Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Betreuer

DIPLOMARBEIT

Software zur statistischen Analyse und grafischen Darstellung von Schallemissionsmessungen an Gesteinsproben

ausgeführt am Institut für Festkörperphysik
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. E. Tschegg

durch
Hannes Sperrer
Spieldorferstraße 59
4653 Eberstalzell

März 2014

Unterschrift

Hannes Sperrer
Spieldorferstraße 59
4653 Eberstalzell

Hiermit versichere ich, dass ich die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen, Internet-Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen –, die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Wien, den 1. März 2014

Hannes Sperrer

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit dokumentiert die Erstellung und Anwendung einer Software zur Charakterisierung und grafischen Darstellung von Schallemissionsmessungen. Das Programm *AE-Graphics 3.5* wurde im Zuge des Forschungsprojektes *Umwelteinflüsse auf die Schädigung und Zerstörung des Gefüges an Gesteinen*, zur Analyse von Schallemissions-Messungen an Gesteinen unter Temperatureinwirkung, am Institut für Hochbau und Technologie der TU Wien entwickelt.

Schallemissionen (kurz AE für Acoustic Emissions) sind elastische mechanische Wellen, die entstehen, wenn im Inneren eines Festkörpers spontan Energie freigesetzt wird, wie beispielsweise bei der plötzlichen Verschiebung der Korngrenzen durch Rissbildung im Material. Diese zeitlich beschränkten (transienten) Schallwellen können von Sensoren an der Oberfläche des Festkörpers erfasst werden. Das Ziel der AE-Analytik ist es, durch die Untersuchung dieser AE-Signale Rückschlüsse auf Vorgänge, wie Schädigungsmechanismen im Inneren des betrachteten Materials, zu ziehen. Die AE-Technik findet bereits in vielen Gebieten, wie z. B. der Qualitätsprüfung bei Herstellungsprozessen, der Ortung von Schäden bei Druckbehältern, der Langzeitüberwachung von Brücken und Gebäuden, oder als zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (ZfP) in der Materialforschung, Anwendung.

Im oben erwähnten Forschungsprojekt galt dem Werkstoff Marmor besonderes Interesse, da dieses Gestein oft in Plattenform an Fassaden von Gebäuden eingesetzt wird und bekannt ist, dass seine Formbeständigkeit große Abhängigkeit von der Witterung und insbesondere von der Temperatureinwirkung zeigt. Für die Messungen im Labor wurden die untersuchten Proben deshalb einer zyklischen Temperaturveränderung ausgesetzt und die dabei entstehenden AE-Signale aufgenommen. Mit der Software *AE-Graphics 3.5* können diese Messdaten anhand von ausgewählten AE-Parametern statistisch analysiert und graphisch dargestellt werden.

Abstract

The following thesis describes the construction and application of software for the characterization and graphical depiction of acoustic emission measurements. The program *AE-Graphics 3.5* was developed as part of the research project *Environmental Influences on the Damage and Destruction of the structure of Rocks* to analyze the acoustic emission measurements on stones under temperature exposure at the Institute of Building Construction and Technology of the Technical University Vienna.

Acoustic Emissions (AE) are elastic mechanical waves which occur when energy is released spontaneously on the inside of solids, for example in case of a sudden displacement of the grain boundaries by crack formation in the material. These timely restricted (transient) acoustic waves can be detected by sensors located on the surface of the solids. The goal of the AE-analysis is to use the examination of the AE-signals to shed light on processes such as the mechanism of degeneration on the inside of the observed materials. The AE-technique is already applied in many areas, such as quality assessment during production processes, ranging of damages in pressure containers and long-term monitoring of bridges and buildings, as non-destructive material testing in materials science.

The above mentioned research project focussed on the construction material marble as this is the stone often used in the form of tiles on the facades of buildings and because its shape retention is known to be very dependent on atmospheric conditions and especially on temperature influences. Thus the samples were exposed to cyclic temperature changes during the measurements in the laboratory and the subsequently generated AE-signals were recorded. The software *AE-Graphics 3.5* can then analyze these measuring data statistically by means of selected AE-parameters and depict them graphically.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung **1**

1.1. Motivation und Zielsetzung 1

1.2. Aufbau und Kapitelübersicht 3

2. Grundlagen der Schallausbreitung **4**

2.1. Wichtige Schallgrößen 5

2.1.1. Schallausschlag 5

2.1.2. Schallschnelle und Schallschnellepegel 5

2.1.3. Schalldruck und Schalldruckpegel 6

2.1.4. Schallenergie und Schallenergiepegel 7

2.1.5. Schallintensität und Schallintensitätspegel 8

2.1.6. Schallleistung und Schallleistungspegel 9

2.2. Kugelwellen im homogenen, isotropen Medium 10

2.3. Körperschall 11

2.3.1. Longitudinalwellen im isotropen Festkörper 12

2.3.2. Transversalwellen im isotropen Festkörper 15

2.3.3. Das Wellenfeld an Oberflächen von Festkörpern 17

2.3.4. Schallgeschwindigkeiten im Festkörper 19

3. Die Schallemissionsanalyse und ihre Anwendung **21**

3.1. Historische Entwicklung der AE-Messung 21

3.2. AE-Quellen in verschiedenen Materialien 23

3.3. Anwendungsbereiche der AE-Technik 23

3.4. Analyse von AE-Signalen 24

3.4.1. Charakterisierung von Signalen durch AE-Parameter 25

3.4.2. Wellenformanalyse 26

3.5. Messtechnik in der AE-Analytik 28

3.5.1. Sensoren 28

3.5.2. Vorverstärker 30

3.5.3. Frequenzfilter 30
3.5.4. Digitalisierung und Speicherung 30
3.5.5. Analyse und Interpretation 31

4. Schädigung von Marmor durch Umwelteinflüsse 32
4.1. Methoden zur Ermittlung von Schäden im Gefüge von Marmor 32
4.2. Wölbung von Marmorplatten als Folge der Verwitterung 34

5. AE-Messungen an Marmorproben an der TU Wien 36
5.1. Experimenteller Aufbau 36
5.1.1. AE-Messsystem 37
5.1.2. Zyklische Heizung und Abkühlung der Proben 37
5.2. Das Probematerial und seine Herkunft 37
5.2.1. Carrara-Marmor 38
5.2.2. Sanierung der Otto-Wagner-Kirche 40

6. Fouriertransformation (FT) 42
6.1. Diskrete Fouriertransformation (DFT) 42
6.1.1. Nyquist-Frequenz, Abtasttheorem und Aliasing 45
6.1.2. DFT eines reellen Signales 45
6.2. Schnelle Fouriertransformation (FFT) 46
6.2.1. Implementierung des FFT-Algorithmus 49
6.2.2. Anwendung des FFT-Algorithmus 51

7. Die Software - AE Graphics 3.5 55
7.1. Grafische Benutzeroberfläche und Bedienung 55
7.1.1. Das Startfenster 57
7.1.2. Das Gruppenfenster 60
7.1.3. Das Diagrammfenster 62
7.2. Die Gruppenkriterien 64
7.2.1. Amplitude 65
7.2.2. Energie 65
7.2.3. Frequenz 67

8. Beispielhafte Anwendung von AE-Graphics 3.5 auf Versuchsdaten 69
8.1. Gruppendefinition nach Frequenz 69
8.2. Grafische Ausgabe für die Proben 70
8.2.1. Verteilung der Schallereignisse in Frequenzgruppen 70

8.2.2. Diagramme für Carrara-alt 71
8.2.3. Diagramme für Carrara-neu 72

9. Schlussbetrachtungen **76**
9.1. Zusammenfassung 76
9.2. Ausblick 76

A. Format der Textdateien **83**
A.1. Formatierung der ersten Textdatei 83
A.2. Formatierung der zweiten Textdatei 83
A.3. Formatierung der Filter-Datei 84

B. Quellcode **87**

C. Vallen AMSY-5 Systembeschreibung **107**

Abbildungsverzeichnis

1.1. Überblick der AE-Messkette 2

2.1. Auslenkungen und Spannungen in einer Longitudinalwelle 12
2.2. Auslenkungen und Spannungen in einer Transversalwelle 16
2.3. Rayleigh-Welle an der Oberfläche eines Festkörpers 18
2.4. Snelliussches Brechungsgesetz 19

3.1. mögliche Signalformen 25
3.2. AE-Parameter 27
3.3. Schema der AE-Messkette 29

5.1. Versuchsaufbau, Bildquelle: [43] 38
5.2. Die Probekörper 39
5.3. Detailansicht der Otto-Wagner-Kirche 40
5.4. Gesamtansicht der Otto-Wagner-Kirche 41

6.1. Schema der rekursiven Anwendung des Danielson-Lanczos Lemmas . . 48
6.2. Rekursive Anwendung des Danielson-Lanczos Lemmas auf ein Datenarray 49
6.3. Arrayeinträge vor und nach der FFT 49
6.4. Flussdiagramm für die FFT-Berechnung 50
6.5. FFT-Algorithmus 51
6.6. Anwendung des FFT-Algorithmus auf die Testfunktion 52
6.7. Anwendung des FFT-Algorithmus auf Messdaten 54

7.1. AE Graphics 3.5: Startfenster 56
7.2. AE Graphics 3.5: Öffnen1ButtonClick 56
7.3. AE Graphics 3.5: Öffnen2ButtonClick 58
7.4. AE Graphics 3.5: Gruppenfenster 61
7.5. PAP zu GruppenButtonClick und DiagrammeButtonClick 62
7.6. AE Graphics 3.5: Diagrammfenster 64
7.7. Anwendung des Amplitudenkriteriums 66

7.8. Anwendung des erweiterten Frequenzkriteriums 68

8.1. Screenshot AE-Graphics 3.5, Startfenster 71
8.2. Screenshot AE-Graphics 3.3, Kreisdiagramme für Carrara-Marmor . . . 73
8.3. Screenshot AE-Graphics 3.3, Zeitverläufe: carrara-alt 74
8.4. Screenshot AE-Graphics 3.3, Hits-Temperatur: carrara-alt 74
8.5. Screenshot AE-Graphics 3.3, Zeitverläufe: carrara-neu 75
8.6. Screenshot AE-Graphics 3.3, Hits-Temperatur: carrara-neu 75

A.1. Formatierung der ersten Textdatei 85
A.2. Formatierung der zweiten Textdatei 85
A.3. Formatierung der Filter-Datei 86

Tabellenverzeichnis

2.1. Einteilung des Schalles nach seiner Frequenz 4

6.1. Frequenzen des Testsignals 53

8.1. Einteilung der AE-Signale anhand ihrer Frequenz 70

1. Einführung

1.1. Motivation und Zielsetzung

In Zusammenarbeit mit einigen österreichischen Steinmetzbetrieben wurde im Jahr 2009 von E. Tschegg am Institut für Hochbau und Technologie (E 206/4) ein dreijähriges Forschungsprojekt mit dem Titel *Umwelteinflüsse auf die Schädigung und Zerstörung des Gefüges an Gesteinen* durchgeführt. Im Zuge dieses Projektes wurden verschiedene Marmore und andere Gesteine in bruchfrischem und verwittertem Zustand verglichen. Einflüsse wie Feuchtigkeit, Probengröße und verschiedene Konservierungsverfahren auf das entstehende Schadensausmaß wurden berücksichtigt. Im Zentrum der Untersuchungen stand allerdings der Einfluss der Temperatur bzw. der Temperaturwechsel auf die Beständigkeit von Gesteinen. Zu diesem Zweck wurden die Gesteinsproben in Versuchen einem zyklischen Temperaturverlauf ausgesetzt. Um Art und Ausmaß der aufgrund der Temperaturwechsel entstehenden Schäden zu bestimmen, wurde Schallemissionsanalyse verwendet. Dabei wurden mit Sensoren auf der Probeoberfläche Schallemissionen (kurz AE für Acoustic Emissions) im Ultraschallbereich erfasst, die als Folge von mechanischen, thermischen oder chemischen Einwirkungen auf das Material entstehen. Als AE-Messsystem wurde *AMSY-5 M6* der *Vallen Systeme GmbH* verwendet. Es wurden zahlreiche Messungen mit unterschiedlichen Proben und Versuchsbedingungen durchgeführt. Zur weiteren Analyse der daraus gewonnen Messdaten wurde die in dieser Arbeit vorgestellte Software *AE-Graphics 3.5* entwickelt. Basis für die Anwendung von *AE-Graphics 3.5* sind Textdateien, die mit der Software *Vallen AE-Suite* erstellt wurden. Ziel dieser Arbeit war die Erstellung einer benutzerfreundlichen *Windows*-Anwendung, die Folgendes leisten soll:

- Einlesen der durch die *Vallen AE-Suite* erzeugten Textdateien mit den aufgezeichneten und berechneten AE-Daten
- Fouriertransformation der Zeitverläufe zur Ermittlung der dominierenden Frequenzen im Spektrum der AE-Signale

- Filterung und Gruppierung der AE-Signale nach Messkanal, Frequenz und den AE-Parametern Energie und Amplitude
- Erzeugung einer anschaulichen grafischen Darstellung der Anzahl der AE-Signale mit den jeweiligen Eigenschaften als Funktion der Zeit und der Temperatur
- Erstellung einer Speicherfunktion für die erzeugten Diagramme

AE-Graphics 3.5 soll dazu dienen, aus der oft großen Anzahl von erfassten AE-Signalen jene mit bestimmten Eigenschaften zu gruppieren. Dies soll einerseits helfen unerwünschte Störsignale herauszufiltern und andererseits die Möglichkeit bieten, zu erkennen, ob eine spezifische Art von AE-Signalen bei einer bestimmten Temperatur gehäuft oder vermindert auftritt. Neben der Ermittlung des allgemeinen Schadensausmaßes durch die Temperatureinwirkung in der Probe, besteht auch Interesse daran mögliche Schädigungsmechanismen anhand ihrer AE-Signale zu identifizieren. Abbildung 1.1 zeigt schematisch die AE-Messkette beginnend mit der Probe, die beheizt/gekühlt wird bis zur Analyse-Software *AE-Graphics*.

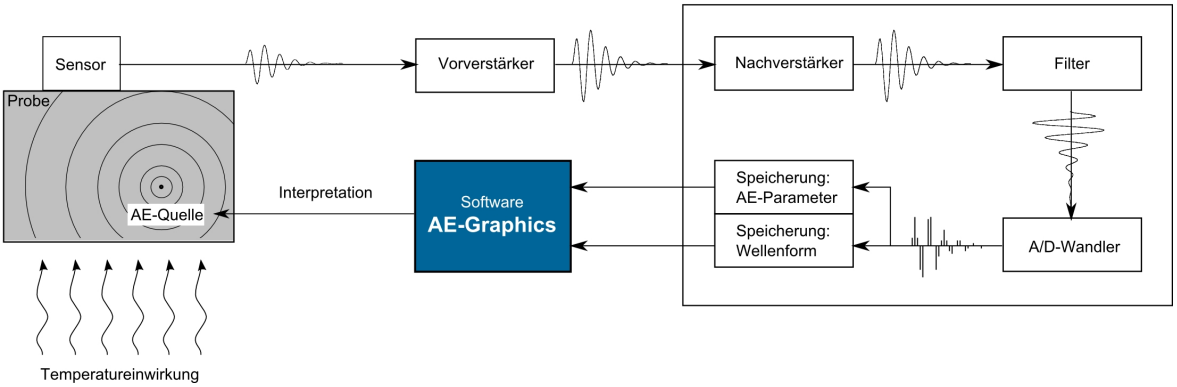


Abbildung 1.1.: Überblick der AE-Messkette mit der Software *AE-Graphics* als Werkzeug zur qualitativen und quantitativen Analyse der aufgezeichneten AE-Daten (eigene Darstellung nach [23])

1.2. Aufbau und Kapitelübersicht

Im Kapitel 2 werden die Grundlagen der Schallausbreitung kurz dargestellt. Im ersten Abschnitt werden die wichtigsten Größen der Schallausbreitung und Schallmessung angeführt. Der zweite Teil befasst sich mit Schallausbreitung und Arten von Wellen wie sie im idealisierten Festkörper vorkommen. Die Grundlagen, Anwendungen und die Begriffe der AE-Analyse werden in Kapitel 3 behandelt. Anschließend wird in Kapitel 4 auf die Umwelteinflüsse eingegangen, die zur Schädigung von Marmoren führen können. Das betrachtete Probematerial, seine Herkunft und die durchgeführten AE-Messungen werden in Kapitel 5 genauer erläutert. In Kapitel 6 werden die wichtigsten Grundlagen zur Fouriertransformation dargestellt. Sie bilden den Ausgangspunkt für den in der Software angewendeten FFT-Code, der in Abschnitt 6.2.1 dokumentiert ist. Zentraler Punkt dieser Arbeit ist die erstellte Software *AE-Graphics 3.5*, deren Benutzeroberfläche und Bedienung in Kapitel 7 beschrieben sind. Der zugehörige Quellcode ist in Anhang B zu finden. Abschließend ist in Kapitel 8 eine beispielhafte Anwendung der Software dokumentiert. Kapitel 9 enthält eine kurze Zusammenfassung und einen Ausblick auf mögliche weitere Entwicklungen.

2. Grundlagen der Schallausbreitung

In diesem Kapitel werden grundlegende Größen und Zusammenhänge der Schallausbreitung und Schallmessung dargestellt. Für eine detailiertere Darstellung sei auf Lehrbücher der Akustik verwiesen (vgl. hierzu beispielsweise [8], [30]).

Unter Schall versteht man physikalisch eine räumlich und zeitlich fortschreitende Welle mechanischer Deformationen in einem Medium. Schall breitet sich mit einer für das Medium charakteristischen *Schallgeschwindigkeit* c aus. Die *Frequenz* f einer Schallwelle entspricht der Anzahl der vollendeten Schwingungen pro Zeitintervall. Schallgeschwindigkeit c, Frequenz f und *Wellelänge* λ sind über (2.1) miteinander verknüpft.

$$c = \lambda f \tag{2.1}$$

Die Wellenlänge λ bezeichnet dabei den Abstand zweier aufeinander folgender Wellenfronten. Je nach Frequenz des Schallsignals werden drei Schallbereiche unterschieden. Schwingungen mit einer Frequenz kleiner als 16 Hz liegen außerhalb des menschlichen Hörvermögens und werden dem Infraschallbereich zugeordnet. Frequenzen zwischen 16 Hz und 16 kHz werden zum Hörfrequenzbereich zusammengefasst. Schallwellen mit Frequenzen größer als 16 kHz werden als Ultraschallwellen bezeichnet. Sie sind vom menschlichen Gehör nicht erfassbar, aber in der Materialforschung von großem Interesse [28].

$f \lesssim 16$ Hz	Infraschall
$16\text{ Hz} \lesssim f \lesssim 16\text{ kHz}$	Hörschall
$f \gtrsim 16$ kHz	Ultraschall

Tabelle 2.1.: Einteilung des Schalles nach seiner Frequenz [8]

2.1. Wichtige Schallgrößen

Neben den elementaren Größen f, λ und c, die für alle Arten von Wellenbewegungen (elektromagnetische Wellen, Wahrscheinlichkeitswellen der Quantenmechanik, etc.) brauchbar sind, werden in den folgenden Abschnitten Größen speziell zur Charakterisierung von Schallwellen angeführt.

2.1.1. Schallausschlag

Der *Schallausschlag* ist die dem Schall zugeordnete Wechselauslenkung der Teilchen im Schallfeld. Die größte Auslenkung wird mit Amplitude bezeichnet. In den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 wird der Schallausschlag mit den griechischen Buchstaben ζ und η bezeichnet.

2.1.2. Schallschnelle und Schallschnellepegel

Die *Schallschnelle* v ist die Momentangeschwindigkeit mit der die Teilchen im Schallfeld um ihre Ruhelage schwingen. Sie ist eine vektorielle Größe und entspricht der zeitlichen Ableitung des Schallausschlages. Die Schallschnelle ist physikalisch von der Schallgeschwindigkeit c zu unterscheiden. Da der Wertebereich für akustische Größen oft mehrere Größenordnungen abdeckt, ist es sinnvoll logarithmische Verhältnisgrößen zu benutzen. Der Schallschnellepegel L_v ist definiert als der zehnfache dekadische Logarithmus des Effektivwertes der Schallschnelle $\tilde{v}$ zum Quadrat bezogen auf das Quadrat der Bezugsschnelle v_0:

$$L_v = 10 \lg \left(\frac{\tilde{v}}{v_0}\right)^2 \mathrm{dB} = 20 \lg \left(\frac{\tilde{v}}{v_0}\right) \mathrm{dB} \tag{2.2}$$

Der *Schallschnellepegel* wird in der logarithmischen Hilfseinheit Dezibel (dB) gemessen. Der Effektivwert der Schallschnelle $\tilde{v}$ wird dabei aus dem quadratischen Mittelwert der Schallschnelle v berechnet, wobei sich die Integration im Falle eines periodischen Schnelleverlaufes auf die Periodendauer T beschränkt:

$$\tilde{v}^2 = \lim_{\tau \to \infty} \frac{1}{\tau} \int_{\tau} v^2(t)dt = \frac{1}{T} \int_{T} v^2(t)dt \tag{2.3}$$

Die Bezugsschnelle ist definiert mit $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ m/s [9].

2.1.3. Schalldruck und Schalldruckpegel

Der *Schalldruck* p ist eine der wichtigsten Schallfeldgrößen und wird charakterisiert als skalare Wechselgröße, die dem statischen Druck p_{stat} des umgebenden Mediums überlagert ist.

$$p_{ges}(t) = p_{stat} + p(t) \tag{2.4}$$

In Luftschall entspricht der statische Umgebungsdruck p_{stat} dem atmosphärischen Luftdruck. Bei Schall in Festkörpern, wie in Kapitel 2.3, muss der Druck p durch die jeweiligen Spannungen σ_z (2.28) und τ (2.44) ersetzt werden. Zur Beschreibung der Stärke eines Schallereignisses wird der Schalldruckpegel L_p verwendet, in welchem das Verhältnis vom effektiven Schalldruck $\tilde{p}$ zu Bezugsschalldruck p_0 einfließt:

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{\tilde{p}}{p_0} \right)^2 \text{dB} = 20 \lg \left(\frac{\tilde{p}}{p_0} \right) \text{dB} \tag{2.5}$$

$$\tilde{p}^2 = \lim_{\tau \to \infty} \frac{1}{\tau} \int_{\tau} p^2(t)dt = \frac{1}{T} \int_{T} p^2(t)dt \tag{2.6}$$

Der Bezugsschalldruck ist definiert mit $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Dieser Wert entspricht näherungsweise der Hörschwelle eines Menschen bei einem Sinuston mit Frequenz f=1000 Hz [9].

2.1.4. Schallenergie und Schallenergiepegel

Die *Schallenergie* W ist die in einem Schallfeld enthaltene Energie. Sie lässt sich aus der Summe aus kinetischer Energie W_{kin} und potentieller Energie W_{pot} berechnen:

$$W = W_{kin} + W_{pot} \tag{2.7}$$

Der kinetische Anteil der Energie rührt von der Wechselgeschwindigkeit v der Teilchen im betrachteten Medium her. Durch die abwechselnde Verdichtung und Verdünnung von Teilen des Mediums wird potentielle Energie vom Medium aufgenommen und abgegeben. Oft ist es sinnvoll statt der Schallenergie W die *Schallenergiedichte* w für einen bestimmten Ort zu betrachten.

$$w = w_{kin} + w_{pot} \tag{2.8}$$

Die beiden entsprechenden Anteile w_{kin} und w_{pot} sind aus der Dichte ρ des Mediums und den oben eingeführten Größen berechenbar [9]:

$$w_{kin} = \frac{\rho\, v^2}{2} \tag{2.9}$$

$$w_{pot} = \frac{p^2}{2\,\rho\, c^2} \tag{2.10}$$

Die Gesamtenergie (2.7) lässt sich durch Integration von (2.8) über das betrachtete Volumen V bestimmen:

$$W = \int_V \frac{\rho\, v^2}{2}\, dV + \int_V \frac{p^2}{2\,\rho\, c^2}\, dV \tag{2.11}$$

Für eine ebene, fortschreitende Schallwelle müssen der kinetische (2.9) und der potentielle (2.10) Energiedichteanteil gleich groß sein [9]:

$$\tilde{w} = \frac{\rho\,\tilde{v}^2}{2} + \frac{\tilde{p}^2}{2\,\rho\,c^2} = \rho\,\tilde{v}^2 \tag{2.12}$$

Die der *Schallenergie* W zugehörige logarithmische Größe ist der *Schallenergiepegel* L_W mit dem Bezugswert W_0 [9]:

$$L_W = 10\,\lg\left(\frac{W}{W_0}\right)\,\mathrm{dB} \qquad \text{mit} \quad W_0 = 10^{-12}\ \mathrm{J} \tag{2.13}$$

2.1.5. Schallintensität und Schallintensitätspegel

Die *momentane Schallintensität* I gibt die Schallleistung an, die pro Flächeneinheit durch eine durchschallte Fläche tritt. Sie beschreibt die Energieflussdichte in Schallfeldern und berechnet sich aus dem Produkt von Schalldruck p und Schallschnelle v:

$$\vec{I} = p\,\vec{v} \tag{2.14}$$

Die Schallintensität ist eine zeitabhängige, vektorielle Größe, deren Richtung durch den Vektor der Schallschnelle $\vec{v}$ gegeben ist. Eine *effektive Schallintensität* I kann aus den entsprechenden Effektivwerten (2.6) und (2.3) berechnet werden:

$$I = \tilde{p}\,\tilde{v}\,\cos\phi \tag{2.15}$$

Der *Phasenwinkel* ϕ berücksichtigt die Phasenverschiebung zwischen Druck p und Schnelle v. Für eine eben fortschreitende Welle ist die Phasenverschiebung ϕ=0:

$$I = \tilde{p}\,\tilde{v} \tag{2.16}$$

Die der Schallintensität I zugehörige logarithmische Größe ist der *Schallintensitätspegel* L_I mit dem Bezugswert I_0 [9]:

$$L_I = 10\,\lg\left(\frac{I}{I_0}\right)\,\mathrm{dB} \qquad \text{mit} \quad I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2} \tag{2.17}$$

Im quellfreien Schallfeld gilt die Energieerhaltung:

$$\frac{\partial}{\partial t} w + \nabla \cdot \vec{I} = 0 \tag{2.18}$$

Die zeitliche Änderung der Energiedichte w (2.8) in einem Volumen steht mit der Energieflussdichte $\vec{I}$ (2.14) im Gleichgewicht.

2.1.6. Schallleistung und Schallleistungspegel

Die *Schallleistung* P ist die gesamte Schallenergie, die von einer Schallquelle pro Zeiteinheit abgestrahlt wird. Sie berechnet sich aus dem Integral der Schallintensität I über eine durchschallte Fläche S:

$$P = \int_S \vec{I}\, d\vec{S} = \int_S p\,\vec{v}\, d\vec{S} \tag{2.19}$$

Die der Schallleistung P zugehörige logarithmische Größe ist der *Schallleistungspegel* L_W mit dem Bezugswert P_0 [9]:

$$L_W = 10\,\lg\left(\frac{P}{P_0}\right)\,\mathrm{dB} \qquad \text{mit} \quad P_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W} \tag{2.20}$$

2.2. Kugelwellen im homogenen, isotropen Medium

Alle Schallereignisse müssen der *Wellengleichung* genügen, welche in ihrer allgemeinen Form lautet [5]:

$$\Delta\, p(x,y,z,t) - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\, p(x,y,z,t) = 0 \tag{2.21}$$

$$\text{mit} \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Die Wellengleichung (2.21) beschreibt das Raum- und Zeitverhalten einer Größe p mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c.

Da die meisten technischen und natürlichen Schallquellen Kugelwellen emittieren, bietet es sich an bei der Beschreibung der Wellenfelder auf Kugelkoordinaten überzugehen [5]:

$$(x,y,z) \rightarrow (r,\theta,\varphi)$$

$$\Delta \rightarrow \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2}\frac{\cos\theta}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta} + \frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2} \tag{2.22}$$

Breitet sich eine Störung von einer punktförmigen Quelle in einem homogenen, isotropen Medium aus, so müssen die Phasenflächen dieser Welle die Gestalt von konzentrischen Kugeln um diese Quelle annehmen. Die Feldgrößen sind unabhängig von den Winkelkoordinaten θ und φ. Somit liefern nur die ersten beiden Terme des Laplace-Operators (2.22) einen Beitrag (Kugelwelle 0.Ordnung). Mit dieser Annahme erhält die Wellengleichung (2.21) folgende Form[1]:

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}(p\,r) - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}(p\,r) = 0 \tag{2.23}$$

[1] Hier wurde folgende Äquivalenz für die ersten beiden Terme des Laplace-Operators ausgenutzt: $\frac{1}{r}\frac{\partial^2}{\partial r^2}(p\,r) = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial p}{\partial r} + p\right) = \frac{1}{r}\left(r\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial p}{\partial r}\right) = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial}{\partial r}\right)p$

Nimmt man weiter für die Schallfeldgröße p eine zeitlich harmonische Funktion der Form (2.24) an,

$$p(r,t) = \hat{p}(r)\, e^{\mathrm{i}\omega t} \tag{2.24}$$

so ergibt sich aus (2.23) die Gleichung:

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}(\hat{p}\, r) + k^2(\hat{p}\, r) = 0 \quad \text{mit} \quad k = \frac{\omega}{c} \tag{2.25}$$

k wird dabei als *Wellenzahl* bezeichnet. Die Lösungen dieser Gleichung sind Kugelwellen der Form (2.26), wobei A_0 eine i. Allg. komplexe Konstante ist, welche durch die Quellstärke festgelegt ist. Die Richtigkeit dieser Lösung lässt sich durch Einsetzen in (2.25) bzw. (2.23) überprüfen.

$$\hat{p}(r) = \frac{A_0}{r} e^{-\mathrm{i}kr} \quad \text{bzw.} \quad p(r,t) = \frac{A_0}{r} e^{\mathrm{i}(\omega t - kr)} \tag{2.26}$$

2.3. Körperschall

Unter Körperschall versteht man Schwingungsvorgänge in festen Körpern. Materialkennwerte wie *Elastizitätsmodul* E, *Dichte* ρ und *Poissonzahl* μ gehen in die Wellengleichung ein und haben somit auch einen wesentlichen Einfluss auf die Größe der Schallgeschwindigkeit. Man unterscheidet grundsätzlich zwei Arten von Schallwellen. Als *logitudinale* Wellen (Längswellen) werden jene Schallwellen bezeichnet, bei denen die Schwingungsrichtung gleich der Richtung der Schallausbreitungsrichtung ist. Steht die Schwingungsrichtung der Schallwelle normal auf die Ausbreitungsrichtung, so spricht man von einer *transversalen* Welle (Scherwelle). Während in Gasen nur longitudinale Wellen auftreten, können bei Festkörpern sowohl longitudinale als auch transversale Wellen vorkommen [30], [8].

2.3.1. Longitudinalwellen im isotropen Festkörper

Bei longitudinaler Ausbreitung fallen Schwingungs- und Ausbreitungsrichtung der Welle zusammen. Man kann sich den Festkörper aus äquidistanten Ebenen zusammen gesetzt denken, die parallel zur Ausbreitungsrichtung sind. Diese Ebenen ändern bei einer longitudinalen Wellenbewegung ihre relativen Abstände. Die Teilchen in der Ebene mit der Ruhelage $z = const$ werden mit einer Schwingungsamplitude ζ angeregt. Die Teilchen der um dz entfernten Ebene $z + dz = const$ haben in linearer Näherung dann die Schwingungsamplitude $\zeta + \frac{\partial \zeta}{\partial z} dz$ (siehe Abbildung 2.1). Die ursprünglich im Volumen $A\,dz$ eingeschlossene Materie erfährt durch die Wellenbewegung eine Dehnung ϵ_z in z-Richtung (2.27):

$$\epsilon_z = \frac{\partial \zeta}{\partial z} \tag{2.27}$$

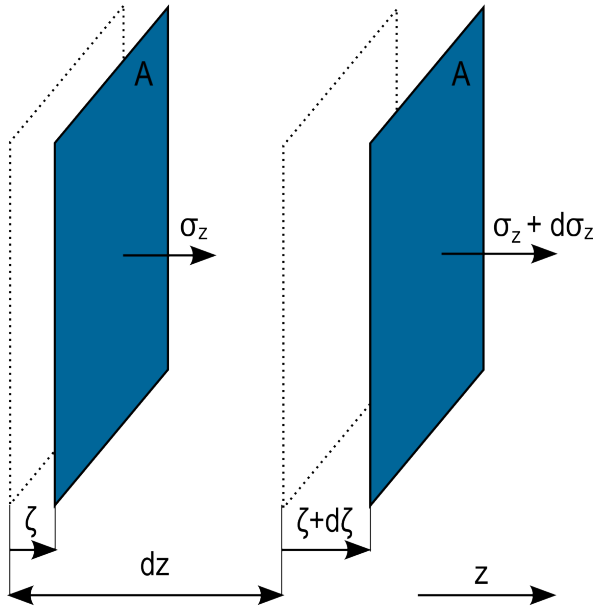


Abbildung 2.1.: Auslenkungen und Spannungen in einer Longitudinalwelle

Diese Dehnung hat eine Änderung der Spannung im Material zur Folge. Im Grenzwert kleiner Deformationen stellt sich dabei gemäß dem *Hooke'schem Gesetz* eine zur Dehnung proportionale rücktreibende Kaft F ein. Die Konstante D wird als *longitudinale Steife* des Materials bezeichnet.

$$\sigma_z = D\,\epsilon_z = D\,\frac{\partial \zeta}{\partial z} \quad \text{mit} \quad \sigma_z = \frac{F}{A} \tag{2.28}$$

Auch die Spannung σ_z ist vom Ort abhängig. Am rechten Ende des Volumselementes dV wirkt eine um $d\sigma_z$ erhöhte Spannung, die nach (2.28) mit der Amplitude ζ verknüpft ist:

$$\sigma_z + d\sigma_z = \sigma_z + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}\,dz = \sigma_z + D\,\frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} \tag{2.29}$$

Die aufgrund der Spannungsdifferenz wirkende Kraft dF auf das Volumen dV ist:

$$dF = A\,(\sigma_z + d\sigma_z - \sigma_z) \tag{2.30}$$

Durch Einsetzen von (2.29) erhält man schließlich:

$$dF = A\,D\,\frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} \tag{2.31}$$

Die Newton'sche Bewegungsgleichung für das Massenelement dm lautet:

$$\begin{aligned} dF &= dm\,\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \\ &= \rho\,dV\,\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \\ &= \rho\,A dz\,\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \end{aligned} \tag{2.32}$$

Die Gleichungen (2.31) und (2.32) ergeben zusammen eine eindimensionale Wellengleichung (2.33), die eine Störung ζ in einem isotropen Festkörper beschreibt, welche sich longitudinal in z-Richtung ausbreitet.

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} - \frac{\rho}{D}\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = 0 \tag{2.33}$$

Durch Vergleich mit der Wellengleichung (2.21) ergibt sich im Falle der longitudinalen Wellen im Festkörper für die Schallgeschwindigkeit c:

$$c_L = \sqrt{\frac{D}{\rho}} \tag{2.34}$$

Eine weitere wichtige Kenngröße des Schallfeldes stellt die Energie W dar, die durch die Welle transportiert wird. Zu diesem Zweck ist es sinnvoll von der Auslenkung ζ auf die Geschwindigkeit v überzugehen. v wird als Schnelle bezeichnet und entspricht der Momentangeschwindigkeit der ausgelenkten Teilchen:

$$v_z = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \tag{2.35}$$

Die kinetische Energiedichte w_{kin} der Schallwelle ist dann:

$$w_{kin} = \frac{1}{2}\,\rho\, v_z^2 \tag{2.36}$$

Der potentielle Anteil der Energiedichte w_{pot} ist durch die in der elastischen Verformung (2.28) enthaltenen Energie gegeben [30]:

$$w_{pot} = \int_0^{\epsilon_z} \sigma_z \, d\epsilon_z = \frac{1}{2}\, D\, \epsilon_z^2 = \frac{1}{2D}\, \sigma_z^2 \tag{2.37}$$

Die gesamte Energiedichte w bzw. Energie W ist:

$$w = w_{kin} + w_{pot} \tag{2.38}$$

$$W = \int_0^V w \, dV \tag{2.39}$$

Außerdem sind die beiden Energieanteile w_{kin} und w_{pot} nach (2.12) gleich groß:

$$w_{kin} = \frac{1}{2} \rho \, v_z^2 = w_{pot} = \frac{1}{2D} \sigma_z^2 \tag{2.40}$$

Die in Gleichung (2.28) eingeführte longitudinale Steife D ist von Geometrie und Materialwerten des Festkörpers abhängig. Im Falle eines stabförmigen Körpers lässt sich die longitudinale Steife D durch das Elastizitätsmodul E des Materials ersetzen. Im unbegrenzten Festkörper fließt weiters die Poisson- oder Querkontraktionszahl μ ein. Sie ist eine dimensionslose Größe, die die Proportionalität zwischen Längen- und dazu normalen Breitenänderung bei Einwirkung einer Zugkraft angibt. Die longitudinale Schallgeschwindigkeit (2.34) für einen unbegrenzten Festkörper bekommt die Form [26]:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \tag{2.41}$$

2.3.2. Transversalwellen im isotropen Festkörper

Ein fester Körper widersetzt sich nicht nur der Änderung seines Volumens, sondern auch der Änderung seiner Form. Das ist möglich, da ein fester Körper im Gegensatz zu Gasen und Flüssigkeiten in jeder betrachteten Schnittebene auch tangentiale Spannungen (Schubspannungen) übertragen kann. Das ermöglicht Transversalwellen, die sich mit der Geschwindigkeit c_T senkrecht zur Auslenkung der Teilchen ausbreiten. Zur Herleitung der Wellengleichung betrachtet man zwei benachbarte Materialschichten mit der Höhe dy und Abstand dz (Abbildung 2.2).

Wird die linke Materialebene um η transversal ausgelenkt, so beträgt die Auslenkung für die benachbarte Ebene $\eta + \frac{\partial \eta}{\partial z} dz$. Die Auslenkung hat eine Verzerrung des ursprünglichen Rechteckes mit den Seiten dy und dz zu einem Parallelogramm zur Folge. Der

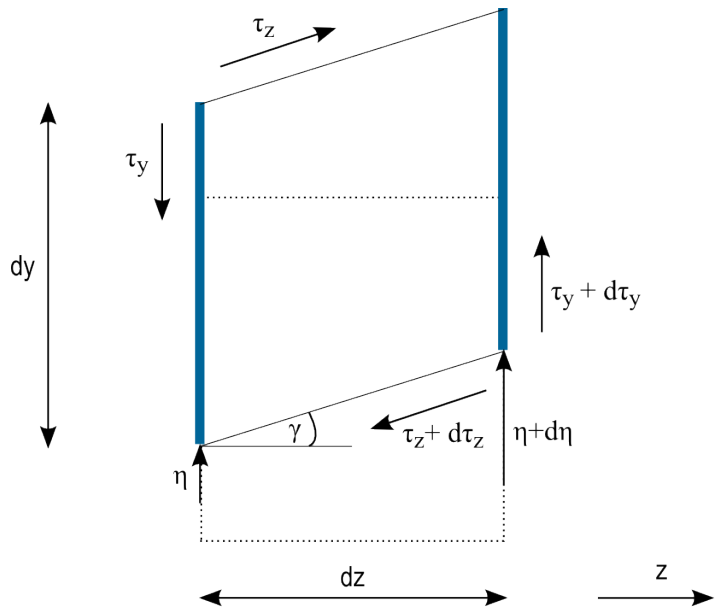


Abbildung 2.2.: Auslenkungen und Spannungen in einer Transversalwelle

spitze Winkel γ (*Schubwinkel*) des Parallelogramms ist für kleine Auslenkungen η:

$$\gamma \approx \tan\gamma = \frac{\partial \eta}{\partial z} \tag{2.42}$$

Durch die Verformung enstehen Schubspannungen. Aufgrund des Momentengleichgewichtes müssen aber die in unterschiedlicher Richtung wirkenden Schubspannungen τ_y und τ_z gleich groß sein [30]:

$$\tau = \tau_y = \tau_z \tag{2.43}$$

Weiters ist für kleine Verformungen die Spannung τ im Sinne des Hooke'schen Gesetzes proportional zum Schubwinkel γ:

$$\tau = G\,\gamma = G\,\frac{\partial \eta}{\partial z} \tag{2.44}$$

Die Proportionalitätskonstante G wird als *Schubmodul* bezeichnet. Die weitere Herleitung der Wellengleichung für Transversalwellen ist nun analog zu der der im Kapitel

2.3.1 betrachteten Longitudinalwellen, mit dem Unterschied, dass nun die Verschiebung η in y-Richtung (normal zur Ausbreitungsrichtung) ist, die Spannung σ_z durch τ und die longitudinale Steife D durch das Schubmodul G ersetzt werden. Aus den analogen Beziehungen (2.29) bis (2.32) folgt dann die Wellengleichung:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} - \frac{\rho}{G}\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \tag{2.45}$$

Durch Vergleich mit der Wellengleichung (2.21) ergibt sich im Falle der transversalen Wellen im Festkörper für die Schallgeschwindigkeit c:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{2.46}$$

Da Normalspannungen σ und Schubspannungen τ im isotropen Festkörper nicht unabhängig voneinander sind, lässt sich der Schubmodul G aus dem Elastizitätsmodul E und der Poissonzahl μ berechnen. Der Zusammenhang der Größen ist durch die folgende Beziehung gegeben [30]:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \tag{2.47}$$

Mit Beziehung (2.47) erhält man für die transversale Schallgeschwindigkeit c_T (2.46):

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho\,(1+\mu)}} \tag{2.48}$$

2.3.3. Das Wellenfeld an Oberflächen von Festkörpern

Berücksichtigt man auch Grenzflächen, wie die Oberfläche von realen Festkörpern, so gibt es einen weiteren Wellentyp, der auftreten kann. Diese Wellenart wird als Oberflächenwelle oder *Rayleigh-Welle* bezeichnet und ist weder rein longitudinal noch rein transversal. Die allgemeine mathematische Beschreibung von Rayleigh-Wellen ist schwierig. Die Geschwindigkeit der Rayleigh-Welle ist frequenzabhängig

und geringfügig kleiner als die transversale Schallgeschwindigkeit c_T. Die Rayleigh-Schallgeschwindigkeit c_R lässt sich mit einer Näherungsformel bestimmen [30]:

$$c_R \approx c_T \left(\frac{0,874 + 1,12\mu}{1 + \mu} \right) \tag{2.49}$$

Die Eindringtiefe nimmt von der Festkörperoberfläche in sein Inneres stark ab. Bei einer Tiefe größer als die doppelte Wellenlänge ist praktisch keine Wellenbewegung mehr vorhanden [28]. Die Abbildung 2.3 zeigt schematisch wie sich das quadratische Netz eines Festkörpers bei einer Rayleigh-Welle (in z-Richtung) deformiert.

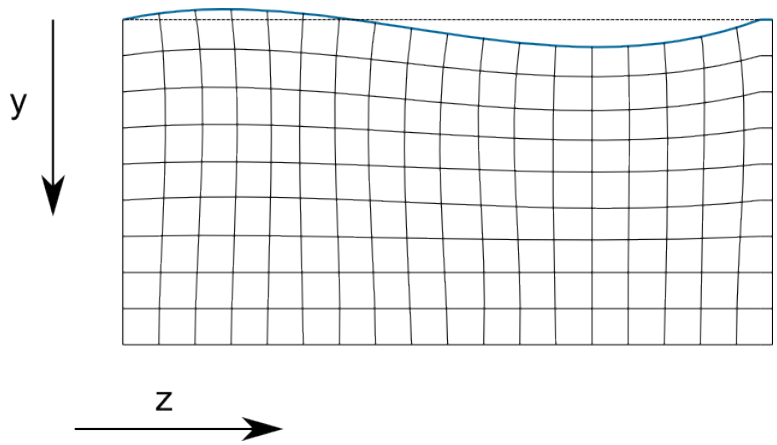


Abbildung 2.3.: Rayleigh-Welle an der Oberfläche eines Festkörpers

Ein weiteres wichtiges Phänomen an Grenz- und Oberflächen ist die *Brechung* bzw. *Reflexion* von Wellen. Für ebene Schallwellen kann das *Snelliussche Brechungsgesetz* bzw. das *Reflexionsgesetz* (Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel) herangezogen werden, welches die Richtungsänderung einer Welle beim Übergang zwischen zwei verschiedenen Materialien beschreibt. Verantwortlich für diese Richtungsänderungen sind unterschiedliche, materialabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den beiden betrachteten Materialien. Im Allgemeinen entstehen an einer Grenzfläche zwischen zwei Festkörpern aus einer einfallenden Longitudinalwelle sowohl longitudinale als auch transversale Wellenkomponenten. Aufgrund der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten (c_L und c_T) der beiden Wellenarten werden diese beiden Anteile mit unterschiedlichen Winkeln gebrochen.

$$\frac{\sin(\theta_{L1})}{c_{L1}} = \frac{\sin(\theta_{T1})}{c_{T1}} = \frac{\sin(\theta_{L2})}{c_{L2}} = \frac{\sin(\theta_{T2})}{c_{T2}} \tag{2.50}$$

Die Indizes L und T in Gleichung (2.50) beziehen sich auf den longitudinalen und transversalen Wellenanteil. Die beiden unterschiedlichen Medien werden durch die Indizes 1 und 2 gekennzeichnet. Mit θ werden die Winkel zwischen den entsprechenden Wellenvektoren und der Grenzflächennormale bezeichnet. Die Abbildung 2.4 zeigt eine einfallende Longitudinalwelle k, die an der Grenzfläche zweier Festkörper teilweise reflektiert und transmittiert wird.

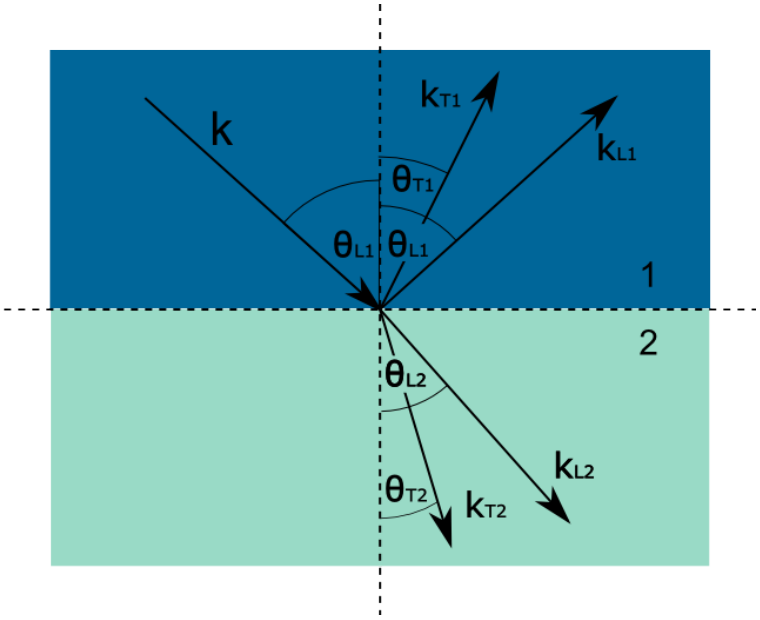


Abbildung 2.4.: Snelliussches Brechungsgesetz: Eine einfallende Longitudinalwelle k wird an der Grenzfläche 1-2 zwischen zwei Festkörpern teilweise reflektiert (k_{T1} und k_{L1}) und transmittiert (k_{T2} und k_{L2}). Die Indizes L und T stehen für die Wellenarten longitudinal und transversal.

Für eine detaillierte Beschreibung des Wellenfeldes an Grenzflächen sei beispielsweise auf [30] oder [28] verwiesen.

