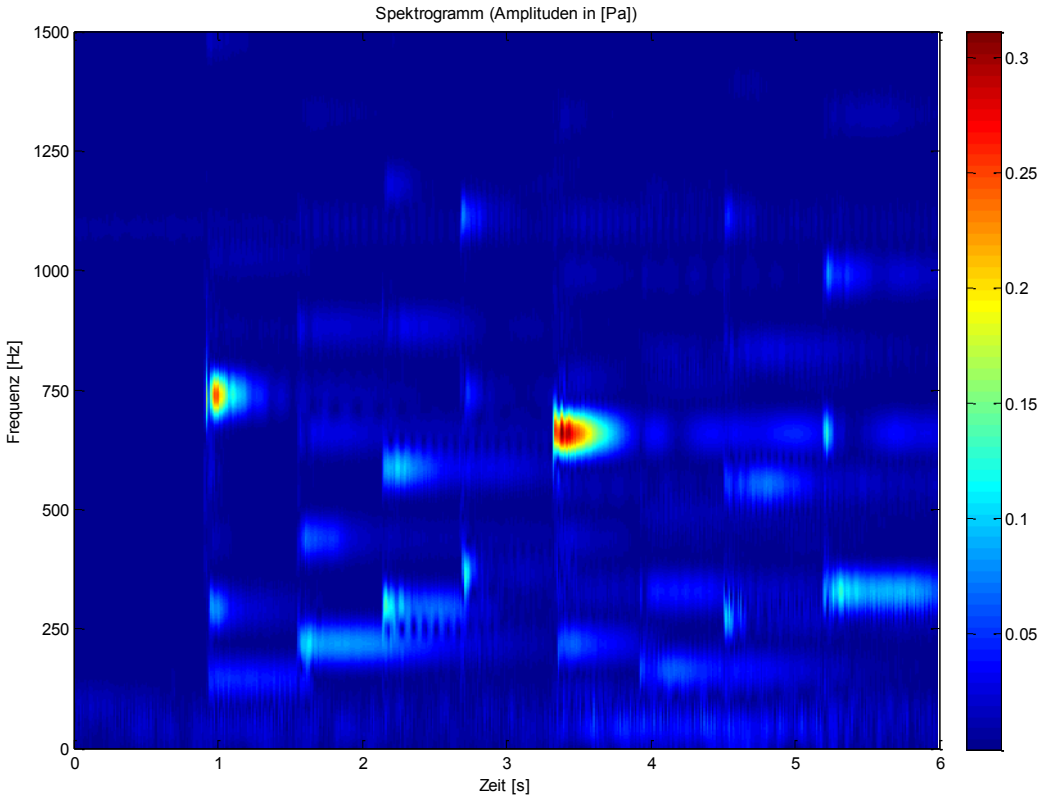
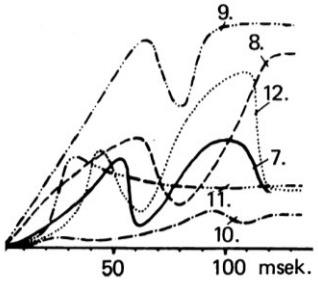


Abb. 17: Spektrogramm des Schalldrucks im Frequenzbereich 0 Hz bis 1500 Hz

Sehr deutlich zu erkennen sind in Abbildung 17 die ersten Teiltöne der beiden Tasten, die von der rechten Hand angeschlagen wurden. Das fis‘‘ (ca. 740 Hz) wurde zum Zeitpunkt ca. 0,9 s angeschlagen, das e‘‘ (ca. 659 Hz) wurde zum Zeitpunkt ca. 3,3 s angeschlagen. Relativ gut sichtbar sind auch die ersten Teiltöne der Tasten, die von der linken Hand angeschlagen wurden. Auch einige Obertöne (zweite Teiltöne, dritte Teiltöne, etc.) sind im Spektrogramm zu sehen.

Ein- und Ausschwingvorgänge von Teiltönen sind auf verschiedenen Instrumenten unterschiedlich, und die Teiltöne (Obertöne) tragen wesentlich zur Charakteristik eines Tons (Klangcharakter, Klangfarbe) bei. [9]

Jörg Gedan zeigt in [9] die folgende Abbildung des realen Einschwingvorgangs eines Musikinstruments.



[Abb. 5] Realer Einschwingvorgang eines Musikinstruments
Aufzeichnung der Lautstärke einzelner Teiltöne in den ersten Millisekunden

Abb. 18: Einschwingvorgang (Abbildung aus [9])

Mit Hilfe des Spektrogramms (bzw. der dafür berechneten Daten) müsste sich der Ein- und Ausschwingvorgang eines Instrumentes untersuchen lassen. Schaut man sich beispielsweise den Beginn des Signals an, wenn die rechte Hand fis‘‘ (ca. 740 Hz) und die linke Hand gleichzeitig d (ca. 147 Hz) anschlägt, so ergeben sich im Zeit- und Frequenzbereich (Amplitudenspektrum) folgende Bilder.

