



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Schädigung und Wölbung von Marmorfassadenplatten durch Witterungseinflüsse

Ausgeführt am Institut für Hochbau und Technologie,
Labor für Materialwissenschaften – E206/4,
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von
Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Elmar Tschegg

durch
Katharina UMLAUB
Matrikelnummer 0525160
Klimschgasse 20, 1030 Wien

Kurzfassung

Seit vielen Jahren werden Marmorplatten als Fassadenverkleidungen eingesetzt. Diese zeigen durch den jahreszeitlichen Temperaturwechsel und Witterungseinflüsse ein Schädigungsverhalten, das sich in Wölbungen der Platten äußert. Dieser Formverlust geht so weit, dass die Fassadenplatten nicht mehr von den Verankerungen gehalten werden können, was ein enormes Gefährdungspotential darstellt. Die gegenständliche Arbeit befasst sich mit dem Austesten eines Messverfahrens, mit dem mittels Schallemissionsmessung für verschiedene Marmortypen Kennwerte zur Charakterisierung des Schädigungsverhaltens durch Witterungseinflüsse insbesondere Temperaturschwankungen im Gefüge ermittelt werden sollen.

Schallemission (Acoustic Emission, AE) ist die elastische Energie, die während der Deformation von Materialien resp. beim Entstehen von Defekten wie Mikro- und Makrorissverlängerungen in Interfaces zwischen Körnern oder Gefrierprozessen in Poren spontan freigesetzt wird.

Schallemissionsmessung (Acoustic Emission Testing, AT) ist eine zerstörungsfreie Untersuchungs- und Diagnosemethode, die bis dato zur Prüfung von Komponenten in der Luft- und Raumfahrt, Leckageprüfungen von Tanks und Materialtest von Keramik-, Metall- und Holzbauteilen angewendet wird.

Für die AE-Messung im Labor werden die Proben in einer Klimakammer (Dewar) einem gesteuerten Temperaturwechselprozess zwischen -20°C und $+60^{\circ}\text{C}$ unterzogen; ein Kälte-Wärme-Zyklus (es wird mit Abkühlung begonnen) dauert 24 Stunden, es werden 6 Zyklen gefahren; je Versuchsreihe werden maximal sechs Probenkörper untersucht.

Folgende Marmorsorten wurden untersucht: Ekeberg (aus Schweden), Snow White (aus Thassos, Griechenland), Schwarzenzer Marmor (aus Oberösterreich) und Carrara (verwittert und unverwittert; Fassadenplatten der Kirche Hl. Leopold am Steinhof, Wien). Bei allen noch nicht bewitterten Proben zeigte sich das gleiche (erwartete) Ergebnis in unterschiedlich starker Ausprägung: anfänglich gibt es eine große Anzahl von Schallemissionsereignissen, die nach weiteren Temperaturwechselbeanspruchungen abnehmen.

Diese Arbeit behauptet, dass nach einer bereits eingetretenen Schädigung das Schädigungspotential abnimmt, weil in Mikro-Rissen und Poren ein Gefriersprengprozess als Hauptschädigungsursache nicht mehr stattfinden kann; diese Hypothese ist noch durch weitere Untersuchungen zu untermauern.

Abstract

Marble as an exterior cladding material is in use for many years. However, the marble slabs show damages due to the season changes and weather exposure, manifesting in bowing of the slabs. This results in loosening the claddings from their fixings which means a serious threat to the environment. This paper deals with testing an acoustic emission setup to determine characteristic features of damage behavior due to atmospheric effects, especially temperature changes, for different types of marble.

Acoustic emission is the elastic energy which is released during deformation of materials resp. developing of defects as extension of cracks in interfaces between grains.

Acoustic emission testing is a damage-free examination method, which is used to day in space technology, leakage testing of tanks and for material testing of ceramic, metallic and wooden components.

In the acoustic emission measuring laboratory, the samples undergo controlled temperature cycles between -20°C and $+60^{\circ}\text{C}$ in a dewar. One cooling-heating cycle takes twenty four hours and six such cycles are run; up to six samples are used for each series. The marble types tested are: Ekeberg (from Sweden), Snow White (from the isle of Thassos, Greece), Marble „Schwarzensee“ (from Upper-Austria, Austria) und Carrara (Italian provenience, used for testing where decayed and new claddings of the church „Hl. Leopold am Steinhof“, Vienna, Austria). All unwithered samples showed the same behavior but produced different intensity of acoustic emission – initially a mayor amount of acoustic emission signals are emitted, with diminishing hits the more cycles are run.

This work maintains that after initial decay has taken place the process or further potential of damage decreases due to the fact that the process of freeze-bursting as a main cause of damage is no more effective in already burst micro cracks and pores - this hypothesis is still to be strengthened by further investigations.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	3
1. Einleitung	5
1.1. Methoden zur Prüfung von Schäden an Gefügen von Marmor	12
2. Schall	14
2.1. Physik des Schalls	14
2.2. Schallemission	20
2.2.1. Geschichte der Schallemission	20
2.2.2. Definition	21
2.2.3. Schallemissionsprüfung	22
2.2.4. Charakteristik von Schallemissionssignalen	23
2.2.5. Messzyklen für Abkühlung und Heizung der Proben	24
2.2.6. Proben	25
2.2.7. Versuchsaufbau	25
2.2.8. Messkette	29
2.2.9. Probleme bei der Schallemissionsmessung	30
2.3. Verbesserungen des Messaufbaus	31
3. Marmor	33
3.1. Ekeberg	34
3.2. Snow White of Thassos	36
3.3. Schwarzensee	38
3.4. Carrara	40
4. Ergebnisse	42
4.1. Ekeberg	43
4.2. Snow White	45
4.3. Schwarzensee Marmor	47
4.4. Carrara Marmor	49
4.4.1. Unverwitterte Probe	49
4.4.2. Verwitterte Probe	52
4.5. Vergleich aller Marmorsorten	55
5. Diskussion	60
6. Zusammenfassung	62
7. Literaturverzeichnis	63

1. Einleitung

Marmorobjekte in Europa zeigen nach einer längeren Aufstellungsdauer im Freien abhängig vom Marmortyp verschieden stark ausgeprägte Schäden, die von Oberflächenerosion (Formverlust durch Lösungsprozesse, graduelle Gefügauflockerung an den Korngrenzen bis zur „Kristallzuckerbildung“, Riss- und Krustenbildung sowie Bioerosion) bis zum Verlust der Formbeständigkeit (Wölbung, Rissbildung) der an älteren oder historischen Baudenkmalern außen angebrachten Marmorplatten reichen.

Die Schädigung des Umwelteinflüssen ausgesetzten Materials steht in engem Zusammenhang mit den chemischen (z.B. Salzkontamination) und klimatischen Bedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, usw.), wobei die Wechselbeanspruchungen (warm/kalt, insbes. Frost/Tau, feucht/trocken) längerfristig wesentlich eine Beschleunigung des Schädigungsgrades bewirken; ebenso ist die Marmorqualität und dessen Herkunft ausschlaggebend für die Art der Schädigung und die Formbeständigkeit. Bestimmte Typen von Carrara-Marmor sind zum Beispiel bei Verwendung im Freien als besonders empfindlich hinsichtlich Schädigungen und instabiler Formbeständigkeit dokumentiert [1].

Die Wölbung von Marmorplatten, insbesondere der Inschriftenplatten von Grabdenkmälern auf Friedhöfen (Abb. 1), wurde bereits zu Beginn des 20. Jh. wissenschaftlich untersucht [28].

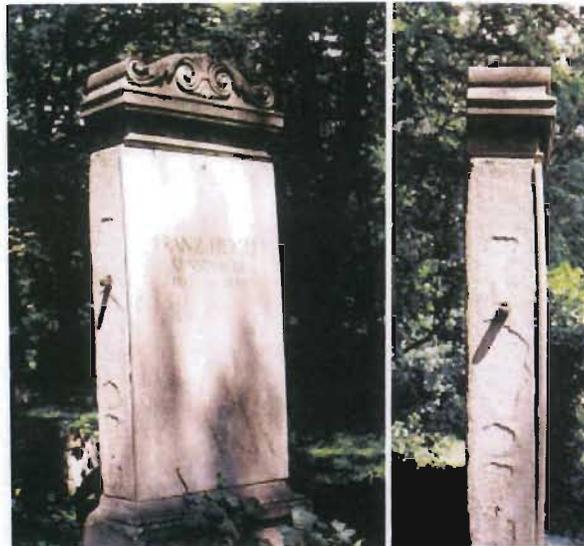


Abbildung 1: Gewölbte Marmorplatte; Alter Südfriedhof, München [2]

Beispiele betroffener und gut dokumentierter Baudenkmalern sind der Otto-Wagner-Bau Kirche St. Leopold am Steinhof in Wien [3], die Skulpturen im Schlosspark von Sanssouci in Potsdam bei Berlin [4], der Grand Arche de la Défense in Paris [5], die Finlandia Hall in Helsinki [6] und das Amoco Building in Chicago [7].

Die in den Jahren 1905-1907 in Wien nach Plänen des Jugendstilarchitekten Otto Wagner erbaute **Kirche "Zum Hl. Leopold"** am Steinhof (Abb. 2 u. 3) ist Teil einer für die damalige Zeit sehr fortschrittlichen Krankenanstalt für Nerven- und Geisteskrankte; auch die Kirche war speziell auf die Bedürfnisse und Pflegerfordernisse der Patienten ausgerichtet. Die Aussenfassade der Kirche bestand aus 2 cm starken Marmorplatten aus Carrara, die mit sichtbaren Kupferankern, die auch als dekorative Elemente gedacht waren, befestigt wurden. Wegen der im Lauf der Zeit aufgetretenen Wölbungen der Fassadenplatten sowie verschiedener anderer baulicher Mängel (u.a. intermetallische Korrosionserscheinungen an der Kuppel, Setzungen des Fundaments) wurde nach verschiedenen Reparaturen und Restaurierungen zwischen 2000 und 2006 eine Generalsanierung durchgeführt. Alle 3000 Fassadenplatten wurden durch neue, 2 cm starke, wieder aus Carrara ersetzt und auf Putzstreifen auf dem Mauerwerk angebracht. Alle neuen Fassadenplatten wurden vor der Montage mittels Ultraschall untersucht; zwei Proben, jeweils eine von einer verwitterten und eine von einer neuen Fassadenplatte, sind miteinbezogen in die Untersuchungen dieser Arbeit.



Abbildung 2: Kirche am Steinhof Zustand vor Renovierung [37]

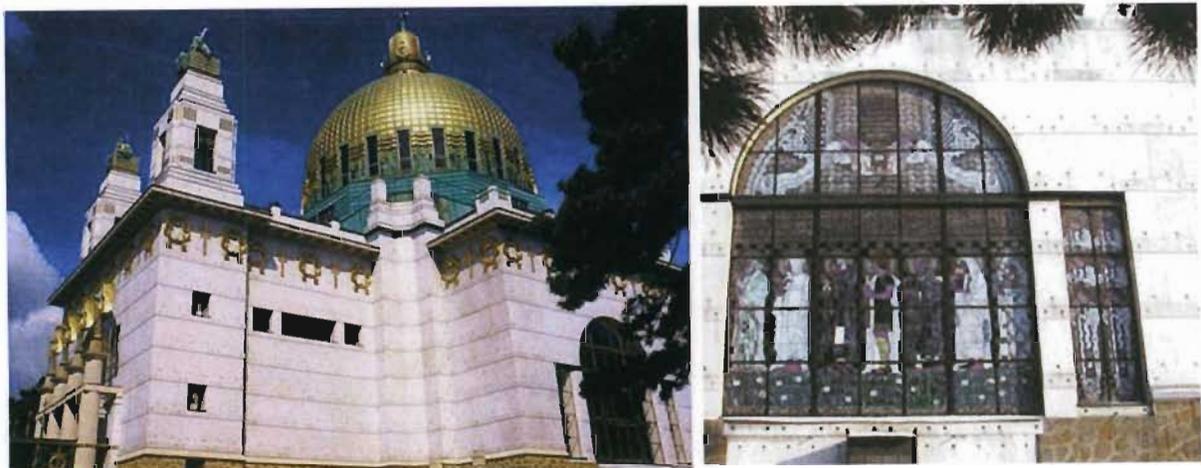


Abbildung 3: Kirche am Steinhof; links: Zustand nach der Renovierung; rechts: Detail der renovierten Fassade [37]

Das 1971 nach einem Entwurf vom Architekten und Städteplaner Alvar Aalto fertiggestellte Konzert- und Kongressgebäude **Finlandia-Halle** (finnisch: *Finlandiatalo*; Abb. 4 u. 5) ist eines der Wahrzeichen der finnischen Hauptstadt Helsinki. Die Fassade ist mit 5 cm starken Platten aus Carrara-Marmor verkleidet. Dem rauen finnischen Klima wird zugeschrieben, dass sich die Platten bereits nach kurzer Zeit nach innen zu werfen begannen und teilweise abstürzten. 1998 wurden alle Fassadenplatten durch Stärkere, ebenfalls aus Carrara-Marmor, ersetzt, die sich bereits 2006 wieder zu wölben begannen, diesmal allerdings nach außen, bedingt durch eine andere Befestigungsmethode mit Verfugung. Da vorerst keine Absturzgefahr besteht, wird mit einer neuerlichen Fassadenreparatur abgewartet. Auch andere Gebäude von A. Aalto mit Fassaden aus Carrara-Marmor zeigen die gleichen Probleme (z.B. das Enso-Gutzeit Bürogebäude in Helsinki, Finnland).



Abbildung 4: Finlandia-Halle, Helsinki, Finnland [27]

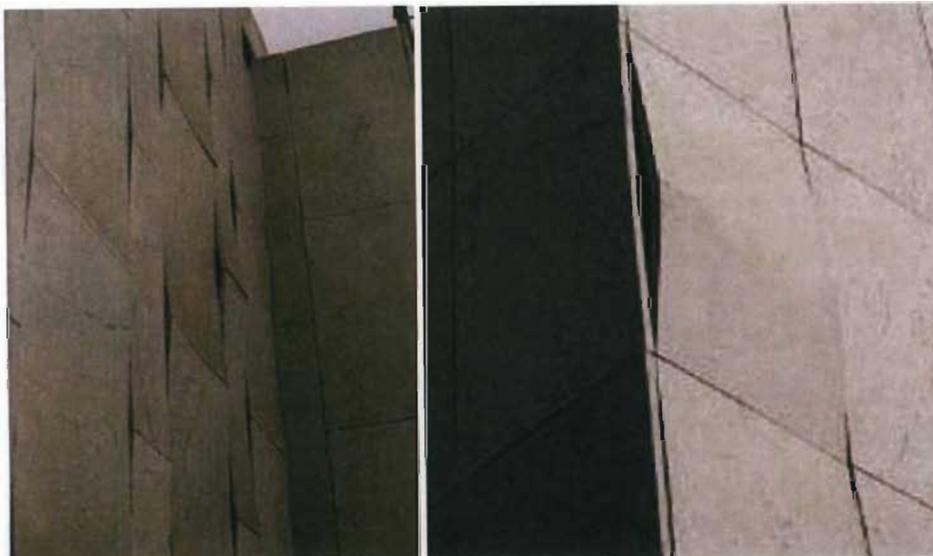


Abbildung 5: Finlandia Halle; links: nach innen gewölbte Fassadenplatte, rechts: nach außen gewölbte Fassadenplatte nach Austausch [34, 17]

Das ursprünglich für Standard Oil von den Architekten Edward Durell Stone und Perkins & Will entworfene Amoco Building (jetzt **Aon Center**, 200 East Randolph Street, Chicago, Illinois, USA; Abb. 6) war bei seiner Fertigstellung 1973 mit 83 Etagen und einer Höhe von 346 m das welthöchste Gebäude mit einer Fassadenverkleidung aus 43000 Marmorpaneelen aus Carrara, die mit 3,5 cm Stärke dünner als jemals zuvor geschnitten worden waren. Bereits ein Jahr nach Fertigstellung (1974) fiel ein Paneel aus der Verankerung und durchschlug das Dach des Nachbargebäudes – eine Untersuchung ergab, dass die Paneele bereits Rissbildungen und Verformungen aufwiesen. Zur Sicherung wurden die Marmorplatten mit zusätzlichen Stahlspangen befestigt. Da auch diese Methode sich nicht als dauerhaft für die Verankerung erwies, wurde die gesamte Fassade zwischen 1990 und 1992 durch Ersetzen der Carrara-Marmorplatten durch Granitplatten (Mount Airy white granite) saniert. Einen Parallelfall stellt das 1975 erbaute, ebenfalls von Edward Durell Stone entworfene Gebäude First Canadian Place in Toronto, Ontario, Canada, dar. Die ursprünglich weißen Carrara-Marmorfassadenplatten hatten sich durch Erosion grau verfärbt; eine Platte fiel 2007 herab. Die gesamte Fassade wurde Zug um Zug erneuert und der Marmor durch Milchglasplatten ersetzt.