2.3.4. Schallgeschwindigkeiten im Festkörper

Das Verhältnis von transversaler Schallgeschwindigkeit c_T (2.48) und longitudinaler Schallgeschwindigkeit c_L (2.34) ist:

$$\frac{c_T}{c_L} = \sqrt{\frac{G}{D}} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \tag{2.51}$$

Da die Poissonzahl μ für isotrope Materialien üblicherweise Werte zwischen 0 und 0,5 annimmt [22], ist die transversale Schallgeschwindigkeit stets geringer als die longitudinale Schallgeschwindigkeit:

$$\frac{c_T}{c_L} < 1 \tag{2.52}$$

Mit dieser Annahme ergibt sich weiters, dass die Schallgeschwindigkeit einer Rayleigh-Welle c_R (2.49) kleiner ist als die transversale und longitudinale Schallgeschwindigkeit:

$$\frac{c_R}{c_T} < 1 \tag{2.53}$$

Im Falle eines anisotropen Festkörpers (z. B. Kristall) hängt die Schallgeschwindigkeit nicht nur vom Wellentyp, sondern auch von der Ausbreitungsrichtung und der Auslenkrichtung (bei Transversalwellen) ab. In diesem Fall lässt sich das Material nicht mehr mit skalaren Größen charaterisieren. Der Elastizitätsmodul muss dazu mit dem allgemeineren Elastizitätstensor ersetzt werden [8].
Für das in dieser Arbeit betrachtete Material liegt die longitudinale Schallgeschwindigkeit bei etwa $c_L = 5000$ m/s (bruchfrischer Cararra Marmor). Bei hoher Porosität als Folge von Verwitterung kann die Schallgeschwindigkeit auf weniger als 1500 m/s absinken [39].

3. Die Schallemissionsanalyse und ihre Anwendung

Unter *Schallemissionen*, oder kurz AE für *Acoustic Emission*, versteht man Schallwellen, welche durch eine spontane, lokale Spannungsänderung im Inneren von Materialien verursacht werden [14].
Wird ein festes, homogenes Material elastisch verformt, so führt dies zu einem Anstieg der elastischen Energie. Wird dieses Material über seine Elastizitätsgrenze hinaus beansprucht, so kommt es zu plastischer Verformung und anschließend zum Bruch. Befinden sich im elastisch beanspruchten Material strukturelle Unregelmäßigkeiten, wie z. B. Einschüsse oder Defekte, so können sich Spannungen an diesen Punkten konzentrieren, die schließlich zu Rissbildung führen. Dabei wird das Material ruckartig lokal entspannt. Die dabei freigesetzte Energie wird in Form einer Schallwelle an das umgebende Material abgegeben. Mit geeigneten Sensoren können diese Schallsignale aufgenommen und analysiert werden. Unter Schallemissionsanalyse bzw. Schallemissionsprüfung, oder kurz AT für *Acoustic Emission Testing*, versteht man die Analyse von AE-Signalen in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung [44].

3.1. Historische Entwicklung der AE-Messung

Die Geschichte der AE-Messung lässt sich in zwei Abschnitte unterteilen: die vortechnologische und die technologische Periode ab der Mitte des 20. Jahrhunderts. Schon zu Anbeginn der Menschheit wurden Schallemissionen beim Brechen von Steinen, Brechen von Knochen oder beim Knistern von Holz im Feuer wahrgenommen. Auch Erdbeben und Gebirgsschläge sind Quellen für Schallemissionen. Die dabei entstehenden elastischen Wellen unterscheiden sich von oben genannten AE-Signalen vor allem durch niedrigere Frequenzen und größere Amplituden [14].
Die vermutlich erste handwerkliche Anwendung von Schallemissionen zur Qualitäts-

kontrolle wurde von Töpfern eingesetzt. Um die Qualität von Tongefäßen zu beurteilen wird bei der Töpferei traditionell beim Abkühlen im Ofen auf hörbares Knacken geachtet. Diese AE wurden als Hinweise auf Defekte und strukturelle Schwachstellen in der Keramik gedeutet[28]. Die erste dokumentierte Beobachtung von AE bei Metallen werden dem im achten Jahrhundert lebenden arabischen Alchemisten Dschābir ibn Ḥayyān zugeschrieben. In seinem Buch *Summa Perfectionis Magistterii* [2] schreibt er von Zinn (Jupiter) und Eisen (Mars), die beim Schmieden grelle und raue Geräusche erzeugen. Der Begriff *Zinngeschrei* wurde dadurch geprägt. Später wurde diese Eigenschaft von Chemikern auch bei der Bearbeitung von Cadmium und Zink festgestellt [28].

Am Anfang des 20. Jahrhunderts wurden Metalle sowie deren Aufbau und Zusammensetzung intensiver erforscht und die Metallurgie wurde zu einer eigenständigen Wissenschaftsdisziplin. Als Grund für das Phänomen des Zinngeschreis gab erstmals 1916 J. Czochralski [7] die Reibung von Kristallen aneinander an. Unabhängig davon berichteten 1923 A. Portevi und F. Le Chatelier [34] von scharfen hochfrequenten Geräuschen bei der Verformung von Aluminium-Kupfer-Magnesium Legierungen. Bei Scherverformung von Steinsalzkristallen und Zink-Einkristallen entdeckten 1928 P. Ehrenfest und A. Joffe [15] ebenfalls Geräusche, die dem Ticken einer Uhr ähnlich sind.

Die ersten dokumentierten Versuche AE mit Messtechnik zu erfassen, stammen von F. Kishinoue [20] von der Universität Tokio (1933) und unabhängig davon 1936 von den Deutschen F. Förster und E. Scheil [11]. Kishinoue untersuchte Holzproben unter Biegebeanspruchung und entwarf einen Messaufbau zur Aufnahme der dabei entstehenden Geräusche. Ursprünglich wollte er mit diesen Versuchen jene elastische Wellen studieren, die bei Erdbeben auftreten. Mit einem Oszillographen konnte er als Erster neben den akustischen Knackgeräuschen auch nicht hörbare Schwingungen (AE) aufzeichnen. Förster und Scheil gelang es die AE-Signale, die bei der Bildung von Martensit in einem Draht aus Nickelstahl entstanden, aufzunehmen. Dies gelang ihnen mit einem selbstgebauten elektrodynamischen Sender/Empfänger-System, das die mechanischen Vibrationen in eine elektrische Spannung umwandelte [28].

Als Startpunkt für die technologische AE-Analyse werden meist die Arbeiten von J. Kaiser an der technischen Hochschule München genannt. Seine im Jahr 1950 publizierte Doktorarbeit [16] gilt als erste umfassende Untersuchung zu AE-Phänomenen. Kaiser untersuchte verschiedene Materialien im Zugversuch und detektierte die dabei entstehenden AE-Signale. Er verglich dabei die verschiedenen Probematerialien bezüglich ihrer AE-Signale und deren Frequenzen. Er konnte zeigen, dass bei Metallen die meisten AE-Signale im Bereich der Streckgrenze auftreten. Seine wichtigste Ende-

ckung aber war, dass bei einem bereits vorher belasteten Material erst dann wieder AE-Signale emittiert werden, wenn das vorherige Beanspruchungsniveau überschritten wird. Diese Irreversibilität des AE-Verhaltens von Materialien wird heute als *Kaiser-Effekt* bezeichnet. Für die Werkstoffprüfung ist dieser Effekt von großer Bedeutung, da damit eine Abschätzung der Höhe der bisherigen Belastung ermöglicht wird. Obwohl der Kaiser-Effekt bei metallischen Werkstoffen meist auftritt, kann dies für andere Materialien nicht verallgemeinert werden. Bei faserverstärkten Kunststoffen oder Beton werden beispielsweise oft AE-Signale bei einer kleineren Belastung als der vorherigen Maximalbelastung beobachtet. In der Literatur wird diese Abweichung vom Kaiser-Effekt mit dem *Felicity-Verhältnis* angegeben. Es entspricht dem Verhältnis zwischen der Last, bei der AE-Signale in einer Wiederbeanspruchungsphase auftreten und der zuvor angelegten Maximallast (der Kaiser-Effekt kann als Spezialfall mit einem Felicity-Verhältnis von 1 aufgefasst werden) [28].

3.2. AE-Quellen in verschiedenen Materialien

AE-Signalen können sehr unterschiedliche Erzeugungsmechanismen zu Grunde liegen. In Metallen konnten Risswachstum, Bewegung von Versetzungen, Reibung an Korngrenzen sowie Bruch und Dekohäsion an den Grenzen von Einschlüssen als AE-Quellen identifiziert werden. In Verbundwerkstoffen kann das Aufbrechen der Matrix und das Ablösen oder der Bruch von Fasern für AE-Emissionen verantwortlich sein. Typischerweise treten diese Mechanismen als Reaktion des Materials auf Belastung auf. Im Gegensatz zu den oben genannten klassischen AE-Quellen unterscheidet man so genannte *sekundäre Quellen*, die z. B. Reibung (bei beweglichen Teilen), Lecks und Kavitation sein können. Auch die Neuausrichtung von magnetischen Domänen, Verflüssigung oder Verfestigung von Material sowie strukturelle Phasenübergänge zwischen verschiedenen Kristallstrukturen können Quellen von AE-Signalen sein. Die Ursachen für die Entstehung von AE-Quellen und somit AE-Signalen sind chemische, mechanische oder thermische Veränderungen des Materials [31], [28].

3.3. Anwendungsbereiche der AE-Technik

Neben der Untersuchung von AE-Signalen mit dem Ziel mehr über die Mechanismen und die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse zu erfahren, hat sich die

AE-Analyse vor allem als zerstörungsfreie Prüfmethode für Werkstoffe etabliert. Die Schallemissionsanalyse findet in vielen Bereichen eine Anwendung [44]:

- Zerstörungsfreie Prüfung von mechanisch stark belasteten Komponenten oder Strukturen aus Materialien wie Metall (Tanks, Druckbehälter, Reaktoren, usw.) oder Kunststoffen und Verbundwerkstoffen (für Luft- und Raumfahrt)
- Materialforschung (Ermittlung von Materialeigenschaften, Versagensmechanismen, Schädigungsverhalten, usw.)
- Qualitätsprüfung (Schweißüberwachung, Aushärtungsprozesse, Trocknung von Holz, usw.)
- Leckageprüfung von Tanks und Rohrleitungen
- Geologische und mikroseismische Forschung
- Langzeitüberwachung von Gebäuden und Brücken
- Ortung von Schäden (z. B. Risse in einem Druckbehälter)
- usw.

Die erfolgreiche Anwendung der Schallemissionsanalyse als Diagnosewerkzeug in der Materialprüfung ist nur dann möglich, wenn ein qualitativer oder quantitativer Zusammenhang zwischen den detektierten AE-Signalen und dem Materialzustand bzw. den zu erkennenden Schädigungsmechanismen besteht.

3.4. Analyse von AE-Signalen

Die Analyse von Wellenformen erlaubt es, Informationen über die Art der verursachenden AE-Quellen zu gewinnen. In der AE-Literatur wird eine Unterscheidung zwischen *qualitativer* und *quantitativer* Analyse gemacht. Für eine quantitative Analyse ist es notwendig das gesamte AE-Signal in digitaler Form zu speichern, wogegen es bei der qualitativen Analyse reicht, einige charakteristische Parameter aus dem Signal zu berechnen und diese zu speichern. Während in den frühen Anwendungen der AE-Messung Wellenformen nicht aufgezeichnet werden konnten, ist es heute aufgrund der Entwicklung von schneller, digitaler Signalverarbeitung möglich, die gesamte Wellenform eines AE-Signals zu speichern und zu analysieren. Aus der Kenntnis der Wellenform können exakte Aussagen über eine Stichprobe abgeleitet werden, während es für statistische Aussagen über die Gesamtheit der aufgezeichneten Signale sinnvoll ist, AE-Parameter

zu verwenden. Die statistische Verteilung und Entwicklung dieser AE-Parameter kann analysiert werden und mit mechanischen oder thermischen Belastungen während der Versuchsdauer verglichen werden [28].

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von AE-Signalen: *transiente* und *kontinuierliche*. Transiente Signale, auch *Bursts* genannt, sind zeitlich beschränkt und heben sich deutlich vom Grundrauschen ab. Jedes transiente AE-Signal entspricht im Idealfall einem individuellen physikalischen Ereignis im Material, wie z. B. Rissbildung oder Materialbruch. Im Gegensatz dazu versteht man unter einem kontinuierlichen Signal, ein Signal das zeitlich nicht begrenzt ist. Grund für das Auftreten von kontinuierlichen Signalen können neben einer kontinuierlich emittierenden AE-Quelle auch mehrere AE-Quellen sein, deren Signale sich überlagern. Bei kontinuierlich emittierenden Schallquellen handelt es sich meist um Störgeräusche der Umgebung, wie z. B. laufende Pumpen oder elektrisches Rauschen des Verstärkers. Die Abbildung[2] 3.1 zeigt Beispiele für die beiden möglichen Signalformen [44].

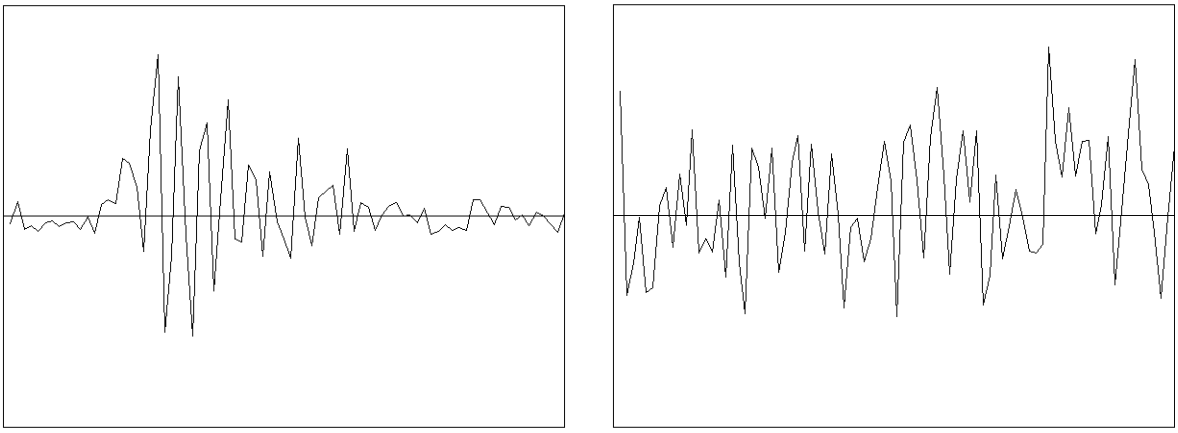


Abbildung 3.1.: Beispiele für mögliche Signalformen
links: transientes Signal
rechts: kontinuierliches Signal

3.4.1. Charakterisierung von Signalen durch AE-Parameter

Bei einer AE-Analyse hat man es selten mit wenigen AE-Signalen zu tun. Meistens stützt sich eine Analyse auf mehrere tausend AE-Signale. Eine sinnvolle Wahl von AE-Parametern soll es ermöglichen, interessante, von gesuchten AE-Quellen erzeugte Si-

[2]Zur Erstellung aller Diagramme wurde *Gnuplot 4.6.0* verwendet, online: `www.gnuplot.info`

gnale von Signalen anderer Quellen sowie Störsignalen zu unterscheiden. AE-Parameter lassen sich sinnvollerweise nur für transiente AE-Signale bestimmen. Die verbreitetsten AE-Parameter und ihre Interpretation sind in Abbildung 3.2 grafisch dargestellt [14].

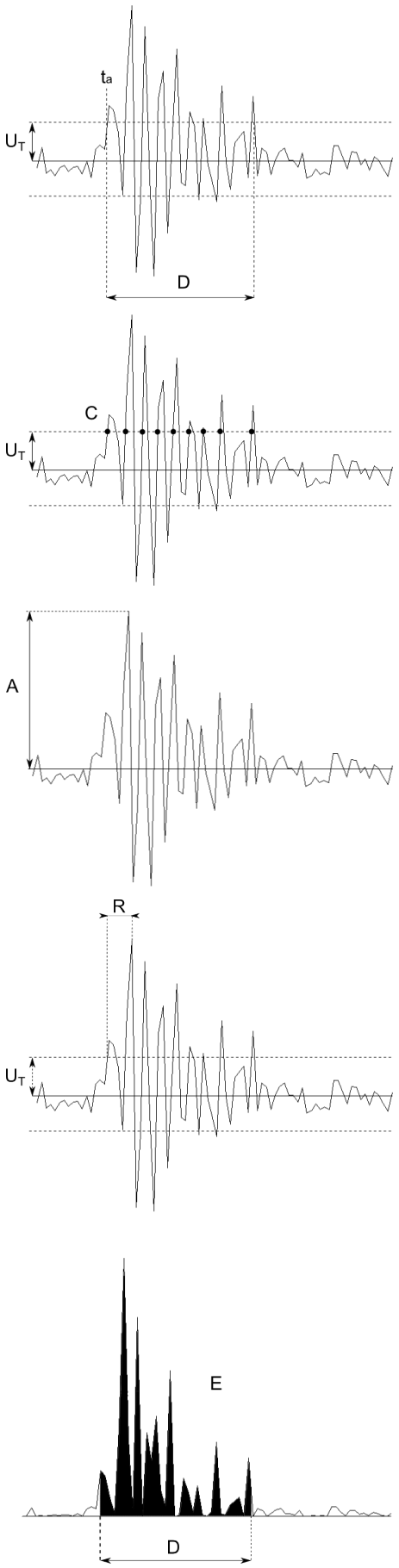
Die Aufnahme eines AE-Signals wird gestartet sobald ein Triggerkriterium erfüllt wird. Als Triggerung wird meistens das Überschreiten eines Schwellwertes für die Signalamplitude gewählt. Der Schwellenwert U_T (*Threshold*-Spannung) beeinflusst die Anzahl der erfassten AE-Signale. Wird die Schwelle zu hoch angesetzt, so werden die gesuchten AE-Signale eventuell nicht aufgenommen. Bei zu niedrigem Schwellenwert besteht die Gefahr, dass auch Störsignale oder Spitzen im Hintergrundrauschen als transiente AE-Signale interpretiert werden. Der Zeitpunkt der ersten Schwellenüberschreitung wird als Ankunftszeitpunkt t_a bezeichnet. Die *Signaldauer* D ist mit der Zeitspanne zwischen erster und letzter Schwellenüberschreitung definiert. Die Schwellwertüberschreitungen (in einer Polarität) innerhalb der Signaldauer werden addiert und als *Counts* C gezählt. Aus dem Verhältnis der Größen C und D kann die Frequenz f des Signals grob abgeschätzt werden. Ein weiterer aussagekräftiger AE-Parameter ist die maximale *Amplitude* A. Die Zeitspanne zwischen der ersten Schwellenüberschreitung t_a und dem Zeitpunkt der Maximalamplitude A wird als Anstiegszeit R (*rise time*) bezeichnet. Durch Integration des quadrierten Amplitudenverlaufes $U^2(t)$ über die Signaldauer lässt sich die Energie E eines AE-Signals bestimmen:

$$E = \int_D U^2(t)\, dt \tag{3.1}$$

Da die aufgezeichnete Energie (3.1) nur einen Bruchteil der tatsächlich emittierten Energie darstellt und weder Einflüsse der Ausbreitung des Signals noch der Übertragungsfunktion des Messsystems berücksichtigt werden stellt der Energiewert E nur eine relative Größe dar.

3.4.2. Wellenformanalyse

Die digitale Speicherung der gesamten Wellenform (quantitative Analyse) ermöglicht eine genauere Analyse von AE-Signalen. Unter der Annahme, dass bestimmte AE-Quellen charakteristische Signalformen zur Folge haben, lassen sich durch Vergleich der Zeitverläufe der AE-Signale möglicherweise deren Quellen identifizieren. Neben der einfachen visuellen Bewertung der Zeitverläufe, können auch noch weitere aussagekräf-



Signaldauer D [ms]

Counts C [-]

Amplitude A [mV],[dB]

Anstiegszeit R [ms]

Energie E [V^2 s]

Abbildung 3.2.: AE-Parameter

tige AE-Parameter aus dem Signalverlauf extrahiert werden. Von besonderem Interesse sind die im Signal auftretenden Frequenzen. Um die Frequenzen eines AE-Signals zu ermitteln ist es notwendig aus dem Zeitsignal das Frequenzspektrum zu berechnen. Da die Zeitsignale als diskrete Amplitudenwerte vorliegen, ist zu diesem Zweck die Anwendung einer *schnellen Fouriertransformation* naheliegend. Die Fouriertransformation und deren Anwendung im Programm *AE Graphics 3.5* wird im Kapitel 6 genauer behandelt.

3.5. Messtechnik in der AE-Analytik

Ziel einer AE-Messung ist es Schallemissionen, die im Inneren einer belasteten Probe entstehen mit einem Sensor an der Probenoberfläche aufzunehmen, zu verarbeiten und zu speichern. Die qualitative und quantitative Analyse der aufgenommenen Daten erlaubt möglicherweise Rückschlüsse auf die Ursache der Schallemission. AE-Messsysteme können je nach Anwendungsbereich sehr unterschiedlicher Art und Größe sein; sie reichen von kleinen portablen Geräten bis hin zu großen Mehrkanal-Systemen. Die Grundkomponenten eines AE-Messsystems sind allerdings meist identisch. In Abbildung 3.3 sind die typischen Elemente einer AE-Messkette dargestellt. Die Messung beginnt beim Sensor, der die auf der Oberfläche auftreffenden Körperwellen in ein elektrisches Signal umwandelt. Das vorverstärkte Signal gelangt anschließend in das Erfassungsgerät (eingerahmte Box in Abbildung 3.3). Dort erfolgt eine weitere Verstärkung und Filterung der Signale. Anschließend werden die Signale digitalisiert und können gespeichert werden. Frühere Messgeräte beschränkten sich hier auf die Speicherung einiger extrahierter AE-Parameter, während es mit heutigen Datenverarbeitungsgeräten möglich ist, die gesamte Wellenform praktisch in Echtzeit zu speichern. Die gewonnenen Daten stehen für eine Analyse und Interpretation zur Verfügung. In folgenden Abschnitten wird auf die wichtigsten Komponenten der AE-Messkette genauer eingegangen.

3.5.1. Sensoren

Der Sensor hat die Aufgabe die an der Oberfläche ankommenden akustischen Wellen in ein dazu proportionales Spannungssignal zu wandeln. Die Frequenzen der interessanten AE-Signale sind typischerweise im Bereich von 100 kHz bis 300 kHz und liegen somit im Ultraschallbereich [28]. Für die AE-Analyse haben sich vor allem piezoelektrische

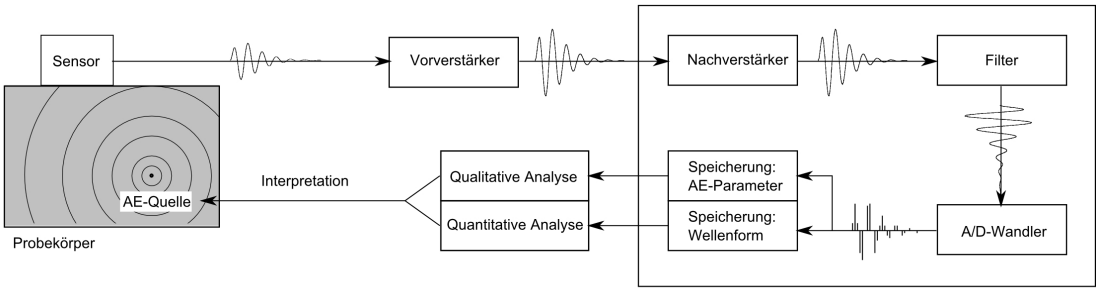


Abbildung 3.3.: Schema der AE-Messkette (eigene Abbildung nach [23])

Sensoren bewährt. Die Vorteile von piezoelektrischen Sensoren gegenüber anderen Sensorprinzipien sind [29]:

- hohe Dynamik (160 dB)
- keine beweglichen Teile
- großer Frequenzbereich und große Empfindlichkeit
- kleine, leichte Bauformen möglich
- in allen drei Raumrichtungen montierbar
- hohe Stabilität der Eigenschaften

Physikalische Grundlage für piezoelektrische Sensoren ist der Piezoeffekt: Wird auf ein piezoelektrisches Material wie z. B. Quarz eine Kraft ausgeübt, so wird dessen Kristallgitter elastisch verformt. Diese Verformung hat eine Änderung der elektrischen Polarisation zur Folge, die als elektrische Spannung abgegriffen werden kann.[8]
Diese Spannung ist in weiten Grenzen proportional zu der angelegten Kraft bzw. zum Druck. Das vom Sensor aufgezeichnete Spannungssignal entspricht dem über die Sensorfläche gemittelten Oberflächenschalldruck. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Abmessung des Piezoelements, die Massenverhältnisse im Sensor und die Anregungsfrequenz das Messergebnis verzerren. Die frequenzabhängige Empfindlichkeit des Sensors wird mit seiner Übertragungscharakteristik erfasst. Die Abmessung von handelsüblichen Sensoren liegen im Bereich von einigen Millimetern bis zu einigen Zentimetern. Piezoelektrische Sensoren können eine sehr hohe Empfindlichkeit (1 V/nm) haben. Da sich Signale in der Größenordnung von µV bereits vom elektrischen Rauschen abheben, sind Bewegungsamplituden, die einem Bruchteil eines Atomradius entsprechen, bereits detektierbar [44].

Für die Qualität der Messung spielt die akustische Ankopplung des Sensors an die Oberfläche des Prüfobjektes eine wesentliche Rolle. Meist werden Koppelmittel wie Silikonfett, Öl oder Kleber verwendet um einen guten akustischen Kontakt herzustellen. Für die Befestigung von AE-Sensoren verwendet man neben Kleber auch elastische Bänder, Klebebänder, Klammern oder Magnethalter (bei magnetischen Materialien) [44].

3.5.2. Vorverstärker

Der Vorverstärker hat die Aufgabe das Ausgangssignal des Sensors so weit anzuheben, dass es von der Erfassungseinheit registriert werden kann. Da das schwache Sensorsignal besonders leicht durch äußere elektromagnetische Störeinflüsse beeinflusst werden kann, ist es wichtig, die Länge des Verbindungskabels zwischen Sensor und Vorverstärker möglichst kurz zu halten. Naheliegend ist deshalb auch die Verwendung von Sensoren mit integriertem Vorverstärker. Auch der Vorverstärker ist einer Frequenzabhängigkeit unterworfen. Um Signalverzerrungen zu vermeiden, sollte der Vorverstärker idealerweise eine konstante Verstärkung über einen möglichst breiten Frequenzbereich haben [44].

3.5.3. Frequenzfilter

Der Vorverstärker wird üblicherweise durch ein abgeschirmtes Koaxialkabel mit dem Erfassungsgerät verbunden. Hier wird der Signalpegel durch Verstärkung weiter erhöht. Frequenzfilter sollten anschließend den Frequenzbereich so einschränken, dass niederfrequente Störungen ausgeblendet werden. Auch zu hohe Frequenzanteile sollten im Hinblick auf die Digitalisierung (siehe Abschnitt 6.1.1: *Aliasing-Effekt*) gefiltert werden. Auch hier kann der Einfluss eines Filters auf das AE-Signal mit der Übertragungscharakteristik des Filters beschrieben werden [23].

3.5.4. Digitalisierung und Speicherung

Die Digitalisierung erfolgt in zwei Teilprozessen. Im ersten Teil wird das analoge, verstärkte und gefilterte Spannungssignal in diskreten Zeitschritten abgetastet. Die Größe der Zeitschritte Δt ist durch die Abtastfrequenz $f_s = 1/\Delta t$ bestimmt. Im zweiten Schritt wird die Signalamplitude für jeden Zeitschritt auf einen ganzzahligen Wert

gerundet, der ein Vielfaches einer kleinsten Einheit (Auflösung) ist. Die Digitalisierung erfolgt durch den Analog-Digital-Wandler. Ein 12-Bit A/D-Wandler ist in der Lage $2^{12} = 4096$ Amplituden-Zahlenwerte abzubilden. In diesem Fall liegt der maximal/minimal darstellbare Amplitudenwert bei dem ± 2047-fachen der Amplitudenauflösung. Der Vorverstärker soll so gewählt werden, dass die Signalamplitude deutlich über der Auflösung, aber unter dem maximal digitalisierbaren Wert liegt. Da für die AE-Analyse nur bestimmte transiente Signale von Interesse sind, ist eine kontinuierliche Aufzeichnung über die gesamte Messzeit nicht sinnvoll. Die zeitweise Aufzeichnung von AE-Signalen wird über ein Triggerkriterium festgelegt. Diese Signale können anschließend in Form von extrahierten AE-Parametern oder als gesamte Wellenform abgespeichert werden [23].

3.5.5. Analyse und Interpretation

Da man es bei AE-Messungen nicht selten mit mehreren Tausend AE-Signalen zu tun hat, bietet sich eine statistische softwaretechnische Analyse der AE-Signale an. Grundlage dazu können die extrahierten AE-Parameter oder die gesamten Wellenfronten sein. Das Ziel der Analyse kann neben der Ermittlung des Schädigungsausmaßes des beanspruchten Materials auch der Rückschluss auf physikalische Prozesse sein, die zu Schädigung und AE-Emission im Material führen.
Das in dieser Arbeit beschriebene Programm *AE-Graphics 3.5* dient zur statistischen Analyse und Klassifikation von AE-Signalen anhand ihrer AE-Parameter. AE-Graphics ist speziell auf die Erfordernisse der AE-Untersuchungen von Gesteinsproben unter dem Einfluss von Temperaturschwankungen zugeschnitten, wie sie am Institut für Hochbau und Technologie der TU Wien im Zuge des Forschungsprojektes *Umwelteinflüsse auf die Schädigung und Zerstörung des Gefüges an Gesteinen* [41] durchgeführt wurden.

4. Schädigung von Marmor durch Umwelteinflüsse

Marmor wird seit mehreren Jahrtausenden abgebaut und als Material für Bauwerke oder Kunstgegenstände verwendet. Ist ein Marmorobjekt der Witterung im Freien ausgesetzt, wie es bei Statuen oder Fassaden aus Marmor oft der Fall ist, so treten abhängig vom Marmortyp Materialschäden auf. Die Schäden reichen von oberflächlicher Erosion, Krusten- und Rissbildung bis zu Verformung und Bruch. Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Beständigkeit von Marmor sind [24]:

- **Werkstoffeinflüsse:** Gefüge, Kristallinität, Textur, thermisches Ausdehnungsverhalten, Wärmeleitfähigkeit, usw.
- **physikalische Einflüsse:** Klima, Mikroklima, Luftfeuchte, Temperaturschwankungen, usw.
- **chemische Einflüsse:** chemische Zusammensetzung der Umgebungsluft (Abgase, Aerosole), im Regen- und Bodenwasser gelöste Stoffe, pH-Wert, usw.
- **biologische Einflüsse:** Vorhandensein und Art von Keimen verschiedenster Mikroorganismen und anderer Lebewesen (Ausscheidung von Stoffwechselprodukten, Aufnahme von mineralischen Stoffen aus dem Marmor), usw.

4.1. Methoden zur Ermittlung von Schäden im Gefüge von Marmor

Zur Ermittlung von Schäden, bzw. des Schadensausmaßes in einer Gesteinsprobe haben sich einige Untersuchungsmethoden etabliert:

- **Dünnschliffe:** Zur Ermittlung von optischen Veränderungen im Gefüge können Dünnschliffe der Marmorproben hergestellt werden. Diese lassen sich beispiels-

weise mit einem Polarisationsmikroskop oder Rasterelektronenmikroskop näher untersuchen [4].

- **Laufzeitmessungen:** Bei dieser Methode wird mit einem Sender ein Ultraschallsignal durch die Probe geleitet, das von einem Empfänger detektiert wird. Die Messung der Distanz zwischen Sender und Empfänger und die vom Signal dafür benötigte Zeit erlauben die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in der Probe. Da die longitudinale Schallgeschwindigkeit der Welle durch die Porosität der Probe stark beeinflusst wird, können mit dieser Methode Rückschlüsse auf die Aufweitung des Porenraumes und somit der Schädigung der Probe gezogen werden [39]. Neben der Porosität kann die Messung auch der Ermittlung des E-Moduls dienen (siehe Abschnitt 2.3.1).

- **Quecksilberporosimetrie:** Diese Methode erlaubt neben der Ermittlung der inneren Oberfläche und des Gesamtporenvolumen auch die Abschätzung der Porengrößenverteilung. Grundlage für diese Messmethode ist das Kapillargesetz. Es besagt, dass nicht benetzbare Flüssigkeiten wie Quecksilber nur unter Anwendung von Druck in Kapillarräume bzw. Poren eindringen können. Der aufzubringende Druck ist dabei umgekehrt proportional zum Porendurchmesser. Wird Quecksilber in die Poren der Probe gedrückt, werden zuerst die großen und bei höheren Drücken die kleineren Poren gefüllt. Die Messung der eingepressten Menge bei zunehmendem äußeren Druck erlaubt die Bestimmung der gesuchten Größen. Die Quecksilberporosimetrie ist ein weit verbreitetes und genormtes Analyseverfahren in der Materialforschung, das auch bei Marmor Anwendung findet [39] [21].

- **Dilatatometer und Dehnmessstreifen:** Diese Messgeräte können verwendet werden, um den Wärmeausdehnungskoeffizienten einer Probe zu bestimmten. Dazu wird die Probe einer veränderlichen Temperatur ausgesetzt und dabei mit einem Dilatometer oder mit Dehnmessstreifen die Längenänderung der Probe gemessen. Eine weitere interessante Größe ist die irreversible Restdehnung der Probe, die als Anzeichen einer Schädigung gedeutet werden kann [42].

Neben den oben aufgezählten Methoden existieren noch viele andere Verfahren, mit denen weitere physikalische Kenngrößen (Biegefestigkeit, Härte, Wasseraufnahme, Wasserdampfdiffusionswiderstand, usw.) ermittelt werden, die als Maß für eine Schädigung der Probe dienen können.

4.2. Wölbung von Marmorplatten als Folge der Verwitterung

Die Verformung von Marmorplatten wurde bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts anhand von alten Grabsteinen untersucht [19]. Auch bei historischen und modernen Gebäuden wurde und wird Marmor in Form dünnwandiger, großflächiger Fassadenverkleidung eingesetzt. Neben gestalterischen Gründen sollen die Platten auch als Schutz gegen Einflüsse der Verwitterung dienen. Während viele Marmorfassadenplatten eine befriedigende Beständigkeit aufweisen, gibt es auch zahlreiche Gebäude, bei denen Schäden zu aufwendigen Sanierungsmaßnahmen, oder zu einem teuren Austausch der ganzen Fassade geführt haben. Bekannte europäische Beispiele dafür sind der *Grande Arche de la Fraternité* [1] in Puteaux, die *Finlandia-talo* [37] in Helsinki, oder die *Otto-Wagner-Kirche* [12] in Wien. Die Haupteinflussfaktoren, die eine Verformung von Marmorplatten begünstigen sind die Feuchtigkeit, der jahreszeitliche Temperaturwechsel, sowie die Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht. Als Hauptgrund für die tatsächliche Schädigung des Gefüges und somit auch Verformung der Marmorplatten, werden von vielen Autoren die thermische Anisotropie der Minerale Calzit und Dolomit im Marmor verantwortlich gemacht [42] [39] [18].
Der typische Schadensprozess von *Carrara*-Marmor unter mitteleuropäischen Klimabedingungen lässt sich in drei Phasen einteilen. Ausgangspunkt stellt der Marmor im Urzustand dar. Da Marmor in Qualität und Homogenität stark variiert und man bei historischen Objekten den Urzustand nur abschätzen kann, ist man auf eine sehr allgemeine Charakterisierung dieses Zustandes angewiesen: *Carrara*-Marmor besteht fast ausschließlich aus chemisch reinen Calzitkristallen mit Kristallgrößen zwischen 0,05 mm und 0,10 mm, die durch Kohäsion nahezu porenfrei untereinander verbunden sind [18].

Phase 1: Die erste Phase beschreibt die Änderung des Urzustandes, die bereits beim Abbau im Steinbruch beginnt. Durch Druckentlastung und durch das plötzliche Einwirken der schwankenden Außentemperatur auf den frisch gebrochenen Stein entstehen Spannungen zwischen den einzelnen Kristallen, sodass es zu zunehmender Dekohäsionen und zur Entstehung eines Submikroporensystem (Porendurchmesser <4 nm) kommt. Wassermoleküle können nur langsam in das Porensystem eindringen [18].
Phase 2: Die zweite Phase ist durch Vergrößerung von Poren und der Bildung neuer Poren gekennzeichnet. Da sich in den kleineren Poren noch keine Eiskristalle bilden können, ist nur mit einem sehr geringen Anteil an Frostsprengungen zu rechen. In

dieser Phase sind primär thermische Spannungen für das Fortschreiten der Schäden verantwortlich. Die Geschwindigkeit der Zustandsverschlechterung des Marmors ist hauptsächlich durch die Größe und der Zahl der auf den Stein einwirkenden Temperaturschwankungen gegeben [18].
Diese Temperaturveränderungen ergeben sich durch die Schwankung der Außenlufttemperatur und durch die zeitlich stark variierenden Sonneneinstrahlung. Somit spielt, im Fall von Fassadenplatten, neben dem Gebäudestandort auch die Ausrichtung der Fassade eine wesentliche Rolle [42].
Phase 3: In der dritten Phase sind Gefriersprengprozesse bestimmend für die weitere Schädigung des Marmors. Voraussetzung für das Auftreten dieser Phase sind niedrige Temperaturen und eine hohe lokale Luftfeuchtigkeit. In den Makroporen kann Eisbildung stattfinden, was zur Folge hat, dass weiteres flüssiges Wasser, welches aus dem Submikroporensystem diffundiert, sich an den Eiskristallen in den Makroporen anlagern kann. Die Eiskristalle vergrößern sich und drücken auf die Porenwände, sodass das Makroporensystem sich weiter vergrößert. Gleichzeitig kontrahieren die Mikroporen durch den Wasserentzug. Durch die gegenläufigen Prozesse kommt es zu erheblichen Spannungen im Material welche die Poren weiter vergrößern. Risse entstehen, die ein weiteres Eindringen von Wasser begünstigen. Das Ende dieser Phase ist durch eine extreme Beschleunigung des Gesamtschadensprozesses gekennzeichnet [18].

Durch die oben beschriebenen Mechanismen kommt es in den Marmorplatten zu einer irreversiblen Dilatation. Bei Vorhandensein von Wasser in den Poren, kann es bei jedem weiteren Temperaturwechsel zu einer zusätzlichen Dilatation kommen. Ist die Marmorplatte nur einseitig feucht (z. B. an der Außenseite der Fassadenplatte), so laufen die Dilatationsprozesse im Plattenquerschnitt unterschiedlich ab. Die verschiedenen Dilatationswerte führen zu einem Verlust der Formbeständigkeit und einer Wölbung der Platte [42].

5. AE-Messungen an Marmorproben an der TU Wien

In Zusammenarbeit mit einigen Steinmetzbetrieben wurde im Jahr 2009 von E. Tschegg am Institut für Hochbau und Technologie ein dreijähriges Forschungsprojekt mit dem Titel *Umwelteinflüsse auf die Schädigung und Zerstörung des Gefüges an Gesteinen* [41] durchgeführt. Im Zuge dieses Projektes wurden verschiedene Marmore und andere Gesteinsproben in frischem und verwittertem Zustand einem zyklischen Temperaturverlauf ausgesetzt. Erstmals wurde zur Echtzeiterfassung der dabei entstehenden Schäden AE-Analytik angewendet. Ziel des Projektes war neben der Untersuchung der schädigenden physikalischen Vorgänge die Etablierung der AE-Technik als methodische Ergänzung zu den herkömmlichen Untersuchungsmethoden (siehe Abschnitt 4.1). Erste Ergebnisse sind unter anderem in [43] und [13] dokumentiert.

Als AE-Messsystem wurde *AMSY-5 (**A**coustic Emission **M**easurement **SY**stem)* zusammen mit der Datenerfassungs- und Analysesoftware *Vallen AE-Suite* der *Vallen Systeme GmbH* verwendet. Um das Bedürfnis nach einer weiteren Analyse und Filterung der aufgezeichneten AE-Signale zu erfüllen, wurde die in dieser Arbeit vorgestellte Software *AE-Graphics 3.5* entwickelt.

5.1. Experimenteller Aufbau

Im diesem Abschnitt wird der experimentelle Versuchsaufbau, der bei der AE-Analyse der Natursteinproben verwendet wurde, kurz beschrieben. Die bei den Messungen aufgezeichneten Daten bilden das Ausgangsmaterial für die weitere Analyse der AE-Signale mit *AE-Graphics 3.5*. Für eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus sei auf [43] verwiesen.

5.1.1. AE-Messsystem

Als AE-Erfassungssystem wurde *AMSY-5 M6* der *Vallen System GmbH* verwendet. *AMSY-5 M6* ist ein digitales Multi-Kanal Messsystem, das es erlaubt parallel sechs Messkanäle (M6) zu erfassen. Es umfasst alle notwendigen Elemente der Messkette vom Vorverstärker bis zur Speicherung und Analyse der AE-Signale an einem PC (siehe Kapitel 3.5). Als AE-Sensoren wurden piezoelektrische Sensoren vom Typ *VS900-M* von *Vallen* verwendet. Eine ausführlichere Beschreibung des verwendeten Messsystems ist in Anhang C zu finden.

5.1.2. Zyklische Heizung und Abkühlung der Proben

Ziel des Versuchsaufbaues war es, die Proben einem 24 Stunden-Temperaturzyklus auszusetzen und die dabei entstehenden AE-Signale zu messen. Das Messsystem *AMSY-5* erlaubte es, die Signale von sechs Proben gleichzeitig zu erfassen. Die Proben wurden mit darauf befestigten AE-Sensoren in ein Dewargefäß gegeben (siehe Abbildung 5.1). Mittels eines grafischen *LabVIEW*-Programms wurde die Temperatur im Dewargefäß geregelt. Die Heizung wurde von zwei 80 W-Glühbirnen bewerkstelligt, welche am Boden des Dewargefäß befestigt waren. Ein Ventilator sorgte für die gleichmäßige Temperaturverteilung. Eine Kühlung unter Raumtemperatur wurde durch flüssigen Stickstoff ermöglicht, der durch Kupferröhren in die Wand des Dewargefäßes geleitet werden konnte. Es wurde ein näherungsweise sinusförmiger Temperaturverlauf geregelt, der mit einer Abkühlung von Raumtemperatur auf $-20\,°C$ begann. Anschließend wurde auf einen Spitzenwert von $60\,°C$ aufgeheizt und wieder abgekühlt. Die Temperaturänderung wurde so geregelt, dass innerhalb von 24 Stunden dieser Zyklus einmal durchlaufen wird. Die Messungen erstreckten sich über eine Gesamtdauer von mehreren Tagen.

Bei den untersuchten Probekörpern handelte es sich um $3 \times 3 \times 2\,cm$ große Quader (siehe Abbildung 5.2), die mit einer Diamantsäge aus den Marmorplatten geschnitten wurden.

5.2. Das Probematerial und seine Herkunft

Neben zahlreichen anderen Natursteinen wurde auch Proben aus *Carrara*-Marmor untersucht. *Carrara*-Marmor ist von besonderem Interesse, da er oft in Plattenform an

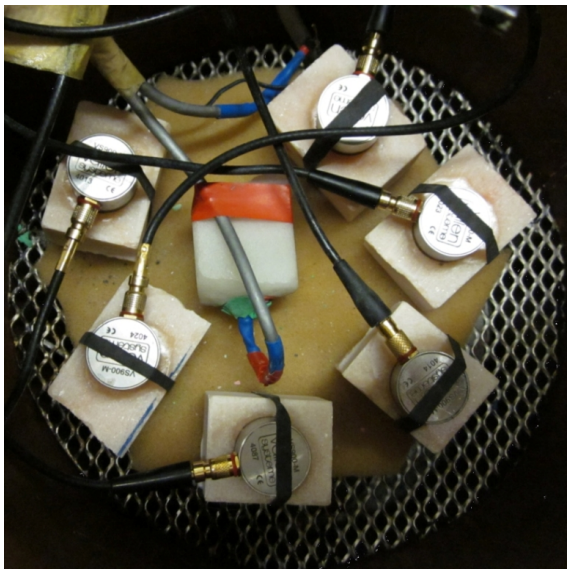


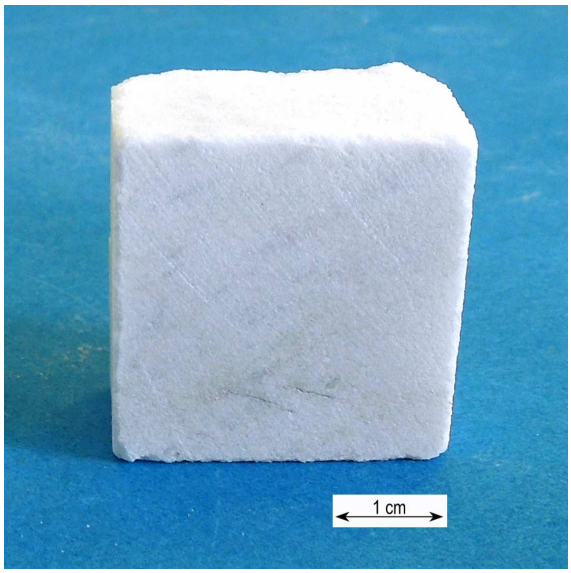
Abbildung 5.1.: Versuchsaufbau zu den AE-Messungen
links: das verwendete Dewargefäß mit Stickstoffkühlung
rechts: Marmorproben mit AE-Sensoren im Inneren des Dewargefäßes

Fassaden von Gebäuden eingesetzt wird und bekannt ist, dass seine Formbeständigkeit große Abhängigkeit von der Witterung zeigt [42]. Im Zuge der Sanierung der Otto-Wagner-Kirche wurde deren beschädigte Fassadenplatten aus *Carrara*-Marmor erneuert. Dabei wurden aus den alten, verwitterten und den neuen Marmorplatten Proben geschnitten. Diese Proben, mit *Carrara-alt* und *Carrara-neu* bezeichnet, wurden ebenfalls den oben beschrieben Versuchsbedingungen ausgesetzt. In den folgenden Abschnitten wird näher auf das Probematerial und seine Herkunft eingegangen. In Kapitel 8 wird dann die Software *AE-Graphics 3.5* beispielhaft auf die Daten angewendet, die speziell von Messungen dieser beiden Proben stammen.

5.2.1. Carrara-Marmor

Eine wissenschaftliche Definition des Begriffes *Marmor* lautet:

> *"Marmore (engl. marbles) sind mittel- bis grobkörnige Metamorphite, die zu >90 Vol.-% aus Karbonaten, insbesondere aus Calcit und/oder Dolomit (Dolomit-Marmore), seltener aus Ankerit bestehen. Sie werden regional- oder kontaktmetamorph aus ziemlich reinen Karbonatgesteinen gebildet. Häufige Nebengemengteile sind Graphit oder Phlogopit."* [33, S. 336]



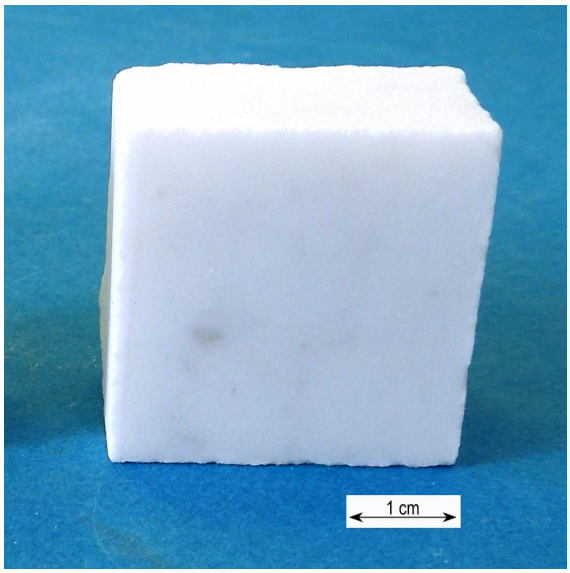


Abbildung 5.2.: Probekörper
links: verwitterte Probe *Carrara-alt*
rechts: unverwitterte Probe *Carrara-Neu*

Allerdings wird in der Praxis, insbesondere in der Bauwirtschaft, jedes polierfähige Karbonatgestein als Marmor bezeichnet. Echter oder kristalliner Marmor ist durch Umkristallisierung aus Kalkgestein hervorgegangen [36]. Er zeichnet sich dadurch aus, dass er kantendurchscheinend kristallin ist und keine Fossilien enthält (Marmore mit sichtbaren Fossilresten sind häufig noch Kalksteine). Echter Marmor besteht aus etwa gleich großen, miteinander verwachsenen polygonalen Kalkspatkristallen $CaCO_3$. Äußerlich ist echter Marmor durch das Glitzern der Kristallflächen bei einfallendem Licht zu erkennen (Zuckerkörnigkeit). Marmor, der nur aus Kalkspat besteht, ist weiß bis weißgrau. Verschiedene stoffliche Beimengungen im ursprünglichen Kalkstein können sich auf Farbe und Struktur des Marmors auswirken. Je nach Herkunftsgebiet unterscheiden sich die Zusammensetzung und damit auch die Farbschattierung (vgl. hierzu beispielsweise [32]).