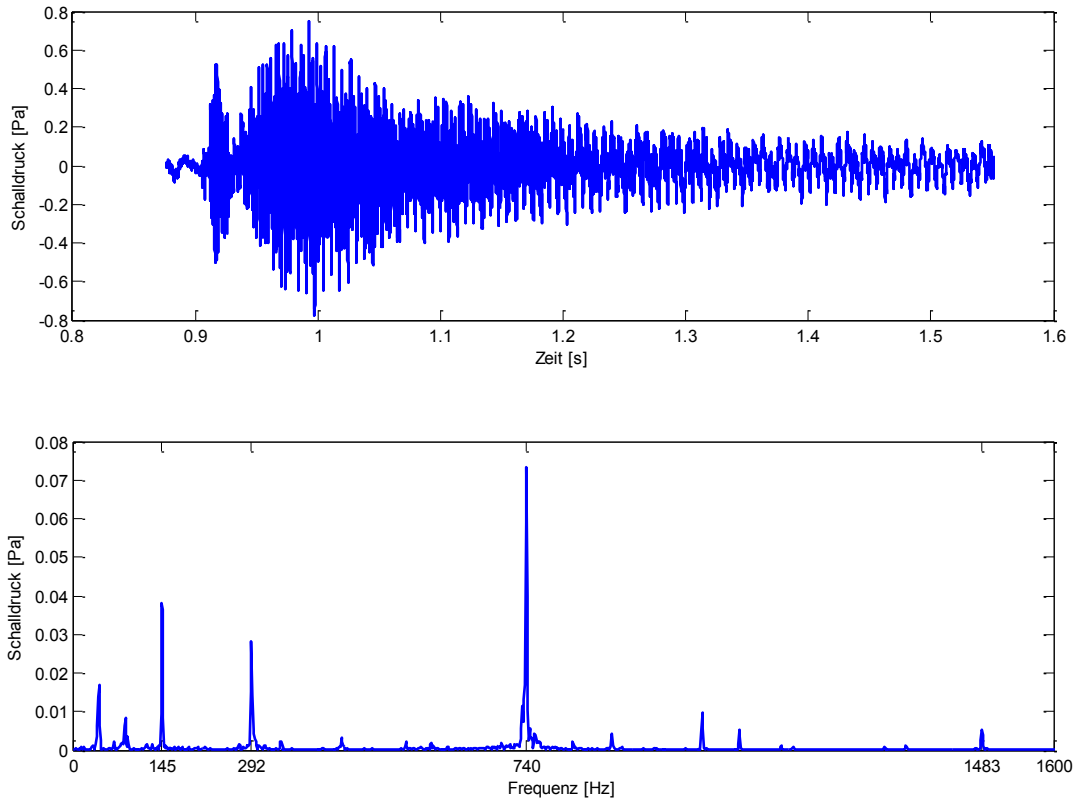


Abb. 19: Zeitsignal und Amplitudenspektrum (Signalausschnitt 0,88 s bis 1,55 s)

Aus dem gesamten Signal wurde hierzu der Bereich zwischen 0,88 s und 1,55 s ausgeschnitten. Gut zu erkennen sind im Amplitudenspektrum in Abbildung 18 die ersten Teiltöne bei 740 Hz (fis‘‘) und 145 Hz (d). Man erkennt auch noch deutlich den zweiten Teilton von d (292 Hz), und schwach ausgeprägt findet sich auch der zweite Teilton von fis‘‘ (1483 Hz).

Mit Hilfe des Spektrogramms können nun beispielsweise die Einschwingvorgänge von Teiltönen des fis‘‘ betrachtet werden. Natürlich könnte man sich stattdessen auch die Einschwingvorgänge der Teiltöne des d anschauen.

Matlab bietet hierzu die folgende Funktion an: `spectrogram`. Diese Funktion kann mit unterschiedlichen Einstellungen genutzt werden. Eine sinnvolle Syntax lautet:

```
[S,F,T] = spectro-
gram(x,window,noverlap,F,fs);
```

Im folgenden werden zunächst die Parameter auf der rechten Seite dieser Gleichung kurz erläutert.

Bei `x` handelt es sich um einen Vektor (Datenvektor). Dieser Vektor enthält bei dem hier betrachteten Beispiel das gemessene Zeitsignal, also den Schalldruck in der Einheit Pascal (siehe oberen Plot in Abbildung 19).

`window` ist ein sogenanntes Hamming-Fenster der Länge `nfft`. Das Hamming-Fenster ist benannt nach Richard W. Hamming und erlaubt die isolierte Betrachtung von Ausschnitten eines Signals. Im folgenden wurde eine Länge von 1024 gewählt, und `window` wurde in Matlab folgendermaßen erzeugt:

```
nfft = 1024;
window = hamming(nfft);
```

Abbildung 20 zeigt ein Hamming-Fenster der Länge 1024.