Abbildung 6: Amoco-Building; links: während der Renovierungsphase, rechts: heutiger Zustand [27]

La Grande Arche (deutsch: *der große Bogen*; Abb. 7) ist ein in den 1980er errichtetes Bauwerk in Form eines Triumphbogens im Pariser Vorort La Défense, ein würfelförmiger Stahlbetonbau mit einer Höhe von 110 m und einer Glas/Carrara-Marmor-Fassade, geplant vom dänischen Architekten Johan Otto von Spreckelsen. Bereits drei Jahre nach Fertigstellung begannen die Marmor-Fassadenplatten abzustürzen, was zuerst auf schlechte Befestigung zurückgeführt wurde und durch eine Befestigung von 2700 der Fassadenelemente mit System Halfen vorerst behoben wurde. Danach kam es zunehmend zum Werfen der Fassadenplatten, was durch die Witterungsexposition und durch Verwendung des Carraratyps Figaia (statt des ursprünglich vorgesehenen Bardiglio), der im Preis 60% unter dem ursprünglichen lag, begründet wurde. Da weiterhin einzelne Fassadenplatten abstürzten, ist derzeit eine Generalsanierung der Fassade mit Austausch aller Marmorplatten durch Granitplatten im Gange.

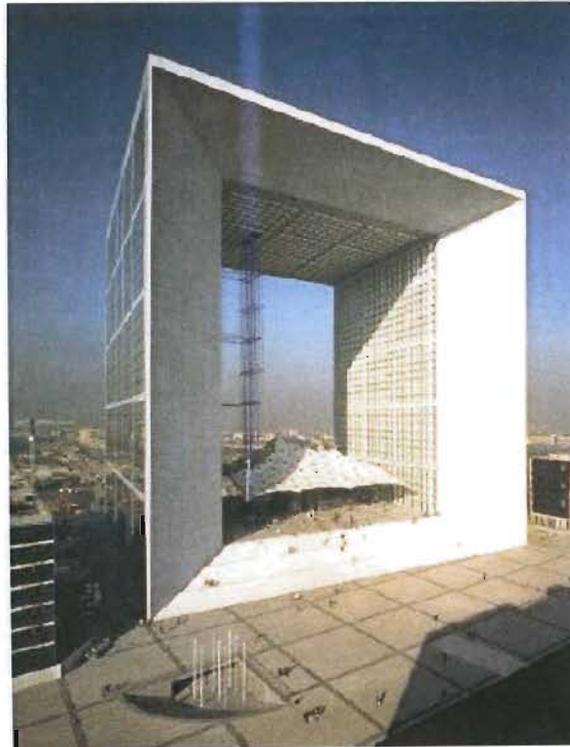


Abbildung 7: La Grande Arche; unten: diverse Defekte an der Fassade [27,35]

Unterhalb des auf einer Anhöhe erbauten Schlosses **Sanssouci** in Berlin-Potsdam ließ Friedrich der Große um 1750 einen barocken Ziergarten mit verschiedenen Statuen (z.B. Statue der Venus, Abb. 8) anlegen; die Marmorfiguren und -figurengruppen sind aus Carrara-Marmor und Werke der Bildhauerwerkstätten Jean-Baptiste Pigalle und François Gaspard Adam; nach verschiedenen vorangegangenen Restaurierungen und Reinigungen hat Köhler (resp. Labor Köhler) ab 1976 die Skulpturen untersucht und Verwitterungsphänomene wie zuckerige Abwitterung, Krustenbildung, Blasen, Rissbildungen, Auflockerung bis in den Kern mit daraus resultierenden Fehlstellen, dokumentiert; trotz eines optisch zufriedenstellenden Eindrucks waren die Skulpturen im Stadium der Auflösung und werden (z.T. bereits fertiggestellt) zur Restaurierung nach einem von Köhler mitentwickelten Verfahren lasergereinigt und mittels Acrylharz-Volltränkung konserviert.

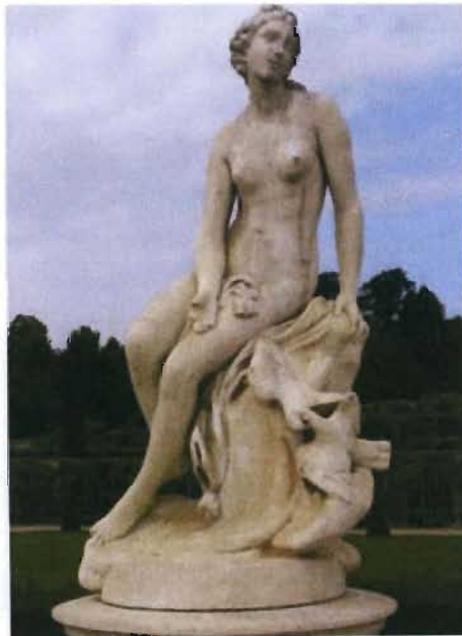


Abbildung 8: Potsdam; restaurierte Statue der Venus am Figurenrondell [36]

Solche Schäden können für Passanten und Umgebung gefährlich sein - die zur Behebung der Schäden erforderlichen Restaurierungsmaßnahmen von Gebäuden, wie. z.B. der Austausch gewölbter Marmor-Fassadenplatten, und Skulpturen sind unumgänglich und kostenintensiv. Schädigungen dieser Art sind Gegenstand verschiedenster wissenschaftlicher Studien und Untersuchungen. Einige Beispiele dafür sind Studien von Wolf-Dieter Grimm [8], Wolfram Köhler [4] und Klaus Poschlod [9]. Da immer öfter solche Schäden auftreten, bewilligt die EU internationale Forschungsprojekte zur Ursachenklärung, Früherkennung, und daraus resultierender Verringerung der Kosten der Schadensbehebungen.

Das CRAFT-Projekt (1995-1997) [10] war eine Zusammenarbeit mehrere Universitäten und Firmen der Gesteinsindustrie aus Österreich, Deutschland, Schweiz und Italien. An den verschiedensten europäischen Marmoren wurden petrographische, röntgenographische,

dilatometrische, Ultraschall-, FE-, mechanische und bruchmechanische Untersuchungsmethoden angewandt. Außerdem gab es Klimastudien, durchgeführt in ganz Europa, die auf beobachtete Schädigungsverläufe hinweisen.

Das TEAM-Projekt (2005-2007) [11] wählte typische Marmorsorten aus, die petrographische und gesteinsphysikalische Untersuchungen durchliefen. Besonderer Bedeutung wurde der Wölbung von Marmorplatten beigemessen; Marmorplatten wurden im Labor untersucht und Gebäude mit Marmorfassaden in Deutschland, Schweden und Dänemark nach ihrer Schädigung beurteilt.

Beide Forschungsprojekte gaben Anstoß für mehrere Dissertationen, bei denen verschiedene Messmethoden verwendet wurden. C. Widhalm [12] führte insbesondere Dilatationsmessungen an verschiedenen Marmoren durch, G. Fleischer [13] hat Laufzeit-Schalluntersuchungen an der Marmorfassade der Jugendstilkirche am Steinhof in Wien durchgeführt und bewertet, J.M. Rüderich [14] untersuchte gefügekонтроllierte Verwitterung an natürlichen und konservierten Marmoren, K. Malaga-Starzec [15] führte mikroskopische und makroskopische Studien an Natursteinen bei Witterungseinflüssen durch, Anna-Maria Olsen [16] Labortests über das Potential an gewölbten Marmorplatten und Andreas Koch [17] Untersuchungen über die Deformation von Fassadenplatten aus Marmor.

Aus der Vielzahl von Untersuchungen und Berichten geht klar hervor, dass Schädigung, Entfestigung und Gesteinszerrüttung des Gefüges durch Bewitterung sehr gut untersucht und dokumentiert sind. Köhler [4] teilt den Prozess der Schädigung und Zerstörung des Gefüges in drei Phasen ein. In Phase I kommt es noch bei der Freilegung im Steinbruch durch schwankende Außentemperatur und Spannungsumlagerungen im Gefüge zur ersten intergranularen Dekohäsion zwischen den Kristalliten - im Marmor entsteht ein geringfügig geändertes Porengefüge, wobei Wassermoleküle nur sehr langsam in diese Submikroporensysteme (< 4 nm) eindringen können; diese Art der Schädigung ist sehr klein und in der Praxis vernachlässigbar. Durch weitere oftmalige Temperaturschwankungen (Tag/Nacht und Sommer/Winter) werden die Korngrenzen langsam erweitert; dadurch kommt es zur Vergrößerung der Porensysteme als Phase II - mit der Vergrößerung der Mikroporen (4-100 nm) bilden sich im Winter erste Eiskristalle, und dadurch vorerst zu einer geringen Frostsprengung im Gefüge.

Der Verlauf von Phasen I und II ist in allen Klimabereichen sehr ähnlich und bewirkt die erste und grundlegende Schädigung des Marmors. Bei Beschleunigung der Schädigung (große Temperaturunterschiede, Porenvergrößerungen) sind der Standort und die Orientierung der Gebäude oder Skulpturen hauptsächlich für das Eintreten von Frostbeanspruchung verantwortlich.

In Phase III nach Köhler findet auch in kleineren Poren eine Eisbildung statt - dies kann nur in Gebieten zustande kommen, die niedrige Temperaturen und sehr hohe lokale Feuchten aufweisen - die Poren werden ausgefüllt oder erweitert; die Schädigung des Gefüges durch den Gefriersprengprozess ist wesentlich größer als bei warmem Klima, bei dem die Temperaturen gänzlich über dem Gefrierpunkt des Wassers liegen, da sich der Schädigungsprozess bei jedem Gefriervorgang wiederholt, und somit zu einer raschen

Zerstörung der Gesteinsstruktur führt.

Phase III ist wesentlich maßgeblich für die Zerstörung des Gefüges, allerdings haben in der Vergangenheit nur ganz wenige experimentelle Studien stattgefunden.

Mikroseismische und mikroakustische Meßmethoden werden in der Baustoffprüfung, im Bergbau und im Tunnelbau erfolgreich zur Beschreibung bruchmechanischer Vorgänge, durch bergmännische Arbeiten induzierte Mikrorissbildungen im Gebirge und zur Abschätzung des Gefahrenpotentials eingesetzt; die bis dato noch nicht angewandte mikroakustische Schallemissionsmethode könnte daher ein zusätzliches zielführendes Mittel für die weitere Erforschung von Schädigungen an Gesteinen bei Temperaturwechselbeanspruchung sein.

Diese Diplomarbeit befasst sich daher mit der Austestung einer Schallemissionsmessanlage und der Messung von Schallemissionen an fünf verschiedenen Marmortypen bei Simulierung eines Gefriersprengprozesses, also eines temperatur-, feuchtigkeits- und zeitabhängigen Schädigungsprozesses als weiteren Beitrag zur Erforschung der Schädigung und Zerstörung des Gefüges.

Die mineralogischen, petrologischen, gefügekundlichen und gesteinsphysikalischen Eigenschaften der mit Hilfe der Schallemissionsmethode zu untersuchenden Marmortypen sind u.a. in den vorhergegangenen oben erwähnten Forschungsprojekten untersucht und dokumentiert worden.

1.1. Methoden zur Prüfung von Schäden an Gefügen von Marmor

Weitere und gebräuchliche Meßmethoden zur Beschreibung von Schädigungen an Marmor durch Witterungseinflüsse sind:

- Dilatationsmethode

Diese Meßmethode wird verwendet zur Messung des Wärmeausdehnungskoeffizienten und der Restdehnung bei Erwärmung einer Marmorprobe und Abkühlung auf den Ausgangszustand; meist wurden Proben in Temperaturbereichen über 0°C gemessen, bei tieferen Temperaturen kann es zu Problemen der Vereisung der Wegaufnehmer, weshalb es nur ganz wenige Dilatationsmessungen im Gefrierbereich von Wasser gibt.

Die Meßmethode hat den Nachteil, dass nicht festgestellt werden kann, zu welcher Zeit und bei welcher Temperatur sich der Schädigungsprozess ereignet hat, und dass sie bei tiefen Temperaturen, bei denen Schädigungen an Marmor besonders häufig auftreten, nicht zuverlässig ist. Diese Methode wurde u.a. von Tschegg und Widhalm [1, 10, 12, 18] und im TEAM-Projekt angewandt [11, 17].

- Laufzeitmessungsmethode

Die Schalllaufzeitmessung ist eine zerstörungsfreie Prüfmethode zur Bestimmung des Schädigungsgrades an Gesteinen. Es werden der E-Modul und die Porosität gemessen.

Der Messkörper wird zwischen zwei Tastköpfen montiert und mit Longitudinalen Wellen mit Schallfrequenzen von 40-60 kHz beschallt.

Verschiedene Messungen ergaben, dass bei niedrigen Prüftemperaturen ($< 0^{\circ}\text{C}$) kein Unterschied der Schädigung zwischen trockenen, wassersatten und wassersattgeschädigten Proben festzustellen ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Wasser in der Gesteinsprobe sich in Eis umgewandelt hat und der Schall sich ungestört ausbreiten kann. Bei warmen Prüftemperaturen unterscheiden sich die Schallausbreitungswerte: bei verwitterten, getrockneten Marmorproben sind die Werte niedrig und bei unverwitterten, wassersatten Proben hoch.

Nachteile dieser Meßmethode sind, dass die Schädigung bei tiefen Temperaturen eher schlecht und Zeitpunkt und Temperatur, bei der die Schädigung stattgefunden hat, überhaupt nicht festgestellt werden kann. Der Einsatz dieser Messmethode ist z.B. in [4, 13, 14] dokumentiert.

- Quecksilberporosimetrie

Quecksilberporosimetrie ist eine gängige Untersuchungsmethode im Bauwesen und Geowissenschaften für makro- und mikroporöse Systemen.

Quecksilber wird in die Poren eines Feststoffes unter Druck eingebracht, gemessen wird das eingedrungene Quecksilbervolumen in Abhängigkeit vom Druck. Zusätzlich zur Porenradialverteilung wird das Porenvolumen, die Porosität und die spezifische Oberfläche der Probe gemessen; aus der Anzahl der Poren und dem geänderten Porenvolumen kann der Schädigungsgrad des Gefüges von Marmor geschätzt werden.

Auf den Zeitpunkt der Schädigung bei einer bestimmten Temperatur kann nicht geschlossen werden, auch die Porenvolumenänderung kann erst nach Beendigung der Messung festgestellt werden [17].

- Fluoreszenz-Mikro-Foto-Methode

Diese Methode wird verwendet, um die Breite mikroskopischer Risse sowie die Größe von Poren und Gesamtporensysteme an Schlifflinien zu untersuchen.

Nachteilig an dieser Methode ist, dass der Grad der Schädigung erst im Nachhinein bewertet und der Zeitpunkt der Schädigung bei einer bestimmten Temperatur überhaupt nicht bestimmt werden kann.

- Dehnmessstreifen-Methode

An Marmorproben kann man das Verfahren zur Analyse des E-Moduls und der Restdehnung bei niedrigen bis höheren Temperaturen anwenden. Ein Dehnmessstreifen wird auf den Probenkörper aufgebracht, bei einer Temperaturänderung ändert sich das Signal an der Messbrücke. Der Messstreifen ist nach dem Ende der Messung nicht nochmals verwendbar und meist auch nicht mehr zu entfernen.