Auf Grund seiner Eigenschaften, insbesondere der leichten Bearbeitbarkeit, des edlen Glanzes und der glatten Oberfläche, ist Marmor seit der Antike als Werkstoff sehr beliebt. Für viele bedeutsame Gebäude und Kunstwerke wurde Marmor verwendet. Heute werden Marmore gern für Fußböden, Treppenbeläge, Wandfliesen und Fassadenplatten im Außenbereich von Gebäuden verwendet [17]. Zu den bekanntesten Marmoren gehört der *Carrara*-Marmor. Unter Carrara-Marmor werden zahlreiche Marmor-Typen gehandelt, die aus Steinbrüchen um die italienische Stadt Carrara stammen. Der wahrschein-

lich bekannteste Marmor-Typ aus Carrara ist jener, der unter der Handelsbezeichnung *BIANCO CARRARA, Marmor, weiß, Carrara/Italien* bekannt ist [38].

5.2.2. Sanierung der Otto-Wagner-Kirche

In den Jahren 1904 bis 1907 wurde in Wien auf dem Areal der damaligen *Heilanstalt für Nerven- und Geisteskranke am Steinhof* eine Kirche errichtet. Sie wurde dem heiligen Leopold geweiht und ist unter dem Namen *Kirche am Steinhof* bekannt. Geplant wurde sie vom berühmten Jugendstil-Architekten Otto Wagner. Die Otto-Wagner-Kirche stellt ein Hauptwerk des Jugendstils dar und gilt als ein Wahrzeichen Wiens [45].

Abbildung 5.3.: Detailansicht der, mit dekorativen Kupfernägeln befestigten Carrara-Marmorplatten über dem Hauptportal der Otto-Wagner-Kirche

Im den Jahren 2000 bis 2006 wurde die Kirche generalsaniert [12]. Gemeinsam mit dem Bundesdenkmalamt wurden bei dieser Sanierung nahezu alle falschen Reparaturen und Restaurierungen der letzten hundert Jahre ausgebessert, mit dem Ziel den ursprünglichen Zustand der Kirche wiederherzustellen. Neben der Renovierung und Neuvergoldung der Kuppel, der Erneuerung des gesamten Fundamentes, sowie kleinerer Renovierungen im Innenbereich wurde auch die Fassade komplett erneuert. Die

Außenfassade der Kirche mit einer Gesamtfläche von 1800 m^2 bestand aus 2 cm starken Platten aus Carrara-Marmor. Diese Platten waren mit dekorativen Kupfernägeln in das Mauerwerk eingelassen. Auf Grund von Schäden an den Platten, insbesondere der im Laufe der Zeit aufgetretenen Verformung dieser, wurden sämtliche Platten ausgetauscht. Die 3000 neuen Marmorplatten aus BIANCO CARRARA wurden vor der Montage mittels Ultraschalluntersuchung auf ihre Qualität hin überprüft [3], [12].

Abbildung 5.4.: Gesamtansicht der sanierten Otto-Wagner-Kirche

6. Fouriertransformation (FT)

Die (kontinuierliche) Fouriertransformation (FT) ist eine mathematische Integraltransformation, die es erlaubt ein kontinuierliches Signal in ein kontinuierliches Spektrum zu zerlegen. Mathematisch entspricht die FT einer Projektion auf die Basisvektoren des Vektorraums der periodischen Funktionen. Die Fouriertransformation (in einer Dimension) einer integrablen Funktion $h \in L^1(\mathbb{R})$ ist definiert als [35]:

$$H(f) = FT(h) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)\ e^{-2\pi i f t}\, dt \tag{6.1}$$

$$h(t) = FT^{-1}(H) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)\ e^{2\pi i f t}\, df \tag{6.2}$$

Mit $FT(h)$ wird die Fouriertransformierte der Funktion h bezeichnet. $FT^{-1}(H)$ bezeichnet die inverse Fouriertransformierte der Funktion H. Die Funktionen H und h werden als *Paar von Fouriertransformierten*[3] bezeichnet. Repräsentiert die Variable t die Zeit in Sekunden, so entspricht f einer Frequenz mit der Einheit Hertz [25].

6.1. Diskrete Fouriertransformation (DFT)

Im Gegensatz zur kontinuierlichen FT betrachtet man bei der diskreten Fouriertransformation eine Funktion $h(t)$, die nur an äquidistanten, diskreten Punkten t_k gegeben ist. Das ist z. B. der Fall wenn eine Messgröße zu regelmäßigen Zeitpunkten abgetastet wird (*sampling*). Das Abtastintervall wird mit Δt bezeichnet und entspricht dem Zeitintervall zweier aufeinander folgenden Abtastpunkte.

[3] Die Normierungskonstanten vor den Integralen in (6.1) und (6.2) sind Konventionssache und in der Literatur nicht einheitlich. Hier wurden sie als 1 gewählt.

$$h_k = h(t_k) \qquad t_k = k\,\Delta t \qquad \text{mit} \quad k \in \mathbb{Z} \tag{6.3}$$

Für die DFT ist es notwendig das Integral in der Fouriertransformation (6.1) durch eine diskrete Summe zu nähern:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)\; e^{-2\pi i f t}\, dt \approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(t_k)\; e^{-2\pi i f t_k}\, \Delta t \tag{6.4}$$

In der digitalen Signalverarbeitung hat man es allerdings immer mit endlichen Signalen und einer endlichen Anzahl von Abtastpunkten N zu tun. Die Summe in Gleichung (6.4) wird endlich:

$$H(f) \approx \sum_{k=0}^{N-1} h(t_k)\; e^{-2\pi i f t_k}\, \Delta t \tag{6.5}$$

Das betrachtete Signal sollte vollständig durch die Abtastzeit $N\,\Delta t$ erfasst werden. Lässt sich h nicht auf ein endliches Intervall beschränken, so sollen die Abtastwerte *repräsentativ* für $h(t)$ zu allen anderen Zeitpunkten außerhalb des betrachteten Intervalls sein [35].

Da h nur an N diskreten Punkten t_k gegeben ist, ist die Fouriertransformierte $H(t)$ ebenfalls nur an N diskreten Punkten f_k berechenbar.

$$f_n = \frac{n}{N\Delta t} \qquad \text{mit} \quad n = -\frac{N}{2}, ..., \frac{N}{2} \tag{6.6}$$

Die Extremwerte von n entsprechen dabei der kritischen Nyquist-Frequenz f_c (siehe Abschnitt 6.1.1). Unter Berücksichtigung der Beziehungen (6.3) und (6.6) lässt sich Gleichung (6.5) schreiben als [35]:

$$H(f_n) \approx \sum_{k=0}^{N-1} h(t_k)\ e^{-2\pi i f_n t_k}\ \Delta t = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} h_k\ e^{-2\pi i k n/N} \tag{6.7}$$

Die Summe in Gleichung (6.7) wird als *diskrete Fouriertransformierte* H_n der Punkte h_k bezeichnet [35]:

$$H_n = \sum_{k=0}^{N-1} h_k\ e^{-2\pi i k n/N} \tag{6.8}$$

Die Werte von H_n sind periodisch bezüglich n mit einer Periode von N. Daher genügt es sich auf positive Indexwerte n zu beschränken:

$$H_{-n} = H_{N-n} \qquad \text{mit} \quad n = 1, 2, ... \tag{6.9}$$

Erweitert man den Index n von 0 bis $N-1$, so laufen k und n über den selben Indexbereich. Die Abbildung von N diskreten Zeitwerten t_k zu N diskreten Frequenzwerten f_n ist offensichtlich. In dieser Konvention entspricht der Index $n = 0$ einer Frequenz von 0. Positive Frequenzen korrespondieren mit dem Indexbereich von 1 bis $N/2 - 1$, während negative Frequenzen durch den Indexbereich $N/2 + 1$ bis $N - 1$ abgedeckt werden. Der Wert $n = N/2$ entspricht dabei den *beiden* Grenzfrequenzen $f = \pm f_c$:

$$\begin{aligned} \text{Indexbereich} \quad &\Longleftrightarrow \quad \text{Frequenzbereich} \\ 1 \leq n \leq N/2 - 1 \quad &\Longleftrightarrow \quad 0 < f < f_c \\ N/2 + 1 \leq n \leq N - 1 \quad &\Longleftrightarrow \quad -f_c < f < 0 \end{aligned} \tag{6.10}$$

Die entsprechende inverse Transformation zu (6.8) ist [35]:

$$h_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_n\ e^{2\pi i k n/N} \tag{6.11}$$

Die beiden Gleichungen[4] (6.8) und (6.11) bilden zusammen die DFT.

6.1.1. Nyquist-Frequenz, Abtasttheorem und Aliasing

Der Kehrwert des Intervalls Δt wird in der Signalverarbeitung mit Abtastrate (*sample rate*) f_s bezeichnet. Sie gibt an, wie viele *samples* pro Sekunde erfasst werden. Eine weitere wichtige Größe der Signalverarbeitung ist die *Nyquist-Frequenz* f_c. Sie ist definiert als die halbe Abtastrate [35]:

$$f_c = \frac{1}{2} f_s = \frac{1}{2\,\Delta t} \tag{6.12}$$

Der Nyquist-Frequenz f_c kommt im *Nyquist-Shannon-Abtasttheorem* (sampling theorem) eine wesentliche Rolle zu. Es besagt: Wird ein bandbegrenztes Signal $h(t)$ mit einer Abtastrate von f_s abgetastet und die Bandbreite des Signals ist beschränkt auf Frequenzen kleiner f_c ($H(f) = 0$ für alle $|f| \leq f_c$), so ist $h(t)$ *vollständig* bestimmt durch die Abtastwerte h_k. Wird im Gegensatz dazu ein Signal abgetastet, das nicht mit f_c bandbegrenzt ist, so werden alle Frequenzanteile mit $|f| > f_c$ fälschlicherweise in den Frequenzbereich $-f_c < f < f_c$ abgebildet. Dieser Fehler wird als *Alias-Effekt* (aliasing) bezeichnet. Der Aliasing-Effekt lässt sich unterdrücken indem man die Abtastfrequenz f_s genügend hoch wählt, oder die zu hohen Frequenzanteile des Signals vor der Abtastung bereits mit einem Tiefpass herausfiltert (Anti-Alisasing-Filter) [27],[35].

6.1.2. DFT eines reellen Signales

Mit Verwendung der Eulerschen Formel ergibt sich für ein reelles Signal h_k für die Fouriertransformierte H_n (6.8) die Eigenschaft:

[4] Auch hier sind die Vorfaktoren Konventionssache. Um die Beziehung zwischen den h_k und H_n symmetrischer zu gestalten, kann man den $1/N$ - Faktor auch auf beide Transformationsrichtungen aufteilen. DFT und inverse DFT unterscheiden sich dann nur mehr im Vorzeichen des Exponenten.

$$
\begin{aligned}
H_{-n} &= \sum_{k=0}^{N-1} h_k \; e^{-2\pi i k(-n)/N} = \sum_{k=0}^{N-1} h_k \{\cos(2\pi kn/N) + i\sin(2\pi kn/N)\} \\
&= \sum_{k=0}^{N-1} h_k \{\cos(-2\pi kn/N) - i\sin(-2\pi kn/N)\} = H_n^* \qquad (6.13)
\end{aligned}
$$

Das bedeutet, dass der Realteil von H_n gerade Symmetrie hat und die Werte des Realteils symmetrisch um $n = 0$ sind. Der Imaginärteil von H_n hat ungerade Symmetrie:

$$
\mathrm{Re}[H_{-n}] = \mathrm{Re}[H_n] \qquad \mathrm{Im}[H_{-n}] = \mathrm{Im}[-H_n] \qquad (6.14)
$$

6.2. Schnelle Fouriertransformation (FFT)

Zur numerischen Berechnung der DFT ist es sinnvoll die komplexe Größe Z zu definieren:

$$
Z = e^{-2\pi i/N} \qquad (6.15)
$$

Die DFT (6.8) lässt sich dann schreiben als:

$$
H_n = \sum_{k=0}^{N-1} Z^{nk} \, h_k \qquad (6.16)
$$

Gleichung (6.16) entspricht einer Matrixmultiplikation. Der Vektor mit den Komponenten h_k wird mit der (n, k)-Matrix multipliziert, deren (n, k)-tes Element die Konstante Z zur Potenz $n\,k$ ist. Ergebnis der Multiplikation ist ein Vektor, der die fouriertransformierten Komponenten H_n enthält. Die Matrixmultiplikation erfordert N^2 Multiplikationen und einige weitere Rechenoperationen zur Berechnung der Potenzen von z. Für die Berechnung der DFT von N Werten steigt der Rechenaufwand somit wie $\mathcal{O}(N^2)$. Zur konkreten numerischen Berechnung der DFT am Computer gibt es verschiedene Methoden, wobei sich eine Methode in ihrer Effizienz von allen anderen

absetzt. Dieser Algorithmus wird schnelle Fourier-Transformation (*Fast Fourier transform*) genannt und mit FFT abgekürzt. Allgemein bekannt wurde dieses Verfahren durch J. W. Cooley und J. W. Turkey [6], die es 1965 veröffentlichten[5]. Mit der FFT ist es möglich den Rechaufwand auf $\mathcal{O}(N \ln N)$ zu reduzieren. Eine sehr einfache Darstellung des Algorithmus lieferten G. C. Danielson und C. Lanczos im Jahr 1942. Das *Danielson-Lanczos Lemma* zeigt wie eine DFT der Länge N als Summe zweier DFT der Länge $N/2$ geschieben werden kann, indem man eine Aufteilung der N Datenpunkte (6.8) in jene mit geradem k und ungeradem k macht [35]:

$$\begin{aligned} H_n &= \sum_{k=0}^{N-1} h_k \; e^{-2\pi i k n/N} \\ &= \sum_{k=0}^{N/2-1} h_{2k} \; e^{-2\pi i (2k) n/N} + \sum_{k=0}^{N/2-1} h_{2k+1} \; e^{-2\pi i (2k+1) n/N} \\ &= \sum_{k=0}^{N/2-1} h_{2k} \; e^{-2\pi i k n/(N/2)} + Z^n \sum_{k=0}^{N/2-1} h_{2k+1} \; e^{-2\pi i k n/(N/2)} \\ &= H_n^e + Z^n \, H_n^o \end{aligned} \tag{6.17}$$

In Gleichung (6.17) bezeichnet H_n^e die n-te Komponente der Fouriertransformierten mit der Länge $N/2$, wobei der hochgestellte Index e die Summation über die geraden Indexwerten k symbolisieren soll. Analog dazu ist in H_n^o die Summation über die ungeraden Indexwerte enthalten. Der Index n läuft weiterhin von 0 bis $N-1$, wobei aber H_n^e und H_n^o periodisch in n mit der Periode $N/2$ sind. Die Größe Z wurde bereits in Gleichung (6.15) definiert. Das Danielson-Lanczos Lemma kann auch rekursiv verwendet werden: Die Berechnung von H_n wurde reduziert auf die Berechnung von H_n^e und H_n^o. Nun kann die selbe Reduktion auf H_n^e angewendet werden, sodass sich die Berechnung von den $N/2$ geraden Datenpunkten auf dessen $N/4$ gerade indizierten Datenpunkte H_n^{ee} und dessen $N/4$ ungerade indizierten Datenpunkte H_n^{eo} reduziert. Zu diesem Zweck ist es sinnvoll N als Potenz von 2 zu wählen. Die Abbildung 6.1 zeigt die schrittweise Zerlegung der Fouriertransformierten in gerade und ungerade indizierte Teile.

Unter dieser Einschränkung für N kann nun das Danielson-Lanczos Lemma so lang angewendet werden, bis nur mehr Transformationen mit der Länge eins (Ein-Punkt-

[5] Verschiedene Formen des Algorithmus wurden schon früher von Mathematikern verwendet und publiziert. Bereits 1805 verwendete z. B. der Mathematiker K. F. Gauß dieses Verfahren. Dass diese früheren Arbeiten großteils in Vergessenheit gerieten, mag daran liegen, dass erst mit digitalen Computern ein praktikables Werkzeug zur Anwendung der FFT zur Verfügung stand [35],[40].

$$
\begin{array}{ccccccccccccc}
 & & & & & & H_n & & & & & & \\
 & & & & & \swarrow & & \searrow & & & & & \\
 & & & & H_n^e & & & & & H_n^o & & & \\
 & & & \swarrow & \downarrow & & & & & \downarrow & \searrow & & \\
 & & H_n^{ee} & & H_n^{eo} & & & & & H_n^{oe} & & H_n^{oo} & \\
 & \swarrow & \downarrow & & \downarrow & \searrow & & & \swarrow & \downarrow & & \downarrow & \searrow \\
H_n^{eee} & & H_n^{eeo} & & \ldots & & & & & & & &
\end{array}
$$

Abbildung 6.1.: Rekursive Anwendung des Danielson-Lanczos Lemmas:
In jedem Schritt (senkrecht) wird die Zahl der Transformierten verdoppelt, deren Länge halbiert sich allerdings.

Transformierte) vorkommen. Wie man an der Gleichung (6.16) leicht erkennen kann, ist die DFT eines Datenpunktes dieser Datenpunkt selbst. Formal bedeutet das, dass jedes aus $\ln(N)$ e's und o's bestehende Muster einem Input-Datenpunkt h_k zugeordnet ist:

$$H_n^{eoeeoeoo\ldots eoe} = h_k \qquad \text{für ein } k \tag{6.18}$$

Um herauszufinden welcher k-Wert zu welchem Muster aus e's und o's gehört, muss man nur die Reihenfolge der e's und o's umkehren. Ordnet man in diesem umgekehrten Muster dem e die Zahl 0 und dem o die Zahl 1 zu, so erhält man den zugehörigen Werte für k im Binärcode (siehe Abbildung 6.2). Um die N Datenpunkte h_k zu transformieren, werden diese zunächst entsprechend der *Umkehrung der Bit-Reihenfolge* sortiert. Sie bilden nun die Einpunkt-Transformierten (6.18). Im nächsten Schritt werden die benachbarten Werte zu Paaren von Zwei-Punkt-Transformierten kombiniert. Zwei benachbarte Paare werden weiter zu Transformierte mit Länge vier kombiniert. Dieser Vorgang wird fortgesetzt, bis die zwei Hälften des gesamten Datenblocks zur letzten Transformation kombiniert werden. Jede Kombination benötigt $\mathcal{O}(N)$ Rechenoperationen. Die Anzahl der Kombinationen ist $\ln(N)$. Somit hat der ganze Algorithmus $\mathcal{O}(N \ln N)$. Die Idee der Umkehrung der Bit-Reihenfolge zusammen mit dem Danielson-Lanczos Lemma bildet den Kern der FFT [35].

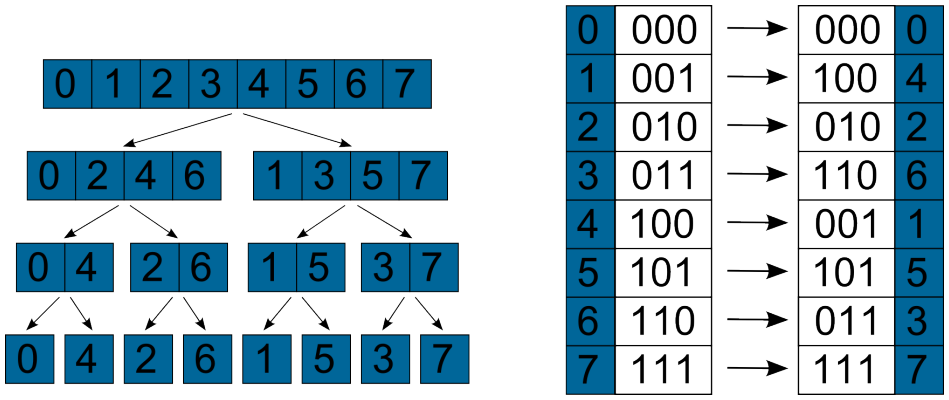


Abbildung 6.2.: *links*: Rekursive Anwendung des Danielson-Lanczos Lemmas auf ein Datenarray mit $N = 2^3 = 8$ Datenpunkten. Bis zu den Ein-Punkt-Transformierten sind $\ln(8) = 3$ Zerlegungen notwendig.
rechts: Die Ordnung der Ein-Punkt-Transformierten lässt sich elegant durch Umkehrung des Bitmusters erzeugen.

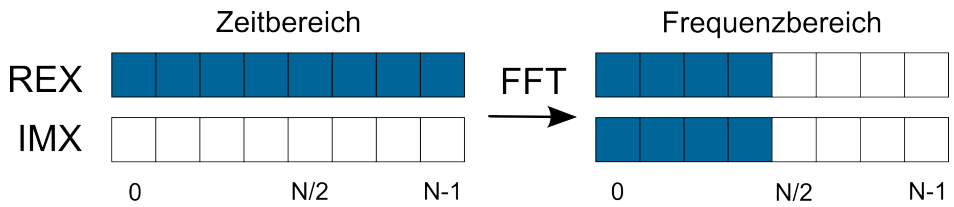


Abbildung 6.3.: Arrayeinträge vor (*links*) und nach (*rechts*) der FFT. Die blau markierten Felder im Frequenzbereich entsprechen den Frequenzen $0 \leq f < f_c$.

6.2.1. Implementierung des FFT-Algorithmus

Ausgangspunkt für den, in dieser Arbeit verwendeten, FFT-Algorithmus sind zwei Arrays der Größe N: REX[ ] für den Realteil und IMX[ ] für den Imaginärteil der Datenpunkte. Abbildung 6.3 zeigt die Array-Belegung vor und nach der FFT. Vor Beginn der FFT enthält REX[ ] das aufgenommene Zeitsignal h_k und die Einträge von IMX[ ] sind Null, da das Messsignal reell ist. Die Array-Einträge mit Index $N/2+1$ bis $N-1$ entsprechen negativen Frequenzen und enthalten für ein reelles Eingangsignal nach der FFT keine zusätzliche Information (siehe Gleichungen (6.10) und (6.14)).
Der FFT-Algorithmus besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Der erste Teil sorgt für das *Bit Reversal Sorting* wie in obigen Abschnitt beschrieben. Die umsortierten Eingangs-Datenpunkte entsprechen den Ein-Punkt-Transformierten und bilden den Ausgangspunkt für den zweiten Teil des Algorithmus, in welchen die N Einpunkt-Transformierten schrittweise zum N-Punkt-Spektrum H_n zusammengesetzt werden.

Abbildung 6.4 zeigt ein Flussdiagramm für die Kombination zweier Vier-Punkt-Transformierten zu einer Acht-Punkt-Transformierten. Die gerade indizierten Punkte werden wie in (6.17) angegeben mit der jeweiligen Potenz von Z multipliziert. Im Programmcode werden diese Multiplikationen mit entsprechenden Sinus- und Kosinus-Funktionen ausgeführt. Das Grundschema für diese Kalkulation ist ein Flussdiagramm mit zwei Ausgängen, die von zwei Eingängen abhängig sind (Abbildung 6.4 rechts). Dieses Basiselement berechnet aus zwei komplexen Punkten zwei andere komplexe Punkte und wird wegen seiner Struktur *Butterfly* genannt [40].

Der gesamte Algorithmus benötigt drei Schleifen. Die äußere Schleife läuft über die $\ln(N)$ Kombinationsstufen. Die mittlere Schleife läuft über alle individuellen Frequenzspektren in dieser Stufe. Die innere Schleife berechnet unter Verwendung des *Butterfly* die einzelnen Punkte im Frequenzspektrum. Das Flussdiagramm für den gesamten FFT-Algorithmus ist in Abbildung 6.5 (links) dargestellt. Die *Overhead*-Boxen bestimmen Beginn- und End-Indizes der jeweiligen Schleifen und berechnen die komplexen Multiplikationen mit Z, die im *Butterfly* benötigt werden. Auf der rechten Seite der Abbildung ist der in dieser Arbeit verwendete Programmcode in BASIC dargestellt (entnommen aus [40]).

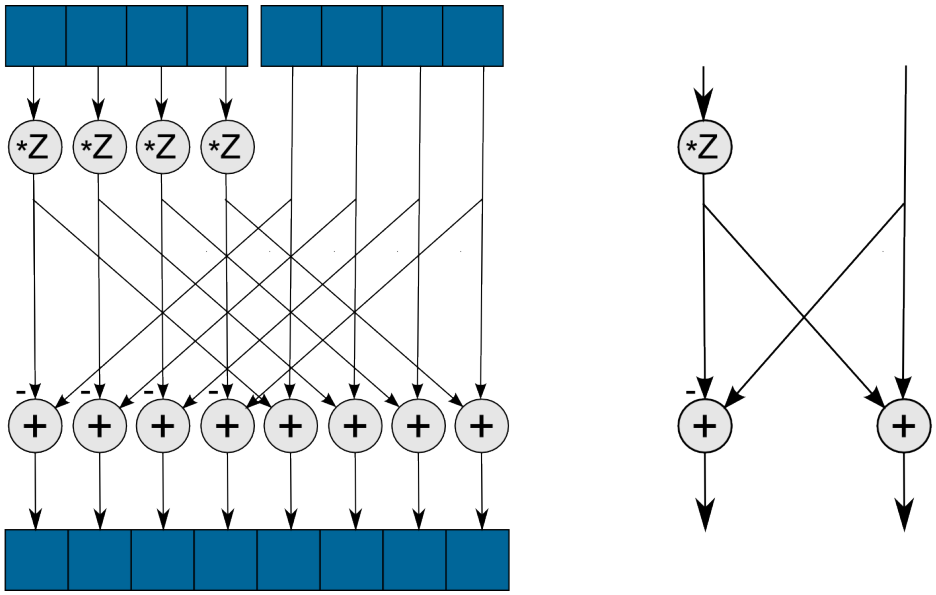
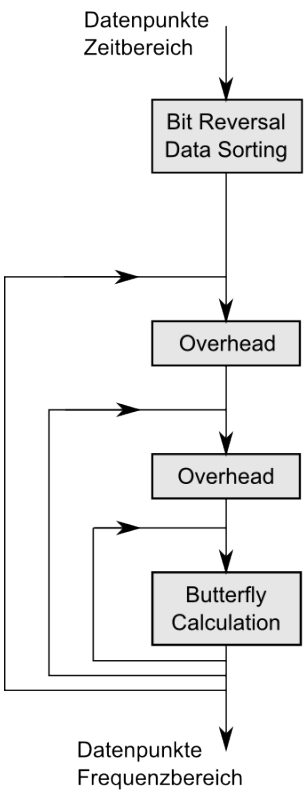


Abbildung 6.4.: *links:* Flussdiagramm für die Berechnung eines Spektrums: Kombination zweier Vier-Punkt-Transformierten zur Acht-Punkt-Transformierten.
rechts: Basis-Muster: FFT-Butterfly



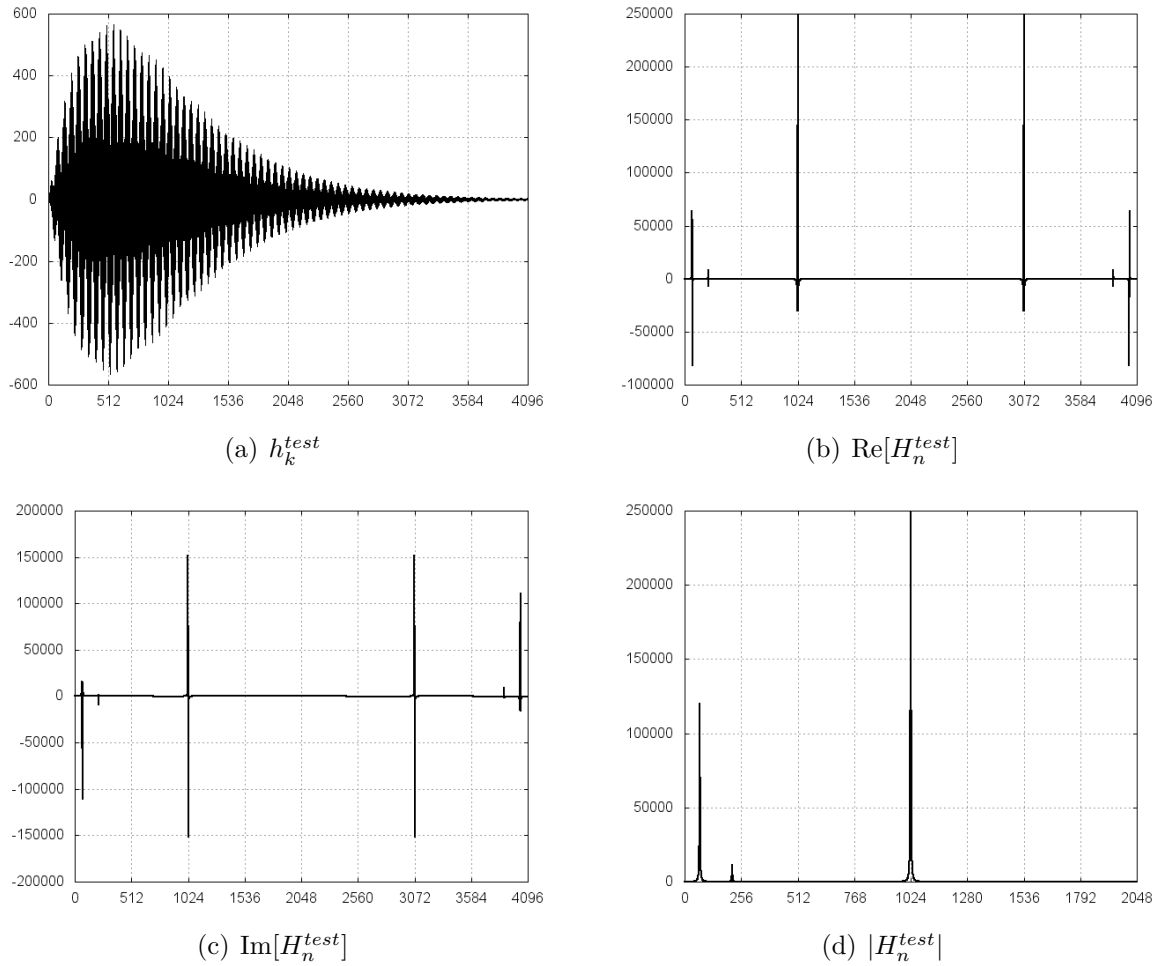

```
1000:   'THE FAST FOURIER TRANSFORM
1010:   'Upon entry, N% contains the number of points in the DFT, REX[ ] and
1020:   'IMX[ ] contain the real and imaginary parts of the input. Upon return,
1030:   'REX[ ] and IMX[ ] contain the DFT output. All signals run from 0 to N%-1.
1040:   '
1050:   pi = 3.14159265
1060:   NM1% = N% - 1
1070:   ND2% = N% / 2
1080:   M% = CInt(Math.Log(N) / Math.Log(2))
1090:   J% = ND2%
1100:   '
1110:   For i% = 1 To N% - 2                            'Bit reversal sorting
1120:       If i% >= J% Then GoTo 1190
1130:       TR = REX(J%)
1140:       TI = IMX(J%)
1150:       REX(J%) = REX(i%)
1160:       IMX(J%) = IMX(i%)
1170:       REX(i%) = TR
1180:       IMX(i%) = TI
1190:       K% = ND2%
1200:       If K% > J% Then GoTo 1240
1210:       J% = J% - K%
1220:       K% = K% / 2
1230:       GoTo 1200
1240:       J% = J% + K%
1250:   Next i%
1260:   '
1270:   For L% = 1 To M%                                'Loop for each stage
1280:       LE% = CInt(2 ^ L%)
1290:       LE2% = LE% / 2
1300:       UR = 1
1310:       UI = 0
1320:       SR = Math.Cos(pi / LE2%)                    'Calculate sine & cosine values
1330:       SI = -Math.Sin(pi / LE2%)
1340:       For J% = 1 To LE2%                          'Loop for each sub DFT
1350:           JM1% = J% - 1
1360:           For i% = JM1% To NM1% Step LE%          'Loop for each butterfly
1370:               IP% = i% + LE2%
1380:               TR = REX(IP%) * UR - IMX(IP%) * UI  'Butterfly calculation
1390:               TI = REX(IP%) * UI + IMX(IP%) * UR
1400:               REX(IP%) = REX(i%) - TR
1410:               IMX(IP%) = IMX(i%) - TI
1420:               REX(i%) = REX(i%) + TR
1430:               IMX(i%) = IMX(i%) + TI
1440:           Next i%
1450:           TR = UR
1460:           UR = TR * SR - UI * SI
1470:           UI = TR * SI + UI * SR
1480:       Next J%
1490:   Next L%
1500:   '
1510:   Return
```

Abbildung 6.5.: *links:* Flussdiagramm zum Ablauf des Algorithmus.
rechts: BASIC-Programmcode für die Berechnung der FFT von N komplexen Datenpunkten [40].

6.2.2. Anwendung des FFT-Algorithmus

Zur Überprüfung des Codes wurden Testsignale gewählt, auf welche der Algorithmus angewendet wurde. In Abbildung 6.6a ist ein auf $N = 4096$ Datenpunkten generiertes Testsignal $h_k^{test} = k\, e^{-k/500}\{\sin(2\pi\, k/60)+1/10\sin(2\pi\, k/19)+2\cos(2\pi\, k/4)\}$ dargestellt. Dieses Testsignal entspricht einer Überlagerung aus drei Schwingungen mit den Frequenzen $f = \{1/60, 1/19, 1/4\}$. Mithilfe des FFT-Algorithmus wurden aus dem Testsignal der Realteil $\mathrm{Re}[H_n^{test}]$ und der Imaginärteil $\mathrm{Im}[H_n^{test}]$ des entsprechenden Spektrums berechnet. Die Abbildungen 6.6b und 6.6c zeigen den um $N/2 = 2048$ symmetrischen Realteil und den um $N/2$ antisymmetrische Imaginärteil des Spektrums. Diese beiden Anteile werden im *Amplitudenspektrum* $|H_n^{test}|$ kombiniert. Dazu wird der Betrag des komplexen Spektrums $\sqrt{\mathrm{REX[n]}^2 + \mathrm{IMX[n]}^2}$ gebildet (siehe Abbildung 6.6d). Wegen

der Symmetrie genügt im Diagramm eine Darstellung bis $N/2$. Das Spektrum zeigt ausgeprägte Spitzen bei den Indizes $n = \{68, 216, 1024\}$. Die Indizes lassen sich mit Beziehung (6.6) in "Frequenzen" $f_n = n/4096$ umrechnen. Diese Werte entsprechen mit guter Genauigkeit den Werten der tatsächlichen Frequenzen f in den Winkelfunktionen des Testsignals. Die mittels FFT-Algorithmus ermittelten Frequenzspitzen und die tatsächlichen Frequenzen des Testsignals h_k^{test} sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.



(a) h_k^{test} (b) $\mathrm{Re}[H_n^{test}]$

(c) $\mathrm{Im}[H_n^{test}]$ (d) $|H_n^{test}|$

Abbildung 6.6.: Anwendung des FFT-Algorithmus auf die Testfunktion h_k^{test} (a). Das Ergebnis ist ein komplexes Spektrum H_n^{test} mit Realteil (b), Imaginärteil (c) und Betrag (d).

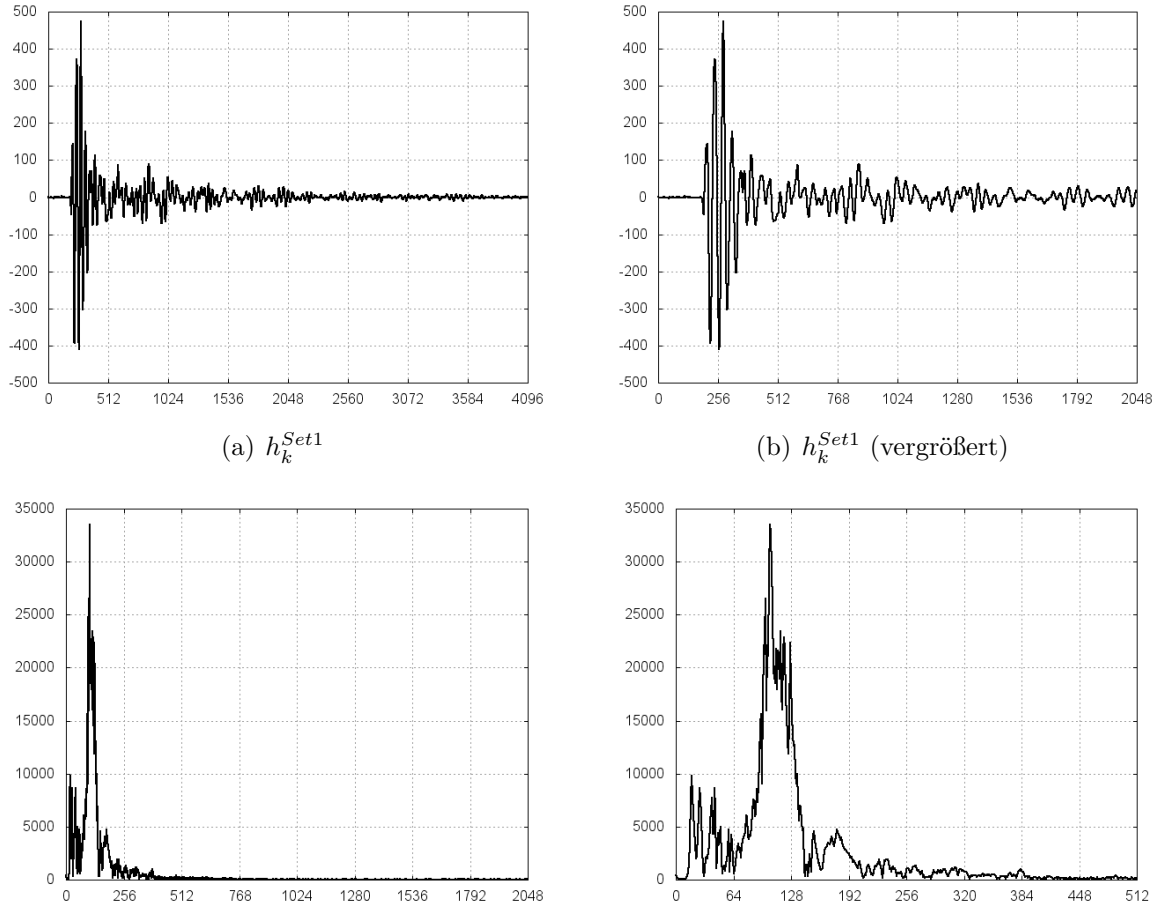
In einem zweiten Beispiel wird der FFT-Algorithmus auf ein reales Messsignal angewendet. In der Abbildung 6.7a ist das erste aufgenommene Schallsignal (*Set1*) der in Kapitel 8 betrachteten Daten visualisiert. In Abbildung 6.7c ist das berechnete Amplitudenspektrum dargestellt. Die Abbildungen 6.7b und 6.7d zeigen vergrößerte Ausschnitte der beiden Verläufe. Für den Verlauf der entsprechenden physikalischen

f_n	f
0,01660	0,01666 (=1/60)
0,05273	0,05263 (=1/19)
0,25000	0,25000 (=1/4)

Tabelle 6.1.: Die mit dem FFT-Algorithmus berechneten Frequenzen f_n und die tatsächlichen Frequenzen f des Testsignals h_n^{test}

.

Größen müssen die Achsen des Diagramms mit dem *Scale Factor* bzw. der *Sample Rate* korrigiert werden.



(a) h_k^{Set1}

(b) h_k^{Set1} (vergrößert)

(c) $|H_n^{Set1}|$

(d) H_k^{Set1} (vergrößert)

Abbildung 6.7.: Anwendung des FFT-Algorithmus auf die Messdaten h_k^{Set1} (a,b) ergibt das Amplitudenspektrum $|H_n^{Set1}|$ (c,d)

7. Die Software - AE Graphics 3.5

In diesem Kapitel wird die Funktion des erstellten *Windows*-Anwendung *AE Graphics 3.5* und seine Bedienung behandelt. Der gesamte Quellcode ist im Anhang B dieser Arbeit zu finden. Das Programm wurde in der Programmiersprache *Visual Basic* in der Entwicklungsumgebung *Visual Studio 2010 Express*[6] realisiert. Die grafische Benutzeroberfläche wurde mit der Programmierschnittstelle *Windows Forms* erstellt.
Ausgangsmaterial für die Anwendung des Programmes sind Textdateien mit AE-Daten, die mithilfe der *Vallen AE Suite* aus den Versuchsdaten exportiert wurden und deren Formatierungen in Anhang A beschrieben sind. Neben Screenshots der Benutzeroberfläche sind auch noch *Programmablaufpläne* (PAP), angelehnt an DIN 66001 [10], dargestellt. Dabei werden durch definierte Symbole die Teilprozesse in ihrer logischen und zeitlichen Reihenfolge dargestellt. Mit Hilfe des PAP ist es möglich einen schnellen Überblick über einen Prozess zu erhalten. Hier soll der PAP nicht die genaue Programmstruktur, sondern den allgemeinen, vom Benutzer wahrgenommenen Ablauf widerspiegeln. Für die Erstellung der Programmablaufpläne wurde die Software *Pap-Designer 2.2.0.8*[7] verwendet.

7.1. Grafische Benutzeroberfläche und Bedienung

Die grafische Benutzeroberfläche besteht im wesentlichem aus drei verschiedenen Fenstern: das Startfenster, das Gruppenfenster und das Diagrammfenster. In folgenden Abschnitten wird die Bedienung und Funktion des Programms anhand dieser drei Fenster beschrieben.

[6] online: `www.microsoft.com/germany/express`
[7] online: `www.friedrich-folkmann.de/index-pd.html`

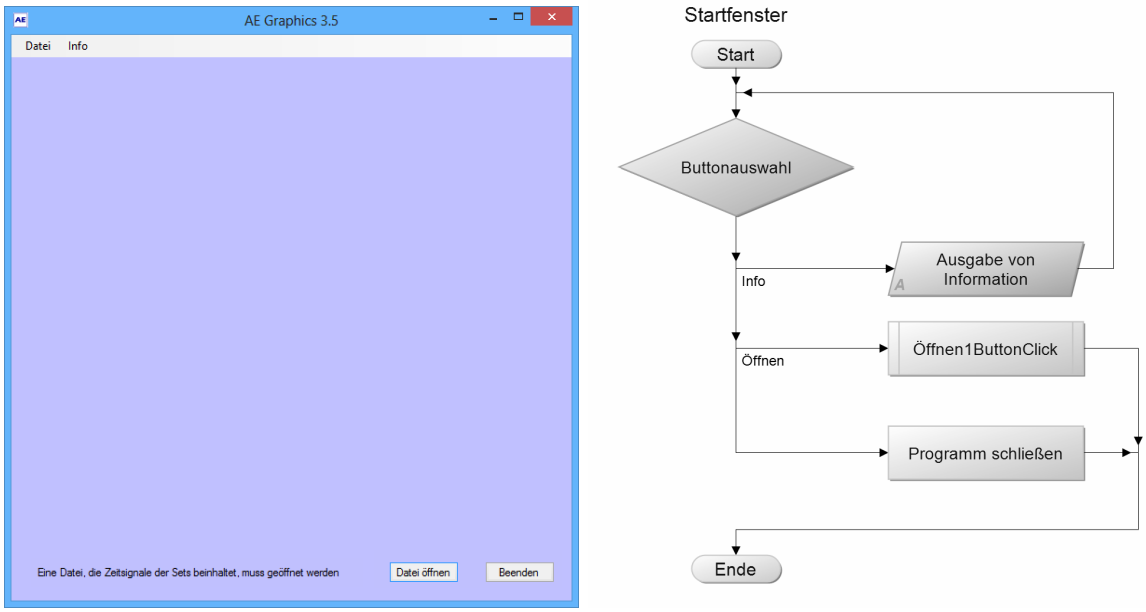


Abbildung 7.1.: AE Graphics 3.5: Startfenster (*links:* Screenshot, *rechts:* PAP)

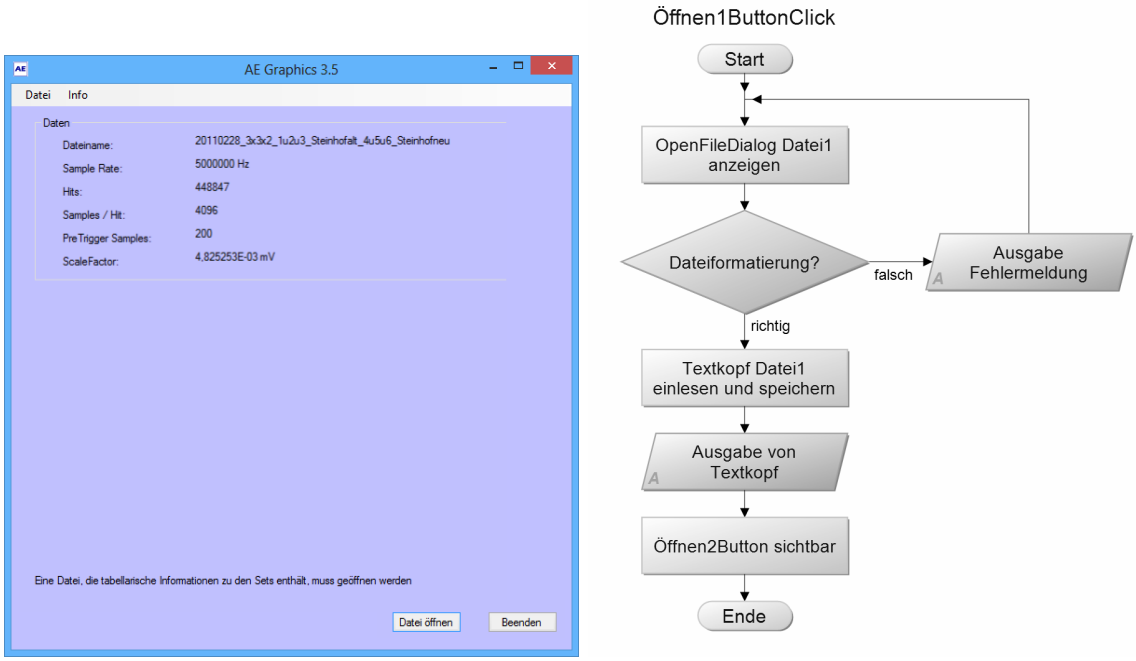


Abbildung 7.2.: AE Graphics 3.5: Öffnen1ButtonClick (*links:* Screenshot, *rechts:* PAP)

7.1.1. Das Startfenster

Das Startfenster (siehe Abbildung 7.1) erscheint sobald das Programm gestartet wird. Von diesem Fenster aus besteht die Möglichkeit eine Textdatei zu öffenen. Wird auf den *Datei öffnen*–Button geklickt, so wird die Subroutine *Öffnen1ButtonClick* aufgerufen.