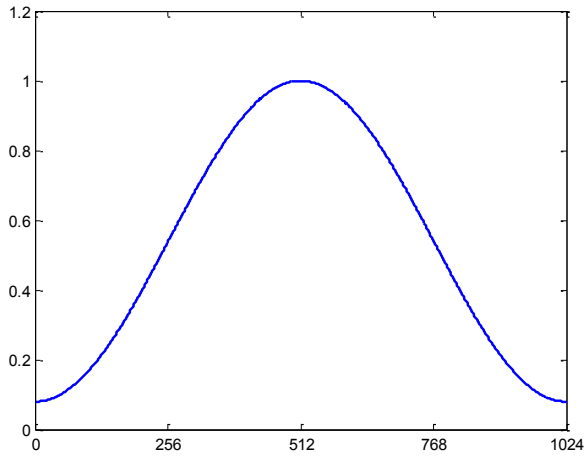


Abb. 20: Hamming-Fenster (Länge: 1024)

`noverlap` gibt vor, um wie viele Werte sich die betrachteten Signalausschnitte überlappen. Hier wurde mit `noverlap = 512` gearbeitet. Da das Hamming-Fenster 1024 Werte aufweist, überlappen sich damit die einzelnen Signalausschnitte um 50 %, was dem Standardwert in Matlab entspricht.

`F` ist ein Vektor von Frequenzen in der Einheit Hz, z.B.: `F = 500 : 1 : 1000;`

Dieses Beispiel liefert folgenden Vektor:
500 Hz, 501 Hz, 502 Hz, …, 1000 Hz.

Es ergibt sich hierbei also ein Frequenzvektor mit 501 Elementen. Durch Vorgabe eines Frequenzvektors `F` wird das Spektrogramm für die Frequenzen in `F` berechnet. Dazu nutzt Matlab den sogenannten Goertzel-Algorithmus. Dabei werden die vorgegebenen Frequenzen (`F`) entsprechend der Signalauflösung auf die nächstgelegenen Frequenzwerte der diskreten Fourier-Transformation gerundet.

`fs` ist die Abtastfrequenz in Hz. Für die hier betrachtete Beispielmessung betrug die Abtastfrequenz 44,1 kHz. Es gilt also:
`fs = 44100;`

Die Funktion `spectrogram` liefert bei der hier verwendeten Syntax (`[S,F,T] = spectrogram(...);`) die drei Ergebnisvariablen `S`, `F` und `T`. Bei `S` handelt es sich um eine Matrix mit komplexen Zahlen (komplexen Amplituden). Für das oben beschriebene Beispiel hat `S` 501 Zeilen und 57 Spalten. `F` enthält die vorgegebenen Frequenzen (501 Zeilen, 1 Spalte). Der Vektor `T` (1 Zeile, 57 Spalten) beinhaltet die Zeitpunkte, für die das Spektrogramm berechnet wurde. Dabei handelt es sich jeweils um die Mittelpunkte der Signalausschnitte der Länge 1024.

Je nachdem, wie die obigen Parameter gewählt werden, lassen sich Zeit- und Frequenzauflösung im Spektrogramm verändern. Dabei ist zu beachten, daß Zeit- und Frequenzauflösung in einem umgekehrten Verhältnis zueinander stehen. D.h.: Wählt man kürzere Signalausschnitte so erhöht sich die Zeitauflösung, aber gleichzeitig verringert sich die Frequenzauflösung.

Und umgekehrt gilt: Wählt man längere Signalausschnitte so verringert sich die Zeitauflösung, aber gleichzeitig erhöht sich die Frequenzauflösung. Mit obigen Einstellungen ergibt sich folgendes Spektrogramm (siehe Abbildung 21).

Für Abbildung 21 wurde der Matlab-Befehl `imagesc` verwendet. Da es sich bei `S` um eine Matrix komplexer Zahlen handelt, muß für die Darstellung der Amplituden (Beträge) `2/nfft*abs(S)` geplottet werden. Der Faktor `2/nfft` liefert hierbei die korrekte Skalierung.

Bei dem in Abbildung 21 dargestellten Spektrogramm tritt die maximale Amplitude bei der Frequenz 737 Hz auf. Dies entspricht der 238. Zeile der Matrix `S`. Plottet man die Amplituden dieser Frequenz 737 Hz (Zeile 238) über der Zeit, so ergibt sich der folgende Ein- und Ausschwingvorgang des ersten Teiltons von fis‘‘ (siehe Abbildung 22).