Nachteilig ist, dass bei dieser Methode der exakte Zeitpunkt der Schädigung in Bezug auf die Prüftemperatur nicht bestimmt werden kann; auch das Anbringen und die Handhabung der DMS-Streifen ist nicht praktikabel. Auch das Aufbringen der ist in der Praxis nicht problemlos. Die Ergebnisse des CRAFT-Projekts beruhen zum Teil auf dieser Untersuchungsmethode [10].

2. Schall

2.1. Physik des Schalls

Schall wird definiert als mechanische Schwingungen fester, flüssiger oder gasförmiger Medien; werden Teilchen eines Festkörpers aus ihrer Ruhelage ausgelenkt, beeinflussen diese auch die umgebenden Teilchen - diese schwingen mit einer vom Ort der ursprünglichen Anregung abhängigen Phasenverschiebung.

Die Schwingungen unterteilt man nach den Frequenzbereichen in „hörbaren Schall“ ($f = 16\text{--}16000$ Hz), Infraschall ($f < 16$ Hz), Ultraschall ($f > 16$ kHz) und Hyperschall ($f > 10$ MHz). [29]

Modell für die Ausbreitung von Impulsen in Festkörpern ist eine punktförmige Quelle in einem idealen (homogen, isotrop, unendlich ausgedehnt, dämpfungsfrei, linear elastisch) Werkstoff, von der kugelförmige Wellen ausgehen, mit

$$\xi(r, t) = f(r) \sin(\omega t - kr)$$

als orts- und zeitabhängige Funktion mit $f(r)$ der Amplitude, ω der Kreisfrequenz und k der Wellenzahl, mit $k = 2\pi/\lambda$ mit λ der Wellenlänge.

Die Welle breitet sich in der Periodendauer T und der Frequenz f um λ mit Geschwindigkeit c aus:

$$c = \lambda/T = f * T;$$

wobei in festen Körpern

$$c = \sqrt{E/\rho} \text{ mit Elastizitätsmodul } E \text{ und}$$

in Gasen und Flüssigkeiten

$$c = \sqrt{K/\rho} = \sqrt{1/\kappa\rho} \text{ mit Kompressionsmodul } K \text{ und Kompressibilität } \kappa.$$

Die Schallgeschwindigkeit hängt von der Dichte und dem Elastizitätsmodul sowie der Kompressibilität ab.

Als Schallschnelle v bezeichnet man die Geschwindigkeit der Teilchenschwingung.

$$v = \omega * f(r) \cos(\omega t - kr)$$

Das Maß für die Schallenergie, die auf eine Fläche trifft, ist die Schallintensität I .

$$I = 2\pi^2 f(r)^2 \rho c f^2$$

Für die Amplitude der Kugelwelle gilt:

$$v * f(r)^2 * 4\pi r^2 = \text{const.}, \text{ somit } f(r) = \frac{A}{r}.$$

Somit erhält man für eine harmonische Kugelwelle, die bei $r = 0$ angeregt wird:

$$\xi(r, t) = \frac{A}{r} \sin(\omega t - kr); \text{ resp. } \xi(r, t) = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)} \text{ mit } r > 0.$$

Die Signalausbreitungsgeschwindigkeit ist frequenzunabhängig und die Signalamplitude umgekehrt proportional zum Abstand der Quelle [31].

Die Wellengleichung des Schalls lässt sich aus Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Euler-Gleichung

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla p \quad (2)$$

und Druck(p)-Dichte(ρ)-Beziehung

$$p = p(\rho) \quad (3)$$

herleiten.

Mit diesen Gleichungen werden die Erhaltung von Masse und Impuls beschrieben. Die Gleichungen von Druck, Schallschnelle und auch Dichte lassen sich in einen Gleich- und einen Schwankungsanteil zerlegen.

Die Druckschwankungen p' , die in einem Stoff erzeugt werden durch die Schwingungen ausgehend von der Schallquelle, und dem statischen Druck p_0 ergeben Schwankungs- und Gleichanteil des Drucks.

$$p = p_0 + p' \quad (4)$$

Die Gesamtgeschwindigkeit \vec{v} der Teilchen (Schallschnelle) beschreibt die Geschwindigkeit \vec{v}' mit der Teilchen um Lage \vec{v}_0 schwingen.

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}' \quad (5)$$

Die Dichte zerlegt in beide Anteile ergibt mit ρ_0 , der Dichte im Ruhezustand ohne Schallausbreitung (Gleichanteil)

$$\rho(\vec{x}, t) = \rho_0 + \rho'(\vec{x}, t) \quad (6)$$

Nach Linearisierung der drei Gleichungen (1), (2) und (3) und Einbeziehung der Gleichanteile der Gleichungen für Druck, Dichte und Schallschnelle erhält man für (1) unter Vernachlässigung Terme höherer Ordnung in den Schwankungsanteilen und Berücksichtigung eines im Ruhezustand befindlichen Mediums ($\vec{v}_0 = 0$):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_0 + \rho') + \nabla[(\rho_0 + \rho')\vec{v}'] = 0 \quad (7)$$

Da ρ_0 konstant ist, verschwindet die Zeitableitung $\frac{\partial \rho_0}{\partial t}$; wenn $|\rho'| \ll \rho_0$ kann man $\rho' \vec{v}'$ vernachlässigen.

Unter dieser Voraussetzung erhält man die vereinfachte linearisierte Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0(\nabla \vec{v}') = 0 \quad (8)$$

Allgemein kann man schreiben:

$$\frac{D\vec{v}'}{Dt} = \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} + (\vec{v}' \nabla) \vec{v}' \quad (9)$$

Die Euler-Gleichung (2) durch Einsetzen von (4), (5) und (6) lässt sich nun darstellen als:

$$(\rho_0 + \rho') \left[\frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} + (\vec{v}' \nabla) \vec{v}' \right] = -\nabla p \quad (10)$$

Nur die linearen Terme der Schwankungsanteile werden berücksichtigt, und deren Produkte und Ableitungen, sowie die Ableitungen der Konstanten vernachlässigt. Daraus folgt die linearisierte Euler-Gleichung:

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} = -\nabla p' \quad (11)$$

Weiters wird eine Taylorentwicklung für die Druck-Dichte-Beziehung (3) durchgeführt.

$$p(\rho) = p(\rho_0) + (\rho - \rho_0) \frac{dp}{d\rho}(\rho_0) + \dots \quad (12)$$

Diese führt unter Vernachlässigung Terme höherer Ordnung zu:

$$p' = \rho \frac{dp}{d\rho}(\rho_0), \quad (13)$$

$$\text{wobei } \frac{dp}{d\rho}(\rho_0) = c^2 \text{ ist.} \quad (14)$$

Die Druck-Dichte-Beziehung lässt sich in linearisierter Form schließlich anschreiben als

$$p' = \rho' c^2 \quad (15)$$

Damit man die Wellengleichung als Ergebnis erhält, leitet man die linearisierte Kontinuitätsgleichung (8) nach der Zeit ab.

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} + \rho_0 \left(\nabla \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} \right) = 0 \quad (16)$$

Mit Einbeziehung der Divergenz der linearisierten Euler-Gleichung (11)

$$\rho_0 \nabla \left(\frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} \right) + \nabla^2 p' = 0 \quad (17)$$

erhält man als Differenz beider vorangegangener Gleichungen (16) und (17):

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \Delta p' = 0 \quad (18)$$

Durch Anwenden der linearisierten Druck-Dichte-Beziehung (15) ergibt sich die Wellengleichung für den Schalldruck [29]:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \Delta p' = 0 \quad (19)$$

Diese beschreibt die Wellenausbreitung unter kleiner Störungen in einem Medium in Ruhe.

In der Praxis ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit frequenzabhängig und richtungsabhängig wegen Werkstoff-Anisotropien, Dämpfung und Dispersion durch nicht linear-elastisches Verhalten; daher treten anstelle der Kugelwelle longitudinale (z.B. Schall) und transversale Wellen.

Ausgehend von der ebenen Wellenfunktion wird nun gezeigt, dass es sich dabei um eine Lösung der Wellengleichung (19) handelt:

$$\xi(z, t) = f(z - vt)$$

Es ergibt sich nach partieller Differentiation nach t und z:

$$\frac{\partial \xi}{\partial z} = \frac{df}{du} \frac{du}{dz} = f'(u) * 1$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{d^2 f}{du^2} = f''(u)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{df}{du} \frac{du}{dt} = -v * f'(u)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{d^2 f}{du^2} * v^2 = f''(u) * v^2$$

mit $u = z - vt$, $\xi(z, t) = f(u)$ und $f'(u) = \frac{df}{du}$.

Somit erhält man die allgemeine Wellengleichung (q.e.d.) [29]

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} * \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

für eine in z-Richtung ausbreitenden Welle $\xi(z, t)$ mit der Phasengeschwindigkeit v bzw. für alle andern Richtungen

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} * \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = \frac{1}{v^2} * \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

Den Spezialfall der ebenen Welle mit Ausbreitung in z-Richtung kann man wie folgt darstellen:

$$\xi = A * \cos(\omega t - kz)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = -k^2 \xi, \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\omega^2 \xi$$

Daraus folgt für die Phasengeschwindigkeit

$$v = \frac{\omega}{k} = f * \lambda$$

Im Zuge der Ausbreitung einer Welle erfährt diese beim Auftreffen auf eine Mediumsgrenze Absorption, Reflexion, Brechung, Streuung oder Beugung, oder eine Kombination dieser Effekte.

Die durch die Absorption (z.B. verursacht durch innere Reibung oder Wärmeleitung) beeinflusste Schallintensität I ist

$$I(x) = I(0)e^{-\mu x}, \text{ mit Absorptionskoeffizient des Materials } \mu.$$

Bei Reflexion gilt das Reflexionsgesetz $\alpha = \beta$, d.h. Einfallswinkel ist gleich dem Ausfallswinkel.

Das Brechungsgesetz von Snellius

$$\frac{\sin\alpha}{v_1} = \frac{\sin\beta}{v_2}$$

besagt, dass Wellengeschwindigkeit in Medium 1 und Einfallswinkel proportional zu Wellengeschwindigkeit in Medium 2 und Ausfallswinkel sind.

Diese Gesetze finden in der AE-Technik bei Messungen und Prüfungen ihre Anwendung.

2.2. Schallemission

2.2.1. Geschichte der Schallemission

Feste Materialien sind grundsätzlich elastisch. Überwindet man die Elastizitätsgrenze, kommt es je nach Material gleich zum Bruch, oder zur plastischen Verformung und nach weiterer Dehnung zum Bruch. Befindet sich im Material eine strukturelle Unregelmäßigkeit (Defekt, Einschlüsse, ...), so treten dort erhöhte Spannungen auf, und es kommt zur Rissbildung; dadurch wird elastische Energie in Form eines Schallemissionsereignisses freigesetzt. Ebenso können durch Temperaturschwankungen oder durch Umwandlung von Wassereinschlüssen in Eis Risse, mikrostrukturelle Umwandlungen oder Reibungen entstehen, wobei vom Material Schallwellen emittiert werden.

Schallemissionsmessung wird als zerstörungsfreie Prüfmethode bei vielen materialwissenschaftlichen Untersuchungen an verschiedenen Werk- und Baustoffen eingesetzt. Die Schallemissionsmessung versucht Signale, die durch z.B. Risse, Reibung, oder Materialversagen entstehen, als Schallemission zu erkennen und aufzuzeichnen.

Die ersten Schallemissionsmessungen reichen wahrscheinlich bis ungefähr 6500 v. Chr. zurück und wurden von Handwerkern bei der Herstellung von Tonwaren beobachtet. Die Töpfer stellten mittels Schallemission die Qualität ihrer Ware sicher; die Tongefäße kühlten im Brennofen ab und falls es zu einem knacksenden Geräusch kam, wies dies darauf hin, dass die Töpferei nicht einwandfrei und strukturell geschädigt war.

Die erste bei Metallen beobachtete Schallemission ist das „Zinngeschrei“ (tin cry), es tritt auf bei der plastischen Verformung von reinem Zinn, verursacht von der mechanischen Zwillingsbildung; das älteste Werkstück aus reinem Zinn, ein Armreif, wurde auf Lesbos gefunden und auf zwischen 2650 und 2550 v.Chr. datiert - bei seiner Herstellung hat der Hersteller die Schallemission sicher auch beobachtet.

Im 8. Jhdt. wurde Schallemission erstmals dokumentiert - der arabischen Alchimist Jabir ibn Hayyan schrieb, Zinn (Jupiter) gibt ein grelles fürchterliches Geräusch von sich; auch Eisen (Mars) lärmt während des Schmiedens, hervorgerufen durch die Umwandlung in Martensit während des Abkühlens [19].

Seit dieser Zeit gibt es zahlreiche Dokumentationen über Schallemission von Zinn, Cadmium und Zink, allerdings hauptsächlich von Chemikern.

Mit Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelt sich die Metallurgie als eigenständiger wissenschaftlicher Zweig mit zahlreichen Publikationen über Schallemission von Metallen und Legierungen.

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden in Deutschland von Friedrich Förster und Erich Scheil erste Experimente (im eisenhüttenkundlichen Bereich - Formung von martensitischem Stahl) zur Schallmessung ausgeführt.

Joseph Kaiser führte 1950 die ersten rein auf das Schallemissionsphänomen ausgerichteten

Messungen durch - mit Aufnahme von Frequenzen, Zusammenhang von Spannungs-Dehnungskurven und Frequenzen - und gilt als Pionier der (deutschen) Schallemissionsforschung.

Nach dem zweiten Weltkrieg wurde besonders in den USA Forschung über Schallemission und Materialverhalten betrieben, wobei das Hauptaugenmerk auf den praktischen Anwendungen der Luftfahrtindustrie und der Reaktortechnik lag.

2.2.2. Definition

Schallemission (Acoustic Emission oder AE) ist definiert als die elastische Energie, die während einer Deformation von Materialien spontan freigesetzt wird. Die Schallereignisse haben eine Frequenz bis 10^7 Hertz und werden als „Event“ (Schallemission eines Quellereignisses), „Hit“ (auf einem Sensor detektiertes Schallereignis) oder „Burst“ (Schallereignis mit hoher Amplitude und kurzer Dauer) bezeichnet.

AE ist eine Klasse von Phänomenen, bei denen transiente elastische Wellen durch schnelle Freisetzung von Energie aus lokalisierten Quellen innerhalb eines Materials generiert werden oder die transiente elastische Welle selbst.

Definitionsgemäß ist AE entweder der Prozess der Wellenentstehung oder die Welle selbst. Auch andere Begriffe wie Spannungswellenaussendung, Spannungswellen, Mikroseismik, mikroseismische Aktivität oder Felsengeräusch werden anstelle von Schallemission verwendet.

Quellen von Schallemission sind u.a. verschiedenste Mechanismen von Deformationen und Brüchen. Die hauptsächlichen Ursachen für natürliche AE sind Erdbeben und Bergstürze in Minen. Weiters tritt Schallemission aber auch in Metallen (u.a. bei wachsenden Rissen, wandernde Versetzung, Gleiten, Zwillingsbildungen, Korngrenzscherungen, Brüche von Einschlüssen) und Kompositen (Matrixstruktur- und Faserbrüche) auf.

Außerhalb dieser klassischen Anwendungsbereiche - sogenannte Primärquellen - findet man Schallemission bei Sekundär- oder Pseudoquellen wie bei Lecks, Kavitation, Reibung (z.B. bei Wälzlagern), Ausrichtung von magnetischen Domänen (Barkhausen Effekt), Verflüssigung und Verfestigung sowie Fest-Fest-Zustandsumwandlungen.

Ursache der Schallemission ist das Freisetzen von elastischer Energie bei einem Rissvorgang in Form eines lokalen Bewegungssprungs; dieser stößt die Umgebung an, die elastisch nachgibt und zurückfedert, und somit eine elastische Welle auslöst.