Am Anfang der Subroutine wird überprüft, ob die Formatierung der geöffnenten Textdatei der Formatierung aus Anhang A.1 entspricht. Bei entsprechender Formatierung wird der Textkopf der Datei eingelesen und im Fenster ausgegeben (Abbildung 7.2). Folgende Informationen werden im Abschnitt *Daten* im Startfenster angezeigt:

Daten:

- **Dateiname:** Der Dateiname der geöffneten Textdatei wird angezeigt.
- **Sample Rate:** Die Sample Rate oder Abtastrate gibt an, mit welcher Frequenz das analoge Messsignal in dieser Datei abgetastet wurde. Für die AE-Messungen betrug die Sample Rate $f_s = 5$ MHz.
- **Hits:** Die hier angezeigte Zahl gibt die Anzahl der in dieser Datei aufgezeichneten Schallereignisse an.
- **Samples / Hit:** Darunter versteht man die Anzahl der Abtastpunkte (Samples) pro aufgenommenen Schallsignal (Hit). Dieser Wert ist konstant und bestimmt gemeinsam mit der Sample Rate die Aufnahmezeit für ein Schallsignal. Für die AE-Messungen beträgt die Anzahl der Samples $N = 4096$ (12 Bit).
- **Pre Trigger Samples:** Die Aufnahme eines Schallsignals wird gestartet, sobald die Amplitude einen gewissen Schwellenwert übersteigt. Um auch den Beginn des Signals zu erfassen, werden eine bestimmte Anzahl von Messpunkten, die vor dem Auslösezeitpunkt liegen, mitgespeichert. Der Wert für die *Pre Trigger Samples* wurde für die AE-Messungen mit 200 gewählt.
- **Scale Factor:** Der *Scale Factor* entspricht dem kleinsten darstellbaren Amplitudenwert (Amplitudenauflösung). Er legt die Umrechnung zwischen gespeicherten Integer-Werten und tatsächlich gemessenen Spannungswerten fest. Bei dem verwendeten Messsystem *AMSY-5* beträgt er 4,825 µV.

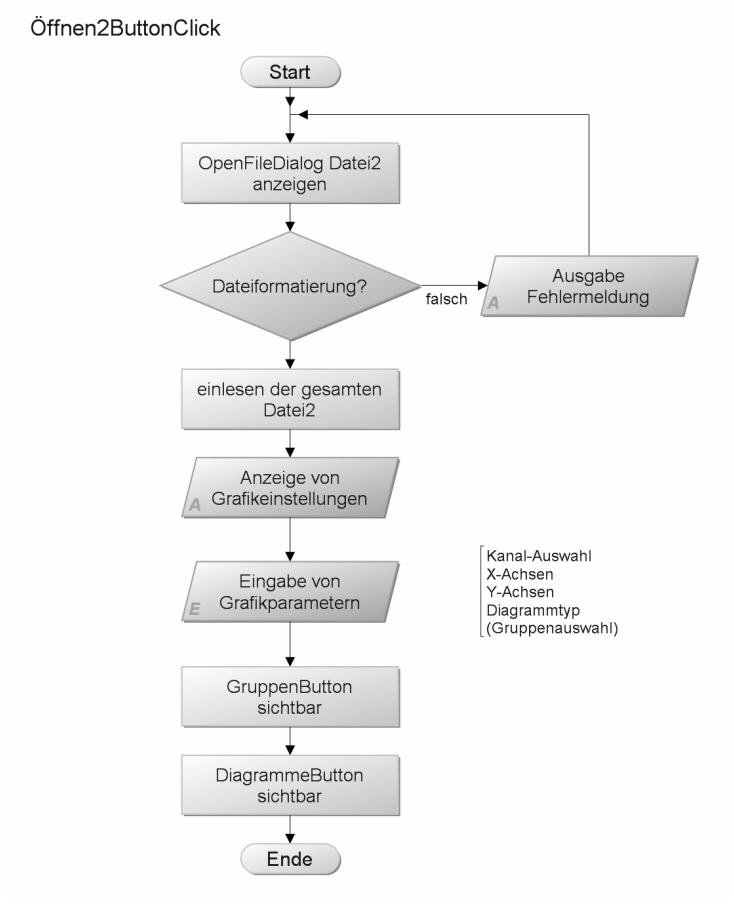


Abbildung 7.3.: AE Graphics 3.5: Öffnen2ButtonClick (*oben:* Screenshot, *unten:* PAP)

Nach dem erfolgreichen Öffnen dieser Datei besteht die Möglichkeit, eine zweite Textdatei zu öffnen. Diese Textdatei muss aus den selben Versuchsdaten wie die erste Datei exportiert worden sein und eine Formatierung, wie in Anhang A.2 dargestellt, besitzen. Wurde diese Datei erfolgreich geöffnet, so werden deren Werte eingelesen. Im Startfenster werden nun mehrere Einstellmöglichkeiten angezeigt (Abbildung 7.3). Die Einstellmöglichkeiten sind in vier bzw. fünf umrandete Bereiche gruppiert, deren Bedeutung im Folgenden kurz erklärt wird.

Kanal-Auswahl : Das Messsystem *AMSY-5* erlaubt es mehrere Proben gleichzeitig zu messen. Die Software unterscheidet die Signale von sechs Sensoren. Dementsprechend werden die Daten nach Herkunft des Signals mit einer Kanalnummer von eins bis sechs unterschieden. In der Grafikausgabe von AE-Graphics 3.5 werden immer nur die Messwerte einer Probe dargestellt. Die zu betrachtende Probe kann über die Kanalauswahl (*Channel*) festgelegt werden.

X-Achsen: Auf der X-Achse wird wahlweise Zeit in Minuten oder Temperatur in Grad Celsius aufgetragen. Für die Darstellung über Zeit wird die gesamte Dauer des Versuchs in gleichmäßige Zeitschritte unterteilt. Das ist für die Diagramme notwendig, da in ihnen die Anzahl der *Hits* mit bestimmten Eigenschaften (Energie, Amplitude, Frequenz) über der Zeit dargestellt werden soll. Zu diesem Zweck muss ein Zeitintervall definiert werden, innerhalb dessen die Hits mit entsprechenden Eigenschaften gezählt werden. Wird der Wert der *Zeitauflösung* sehr klein gewählt, so ist die Folge davon, dass nur wenige Hits innerhalb dieser Zeitspanne liegen und somit die statistische Aussagekraft sehr gering werden kann. Die Zeitauflösung sollte allerdings auch nicht zu groß gewählt werden, da sich sonst die Temperatur innerhalb dieser Zeitspanne zu stark ändert. Als *Default*-Wert für die Zeitauflösung ist 60 min gewählt.

Für die Darstellung über Temperatur wird analog zur Zeitauflösung eine Temperaturauflösung definiert, welche den Temperaturbereich angibt, innerhalb dessen jeweils die *Hits* mit bestimmten Eigenschaften gezählt werden. Diese Hit-Anzahl wird im Diagramm über der Temperatur aufgetragen. Da es von Interesse ist, bei welcher Temperatur bestimmte AE-Signale gehäuft oder vermindert auftreten, ist es nicht sinnvoll den Wert sehr groß zu wählen, da sonst über einen sehr breiten Temperaturbereich gemittelt wird. Gegen eine sehr genaue Temperaturauflösung spricht die Ungenauigkeit der Temperaturmessung und -regelung. Der *Default*-Wert für die Temperaturauflösung beträgt 1°C

Wird die Checkbox *alternative Skalierung* ausgewählt, so ist es möglich im Dia-

gramm einen bestimmten Achsenabschnitt darzustellen. Ohne diese Auswahl wird der minimale X-Wert durch den Aufnahmezeitpunkt des ersten Hits bzw. die niedrigste im Versuch vorkommende Temperatur und der maximale X-Wert durch den Zeitpunkt des letzten aufgenommen Hits bzw. der höchsten Temperatur bestimmt.
Die Größe der dargestellten Datenpunkte (bei Auswahl von *Points* als Diagrammtyp) kann über *Marker Size* variiert werden.

Y-Achsen: Im ersten Diagramm, das später im Diagrammfenster angezeigt wird (Abbildung 7.6 oben), sind die einzelnen Hits als Punkte dargestellt. Die Y-Koordinate dieser Punkte ist durch die Amplitude, die Energie oder die Frequenz des jeweiligen Schallsignals gegeben. Die Darstellungsoption *Frequenz* steht erst nach Anwendung der FFT zur Verfügung. Auch hier besteht die Möglichkeit über die Checkbox *alternative Skalierung* den minimalen und maximalen Achsenwert manuell festzulegen.

Diagrammtyp: Während im ersten Diagramm des Diagrammfensters jedes AE-Signals als Punkt dargestellt wird, wird im zweiten Diagramm über eine Anzahl von Hits mit bestimmten Eigenschaften in einem Zeit- oder Temperaturintervall aufsummiert (mittleres Diagramm in Abbildung 7.6). Für den Graphen im zweiten Diagramm stehen verschiedene Arten der Darstellung zur Verfügung. Die *Default*-Einstellung ist *StepLine*. Bei dieser Einstellung wird von jedem Punkt aus die Kurve waagrecht bis zum nächsten Punkt fortgesetzt. Die diskreten Zeit- bzw. Temperaturschritte sind damit gut zu erkennen. Bei der *Column*-Einstellung wird die Hit-Anzahl in jedem Intervall durch farbige Säulen dargestellt. Für die einfache Darstellung eines farbigen Punktes pro Intervall ist die Einstellung *Point* zu wählen. Die Option *Print* entspricht der Auswahl *Column*, allerdings werden alle Diagramme in Schwarz-Weiß dargestellt. Die Kurven können mit verschiedenen Grautönen und Schraffuren unterschieden werden.

Gruppenauswahl: In diesem Bereich können die Gruppen ausgewählt werden, die im Diagramm dargestellt werden sollen. Die Auswahl steht erst zur Verfügung, wenn vorher über den *Gruppen*-Button Gruppen definiert wurden.

7.1.2. Das Gruppenfenster

Nach dem Öffnen der beiden Textdateien erscheint im Startfenster der Button *Gruppen*. Wird dieser Button ausgewählt, so wird die Subroutine *GruppenButtonClick* aufgerufen

und das Gruppenfenster (Abbildung 7.4) erscheint. Es besteht die Möglichkeit bis zu acht verschiedene Gruppen zu definieren. Als Gruppe versteht man eine Teilmenge, der am betrachteten Channel aufgenommenen Hits, die bestimmte Kriterien erfüllen. Für jede Gruppe können Intervalle für die AE-Parameter *Amplitude*, *Energie* und *Frequenz* definiert werden. Liegen die entsprechenden AE-Parameter eines Hits in diesen Intervallen, so ist es ein Element dieser Gruppe. Erfüllt ein Hit eines dieser Kriterien nicht, so wird dieser Hit herausgefiltert und trägt nicht zur Gruppe bei. Die *Default*-Werte der Intervalle sind so gewählt, dass jeder Hit Element jeder Gruppe ist. Auf die Bedeutung der Gruppenkriterien (Amplitude, Energie und Frequenz) wird in Abschnitt 7.2 genauer eingegangen.

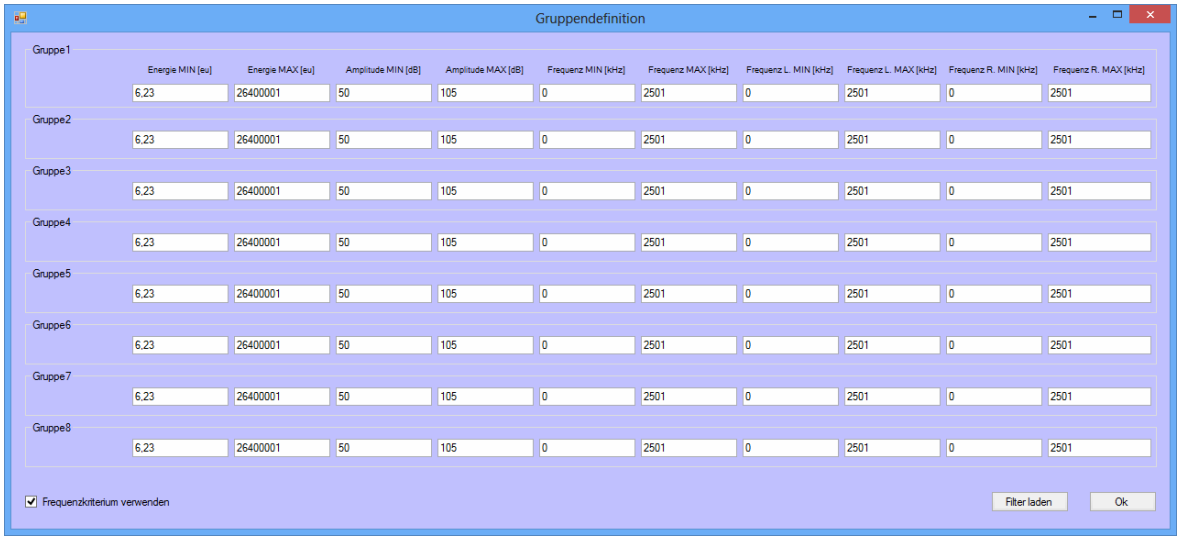
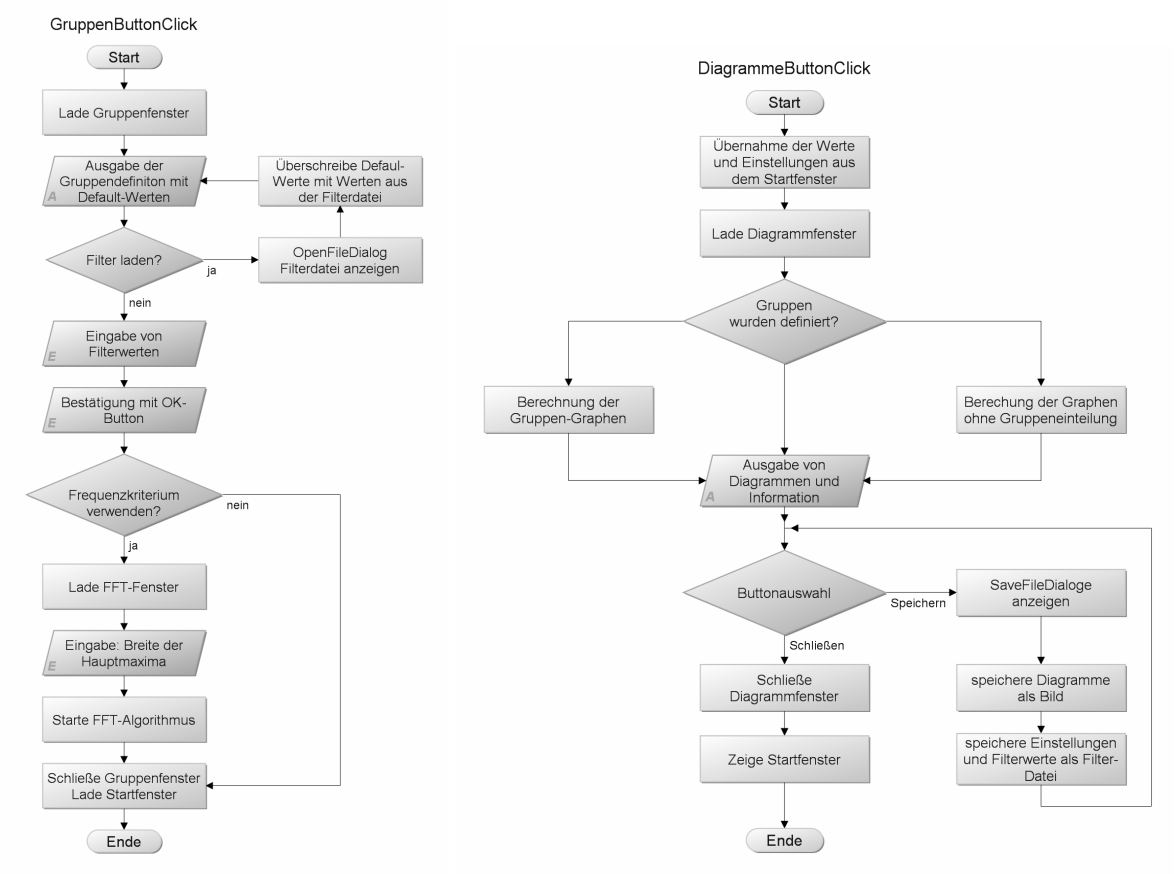


Abbildung 7.4.: AE Graphics 3.5: Gruppenfenster mit aktiviertem Frequenzkriterium und *Default*-Werten für die Filterintervalle.

Über den Button *Filter laden* kann man eine Filterdatei öffnen. Diese Datei enthält Intervallwerte für die acht Gruppen. Die Verwendung einer Filterdatei kann die manuelle Eingabe der Intervallwerte ersetzen. Das ist vor Allem dann sinnvoll, wenn die Daten mehrerer verschiedener Versuche mit gleichen Filterwerten untersucht werden sollen. Die formale Gestalt einer Filterdatei ist in Anhang A.3 beschrieben.

Für die Verwendung des Frequenzkriteriums ist es notwendig, aus jedem Zeitsignal mit einer Fouriertransformation dessen Frequenzspektrum zu berechnen. Dies wird mit dem im Kapitel 6.2.1 dargestellten FFT-Algorithmus ausgeführt. Da die FFT bei großen Datenmengen einige Zeit in Anspruch nimmt, kann das Frequenzkriterium mit der Checkbox *Frequenzkriterium verwenden* wahlweise aktiviert bzw. deaktiviert werden. Durch Bestätigung mit dem *OK*-Button werden die manuell eingegebenen oder einge-

lesen Filterwerte übernommen. Bei aktivem Frequenzkriterium wird nun ein Eingabefenster geöffnet, in dem die Breite das Maximums im Frequenzspektrum abgeschätzt werden muss (mehr dazu in Abschnitt 7.2.3). Nach Abschluss der FFT wird wieder das Startfenster eingeblendet. Bei nicht-aktiviertem Frequenzkriterium wird mit dem *OK*-Button sofort in das Startfenster gewechselt. Die Anzeige im Startfenster wurde nun um den Bereich *Gruppenauswahl* erweitert. Der gesamte Ablauf ist grafisch in Abbildung 7.5a dargestellt.



(a) (b)

Abbildung 7.5.: PAP zu GruppenButtonClick (a) und DiagrammeButtonClick (b)

7.1.3. Das Diagrammfenster

Im Startfenster kann über den Button *Diagramme* das Diagrammfenster aufgerufen werden. Das Diagrammfenster kann vor und auch nach einer Gruppeneinteilung aufgerufen werden. Sind keine Gruppen definiert, so werden alle am betrachteten Channel aufgenommen Hits in den Diagrammen angezeigt. Abbildung 7.6 zeigt ein Beispiel für

ein Diagrammfenster ohne Gruppen. Die dafür gewählten Einstellungen entsprechen denen in Abbildung 7.3 (oben) dargestellten. Wurden bereits Gruppen definiert, so werden die im Startfenster ausgewählten Gruppen in den Diagrammen dargestellt. Zusätzlich zur Anzeige der Diagramme, besteht auch die Möglichkeit, die Diagramme als Bild zu speichern. Bei Betätigung des *Speichern*-Buttons wird parallel zum Bild auch eine Filterdatei mit den zugehörigen Einstellungen und Gruppendefinitionen abgespeichert. Eine schematische Übersicht zum Programmablauf im Diagrammfenster ist in Abbildung 7.5b dargestellt. Im Diagrammfenster (siehe Abbildung 7.6) werden drei bzw. vier Diagramme angezeigt. Im oberen Punktdiagramm entspricht ein Punkt einem Hit. Die Y-Koordinate des Punktes entspricht wahlweise der Amplitude, der Energie oder der Frequenz dieses Hits. Auf der X-Achse kann entweder der Detektionszeitpunkt des Hits, oder die zu diesem Zeitpunkt herrschende Temperatur, aufgetragen werden. Für die X-Achse des zweiten Diagrammes stehen die selben beiden Größen. Im Unterschied zum ersten Diagramm ist hier auf der Y-Achse die Hit-Anzahl dargestellt. Im unterem Diagramm ist der Temperaturverlauf während der Messzeit dargestellt. Das vierte Diagramm ist ein Kreisdiagramm, das die Verteilung der Hits auf die verschieden Gruppen veranschaulicht. Da bei der Diagrammausgabe in Abbildung 7.6 noch keine Gruppen definiert wurden, wird dieses Diagramm hier nicht angezeigt. Zusätzlich zu den Diagramme werden noch einige Informationen im Diagrammfenster angezeigt:

- **Hitverteilung:** Neben der Anzahl der Hits für jede der acht Gruppen, wird auch noch angezeigt wie viele Hits von keiner Gruppe erfasst werden oder, gleichzeitig zu mehreren Gruppen beitragen. Ein Hit kann ein Element mehrerer Gruppen sein, wenn sich die im Gruppenfenster definierten Intervalle von verschiedenen Gruppen überschneiden. Eine Mehrfachzählung sollte allerdings mit einer geeigneten Wahl der Filterwerte vermieden werden, da sonst mehr Hits im Diagramm angezeigt werden als tatsächlich gemessen wurden und somit die statistische Aussagekraft der Diagramme nicht mehr gegeben ist. Zum Vergleich wird auch noch die Gesamtzahl der Hits des betrachteten Channels und die Summe der Hits von allen sechs Channel angezeigt.

- **Channel:** Die Nummer des ausgewählten Channels wird angezeigt.

- **Auflösung:** Hier wird die im Startfenster ausgewählte Zeitauflösung in [min] bzw. Temperaturauflösung in [°C] angezeigt.

- **Versuchsdauer:** Dauer der gesamten Messung in Minuten.

- **Dateiname:** Hier wird der Name der Datei ausgegeben, aus dem die Versuchs-

daten für diese Diagramme stammen.

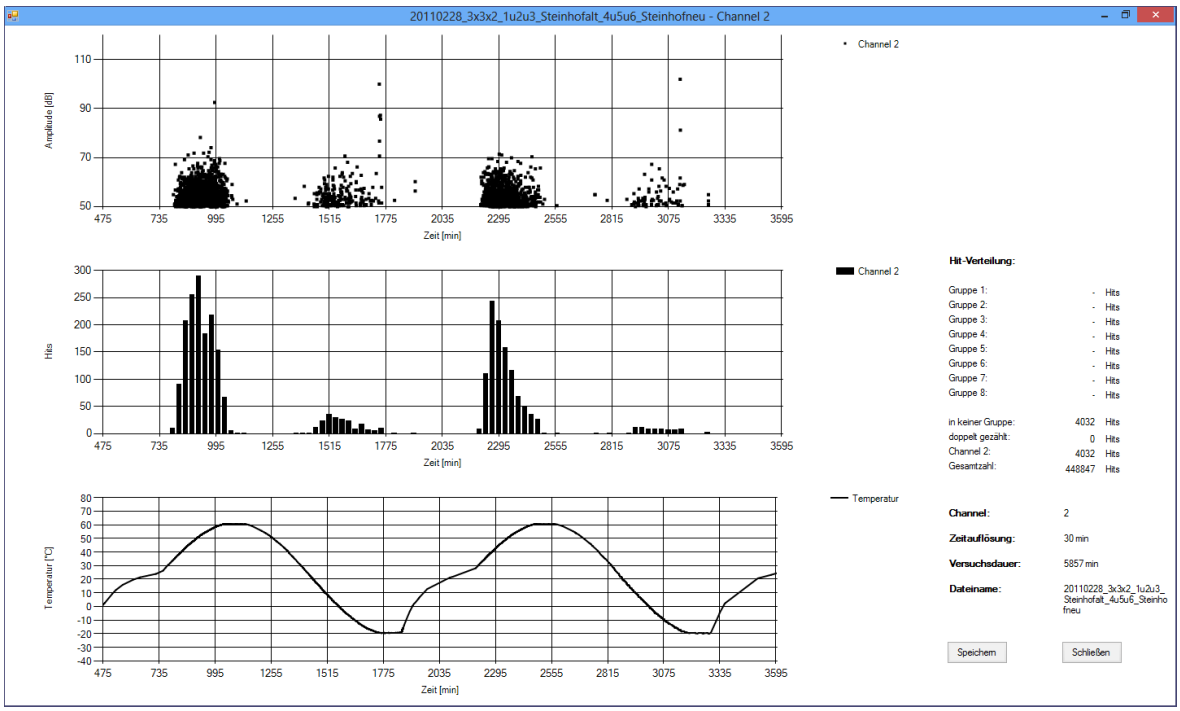


Abbildung 7.6.: AE Graphics 3.5: Diagrammfenster
Die Einstellungen entsprechen denen in Abbildung 7.3 (oben) dargestellten: Auswahl von Channel 2; Darstellung über Zeit mit den Achsenwerte von $Xmin = 475$ min und $Xmax = 3600$ min und einer Zeitauflösung von 30 min; Amplitude als Y-Achse; schwarz-weißer Print-Diagrammtyp; keine Gruppen definiert.

7.2. Die Gruppenkriterien

Die Kriterien einer Gruppe legen fest, ob ein Hit und damit das zugehörige AE-Signal ein Element dieser Gruppe ist. Es besteht die Möglichkeit Intervalle zu definieren, die sich auf die Größen Amplitude, Energie und Frequenz des Signales beziehen. Für jede Gruppe können für jede dieser drei Größen individuelle Intervalle definiert werden. Ein Hit ist nur dann Element einer Gruppe, wenn alle seiner betrachteten Größen innerhalb der definierten Intervalle liegen. In folgenden Abschnitten wird näher auf die möglichen Filtergrößen eingegangen.

7.2.1. Amplitude

Unter der Amplitude A versteht man die in Abbildung 3.2 dargestellten AE-Parameter. Die Amplitude kann in ihrer Messeinheit *Volt* oder in der logarithmischen Hilfseinheit *Dezibel* dargestellt werden. Da der Wertebereich der Amplitude mehrere Größenordnungen abdecken kann, wurde hier die Einheit Dezibel (dB) für die Amplitude bevorzugt.

$$A = 20 \lg \left(\frac{\hat{U}}{U_0} \right) \text{dB} \tag{7.1}$$

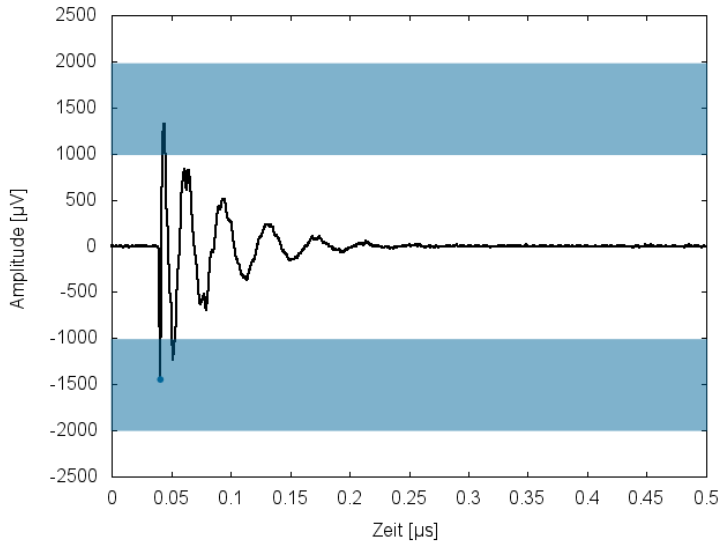
Die Spannung $\hat{U}$ in Formel 7.1 entspricht dem Spitzenwert der Amplitude. Als Bezugswert wird, in Übereinstimmung mit der Messsoftware (siehe Anhang C: *AMSY-5*), eine Spannung von $U_0 = 1$ µV gewählt. Die Amplitudenwerte liegen hier typischerweise zwischen 50 dB (entspricht dem bei den Messungen eingestelltem Schwellenwert U_T) und etwa 120 dB. Abbildung 7.7 zeigt die Anwendung eines Amplitudenkriteriums auf zwei verschiedene AE-Signale. Das Signal (a) erfüllt das Kriterium, da seine maximale Amplitude innerhalb des definierten Intervalls liegt.

7.2.2. Energie

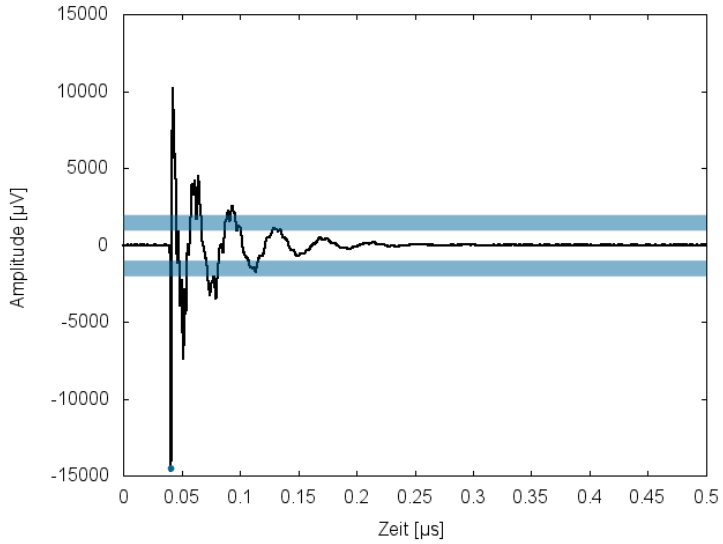
Die Energie eines elektrischen Signals $E_{elektrisch}$ ist durch das Integral der quadratische Spannungsamplitude $U^2(t)$ über die Signaldauer D des Signals berechenbar. R entspricht dabei dem im Messkreis wirkenden Widerstand:

$$E_{elekrisch} = \frac{1}{R} \int_D U^2(t)\, dt \tag{7.2}$$

Bei AE-Messungen wird die Energie E üblicherweise als relative Größe ohne den Widerstand R definiert (siehe Gleichung (3.1)). Da das AE-Signal in Form von diskreten Amplitudenwerten $U_i = U(t_i)$ in äquidistanten Zeitabständen Δt vorliegen, kann die Integration in erster Näherung durch die Trapezformel [5] berechnet werden:



(a)



(b)

Abbildung 7.7.: Anwendung des Amplitudenkriteriums auf AE-Signale:
Das Intervall (blau) wurde mit $[A_{min}, A_{max}] = [60\,\text{dB}\,, 66\,\text{dB}]$ gewählt.
(a) Die Amplitude des Signals beträgt $A = 63,2\,\text{dB}$ und liegt innerhalb des definierten Intervalls.
(b) Die Amplitude beträgt $A = 83,5\,\text{dB}$ und liegt außerhalb des Intervalls und erfüllt somit das Gruppenkriterium nicht.

$$
\begin{aligned}
E &= \int_D U^2(t)\,dt \\
&\approx \Delta t \left(\frac{1}{2} U^2(t_a) + U^2(t_{a+1}) + U^2(t_{a+2}) + ... + U^2(t_{e-1}) + \frac{1}{2} U^2(t_e) \right)
\end{aligned}
\tag{7.3}
$$

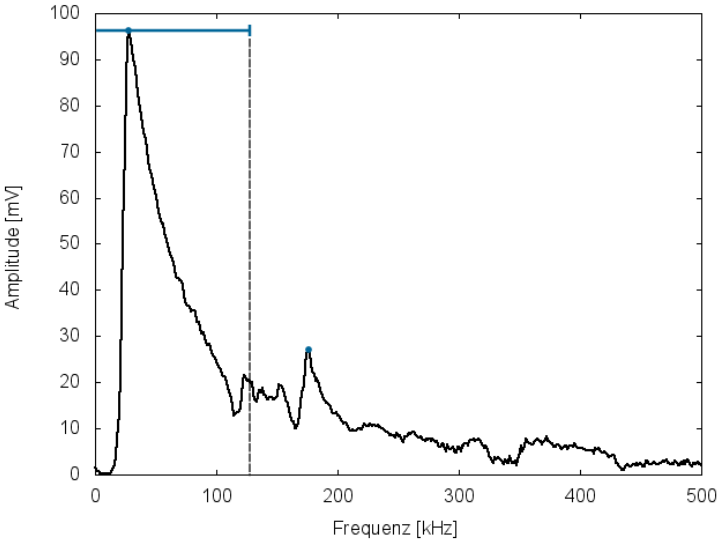
Die Indizes a und e entsprechen dabei Anfangs- und Endzeitpunkt des Signals $D = t_e - t_a = (e - a)\,\Delta t$. Die Zeit zwischen zwei Abtastpunkten ist durch die Sample Rate $f_s = 1/\Delta t$ gegeben. Die Energieeinheit *eu*, die vom *Vallen AMSY-5*-Messystem (Anhang C) für die vom Sensor aufgenommene Energie vorgesehen ist, ist definiert als:

$$1\ \mathrm{eu} = 10^{-14}\ \mathrm{V}^2\,\mathrm{s} \tag{7.4}$$

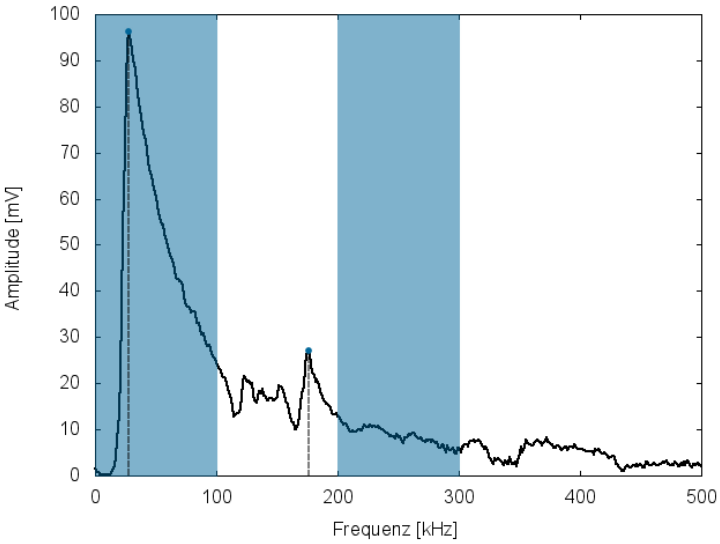
Da die Energie hier nicht in einer logarithmischen Einheit dargestellt wird, erstrecken sich die Energiewerte von AE-Signalen typischerweise über mehrere Größenordnungen.

7.2.3. Frequenz

Unter der Frequenz f eines AE-Signals wird hier jene Frequenz verstanden, bei der die Amplitude des Frequenzspektrums ihren maximalen Wert erreicht. Während die Größen *Amplitude* und *Energie* aus der *Vallen AE Suite* exportiert werden, muss das Frequenzspektrum erst durch Fouriertransformation der diskreten AE-Signale berechnet werden (siehe Kapitel 6). Anschließend kann in diesem Spektrum das Maximum gesucht werden. AE-Signale können somit anhand ihres dominierenden Frequenzanteils unterschieden werden. Um zwei unterschiedliche Spektren, deren Hauptmaxima in etwa bei der gleichen Frequenz f liegen zu unterscheiden, gibt es eine Option um auch Nebenmaxima zu berücksichtigen. Zusätzlich zu einem Frequenzintervall für das Hauptmaximum können zwei weitere Intervalle angegeben werden, welche sich auf ein Nebenmaximum links (f_L) und rechts (f_R) des Hautmaximums beziehen. Dazu ist es notwendig, die Breite des Hauptmaximums abzuschätzen. Dieser Wert legt fest welcher Bereich für die Suche der Nebenmaxima gesperrt ist. In Abbildung 7.8 ist das zugehörige Frequenzspektrum zum Zeitsignal aus dem Diagramm von Abbildung 7.7a dargestellt. Während das Hauptmaximum des Spektrums eindeutig bestimmt werden kann, ist die Lage der Nebenmaxima abhängig von der Breitenabschätzung des Hauptmaximums. Abbildung 7.8a zeigt das Signal mit den ermittelten Maxima bei einer gewählten Breite des Hauptmaximums von 200 kHz. In Abbildung 7.8b sind zusätzlich zwei beliebige Frequenz-Kriterien eingezeichnet, von denen nur eines erfüllt ist.



(a)



(b)

Abbildung 7.8.: Anwendung des erweiterten Frequenzkriteriums auf AE-Signale:
(a) Das Maximum des Spektrums liegt bei $f = 28,1\,\text{kHz}$. Die Breite des Maximums wurde mit 200 kHz abgeschätzt. Der Frequenzbereich $f \pm 100\,\text{kHz}$ ist somit für die Ermittlung der Nebenmaxima ausgeschlossen. Die Spitze bei $f_R = 177,0\,\text{kHz}$ wird als rechtes Nebenmaximum interpretiert (ein linkes Nebenmaximum gibt es hier nicht, da der Bereich links des Hauptmaximums durch die Breitenangabe des Hauptmaximums gesperrt ist).
(b) Hier sind mögliche Kriterien (blau) eingezeichnet. Sie wurden so gewählt dass die Lage des Hautmaximums f im Intervall $[f_{min}, f_{max}] = [0\,\text{kHz}\,, 100\,\text{kHz}]$ sein muss (erfüllt) und die Lage des rechten Nebenmaximums f_R im Intervall $[f_{Rmin}, f_{Rmax}] = [200\,\text{kHz}\,, 300\,\text{kHz}]$ sein muss (nicht erfüllt).

8. Beispielhafte Anwendung von AE-Graphics 3.5 auf Versuchsdaten

In diesem Kapitel werden die Messungen an den Proben *Carrara-alt* und *Carrara-neu* aus Kapitel 5 gegenübergestellt. Die Proben wurden im Experiment gemeinsam über einen Zeitraum von vier Tagen einem Sinus-ähnlichen Temperaturverlauf ausgesetzt. Die dabei entstandenen Schallereignisse wurden vom *Vallen AMSY-5*-Messsystem aufgenommen und anschließend in Form von Textdateien exportiert. Diese Daten bilden die Grundlage für alle weiteren Ausführungen und Diagramme.
Die Software *AE-Graphics 3.5* erlaubt es, Gruppen von Schallereignissen zu bilden, die sich in den Diagrammen durch ihre Farbe unterscheiden. Ob ein AE-Signal Element einer Gruppe ist oder nicht kann über die Eingabe von Gruppenkriterien (Kapitel 7.2) festgelegt werden. Zur anschaulichen Darstellung wurde hier auf eine Kombination verschiedener Gruppenkriterien verzichtet. Die Gruppeneinteilung erfolgt ausschließlich durch die Frequenz (bei der das Frequenzspektrum des AE-Signals ein Maximum aufweist).

8.1. Gruppendefinition nach Frequenz

Es wurden sieben Gruppen mit einem einfachen Frequenzkriterium definiert, wobei die jeweilige Frequenzbereiche so gewählt wurden, dass alle Schallereignisse erfasst werden und keine Überschneidungen zwischen den Gruppen vorhanden sind. Die Gruppen, ihre Frequenzintervalle und deren Farben im Diagramm sind in Tabelle 8.1 dargestellt.

Zur Berechnung der Diagramme wurden die Frequenzintervalle aus Tabelle 8.1 in das Gruppenfenster des Programmes *AE-Graphics 3.5* eingetragen.

Gruppe	Frequenz f [kHz]	Farbe
1	$f < 50$	
2	$50 \leq f < 100$	
3	$100 \leq f < 150$	
4	$150 \leq f < 200$	
5	$200 \leq f < 400$	
6	$400 \leq f < 600$	
7	$f \geq 600$	

Tabelle 8.1.: Einteilung der AE-Signale anhand ihrer Frequenz

8.2. Grafische Ausgabe für die Proben

Abbildung 8.1 zeigt die ausgewählten Einstellungen für die grafische Ausgabe. Bei diesem Screenshot sind die am Kanal 2 aufgenommen AE-Signale (*Carrara-alt*) für die Darstellung ausgewählt. Für die X-Achsen wurde *Zeit* mit einer Auflösung von 60 min gewählt. Die ausgegebenen Diagramme entsprechen den Abbildungen 8.3 und 8.2a. Für die Erzeugung des Diagramms 8.4 wurde für die X-Achse *Temperatur* ausgewählt, wobei die Temperaturauflösung 1°C betrug. Als Größe für die Y-Achsen wurde *Amplitude* mit einem Achsenmaximum von 70 dB gewählt. Durch die Auswahl *column* werden die aufsummierten Hits in den jeweiligen Diagrammen als Balken dargestellt. Die selben Einstellungen wurden für die Daten von Kanal 6 (*Carrara-neu*) verwendet. Die dabei erzeugten Diagramme sind in den Abbildungen 8.5, 8.6 und 8.2b dargestellt.

8.2.1. Verteilung der Schallereignisse in Frequenzgruppen

In Abbildung 8.2 ist die Verteilung der Schallereignisse auf die sieben definierten Gruppen für die beiden betrachteten Proben dargestellt. Neben der absoluten Anzahl der Hits in jeder Gruppe, ist auch die Summe aller Schallereignisse für den jeweiligen Kanal dargestellt. Unter *Gesamtzahl* ist Summe der Schallereignisse von allen sechs Kanälen angegeben. Durch die nicht überschneidende Gruppendefinitionen und der Abdeckung des gesamten vorkommenden Frequenzbereiches, ist jedes Schallereignis eindeutig einer Gruppe zugeordnet (doppelt gezählt: 0 Hits, in keiner Gruppe: 0 Hits).

Hier werden bereits deutliche Unterschiede sichtbar. Bei der verwitterten Probe *Carrara-alt* (Abbildung 8.2a) werden insgesamt 4032 Hits gezählt. Das sind mehr als doppelt so viele AE-Ereignisse wie bei der Probe *Carrara-neu* (Abbildung 8.2b). Auch

Abbildung 8.1.: Screenshot Startfenster *AE-Graphics 3.5*: Gewählte Einstellungen für die Diagrammausgabe

das Verhältnis der vorkommenden Frequenzen unterscheidet sich deutlich. Während bei *Carrara-alt* praktisch keine Schallereignisse im Frequenzintervall $50\,\text{kHz} \leq f < 100\,\text{kHz}$ (Gruppe 2 ■) liegen, sind es bei *Carrara-neu* über 200 Hits.

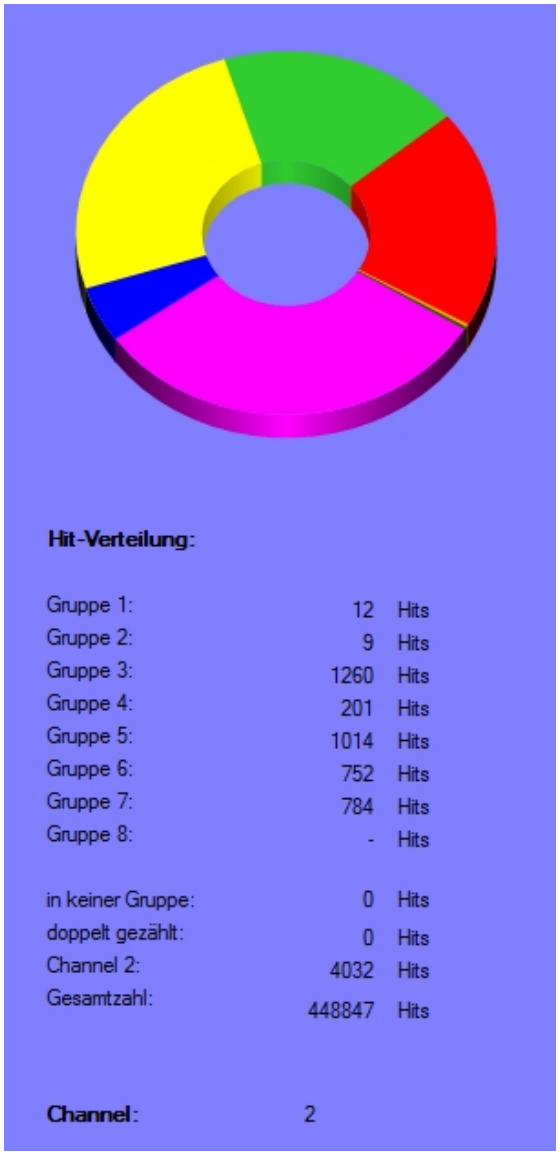
8.2.2. Diagramme für Carrara-alt

Bei der Probe *Carrara-alt* kann man durch den Vergleich mit dem Temperaturverlauf deutlich erkennen, dass es jeweils kurz vor Erreichen des Temperaturmaximums vermehrt zu Schallemissionen kommt (Abbildung 8.3). Weitere Anhäufungen von Schallereignissen treten im Bereich des Nulldurchgangs der Temperaturkurve (0°C) auf. Die Anhäufungen wiederholen sich periodisch mit der Temperatur, werden aber bei jedem Zyklus schwächer. Die Anzahl der auftretenden Schallemissionen bei Tempera-

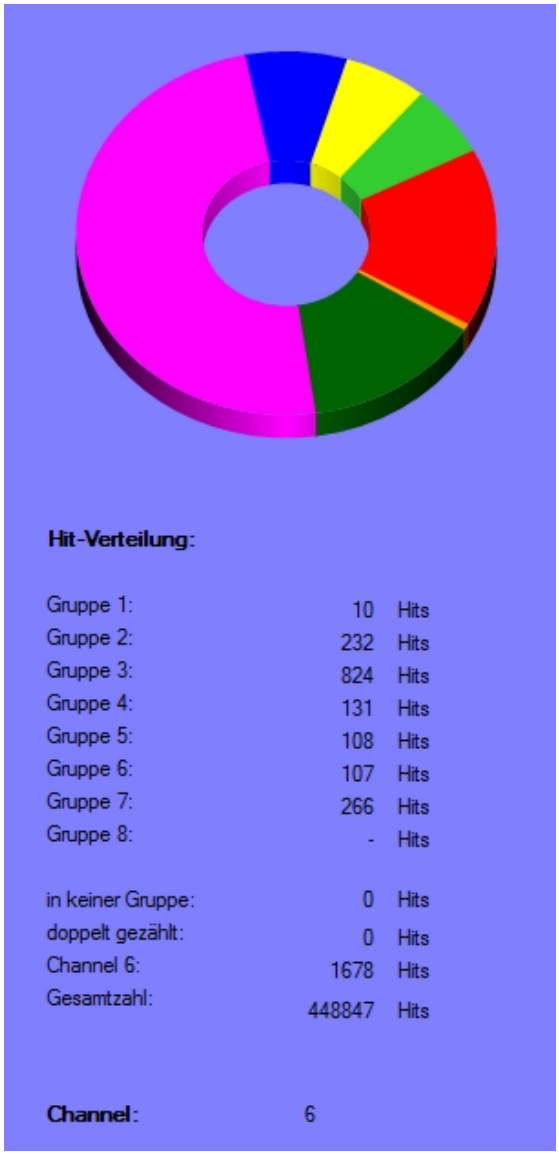
turmaxima ist deutlich größer, als die Anzahl der beim Nulldurchgang auftretenden Schallereignisse. Im Balkendiagramm der Abbildung 8.4 ist zu erkennen, dass sich die Frequenz-Verteilung der Schallereignisse bei den Temperaturmaxima mit jedem neuem Zyklus ändert. Während mit jedem Zyklus die hochfrequenten Schallsignale (Gruppen 5 ■, 6 ■, 7 ■) abnehmen, steigt der relative Anteil der AE-Signale in Gruppe 3 ■ an. Im Diagramm 8.4 ist die Verteilung der AE-Ereignisse über der Temperatur dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass Schallereignisse mit hohen Frequenzen praktisch nur bei Temperaturen größer 30°C auftreten. Im Bereich der Raumtemperatur ($\sim$ 25°C) wurden keine Schallsignale gemessen. Bei Temperaturen kleiner als Raumtemperatur ist die Verteilung relativ gleichmäßig.

8.2.3. Diagramme für Carrara-neu

In Abbildung 8.5 sind die Schallereignisse für die Probe *Carrara-neu* dargestellt. Auch hier treten Anhäufungen von AE-Ereignissen periodisch mit den Nulldurchgängen der Temperaturkurve auf. Eine bemerkenswerte Ausnahme stellt jedoch die erste Anhäufung dar, die nicht bei 0°C, sondern beim ersten Temperaturminimum (-20°C) auftritt. Es gibt nur noch einen weiteren erwähnenswerten Beitrag an AE-Ereignissen kurz vor Erreichen des ersten Temperaturmaximums. Wie schon in Abbildung 8.2b zu erkennen ist, sind es bei dieser Probe vor allem Schallereignisse niedriger Frequenz (Gruppe 2 ■, Gruppe 3 ■), die vermehrt auftreten. Im Diagramm 8.6 ist die Verteilung der Schallereignisse über der Temperatur dargestellt. Es ist zu erkennen, dass für Temperaturen größer als Raumtemperatur nur mehr vereinzelt AE-Signale gemessen wurden.