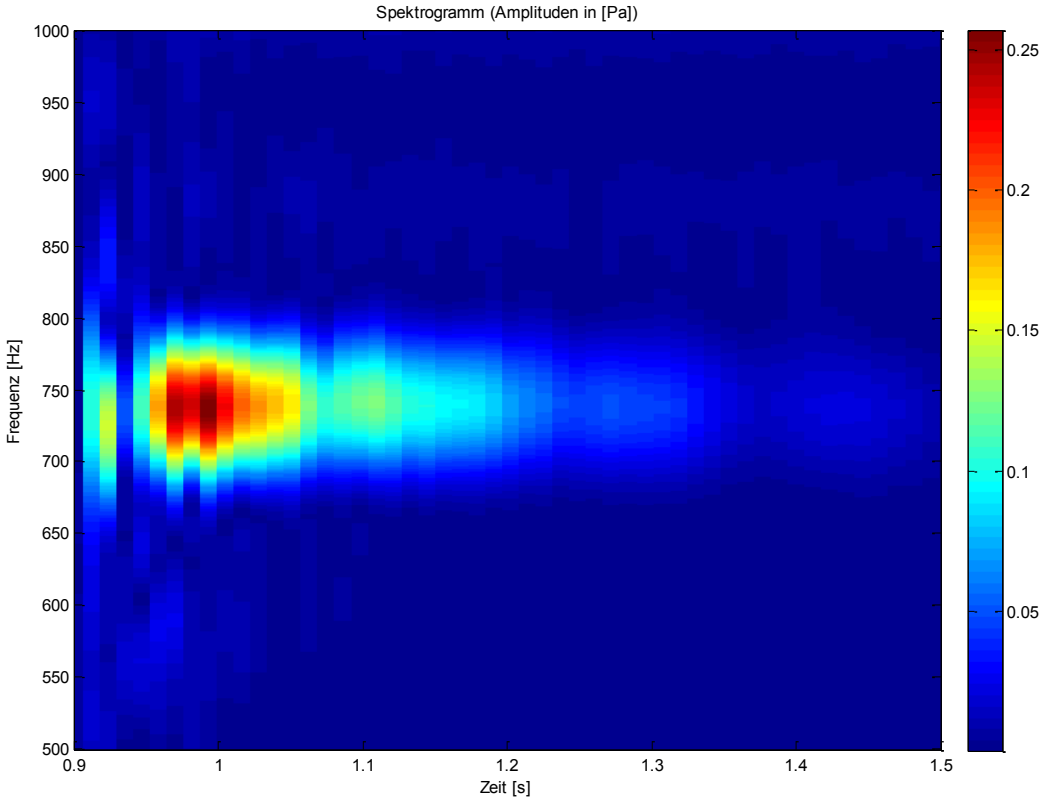


Abb. 21: Spektrogramm des Schalldrucks im Frequenzbereich 500 Hz bis 1000 Hz

Die Amplitude des Schalldrucks der Frequenz 737 Hz beginnt ab dem Zeitpunkt 0,9 s steil anzusteigen. Nach 23 Millisekunden wird ein lokales Maximum erreicht. Danach bricht die Amplitude stark ein, so daß zum Zeitpunkt 0,9348 s ein lokales Minium vorliegt. Im folgenden steigt die Amplitude wieder steil an und erreicht zum Zeitpunkt 0,9929 s ihr globales Maximum. D.h.: Bis zum Erreichen des (globalen) Maximums vergehen ca. 93 Millisekunden. Im weiteren Verlauf fällt die Amplitude nahezu kontinuierlich ab und erreicht zum Zeitpunkt 1,5 s Werte kleiner 0,01 Pa.

Ein- und Ausschwingvorgänge hängen natürlich nicht nur vom Instrument sondern noch von einer Vielzahl weiterer Faktoren ab. So kann man beispielsweise beim Spielen auf das rechte Pedal verzichten oder aber das rechte Pedal mit dem Tastenanschlag oder auch nach dem Tastenanschlag treten und dann länger oder kürzer halten. Und dieser sogenannte Anschlag, d.h. die Art und Weise, wie der Pianist die Klaviertaste anschlägt, beeinflusst maßgeblich Ein- und Ausschwingvorgänge. So können Töne einer Melodiefolge z.B. gebunden (legato) oder abgetrennt (staccato) gespielt werden. Daneben gibt es noch weitere Anschlagsarten (non legato, portato, staccatissimo, etc.). Natürlich werden sich auch Unterschiede zwischen leisem (piano) und lautem (forte) Klavierspiel zeigen.