2.2.3. Schallemissionsprüfung

Schallemissionsprüfung (Acoustic Emission Testing oder AT) ist eine zerstörungsfreie Prüfmethode zur Überwachung struktureller Schadensfreiheit, Feststellung von Lecks, beginnendem Versagen von mechanischen Equipment und zur Charakterisierung von Materialverhalten.

Besonders an dieser Untersuchungsmethode ist, dass Energie aus dem Testobjekt emittiert und nicht zugeführt wird, wie bei anderen Methode wie Ultraschall oder Röntgen.

Gegenüber anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren hat die Schallemissionsmethode folgende Vorteile:

- AT ist eine dynamische Echtzeituntersuchungsmethode und liefert Rückmeldung bei dynamischen Unregelmäßigkeiten (Wachstum unter struktureller Belastung), nicht jedoch bei statischen Unregelmäßigkeiten.
- AT ermöglicht mit einem einzigen Test die Evaluierung von Unstetigkeiten einer kompletten Struktur.
- Auf Grund des beschränkten Zugriffs können Unregelmäßigkeiten auch bei Strukturen erfasst werden, die anderen Testmethoden nicht zugänglich sind.
- Kessel und andere Drucksysteme können mit AT meist auch ohne Ausserbetriebnahme geprüft werden.
- AT kann dazu benützt werden, um Katastrophenausfälle von Systemen mit unbekanntem Unstetigkeiten zu verhindern und Druckproben mit geringeren Drücken zu fahren.

Da allerdings für die Schallemissionsprüfung das Prüfobjekt meist über das normale Maß belastet werden muss, bietet sich AT als Verfahren dann an, wenn das Prüfobjekt diesen höheren Belastungen ausgesetzt werden muss, z.B. bei Druckprüfungen.

Schallemission ist ein Wellenphänomen; die Schallemissionsprüfung verwendet Eigenschaften von bestimmten Wellen, um Materialien zu charakterisieren, in denen Wellen sich fortbewegen.

In der Praxis wird Schallemissionsanalyse häufig bei der Untersuchung mechanischer Eigenschaften und deren Charakterisierung angewendet, für Tests während des Betriebs und vor dem Betrieb, zur Echtzeitüberwachung, prozessbegleitender Schweißüberwachung, der Lokalisierung von Lecks, der Ermittlung von Materialeigenschaften, geologischen und mikroseismischen Analysen, periodischer oder dauernder Überwachung von Kesselanlagen, oder der Erkennung von drohenden Ermüdungsbrüchen in der Luftfahrttechnik oder anderen Maschinenteilen.

Die Schallemissionsprüfung kann nur durchgeführt werden, wenn das Material unter einer Belastung steht z.B. Druckbelastung oder Temperaturschwankung.

2.2.4. Charakteristik von Schallemissionssignalen

Mikrorisse, Rissverlängerungen, Matrix-Ablösungen, plastische Verformungen, Reibung im Material im Interface zwischen zwei Körnern und Umwandlungen von Wasser in Eis in einer Pore erzeugen verschiedene Schallereignisse mit einer Frequenz bis 10^7 Hertz; über an der Probe befestigte Sensoren werden die Informationen von der AE-Anlage aufgezeichnet und verarbeitet, sodass schlussendlich statistisch aufbereitete Daten in grafischer und numerischer Darstellung zur Auswertung zur Verfügung stehen.

Die Höhe der Amplitude und der Amplitudenverlauf der verschiedenen Events sind unterschiedlich und charakterisieren die unterschiedlichen Schädigungsdefekte im Marmor. Aus diesen Informationen kann auf das gesamte Ausmaß der Schädigung im Marmor rückgeschlossen werden, und es können die Schädigungsdefekte in Abhängigkeit von der aktuellen Prüfzeit und der tatsächlichen Temperatur der Probe bestimmt, analysiert und graphisch aufbereitet werden [25].

AE liefert transiente und kontinuierliche Signale (Abb. 9 u. 10).

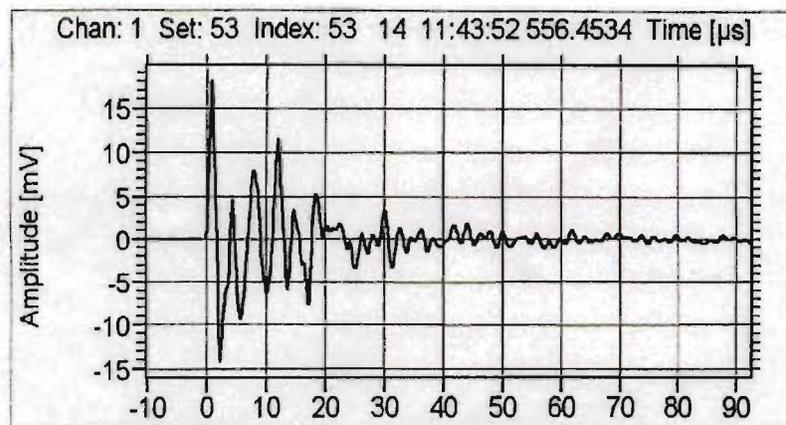


Abbildung 9: Transientes AE- Signal

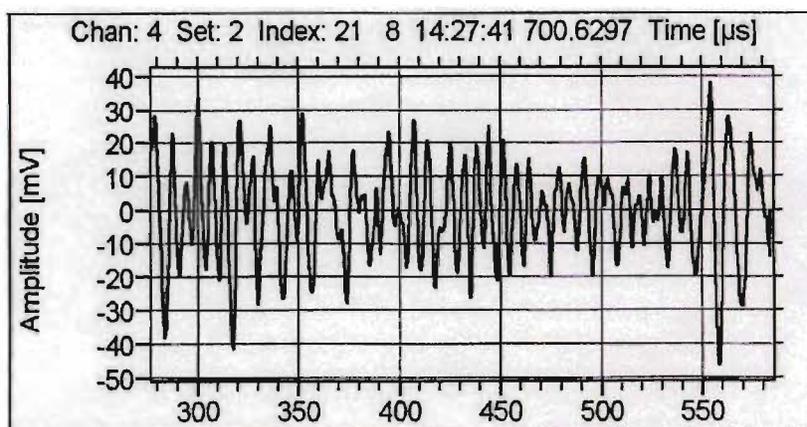


Abbildung 10: Kontinuierliches AE-Signal

Bei transienten AE-Signalen (bursts; Abb. 9) sind Beginn und Ende klar vom Hintergrundgeräusch differenziert, das kontinuierliche Signal (Abb. 10) hingegen weist nur Schwankungen auf.

Für die Analyse sind nur die transienten AE-Signale interessant (kontinuierliche Signale sind meist Störsignale).

Es werden folgende Merkmale aufgezeichnet: Ankunftszeit, Maximalamplitude, Anstiegszeit (rise time), Signaldauer (duration), Überschwingungen eines Hits (overshoot), Energie sowie den Effektivwert des Hintergrundgeräuschs (Abb. 11).

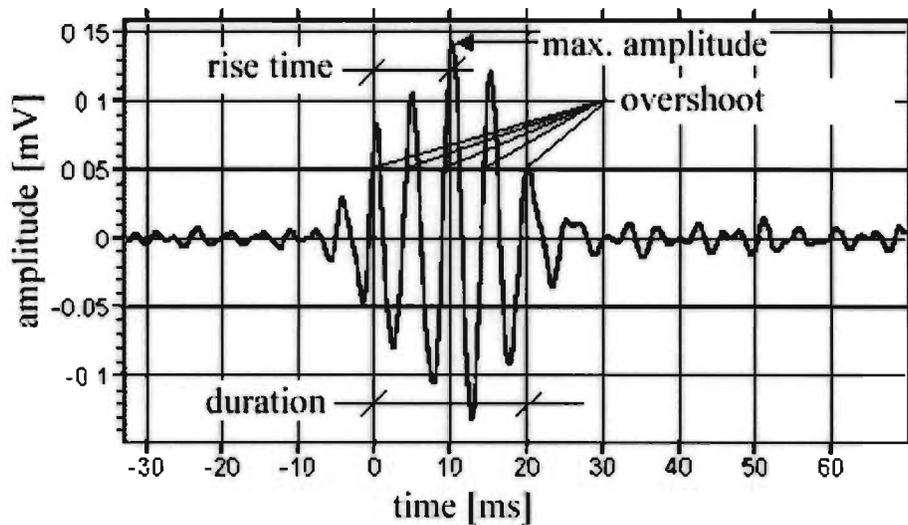


Abbildung 11: Transientes Signal mit einigen Merkmalen

2.2.5. Messzyklen für Abkühlung und Heizung der Proben

Die Schallemissionsmessung wird vom Computer aus durch eine LabView-Anwendung gesteuert.

In einer vorangegangenen Testreihe wurden zu Simulationszwecken 3 verschiedene Aufheiz- und Abkühlzyklen gefahren. Als Probenmaterial wurden verschiedene Typen von Marmor, sowie Vergleichsproben aus Aluminium und Glas verwendet.

Messzyklus A begann mit einer Abkühlung der Proben auf -20°C , dann ließ man diese als ersten Teil einer Erwärmung wieder Umgebungstemperatur annehmen; danach wurden die Proben auf 60°C aufgeheizt. Anschließend wurde der Heizzyklus beendet und die Proben kühlten auf Umgebungstemperatur ab. Pro Tag wurde nur ein solcher Zyklus gefahren.

Messzyklus B war ein reiner Heizzyklus mit Aufheizung von 26°C auf 60°C . Danach wurde ebenfalls die Heizperiode beendet, die Probe kühlte selbstständig ab und wurde beim Erreichen von 26°C wieder aufgeheizt; dies geschah 2 Mal pro Tag.

Messzyklus C war ein reiner Abkühlzyklus von $+20^{\circ}\text{C}$ auf -20°C , der Ablauf war analog zu Messzyklus B.

Für die gegenständliche Arbeit wurden die Proben nur dem Messzyklus A unterzogen, also

einer Abkühlung auf -20°C , einer ersten Erwärmungsphase auf Umgebungstemperatur, einer Heizphase auf 60°C und einer abschließenden Abkühlphase auf Umgebungstemperatur.

2.2.6. Proben

Beim Probenmaterial handelt es sich um fünf verschiedene Sorten von Marmor: zwei verschiedene Typen Carrara-Marmor von der Kirche am Steinhof, Schwarzensee Marmor aus Österreich, Griechischer Marmor von der Insel Thassos und schwedischer Ekeberg Marmor. Die Proben wurden im Labor mit einer Diamantsäge auf $3 \times 3 \times 2 \text{ cm}$ große Quader geschnitten.

2.2.7. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist folgender:

Sechs Probenkörper werden in je eine Probenhalterung eingespannt. Diese besteht aus einer Feder und dem Schallemissionssensor (Abb. 12).

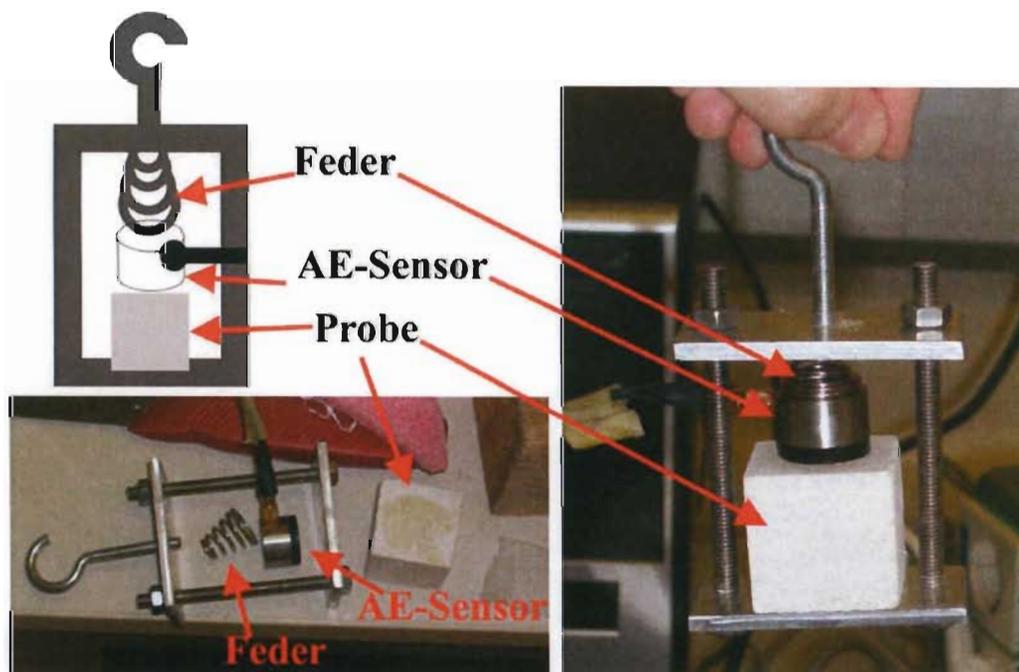


Abbildung 12: Probenhalterung: Skizze, zerlegter Zustand, Probenhalterung mit eingelegeter Probe.

Zwischen der Probe und dem Sensor wird Vakuum-Fett als Kontaktmittel zur Vermeidung von Hohlräumen, die die Schallübertragung beeinträchtigen würden, und um eine möglichst gute Ankopplung zu erzielen, zwischen dem Sensor und der Probenoberfläche aufgebracht.

Das Probengefäß selbst (Dewar; Abb. 13) bietet die Möglichkeit des Aufheizens der Proben mittels zweier Glühbirnen, sie befinden sich am Boden des Dewars, und des Abkühlens durch Einbringen von flüssigem Stickstoff in ein Cu-Rohr. Ein Ventilator, gespeist mit 12 V, ebenfalls am Boden des Dewars, gewährleistet eine gleichmäßige Temperaturverteilung (Abb. 14).

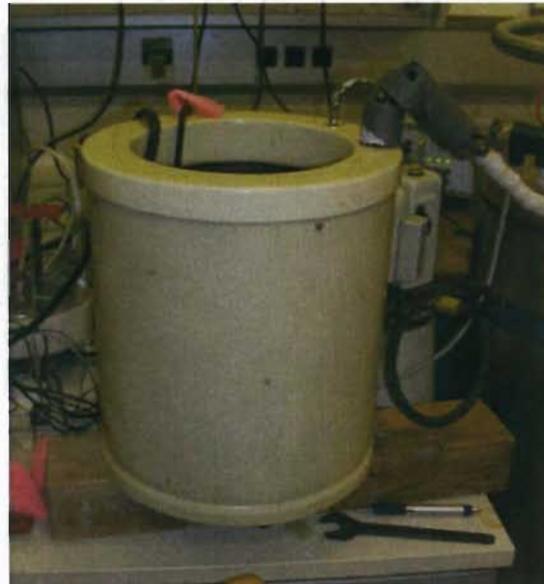


Abbildung 13: Probengefäß

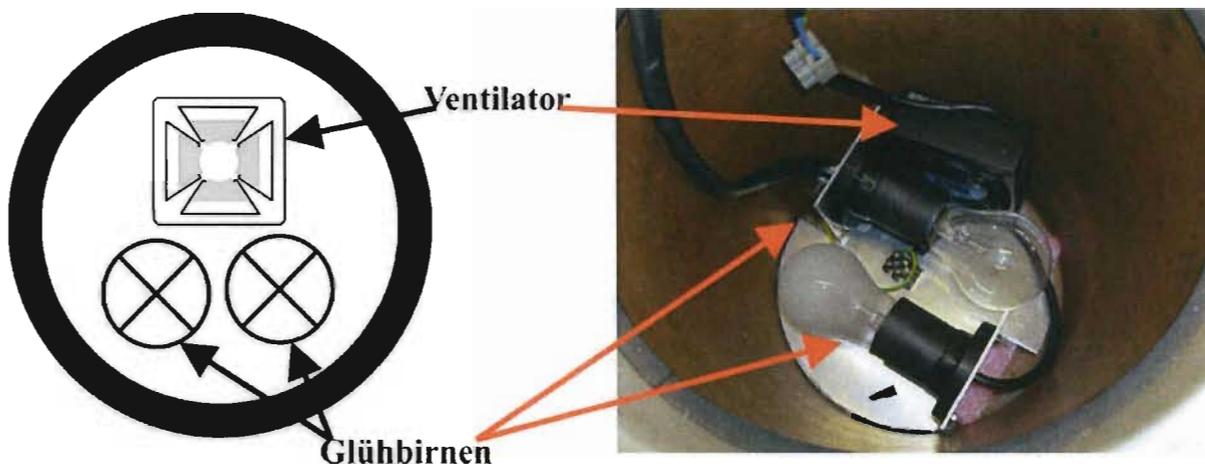


Abbildung 14: Innenaufbau des Probengefäßes: Skizze, Anordnung im Dewar.