(a)



(b)

Abbildung 8.2.: Verteilung der Schallereignisse auf die Gruppen
(a) für Probe am Channel 2: *Carrara-alt*
(b) für Probe am Channel 6: *Carrara-neu*

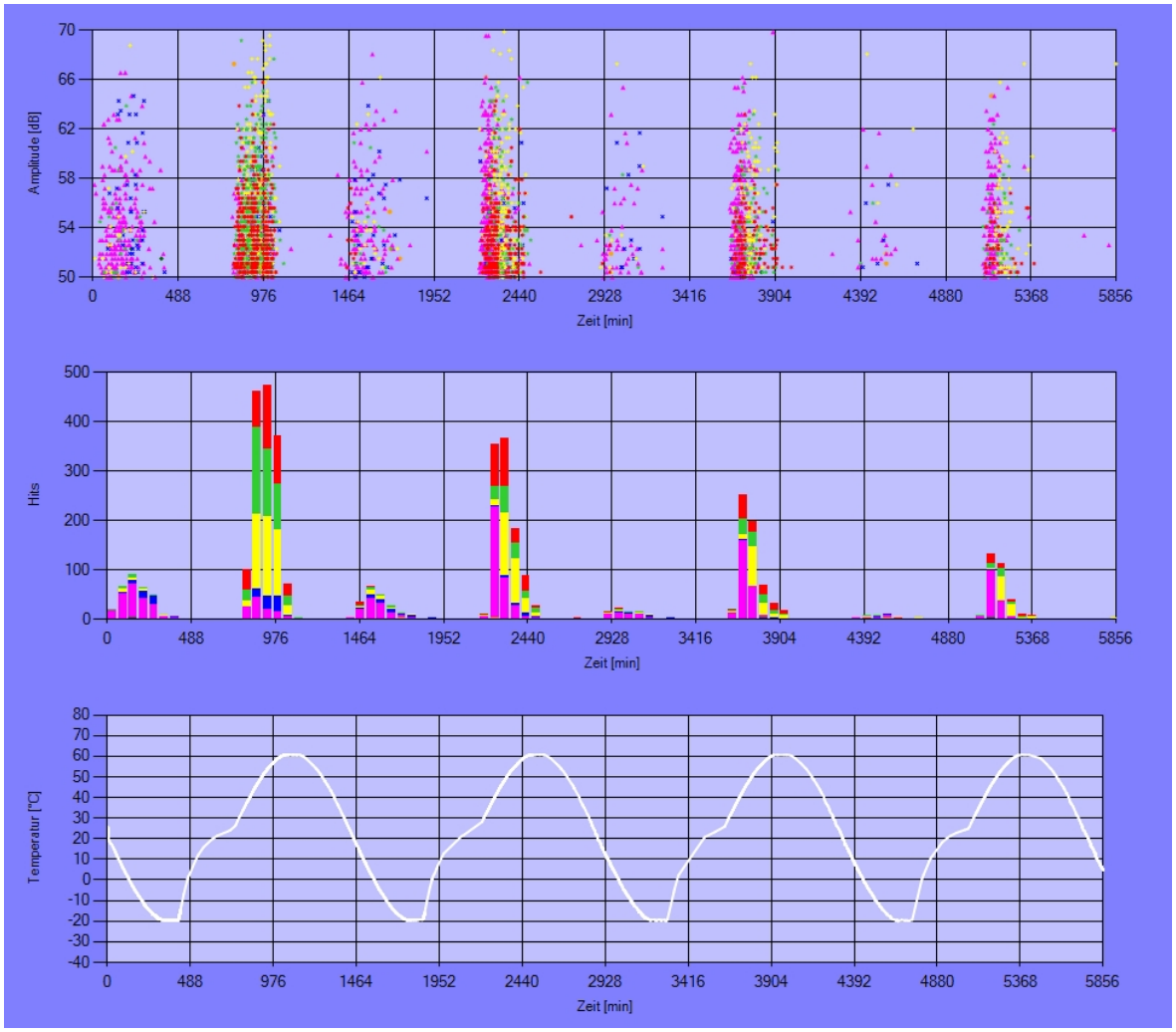


Abbildung 8.3.: Zeitverläufe *Carrara-alt*

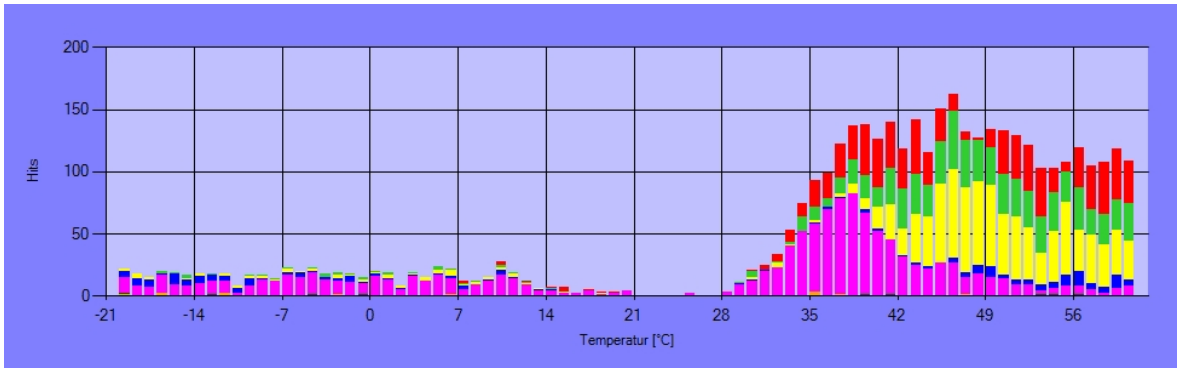


Abbildung 8.4.: Hits-Temperatur-Diagramm, *Carrara-alt*

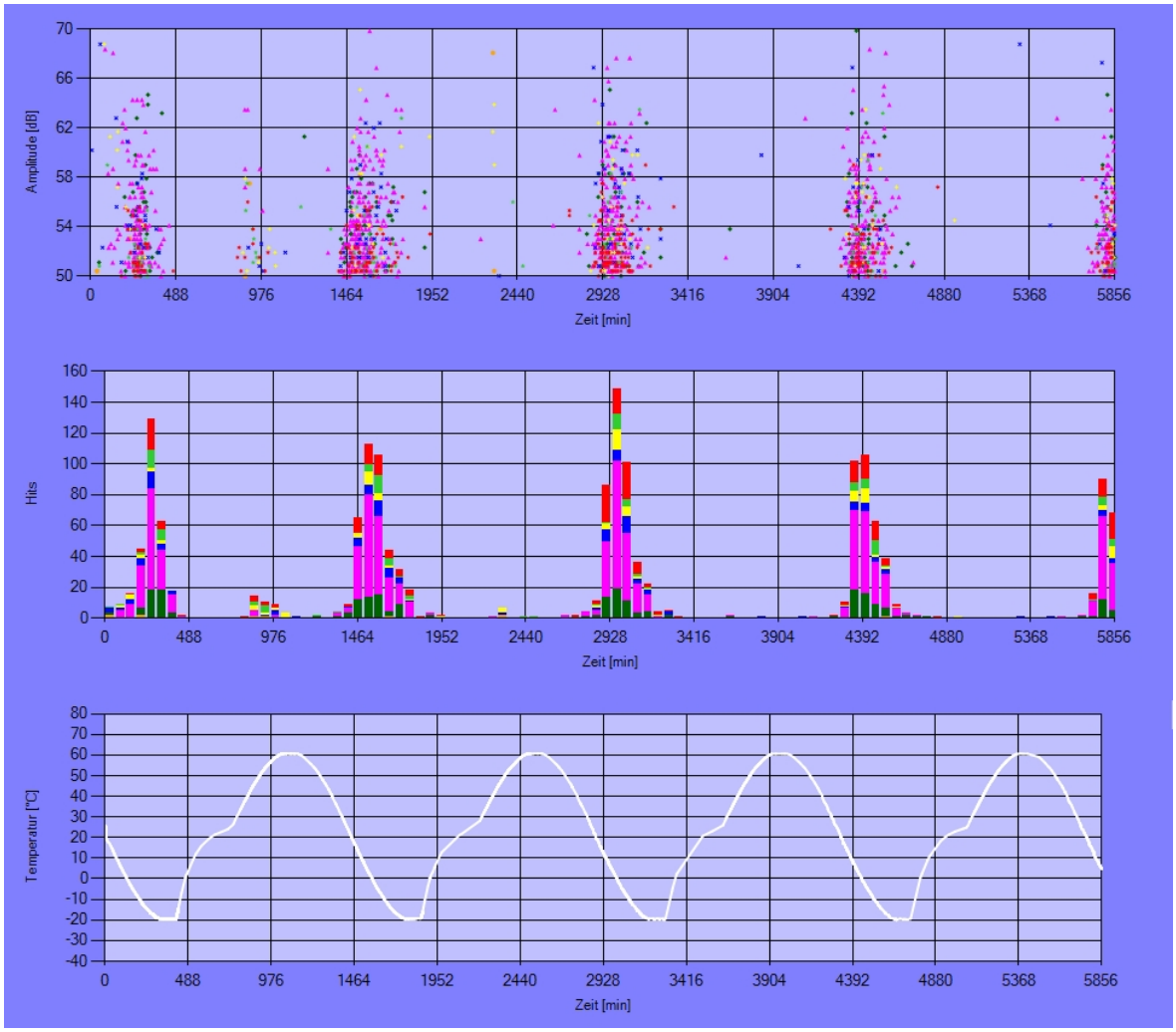


Abbildung 8.5.: Zeitverläufe *Carrara-neu*

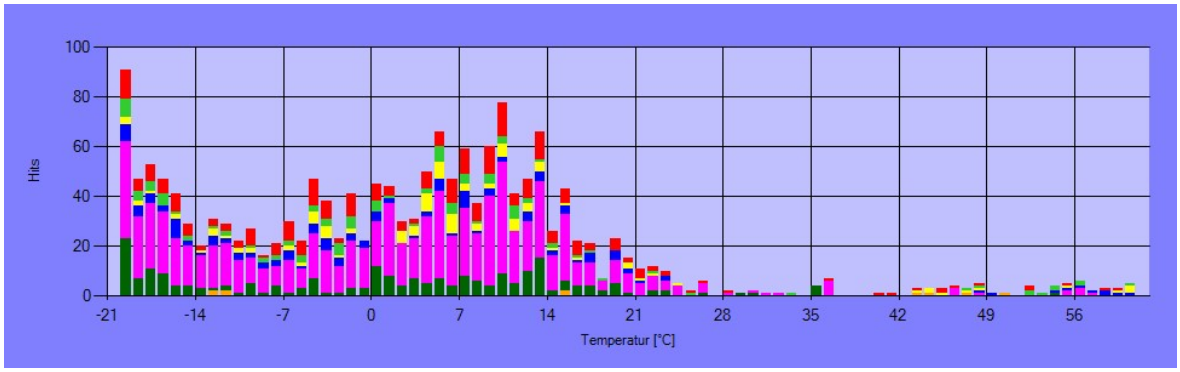


Abbildung 8.6.: Hits-Temperatur-Diagramm, *Carrara-neu*

9. Schlussbetrachtungen

9.1. Zusammenfassung

Die Klassifizierung der AE-Signale in Gruppen mit der Software *AE-Graphics 3.5* ermöglicht es, verschiedene Arten von AE-Signalen getrennt darzustellen. Eine mögliche Trennung der Gruppen mit einem Frequenzkriterium erfolgte im Kapitel 8 dieser Arbeit. Die zwei untersuchten Marmorproben *Carrara-alt* und *Carrara-neu* zeigen eine deutlich unterschiedliche Anzahl und Verteilung von Schallereignissen bei zyklischer Temperaturveränderung. Geht man davon aus, dass das Schadensausmaß proportional zu den emittierten AE-Signalen ist, so entstanden im bereits vorgeschädigten, verwitterten Material deutlich mehr Schäden bei der experimentellen Temperatureinwirkung. Vor allem bei hohen Temperaturen war die AE-Ereignisrate sehr hoch, was in diesem Fall Gefriersprengprozesse als Hautursache für die Schädigung ausschließt (siehe Phasenmodell in Kapitel 4.2).

Neben der beispielhaften Anwendung hier, fand die Software Verwendung in der Dissertation *Schallemissionsuntersuchungen an Natursteinen* [13] von V. Gräf, in der verschiedene Natursteinproben mit AE-Analytik untersucht und verglichen wurden. Es hat sich gezeigt, dass die Software sich eignet um AE-Signale statistisch zu untersuchen und das Schadensausmaß in der Probe abzuschätzen. Um allerdings konkrete Aussagen über die Schädigungsmechanismen in den Proben ableiten zu können, reicht die AE-Analyse mit *AE-Graphics 3.5* nicht aus.

9.2. Ausblick

Die Software ermöglicht eine Einteilung der AE-Signale nach den Parametern Amplitude, Energie und Frequenz. Es wäre möglich weitere AE-Parameter als Unterscheidungsmerkmale in die Software zu integrieren. Allerdings hat sich gezeigt, dass eine zu „scharfe“ Kriterienwahl meist zu einer starken Verringerung der Hit-Anzahl in der

jeweiligen Gruppe führt und somit die statistische Aussagekraft darunter leidet. Da die AE-Signale in ihrer gesamten Wellenform vorliegen, wäre es auch möglich eine Gruppeneinteilung nach Ähnlichkeit der Zeit- oder Frequenzverläufe zu realisieren (quantitative AE-Analyse).

Einer kritischen Betrachtung müssen auch die gemessenen AE-Signale an sich unterzogen werden. Vom Sensor werden die Bewegungen an der Oberfläche des Probekörpers erfasst, wobei unberücksichtigt bleibt, an welchem Punkt im Probekörper das AE-Signal entstanden ist und wie es sich vom Ursprungsort bis zur Detektion an der Oberfläche verändert hat. Zwar gibt es Modelle, welche die Schallausbreitung in Festkörpern gut beschreiben (vgl. hierzu beispielsweise [28], [14]), allerdings setzt die Anwendbarkeit dieser Modelle ein isotropes, homogenes Material voraus. Neben der natürlichen Intensitätsverringerung durch die Zunahme der Wellfrontfläche bei der Schallausbreitung, kommt auch noch eine mögliche Richtwirkung hinzu. Durch die beschränkte Probengröße sind auch Reflexionen der Schallwellen an den Körperoberflächen nicht zu vernachlässigen.
Eine zusätzliche Lokalisierung des AE-Quellortes könnte weiteren Aufschluss über den Schadensprozess (wie z. B. eine Rissbildung oder Rissverlängerung) im Material geben. Die Ortung von Schäden ist durch Einsatz von mehreren Sensoren an der Körperfläche und der Messung der jeweiligen Signal-Laufzeitunterschiede möglich und findet bereits in vielen Gebieten, wie z. B. der Prüfung von metallischen Druckbehältern [44], Ortung von Rissen in Steinsalz und Granit oder Quellenortung von Erdbeben [14] Anwendung. Voraussetzungen für eine hinreichend genaue Ortung sind allerdings eine große Probendimension (größere Laufzeitunterschiede, wenig Reflexionen) und ein homogenes Material für eine gleichmäßige Ausbreitung der Wellen [14].

Literaturverzeichnis

[1] R. Perrier A. Bouineau. La décohésion granulaire, maladie des revêtements de façades en marbre. *Mines et Carriéres*, pages 69–77, 1995.

[2] Geber the Arabian and W. R. Newman. *The Summa Perfectionis of Pseudo-Geber - A Critical Edition, Translation and Study.* BRILL, Leiden, 1991.

[3] Archiv des Bundesdenkmalamt. *Die Kirche am Steinhof.* online: `www.bda.at/text/136/908/8413`. 2013.08.25.

[4] W. Eppensteiner B. Schwaighofer. Gesteine - Gewinnung & Verarbeitung. *Mitteilungen - Institut für Angewandte Geologie, Universität für Bodenkultur Wien*, 2003.

[5] I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew, G. Musiol, and H. Muehlig. *Taschenbuch der Mathematik.* Harri Deutsch Verlag, Thun, Frankfurt am Main, 2008.

[6] J. W. Cooley and J. W. Tukey. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics Computation*, 19:297–301, 1965.

[7] J. Czochralski. Die Metallographie des Zinns und die Theorie der Formänderung bildsamer Metalle. *Metall und Erz*, XIII:381–393, 1916.

[8] W. Demtröder. *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme.* Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2006.

[9] Deutsche Gesellschaft für Akustik. *DEGA-Empfehlung 101. Akustische Wellen und Felder.* online: `http://www.dega-akustik.de/publikationen/DEGA_Empfehlung_101.pdf`, 2006. 2013.10.18.

[10] DIN 66001. *Informationsverarbeitung Sinnbilder für Datenfluß- und Programmabläufe*, 1966.

[11] F.Förster and E. Scheil. Akustische Untersuchungen der Bildung von Martensitnadeln. *Zeitschrift für Metallkunde*, 29/9:245–247, 1936.

[12] A. Rohatsch G. Fleischer. Untersuchungen zur Generalsanierung der Kirche St. Leopold "am Steinhof" in Wien. *Referateband, 11. Wiener Sanierungstage 27.-28.03.2003, Institut für Bauschadensforschung, Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik*, 2003.

[13] V. Gräf. *Schallemissionsuntersuchungen an Natursteinen.* PhD thesis, Technische Universität Wien, 2012.

[14] C. U. Grosse and M. Ohtsu. *Acoustic Emission Testing.* Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.

[15] A. Joffe. *The Physics of Crystals.* McGraw-Hill Book, 1928.

[16] J. Kaiser. *Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch.* PhD thesis, Technische Hochschule München, 1950.

[17] A. Kalweit. *Handbuch für technisches Produktdesign - Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure.* Springer DE, Berlin, 2006.

[18] W. Köhler. Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara-Marmor in Potsdam-Sanssouci. *Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland*, 2:50–54, 1989.

[19] A. Kieslinger. Gesteinskundliche Untersuchungen an alten Grabsteinen. *Geologie und Bauwesen*, 6:1–21, 1934.

[20] F. Kishinoue. An experiment on the progression of fracture. *Jisin*, 6:24–31, 1934.

[21] A. Koch. *Deformation von Fassadenplatten aus Marmor: Schadenskartierungen und gesteinstechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden.* PhD thesis, Georg-August-Universität zu Göttingen, 2005.

[22] K.W.F. Kohlrausch, G. Lautz, and V. Kose. *Praktische Physik 3. Tabellen und Diagramme.* Teubner, 1986.

[23] S. Köppel. *Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Stahlbetontragwerken.* PhD thesis, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 2002.

[24] W. Köhler L. Goretzki, M. Fütling. Untersuchungen zur Korrosion der Marmorskulpturen im Park von Potsdam-Sanssouci. *Zeitschrift für Bauinstandhaltung und Denkmalpflege*, 3:104–109, 1987.

[25] C. B. Lang and N. Pucker. *Mathematische Methoden in der Physik.* Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2005.

[26] N. Langner and K. W. Liersch. *Bauphysik kompakt: Wärme, Feuchte, Schall.* Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zurich, 2011.

[27] F. P. León, U. Kiencke, and H. Jäkel. *Signale und Systeme.* Oldenbourg Verlag, 2010.

[28] R. K. Miller. *Nondestructive Testing Handbook.* American Society for Nondestructive Testing, 1987.

[29] M. Möser. *Messtechnik der Akustik.* Springer DE, Berlin, 2010.

[30] M. Möser and W. Kropp. *Körperschall: Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen.* Springer, Berlin, 2010.

[31] B. Muravin. Acoustic Emission Science and Technology. *Journal of Building and Infrastructure Engineering of the Israeli Association of Engineers and Architects*, 2009.

[32] G. Neroth and D. Vollenschaar. *Wendehorst Baustoffkunde.* Springer DE, Berlin, 2011.

[33] M. Okrusch and S. Matthes. *Mineralogie - eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstattenkunde.* Springer DE, Berlin, 2010.

[34] A. Portevi and F. Le Chatelier. Sur un Phénomène Observé lors de I'Essai de Traction d'Alligages en Cours de Transformation. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences*, 176:507–510, 1923.

[35] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery. *Numerical Recipes 3rd Edition - The Art of Scientific Computing.* Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

[36] D. Reinsch. *Natursteinkunde - Eine Einführung Für Bauingenieure, Architekten, Denkmalpfleger Und Steinmetze.* Enke, Stuttgart, 1991.

[37] G. Royer-Carfagni. Some considerations on the warping of marble façades: the example of Alvar Aalto's Finland Hall in Helsinki. *Construction and Building Materials*, 13:449–457, 1999.

[38] U. Sebastian. *Gesteinskunde - Ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender.* Springer DE, Berlin, 2011.

[39] F. Sheremeti-Kabashi. *Untersuchungen der Gefügeanisotropie von Carrara-Marmor und deren Einfluss auf die Verwitterung.* PhD thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2002.

[40] S. W. Smith. *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing.* California Technical Pub, 1997.

[41] E. K. Tschegg. *Umwelteinflüsse auf die Schädigung und Zerstörung des Gefüges an Gesteinen.* Technical report, Labor für Materialwissenschaften, Institut für Hochbau und Technologie der technischen Universität Wien, 2009.

[42] E. K. Tschegg, C. Widhalm, and W. Eppensteiner. Ursachen mangelnder Formbeständigkeit von Marmorplatten. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 150(2):283–297, 01 1999.

[43] K. Umlaub. Schädigung und Wölbung von Marmorfassadenpatten durch Witterungseinflüsse. Master's thesis, Technische Universität Wien, 2011.

[44] H. Vallen. *Die Schallemissionsprüfung*, volume 6 of *ZfP kompakt und verständlich*. Castell-Verlag, 2003.

[45] Wirtschaftsinfo Rund um Wien. Otto-Wagner-Kirche. online: `www.stadt-wien.at/wien/sehenswuerdigkeiten/kirchen/otto-wagner-kirche.html`. 2013.07.20.

A. Format der Textdateien

Basis für die Anwendung der Software *AE-Graphics 3.5* sind Daten, die in Form von Textdateien gespeichert sind. Zu jedem Versuch werden aus der *Vallen AE-Suite* zwei Textdateien exportiert, deren Formatierung im Folgenden kurz beschrieben wird.

A.1. Formatierung der ersten Textdatei

Die Textdatei, die zuerst geöffnet werden muss, enthält die Zeitverläufe aller aufgenommenen Hits. Sie wird benötigt um das Frequenzspektrum zu berechnen. Am Anfang der Datei steht ein elfzeiliger Textkopf. Dieser wird nach dem erfolgreichen Öffnen der Datei im Startfenster angezeigt. Im Anschluss an den Textkopf beginnen die aufgezeichneten AE-Signale. Jedes aufgezeichnete AE-Signal (Set) besteht aus 4096 Amplitudenwerten, wobei jede Zeile einen Wert enthält. Jedes neue Datenset wird mit einer Zeile der Form "[Set x of y Channel$z$ Time d hh:mm:ss µs]" eingeleitet, wobei x die aktuelle Set-Nummer, y die Gesamtzahl an aufgenommen Sets und z der dazugehörige Messkanal ist. Der Zeitstempel gibt den Aufnahmezeitpunkt wieder. Abbildung A.1 zeigt ein Beispiel für die Form dieser Datei.

A.2. Formatierung der zweiten Textdatei

Die zweite Textdatei, die geöffnet werden muss, enthält die von der *Vallen AE-Suite* berechneten AE-Parameter. In Abbildung A.2 ist die Formatierung dieser Datei dargestellt. Eine Zeile der Textdatei entspricht einem erfassten AE-Signal (Hit). Die mit Tabstopps getrennten Spalten enthalten die AE-Parameter des jeweiligen Signals. Die Spaltenparameter sind hier kurz zusammengefasst (eine genauere Beschreibung der Bedeutung der AE-Parameter findet sich in Kapitel 3.4.1 und Anhang C):

- Id: Ht für Hit

- TRAI: fortlaufende Nummerierung (Transienten-Recorder Index)
- CHAN: Messkanal, an dem Signal gemessen wurde
- DAY: Zeitdauer vom Beginn der Messung bis zur Aufnahme des entsprechenden AE-Signals in [Tagen]
- HHMMSS: Zeitdauer vom Beginn des Messtages bis zum entsprechenden AE-Signal in [hh:mm:ss]
- A: Amplitude des Signals in [dB]
- R: Anstiegszeit in der AE-Wellenfront [µs]
- THR: Schwellenamplitude in [dB], deren erste Überschreitung den Start des Hits festlegt
- E(TE): Energie des Signals in [eu]
- D: Signaldauer in [µs]
- PA0: Zusätzlicher analoger Messkanal in [mV] (Dieser wurde benutzt um die Temperatur zum Emissionszeitpunkt des jeweiligen Signals zu erfassen. Zwischen PA0 in mV und der Temperatur in °C besteht der lineare Zusammenhang: $T[^\circ C] = -251.18 + 0.093 * PA0[mV]$.)
- PA1: weiterer analoger Messkanal
- DSET: Datenset-Nummer

A.3. Formatierung der Filter-Datei

Die Filterdatei enthält die Gruppenkriterien in Form von Intervallen der AE-Parameter. Diese Datei mit der Dateiendung ".filter" wird automatisch mit der Diagrammgrafik abgespeichert. Sie enthält neben den gewählten Gruppenintervallen auch allgemeine Informationen zur Messung, sowie die gewählte Zeit- bzw. Temperaturauflösung, den betrachteten Messkanal und optional die Breite des Hauptmaximums im Frequenzspektrum. Eine Filterdatei kann im Gruppenfenster geöffnet werden, wobei die Filterwerte in die Eingabemaske des Gruppenfensters übernommen. Bei Anwendung der selben Gruppenkriterien auf viele verschiedene Messungen bietet sich die Verwendung einer Filterdatei an, da die manuelle Eingabe der Intervallwerte entfällt. Die Formatierung einer Filterdatei ist in Abbildung A.3 dargestellt.

Datei1 - Editor

Datei Bearbeiten Format Ansicht ?

```
ActiveX Version: 2010.0202
[File Info]
File name: g:\20100827_AlleimDewer_1u2Manner_3u4ITQ2_5u6POQ3.tra
File type: AMSY4/AMSY5
Sample rate [Hz]: 5000000
Sets on File: 408
Samples / Set: 4096
[Export Info]
Export File: c:\vallen\api\20100827_AlleimDewer_1u2Manner_3u4ITQ2_5u6POQ3.txt
PreTrigger Samples: 200
VTR.VScaleFactor: 4,825253E-03

Scaled Data [mV]
[Set 1 of 408 Channel1 Time   0 00:01:01 895,5049]
0
0
0
0
-1
-2
-2
-2
0
0
1
1
0
0
0
0
-1
-2
-3
-2
-1
0
1
2
3
2
2
1
1
1
0
0
0
-1
-2
-1
0
1
1
1
0
0
0
0
1
0
0
```

Abbildung A.1.: Formatierung der ersten Textdatei *Datei1.txt*

Datei2 - Editor

Datei Bearbeiten Format Ansicht ?

```
Id      TRAI CHAN  DAY   HHMMSS    A       R  THR   E(TE)        D     PA0     PA1       DSET
                         [hhmmss] [dB]    [µs] [dB]    [eu]     [µs]    [mV]    [mV]
La Label  1: '10:18 Resume'
DT Mittwoch, 01. September 2010, Host Time: 10:18
Ht         1    2    0 00:00:09 67,3    15,6 50,0  428E01   153,6 2970,31   0,313        15
Ht         2    4    0 00:05:44 63,2    30,6 50,0  316E01   188,8 2902,50  -0,313       593
Ht         3    3    0 00:05:44 67,7    29,8 50,0  548E01   214,2 2902,50  -0,313       594
Ht         4    3    0 00:05:46 57,2    13,0 50,0  467E00    57,2 2902,81   0,313       598
Ht         5    4    0 00:05:46 53,4    11,8 50,0  283E00    68,6 2902,81   0,313       599
Ht         6    3    0 00:06:21 67,7    38,2 50,0  144E02   193,2 2901,88   0,313       665
Ht         7    4    0 00:06:21 61,7     6,4 50,0  205E01   115,8 2901,88   0,313       666
Ht         8    3    0 00:07:02 52,3     0,4 50,0  653E-1     5,4 2901,56   0,000       738
Ht         9    3    0 00:07:11 63,2    51,4 50,0  497E01   114,2 2901,56  -0,313       756
Ht        10    4    0 00:07:11 61,3     8,2 50,0  134E01    82,8 2901,56  -0,313       757
Ht        11    3    0 00:07:15 59,0    49,2 50,0  208E01   102,6 2901,25   0,000       763
Ht        12    4    0 00:07:15 54,5     1,4 50,0  251E00    57,6 2901,25   0,000       764
Ht        13    1    0 00:10:58 52,3    14,4 50,0  204E00    22,8 2884,38   0,313      1146
Ht        14    6    0 00:11:51  102    80,2 50,0  240E05   946,8 2880,94   0,000      1243
Ht        15    5    0 00:11:51 97,8    55,4 50,0  186E05   917,2 2880,94   0,000      1244
Ht        16    1    0 00:12:16 62,0     6,8 50,0  186E01   156,0 2880,94   0,313      1286
Ht        17    1    0 00:12:49 63,9    30,8 50,0  438E01   253,0 2880,94  -0,313      1343
Ht        18    1    0 00:12:52 56,0    22,8 50,0  633E00    41,4 2880,94   0,313      1355
Ht        19    3    0 00:14:19 52,6    40,0 50,0  296E00    56,2 2881,56   0,000      1501
Ht        20    2    0 00:15:05 53,4     6,4 50,0  265E00    30,2 2882,19  -0,313      1586
Ht        21    2    0 00:19:33 71,1    15,8 50,0  229E02   269,6 2879,06   0,000      2046
Ht        22    1    0 00:19:59 70,3     0,8 50,0  320E01    94,0 2879,38   0,000      2090
Ht        23    1    0 00:20:09 57,2     3,2 50,0  484E00    26,0 2879,69  -0,313      2109
Ht        24    1    0 00:20:21 71,4     0,8 50,0  491E01    94,6 2880,00   0,000      2138
Ht        25    2    0 00:20:30 52,6     6,8 50,0  189E00    10,6 2880,00  -0,313      2156
Ht        26    1    0 00:20:47 71,8     0,8 50,0  562E01    94,8 2878,75  -0,313      2183
Ht        27    1    0 00:20:59 75,2     0,8 50,0  104E02   114,6 2875,00   0,313      2205
Ht        28    1    0 00:21:05 68,1     0,6 50,0  243E01    77,2 2873,13   0,313      2221
Ht        29    1    0 00:22:02 61,7     0,6 50,0  108E01    54,6 2866,56   0,313      2324
Ht        30    1    0 00:22:10 72,6     0,8 50,0  638E01    95,0 2865,94   0,625      2342
Ht        31    1    0 00:22:17 67,7     0,8 50,0  221E01    70,0 2866,25   0,313      2352
Ht        32    1    0 00:22:27 51,1     0,2 50,0  126E00     0,6 2865,94   0,000      2372
Ht        33    6    0 00:22:51 50,8     0,4 50,0  569E-1     0,6 2866,56   0,000      2419
Ht        34    4    0 00:22:54 66,9    35,0 50,0  716E01   212,6 2866,25   0,625      2425
Ht        35    3    0 00:22:54 72,6    29,6 50,0  161E02   244,8 2866,25   0,625      2426
Ht        36    2    0 00:23:59 55,6    15,8 50,0  728E00   100,8 2866,88   0,313      2535
Ht        37    2    0 00:25:12 51,1     0,2 50,0  103E00     0,4 2867,81   0,313      2668
Ht        38    2    0 00:26:07 60,5    42,6 50,0  117E01    86,6 2869,06   0,313      2761
Ht        39    2    0 00:26:21 53,4     0,4 50,0  947E-1     3,8 2865,63  -0,313      2792
Ht        40    6    0 00:26:28 83,5     4,6 50,0  184E03   243,2 2864,69   0,000      2801
Ht        41    5    0 00:26:28 78,6     9,2 50,0  592E02   210,6 2864,69   0,000      2802
Ht        42    6    0 00:26:56 51,1     0,6 50,0  239E00    35,8 2862,19   0,000      2855
Ht        43    5    0 00:26:56 50,0     0,2 50,0  981E-1     0,2 2862,19   0,000      2856
Ht        44    6    0 00:28:02 55,3     1,0 50,0  285E00    28,0 2862,81   0,313      2974
Ht        45    5    0 00:28:02 50,8     0,6 50,0  777E-1     1,0 2862,81   0,313      2975
Ht        46    2    0 00:29:21 51,9    37,0 50,0  291E00    43,6 2863,13   0,000      3113
Ht        47    1    0 00:29:36 72,2     0,8 50,0  520E01    94,6 2859,69  -0,313      3137
Ht        48    1    0 00:30:22 64,3     1,0 50,0  246E01    72,2 2855,94   0,000      3220
Ht        49    1    0 00:30:35 54,9     4,0 50,0  557E00    41,2 2856,25  -0,313      3243
Ht        50    1    0 00:30:57 58,3    16,6 50,0  698E00   103,2 2856,25  -0,313      3281
Ht        51    2    0 00:30:59 50,0     0,2 50,0  143E00     0,2 2856,56  -0,313      3285
Ht        52    1    0 00:31:16 64,3     3,8 50,0  239E01    72,2 2855,94   0,313      3318
Ht        53    1    0 00:31:33 59,0     3,6 50,0  118E01    54,8 2856,56   0,000      3353
Ht        54    1    0 00:31:50 61,3     0,6 50,0  181E01    71,8 2856,88   0,313      3379
Ht        55    6    0 00:32:38 52,6    19,6 50,0  205E00    20,4 2857,81   0,313      3465
Ht        56    6    0 00:33:53 57,9    16,2 50,0  426E00    46,8 2856,25   0,000      3600
Ht        57    5    0 00:33:53 51,1     6,8 50,0  228E00    22,6 2856,25   0,000      3601
```

Abbildung A.2.: Formatierung der zweiten Textdatei *Datei2.txt*

Versuch1 - Editor

Datei Bearbeiten Format Ansicht ?

```
Dateiname:                          Versuch1
SampleRate [Hz]:                    5000000
Sets:                               8534
Samples/Set:                        4096
Pre-Trigger Samples:                200
Scale Factor [mV]:                  4,825253E-03

Zeitauflösung [min]:                60
Kanal:                              1


Filtereinstellungen:

                Ansicht         Energie         Amplitude       Frequenz        FrequenzL.      FrequenzR

Gruppe 1:       True    |9,47|29800001| |50|105|        |0|50|  |0|2501|        |0|2501|
Gruppe 2:       True    |9,47|29800001| |50|105|        |50|100|        |0|2501|        |0|2501|
Gruppe 3:       True    |9,47|29800001| |50|105|        |100|150|       |0|2501|        |0|2501|
Gruppe 4:       True    |9,47|29800001| |50|105|        |150|200|       |0|2501|        |0|2501|
Gruppe 5:       True    |9,47|29800001| |50|105|        |200|400|       |0|2501|        |0|2501|
Gruppe 6:       True    |9,47|29800001| |50|105|        |400|600|       |0|2501|        |0|2501|
Gruppe 7:       True    |9,47|29800001| |50|105|        |600|2501|      |0|2501|        |0|2501|
Gruppe 8:       True    |9,47|29800001| |50|105|        |0|2501|        |0|2501|        |0|2501|

Breite des Hauptmaximas [kHz]:          100
```

Abbildung A.3.: Formatierung der Filter-Datei *Versuch1.filter*

B. Quellcode

Die folgenden Seiten beinhalten den Quellcode von *AE-Graphics 3.5* in *Visual Basic*. Der Code besteht aus vier Teilen. Diese vier Teile entsprechen dem Code des Startfensters, des Gruppenfensters, des FFT-Fensters und des Diagrammfensters. Die entsprechenden optischen Fensterelemente wie Buttons, Eingabeboxen, Diagramme usw. wurden im *Ansicht-Designer* der Entwicklungsumgebung *Microsoft Visual Studio 2010 Express* erstellt.

D:\Dropbox\Diplomarbeit\AE Software 3.5\WindowsApplication1\WindowsApplication1\Startfenster.vb 1

```
1  Imports System.IO
2
3  Public Class Startfenster
4
5      Public Info(12) As String               '
6      Public Dateiname As String              '
7      Public Hits As String                   '
8      Public SampleRate As String             '    Information aus der Textdatei 1
9      Public SamplesPerHit As String          '
10     Public PreTriggerSamples As String      '
11     Public ScaleFactor As String            '
12
13     Public Channel() As String              '
14     Public Zeit() As String                 '
15     Public Amplitude() As String            '
16     Public Energie() As String              '   Charakteristische Größen der Sets
17     Public Temperatur() As String           '   (Dimension wird dynamisch auf Setanzahl (aus Textdatei 1) festgelegt)
18     Public Frequenz() As String             '
19     Public FrequenzL() As String            '
20     Public FrequenzR() As String            '
21
22     Public minZeit As Double                '
23     Public maxZeit As Double                '
24     Public minTemp As Double                '
25     Public maxTemp As Double                '
26     Public minE As Double                   '   Default-Filtergrenzwerte
27     Public maxE As Double                   '
28     Public minA As Double                   '
29     Public maxA As Double                   '
30     Public minF As Double                   '
31     Public maxF As Double                   '
32     Public steps As Integer
33     Public dt As Double                     '   Zeit-/Temperaturauflösung
34
35
36     Public Kanal As Integer                 '   Kanalauswahl (1-6)
37     Public FrequIntervall As Double         '   geschätzte Breite des Hauptmaximums im Frequenzspektrum
38
39     Public Filter(8, 11) As Double          '   Filtermatrix:  Zeilen: Gruppe: 1-8, Spalten: 10 Filter-Grenzwerte MIN/MAX
40     Public Gruppen(8, 0) As Boolean         '   Gruppenmatrix: Zeilen: Gruppe: 1-8, Spalten: Set passiert Filter (=true) ; Spaltendimension wird dynamisch ↙
       auf Setanzahl gesetzt
41
42     Public Kurve(8, 0)
43     Public Gruppenauswahl(8) As Boolean     '   Gruppenauswahl = true, wenn Gruppe im Diagramm aufscheint
44     Public zähler(8) As Integer             '   Set-Zähler: Zählt alle Sets einer Gruppe
45     Public Überschneidungen As Integer      '   Anzahl der Sets die zu 2 Gruppen beitragen
46     Public Gruppenlos As Integer            '   Anzahl der Sets die zu keiner Gruppe beitragen
47     Public xAchse()
48     Public yTemperaturAchse() As Double
```

D:\Dropbox\Diplomarbeit\AE Software 3.5\WindowsApplication1\WindowsApplication1\Startfenster.vb 2

```
49
50
51     Private Sub Öffnen1Button_Click() Handles Öffnen1Button.Click
52
53         dt = 60
54         FrequIntervall = 100
55
56         DatenBox.Visible = False
57         xAchsenBox.Visible = False
58         GruppenBox.Visible = False
59         GruppenButton.Visible = False
60         DiagrammeButton.Visible = False
61         Gruppenauswahl(0) = True
62
63         Dim StringTeile() As String
64
65         OpenFileDialog1.Filter = "Textdateien (*.txt)|*.txt"
66
67         If OpenFileDialog1.ShowDialog() = DialogResult.OK Then
68             Dim reader As New StreamReader(OpenFileDialog1.FileName)
69
70             'Textkopf der Datei in Info-Array einlesen:
71
72             For i = 0 To 12
73                 Info(i) = reader.ReadLine
74
75                 If Info(i) = Nothing Then
76                     Info(i) = " "
77                 End If
78
79             Next
80
81             If (Info(0).Chars(0) = "A" And Info(1).Chars(0) = "[" And Info(10).Chars(0) = "V") Then
82
83                 StringTeile = Info(8).Split("\")
84                 Dateiname = StringTeile(StringTeile.Length - 1)
85                 Dateiname = Dateiname.Substring(0, Dateiname.IndexOf("."))
86
87                 StringTeile = Info(4).Split(" ")
88                 SampleRate = StringTeile(StringTeile.Length - 1)
89
90                 StringTeile = Info(5).Split(" ")
91                 Hits = StringTeile(StringTeile.Length - 1)
92
93                 StringTeile = Info(6).Split(" ")
94                 SamplesPerHit = StringTeile(StringTeile.Length - 1)
95
96                 StringTeile = Info(9).Split(" ")
97                 PreTriggerSamples = StringTeile(StringTeile.Length - 1)
```

```
                StringTeile = Info(10).Split(" ")
                ScaleFactor = StringTeile(StringTeile.Length - 1)

                DateiNameLabel.Text = Dateiname
                SampleRateLabel.Text = SampleRate & " Hz"
                SetsLabel.Text = Hits
                SamplesPerSetLabel.Text = SamplesPerHit
                PreTriggerSamplesLabel.Text = PreTriggerSamples
                ScaleFactorLabel.Text = ScaleFactor & " mV"

                DatenBox.Visible = True
                Öffnen1Button.Visible = False
                Öffnen2Button.Visible = True

                InfoLabel.Text = "Eine Datei, die tabellarische Informationen zu den Sets enthält, muss geöffnen werden"

            Else

                MsgBox("Fehler beim Öffnen: Möglicherweise hat die Textdatei eine nicht korrekte Formatierung!", , "Fehlermeldung")

            End If

        End If

    End Sub


    Sub Öffnen2Button_Click() Handles Öffnen2Button.Click

        Dim Temp(Hits + 1) As String
        Dim StringTeile() As String
        Dim Tag(Hits) As String

        Dim i As Integer

        ReDim Channel(Hits + 10)
        ReDim Zeit(Hits)
        ReDim Amplitude(Hits)
        ReDim Energie(Hits)
        ReDim Temperatur(Hits)
        ReDim Frequenz(Hits)
        ReDim FrequenzL(Hits)
        ReDim FrequenzR(Hits)
        ReDim Gruppen(8, Hits)
        ReDim yTemperaturAchse(Hits)

        ListBox1.Items.Add("2")
        ListBox1.Items.Add("3")
```



```
        ListBox1.Items.Add("4")
        ListBox1.Items.Add("5")
        ListBox1.Items.Add("6")
        ListBox1.Items.Add("7")
        ListBox1.Items.Add("8")
        ListBox1.SelectedIndex = 2


        OpenFileDialog2.Filter = "Textdateien (*.txt)|*.txt"

        If OpenFileDialog2.ShowDialog() = DialogResult.OK Then
            Dim reader As New StreamReader(OpenFileDialog2.FileName)

            For i = 0 To 3
                Info(i) = reader.ReadLine

                If Info(i) = Nothing Then
                    Info(i) = " "
                End If

            Next
            i = 1

            If (Info(0).Chars(0) = "I" And Info(1).Chars(0) = " " And Info(3).Chars(0) = "D") Then

                While reader.Peek() > -1

                    Temp(i) = reader.ReadLine

                    If (Temp(i).Chars(0) = "H" And Temp(i).Chars(11) <> " ") Then                                    ' ignoriert Zeilen ohne Setnummer

                        Channel(i) = Temp(i).Substring(12, 5)
                        Channel(i) = Channel(i).Trim

                        Tag(i) = Temp(i).Substring(20, 2)
                        Tag(i) = Tag(i).Trim

                        Zeit(i) = Temp(i).Substring(22, 10)
                        Zeit(i) = Zeit(i).Trim
                        StringTeile = Zeit(i).Split(":")
                        Zeit(i) = StringTeile(2) / 60 + StringTeile(1) + StringTeile(0) * 60 + Tag(i) * 24 * 60     ' in Minuten

                        Amplitude(i) = Temp(i).Substring(32, 4)
                        Amplitude(i) = Amplitude(i).Trim

                        Energie(i) = Temp(i).Substring(49, 8)
                        Energie(i) = Energie(i).Trim
                        StringTeile = Energie(i).Split("E")
                        Energie(i) = StringTeile(0) * 10 ^ (StringTeile(1))
```

```
196
197                         Temperatur(i) = Temp(i).Substring(66, 8)
198                         Temperatur(i) = Temperatur(i).Trim
199                         yTemperaturAchse(i) = -251.18 + CDbl(Temperatur(i)) / 1000 * 93.01
200                         Temperatur(i) = CStr(Math.Round(yTemperaturAchse(i), 3))
201
202                         i = i + 1
203                     End If
204
205                 End While
206
207             End If
208
209
210             i = i - 1
211
212             If i = Hits Then
213
214                 Öffnen2Button.Visible = False
215                 GruppenButton.Visible = True
216                 DiagrammeButton.Visible = True
217                 xAchsenBox.Visible = True
218                 yAchsenBox.Visible = True
219                 DiagrammtypBox.Visible = True
220                 ChannelBox.Visible = True
221                 FrequenzButton.Visible = False
222
223
224                 AuflösungBox.Text = dt
225
226
227                 Extremum(Zeit, minZeit, maxZeit)
228                 Extremum(Temperatur, minTemp, maxTemp)
229                 Extremum(Energie, minE, maxE)
230                 Extremum(Amplitude, minA, maxA)
231                 minF = 0
232                 maxF = SampleRate / 2000    ' samplerate/2 in [kHz]
233
234
235                 For i = 1 To 8
236
237                     Filter(i, 1) = minE
238                     Filter(i, 2) = maxE + 1
239                     Filter(i, 3) = minA
240                     Filter(i, 4) = maxA + 1
241                     Filter(i, 5) = minF
242                     Filter(i, 6) = maxF + 1
243                     Filter(i, 7) = minF
244                     Filter(i, 8) = maxF + 1
```



```
245                     Filter(i, 9) = minF
246                     Filter(i, 10) = maxF + 1
247
248                 Next
249
250
251                 InfoLabel.Text = "Sie können jetzt Gruppen definieren und Diagramme erstellen."
252
253             Else
254
255                 MsgBox("Fehler: Möglicherweise hat die Textdatei eine nicht korrekte Formatierung oder die beiden geöffneten Dateien passen nicht zusammen.", ↙
    , "Fehlermeldung")
256
257             End If
258
259         End If
260
261     End Sub
262
263
264
265     Sub Extremum(ByVal daten() As String, ByRef min As Double, ByRef max As Double)     ' Ermittelt Minimum und Maximum eins Datenarrays
266
267         Dim i As Integer
268
269         min = daten(1)
270         max = daten(1)
271
272         For i = 1 To Hits
273
274             If daten(i) < min Then
275
276                 min = daten(i)
277
278             End If
279
280             If daten(i) > max Then
281
282                 max = daten(i)
283
284             End If
285
286         Next
287
288     End Sub
289
290
291     Private Sub BeendenToolStripMenuItem_Click() Handles BeendenToolStripMenuItem.Click
292         Close()
```

```
    End Sub

    Private Sub BeendenButton_Click() Handles BeendenButton.Click
        Close()
    End Sub



    Private Sub DiagrammeButton_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles DiagrammeButton.Click

        Dim i As Integer
        Dim m As Boolean
        Dim n As Integer


        If ZeitButton.Checked And AuflösungBox.Text = Nothing Then AuflösungBox.Text = 60
        If TemperaturButton.Checked And AuflösungBox.Text = Nothing Then AuflösungBox.Text = 1

        m = True
        dt = AuflösungBox.Text


        Überschneidungen = 0
        Gruppenlos = 0


        For j = 0 To 8

            zähler(j) = 0

            For i = 1 To Hits

                Gruppen(j, i) = False

            Next

        Next


        ''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''


        If ZeitButton.Checked Then

            If (dt >= 10 And dt <= 240) Then

            Else
                MsgBox("Die Zeitauflösung muss zwischen 10 und 240 min gewählt werden!", , "ungültige Werte")
                m = False
```



```
            End If

        End If


        If TemperaturButton.Checked Then
            If (dt >= 0.5 And dt <= 5) Then

            Else
                MsgBox("Die Temperaturauflösung muss zwischen 0.5 und 5 K gewählt werden!", , "ungültige Werte")
                m = False
            End If

        End If
        If m = True Then

            If Channel1Button.Checked = True Then Kanal = 1
            If Channel2Button.Checked = True Then Kanal = 2
            If Channel3Button.Checked = True Then Kanal = 3
            If Channel4Button.Checked = True Then Kanal = 4
            If Channel5Button.Checked = True Then Kanal = 5
            If Channel6Button.Checked = True Then Kanal = 6

            '''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''' zähler der  Gruppen!

            For i = 1 To Hits

                If Channel(i) = Kanal Then

                    Gruppen(0, i) = True                    ' Gruppe 0: True für alle Sets mit Channel i
                    zähler(0) = zähler(0) + 1               ' Channel i: Sets

                    For j = 1 To 8

                        If Energie(i) >= Filter(j, 1) And Energie(i) < Filter(j, 2) And Amplitude(i) >= Filter(j, 3) And Amplitude(i) < Filter(j, 4) And
                            Frequenz(i) >= Filter(j, 5) And Frequenz(i) < Filter(j, 6) And FrequenzL(i) >= Filter(j, 7) And FrequenzL(i) < Filter(j, 8) And
                            FrequenzR(i) >= Filter(j, 9) And FrequenzR(i) < Filter(j, 10) Then

                            Gruppen(j, i) = True
                            zähler(j) = zähler(j) + 1       ' Zähler der Gruppenelemente

                        End If
                    Next

                    ''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''  Überschneidungen
                    For j = 1 To 8
                        For k = j To 8
                            If j <> k And Gruppenauswahl(k) = True And Gruppenauswahl(j) = True And
                                Gruppen(k, i) = True And Gruppen(j, i) = True And Gruppenauswahl(k) = True And Gruppenauswahl(j) = True Then
```