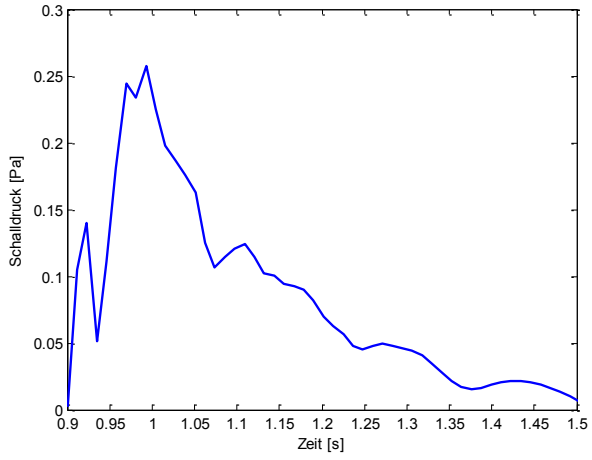


Abb. 22: Einschwingvorgang des ersten Teiltons von fis‘‘ (737 Hz)

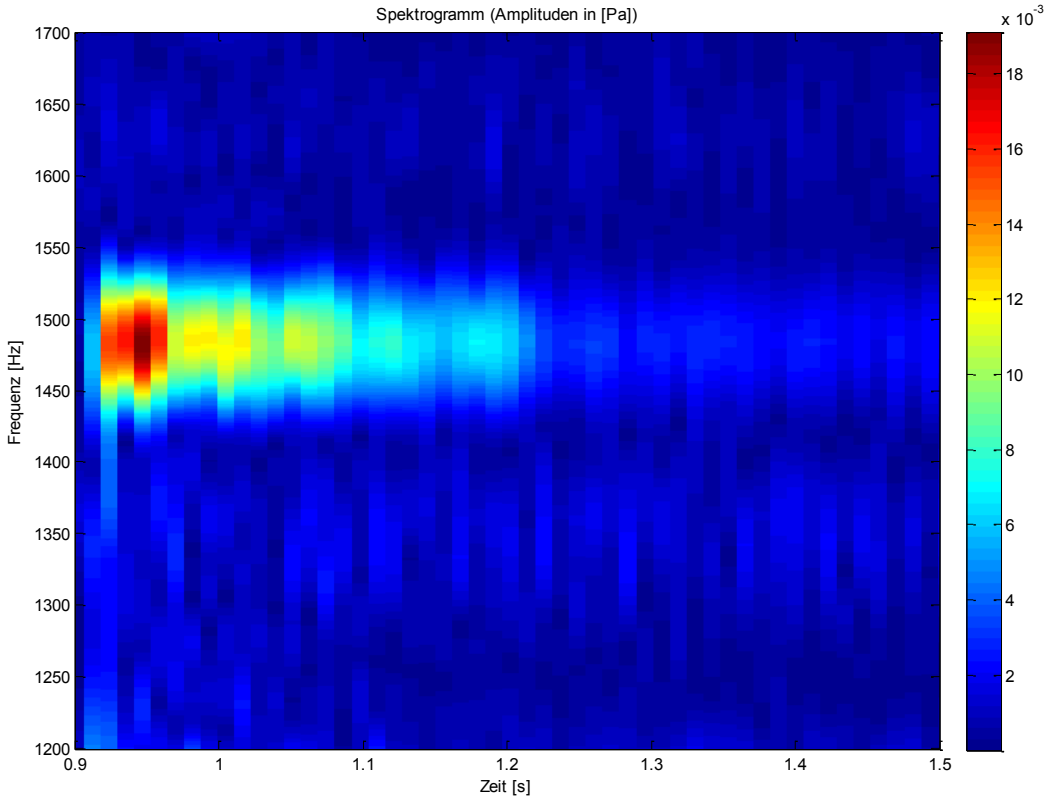


Abb. 23: Spektrogramm des Schalldrucks im Frequenzbereich 1200 Hz bis 1700 Hz

Auf die gleiche Art und Weise kann auch der Ein- und Ausschwingvorgang des zweiten Teiltons von fis‘‘ untersucht werden. Hierzu muß selbstverständlich der betrachtete Frequenzbereich geändert werden.

Es wird daher folgender Frequenzvektor für das Spektrogramm vorgegeben:

```
F = 1200 : 1 : 1700;
```

Dieser Matlab-Befehl liefert den Vektor:
1200 Hz, 1201 Hz, 1202 Hz, …, 1700 Hz.

Es ergibt sich also auch hier wieder ein Frequenzvektor mit 501 Elementen. Durch Vorgabe dieses geänderten Frequenzvektors `F` wird das Spektrogramm für die Frequenzen in `F` berechnet. Die restlichen Parameter der Matlab-Funktion `spectrogram` bleiben gleich (siehe oben). Damit erhält man das in Abbildung 23 zu sehende Spektrogramm, mit dem der Ein- und Ausschwingvorgang des zweiten Teiltons von fis‘‘ untersucht werden kann.

In Abbildung 23 tritt die maximale Amplitude bei der Frequenz 1482 Hz auf. Dies entspricht diesmal der 283. Zeile der Matrix `S`. Plottet man nun die Amplituden dieser Frequenz über der Zeit, so ergibt sich der folgende Ein- und Ausschwingvorgang des zweiten Teiltons von fis‘‘ (siehe Abbildung 24).