Auf einem Rost des Dewars befindet sich eine Vergleichsprobe (ein sogenannter Dummy) mit einem Temperaturfühler, um die Probentemperatur zu bestimmen. Weiters ist das Gefäß ausgestattet mit einem zweiten Temperaturfühler für einen Temperaturregler, der gewährleistet, dass die Messung innerhalb des vorgesehenen Temperaturmessbereichs stattfindet, sowie einem dritten zur Messung der Lufttemperatur im Gefäß. Mit einer elektrischen Regelung und mit einem Messprogramm werden die vorgegebenen Werte mit einer Genauigkeit von $\pm 1^\circ\text{C}$ eingestellt.

Die Zufuhr des flüssigen Stickstoffs zur Abkühlung der Proben wird über ein mechanisches Ventil gesteuert (Abb. 15).

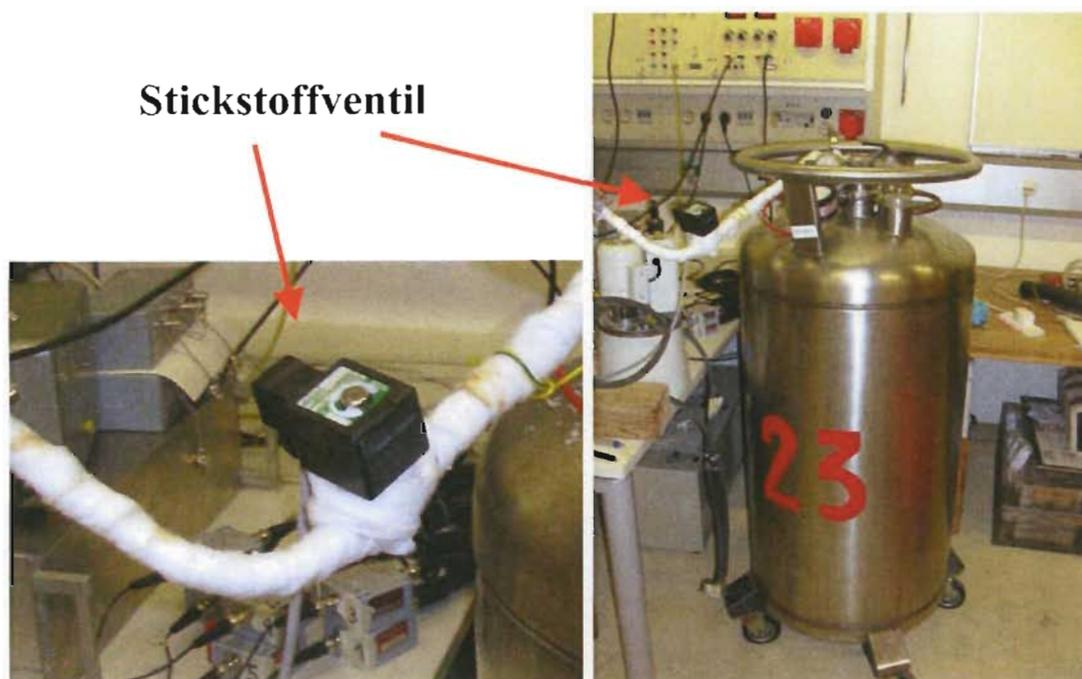


Abbildung 15: Stickstoffversorgung: Ventil zur Steuerung der Stickstoffzufuhr, Stickstoffdewar.

Die Probenträger werden in einem Rost im Thermogefäß eingehängt (Abb. 16), wobei darauf geachtet wird, dass die Proben sich weder gegenseitig noch die Wand des Kühlgefäßes berühren.

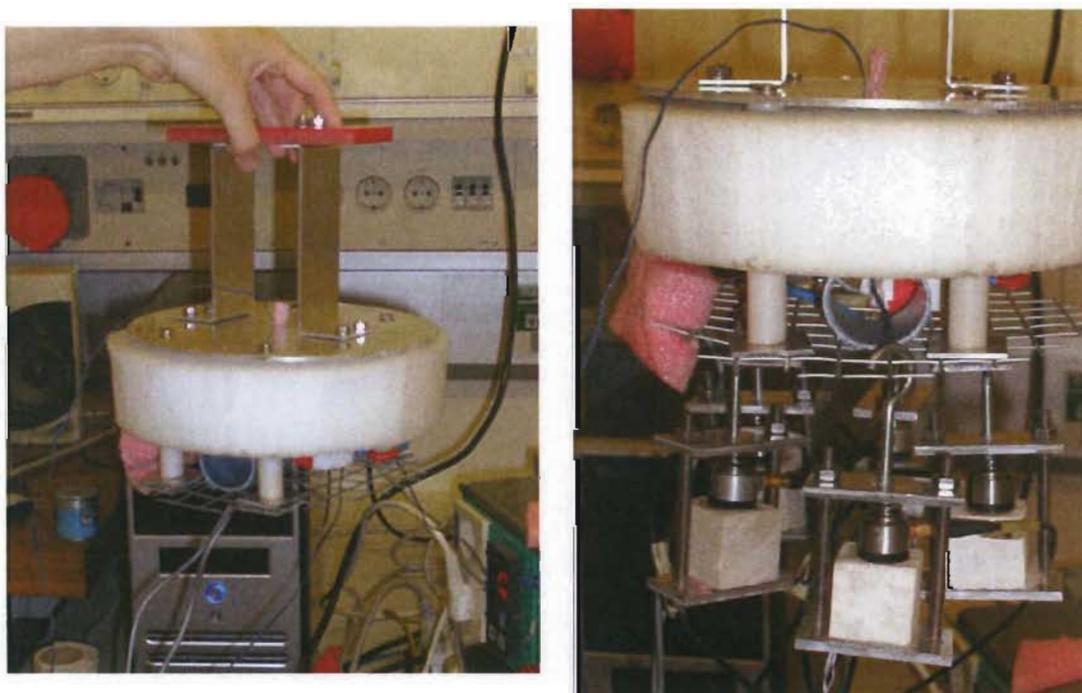


Abbildung 16: Anordnung der bestückten Probenhalterungen.

Die Kabel der AE-Sensoren (Abb. 17) werden am Rand des Behälterdeckels herausgeführt.



Abbildung 17: Kabelführung

Die Schallemissionssensoren leiten das Schallsignal an der Oberfläche der Proben weiter an das Schallemissionsgerät VALLEN AMSY-5 (Abb. 18), welches die umgewandelten AE-Signale an die Datenaufzeichnungssoftware am Computer weiterleitet.



Abbildung 18: AMSY-5 Master Unit mit 6 Steckplätzen, 6 Breitbandmikrophone, Verstärker und Messwandler

2.2.8. Messkette

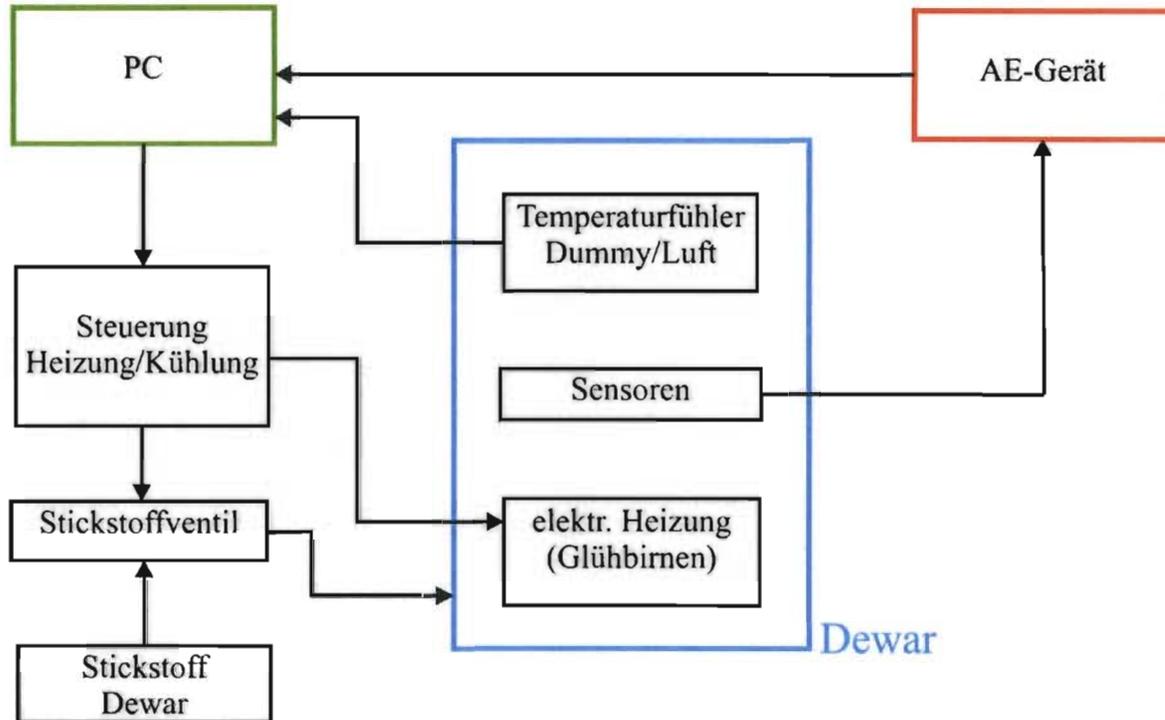


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung

Vom Computer aus erfolgt die Steuerung der Messung, und der Kühlung und Heizphasen mittels LabView-Programm. Auf Grund der Proben temperatur wird festgestellt, ob der Sollwert schon erreicht ist, daraufhin wird geheizt oder abgekühlt (Abb. 19).

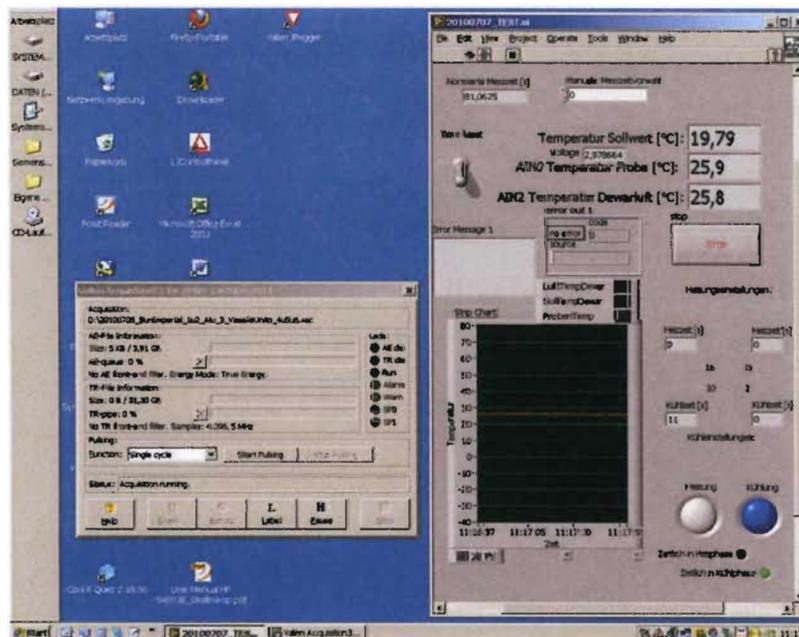


Abbildung 20: Screenshot mit Steuerungsprogramm LabView

Die Schallemission der Probe wird durch Sensoren an das AE-Gerät weitergeleitet; dieses verstärkt und filtert sodann die kontinuierlichen Signale heraus; im Analog-Digital-Wandler werden die transienten Signale in digitale Datensätze umgewandelt; diese werden an den PC übermittelt und dort mit spezieller Software gespeichert, analysiert und grafisch ausgewertet. (Abb.21)

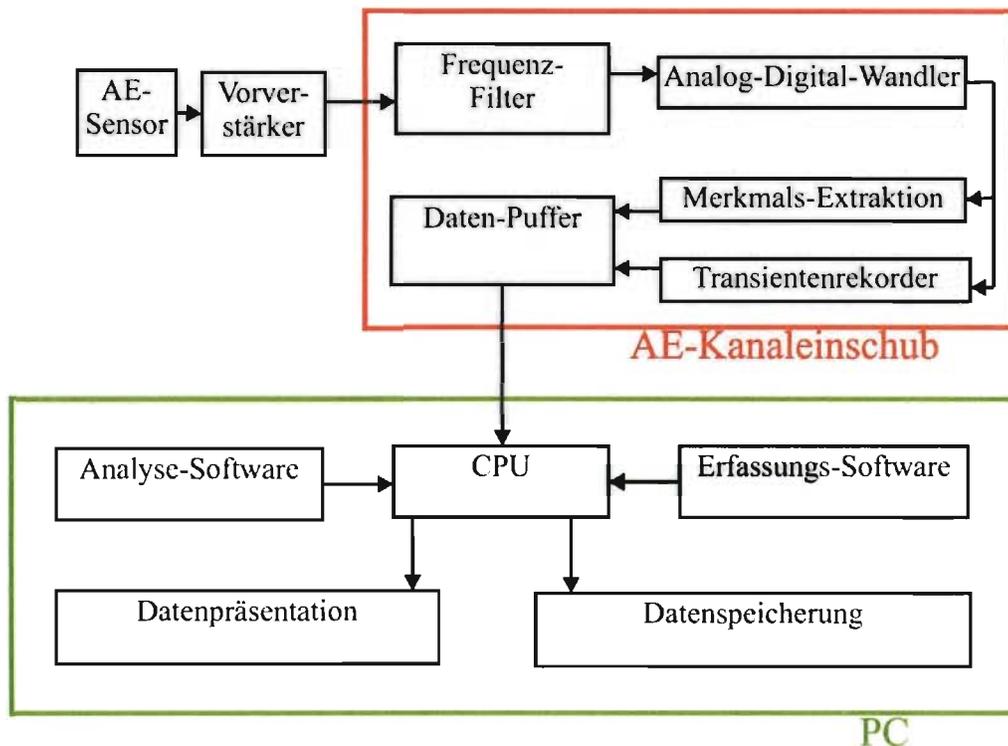


Abbildung 21: Messkette von AE-Sensor bis Computer

2.2.9. Probleme bei der Schallemissionsmessung

Ein Problem, das bei AT auftreten kann, ist, dass die bei einer bestimmten Beanspruchung auftretende Schallemission bei einer Wiederholung dieser nicht mehr auftritt. Eine bestimmte Schallemission kann dadurch nur einmal auftreten. Der nach Joseph Kaiser benannte Kaisereffekt, dass bei einer neuen Beanspruchung des gleichen Objekts erst wieder Schallemission auftritt, wenn die Beanspruchung höher ist oder zwischenzeitig andere Schädigungen eingetreten sind.

Die Sensitivität der Messung ist abhängig von der Sensitivität des Sensors und der Umgebung. In der Praxis ist die Schallemissionsprüfung limitiert durch Hintergrundgeräusche bzw. der Sensitivität der getesteten Materialien bezüglich dieser (Schallabsorption, Schallstreuung). Deshalb ist es wichtig, die Schallemissionssensoren sorgfältig zu platzieren.

Die emittierten Lärmsignale können dauernd oder periodisch auftreten, die Quelle dieser kann entweder intern im Testobjekt liegen oder von außen kommen.