D:\Dropbox\Diplomarbeit\AE Software 3.5\WindowsApplication1\WindowsApplication1\Startfenster.vb 9

```

                                Überschneidungen = Überschneidungen + 1

                            End If
                        Next
                    Next


                    '''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

                    n = 0

                    For j = 1 To 8

                        If Gruppenauswahl(j) = True Then

                            n = n + Gruppen(j, i)
                        End If
                    Next

                    If n = 0 Then

                        Gruppenlos = Gruppenlos + 1

                    End If

                End If

            Next


            '''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

            Call Grafik(Gruppen)

        End If

    End Sub


    Private Sub Grafik(ByVal Gruppen(,) As Boolean)         ' Berechnung der Diagramme

        Dim i As Integer
        Dim j As Integer


        If ZeitButton.Checked Then

            steps = CInt(maxZeit / dt) + 1
```

D:\Dropbox\Diplomarbeit\AE Software 3.5\WindowsApplication1\WindowsApplication1\Startfenster.vb 10

```
            ReDim Kurve(8, steps)
            ReDim xAchse(steps)

            xAchse(0) = -1


            For j = 1 To steps

                xAchse(j) = j * dt

            Next

            j = 1
            For i = 1 To Hits


                While Zeit(i) > xAchse(j)

                    j = j + 1

                End While


                For k = 0 To 8
                    If Gruppen(k, i) = True Then Kurve(k, j) = Kurve(k, j) + 1
                Next



            Next

            For j = 1 To steps

                xAchse(j) = dt / 2 + (j - 1) * dt
            Next


        End If


        If TemperaturButton.Checked Then

            steps = CInt((maxTemp - minTemp) / dt) + 1
            ReDim Kurve(8, steps)
            ReDim xAchse(steps)

            xAchse(0) = -100

            For j = 1 To steps
```

```
489
490                 xAchse(j) = minTemp + j * dt
491
492             Next
493
494
495             For i = 1 To Hits
496
497                 For j = 1 To steps
498
499                     If (Temperatur(i) > xAchse(j - 1) And Temperatur(i) <= xAchse(j)) Then
500
501                         For k = 0 To 8
502
503                             If Gruppen(k, i) = True Then Kurve(k, j) = Kurve(k, j) + 1
504
505                         Next
506
507                     End If
508                 Next
509
510             Next
511
512
513             For j = 1 To steps
514
515                 xAchse(j) = minTemp + dt / 2 + (j - 1) * dt
516             Next
517
518
519         End If
520
521         Dim form As New Diagrammfenster
522         form.Show()
523
524
525     End Sub
526
527
528
529     Private Sub ÜberFFTToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ÜberAEGraphicsToolStripMenuItem.Click
530
531         MsgBox("2011.11    Version 3.0" & _
532                vbCrLf & vbCrLf & "Das ist die dritte Version eines Programmes zur Klassifizierung von AE-Messungen. " & _
533              "Die Klassifizierung erfolgt unter anderem mittels Fouriertransformation der aufgenommenen Zeitverläufe. " & _
534              "Die Daten werden aus Textdateien, welche aus der VallenAE Software exportiert wurden, entnommen. " & _
535              "Das Programm wurde im Rahmen einer Masterarbeit an der TU Wien erstellt." &
536              vbCrLf & vbCrLf & vbCrLf & "2012.01    Version 3.1 " & _
537              vbCrLf & vbCrLf & "Änderungen:" & _
```



```
538              vbCrLf & vbCrLf & "   + Ein-/ Ausblendefunktion im Diagramm für die ungefilterte Kurve" & _
539              vbCrLf & "   + Speicher-/ Ladefunktion für die einzugebenden Filterwerte" &
540              vbCrLf & vbCrLf & vbCrLf & "2012.03    Version 3.2 " & _
541              vbCrLf & vbCrLf & "Änderungen:" & _
542              vbCrLf & vbCrLf & "   + Schwarz-Weiß-Darstellung der Diagramme für Druck" & _
543              vbCrLf & "   + Erweiterung der Darstellungsmöglichkeiten " &
544              vbCrLf & "   + diveres kleine Änderungen " &
545              vbCrLf & vbCrLf & vbCrLf & "2012.05    Version 3.3 " & _
546              vbCrLf & vbCrLf & "Änderungen:" & _
547              vbCrLf & "   + pri-Dateien mit Zeilen ohne Setnummer können geöffnet werden" &
548              vbCrLf & vbCrLf & vbCrLf & "2012.07    Version 3.4 " & _
549              vbCrLf & vbCrLf & "Änderungen:" & _
550              vbCrLf & "   + Änderung der Bezeichnung von 'Sets' in 'Hits'" &
551              vbCrLf & "   + Korrektur des Datentypes der Temperaturwerte (jetzt Gleitkommawerte in Diagramme)" &
552              vbCrLf & vbCrLf & vbCrLf & "2013.07    Version 3.5 " & _
553              vbCrLf & vbCrLf & "Änderungen:" & _
554              vbCrLf & "   + diverse kleine Änderungen" &
555              vbCrLf & "   + kleine Veränderungen und Kommentare im Programmcode" &
556              vbCrLf & vbCrLf & "Hannes Sperrer" & vbCrLf & "h.sperrer@gmx.at", , "Info")
557
558
559     End Sub
560
561     Private Sub GruppenButton_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles GruppenButton.Click
562
563         Gruppenfenster.Show()
564         Me.Hide()
565
566     End Sub
567
568     Private Sub XAchsenCheckBox_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles XAchsenCheckBox.CheckedChanged
569
570         If XAchsenCheckBox.Checked = True Then
571
572             xMinLabel.Visible = True
573             xMaxLabel.Visible = True
574             xMinBox.Visible = True
575             xMaxBox.Visible = True
576
577         End If
578
579         If XAchsenCheckBox.Checked = False Then
580
581             xMinLabel.Visible = False
582             xMaxLabel.Visible = False
583             xMinBox.Visible = False
584             xMaxBox.Visible = False
585             xMinBox.Text = Nothing
586             xMaxBox.Text = Nothing
```

```
587
588         End If
589
590     End Sub
591
592
593     Private Sub YAchsenCheckBox_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles YAchsenCheckBox.CheckedChanged
594
595         If YAchsenCheckBox.Checked = True Then
596
597             yMinLabel.Visible = True
598             yMaxLabel.Visible = True
599             yMinBox.Visible = True
600             yMaxBox.Visible = True
601
602             MinHitzahl.Visible = True
603             MaxHitzahl.Visible = True
604             y2MinBox.Visible = True
605             y2MaxBox.Visible = True
606
607         End If
608
609
610         If YAchsenCheckBox.Checked = False Then
611
612             yMinLabel.Visible = False
613             yMaxLabel.Visible = False
614             yMinBox.Visible = False
615             yMaxBox.Visible = False
616             yMinBox.Text = Nothing
617             yMaxBox.Text = Nothing
618
619             MinHitzahl.Visible = False
620             MaxHitzahl.Visible = False
621
622             y2MinBox.Visible = False
623             y2MaxBox.Visible = False
624             y2MinBox.Text = Nothing
625             y2MaxBox.Text = Nothing
626
627         End If
628
629     End Sub
630
631
632
633     Private Sub CheckBox0_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles CheckBox0.CheckedChanged
634
635         If CheckBox0.Checked = True Then Gruppenauswahl(0) = True
```



```
636         If CheckBox0.Checked = False Then Gruppenauswahl(0) = False
637
638     End Sub
639
640     Private Sub CheckBox1_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles CheckBox1.CheckedChanged
641
642         If CheckBox1.Checked = True Then Gruppenauswahl(1) = True
643         If CheckBox1.Checked = False Then Gruppenauswahl(1) = False
644
645     End Sub
646
647     Private Sub CheckBox2_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles CheckBox2.CheckedChanged
648
649         If CheckBox2.Checked = True Then Gruppenauswahl(2) = True
650         If CheckBox2.Checked = False Then Gruppenauswahl(2) = False
651
652     End Sub
653
654     Private Sub CheckBox3_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles CheckBox3.CheckedChanged
655
656         If CheckBox3.Checked = True Then Gruppenauswahl(3) = True
657         If CheckBox3.Checked = False Then Gruppenauswahl(3) = False
658
659     End Sub
660
661     Private Sub CheckBox4_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles CheckBox4.CheckedChanged
662
663         If CheckBox4.Checked = True Then Gruppenauswahl(4) = True
664         If CheckBox4.Checked = False Then Gruppenauswahl(4) = False
665
666     End Sub
667
668     Private Sub CheckBox5_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles CheckBox5.CheckedChanged
669
670         If CheckBox5.Checked = True Then Gruppenauswahl(5) = True
671         If CheckBox5.Checked = False Then Gruppenauswahl(5) = False
672
673     End Sub
674
675     Private Sub CheckBox6_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles CheckBox6.CheckedChanged
676
677         If CheckBox6.Checked = True Then Gruppenauswahl(6) = True
678         If CheckBox6.Checked = False Then Gruppenauswahl(6) = False
679
680     End Sub
681
682     Private Sub CheckBox7_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles CheckBox7.CheckedChanged
683
684         If CheckBox7.Checked = True Then Gruppenauswahl(7) = True
```

```
        If CheckBox7.Checked = False Then Gruppenauswahl(7) = False

    End Sub

    Private Sub CheckBox8_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles CheckBox8.CheckedChanged

        If CheckBox8.Checked = True Then Gruppenauswahl(8) = True
        If CheckBox8.Checked = False Then Gruppenauswahl(8) = False

    End Sub


    Private Sub ZeitButton_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ZeitButton.CheckedChanged

        If ZeitButton.Checked Then

            AuflösungLabel.Text = "Zeitauflösung [min]:"
            AuflösungBox.Text = "60"
            xMaxLabel.Text = "Max. Zeit:"
            xMinLabel.Text = "Min. Zeit:"

        End If


        If TemperaturButton.Checked Then

            AuflösungLabel.Text = "Temperaturauflösung [°C]:"
            AuflösungBox.Text = "1"
            xMaxLabel.Text = "Max. Temperatur:"
            xMinLabel.Text = "Min. Temperatur:"

        End If

    End Sub



    Private Sub AmplitudeButton_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles AmplitudeButton.CheckedChanged

        If AmplitudeButton.Checked Then

            yMaxLabel.Text = "Max. Amplitude:"
            yMinLabel.Text = "Min. Amplitude:"

        End If


        If EnergieButton.Checked Then

```



```
            yMaxLabel.Text = "Max. Energie:"
            yMinLabel.Text = "Min. Energie:"

        End If


        If FrequenzButton.Checked Then

            yMaxLabel.Text = "Max. Frequenz:"
            yMinLabel.Text = "Min. Frequenz:"

        End If


    End Sub


    Private Sub EnergieButton_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles EnergieButton.CheckedChanged

        If AmplitudeButton.Checked Then

            yMaxLabel.Text = "Max. Amplitude:"
            yMinLabel.Text = "Min. Amplitude:"

        End If


        If EnergieButton.Checked Then

            yMaxLabel.Text = "Max. Energie:"
            yMinLabel.Text = "Min. Energie:"

        End If


        If FrequenzButton.Checked Then

            yMaxLabel.Text = "Max. Frequenz:"
            yMinLabel.Text = "Min. Frequenz:"

        End If

    End Sub


End Class
```

D:\Dropbox\Diplomarbeit\AE Software 3.5\WindowsApplication1\WindowsApplication1\Gruppenfenster.vb 1

```
1  Imports System.IO
2
3  Public Class Gruppenfenster
4
5      Private Sub Gruppenfenster_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load
6
7          Startfenster.GruppenBox.Visible = True
8          Startfenster.CheckBox0.Checked = True
9          Startfenster.CheckBox1.Checked = True
10
11         For i = 1 To 10
12
13             Me.TableLayoutPanel1.Controls("TextBox" & i).Text = Startfenster.Filter(1, i)                    '
14             Me.TableLayoutPanel2.Controls("TextBox" & i + 10).Text = Startfenster.Filter(2, i)               '
15             Me.TableLayoutPanel3.Controls("TextBox" & i + 20).Text = Startfenster.Filter(3, i)               '
16             Me.TableLayoutPanel4.Controls("TextBox" & i + 30).Text = Startfenster.Filter(4, i)               ' Defaultwerte in Eingabemaske
17             Me.TableLayoutPanel5.Controls("TextBox" & i + 40).Text = Startfenster.Filter(5, i)               '
18             Me.TableLayoutPanel6.Controls("TextBox" & i + 50).Text = Startfenster.Filter(6, i)               '
19             Me.TableLayoutPanel7.Controls("TextBox" & i + 60).Text = Startfenster.Filter(7, i)               '
20             Me.TableLayoutPanel8.Controls("TextBox" & i + 70).Text = Startfenster.Filter(8, i)               '
21
22             If i > 4 Then
23
24                 Me.TableLayoutPanel1.Controls("Label" & i + 4).Visible = False                               '
25                 Me.TableLayoutPanel1.Controls("TextBox" & i).Visible = False                                 '
26                 Me.TableLayoutPanel2.Controls("TextBox" & i + 10).Visible = False                            '
27                 Me.TableLayoutPanel3.Controls("TextBox" & i + 20).Visible = False                            '
28                 Me.TableLayoutPanel4.Controls("TextBox" & i + 30).Visible = False                            ' Frequenzwerte unsichtbar
29                 Me.TableLayoutPanel5.Controls("TextBox" & i + 40).Visible = False                            '
30                 Me.TableLayoutPanel6.Controls("TextBox" & i + 50).Visible = False                            '
31                 Me.TableLayoutPanel7.Controls("TextBox" & i + 60).Visible = False                            '
32                 Me.TableLayoutPanel8.Controls("TextBox" & i + 70).Visible = False                            '
33
34             End If
35
36         Next
37
38     End Sub
39
40     Private Sub OKButton_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles OKButton.Click       'Übernahme der Eingabewerte
41
42         For i = 1 To 10
43
44             Startfenster.Filter(1, i) = Me.TableLayoutPanel1.Controls("TextBox" & i).Text
45             Startfenster.Filter(2, i) = Me.TableLayoutPanel2.Controls("TextBox" & i + 10).Text
46             Startfenster.Filter(3, i) = Me.TableLayoutPanel3.Controls("TextBox" & i + 20).Text
47             Startfenster.Filter(4, i) = Me.TableLayoutPanel4.Controls("TextBox" & i + 30).Text
48             Startfenster.Filter(5, i) = Me.TableLayoutPanel5.Controls("TextBox" & i + 40).Text
49             Startfenster.Filter(6, i) = Me.TableLayoutPanel6.Controls("TextBox" & i + 50).Text
```

D:\Dropbox\Diplomarbeit\AE Software 3.5\WindowsApplication1\WindowsApplication1\Gruppenfenster.vb 2

```
50             Startfenster.Filter(7, i) = Me.TableLayoutPanel7.Controls("TextBox" & i + 60).Text
51             Startfenster.Filter(8, i) = Me.TableLayoutPanel8.Controls("TextBox" & i + 70).Text
52
53         Next
54
55         If FFTCheckBox.Checked = True Then
56
57             FFT_Fenster.Show()                                          ' Wechsel zum FFT-Fenster
58         Else
59
60             Startfenster.Show()
61
62             For i = 1 To 8
63
64                 Startfenster.Filter(i, 5) = Startfenster.minF           '
65                 Startfenster.Filter(i, 6) = Startfenster.maxF + 1       '
66                 Startfenster.Filter(i, 7) = Startfenster.minF           ' Filterwerte für Frequenzkriterien so, dass alle Hits erfasst werden
67                 Startfenster.Filter(i, 8) = Startfenster.maxF + 1       ' -> keine Einschränkung durch das (nicht aktivierte) Frequenzkriterium
68                 Startfenster.Filter(i, 9) = Startfenster.minF           '
69                 Startfenster.Filter(i, 10) = Startfenster.maxF + 1      '
70
71             Next
72
73         End If
74
75         Me.Hide()
76
77     End Sub
78
79
80
81
82
83     Private Sub FFTCheckBox_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles FFTCheckBox.CheckedChanged
84
85
86         If FFTCheckBox.Checked = True Then
87
88             For i = 5 To 10
89
90                 Me.TableLayoutPanel1.Controls("Label" & i + 4).Visible = True           '
91                 Me.TableLayoutPanel1.Controls("TextBox" & i).Visible = True             '
92                 Me.TableLayoutPanel2.Controls("TextBox" & i + 10).Visible = True        '
93                 Me.TableLayoutPanel3.Controls("TextBox" & i + 20).Visible = True        '
94                 Me.TableLayoutPanel4.Controls("TextBox" & i + 30).Visible = True        ' Frequenz-Eingabeboxen sinchtbar
95                 Me.TableLayoutPanel5.Controls("TextBox" & i + 40).Visible = True        '
96                 Me.TableLayoutPanel6.Controls("TextBox" & i + 50).Visible = True        '
97                 Me.TableLayoutPanel7.Controls("TextBox" & i + 60).Visible = True        '
98                 Me.TableLayoutPanel8.Controls("TextBox" & i + 70).Visible = True        '
```

```
 99
100            Next
101
102        End If
103
104        If FFTCheckBox.Checked = False Then
105
106            For i = 5 To 10
107
108                Me.TableLayoutPanel1.Controls("Label" & i + 4).Visible = False          '
109                Me.TableLayoutPanel1.Controls("TextBox" & i).Visible = False            '
110                Me.TableLayoutPanel2.Controls("TextBox" & i + 10).Visible = False       '
111                Me.TableLayoutPanel3.Controls("TextBox" & i + 20).Visible = False       ' Frequenz-Eingabeboxen unsichtbar
112                Me.TableLayoutPanel4.Controls("TextBox" & i + 30).Visible = False       '
113                Me.TableLayoutPanel5.Controls("TextBox" & i + 40).Visible = False       '
114                Me.TableLayoutPanel6.Controls("TextBox" & i + 50).Visible = False       '
115                Me.TableLayoutPanel7.Controls("TextBox" & i + 60).Visible = False       '
116                Me.TableLayoutPanel8.Controls("TextBox" & i + 70).Visible = False       '
117
118            Next
119
120        End If
121
122    End Sub
123
124    Private Sub FilterButton_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles FilterButton.Click
125
126        Dim Temp(24) As String
127        Dim StringArray() As String
128
129
130        OpenFileDialog1.Filter = "Filterdateien (*.filter)|*.filter"            ' Öffnen einer Filterdatei
131
132        If OpenFileDialog1.ShowDialog() = DialogResult.OK Then
133            Dim reader As New StreamReader(OpenFileDialog1.FileName)
134
135            For i = 0 To 24                                                     ' Einlesen der Zeilen
136                Temp(i) = reader.ReadLine
137
138                If Temp(i) = Nothing Then
139                    Temp(i) = " "
140                End If
141
142            Next
143
144            If (Temp(0).Chars(0) = "D" And Temp(1).Chars(0) = "S" And Temp(5).Chars(0) = "S") Then      'Punktuelle Kontrolle der Formatierung
145
146
147                If Temp(7).Chars(0) = "Z" Then
```



```
148                    Startfenster.AuflösungBox.Text = Mid(Temp(7), 24).Trim
149                    Startfenster.ZeitButton.Checked = True
150                End If
151
152                If Temp(7).Chars(0) = "T" Then
153                    Startfenster.AuflösungBox.Text = Mid(Temp(7), 26).Trim
154                    Startfenster.TemperaturButton.Checked = True
155                End If
156
157
158                If Temp(24).Chars(0) = "B" Then
159
160                    FFTCheckBox.Checked = True
161                    Startfenster.FrequIntervall = Mid(Temp(24), 33).Trim
162
163                Else
164
165                    FFTCheckBox.Checked = False
166
167                End If
168
169
170
171                For i = 1 To 8
172
173
174                    StringArray = Split(Temp(i + 14), "|")
175
176                    Startfenster.Filter(i, 1) = StringArray(1)              '
177                    Startfenster.Filter(i, 2) = StringArray(2)              '
178                    Startfenster.Filter(i, 3) = StringArray(4)              '
179                    Startfenster.Filter(i, 4) = StringArray(5)              '
180                    Startfenster.Filter(i, 5) = StringArray(7)              ' Eingelesene Werte übernehmen
181                    Startfenster.Filter(i, 6) = StringArray(8)              '
182                    Startfenster.Filter(i, 7) = StringArray(10)             '
183                    Startfenster.Filter(i, 8) = StringArray(11)             '
184                    Startfenster.Filter(i, 9) = StringArray(13)             '
185                    Startfenster.Filter(i, 10) = StringArray(14)            '
186
187                Next
188
189
190                For i = 1 To 10
191
192                    Me.TableLayoutPanel1.Controls("TextBox" & i).Text = Startfenster.Filter(1, i)           '
193                    Me.TableLayoutPanel2.Controls("TextBox" & i + 10).Text = Startfenster.Filter(2, i)      '
194                    Me.TableLayoutPanel3.Controls("TextBox" & i + 20).Text = Startfenster.Filter(3, i)      '
195                    Me.TableLayoutPanel4.Controls("TextBox" & i + 30).Text = Startfenster.Filter(4, i)      '
196                    Me.TableLayoutPanel5.Controls("TextBox" & i + 40).Text = Startfenster.Filter(5, i)      ' Eingelesene Werte in Gruppenmaske schreiben
```

```
197                     Me.TableLayoutPanel6.Controls("TextBox" & i + 50).Text = Startfenster.Filter(6, i)      '
198                     Me.TableLayoutPanel7.Controls("TextBox" & i + 60).Text = Startfenster.Filter(7, i)      '
199                     Me.TableLayoutPanel8.Controls("TextBox" & i + 70).Text = Startfenster.Filter(8, i)      '
200
201                 Next
202
203
204             Else
205
206                 MsgBox("Fehler beim Öffnen: Möglicherweise hat die Textdatei eine nicht korrekte Formatierung!", , "Fehlermeldung")
207
208             End If
209         End If
210
211
212
213     End Sub
214 End Class
```

```
1  Public Class FFT_Fenster
2
3      Private Sub FFT_Fenster_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load
4
5          WeiterButton.Visible = True
6          AbbrechenButton.Visible = True
7          FFTButton.Visible = False
8          TextBox.Enabled = True
9
10         Label1.Text = "Um Nebenmaxima im Frequenzspektrum zu finden, muss die Breite des Hauptmaximas abgeschätzt werden. " & _
11                       "Das gesamte Spektrum erstreckt sich über einen Frequenzbereich von 0 bis " & Startfenster.maxF & " kHz."
12
13         Label3.Text = "kHz"
14
15         TextBox.Text = Startfenster.FrequIntervall
16
17     End Sub
18
19
20     Private Sub WeiterButton_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles WeiterButton.Click
21
22         TextBox.Enabled = False
23         Label2.Visible = True
24         Label2.Text = "Um eine Filternung nach Frequenz zu ermöglichen ist es notwendig eine Fouriertransformation " & _
25                       "der Zeitsingnale durchzuführen. Dieser Vorgang kann einige Minuten in Anspruch nehmen!"
26
27
28
29         If TextBox.Text = Nothing Then
30
31             TextBox.Text = 0
32
33         End If
34
35         If TextBox.Text >= 10 And TextBox.Text <= 1000 Then
36             Startfenster.FrequIntervall = TextBox.Text                          ' Abschätzung der Breite des Hauptmaximums
37             WeiterButton.Visible = False
38             FFTButton.Visible = True
39
40         Else
41
42             FFTButton.Visible = False
43             MsgBox("Bereich muss zwischen 10 und 1000 kHz gewählt werden!", , "Fehler")
44
45         End If
46
47
48     End Sub
49
```



```
50
51     Private Sub FFTButton_Click() Handles FFTButton.Click
52
53
54
55         Dim Temp(Startfenster.SamplesPerHit) As String
56         Dim Daten(Startfenster.SamplesPerHit) As Double
57         Dim i As Integer
58         Dim j As Integer
59         Dim k As Integer
60         Dim reader As New System.IO.StreamReader(Startfenster.OpenFileDialog1.FileName)
61         Dim m As Boolean
62
63
64         m = False
65         j = 0
66         k = 0
67
68         AbbrechenButton.Visible = False
69         FFTButton.Visible = False
70
71         ProgressBar1.Maximum = Startfenster.Hits
72         ProgressBar1.Value = 0
73         ProgressBar1.Visible = True
74
75         For n = 1 To UBound(Startfenster.Info) + 2
76             reader.ReadLine()
77         Next
78
79
80         While reader.Peek() > -1
81
82
83             Temp(i) = reader.ReadLine
84
85
86             If i = Startfenster.SamplesPerHit - 1 Then
87                 j = j + 1
88                 ProgressBar1.Value = j
89
90
91
92                 For k = 0 To Startfenster.SamplesPerHit - 1
93                     Daten(k) = CInt(Temp(k))
94                 Next
95
96                 Call FFT(Daten, Startfenster.FrequIntervall, Startfenster.Frequenz(j), Startfenster.FrequenzL(j), Startfenster.FrequenzR(j))
97                 ' Anwendung des FFT-Algorithmus auf jeden Hit
98
```

```
                reader.ReadLine()


                i = -1
            End If

            i = i + 1

        End While

        ProgressBar1.Visible = False
        AbbrechenButton.Visible = False


        FileClose()

        MsgBox("Fouriertransformation abgeschlossen!", , "Bericht")



        Startfenster.FrequenzButton.Visible = True
        Startfenster.Show()

        Me.Close()

    End Sub


    Sub FFT(ByVal REX() As Double, ByVal intervall As Double, ByRef freq As Double, ByRef freqL As Double, ByRef freqR As Double)


        Dim pi = 3.1415926535897931
        Dim N%, NM1%, ND2%, M%, J%, K%, LE%, LE2%, JM1%, IP%
        Dim TR#, TI#, UR#, UI#, SR#, SI#
        Dim r As Double
        Dim q As Double
        Dim p As Integer

        N = UBound(REX)

        Dim IMX(N) As Double
        Dim max As Double
        Dim c As Double
        Dim i As Integer
        Dim iL As Integer
        Dim iR As Integer
        Dim Index As Integer

        For p = 0 To N - 1
```



```
            IMX(p) = 0
        Next


        ''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

1000:   'THE FAST FOURIER TRANSFORM
        'copyright © 1997-1999 by California Technical Publishing
1010:   'Upon entry, N% contains the number of points in the DFT, REX[ ] and
1020:   'IMX[ ] contain the real and imaginary parts of the input. Upon return,
1030:   'REX[ ] and IMX[ ] contain the DFT output. All signals run from 0 to N%-1.
1060:   NM1% = N% - 1
1070:   ND2% = N% / 2
1080:   M% = CInt(Math.Log(N) / Math.Log(2))
1090:   J% = ND2%
1100:   '
1110:   For i% = 1 To N% - 2                                                   'Bit reversal sorting
1120:       If i% >= J% Then GoTo 1190
1130:       TR = REX(J%)
1140:       TI = IMX(J%)
1150:       REX(J%) = REX(i%)
1160:       IMX(J%) = IMX(i%)
1170:       REX(i%) = TR
1180:       IMX(i%) = TI
1190:       K% = ND2%
1200:       If K% > J% Then GoTo 1240
1210:       J% = J% - K%
1220:       K% = K% / 2
1230:       GoTo 1200
1240:       J% = J% + K%
1250:   Next i%
1260:   '
1270:   For L% = 1 To M%                                                       'Loop for each stage
1280:       LE% = CInt(2 ^ L%)
1290:       LE2% = LE% / 2
1300:       UR = 1
1310:       UI = 0
1320:       SR = Math.Cos(pi / LE2%)                                           'Calculate sine & cosine values
1330:       SI = -Math.Sin(pi / LE2%)
1340:       For J% = 1 To LE2%                                                 'Loop for each sub DFT
1350:           JM1% = J% - 1
1360:           For i% = JM1% To NM1% Step LE%                                 'Loop for each butterfly
1370:               IP% = i% + LE2%
1380:               TR = REX(IP%) * UR - IMX(IP%) * UI                         'Butterfly calculation
1390:               TI = REX(IP%) * UI + IMX(IP%) * UR
1400:               REX(IP%) = REX(i%) - TR
1410:               IMX(IP%) = IMX(i%) - TI
1420:               REX(i%) = REX(i%) + TR
1430:               IMX(i%) = IMX(i%) + TI
```

```
1440:           Next i%
1450:           TR = UR
1460:           UR = TR * SR - UI * SI
1470:           UI = TR * SI + UI * SR
1480:       Next J%
1490:   Next L%
1500:   '


        ''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''
        r = Startfenster.SampleRate / Startfenster.SamplesPerHit / 1000     '[kHz]
        q = Startfenster.ScaleFactor                                        '[mv]
        Index = CInt(intervall / 2 / r)                                     'Umrechnung von Frequenzbereich in Array-Index


        '''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''
        max = 0

        For p = 0 To UBound(REX) / 2 - 1                                    'Suche des globalen Maximums
            c = Math.Sqrt(REX(p) * REX(p) + IMX(p) * IMX(p))

            If c > max Then
                max = c
                i = p                                                       'Arrayindex der maximalen Amplitude
            End If

        Next


        '''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''
        max = 0
        If i - Index > 0 Then

            For p = 0 To i - Index
                c = Math.Sqrt(REX(p) * REX(p) + IMX(p) * IMX(p))

                If c > max Then
                    max = c
                    iL = p                                                  ' Index des linken Nebenmaximums
                End If
            Next


        Else : iL = i

        End If
        '''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

        max = 0
```



```
        If i + Index < UBound(REX) / 2 - 1 Then

            For p = i + Index To UBound(REX) / 2 - 1
                c = Math.Sqrt(REX(p) * REX(p) + IMX(p) * IMX(p))

                If c > max Then
                    max = c
                    iR = p                                                  ' Index des rechten Nebenmaximums
                End If
            Next

        Else : iR = i

        End If
        '''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

        freq = i * r                                                        '
        freqL = iL * r                                                      ' Rückgabewerte
        freqR = iR * r                                                      '


    End Sub


    Private Sub AbbrechenButton_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles AbbrechenButton.Click

        Gruppenfenster.FFTCheckBox.Checked = False
        Me.Close()
        Startfenster.Show()

    End Sub

End Class
```

D:\Dropbox\Diplomarbeit\AE Software 3.5\WindowsApplication1\WindowsApplication1\Diagrammfenster.vb 1

```
1
2  Public Class Diagrammfenster
3
4
5      Sub Diagrammfenster_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load
6
7          Dim i As Integer
8          Dim j As Integer
9          Dim y(8) As Double
10         Dim x(8) As String
11
12         Me.Text = Startfenster.Dateiname & " - " & "Channel " & Startfenster.Kanal
13
14         'Anzeige der Hit-Verteilung im Diagramm
15         Label1.Text = "Channel: "
16         Label2.Text = Startfenster.Kanal
17         Label5.Text = "Versuchsdauer: "
18         Label6.Text = CInt(Startfenster.maxZeit) & " min"
19         Label9.Text = "Hit-Verteilung:"
20         Label19.Text = "doppelt gezählt:"
21         Label29.Text = Startfenster.Überschneidungen
22         Label39.Text = "Hits"
23         Label40.Text = "Gesamtzahl:"
24         Label7.Text = "Dateiname: "
25         Label8.Text = Startfenster.Dateiname
26         Label50.Text = Startfenster.Hits
27         Label60.Text = "Hits"
28         Label70.Text = "in keiner Gruppe:"
29         Label80.Text = Startfenster.Gruppenlos
30         Label90.Text = "Hits"
31
32         'Definition der Farbreihenfolge für das 1.Diagramm:
33         Chart1.Series("Series0").Color = Color.White                        'weiße Farbe entspricht der ungefilterten Hits-Kurve
34         Chart1.Series("Series1").Color = Color.Orange
35         Chart1.Series("Series2").Color = Color.DarkGreen
36         Chart1.Series("Series3").Color = Color.Magenta
37         Chart1.Series("Series4").Color = Color.Blue
38         Chart1.Series("Series5").Color = Color.Yellow
39         Chart1.Series("Series6").Color = Color.LimeGreen
40         Chart1.Series("Series7").Color = Color.Red
41         Chart1.Series("Series8").Color = Color.DimGray
42
43         Chart2.Series("Series0").Color = Chart1.Series("Series0").Color     'weiße Farbe auch im 2ten Diagramm für ungefilterte Kurve
44
45         'Einstellungen für 3tes Diagramm:
46         Chart3.ChartAreas(0).AxisX.Title = "Zeit [min]"
47         Chart3.ChartAreas(0).AxisY.Title = "Temperatur [°C]"
48         Chart3.ChartAreas(0).AxisY.Interval = 10
49         Chart3.Series("Series0").LegendText = "Temperatur"
```

D:\Dropbox\Diplomarbeit\AE Software 3.5\WindowsApplication1\WindowsApplication1\Diagrammfenster.vb 2

```
50         Chart3.Series("Series0").Color = Color.White
51         Chart3.Series("Series0").BorderWidth = 2
52
53
54         If Startfenster.ZeitButton.Checked Then                             ' X-Achse ist Zeit, dann...
55
56             Label3.Text = "Zeitauflösung: "
57             Label4.Text = Startfenster.dt & " min"
58
59             Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Title = "Zeit [min]"
60             Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Minimum = 0                          ' Achsen Minimum ist bei 0 Minuten.
61             Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Maximum = Startfenster.maxZeit
62             Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Interval = CInt((Startfenster.maxZeit - Startfenster.minZeit) / 12)      'Skalierung auf 12 Achsenwerte
63
64             Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Title = "Zeit [min]"
65             Chart2.ChartAreas(0).AxisY.Title = "Hits"
66             Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Minimum = 0
67             Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Maximum = Startfenster.maxZeit
68             Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Interval = CInt((Startfenster.maxZeit - Startfenster.minZeit) / 12)
69
70             Chart3.ChartAreas(0).AxisX.Minimum = Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Minimum
71             Chart3.ChartAreas(0).AxisX.Maximum = Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Maximum
72             Chart3.ChartAreas(0).AxisX.Interval = Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Interval
73
74         End If
75
76         If Startfenster.TemperaturButton.Checked Then
77
78             Label3.Text = "Temperaturauflösung: "
79             Label4.Text = Startfenster.dt & " °C"
80
81             Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Title = "Temperatur [°C]"
82             Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Minimum = CInt(Startfenster.minTemp - 1)
83             Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Maximum = CInt(Startfenster.maxTemp + 1)
84             Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Interval = 4
85
86             Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Title = "Temperatur [°C]"
87             Chart2.ChartAreas(0).AxisY.Title = "Hits"
88             Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Minimum = CInt(Startfenster.minTemp - 1)
89             Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Maximum = CInt(Startfenster.maxTemp + 1)
90             Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Interval = 4
91
92             Chart3.ChartAreas(0).AxisX.Minimum = 0
93             Chart3.ChartAreas(0).AxisX.Maximum = Startfenster.maxZeit
94             Chart3.ChartAreas(0).AxisX.Interval = CInt((Startfenster.maxZeit - Startfenster.minZeit) / 12)
95
96         End If
97
98         If Startfenster.AmplitudeButton.Checked Then
```

```
            Chart1.ChartAreas(0).AxisY.Title = "Amplitude [dB]"
            Chart1.ChartAreas(0).AxisY.Minimum = CInt(Startfenster.minA)

        End If

        If Startfenster.EnergieButton.Checked Then

            Chart1.ChartAreas(0).AxisY.Title = "Energie [eu]"
            Chart1.ChartAreas(0).AxisY.Minimum = 0

        End If


        If Startfenster.FrequenzButton.Checked Then

            Chart1.ChartAreas(0).AxisY.Title = "Frequenz [kHz]"
            Chart1.ChartAreas(0).AxisY.Minimum = CInt(Startfenster.minF)

        End If


        If Startfenster.xMinBox.Text <> Nothing Then Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Minimum = Startfenster.xMinBox.Text
        If Startfenster.xMaxBox.Text <> Nothing Then Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Maximum = Startfenster.xMaxBox.Text
        If Startfenster.yMinBox.Text <> Nothing Then Chart1.ChartAreas(0).AxisY.Minimum = Startfenster.yMinBox.Text
        If Startfenster.yMaxBox.Text <> Nothing Then Chart1.ChartAreas(0).AxisY.Maximum = Startfenster.yMaxBox.Text

        If Startfenster.xMinBox.Text <> Nothing Then Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Minimum = Startfenster.xMinBox.Text
        If Startfenster.xMaxBox.Text <> Nothing Then Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Maximum = Startfenster.xMaxBox.Text
        If Startfenster.y2MinBox.Text <> Nothing Then Chart2.ChartAreas(0).AxisY.Minimum = Startfenster.y2MinBox.Text
        If Startfenster.y2MaxBox.Text <> Nothing Then Chart2.ChartAreas(0).AxisY.Maximum = Startfenster.y2MaxBox.Text


        Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Interval = CInt((Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Maximum - Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Minimum) / 12)
        Chart2.ChartAreas(0).AxisX.Interval = CInt((Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Maximum - Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Minimum) / 12)



        For i = 1 To 8

            If Startfenster.Gruppenauswahl(i) = True Then
                y(i) = Startfenster.zähler(i)
                x(i) = ""


            End If

        Next
```



```
        PieChart.Series("Series1").Points.DataBindXY(x, y)


        If Startfenster.ZeitButton.Checked Then

            Chart3.ChartAreas(0).AxisX.Minimum = Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Minimum
            Chart3.ChartAreas(0).AxisX.Maximum = Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Maximum
            Chart3.ChartAreas(0).AxisX.Interval = Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Interval

        End If


        For i = 0 To 8

            PieChart.Series("Series1").Points(i).Color = Chart1.Series("Series" & i).Color
            Chart2.Series("Series" & i).Color = Chart1.Series("Series" & i).Color
            Chart1.Series("Series" & i).MarkerSize = Startfenster.ListBox1.SelectedItem


            If Startfenster.Gruppenauswahl(i) = True Then

                Chart1.Series("Series" & i).IsVisibleInLegend = True
                Chart2.Series("Series" & i).IsVisibleInLegend = True
                TableLayoutPanel3.Controls("Label2" & i).Text = Startfenster.zähler(i)

                If Startfenster.StepLineButton.Checked Then Chart2.Series("Series" & i).ChartType = DataVisualization.Charting.SeriesChartType.StepLine
                If Startfenster.ColumnButton.Checked Then Chart2.Series("Series" & i).ChartType = DataVisualization.Charting.SeriesChartType.StackedColumn
                If Startfenster.PointButton.Checked Then Chart2.Series("Series" & i).ChartType = DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Point
                If Startfenster.PrintButton.Checked Then Chart2.Series("Series" & i).ChartType = DataVisualization.Charting.SeriesChartType.StackedColumn

                For j = 1 To Startfenster.Hits

                    If Startfenster.Gruppen(i, j) = True And Startfenster.ZeitButton.Checked Then

                        If Startfenster.AmplitudeButton.Checked Then Chart1.Series("Series" & i).Points.AddXY(CInt(Startfenster.Zeit(j)), CDbl(Startfenster.Amplitude(j)))
                        If Startfenster.EnergieButton.Checked Then Chart1.Series("Series" & i).Points.AddXY(CInt(Startfenster.Zeit(j)), CDbl(Startfenster.Energie(j)))
                        If Startfenster.FrequenzButton.Checked Then Chart1.Series("Series" & i).Points.AddXY(CInt(Startfenster.Zeit(j)), CDbl(Startfenster.Frequenz(j)))

                    End If

                    If Startfenster.Gruppen(i, j) = True And Startfenster.TemperaturButton.Checked Then

                        If Startfenster.AmplitudeButton.Checked Then Chart1.Series("Series" & i).Points.AddXY(CDbl(Startfenster.Temperatur(j)), CDbl(Startfenster.Amplitude(j)))
                        If Startfenster.EnergieButton.Checked Then Chart1.Series("Series" & i).Points.AddXY(CDbl(Startfenster.Temperatur(j)), CDbl(Startfenster.Energie(j)))
```

```
192                     If Startfenster.FrequenzButton.Checked Then Chart1.Series("Series" & i).Points.AddXY(CDbl(Startfenster.Temperatur(j)), CDbl
    (Startfenster.Frequenz(j)))
193
194                 End If
195
196             Next
197
198
199             For j = 1 To Startfenster.steps
200                 Chart2.Series("Series" & i).Points.AddXY(Startfenster.xAchse(j), Startfenster.Kurve(i, j))
201             Next
202
203
204         Else
205             TableLayoutPanel3.Controls("Label2" & i).Text = "-"
206             Chart1.Series("Series" & i).Color = Color.Transparent
207             Chart2.Series("Series" & i).Color = Color.Transparent
208             Chart1.Series("Series" & i).IsVisibleInLegend = False
209             Chart2.Series("Series" & i).IsVisibleInLegend = False
210
211         End If
212
213
214         TableLayoutPanel3.Controls("Label3" & i).Text = "Hits"
215
216         Chart1.Series("Series" & i).LegendText = "Gruppe " & i
217         Chart2.Series("Series" & i).LegendText = "Gruppe " & i
218         Chart2.Series("Series" & i).Color = Chart1.Series("Series" & i).Color
219
220         Me.TableLayoutPanel3.Controls("Label1" & i).Text = "Gruppe " & i & ":"
221
222     Next
223
224
225     Label10.Text = "Channel " & Startfenster.Kanal & ":"
226     Label20.Text = Startfenster.zähler(0)
227     Chart1.Series("Series0").LegendText = "Channel " & Startfenster.Kanal
228     Chart2.Series("Series0").LegendText = "Channel " & Startfenster.Kanal
229
230
231     If Startfenster.PointButton.Checked Or Startfenster.ColumnButton.Checked Or Startfenster.PrintButton.Checked Then
232
233         Chart2.Series("Series0").ChartType = DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Column
234
235     End If
236
237     For i = 1 To Startfenster.Hits
238
239
```



```
240         Chart3.Series("Series0").Points.AddXY(CInt(Startfenster.Zeit(i)), Startfenster.yTemperaturAchse(i))
241
242
243     Next
244
245     If Startfenster.PrintButton.Checked Then
246
247         Me.BackColor = Color.White
248         TableLayoutPanel1.BackColor = Color.White
249         TableLayoutPanel2.BackColor = Color.White
250         TableLayoutPanel3.BackColor = Color.White
251         TableLayoutPanel4.BackColor = Color.White
252         PieChart.BackColor = Color.White
253         Chart1.BackColor = Color.White
254         Chart2.BackColor = Color.White
255         Chart3.BackColor = Color.White
256         PieChart.ChartAreas(0).BackColor = Color.White
257         Chart1.ChartAreas(0).BackColor = Color.White
258         Chart3.ChartAreas(0).BackColor = Color.White
259         Chart2.ChartAreas(0).BackColor = Color.White
260         Chart1.Legends("Legend1").BackColor = Color.White
261         Chart2.Legends("Legend1").BackColor = Color.White
262         Chart3.Legends("Legend1").BackColor = Color.White
263         Chart1.Series("Series0").Color = Color.Black
264         Chart2.Series("Series0").Color = Color.Black
265         Chart3.Series("Series0").Color = Color.Black
266         PieChart.ChartAreas(0).Area3DStyle.Enable3D = False
267
268
269         For i = 1 To 8
270
271             Chart2.Series("Series" & i).Color = Color.Black
272
273         Next
274
275
276         Chart2.Series("Series5").Color = Color.DimGray
277         Chart2.Series("Series7").Color = Color.DarkGray
278         Chart2.Series("Series2").Color = Color.LightGray
279         Chart2.Series(4).BackHatchStyle = DataVisualization.Charting.ChartHatchStyle.Percent50
280         Chart2.Series(1).BackHatchStyle = DataVisualization.Charting.ChartHatchStyle.LightDownwardDiagonal
281         Chart2.Series(3).BackHatchStyle = DataVisualization.Charting.ChartHatchStyle.DarkUpwardDiagonal
282         Chart2.Series(8).BackHatchStyle = DataVisualization.Charting.ChartHatchStyle.SmallCheckerBoard
283         Chart2.Series(6).BackHatchStyle = DataVisualization.Charting.ChartHatchStyle.DarkDownwardDiagonal
284
285
286         For i = 1 To 8
287
288             PieChart.Series("Series1").Points(i).Color = Chart2.Series("Series" & i).Color
```

```
289                 Chart1.Series("Series" & i).Color = Chart2.Series("Series" & i).Color
290                 PieChart.Series("Series1").Points(i).BackHatchStyle = Chart2.Series("Series" & i).BackHatchStyle
291
292
293             Next
294
295
296         End If
297
298
299     End Sub
300
301
302
303     Private Sub SpeichernButton_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles SpeichernButton.Click
304
305         Dim StringTeile() As String
306         Dim Verzeichnis As String
307         Dim saveFileDialog1 As New SaveFileDialog()
308         saveFileDialog1.Filter = "Bitmap Image|*.bmp"
309         saveFileDialog1.FileName = Startfenster.Dateiname & " - " & "Channel " & Startfenster.Kanal
310
311         If SaveFileDialog1.ShowDialog() = DialogResult.OK Then
312
313
314             Me.ControlBox = False                               ' Keine Controlbox
315             Me.Tag = Me.Text                      ' Text aus Titelleiste speichern
316             Me.Text = ""                            ' Text in Titelleiste löschen
317             SpeichernButton.Visible = False
318             SchließenButton.Visible = False
319
320             Dim Breite As Integer = Me.Width         ' Breite des Steuerelements
321             Dim Hoehe As Integer = Me.Height         ' Höhe des Steuerelements
322             Dim Schnappschuss As Bitmap = New Bitmap(Breite, Hoehe) ' Größe der Bitmap
323
324             ' ***** Schnappschuß machen als Bipmap *****
325
326             Me.DrawToBitmap(Schnappschuss, Rectangle.FromLTRB(0, 0, Breite, Hoehe))
327             Me.Text = Me.Tag.ToString                           ' Text zurück in Titleleiste
328             Me.ControlBox = True                                ' Controlbox wieder sichtbar
329             My.Computer.Clipboard.SetImage(Schnappschuss)       ' In die Zwischenablage
330             SpeichernButton.Visible = True
331             SchließenButton.Visible = True
332
333             ' ***** Falls in der Zwischenablage eine Bitmap vorliegt *****
334
335             If System.Windows.Forms.Clipboard.GetDataObject() IsNot Nothing Then
336
337                 Dim Zwischenablage As IDataObject = System.Windows.Forms.Clipboard.GetDataObject()
```



```
338                 If Zwischenablage.GetDataPresent(System.Windows.Forms.DataFormats.Bitmap) Then
339
340                     Dim Bitmuster As System.Drawing.Image = CType(Zwischenablage.GetData(DataFormats.Bitmap, True), Image)
341
342                     ' Als bmp speichern
343
344
345                     Bitmuster.Save(SaveFileDialog1.FileName, Imaging.ImageFormat.Bmp)
346
347                 End If
348
349             End If
350
351             StringTeile = saveFileDialog1.FileName.Split(".")
352             Verzeichnis = StringTeile(0) & ".filter"                    ' Parallel zum Bild, das Abspeichern einer Filterdatei
353
354
355             Using sw As System.IO.StreamWriter = System.IO.File.CreateText(Verzeichnis)
356
357                 sw.WriteLine("Dateiname:                " & vbTab & vbTab & Startfenster.Dateiname)
358                 sw.WriteLine("SampleRate [Hz]:          " & vbTab & vbTab & Startfenster.SampleRate)
359                 sw.WriteLine("Sets:                     " & vbTab & vbTab & Startfenster.Hits)
360                 sw.WriteLine("Samples/Set:              " & vbTab & vbTab & Startfenster.SamplesPerHit)
361                 sw.WriteLine("Pre-Trigger Samples:      " & vbTab & vbTab & Startfenster.PreTriggerSamples)
362                 sw.WriteLine("Scale Factor [mV]:        " & vbTab & vbTab & Startfenster.ScaleFactor)
363                 sw.WriteLine()
364                 If Startfenster.ZeitButton.Checked Then sw.WriteLine("Zeitauflösung [min]:" & vbTab & vbTab & vbTab & Startfenster.dt)
365                 If Startfenster.TemperaturButton.Checked Then sw.WriteLine("Temperaturauflösung [°C]:" & vbTab & vbTab & Startfenster.dt)
366
367                 sw.WriteLine("Kanal:                    " & vbTab & vbTab & Startfenster.Kanal)
368                 sw.WriteLine()
369                 sw.WriteLine()
370                 sw.WriteLine("Filtereinstellungen:")
371                 sw.WriteLine()
372                 sw.WriteLine(vbTab & vbTab & "Ansicht" & vbTab & vbTab & "Energie" & vbTab & vbTab & "Amplitude" & vbTab & "Frequenz" & vbTab & "FrequenzL." ↙
    & vbTab & "FrequenzR")
373                 sw.WriteLine()
374
375                 For j = 1 To 8
376
377                     sw.WriteLine("Gruppe " & j & ":" & vbTab & Startfenster.Gruppenauswahl(j) & vbTab & "|" & Startfenster.Filter(j, 1) & "|" & Startfenster. ↙
    Filter(j, 2) & "|" & vbTab & "|" & Startfenster.Filter(j, 3) & "|" & Startfenster.Filter(j, 4) & "|" & vbTab & "|" & Startfenster.Filter(j, 5) & "|" & ↙
    Startfenster.Filter(j, 6) & "|" & vbTab & "|" & Startfenster.Filter(j, 7) & "|" & Startfenster.Filter(j, 8) & "|" & vbTab & "|" & Startfenster.Filter(j, ↙
    9) & "|" & Startfenster.Filter(j, 10) & "|")
378
379                 Next
380
381
382                 If Gruppenfenster.FFTCheckBox.Checked = False Then
```

```
                    sw.WriteLine()
                    sw.WriteLine("Das Frequenzkriterium wurde nicht verwendet")
                Else
                    sw.WriteLine()
                    sw.WriteLine("Breite des Hauptmaximas [kHz]:      " & vbTab & Startfenster.FrequIntervall)
                End If

            End Using

        End If



    End Sub



    Private Sub Schließen_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles SchließenButton.Click

        Me.Close()

    End Sub



End Class
```