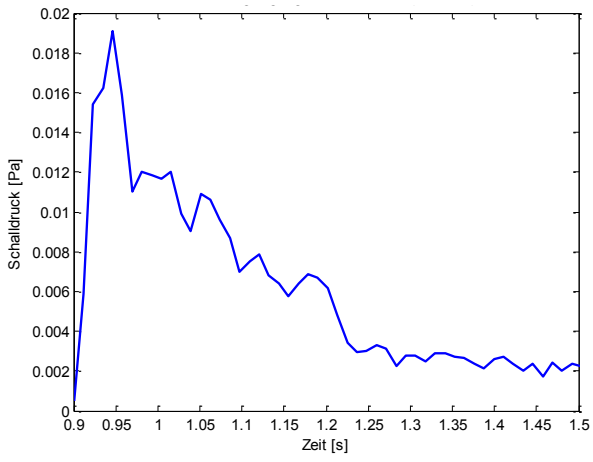


Abb. 24: Einschwingvorgang des zweiten Teiltons von fis‘‘ (1482 Hz)

Bis zum Erreichen des Maximums vergehen beim zweiten Teilton 46 Millisekunden. D.h.: Der zweite Teilton erreicht sein globales Maximum ca. doppelt so schnell wie der erste Teilton. Ab dem Zeitpunkt 0,9464 s fällt die Amplitude des zweiten Teiltons ab, so daß zum Zeitpunkt 1,5 s nur noch Werte von ca. 0,002 Pa vorliegen. Die maximale Amplitude des ersten Teiltons ist deutlich größer als die maximale Amplitude des zweiten Teiltons (0,2573 Pa vs. 0,0191 Pa; Faktor 13,47).

Um den Ein- und Ausschwingvorgang des dritten Teiltons von fis‘‘ zu untersuchen, wird der folgende Frequenzvektor für das Spektrogramm vorgegeben:

```
F = 2000 : 1 : 2500;
```

(2000 Hz, 2001 Hz, 2002 Hz, …, 2500 Hz)
Dies ist ebenfalls ein Frequenzvektor mit 501 Elementen. Die übrigen Parameter der Matlab-Funktion `spectrogram` bleiben wieder gleich (siehe oben). Das daraus resultierende Spektrogramm ist in Abbildung 25 dargestellt. Die Amplituden in diesem Frequenzbereich (2000 Hz bis 2500 Hz) sind noch mal deutlich kleiner als im zuvor betrachteten Frequenzbereich (1200 Hz bis 1700 Hz).

Die maximale Amplitude des dritten Teiltons liegt bei der Frequenz 2240 Hz (241. Zeile von `S`). Plottet man die Amplituden der Frequenz 2240 Hz über der Zeit, so zeigt sich der in Abbildung 26 dargestellte Ein- und Ausschwingvorgang des dritten Teiltons von fis‘‘ (siehe nächste Seite).

Beim dritten Teilton vergehen bis zum Erreichen des Maximums 100 Millisekunden. Danach fällt die Amplitude nicht kontinuierlich ab, sondern es folgt eine Vielzahl lokaler Minima und Maxima. Zum Zeitpunkt 1,5 s bewegen sich die Amplituden in der Größenordnung 0,0005 Pa … 0,001 Pa. Die maximale Amplitude des zweiten Teiltons ist deutlich größer als die maximale Amplitude des dritten Teiltons (0,0191 Pa vs. 0,0025 Pa; Faktor 7,64). Aufgrund des schlechteren Signal-Rausch-Verhältnisses sehen die Amplitudenverläufe des dritten Teiltons sehr stark verrauscht aus.