Das Dunegan-Korollar [19] bezieht sich auf Kesselprüfung und besagt, dass die Schallemission bei der Prüfung mit einem bestimmten Prüfdruck ein Maß für zu erwartende Schädigung in der folgenden Betriebsperiode ist.

Der Felicity-Effekt [19] wurde in faserverstärkten Plastikkomponenten beobachtet - die Schallemission unter einer bestimmten Belastung tritt ein weiteres Mal erst bei einem niedrigeren Belastungsniveau auf und zwar besonders bei schlechtem Materialzustand oder kurz vor dem Versagen des Materials.

2.3. Verbesserungen des Messaufbaus

Da bei den ersten Messungen eine große Anzahl von Störsignalen auftraten, suchte man nach Verbesserungsmöglichkeiten: zuerst wurden die Kabel der AE-Sensoren mit einer Metallabschirmung versehen, dies brachte aber keinerlei Verbesserung und wurde deshalb wieder verworfen. Auch Tests ohne Ventilator erzielten keinen Fortschritt.

Nun wurde die Feder der Probenhalterung einer genaueren Betrachtung unterzogen - es stellte sich heraus dass die verwendete Feder eine große Quelle von Störsignalen darstellte. So wurde nach anderen Befestigungsmöglichkeiten des Sensors am Probenkörper gesucht; experimentiert wurde mit Styropor, Metallspangen und Plastilin, welches sich als nicht hitzebeständig herausstellte. Schlussendlich erzielte ein dickeres Gummiband, das aus einem Fahrradschlauch geschnitten wurde, das beste Ergebnis (Abb. 22) .

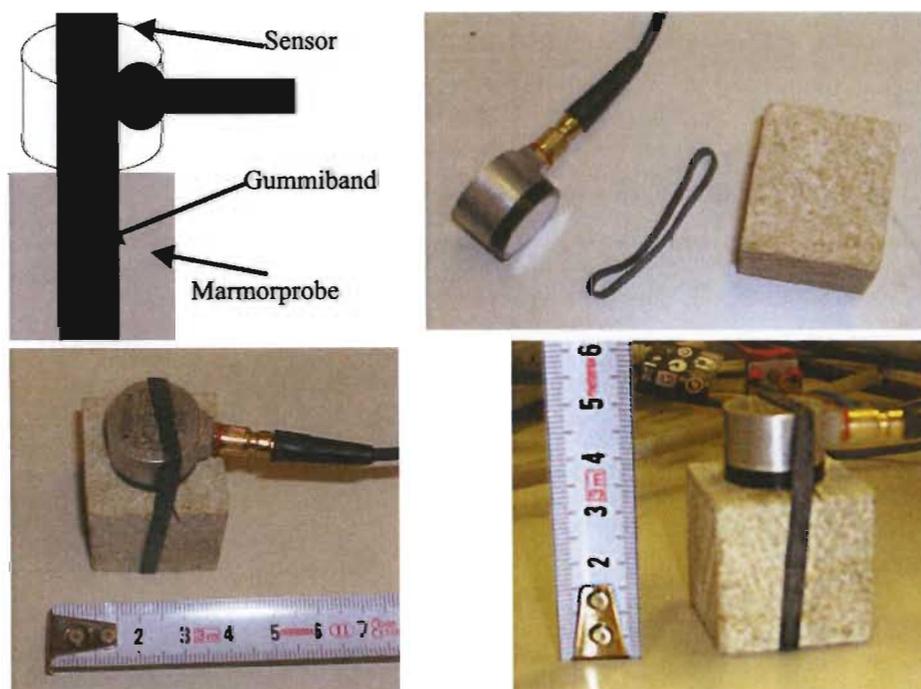


Abbildung 22: Neue Probenanordnung: schematische Darstellung, Bestandteile, Ansicht von oben und seitlich

Weiters wurde oberhalb der Glühbirnen ein Metallrost eingelegt, auf den eine Schaumstoffplatte gelegt wurde, sowie Platzhalter für die einzelnen Proben (Abb. 23). Der Dummy mit dem Probestemperaturfühler wurde ebenfalls auf dem Metallrost platziert.

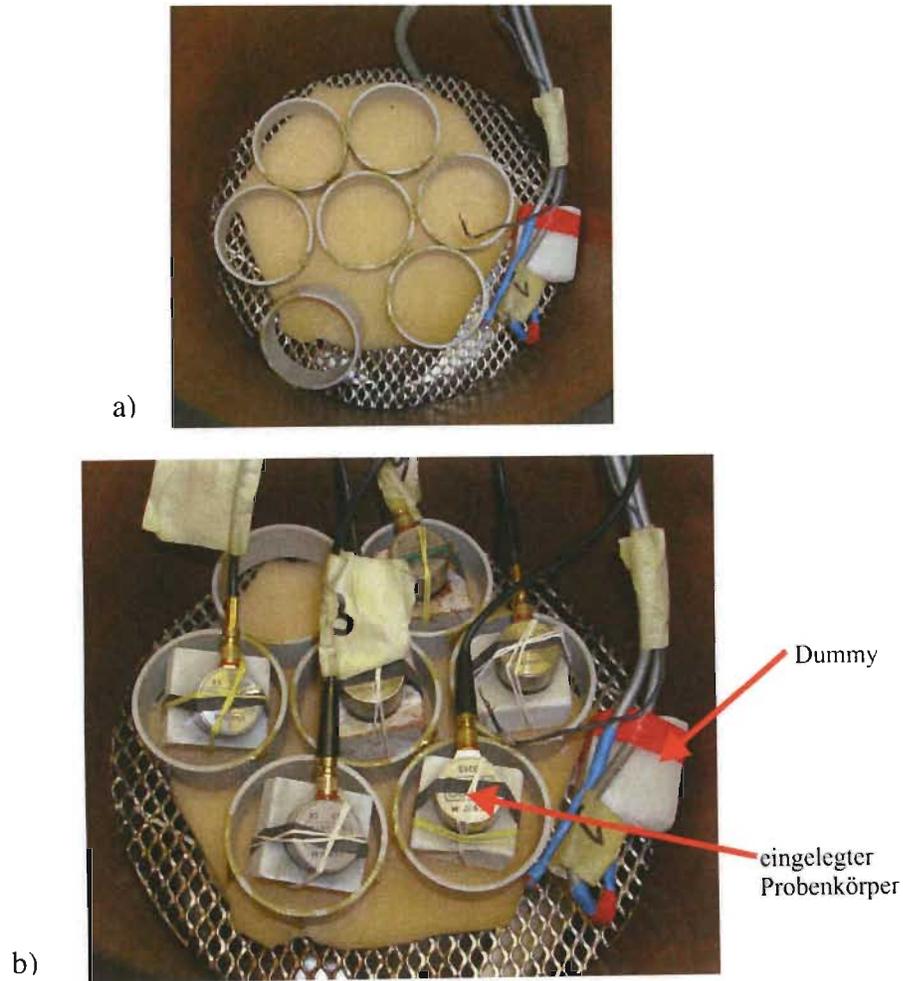


Abbildung 23: Probensetup auf Metallrost im Dewar: a) Leerzustand, b) Zustand mit eingelegten Proben samt Sensorköpfen

3. Marmor

Marmor (aus altgr. *μάρμαρος*, *mármaros* – *marmárein*, „schimmern, glänzen“) ist petrographisch gesehen ein aus Sedimenten, zur Zeit des Erdmittelalters (Mesozoikum - Jura) gebildetes metamorphes Gestein, entstanden durch Umwandlung (Metamorphose) im Erdinnern von Kalkstein und anderen karbonatreichen Gesteinen unter hohem Druck und hoher Temperatur.

Im Verwitterungsprozess (physikalisch oder chemisch) werden die Verwitterungsprodukte (Kalkspatpartikel) durch Wasser, Wind und Eis abgetragen (Erosion), weiter transportiert und dann abgelagert oder auch ausgefällt, wenn sich der CO₂-Gehalt des Wassers ändert (bedingt durch geänderte Umweltbedingungen, wie fallenden Druck oder Erhöhung der Temperatur) [20].

So entstehen zunächst überwiegend lockere Gesteine; aus dem primären Sedimentgestein entsteht durch Temperaturbelastung in der Erdkruste und Druck bei ca. 650°C und ca. 10kbar, das metamorphe Gestein. Dieser Kompaktions- oder Zementationsprozess bewirkt eine Umkristallisation - es entstehen etwa gleichgroße polygonale Kalkspatkristalle - und wird als Metamorphose bezeichnet. Bei der Regionalmetamorphose erfolgt die Umwandlung ohne Magmenkontakt. Bei diesen sehr langsam ablaufenden Prozessen entstehen Marmore mit Richtungsgefüge, die die Gewinnung von spaltrauen Platten zulassen; die bevorzugte Spaltrichtung liegt meist orthogonal zur Richtung der früheren Hauptspannung. Bei einer Kontaktmetamorphose erstarren granitische Magmen in der Erdkruste, während dieser Abkühlung können sich karbonatreiche Gesteine in der Umgebung in Marmor umwandeln. Die „Marmorierung“ des Marmors entsteht bei plastischer Verformung unter tektonischer Belastung, wenn sich die Nebengemengebestandteile (z.B. Eisen, Silizium oder Graphit) inhomogen in Falten und Fließgefügen einlagern.

Marmore sind umkristallisierte Kalkgesteine und bestehen aus etwa gleichgroßen polygonalen Kalkspatkristallen. Allerdings wird auch jedes polierfähige, mittel- bis grobkristalline, Karbonatgestein als Marmor bezeichnet (kultureller und ökonomischer Marmor-Begriff).

Marmor besteht zu mindestens 50 Prozent aus Calcit (Kalkspat), Dolomit oder Aragonit; nur aus Kalkspat bestehender Marmor ist weiß bis weißgrau (z.B. Carrara); aus mit Silikatmineralien (z.B. Granat, Pyroxen oder Vesuvian) durchsetzten Kalksteinen entstehen in der Metamorphose „Silikatmarmore“ (z.B. Castione-Marmor aus dem Tessin oder Cipollino), aus Dolomit CaMg [CO₃]₂ der seltene Dolomitmarmor, noch rarer ist Marmor aus Aragonit zusammensetzt. Im allgemeinen reichen die Farben von Marmor von rot/rötlich (durch Hämatit eingefärbt), gelb bis braun (Limonit), leicht bläulich und graublau (Graphit) bis grün (Chlorit, Serpentinminerale); mehrfarbige Marmore entstehen durch unterschiedliche Mineralbeimengungen und/oder verschiedene Kristallausbildungen, einheitlich schwarz gefärbte Marmore gibt es nicht. Die Marmorierung kann ebenso grau-grünlich bis gelb bis rötlich sein.

3.1. Ekeberg

Ekeberg-Marmor wird in der Provinz Närke in Südschweden abgebaut (Abb. 24) und ist ein Dolomit-Marmor.



Abbildung 24: Marmorsteinbruch von Glanshammar, Schweden [32]

Er besteht aus 90% Dolomit/Calcit und 10% Muscovit, die Körner sind gleichmäßig kugelig sphärisch und durchschnittlich 0,5 mm im Durchmesser; die Färbungen sind hauptsächlich gelblich-weiß, dunkelblau und grau, mit wolkenartigen Schlieren, es gibt aber auch die grünen Varietäten Brännlyckan und Kolmården (Abb. 25).

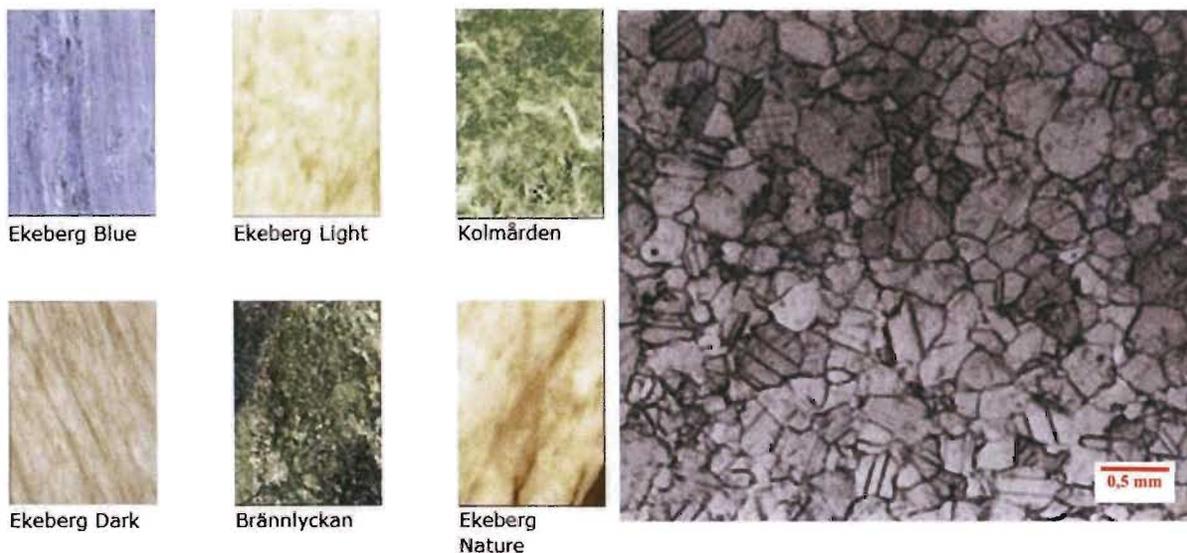


Abbildung 25: Ekeberg-Marmor; Varietäten und Feinstruktur [32, 30]

Verwendet wurde der Ekeberg-Marmor u.a. beim Königlichen Theater in Stockholm (Abb. 26).



Abbildung 26: Verwendungsbeispiel Königliches Theater, Stockholm, Schweden

Eine Probe in Farbstellung Ekeberg dunkel wurde untersucht (Abb. 27).



Abbildung 27: Probenmaterial Ekeberg-Marmor

3.2. Snow White of Thassos

Thassos-Marmor wird auf der griechischen Insel Thassos abgebaut (Abb. 28); der rein weiße Stein gehört zu den bedeutendsten antiken und modernen Bau- und Dekorationsgesteinen weißer Farbe in Europa und Kleinasien und wurde bereits von den Römern verwendet. Der Marmor entstand aus Sedimentationen des Jura und der Kreide durch tektonische Bewegungen der Rhodopen im Oligozän bis Miozän.

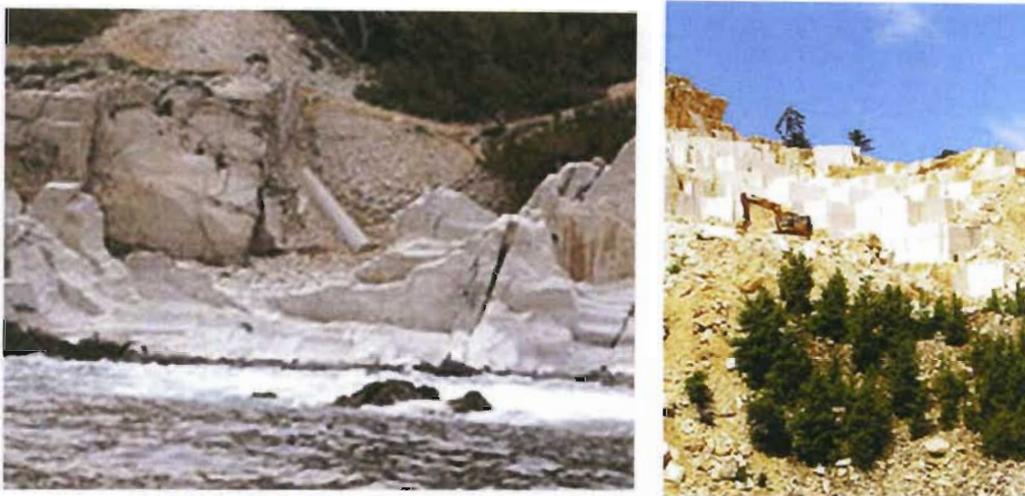


Abbildung 28: Marmorabbau auf Thassos; links: antiker Steinbruch; rechts: derzeitiger Abbau [27, 33].