C. Vallen AMSY-5 Systembeschreibung

Vallen Systeme GmbH

The Acoustic Emission Company

Acoustic Emission System

AMSY-5

System Description

AMSY-5 = **A**coustic Emission **M**easurement **Sy**stem,

high-speed ♦ user-friendly ♦ high performance ♦ very flexible

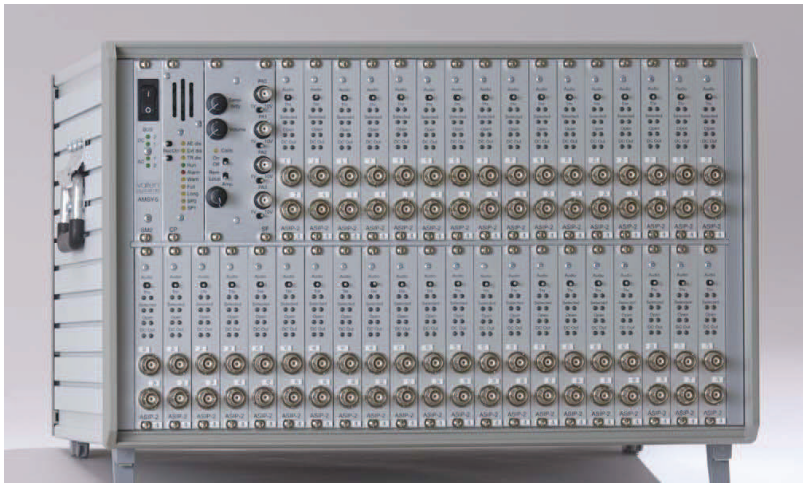


Figure 1: AMSY-5 Master Unit M37-2

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444

Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH

Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany

email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

Contents:

1 Acoustic Emission Overview 4
1.1 AE Measurement and the AMSY-5 4
1.2 Uses of AE 4
2 Hardware Overview 5
2.1 Acoustic Emission Preamplifier 6
2.2 AE Signal Processor ASIP-2 6
2.3 Special Feature Unit AMSY-5-SF 8
2.4 Control Panel AMSY-5-CP 9
2.5 Externals Connector 9
2.6 Alarm/Warning Connector 10
2.7 Switch (SW) 10
2.8 AMSY-5 Rack Driver 10
2.9 ASyC – AE System Controller 11
2.10 External PC 11
2.11 AMSY-5 Units 11
3 Software Overview 11
3.1 Data Acquisition 12
3.2 Acquisition Dialogs 13
3.2.1 Parameter Settings 13
3.2.2 TR Data Select Settings (ASIP-2/A only) 15
3.2.3 TR-Settings: Choosing the TR- and AE sample rate (ASIP-2/A only) 15
3.2.4 Notch Filter Settings (ASIP-2/A only) 15
3.2.5 Disk Space Allocation Dialog 15
3.2.6 Record Control Dialog 16
3.2.7 Online Threshold Control 16
3.2.8 Pulsing 17
3.3 External Control of Acquisition32 18
3.4 Analysis Programs – the VisualCircle 19
3.4.1 VisualAE 19
3.4.2 Relation of VisualAE to Acquisition32 20
3.5 Analysis using VisualAE 20
3.6 Data Processing 21
3.6.1 Location Processor 21
3.6.2 Cluster Processor 22
3.6.3 Filter Processor 22
3.6.4 Polygon Processor 22
3.6.5 Grading Processor 22
3.6.6 User Processor 22
3.6.7 ECP Embedded Code Processor 23
3.6.8 Image Processor 23
3.6.9 Alarm Processor 23
3.6.10 Summary 23
3.7 AE Visuals 23
3.7.1 TR Diagrams 23
3.7.2 AE Diagrams 23
3.7.3 Listing 24
3.7.4 Coupling Table 24
3.8 Reporting 24
3.8.1 Exporting Diagrams 24
3.8.2 Printing 24
3.9 User-Data-Access 24
3.10 More Analysis Software 24
3.10.1 TR-Viewer 24
3.10.2 VisualTR 25
3.11 Online-Help 26
3.12 Modify PAx Input 26
3.13 PCTA-Counter Extender 26

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444

Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH

Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany

email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

4 Results 26
4.1 Hit Data 27
4.1.1 HITS Hits 27
4.1.2 CHAN Channel Number 27
4.1.3 TS Arrival Time 27
4.1.4 A Peak Amplitude 27
4.1.5 ALIN linear Peak Amplitude 28
4.1.6 THR Threshold 28
4.1.7 E Energy 28
4.1.8 CENY Cascaded Energy 28
4.1.9 R Risetime 28
4.1.10 D Duration 28
4.1.11 CNTS Counts 29
4.1.12 CCNT Cascaded Counts 29
4.1.13 RMS Background Noise 29
4.1.14 CHITS Cascaded Hits 29
4.1.15 TRAI Transient Recorder Index 29
4.1.16 Hit Data Flags 29
4.2 Status Data 31
4.2.1 CHAN Channel Number 31
4.2.2 RMSS Background noise 31
4.2.3 ENYS Energy between two status data sets 31
4.3 Parametric Data 31
4.3.1 PA0...7 Parametric Analog Inputs 31
4.3.2 PA0...7U Parametric Analog Inputs 31
4.3.3 PCTA Analog-Controlled Counter 31
4.3.4 PCTE Extended PCTA 31
4.3.5 PCTD Dig. Controlled Counter 32
4.3.6 CYSL Cycle Slope Flag 32
4.4 Location Results 32
4.4.1 EV Events 32
4.4.2 SIGS Signals of Event 32
4.4.3 1.CH…7.CH Channel Sequence 32
4.4.4 DT12...17 Time Difference 32
4.4.5 DT1X Time Difference 32
4.4.6 X X-Coordinate 33
4.4.7 Y Y-Coordinate 33
4.4.8 Z Z-Coordinate 33
4.4.9 LONG Longitude 33
4.4.10 LATI Latitude 33
4.4.11 LUCY Location Uncertainty 33
4.4.12 CGRP Channel Group Number 33
4.4.13 RANK Location Ranking 33
4.5 Administrative Results 33
4.5.1 LABL Label Number 33
4.5.2 DSET Data Set 34
4.6 TR-Feature Extractor Results 34
4.6.1 FCOG Center of Gravity of Frequency Spectrum 34
4.6.2 FMXA Frequency at max. Amplitude of Spectrum 34
4.6.3 FExYY User-assignable Results 34
5 Appendix 35
5.1 ASIP-2/S (Standard) Block Diagram 35
5.2 ASIP-2/A (Advanced) Block Diagram 36
5.3 Special Feature Board - Block Diagram 37
5.4 AMSY-5 System Block Diagram 38
5.5 AEP4 Preamplifier Block Diagram 39
5.6 Example of VisualAE data presentation from a foam glass test under compressive load 40

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

1 Acoustic Emission Overview

Acoustic Emission (AE) testing is a powerful method for examining the behavior of materials deforming under stress. Materials 'talk' when they are in trouble and with the AMSY-5 AE-instrument you can listen to the sounds of crack growth, phase transitions, leakage, friction (both external and by crack surfaces), yielding, fiber-breakage, debonding, corrosion, wear, capacitive (or partial) discharge, cavitation, impact, etc.

Everyone is familiar with AE as heard from wood cracking and glass breaking, however AE equipment as the AMSY-5 can monitor many more useful non-audible emission phenomena. The AMSY-5 is an advanced AE system as it possesses the ability to detect all these AE sources but with improved sensitivity using state-of-the-art 32-bit software tools.

AE activity is detected when a mechanical wave propagates to an AE sensor. In contrast to audible AE, each measured AE signal appears as an electrical signal that can be seen on an oscilloscope or a transient recorder display. Typically AE appears as a wave packet (burst) that increases, reaches one or more peak amplitudes and then decreases. AE is typically monitored above the audible frequency range (often 100-1000 kHz) with a resonant piezo-electric sensor, but the AMSY-5 can work with many more sensor types and in a frequency range from 5 kHz to 3 MHz.

1.1 AE Measurement and the AMSY-5

The AMSY-5 is mainly used to measure and analyze discrete AE signals that cross a pre-defined fixed or floating threshold. In addition to discrete AE, the AMSY-5 can monitor and analyze continuous AE, produced by leaks and wear, for example.

The AMSY-5 converts each wave packet received by each channel into a set of numerical features describing the signal. Important signal features include: arrival time, peak amplitude, energy, rise time, counts and duration.

For the location of a defect in a structure, sensors can be mounted at many different positions on the tested object. The propagation times between the AE source and each sensor will give a series of time differences. By using these time differences, the AMSY-5 software can calculate the source location. The AMSY-5 also groups AE signals from a common source as "events" (each individual signal is called a "hit," regardless of how it is grouped).

Both hits and events can be filtered, classified, accumulated and clustered. Results are displayed graphically and/or numerically, either during the test (on-line) or during posttest analysis (off-line).

The AMSY-5 is the fourth generation of fully digital AE-systems developed by Vallen Systeme since 1985. It incorporates the experience and feedback received from users of the previous generations of digital AE-systems AMS2 (introduced 1986), AMS3 (introduced 1991), and AMSY4 (introduced 1996). AMSY-5 consists of very powerful hardware which includes: fast and accurate analogue to digital converters (40 Mega samples per second with ASIP-2), field programmable gate arrays, digital signal processing chips, the very fast ASyC (AE System Controller) PCI interface board, an external PC (e.g. desktop, lunchbox, panel,…), plus a very complete, flexible and easy-to-use software package. The software provides: system control, parameter management, data acquisition & recording, data analysis, source location, filtering, clustering, presentation and documentation of the measured data. Since this software is derived from the powerful and mature AMSY4 software package, the AMSY-5 offers a mature software package from the beginning.

1.2 Uses of AE

Each AE source listed in paragraph 1 of Acoustic Emission Overview represents one or more applications (uses) of an AE instrument. Some examples include integrity analysis that relies on detection of cracks and other defects, leak monitoring accomplished through leak detection and material process monitoring which can use phase transitions detection. Signal features may indicate the source mechanism (cracking, friction...) and help to distinguish the interesting AE signals from undesired noise.

With the help of the AMSY-5 system, the AE phenomenon can be used for the non-destructive inspection of small and large-sized structures, such as pressure vessels, pipelines, bridges, storage tanks, and for other components for which the early detection of reduced structural integrity is important.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

By discovering hidden failures, even at inaccessible locations of a structure, damage can be prevented: this is one of the major achievements of the AMSY-5.

2 Hardware Overview

The AMSY-5 is a multi-channel AE system consisting of parallel measurement channels. Each channel combines an analogue measurement section, digital processing of the signal and communication to the systems front-end, which is a powerful PC with a complete set of peripherals.

The analogue measurement chain of each channel consists of an AE sensor, a preamplifier and one channel of an ASIP-2 (Dual channel AE Signal Processor), plugged into the system case. The AE-sensor picks up the stress wave from the structure, converts it into an electric signal that is then amplified by a preamplifier nearby. In the ASIP-2, the AE-signal received from the preamplifier is converted into a digital data stream.

AE-features such as time of the first threshold crossing (arrival time), risetime, duration, peak amplitude, energy and counts are extracted by the ASIP-2. In parallel to the feature extraction, the complete waveform can also be stored in an optional transient recorder module.

The AE-feature data as well as parametric data, such as load, strain temperature, etc. are temporarily stored in the memory of the ASyC (32MB) and then transferred to the PC.

In parallel to transferring the AE data the ASyC can read the waveform data from the ASIP-2's optional transient recorder and transfer it to a TRA-file (transient data file) on the PC hard disk. TR-Features can be extracted from the time or frequency domain of the waveform data and be analyzed in combination with the traditional AE-data (online as well as offline).

During data acquisition, or later, after the test, the data can be analyzed and displayed in various different plots on the screen of the PC.

Figure 1 shows the front of a 74-channel AMSY-5 system, illustrating its user-friendliness, compactness and comprehensiveness.

Each ASIP-2 front panel gives the user easy access to 2 BNC connectors for preamplifier connection and one switch to toggle audio-selection per channel on and off. ASIP-2 gives the following status information on 4 bi-color-LEDs:

- Threshold crossing detected
- Amplitude saturation detected
- Channel selected for audio or test-pulse-through
- Preamplifier connected
- Preamplifier supply overloaded
- Input mode DC@50R or AC@100K

More details about the front panel elements will be given later in this document.

On the left of the upper row of ASIP-2's the special feature plug-in AMSY-5-SF can be seen. There are 4 (isolated) BNC connectors for 4 isolated parametric inputs, each one with a range selection switch for 1 V or 10 V. There are also front panel controls for the audio output and the pulser amplitude. The SF-plug-in incorporates a pulser control that receives pulser commands from the PC and controls a pulse amplifier in the system to generate either single pulses or pulse trains up to $400V_{pp}$ in amplitude.

On the left of the SF-module, the Control Panel AMSY-5-CP can be seen. It provides additional status LED's; two switches for enabling/disabling the recording of AE and/or transient data and a speaker to make audio signals audible.

On the very left the front panel AMSY-5-SM (Supply Monitor) with the power switch shows LED's for AC on and DC ok.

An "Externals" connector providing access to various inputs and outputs is on the backside.

The built-in power supply is optimized for lowest possible noise.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

Not seen in Figure 1 is the ASyC (AE System Controller) that is used to assemble data and send it to the PC for further data analysis.

The block-diagrams in the appendix will help in understanding the system concepts of the AMSY-5.

2.1 Acoustic Emission Preamplifier

The acoustic signal is received by the AE sensor and fed electrically to a preamplifier nearby. The amplified AE signal is transmitted along a coaxial cable to the ASIP-2 plug-in in the AMSY-5 system case. The coaxial cable can be several 100 m long. Vallen Systeme offers three preamplifier models: AEP3, AEP4 and integrated preamplifiers in some sensor models. A number of derivatives exist of AEP4 and the integrated preamplifiers. A block diagram of the AEP4 preamplifier is shown in Appendix 5.5.

In low-noise applications, the very first amplification stage of the measurement chain determines the quality of the complete measurement chain. Subsequent stages of the measurement chain amplify not only the desired signal, but also the noise from the first amplification stage. The best signal-to-noise ratio is achieved with a high gain of the very first amplification stage.

On the other hand, when high input voltages are expected, a high gain of the first stage would saturate the measurement chain, hence the gain of the first stage must be lowered for high-level applications.

AE applications are so diverse that a fixed gain of the very first stage of the measurement chain might not be the optimum for all applications.

The AEP3 preamplifier offers the most flexible and best possible solution for that requirement; the gain of the very first stage in the preamplifier is software programmable for a total gain of 34dB to 49dB.

The gain can be adapted to the current needs by software and is automatically taken into account when the amplitude, the threshold, the energy and the RMS-noise are calculated.

The AEP3 preamplifier's frequency range is 20kHz to 2MHz, normally limited by very sharp high-pass (54dB/octave) and low-pass plug-in filter modules as required by the application.

The model AEP4 preamplifier is a lower cost alternative that does not offer the programmable gain function or the sharp filtering. It has a wideband response from 3 kHz to 3 MHz that is suited under the assumption that the necessary filtering is done in the ASIP-2 board. The preamplifier's low noise, in combination with the high resolution of the ASIP-2, at fixed gain of 34 dB (can be jumpered to 40dB) it suits most of the applications. While the AEP3 offers connectors for single-ended and differential sensors, the AEP4 supports single ended sensors only.

The test-pulse-through capability is another unique feature of the preamplifiers AEP3 and AEP4: Test pulses can be passed through the preamplifier up to the sensor.

The AEP3/AEP4 preamplifier is connected to the ASIP-2 board in the system case by a single coaxial cable over which the preamplifier supply ($28V_{DC}$), the amplified AE signal, the gain control information and test pulses are transmitted.

Instead of a separate preamplifier, a sensor with integrated preamplifier can be used. The available integrated preamplifiers do not provide a programmable gain and the sharp frequency filtering. Most of them provide the test-pulse-through feature. The AEP4-IS combines a low-noise preamplifier with 400Vpp test-pulse-through capability with an integrated, spring-loaded sensor and a strong 3-point magnet holder.

2.2 AE Signal Processor ASIP-2

Two versions of ASIP-2 are offered: ASIP-2/S as standard version and ASIP-2/A as advanced version. The following describes the advanced version and notes which functions are not included in the standard version.

As the ASIP-2/A block diagram in the appendix 5.1 shows, each channel can be set to one of four possible input modes:

The normal input mode is "**28V@50Ohm**" what means that the BNC connector delivers 28V DC supply for the preamplifier and employs an input impedance of 50 Ohm.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

When the input mode "**AC@100K**" is selected by software, the channel does not deliver any DC and employs an input impedance of 100kΩ. In this mode, several channels can be connected in parallel to one preamplifier and only one of them must be set to 28V@50Ohm. This is helpful, if one sensor signal shall be acquired using different thresholds and/or different filters.

With the input mode "**8-28V@200R**", the DC voltage for preamplifier supply is programmable in the range 8 to 28V and the input impedance is 200 Ohm. (Available with ASIP-2/A).

With input mode "**8-28V@50Ohm**", the DC voltage for preamplifier supply is programmable in the range 8 to 28V and the input impedance is 50 Ohm (Available with ASIP-2/A).

The preamplifier signal of each channel is fed over a programmable gain (x 1, 2, or 4), over an analogue high-pass and a 2.4MHz antialiasing low-pass filter to the Analog-Digital-Converter (ADC). ASIP-2/S offers gain 1 only, and that results in an input range of 5 V_P (10 V_{PP}).

The high-pass filter is switch-selectable to a corner frequency of 18kHz (normal) or 1.6kHz (for very special low-frequency applications).

The ADC converts the filtered signal at 40 MHz sample rate with 16 bit resolution. A 27-tap FIR filter behind the ADC reduces ADC-noise and expands the dynamic range to 18 bit.

Application specific frequency filtering is done in digital technology on the output of the ADC. This concept offers three main advantages:

1. For any kind of application, the optimum bandwidth can be selected without touching the hardware.
2. With low bandwidth applications, e.g. tank floor testing, the system noise can be drastically reduced compared to earlier models, since the ADC noise is filtered out as well.
3. With same filter setting, there is zero tolerance of filter behavior between the channels.

One of about 500 bandpass filters can be selected with ASIP-2/A at any time. ASIP-2/S comes with high-pass frequencies of 25, 50, 95 and 230 kHz and low-pass frequencies of 45, 300 and 850kHz. A bypass to the bandpass filter is also included. Any additional bandwidth option for ASIP-2/A can be purchased for ASIP-2/S.

Both, high-pass and low-pass filters are 8th order: they provide a roll-off attenuation of 48dB/octave.

Filters for 40 MHz AE-sample rate (feature extraction processing rate) are of 4th order providing a 24 dB/octave roll-off.

ASIP-2/A offers an additional filter stage which can be configured as a notch filter that blocks one, two or 4 user-defined frequencies, up to 2.5% of the AE sample rate.

The output of the digital filter goes to the AE-feature extraction. The routines for feature extraction are given by firmware and can be updated in the course of future developments.

The following features are processed: Arrival time, peak amplitude, risetime, duration, counts, true energy or signal strength, and background noise (before a hit) as true RMS or absolute average level. If true energy and true RMS mode is selected the AE signal is digitally squared, otherwise the digitally rectified value is further processed.

The resulting feature values are stored in the subsequent buffer memory from where it is read and processed by the ASyC.

Parallel to the feature extraction the digitally filtered AE signal goes to the optional transient recorder storage and to the audio-selection sub-system.

The optional transient recorder storage module is an add-on module for the ASIP-2. It has a very flexible choice of trigger configurations. It stores the waveform of AE-signals. Options for 8 or 256 MB or 1GB per channel are offered. Lots of waveforms can be temporarily buffered and are then transferred to the PC over the ASyC during data acquisition.

When the audio-selection LED at the ASIP-2's front panel is lighting green, the filter output is sent over a separate bus to the audio DAC on the SF-module. There the signal envelope of all selected channels is converted to an analogue signal which is made audible by the speaker in the control panel AMSY-5-CP.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

2.3 Special Feature Unit AMSY-5-SF

The block diagram of the AMSY-5-SF special feature board (see appendix 5.3) shows the functions implemented on the SF-unit:

- Measurement of 0, 2, 4 or 8 parametric inputs, such as for load, temperature, crack opening, etc. (a PBx option must be chosen for this)
- Generating pulses for the sensor coupling test or acoustic ultrasonic applications via a pulse amplifier in the master unit.
- Receiving the maximum AE-signal of selected channels and converting it into an audible signal played over the speaker in the control panel AMSY-5-CP.
- The SF-boards of interconnected AMSY-5 Master Units can be used up to 8 PAx inputs.

The SF module, like the ASIP-2 plug-in, is a Eurocard module plugged into the front of the AMSY-5 system box.

It can provide 0 (no PBx option), 2 (with option PB2) or 4 (option PB4) parametric inputs. For needs of more than 4 parametric inputs the option PB8 can be delivered. It provides 8 inputs but occupies the space of one ASIP-2 on the right of the SF-panel. The master case can then house two channels less.

Each parametric input is isolated against ground to avoid ground loop problems. Each parametric input has a strong, user-friendly BNC connector at the front panel, a 1V / 10V-range selection switch, a differential input, an input filter with a jumper-selectable 3dB-frequency limit (16 Hz or 180 Hz), and a 16-bit 100 ksample/s ADC.

Each parametric input is protected by a 100 V-varistor against common mode over-voltages and by a 33 V-varistor against normal mode over-voltage.

A FPGA controls the ADC's of the parametric inputs and stores the data in an ASyC-readable FIFO buffer.

The parametric values can be displayed versus time, and/or in any combination with AE data, and can be used for filtering of AE data. Parametric data sets are created at an adjustable rate (100 Hz to 5 kHz) and added to hit data sets. While AE signals are not arriving, parametric data sets are generated at user-defined time intervals, e.g. once every second, to ensure that plots, such as Load versus Time, show data in sufficient time resolution even when there are no hits detected.

Beside of the parametric inputs, the parametric data set contains the parametric counters PCTA, PCTD and PCTE and the CYSL flag as described later in this chapter.

In the software, the analog inputs are identified by the abbreviations "PA0" to "PA7". The corresponding BNC inputs on the front panel of the parametric unit are labeled accordingly.

The parametric input PA0 can be selected for counting load cycles. The parametric counter "PCTA" (parametric counter, analog controlled) is incremented, when the PA0 input voltage crosses a user-defined trigger-level. A user-defined hysteresis prevents counter-triggering by noise. Instead of the 16-bit counter PCTA, a 32-bit counter PCTE can be used for load cycle counting.

If PCTE is not used, an additional 16-bit parametric counter with 4 digital inputs is provided as described later. The values of either parametric counters, PCTA (16 bit) and PCTD (16 bit), or PCTE (32 bit) are included in the parametric data set.

A flag called "CYSL" (cyclic load's slope) reflects the direction of the movement of the analog input voltage at PA0. CYSL can be used as filter criterion distinguishing events, generated during increasing load, from events, generated during decreasing load.

PA0 can also be used to control the data recording: When the voltage at the selected input is outside the user-defined limits, data recording is disabled.

The control for sensor coupling test pulser is also part of the special feature unit. Pulser commands from the PC are converted into pulses, amplified over the system internal pulse amplifier and fed out either at a BNC connector at the rear panel or sent to a sensor via the pulse-through feature of a selected AE-channel. The pulses are adjustable in amplitude (manually in local mode, or software selectable in remote mode) from 4 to 400V_{PP}. Two frequency ranges for the pulses can be software selected. Normal: 90-210kHz and Low: 30-210kHz (-12dB points).

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

To inject as much energy as possible into the structure, the SF-PU can generate a programmable number of pulses (1 to 15) in a single pulse train (burst).

2.4 Control Panel AMSY-5-CP

This panel has an internal speaker for audio output, 2 record enable/disable switches and LED's for: AE-disable, TR-disable, External disable, Running, Warning, Alarm, and 2 spare LEDs for future developments.

2.5 Externals Connector

The "Externals" connector is a 15-pole male D-connector which allows for external record control and control of the parametric counter PCTD. One can also connect an external speaker (in parallel to the internal speaker in the unit). This connector inputs and outputs the following signals over the following pin numbers:

Pin	Signal	Pin	Signal	Meaning
1	Return line for pin 9	9	Speaker	External speaker amplifier, connected to internal speaker over 100R. Voltage limited to range 0..5V by internal ESD-protection circuit
2	Return line for pin 10	10	CAL-DAC	Outputs the DA-converted pulse amplitude control signal (only for system checkout, 0...+5V)
3	GND	11	PCTD-Clock	Any transition (H->L or L->H) increments or decrements the parametric counter PCTD, depending on the other inputs of the PCTD. Operates only, if the system is running.
4	GND	12	PCTD-up/down	High or open: causes that PCTD increments, Low: causes that PCTD decrements, when PCTD-clock changes H-L or L-H
5	GND	13	PCTD-enable	High or open: enables incrementing/decrementing of PCTD, Low: a transition at PCTD-clock does not change PCTD
6	GND	14	PCTD-reset	High or open: PCTD is set to 0 Low: PCTD stores the current value
7	GND	15	ETRIG	Spare for future use
8	/DISABLE			Low disables AE- and TR-recording and lets the LED "Ext. Dis" shine

Note: Pin 1,2,9,10: are outputs, no external voltage shall be applied at these pins.

Pin 8, 11 to 15: are TTL inputs. Only voltages between 0 and +5V against pins 3 to 7 (ground) are allowed at these pins, and only when the unit is powered and switched on, otherwise permanent damage might occur. Open pins are high. All signals are limited to the voltage range 0…5V by internal ESD protection circuit that protects internal electronics against electrostatic discharge transients up to 15kV (human body model)

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

2.6 Alarm/Warning Connector

This is a 9-pole female D-connector. It grants access to the following signals over the following pin numbers:

Pin	Signal	Pin	Signal	Meaning
1	+5V	to supply external logic. CAUTION: permanent DAMAGE may occur if a) pin 1 is connected to ground or b) pin 1 is connected to pins 6-9 over less than 333Ohm		
2	GND	6	ALARM	low when ALARM LED is on, otherwise pulled up to 5V by 10 kΩ
3	GND	7	WARN	low when WARNING LED is on, otherwise pulled up to 5V by 10 kΩ
4	GND	8	SP0	low when SP0 LED is on, otherwise pulled up to 5V by 10 kΩ
5	GND	9	SP1	low when SP1 LED is on, otherwise pulled up to 5V by 10 kΩ

Note: Pin 6 to 9: each drives up to 15mA to +5V, means minimum allowed resistance between Pin 1 and each of the pins 6 to 9 is 333Ohm. A lower resistance, or a short cut, may cause permanent damage. All signals are protected against electrostatic discharge of up to 15kV (human body model)

2.7 Switch (SW)

At this switch the address of the AMSY-5 unit is defined. In addition, it lets the user disconnect the internal pulser from the pulsing bus. (The BNC cables that connect all BNC connectors "Pulse out /in")

Sw		ON	OFF	Meaning
6	Pulse	out	in	Both switches (5 and 6) must be either ON or OFF. If ON, the internal pulser output is connected to the BNC connector "Pulse out/in" and makes that connector an output. At extension units these switches must be OFF. At the master unit with the lowest address (defined by switches 1-4), the switches 5 and 6 must both be set to ON, if the internal pulse shall be used. At all other units, switches 5 and 6 must be set to OFF.
5	Pulse	out	in	
4	Addr 3	0	8	Define any address (1 to 14) of an AMSY-5 unit as sum of the weight of each switch set to OFF. Example: Switch 4:ON (0), 3:OFF (4), 2:OFF (2), 1:ON (0) defines Addr = 0+4+2+0 = 6. Each unit must have a unique address. The master unit with the lowest address acts as master unit, the others as extension units. Address = 0 and 15 are not allowed.
3	Addr 2	0	4	
2	Addr 1	0	2	
1	Addr 0	0	1	

Note: AMSY-5 software automatically detects address duplicates and illegal address settings.

2.8 AMSY-5 Rack Driver

As shown in the AMSY-5 block diagram (see appendix), the AMSY-5 Rack Driver links the ASIP- bus (at the rear of the AMSY-5 unit), in which one or more ASIP-2s and an AMSY-5-SF unit is installed, with the external ASyC-Bus and the control panel AMSY-5-CP.

The Rack Driver supports multiple AMSY-5 Master Units and/or Extension Units. These are then fully synchronized so that location calculation can be made between channels of different units.

The Rack Driver also provides a special trigger function for the transient recorders, the Pool Trigger: The first threshold crossing of any channel in the pool immediately triggers all transient recorders of the pool. The Pool Trigger function supports multiple Master-/Extension Units. This feature helps to evaluate delta-t's between channels in noisy environments by using cross correlation techniques.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

2.9 ASyC – AE System Controller

The ASyC is a half size PCI interface board to be mounted in an external PC. The ASyC comprises a PowerPC processor and large (32MB) memory for intermediate data storage prior to transfer to the PC.

Since the PC runs under Windows 2000®/XP® which are no real time operation systems; it is very important that the ASyC has enough temporary storage space to cover time periods when the CPU is not available for data transfer. However, the AMSY-5 data processing scheme is designed such that data can never go lost.

Before any buffer fills up, the channel group is set into a so-called “long rearm mode” during which only the most important data will be acquired until enough data is transferred and buffer space is again available.

During signal pauses, the ASyC calculates the floating threshold by multiplying the RMS value of the background noise by a user-defined factor. The user can define a minimum value for the floating threshold. The ASyC is mounted to the PCI bus like any other standard board.

2.10 External PC

The AMSY-5 requires an external PC to which it can easily be connected by cables CBL1-x.x, using a rugged plug.

Any kind of PC, e.g. desktop, lunchbox, 19” rack industry standard PC can be used. Thereby the system can easily be upgraded to latest PC technology. A notebook can be used in combination with either a docking station or a Cardbus-to-PCI-Extender.

Please find the minimum PC requirements in the AMSY-5 System Specification (section External PC).

2.11 AMSY-5 Units

Three different Master Units M6-2, M16-2, and M37-2, for up to 6, up to 16, or up to 37 ASIP-2s, are available. Additionally an Extension Unit E20-2 for up to 20 ASIP-2 boards is available.

The AMSY-5 units are described in detail in the AMSY-5 System Specification document.

3 Software Overview

The AMSY-5 software is well-proven native 32 bit software designed for the Windows 2000® or XP® operating system. Its multitasking capabilities allow for running several tasks in parallel. Its reliability secures safe data recording.

The Vallen Control Panel is the central control unit of Vallen Systeme software. From here the user starts the data acquisition and analysis software.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

Figure 2: Vallen Control Panel.

Data acquisition is completely independent of analysis and data display. During data acquisition as well as for post test analysis, the operator can choose one or more of the following analysis programs from the Control Panel:

- VisualAE™
- VisualTR™ or TR-Viewer under the TR section of the control panel.
- VisualClass™ and/or a Classifier
- Various utilities

Note: Some programs, such as VisualTR™, are optional components of the software package.

3.1 Data Acquisition

The 32-bit AMSY-5 acquisition program acquires AE data only or AE and TR data simultaneously (TR modules needed) and stores them on hard disk. In parallel, the data can be analyzed by e.g. VisualAE.

Double clicking on ‘Acquisition32’ in the Vallen Control Panel starts the program. The hardware detection sequence evaluates and tests all installed hardware components and their revisions.

Note: Vallen software has always been compatible with many years old hardware.

Menus in Acquisition32 let the user

- specify the storage file,
- specify all acquisition parameters,
- activate and deactivate data acquisition,
- start and stop pulse through mode, and
- insert labels.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

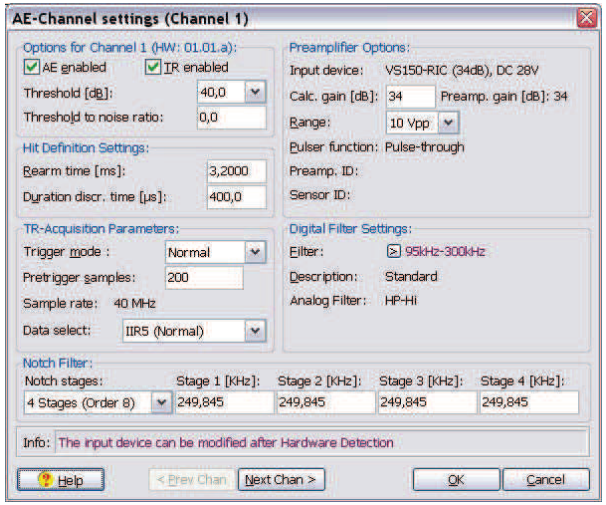


Figure 3: dialog to specify the channel settings.

The acquisition settings are stored in a separate file (*.vac). Those can be copied and their names changed for use with a new measurement.

Different file-types exist:

- Primary data file (extension .pri)
- TR-data files (extension .tra)
- Transient Record Feature files (extension .trf)
- VisualAE set-up files (extension .vae)
- VisualTR set-up files (extension .vtr)

3.2 Acquisition Dialogs

As already mentioned the hardware detection sequence first evaluates and shows the individual hardware components of the system and their revision. There are many more dialogs available. Among them are:

3.2.1 Parameter Settings

Different menus let the user define different kind of acquisition parameters.

The dialog below (see Figure 4) displays the AE-channel parameters. By double clicking on a channel the AE channel settings dialog is opened (see Figure 3), which gives access to the settings of a single channel.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

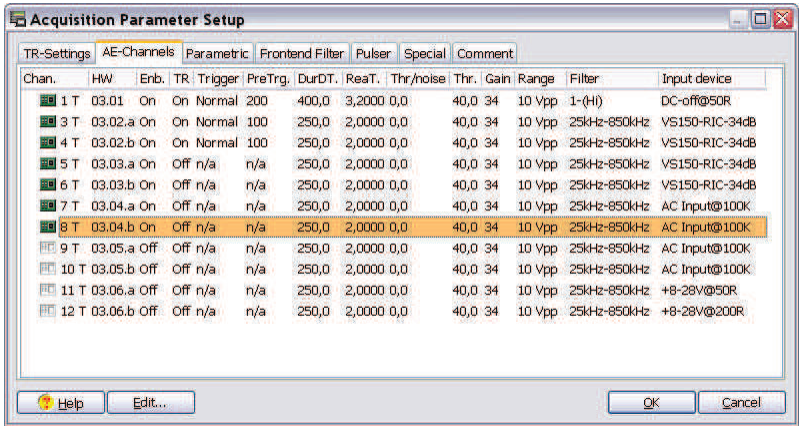


Figure 4: AE-Channels tab of the Acquisition Parameter Setup menu.

There are seven dialog tabs that can be accessed from the Acquisition Parameter Setup dialog:

- **TR-Settings** for the acquisition of digital waveforms (sample rate, size of page). Faster sample rates and larger samples per waveform increase the resolution of the waveforms, while slower sample rate and smaller samples per waveform minimize the needed disk space and TR-data transfer. The sample rate of AE-data can be selected here as well.
- **AE-Channels** for the traditional settings (threshold, gain, hit-timing, etc,) and waveform settings (pre-trigger, trigger mode) as well as filter and notch filter (ASIP-2/A only) settings.
- **Parametric** for the parametric settings, such as acquisition clock, storage interval, cycle counter threshold and more.
- **Frontend Filter** to reject hits / waveforms before these are stored, if desired.
- **Pulser** for the settings of the test-pulse, such as pulse amplitude, pulses per burst, burst interval, and more.
- **Special** for other settings, such as the energy mode (true energy or signal strength measurement), Continuous Mode, External Threshold Mode, and more.
- **Comment** for free text entered by the user, to be stored with the AE data.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

3.2.2 TR Data Select Settings (ASIP-2/A only)

The Data Select setting (see Figure 3, TR-Acquisition Parameter group), available for ASIP-2/A, specifies after which filter the TR data is recorded. Possible settings are

- FIR: after the anti-aliasing filter (FIR) and before the bandpass filter.
- IIR4: after the bandpass filter (IIR4) and before the notch filter.
- IIR5: after the notch filter, the last filter in the filter chain. (Normal, ASIP-2/S)

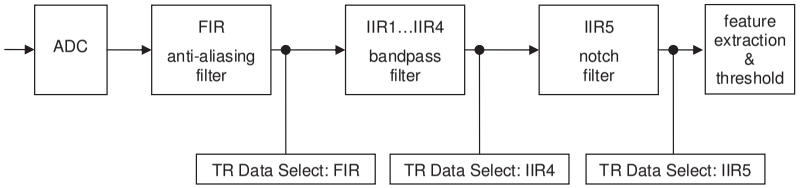


Figure 5: filter chain from ADC (analog to digital conversion) to feature extraction.

While the AE features are always extracted behind filter IIR5, waveform data can be optionally taken after FIR or IIR4 with ASIP-2/A. This allows for narrow band triggering but wide band waveform capture.

3.2.3 TR-Settings: Choosing the TR- and AE sample rate (ASIP-2/A only)

The TR-Settings tab is used for selection of the sample rate of TR-data (waveform capture) and AE-data (feature extraction). With ASIP-2/S AE-data sample rate is 10 MHz. With ASIP-2/A, 10, 20, or 40 MHz AE sample rate can be selected. This influences the range of available bandpass filters:

Any standard filter (about 500), can be used with AE sample rates up to 20 MHz. Each bandpass consists of an 8th order high-pass and an 8th order low-pass, each providing a filter roll-off of 48dB/octave.

At 40MHz AE sample rate, 100kHz or bypass can be selected for high-pass, and 1.8, 2.0, 2.2 MHz, and bypass for low-pass. Such a bandpass consists of an 4th order high-pass and a 4th order low-pass.

The performance of AMSY-5 is optimized for 10 MHz AE sample rate. Higher sample rates decrease the maximum acquisition speed, when a large number of channels is in use.

3.2.4 Notch Filter Settings (ASIP-2/A only)

Using the AE channels settings dialog (see Figure 3) the notch filter settings can be specified. The notch filter can be used to filter out certain frequencies of the AE-spectrum. The notch filter can consist of 1, 2 or 4 stages, for AE-sample rates of 40, 20 or 10 MHz respectively. Each stage resembles an infinite impulse response (IIR) filter of 2nd order. For each stage one frequency to be filtered out can be specified in kHz, up to 2.5% of the selected AE-sample rate. Entering 0 kHz switches a notch filter stage off.

A one stage notch filter provides approximately 26dB attenuation at the notch frequency. For higher attenuation, a second stage can be set to the same frequency. Sometimes the 2nd, 3rd and 4th stage are used to reject harmonics of the lowest notch frequency.

3.2.5 Disk Space Allocation Dialog

This menu recommends the file size (up to 64GB for TR data and up to 4GB for AE data) to be allocated, which the user can simply accept with "Okay." If the user desires, this menu lets the user limit the available size for data acquisition.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

Vallen AE systems have always provided a strategy for protecting data files against power loss and system crashes. Even after a power loss, data acquisition can be continued at the interrupted point - without remarkable data loss. This can be achieved due to Vallen's Disk Space Allocation mechanism.

3.2.6 Record Control Dialog

This menu controls on-line communication between the user and both the data file and the AE-acquisition hardware. The "Record" button begins acquisition.

Figure 6: record control dialog

At any time, the user can insert text labels (comments) into the data stream. Such labels can be used as start and termination criteria for the analysis process. Using the label feature, the data file can be conveniently subdivided into an unlimited number of easily addressable sections.

Labels are automatically inserted, when the acquisition process is resumed after a stop, when parameters, such as gain, threshold etc. are changed and reloaded into the AMSY-5 hardware, and when a sensor coupling test sequence is started or terminated.

The record control dialog also informs whether front-end filtering is activated and whether True Energy or Signal Strength has been selected.

3.2.7 Online Threshold Control

The Online Threshold Control is accessed via the record control dialog. A right click on the record control dialog opens a pop up menu from which one can choose **Threshold Control** (<Ctr>+<t>).

The Online Threshold Control gives the user access to the threshold settings of every single channel. By use of this dialog the user can change the threshold settings of a channel while the acquisition is still running. Changes to the threshold are instantly applied.

The altered settings for the threshold are written to VAC file when the acquisition is paused or stopped.

A vertical bar indicates the current amplitude of an AE-hit. The dimmed bar indicates the largest amplitude of the last two seconds. The red marker indicates the current threshold setting. A channel is selected either by a double click on the according bar or by selecting it from the drop down list.

The Help button lets one access context sensitive help information for accelerated learning.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

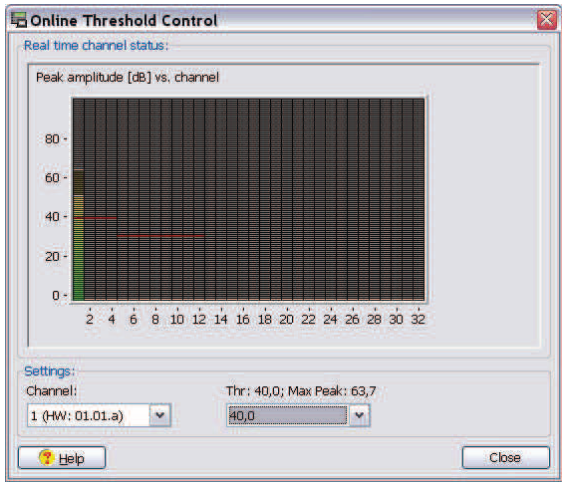


Figure 7: Online Threshold Control dialog

3.2.8 Pulsing

The pulsing function shall be used to verify that the sensor coupling does not degrade with time. Pulsing functions are available as soon as the recording is started (pushing the Record button, see Figure 6). There are three pulsing options:

1. Single Cycle: pulses are sent consecutively to each channel only once.
2. Iterative Cycle: pulses are sent consecutively to each channel until the user stops pulsing manually.
3. Single channel: a single channel pulses until the user stops pulsing manually.

Pulses are fed out either at a BNC connector at the rear panel of the AMSY-5 or sent to a sensor via the pulse-through feature of a selected AE-channel.

3.2.8.1 Pulsing via ASIP-2

Pulses can be fed to the sensor via ASIP-2 and preamplifier (caution: preamplifier must have pulse- through feature). The pulse-through feature of the ASIP-2 transfers the pulse over relays to the BNC connector of the pulsing channel (see block diagram of ASIP-2, Appendix: 5.1 and 5.2). Additionally the pulse is also fed via an attenuator (see block diagram of ASIP-2, Appendix: 5.1 and 5.2) into the AE-signal processing unit of the pulsing channel itself. An exact time stamp is produced of the pulse this way.

3.2.8.2 Verifying constant sensor coupling with time

Pulsing shall be used to verify that the sensor coupling is constant with time. At least at the beginning and end of a test a sensor coupling verification shall be performed.

During pulsing (iterative cycle, singly cycle or single channel), pulses are generated and sent to a software selected channel which is set to "pulse-through mode" to pass the pulses through to the preamplifier and to the sensor.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

The sensor injects acoustic waves into the structure. The waves propagate through, or along the surface of, the structure being tested, and the other AE channels receive these waves and convert them into AE data.

After 4 or 5 pulses, the software automatically selects (in single cycle or iterative cycle pulsing) the next channel for sending pulses.

From this data, the AMSY-5 software can calculate and list the velocity of sound. The calculation is based on sensor positions and the time difference of the first threshold crossing of two channels.

Coupling tables (formerly called auto calibration tables) let the user quickly and easily observe the operation of all the sensors and helps to identify any reduced efficiency in sensor coupling.

3.3 External Control of Acquisition32

Acquisition32 can be controlled externally by use of the command line tool AcqCmd.exe or by use of the ActiveX interface AcqCmdAPI. A detailed description can be found in the online help.

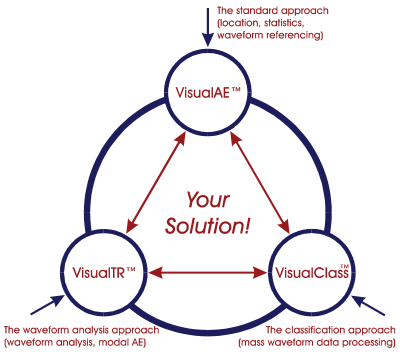
The AcqCmd.exe can be used to perform routine checks of sensor coupling as a scheduled task in Windows. See the online help, scheduled pulsing, for further information.

The AcqCmdAPI can be used to integrate the Acquisition32 into external software projects for automated control of the acquisition.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

3.4 Analysis Programs – the VisualCircle

VisualAE, **VisualTR** and **VisualClass** establish a powerful set of AE-analysis software, the so-called Vallen **VisualCircle**:



VisualAE, VisualTR and VisualClass are trademarks of Vallen-Systeme GmbH, Germany

VisualAE supports an unlimited number of 2D and 3D graphs on multiple pages, any combination of results, in-line filtering, many location algorithms, clustering, and more.