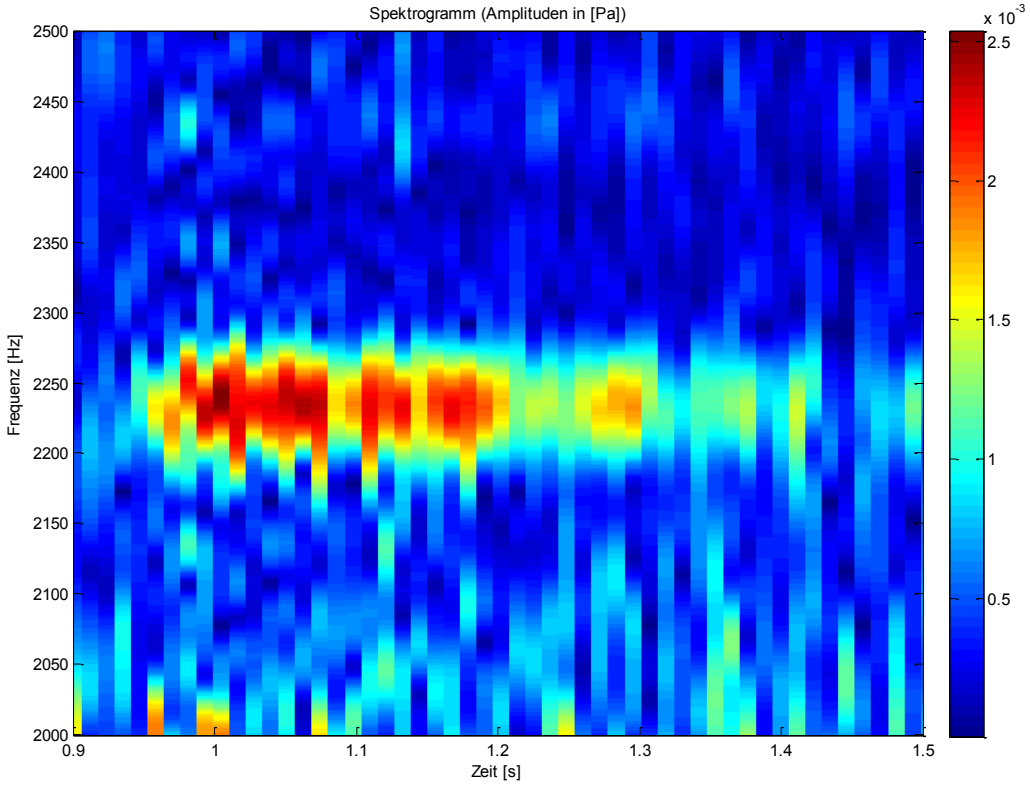


Abb. 25: Spektrogramm des Schalldrucks im Frequenzbereich 2000 Hz bis 2500 Hz

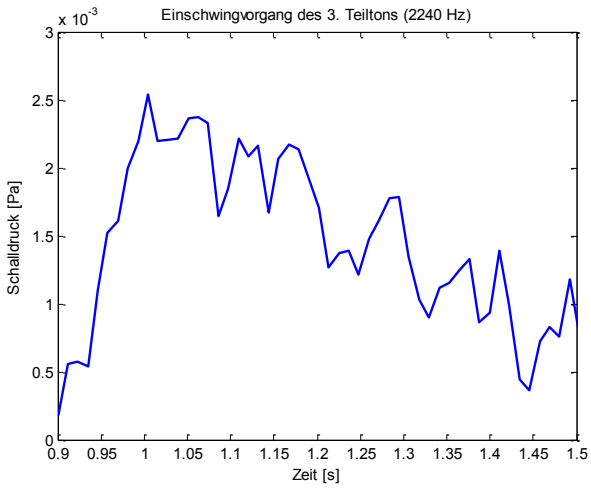


Abb. 26: Einschwingvorgang des dritten Teiltons von fis‘‘ (2240 Hz)

5. Zusammenfassung

In diesem Artikel geht es um die Erstellung und Verwendung eines Matlab-Werkzeugs zur Schallmessung und -analyse mit Laptop und darin enthaltener Sensorik und Messtechnik.

In der Einleitung dieses Artikels werden zunächst zwei Beispiele „klassischer“ Messungen vorgestellt. Mit „klassischer“ Messung ist hier der Einsatz von Sensorik und Verbindungskabeln und einem Gerät zur Messdatenerfassung etc. gemeint. Bei dem ersten Beispiel handelt es sich um eine Schallmessung an einer Bogenoffsetdruckmaschine. Gezeigt wird dabei ein Spektrogramm. Die darin zu sehenden Maxima entsprechen Biegeschwingungen der Zylinder und lassen sich den Ereignissen Druckanfang und Druckende zwischen Platten- und Gummizylinder zuordnen. Bei dem zweiten in der Einleitung gezeigten Beispiel geht es um Schwingungs- und Schallmessungen an einem Klavier. Die gemessenen Daten werden im Zeit- und Frequenzbereich analysiert. Auch bei diesem zweiten Beispiel spielen Spektrogramme eine wichtige Rolle.

Das Matlab-Werkzeug „Guitar Tuner“ der Studierenden Ahmad Hoda und Hamza Kamergi wird in diesem Artikel kurz vorgestellt. Dieses Matlab-Werkzeug unterstützt das Stimmen von Gitarren. Für die Messung wird nur die in einem Laptop vorhandene Sensorik und Messtechnik verwendet. Dabei wird mit Matlab auf den Mikrofoneingang des Laptops zugegriffen. So kann man mit Matlab Schall messen und analysieren.

Anschließend wird auf das Matlab-Werkzeug „Smua“ (Schallmessung und -analyse) und eine Beispielmessung damit eingegangen. Der Student Pascal König erstellte die erste Version dieses Matlab-Werkzeugs im Rahmen seiner Bachelorarbeit [6]. Verglichen mit dem „Guitar Tuner“ [7] von Ahmad Hoda und Hamza Kamergi zeichnet sich das Matlab-Werkzeug „Smua“ durch eine Vielzahl weiterer nützlicher Funktionen aus.