Hauptsächlich wird Dolomit-Marmor (*Marmo Greco duro* - harter griechischer Marmor) in den Steinbrüchen von Saliara und Vathi abgebaut, der sich u.a. aus CaO (31%), MgO (20%), SiO_2 (0,2%) zusammensetzt; der Stein zeichnet sich durch seine fein- bis mittelkörnige Struktur (Korngröße zwischen 0,6 und 2 mm, Abb. 29) mit kleinen Hohlräumen innerhalb des Kristallgefüges, große mineralische Härte und Säurebeständigkeit aus.

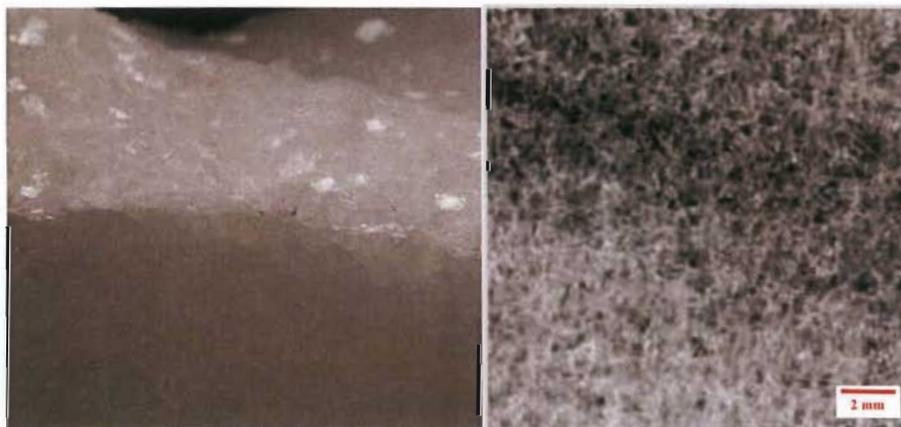


Abbildung 29: Thassos-Marmor; Bruch und Feinstruktur [30]

Es gibt auf Thassos auch Calcit-Marmor (auch *Limenas White*; bei Aliko), allerdings in geringen Mengen.

Die Marmorsorten von Thassos werden in Reinheitsklassen eingeteilt als *Snow White of Thassos* (ΘΑΣΟΥ ΧΙΟΝΟΛΕΥΚΟ) (makellos reinweiß), *Thassos A1* (ΘΑΣΟΥ ΛΕΥΚΟ) (hohes weiß), *Thassos A2* (sehr leichte graue Wolken oder Streifen), *Thassos A3* (deutlich grau) und *Thassos A4* (überwiegend graue Struktur) [33].

Verwendet wurde und wird der Thassos-Marmor für Innenausstattungen und Kunstobjekte aller Art, wie Skulpturen, Grabstelen oder Sarkophage, heutzutage für repräsentative Treppenanlagen, Bäder, oder Wandverkleidungen. Aus Aliko-Marmor wurden u.a. der „Pergamon-Altar“ (Abb. 30) und das Mausoleum von Halikarnassos gefertigt.



Abbildung 30: Verwendungsbeispiel Pergamon Altar, Pergamonmuseum, Berlin

In dieser Arbeit wird eine Probe der Kategorie Snow White of Thassos untersucht (Abb.31).

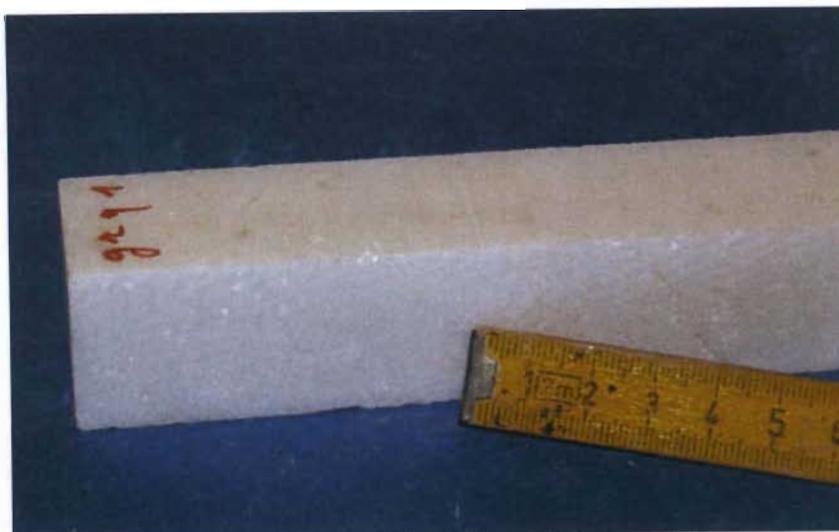


Abbildung 31: Snow White of Thassos; Probenmaterial

3.3. Schwarzenseer

Der „Schwarzenseemarmor“ ist eine österreichische Marmorsorte aus einem Steinbruch am Schwarzensee im Schafbergmassiv in Oberösterreich (Abb. 32).



Abbildung 32: Abbau des Schwarzenseer Marmors [22]

Er besteht aus ziemlich reinen Kalkstein ($> 96 \% \text{CaCO}_3$) und hat sehr lebhaften Färbungen, dadurch bedingt dass die durch Eisen und Mangan angereicherten Sedimente des Obertrias und Jura vor der Metamorphose mehrere Brekzierungphasen (Zerbrechung der Sedimente) im Lias erfuhren (Abb. 33).

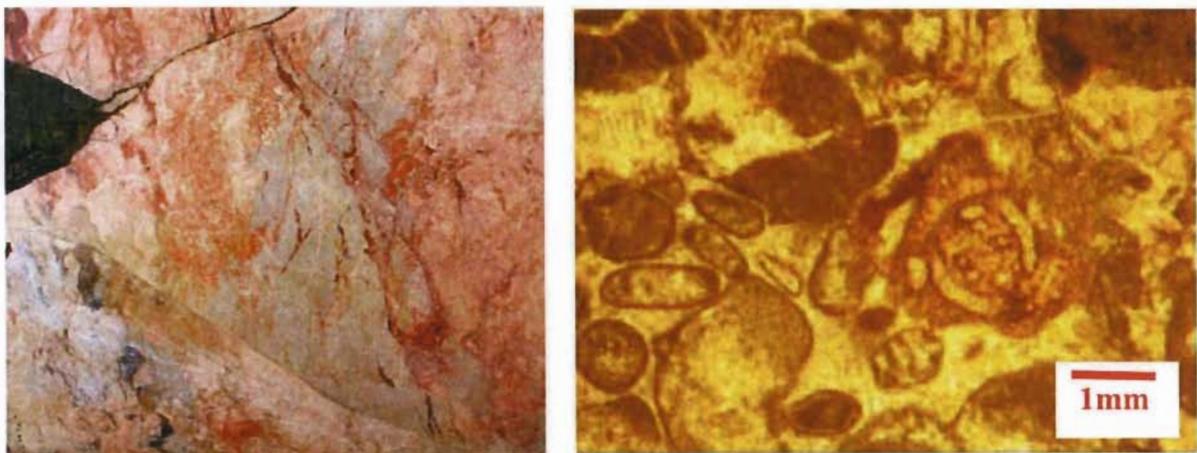


Abbildung 33: Schwarzenseer Marmor; Schnittfläche im Steinbruch und Feinstruktur [22]

Die seit alters als Dekorstein verwertete Kalkbrekzie wurde z.B. im Barock für die Stiftskirche Mondsee und das Stift St. Florian verwendet, später bei den Ringstraßenbauten in Wien, u.a. im Burgtheater, und besonders für Gedenktafeln im 19.Jhdt. (z.B. Sophien-Gedenktafel an der Esplanade in Bad Ischl); sogar bei der Wiener Weltausstellung 1873 wurde ein Muster als „Straubinger Marmor“ ausgestellt. Derzeit wird der Marmor nur zeitweise abgebaut und für Platten, Massivarbeiten und Profileteile, vorwiegend für die

Innenarchitektur verarbeitet (z. B. Restaurierungsarbeiten Schloss Aurolzmünster im Innviertel; Abb. 34).

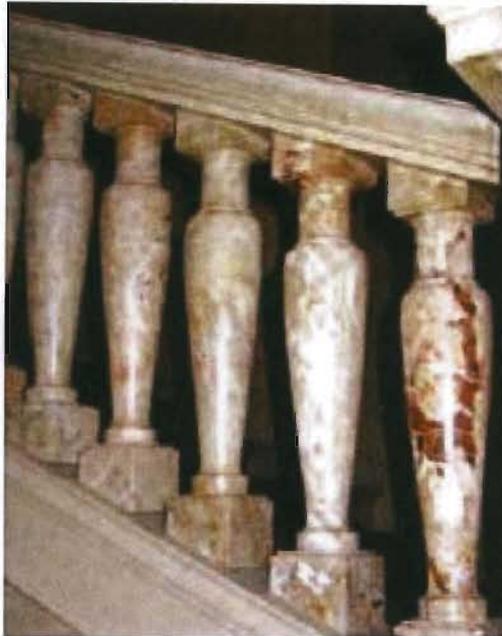


Abbildung 34: Schwarzenseer Marmor; Verwendungsbeispiel [22]

Das verwendete Probenmaterial ist in Abb. 35 zu sehen.



Abbildung 35: Schwarzenseer Marmor; Probenmaterial

3.4. Carrara

Carrara-Marmor ist einer der bekanntesten Marmore weltweit, und kommt aus der italienischen Provinz Massa-Carrara in der Toskana (Abb. 36); der Marmor entstand vor 30 Millionen Jahren im Zuge der Aufwölbung der apuanischen Alpen aufwölbten und besteht aus Calcit (99%), Quarz, Chlorit, Graphit, und Pyrit; der Stein ist feinkörnig (\varnothing 0,4 mm) (Abb. 37), und hat eine geregelte bis mehr oder weniger richtungslos-körnige Textur. Carrara ist der Oberbegriff für mehr als 50 unterschiedliche Handelsnamen, die je nach Steinbruch, Tradition, Güte und Konvention benannt werden.



Abbildung 36: Steinbrüche in Carrara [27]

Der Marmor wird bereits seit der Römerzeit abgebaut, besonders der Renaissance-Bildhauer Michelangelo, aber auch Luigi Bernini, Donatello oder Canova schätzten den „Statuario“ wegen seiner Feinkörnigkeit.



Abbildung 37: Carrara-Marmor; Erscheinungsbild und Feinstruktur [30]

Der als „weißes Gold“ geltende Carrara-Marmor wurde u.a. in den Tempeln und Villen des „alten“ Rom, im Dom von Florenz, im Campanile von Pisa, im Petersdom zu Rom, im ehemaligen World Trade Center in New York, in Kasinos von Las Vegas und als Außenverkleidung an der Finlandia Hall in Helsinki, am Grande Arche de la Défense in Paris und in der Kirche „Am Steinhof“ in Wien verbaut.

Sorten-Namen sind z.B. Carrara-Marmor C, Ordinario, Venato, Calacatta, Statuario, Bardiglio, oder Gioa, wobei „Statuario“ am teuersten und für Bildhauerarbeiten am begehrtesten ist. Carrara-Marmor gibt es rein-weiß, grau bis blau, gelblich oder rötlich, extrem dunkelblau oder grün; einmalige Färbungen mit Marmorierungen haben Calacatta Vagli (rotbraune bis rötlich-graue Arabesken auf weißem Grundton) und Calacatta Rocchetta (graugrünliche Arabesken).

In der gegenständlichen Untersuchungsreihe wurden zwei Proben aus Carrara-Marmor mit der Provenienz Kirche am Steinhof (Abb. 38) verwendet.

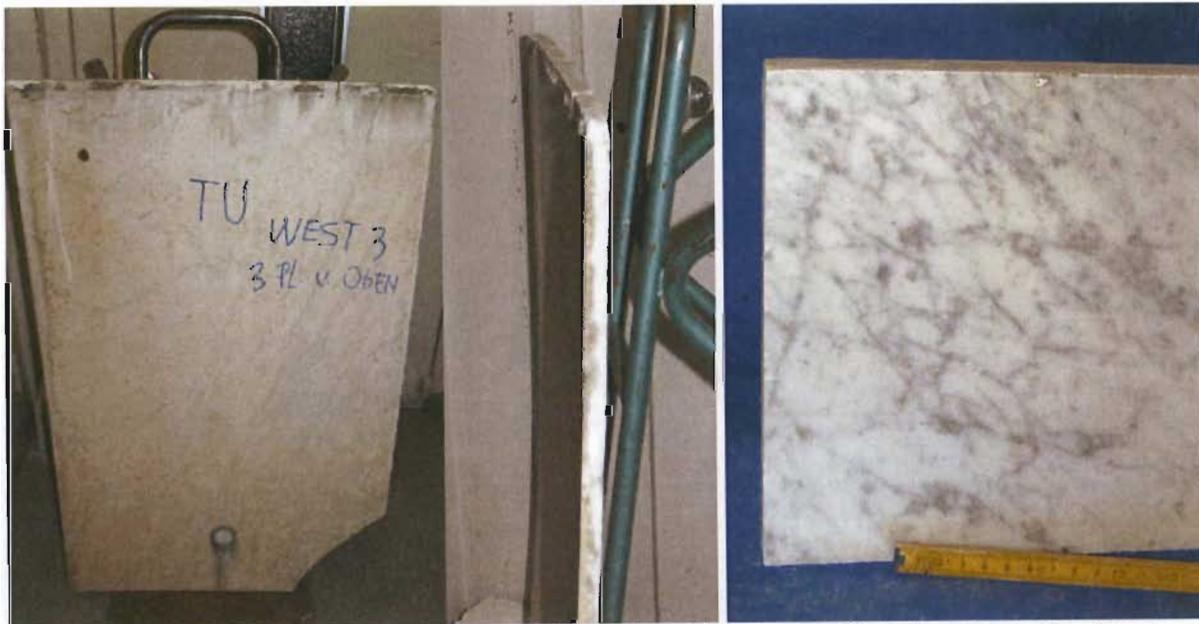


Abbildung 38: Probenmaterial Carrara-Marmor; links: verwittert (Fassadenplatte Kirche "Am Steinhof") rechts: neu

4. Ergebnisse

Die gleichmäßige Temperaturverlaufskurve (Abb. 39) ist durch die computerisierte Steuerung der Abkühl- und Aufheizphasen vorgegeben.

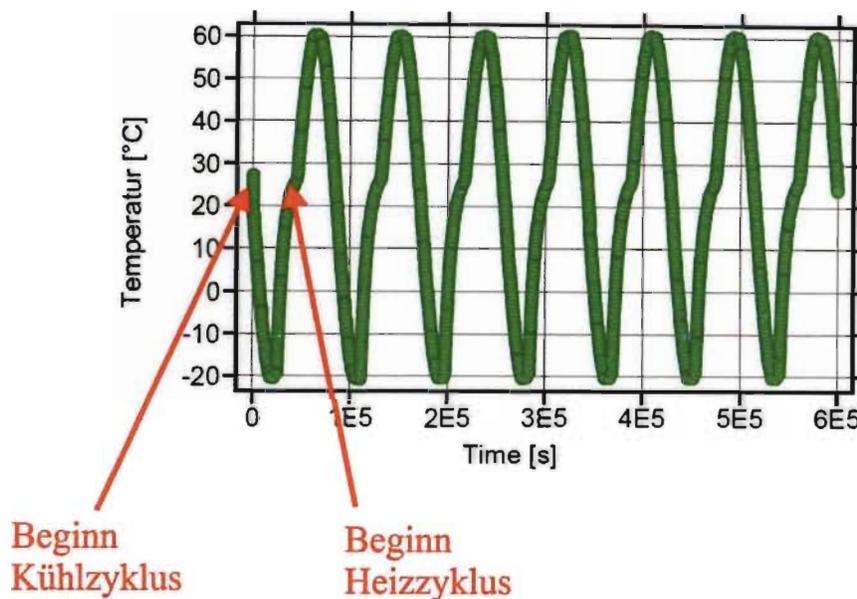


Abbildung 39: Zeit/Temperaturverlaufskurve, Beginn des ersten Kühl- und ersten Heizzyklus eingezeichnet

Ausgehend von der Umgebungstemperatur beginnt man mit einer Abkühlung auf -20°C , dem ersten Minimum in der Verlaufskurve, danach erfolgt eine Erwärmung wieder auf Raumtemperatur und eine Aufheizung bis 60°C , dem ersten Maximum; schließlich wird mit einer Abkühlung auf Raumtemperatur der erste Zyklus abgeschlossen. Alle weiteren Zyklen haben einen analogen Verlauf von Abkühl- und einer darauffolgenden Heizphase und abschließender Selbstabkühlung.