VisualTR is the ideal tool for a closer look at waveform data, with digital filtering, mode-selection using Gaussian cross-correlations, digital filtering, and includes a set of tools to manage learning data for signal classification.

VisualClass is a powerful tool for the development of a waveform classifier. The classification process assigns a class number and class-distance to each hit which are then stored on a so-called feature file. **VisualAE** can read that feature file and correlate the classification results with AE-parameters, external parameters, location results etc. This closes the circle **VisualAE** ✳ **VisualTR** ✳ **VisualClass** ✳ **VisualAE**.

In addition, ActiveX-routines are now available through which a user-written program can read waveform data and write feature data that can be processed by VisualAE. This helps the user to concentrate on the feature extraction development using the programming language he likes, because ActiveX-routines can be used with any 32-bit Windows programming environment.

3.4.1 VisualAE

VisualAE represents newest generation 32-bit Windows software for the analysis of AE data. It offers unique functionality and outstanding user-friendliness. Never before has the analysis of AE data been such powerful, transparent and flexible.

Because AE analysis is a complex topic, the new dimension in AE analysis achieved with VisualAE will quickly become an important factor. The many features available with VisualAE require some learning efforts. The scope of this document is to reduce these efforts to a minimum. An introduction to the internal data processing structure will be given that enables the user to draw optimum benefit from the use of VisualAE.

The control panel can launch the VisualAE program; this will request the data file (.PRI file) for analysis. When the acquisition program is already on-line the control panel suggests the on-line file in the file requester menu or most recently used files. For new files there will be a default set of graphs, the reset and run commands are used to analyze the data.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

3.4.2 Relation of VisualAE to Acquisition32

The program "Acquisition32" performs high-speed data acquisition at very high reliability. Data is stored to hard disk in a very efficient format. The analysis software VisualAE or VisualTR can immediately read any single data set that is written to disk. Acquisition32 and VisualAE or VisualTR are separate applications and can run independently from each other. As data is time sorted before it is stored to disk, location calculation is possible online and without any restrictions. A special communication module, the Scheduler, takes care that each analysis program is aware of data sets that have just been acquired. Of course offline analysis can be performed as well, even during the acquisition of another data file.

3.5 Analysis using VisualAE

During analysis data is read by VisualAE from the HDD (hard disk drive) and then processed in a processing tree. Analysis with VisualAE may contain 3 types of elements:

- **Data Source** (the file from where the program reads the data)
- **Data Processing** (more or less intense)
- **Data Presentation** (graphically or numerically)

The "**Data Source**" is usually a primary file that contains the binary AE-data with references into the waveform data file, plus the waveform data file, if one or more transient data diagrams are activated.

The "**Data Processing**" performs operations on data, such as location calculation, filtering, clustering and the evaluation of user-defined results. The user can define which of these processes shall take place and in which sequence. Multiple parallel processing paths can be linked to a previous processing element and form a more or less complex data processing tree.

Data Presentation is done by so-called "AE-Visuals". Each "AE-Visual" displays selected results in graphical or numerical form. The term AE-Visual includes AE-diagrams, AE-Listings and waveform diagrams, also called TR-diagrams (TR: transient recorder).

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

3.6 Data Processing

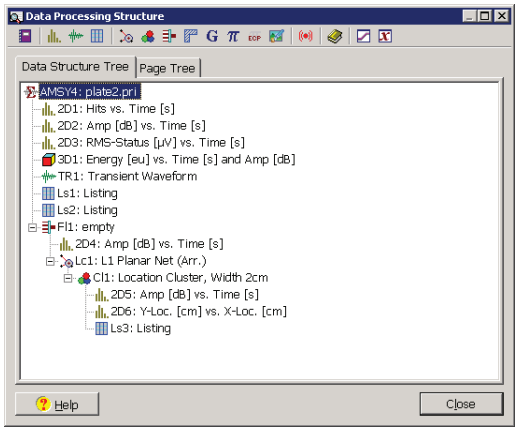


Figure 8: data processing – Data Structure Tree

The data-flow can be directed through several stages for calculations and/or decisions, the so-called "processors". The data read from the HDD are directed through the first processor. Its' output can be used as input for the next, subsequent processor stage(s) and so on.

A tree-structure can be created, starting from the data source (the "root" on top) and splitting up into several branches if required. The sequence of the processors is not fixed, but depends on the requirements of the analysis. To make the results accessible each "branch" requires a Visual (see section 3.7). This structure allows one to easily perform complex and powerful data processing.

3.6.1 Location Processor

The location processor assembles hits into events (hits determined to be generated by a single source), calculates the location of the source, and adds results, such as X, Y, LUCY (location uncertainty), time-differences, number of hits of the event, and more, to the event's data for further processing by subsequent processors or Visuals. Behind a location processor, AE parameters, such as amplitude, counts, etc., are taken from the first-hit of the event. The calculated kind of location results depend on the kind of location algorithm and can be x-, x-y-, x-y-z-coordinates or latitude and longitude, for example. The set-up for the location processor can be made according to the requirements of your application, for details see below (or online help).

3.6.1.1 Event builder

The event builder groups hits into events. The corresponding set-up parameters are found in the Event Builder Tab of the location setup. The "channels" portion of the dialog identifies which channels belong to the location set and whether it has a "normal", "guard" or "combined" function. The event assembly time criteria define how long the time differences can be for one event within a location set. If there are more hits than required to calculate the location, a location uncertainty result (LUCY) is available with most of the algorithms. Finally, general location setting, such as speed of sound, velocity units, maximum distance between sensors, etc. are also to be specified. These general settings are independent of the selected location algorithm.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

3.6.1.2 Channel group

There may be one or more groups inside a location set. With multiple channel groups more complex structures can be covered. Each group may be assigned to a different location algorithm. If sensors are located around a cylindrical vessel, the cylindrical part and the end caps can be combined in one location set by using multiple groups. This channel grouping includes but is not limited to the former Multi-Triplet location algorithm known from the Vallen MultiPlot program.

3.6.1.3 Location and Location Set

To calculate the location of a source from measured data, an algorithm can be assigned to each channel group individually. The kind of algorithm is based on a structure's geometry and how sensors are arranged on the structure. Location algorithms are options in the software and only the purchased algorithms can be used. The algorithms usually place some restrictions on number and position of sensors. For instance the algorithm "Solid 3D" requires at least 4 sensors.

Sensor and source locations are relative to a co-ordinate system defined by the user. If the sensors are not exactly at the position as entered in the software, this will influence the location accuracy.

3.6.2 Cluster Processor

While the cluster processor passes through all data, it adds density levels as defined by thresholds and provides additional statistics about these regions. In the past, clustering has been performed on location results (indicating the location density). In VisualAE the process has been generalized and clustering can be performed on any number and kind of results, such as location results, AE parameters, time, external parameters, and user-defined results.

The user specifies the results to be used for clustering (any number), size, shape (circle/rectangle) and minimum number of elements that shall establish a valid cluster. Graphs linked to the cluster processor and showing the cluster results will display color-coded clusters along with a cluster-legend explaining the color's meaning.

The clustering process is not limited to one or two dimensions: Any number of dimensions can be clustered. Any number of cluster processors can be defined in a processing tree.

3.6.3 Filter Processor

A filter processor passes or rejects AE-data sets based on user specified criteria. The filter processor considers AE-data and external parameters, if it is linked directly to the data file. Behind a location processor, it also considers location results. Behind a user-processor, it also considers the user-defined results. If the filter processor is placed behind a location set, it considers only hit-data of the first-hit per event.

3.6.4 Polygon Processor

This user processor is a kind of graphic filter: it allows the user to define arbitrary polygons on any kind of diagram. Each hit data set will be either inside or outside the defined area and can be filtered accordingly. Example: only data inside the polygon may pass for further analysis/display.

3.6.5 Grading Processor

Provides the formulae for Historic Index and Severity Index published by Professor Tim Fowler. These results can then be displayed graphically and also the maximum numerical values per channel can be obtained provided.

3.6.6 User Processor

User processors can extend the range of results by mathematical operations on all kind of incoming data. The user can choose from a list of predefined mathematical operations, supply one or more parameters or constants (depending on the operation) and give the new parameter both, name and units. User-defined results are available to any process and visual behind the user processor. For example: To produce a plot

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

"Cumulative Hits vs. Load", one can define a user-processor which gives the sum of hits (the value of "Hits" is always one for a hit), name it e.g. CumHITS, and then create a X/Y-history showing CumHits at the vertical axis and the parametric input for the load at the horizontal axis. In addition, combination of AE-parameters can easily be defined with user-processors, e.g. Risetime/Amplitude or Counts/Duration.

3.6.7 ECP Embedded Code Processor

It allows the user to write his own code to be executed inside VisualAE online as well as offline. With this advanced tool one can take any available result(s) and process them according to the specific needs. This is very powerful to support routine testing according to a well defined procedure.

3.6.8 Image Processor

With an image processor digital pictures can be stored and displayed inside VisualAE: with that one can keep measured data and digital photos together without further hassle.

3.6.9 Alarm Processor

Within the alarm processor the user can define a warning and an alarm level for any result. As soon as this level is reached or exceeded the software fires a signal to the Alarm Manager who in turn alerts the user: either by sound, blinking LED, sending a network message or even an email. Perfect to support monitoring of safety related tests where various criteria may trigger to halt or even abort the test.

3.6.10 Summary

A structure menu provides an overview about the current data processing structure. It shows the complete data processing tree including data source, processors, and visuals. From this menu the properties of all processors and visuals can be accessed and modified. The elements can be rearranged by drag-and-drop as well. Thereby you have complete and very convenient control of your data processing structure. You also can show the Visuals ordered by the page number and shift a visual from one page to another.

3.7 AE Visuals

For data presentation, VisualAE offers so-called AE-Visuals, which can be diagrams (AE and TR) and listings. Any number of visuals can be arranged to any point in the data tree. Of course, the results to be displayed have to be available at the linked point. For instance, a user-defined result can only be presented if the Visual is linked directly or indirectly behind the user-processor that evaluates this result.

3.7.1 TR Diagrams

TR-diagrams show waveforms (transient data) in time and/or frequency domain. If VisualTR has been purchased, the corresponding extra functions (e.g. digital filtering and more) are available for the TR Diagrams in VisualAE.

3.7.2 AE Diagrams

2D and 3D-diagrams show AE parameters versus other AE parameters, or the time, or external parameters.

Many properties of those graphs can be adjusted: the results (attributes) to be shown (e.g. Amplitude vs. Time, or Duration vs. Energy...), left and right axis legend, caption (top) and comment text (bottom).

Legends can be edited or made invisible, printable or not printable, and more.

Diagrams can show distributions, correlations (point plots), histories, etc. Each diagram can show several planes. Data represented on a plane can be filtered (e.g. show a certain amplitude range or a certain channel), the color and shape of symbols can be selected, and more.

3D-diagrams can be rotated around each axis and each axis can be stretched.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

3.7.3 Listing

A listing presents data in columns of numbers. The results to be listed and their ordering can be selected in the property menu where you also can define which kind of listing lines you want, such as first-hits only, subsequent hits, time driven external parameters and/or time driven status sets.

Listings can be exported via the clipboard.

3.7.4 Coupling Table

(Formerly called calibration table) The coupling table presents the results of a sensor coupling test run and is a powerful tool for checking sensor coupling and determining the speed of sound. If there are multiple such runs on a file, each run can be selected and differences between the runs can be shown.

3.8 Reporting

At the end of each data analysis task, usually a report has to be created. This part of your work, the representation of your results, is very important, can be quite time consuming and puzzling. VisualAE accelerates these important tasks tremendously. VisualAE offers numerous features for the generation of perfectly looking reports in a minimum of time.

3.8.1 Exporting Diagrams

Complete VisualAE-pages or single diagrams can be exported as graphic to clipboard (if the corresponding option is enabled) and transferred to your word processor or saved to file. Optional packages are available that include tools to copy only an individual AE-Visual. Powerful tools for adjusting the appearance of the graphs, such as the resolution, the inclusion of certain legends, and more, are included.

Another possibility is to export a diagram's data table via clipboard to e.g. a spreadsheet for further processing.

3.8.2 Printing

Creating high-resolution hardcopies from VisualAE is simple and convenient. Any Windows-supported printer can be used. A dialog window offers a printer-preview and many possibilities for adjusting the appearance of the printed page (landscape or portrait, size, position on page...).

3.9 User-Data-Access

Getting ASCII-data from the system is easy and important for a user who wants to use, for example, a spreadsheet program with AE data or transient data.

There are several possibilities to obtain stored AE data or transient data for further processing by other programs, either in ASCII form, or, directly read by user-programs (on-line as well as off-line).

One of them is exporting a listing via the clipboard; another is using the ActiveX interface XTR to read TR-data directly with user-designed software.

The above-mentioned details do not completely describe all features of VisualAE. This description shall prove that VisualAE offers you much more functionality than any other AE-software on the market today.

3.10 More Analysis Software

3.10.1 TR-Viewer

TR-Viewer is part of the basic package and offers reduced functionality (compared to VisualTR). It displays waveforms (fix/autoscaling), client diagrams and calculation of the FFT of a selected part of a waveform.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

3.10.2 VisualTR

This Windows program is the top tool for waveform data analysis.

It shows one or multiple graphs of transient recorder data (TR data) on one screen. Each graph contains the data around the corresponding trigger event, usually the first threshold crossing of a hit (or a hit-cascade).

The labels shown at the vertical scaling are always round numbers and refer to the preamplifier input.

A "Next", a "Previous" and a "Go to..." item in the context menu allow for navigating through the file. A "Run" mode is for stepping through the file without user intervention. A link to the acquisition task causes that new on-line data are shown in the Run mode automatically.

The user can call a context menu of a signal by clicking on the right mouse button. The vertical or horizontal scaling can be changed to zoom in any interesting part of the waveform.

A client-graph can be opened for each waveform diagram showing a selected part of the signal in time or frequency domain.

VisualTR (request separate brochure) supports selectable FFT window functions (Hamming, Hanning...), digital frequency filtering, Gaussian cross-correlation, editing of legend text, multiple pages and more. It also provides helpful utilities for feature extraction, filtering of TR data, combining TR-data from different files to e.g. learning data files and more.

3.10.2.1 Filtering of Transient Recorder Data

Since the selection of the interesting signals is a very important requirement when transient recorder data are to be analyzed, various TR-filter possibilities have been implemented in the AMSY-5 software:

The **front-end filter** rejects data according to the selected criteria before they are transferred and stored (e.g. if the AE data of the hit does not exceed selected minimum peak amplitude or the minimum duration).

The user can generate a correlation plot in VisualAE that contains the TRAI of filtered AE data. A utility (belongs to optional VisualTR) can then be used to copy only TR data belonging to the TRAI(s) of such a plot.

The following items are only available with the optional VisualTR package:

3.10.2.2 Feature Extractor

This is another VisualTR utility program to extract features from TRA data and to write them to a feature file. The AE analysis program can read this file. The TR-features are then handled like AE features (hit data), which means they can be plotted, listed, or used for filtering in the multi-plot program like AE results. The following results are calculated: Center of Gravity of the frequency spectrum (FCOG), Frequency of the spectrums' maximum (FMXA), initiation and reverberation frequency, spectral ratios (energy content ratio for up to 20 time-frequency windows) and some more are currently the most important TR-features.

3.10.2.3 FFT Averager

This application calculates and displays the average spectrum of all waveforms in a TRA file. From all FFTs, for each frequency bin, 3 averaging methods are calculated and shown in 3 curves:

- RMS: Root mean square, result converted to dB above 1 μV_{RMS}
- AVG:Mean value of all bins, result converted to dB above 1μV_{AVG}
- AVG[dB]: Mean value of all bins, converted to dB above 1µV prior to averaging,and a
- curve RMS subtracted by AGV[dB]. This curves gives an indication which frequencies are equally distributed on the analyzed data, (difference is very small) and, vice versa, at which frequencies the waveforms differ.

This application is useful for discovering the lowest level spectral compositions out of the white noise. Additionally the spectra reduces the white noise level shown and pronounces other spectral components.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

3.10.2.4 TR-Combi, TR-Copy, TR-Indexer

These Windows programs are utilities to copy selected TR data from one file to other file(s) and to renumber the TR-Index, where needed. They support the efficient generation of learning databases for signal classification by VisualClass.

3.10.2.5 Transient Data Listings

The waveform currently displayed by the waveform display program (TR-View) can be stored to an ASCII file, one sample per line, also over the "copy ASCII table to Clipboard" function in the TR-View and VisualTR programs.

3.10.2.6 TR-Filter, TR-Unifier

TR-Filter allows one to apply a digital (software) filter to already recorded data and store the result. Thereby TR-data recorded with different hardware filters can be unified.

TR-Unifier is a tool to change sample rate and page length (number of samples per waveform) after recording. This is very useful if data acquired with different settings shall be analyzed with VisualClass.

3.11 Online-Help

Online help is available in the help menu or by pressing F1 for further features. The user will probably wish to familiarize with some more of the features including sensor coupling test, labeling, PC configuration and on- and off-line analysis modes.

3.12 Modify PAx Input

This Windows program modifies parametric data on a primary file. The user can define the parametric input (PA0...PA7) to be modified and a list of data sets and the corresponding input voltages. The program calculates a voltage ramp for the parametric data between two specified data sets. This program enables the user to enter the load curve after a test, especially in the case when no analog signal of the load was available during the test.

In combination with a filter operation, such as "PA7 > -9.000", and setting PA7 to e.g. -10.000mV for a certain range of data sets, the user can exclude undesired hit-data from the data analysis.

3.13 PCTA-Counter Extender

This Windows program is a utility that extends the data from the 16-bit parametric counter PCTA to the 32-bit counter PCTE on already acquired data files. Helpful, when the user has forgotten to switch on PCTE before the data acquisition.

4 Results

The AMSY-5 system offers various results which are either directly measured, such as Arrival-time, Peak amplitude, Parametric Input, etc., or calculated, such as location results, delta-t, or signal slope. In addition, there are logical results (flags) that indicate special situations, such as multi-peak, hit-time-out, etc.

Each result has an identifier used in the filter editor, in plot legends, in listing headers, etc. This identifier is also used in the menu in which the user selects the desired result for plotting or listing. An extensive help text is provided in which the user quickly finds the description of each of the offered results.

Any numerical result can be selected as an axis attribute of a graph.

Most of the numerical and logical results are available for listing as well as for filtering.

The term "hit" means the AE signal of one event received by an independent channel. Several channels can receive hits from one and the same event. Those hits are collected to an event data set by the analysis software.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

In the following description of the AMSY-5 results, the abbreviation of each result is shown:

4.1 Hit Data

Hit data are generated by each AE channel independently, and describe usually one or a series of discrete AE signals with a clear beginning and end. The beginning of a hit is defined by its first threshold crossing, the end, by the absence of threshold crossings for a user-defined period of time, (the Duration Discrimination Time). A hit cascade is a series of discrete hits. The end of a hit-cascade is defined by the absence of threshold crossings for the selected Rearm Time.

Hit data sets contain the following information:

4.1.1 HITS Hits

This returns the value 1 for each hit data set, to be used in cumulative plots.

If location set zero is selected, all hits of all channels are considered. If a location set >0 is selected only hits from channels belonging to the selected location set are considered. Depending on the parameters of the plot currently being processed, either the hits of all considered channels are cumulated in one counter or only the first-hits are considered, or separate counters per channel are used.

HITS-histories as well as histories of CNTS, CCNT, E, CENY, and CHIT are automatically initiated as cumulative plots.

4.1.2 CHAN Channel Number

This is the number of the channel that has produced the data set.

4.1.3 TS Arrival Time

This is the absolute time of the first threshold crossing of a hit. It is measured and stored by each channel individually in steps of 100ns (200ns with AMS3). It is used to identify a hit (in combination with the channel number) and to calculate the event's source location (in combination with the arrival times of other hits).

In listings, the arrival time appears in long format:

"dd hh:mm:ss xxx.xxxx"

dd = day 0,1,2…n

hh = hour

mm = minute

ss = second

xxx.xxxx = ms, with a resolution of 0.1µs.

For graphs, the arrival time can be selected as:

TS (time in seconds) or as TH (time in hours).

TS and TH start with zero at the left-hand margin of the plot. The absolute time belonging to that zero-point is shown in long format in the legend of the graph.

For longtime tests that go over the end of a month, the day is not reset to 1; instead, it is incremented each day until the test ends. This ensures that the internal time is always incremental.

4.1.4 A Peak Amplitude

This is defined as the peak amplitude of a hit. The peak amplitude (A) is given in dB above 1µV referring to the preamplifier input (0dB = 1µV, 20dB = 10µV, 40dB = 100µV, etc.). Maximum is 99.9dB (98.9mV$_{PK}$) at 34dB preamplifier gain. The peak amplitude is extracted from a stream of 16 bit samples (resolution of 3µV at ±100mV range) and then converted to and stored as an 8 bit value with a resolution of 0.3763dB (20 * log(2)

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

/ 16) and an offset of 9.9dB.. The software takes the chosen preamplifier gain into account when displaying amplitude results.

4.1.5 ALIN linear Peak Amplitude

Peak Amplitude in µV. (Derived from the Peak Amplitude in dB)

4.1.6 THR Threshold

The first crossing of the threshold level is the start of a hit. The end of the hit is reached when the input voltage does not cross the threshold for a specified period of time (called the duration discrimination time). The threshold is a dB-value of same range and resolution as the peak amplitude.

In case of a floating threshold, the threshold can vary during a test. Because of this, the threshold is not only a parameter but also a result.

4.1.7 E Energy

The Energy is processed in either a so-called true energy mode, or a signal strength mode. In both modes, the energy is given in Energy Units (eu) and the software takes the selected gain into account, when calculating and displaying the energy. The energy is stored in a logarithm format with a resolution of 0.1%. The scaling below is given at 34dB gain.

True Energy Mode:

Energy is calculated by squaring the digitized AE signal and integrating the results during the hit. (Squarer option ASP-SQ needed)

1 eu corresponds to 10^{-14}V²sec at the sensor output (preamplifier input). The internal resolution is 0.18 * 10^{-3} eu; the maximum is 25*10^{9} eu (48 bit).

Signal Strength Mode:

Energy is calculated by integrating the absolute value of the AE signal during the hit.

1 eu corresponds to 1nVs at the preamplifier input. (The linear energy value is required by some standard procedures.)

The internal resolution is 0.3*10^{-3}eu, the maximum is 1.2885*10^{6} eu (32 bit).

4.1.8 CENY Cascaded Energy

The Cascaded Energy is the sum of the energies of the first-hit and all subsequent hits in a hit-cascade. For resolution and range see Energy.

4.1.9 R Risetime

The Risetime is the time between the first threshold crossing and the first peak detected in a hit.

The resolution is 200ns if R < 800µs else 0.025% of the value. Maximum value supported by the internal representation is 50s, limited to the value of the duration.

4.1.10 D Duration

The Duration is the time between the first and last threshold crossing of a hit.

The resolution is 200ns if D < 800µs else 0.025% of the value. Maximum value in the internal representation is 50s. Limited to about 100ms by the time-out feature of the AMSY-5.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

4.1.11 CNTS Counts

Counts are the number of positive threshold crossings of a hit. Range is limited to the maximum of 65535 (per hit).

4.1.12 CCNT Cascaded Counts

Cascaded Counts are the total number of positive threshold crossings during a hit-cascade. Range is 1 to 65535 (per hit-cascade).

4.1.13 RMS Background Noise

The RMS Background noise is the root-mean square value of the noise on each channel during pauses of threshold crossings. It is derived from the energy measurement. If no hits arrive, the energy is accumulated in time slices of 13ms. The energy rate per 13ms time interval is fed over a variable digital low-pass filter to achieve the user-selected time constant.

The RMS is presented in µV related to the sensor output (preamplifier input). The software takes the selected gain into account.

The result “RMS”, included in the hit data set, is a measure of the noise before the hit. The result “RMSS” is part of the status set (see below).

When True Energy is selected, a true RMS value is evaluated. When Signal Strength is selected, the linear average of the absolute voltage is evaluated. This conversion from energy rate to RMS is done in the analysis program.

Due to the averaging effect, the resolution is very fine. Reasonable accuracies cannot be expected from values lower than half the ADC resolution.

4.1.14 CHITS Cascaded Hits

Cascaded hits are the total number of hits in a hit-cascade.

4.1.15 TRAI Transient Recorder Index

The Transient Recorder Index is a unique number that identifies the transient recorder data belonging to the hit. This can be used to filter TR data according to filtered AE data.

4.1.16 Hit Data Flags

Hit Data Flags are used to indicate special conditions during a hit. These can be shown in a listing and they can be used as filter criteria.

0 means false, 1 means true.

The following flags are provided:

4.1.16.1 TOAB Time-out aborted Signal

This indicates a very long hit or hit-cascade (>100ms) which has been terminated by a time-out process. In the case of suddenly increasing noise (caused by a leakage for example), the hit evaluation is terminated by a time-out function to keep the time sorting process running.

In the listing, this flag is indicated by a "T".

4.1.16.2 ATOA After Timeout Signal

This indicates an artificially started hit after hit time-out (see above). Arrival time, risetime and duration of this hit are not meaningful. Meaningful are the results Cascaded Counts, Cascaded Energy, Amplitude. This hit is not suitable for location calculation.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

In the listing, this flag is indicated by an "A".

4.1.16.3 EXTC Extended Cascading

This indicates a temporary "long-rearm mode" which prevents buffer overflow, because the PC was not able to read out data fast enough.

In the listing, this flag is indicated by an "E".

4.1.16.4 DTOS DDT too short

This indicates a temporary "long duration discrimination mode": At the user-defined DDT, the detected hit rate is too fast to be processed.

In the listing, this flag is indicated by a "D".

4.1.16.5 ROVL Rearming Overlap

This indicates that at least one hit has been detected during rearming. It has the same meaning as "CHIT > 1".

Hardware rearming means waiting for a pause of threshold crossings for a user-defined period of time (the rearm time) before the channel is enabled to trigger a new evaluation of a hit-cascade.

In the listing, this flag is indicated by an "R".

4.1.16.6 CAL Coupling Pulse

(Formerly called Calibration pulse) This indicates a signal that has been generated by the test pulse through feature of the AMSY-5; which is to be used for the determination of the velocity of sound and for the confirmation of proper sensor coupling.

The amplitude of such a pulse is indicated approximately 60dB below the real amplitude at the emitting channel.

The flag is set in the signal data set of the emitting channel. When the software finds that flag set, it sets the flag internally for all hits generated within the ”hit tracking time”, a user controlled parameter.

The filter operation "CAL =1" allows only the transmitted and received test pulses to pass the filter. The filter condition "CAL =0" excludes such signals from an analysis process. Note: To eliminate test pulse data from a plot, you can also use a label filter.

4.1.16.7 CAL1 Coupling Pulse (sent)

CAL1 indicates hit data sets generated by the test pulse in the sending channel.

CAL1 is shown in the listing as upper case "C".

4.1.16.8 CAL2 Coupling Pulse (received)

CAL2 indicates a hit with a delta-t to the previous CAL1-flagged hit of less than the hit tracking time set in VisualAE/Edit/Project Settings/other.

CAL2 is shown in the listing by a lower-case "c".

4.1.16.9 SATR Saturation of Measurement Chain

SATR indicates when the amplitude of a hit exceeds 95% of the input range ($5V_p$). If hit amplitude exceeds 95% of the input range this is also indicated by a yellow flashing THR LED at the ASIP-2 front panel.

If a saturation occurred for a hit, this is indicated by a “S” flag in the listing.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

4.2 Status Data

Each channel generates status data sets in a time driven manner according to the user-defined status interval. Status data sets are also generated every time the transient recorder of a channel is triggered externally. Status data sets contain mainly the following results:

4.2.1 CHAN Channel Number

The number of the channel that has produced the status data set.

4.2.2 RMSS Background noise

This has the same meaning as RMS in hit data. It characterizes the background noise.

4.2.3 ENYS Energy between two status data sets

The energy (true energy or signal strength mode as described for E), including the energy of background noise and energy of hits during the time period between two status data sets.

4.3 Parametric Data

Parametric inputs (PA0-PA7) are measured in the time interval defined by Parametric Clock (0.2…10ms). The latest measurement is stored in a parametric data set, before the next hit data set. When hits arrive in shorter time distance than Parametric Clock, only one parametric data set is stored. When no hits arrive, parametric data sets are written at user-defined Parametric Interval (10 ms…600 s). Parametric results can be used to analyze AE data versus parametric information, e.g. load, pressure, temperature, etc., in correlation and distribution plots. Parametric data can be plotted independently from AE data in history plots.

4.3.1 PA0...7 Parametric Analog Inputs

All analog inputs, in the range -10240mV to +10235mV, are digitized with 0,315mV resolution, in the menu-selected time interval: range 200µs to 10ms.

Each measurement of these inputs is addressed by "PAx" whereby "x" identifies the channel number between 0 and 7. The peak to peak noise of the internal ADC is 2mV maximum.

4.3.2 PA0...7U Parametric Analog Inputs

In addition to PA0 to PA7 that are always presented in mV, PA0U to PA7U can be presented in any linear converted engineering unit, such as N, bar, etc.

To convert the mV into other engineering units, the measured values can be subtracted by an offset and multiplied by a factor. Offset and factor can be entered in the parametric conversion menu (via structure menu).

4.3.3 PCTA Analog-Controlled Counter

This means a 16-bit-counter, incremented when the voltage at PA0 crosses a user-defined trigger level in a certain direction.

A tunable hysteresis band avoids triggering by noise.

See PCTE for the 32-bit equivalent.

4.3.4 PCTE Extended PCTA

This identifies a parametric 32-bit counter like the PCTA. It can only be used if PCTD is not used. It must be selected in the Acquisition Parameter Setup.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

4.3.5 PCTD Dig. Controlled Counter

This identifies an additional 16-bit-counter. PCTD is incremented by the leading and the trailing edges of an external clock pulse, if enabled by an external enable input. This counter can be cleared by an external reset input (TTL-inputs, externals connector). If PCTD is to be used PCTA (but not PCTE) can be used simultaneously.

4.3.6 CYSL Cycle Slope Flag

This indicates the direction of the voltage change of the analog input that is selected as the PCTA-counter-input, normally measuring a cyclic load.

This flag can be used as a filter criterion to separate AE measured during increasing load, from AE measured during decreasing load.

Zero means a negative change.

One means a positive change.

If there is no change, the flag remains in its previous state.

Note: If noise is added to the input signal, this noise may influence the CYSL flag, too.

4.4 Location Results

A location processor generates location results. The setup is independent from the data acquisition and can be changed at any time during or after data acquisition. The program always uses the most recent version of that setup. The setup is stored on the .vae file.

4.4.1 EV Events

This identifies a counter in the analysis program that counts the number of events detected by the channels of the selected location processor. All hits coming from a common acoustic source are collected and only the first-hit of an event increments that counter.

Selecting EV makes only sense in distributions or cumulative histories. In correlations, the value "1" would be shown for each event.

4.4.2 SIGS Signals of Event

It gives the number of processed hits for the current event.

4.4.3 1.CH…7.CH Channel Sequence

This means the sequence number of a hit.

Example: An event hits first channel 2 then 4 and then 3. Then:

1.CH would be 2,

2.CH would be 4,

3.CH would be 3.

4.4.4 DT12...17 Time Difference

Each of these results reflects the time distance between the first-hit and the nth hit of an event. Mainly provided for filtering. For listing use DT1X.

4.4.5 DT1X Time Difference

This is the time difference between the first-hit of an event and the subsequent-hit currently being processed. It is mainly used in listings.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

4.4.6 X X-Coordinate

This is the location result in the X direction. All location algorithms calculate X.

At circular test structures, the valid range for X is (-0.5...+0.5) * circumference.

For spherical results, X corresponds to the projection of the radius vector onto the x-axis.

4.4.7 Y Y-Coordinate

This is the location result in the Y direction. All except the linear location algorithms calculates Y.

For spherical results, Y corresponds to the projection of the radius vector onto the y-axis.

4.4.8 Z Z-Coordinate

This means the location result in the Z direction in cm. Z is calculated by the 3D and spherical location algorithm.

For spherical results, Z corresponds to the projection of the radius vector onto the z-axis.

4.4.9 LONG Longitude

This means the degree longitude of a sphere. LONG is available for spherical location, only.

4.4.10 LATI Latitude

This means the degree latitude of a sphere. LATI is available for spherical location, only. 0 means equator, +90 means North Pole, -90 means South Pole.

4.4.11 LUCY Location Uncertainty

LUCY represents the location uncertainty of an event in cm.

The calculation of LUCY requires that more channels have been hit than needed for the location calculation. For example: 3 hits are needed to calculate a planar location. 4 hits would be needed to calculate the location uncertainty for a planar location.

As a filter criterion, LUCY can separate location results by its uncertainty and show only the more trustworthy locations.

4.4.12 CGRP Channel Group Number

Number of the channel group of the location processor. Using this in a plane filter of a location diagram lets one easily see which location set in a channel group has lead to which result.

4.4.13 RANK Location Ranking

This result gives a ranking of multiple location results per event in a location group that lets one easily select the result with the lowest LUCY (location uncertainty).

4.5 Administrative Results

4.5.1 LABL Label Number

This means the number of a text label inserted into the data stream either automatically by the system or by the operator. It can be used for filtering and as start and termination criterion for the analysis process.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

4.5.2 DSET Data Set

This means a sequential number assigned to each data set in the .PRI file at the time of the data analysis. For example, DSET can be used in a plot to find out the data set no. of a particular data range for using it as a start and/or termination criterion of the analysis process.

4.6 TR-Feature Extractor Results

These results are extracted from transient recorder data by the Feature Extractor Utility (part of VisualTR), stored on the Feature File and read by the analysis program (e.g. VisualAE).

4.6.1 FCOG Center of Gravity of Frequency Spectrum

This gives the frequency in kHz at which the spectrum has its center of gravity.

4.6.2 FMXA Frequency at max. Amplitude of Spectrum

This gives the frequency in kHz at which the spectrum shows the maximum amplitude.

4.6.3 FExYY User-assignable Results

There are 9 results FEx08 to FEx16 provided. To each of them the user can assign a certain feature that shall be extracted from transient recorder data.

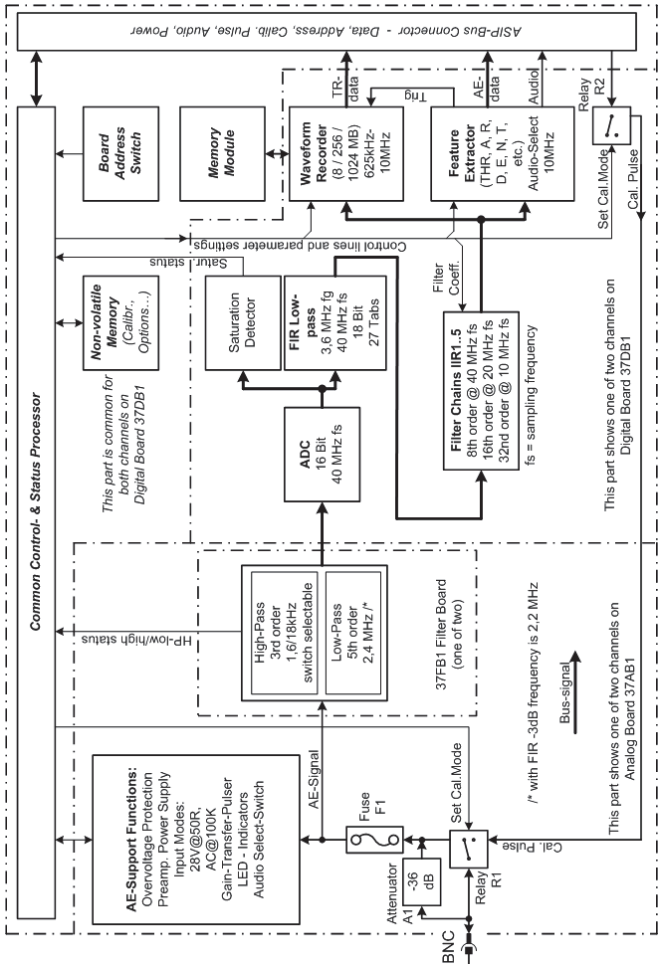
There are general features, like Counts to Peak, Initiation Frequency and Reverberation Frequency, and features that are extracted from user-defined time and frequency segments. Spectral densities may allow for the separation of source mechanisms or wave modes.

A detailed description is available in the online help system.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

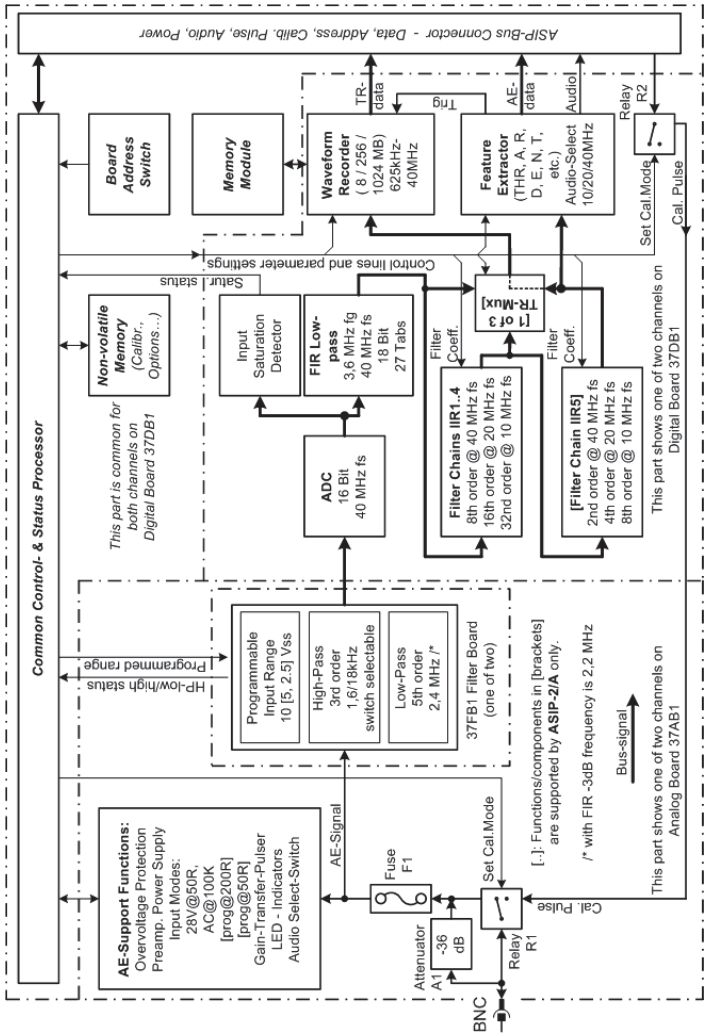
5 Appendix

5.1 ASIP-2/S (Standard) Block Diagram



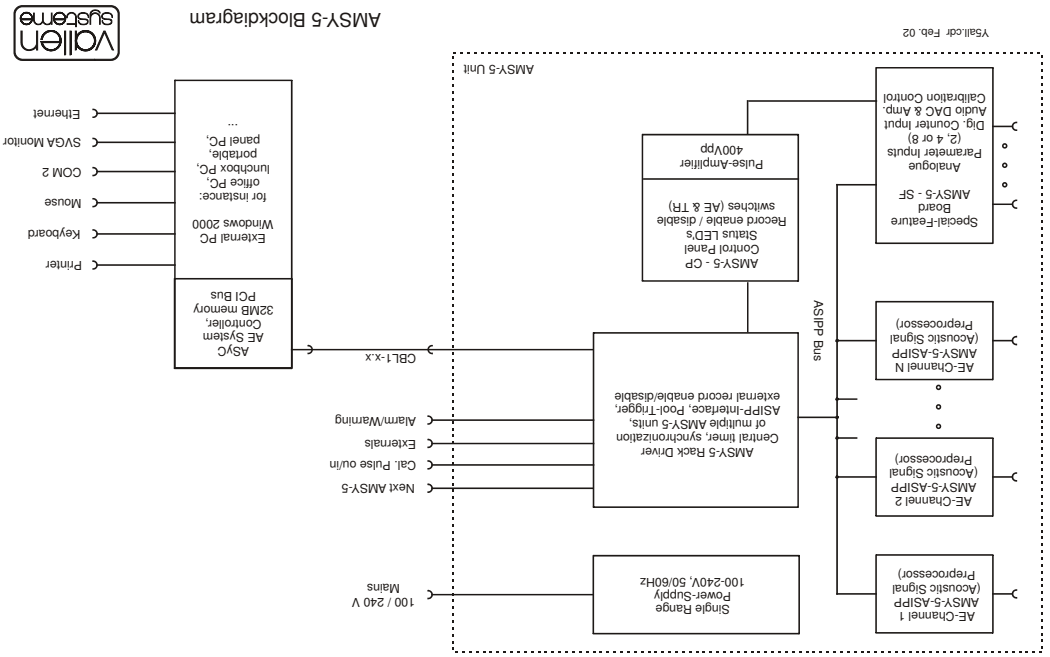
Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

5.2 ASIP-2/A (Advanced) Block Diagram



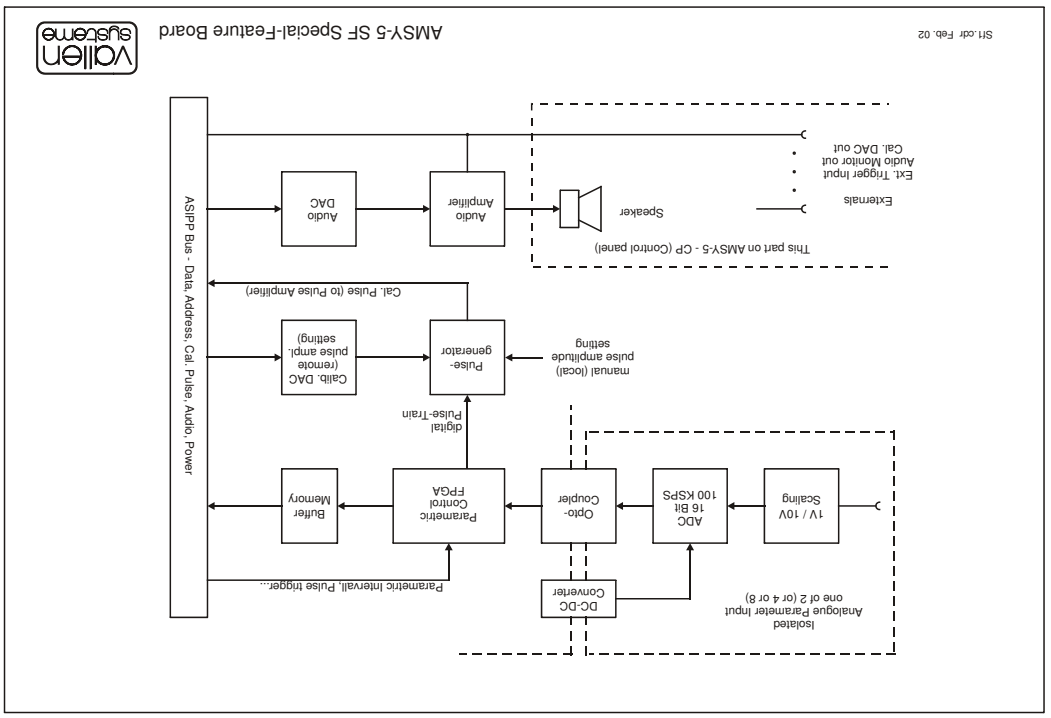
Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

5.4 AMSY-5 System Block Diagram



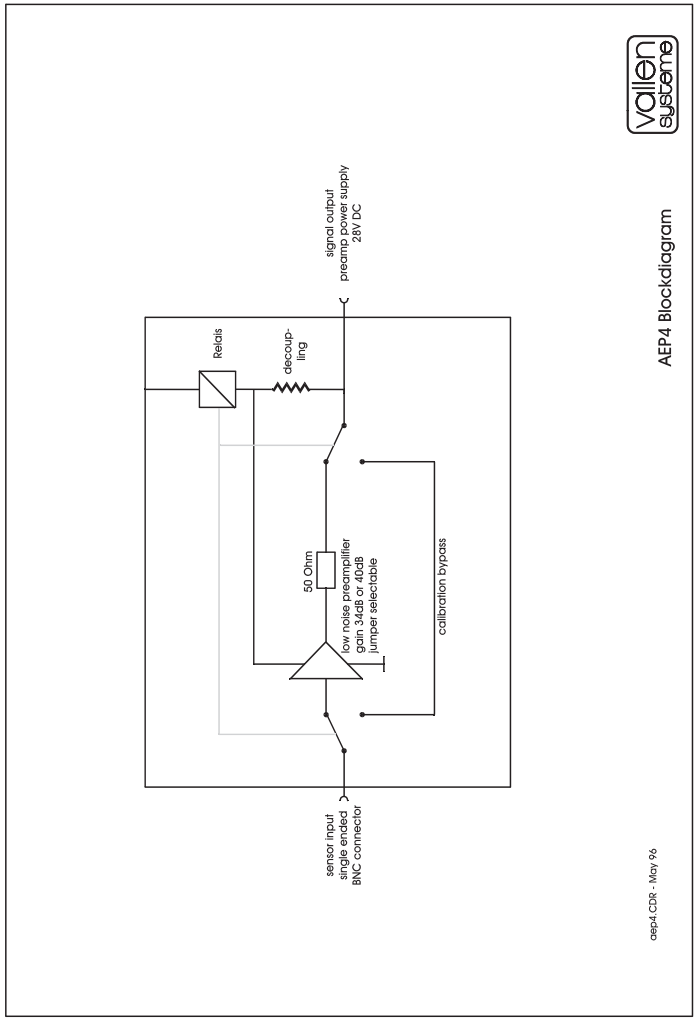
Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

5.3 Special Feature Board - Block Diagram



Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

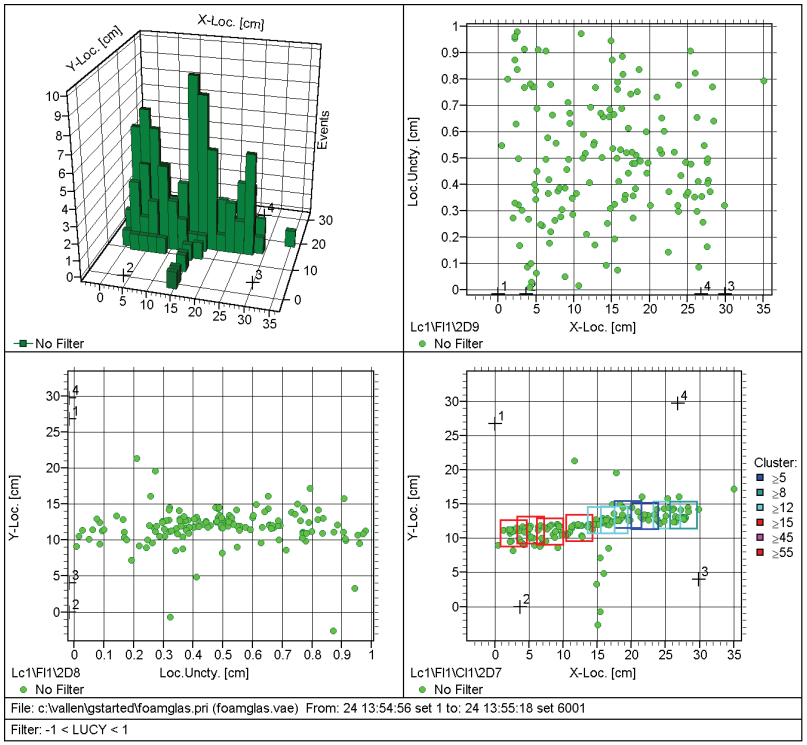
5.5 AEP4 Preamplifier Block Diagram



Note: The terms “calibration bypass” and “pulse-through-capability” mean the same.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de

5.6 Example of VisualAE data presentation from a foam glass test under compressive load



With so many unique features, the AMSY-5 is the most “state of the art“ AE system today available.

Tel: +49 8178 9674-400
Fax: +49 8178 9674-444
Copyright © 2009, Vallen Systeme GmbH
Schäftlarner Weg 26a, 82057 Icking, (Munich), Germany
email: info@vallen.de
http://www.vallen.de