Als Beispiel wird eine Schallmessung an einem Klavier betrachtet. Zeitsignale und Amplitudenspektren werden diskutiert, und mit Hilfe von Spektrogrammen werden Ein- und Ausschwingvorgänge verschiedener Teiltöne analysiert.

Einige Details werden in diesem Artikel nicht näher betrachtet. Z.B.: Pascal König hat in seiner Bachelorarbeit [6] verschiedene Vergleichsmessungen durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Töne unterschiedlicher Frequenz und Lautstärke zeitgleich mit dem Mikrofon eines Laptops (webcam) und mit einem geeichten Mikrofon gemessen. So läßt sich der gemessene Schalldruck in der Einheit Pascal angeben. Da verschiedene Laptops sicherlich Mikrofone unterschiedlicher Bauart aufweisen, sind solche Vergleichsmessungen notwendig, wenn man den auftretenden Schalldruck exakt bestimmen möchte. Oft genügen aber auch Analysen, bei denen es beispielsweise nur darum geht, Frequenzinhalte eines Signals zu bestimmen oder Messreihen qualitativ miteinander zu vergleichen etc.

Die Amplitudenverläufe des dritten Teiltons von fis‘‘ sind relativ stark verrauscht (siehe oben, Abbildungen 25 und 26). Interessant wären daher weitere Vergleichsmessungen (webcam-Mikrofon vs. hochwertiges Messmikrofon) und Analysen, um beispielsweise die Grenzen des webcam-Mikrofons festzustellen (Signal-Rausch-Verhältnis).

Der große Vorteil eines solchen Matlab-Werkzeugs, bei dem nur die in einem Laptop enthaltene Sensorik und Messtechnik verwendet wird, liegt darin, daß man sehr schnell und ohne viel Aufwand Schallmessungen und -analysen durchführen kann.

Danksagung

Herr Hamza Kamergi brachte den Stein ins Rollen (siehe [7]) und legte damit gleichzeitig den Grundstein für die hier dargestellten Arbeiten. Herzlichen Dank dafür!
Herr Pascal König erstellte im Rahmen seiner Bachelorarbeit [6] die erste Version des Matlab-Werkzeugs „Smua“ (Schallmessung und -analyse). Ein herzlicher Dank geht an Herrn Pascal König für den engagierten Einsatz und die geleistete Arbeit!

Literaturverzeichnis

[1] AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.: „Sensorik und Messtechnik wächst und investiert.“ Artikel zur wirtschaftlichen Branchenentwicklung, http://www.ama-sensorik.de/verband/brancheninformationen/branchenstatistik-2014/ (Zugriff am 9.4.2015)

[2] ContiTech AG: „Neue App von ContiTech unterstützt Auslegung von Lagerungssystemen“. Presseartikel, http://www.contitech.de/pages/presse/pressemeldungen/2014/140423_vc_app/presse_de.html (Zugriff am 9.4.2015)

[3] ContiTech AG: „Riemenvorspannung messen: neue App von ContiTech“. Presseartikel, http://www.contitech.de/pages/presse/pressemeldungen/2013/130212_ind/presse_de.html (Zugriff am 9.4.2015)

[4] Hieb, Christian: „Geräuschminderung an Bogenoffset-Druckmaschinen“. Beitrag für die VDI-Fachtagung Maschinenakustik in Böblingen, 15.-16. Oktober 2008.

[5] Messer, Markus: „Grundsatzuntersuchungen zu den Möglichkeiten der aktiven Schwingungsminderung an Druckmaschinen“. Beitrag für die VDI-Fachtagung Maschinenakustik in Böblingen, 15.-16. Oktober 2008.

[6] König, Pascal: Schallmessung und -analyse mit Matlab. Bachelorarbeit (Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Markus Messer), Fachbereich Maschinenbau, Mechatronik, Materialtechnologie, Technische Hochschule Mittelhessen, Campus Friedberg, 2015.

[7] Hoda, Ahmad; Kamergi, Hamza: Guitar Tuner (mit Fast Fourier Transformation) & Guitar Tuner Professional (mit Chirp Z Transformation). Projekt für die Vorlesung Sensorsignalverarbeitung (Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Kuznietsov) im Masterstudiengang Maschinenbau Mechatronik (Technische Hochschule Mittelhessen, Campus Friedberg, 2014.

[8] Gedan, Jörg: Inharmonizität, Das inharmonische Teiltonspektrum von Saiten und seine Konsequenzen für Klang und Klavierstimmung, www.pian-e-forte.de, Fachwissen, 2008.

[9] Gedan, Jörg: Akustische Grundlagen der Musik, www.pian-e-forte.de, Fachwissen, 2006.