Die theoretisch sinusförmige Temperaturverlaufskurve zeigt an dem Punkt der Aufwärmphase, wo der Übergang von Eigenerwärmung auf Raumtemperatur zur „echten“ Heizphase stattfindet, einen deutlich erkennbaren Knick, der bei einer ständigen Probenerwärmung ab dem Temperaturminimum nicht gegeben wäre.

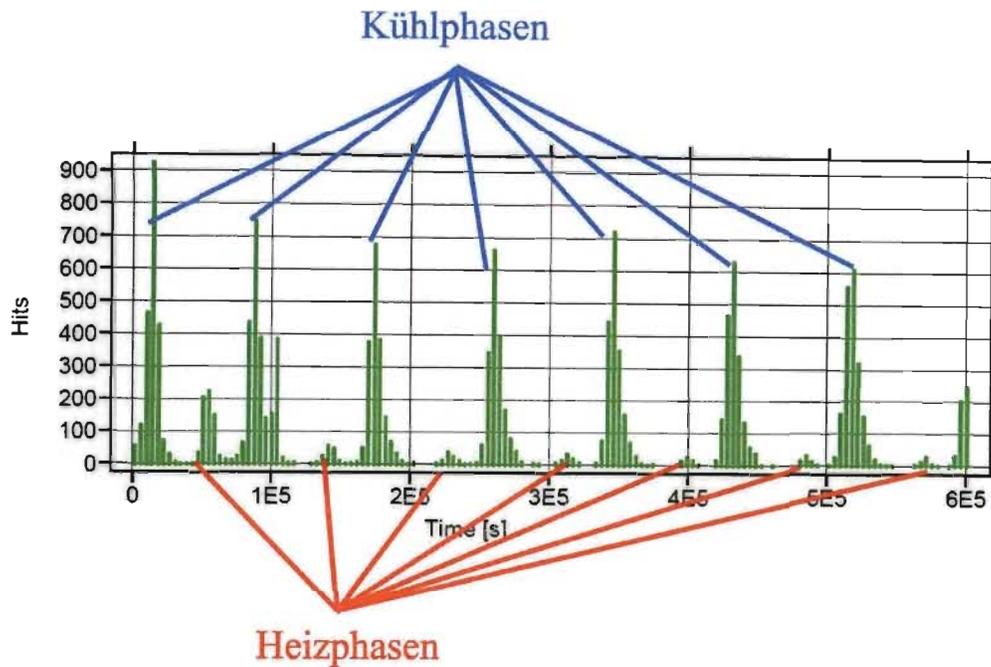


Abbildung 40: Typische Zeit/Hits-Verlaufskurve bei den Messungen

Die korrespondierende Zeit/Hits-Verlaufskurve (Abb. 40) zeigt die voneinander abgegrenzten Bereiche der einzelnen Kühl- und Heizphasen. Sind die Proben auf Umgebungstemperatur (ca. 20°C), finden praktisch keine AE-Ereignisse statt.

4.1. Ekeberg

Bei den vorliegenden Ergebnissen konnte festgestellt werden, dass die Events der Schallemission in der ersten Abkühlphase am größten ist. Mit jedem weiteren Zyklus nimmt die Anzahl der Events ab. Beim ersten Abkühlprozess treten zwischen 600 bis 900 Hits auf, nach der siebenten Abkühlung sind es nur noch 200 Hits (Abb. 41).

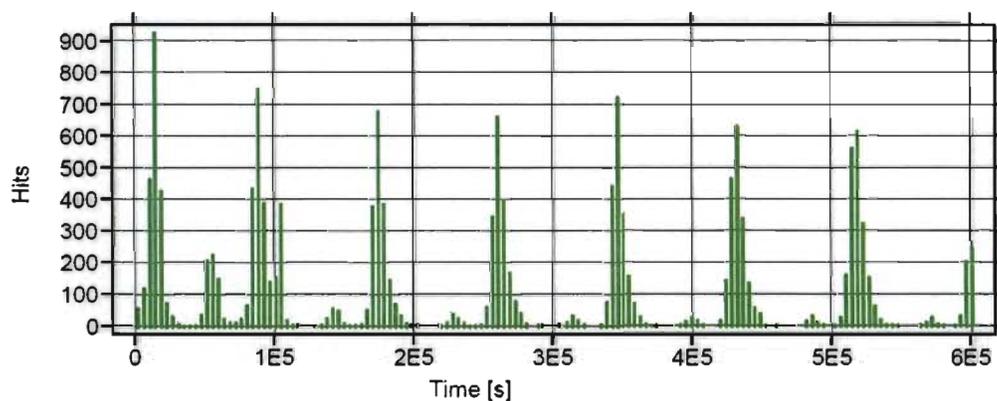


Abbildung 41: Hits/Zeit-Verlauf

Dies bestätigt die Vermutung, dass die Schädigung des Gesteins mit weiterer thermischer Belastung abnimmt. Aus der Hits/Temperatur-Verlaufskurve (Abb. 42) ist zu erkennen, dass bei ca. -20°C zwischen 200 bis 550 Hits auftreten, sowie der größte Bereich der Schallemissionssignale im Bereich 0°C bis 22°C , welche den Aufwärmbereich repräsentiert, sodass anzunehmen ist, dass in diesem Bereich die größte Schädigung stattfindet. Das Auftreten von AE-Ereignissen vermindert sich ab ca. 25°C (entspricht der Heizphase) auf nur noch 50 Hits. So sind auch aus dem Hits/Zeit-Verlauf (Abb. 41) klar abgetrennte Kühl- und Heizphasen zu erkennen.

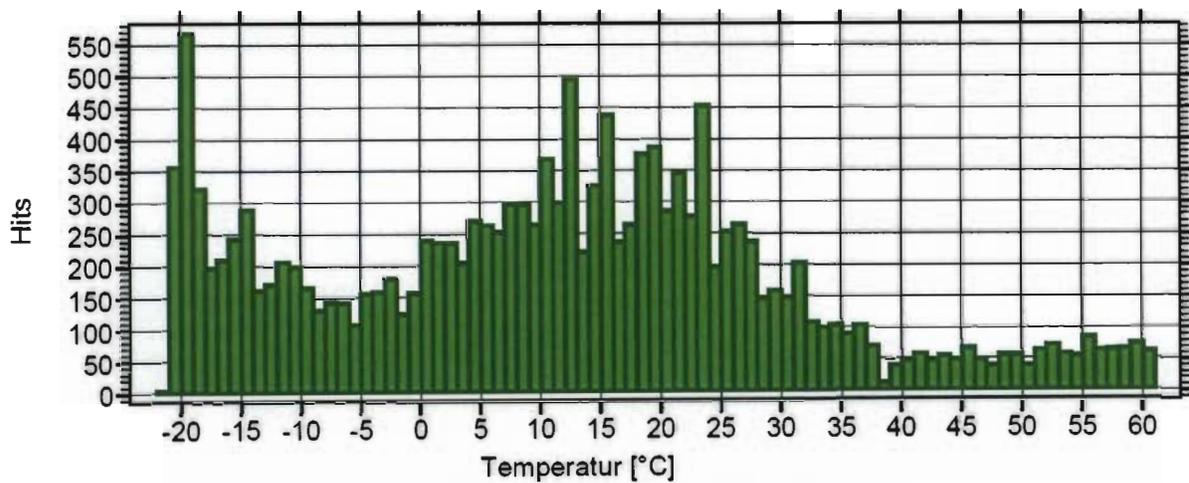


Abbildung 42: Hits/Temperatur-Verlauf

Betrachtet man den Amplituden/Zeit-Verlauf (Abb. 43), so ist zu erkennen, dass die Schallemissionssignale der verschiedenen Abkühlzyklen sich kaum in Dichte und stark ausgeprägten Amplitudenbereich unterscheiden.

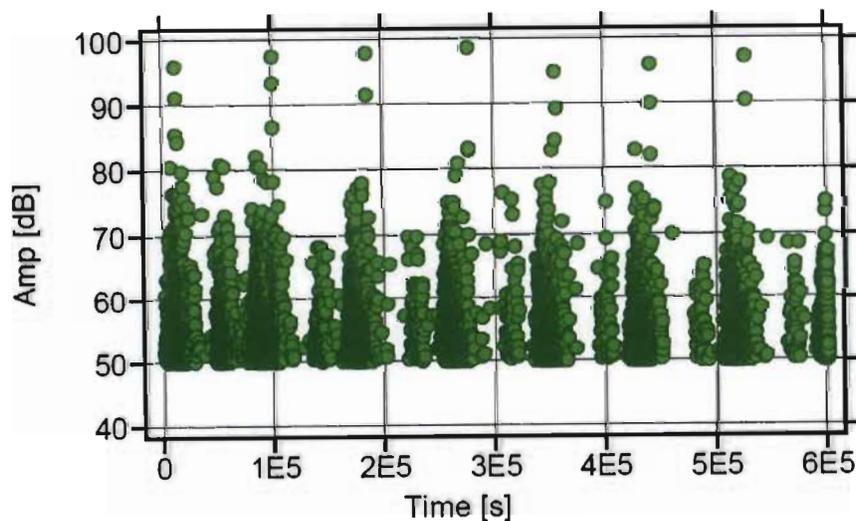


Abbildung 43: Amplitude/Zeit-Verlauf

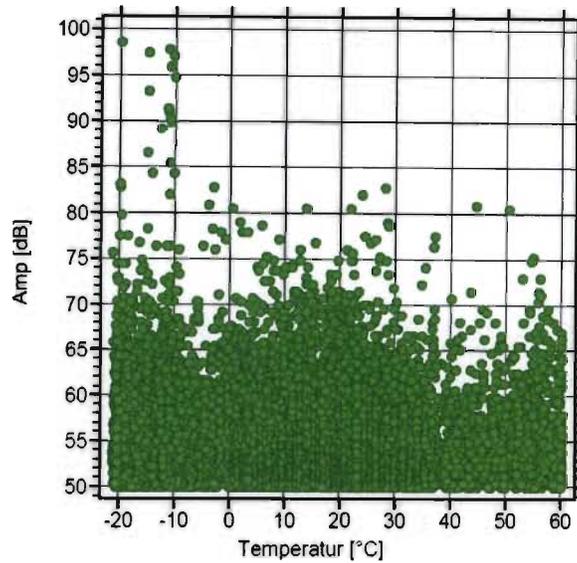


Abbildung 44: Amplitude/Temperatur-Verlauf

Der Amplitude/Temperatur-Verlauf (Abb. 44) zeigt die typische Form einer gleichgerichteten Sinuskurve, wobei im tiefen Temperaturbereich die Amplituden höher sind als bei höheren Temperaturen.

4.2. Snow White

Der griechische Marmor, Snow White of Thassos, zeigt im Allgemeinen kaum Schallemissions-Hits von -20°C bis 60°C . Wie aus Abb. 45 ersichtlich, grenzen sich die Heizzyklen klar von den Kühlphasen ab. Die Anzahl der Hits ist bei der ersten Abkühlung am größten und nimmt danach kontinuierlich ab. Die AE-Signale in den Kühlzyklen beginnen mit ca. 30 bis 35 Hits und nehmen dann auf 15 Hits ab. In den Heizzyklen bleiben die AE-Signale unter 5 Hits.

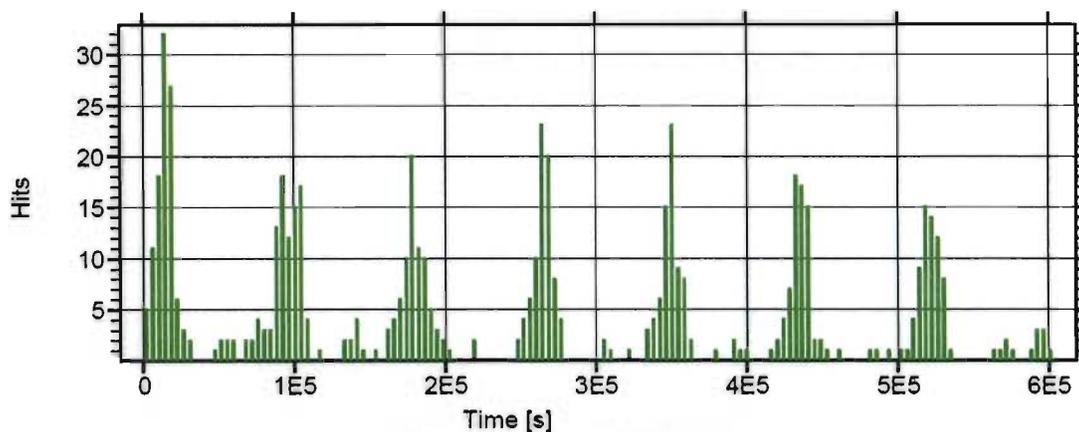


Abbildung 45: Hits/Zeit-Verlauf

Weiters zeigt sich (in Abb. 46), dass die Anzahl der Hits am höchsten um -20°C mit 48 Hits ist, und dann bis -2°C maximal 22 Hits erreicht. Im Bereich ab 15°C ist kaum eine Schädigung zu erkennen; Ereignisse besitzen ca. 5-7 Hits.

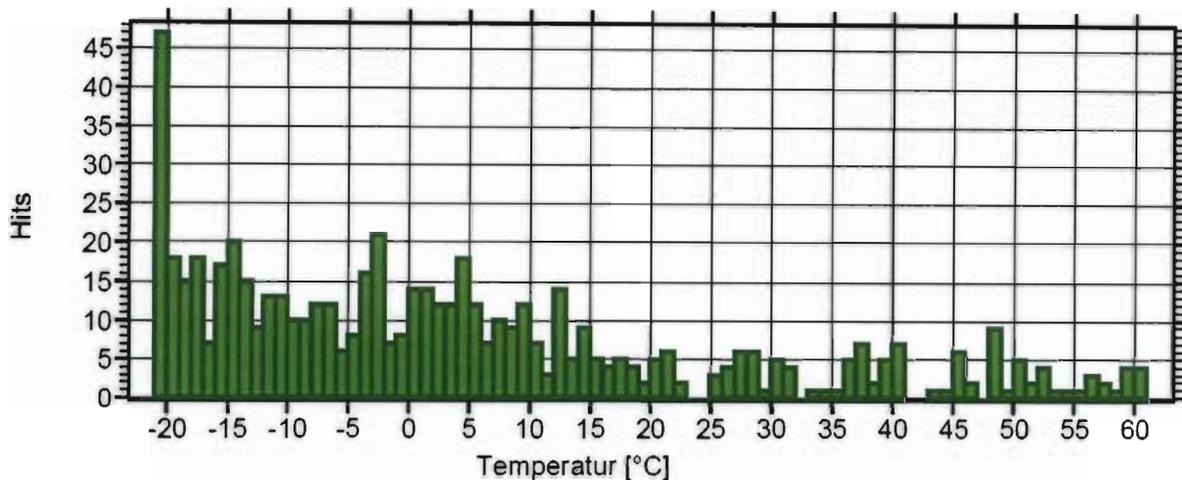


Abbildung 46: Hits/Temperatur-Verlauf

Die Amplituden der AE-Signale sind im Bereich der Abkühlung bis um die 80 dB, während sie den Heizphasen nur um die 65-70 dB erreichen können; allerdings finden in den Heizphasen nur durchschnittlich 5 Events statt, die auch durch andere Störsignale hervorgerufen werden könnten (Abb. 47). Die Bereiche der Abkühlphasen sind im Amplituden/Zeit-Diagramm klar erkennbar.

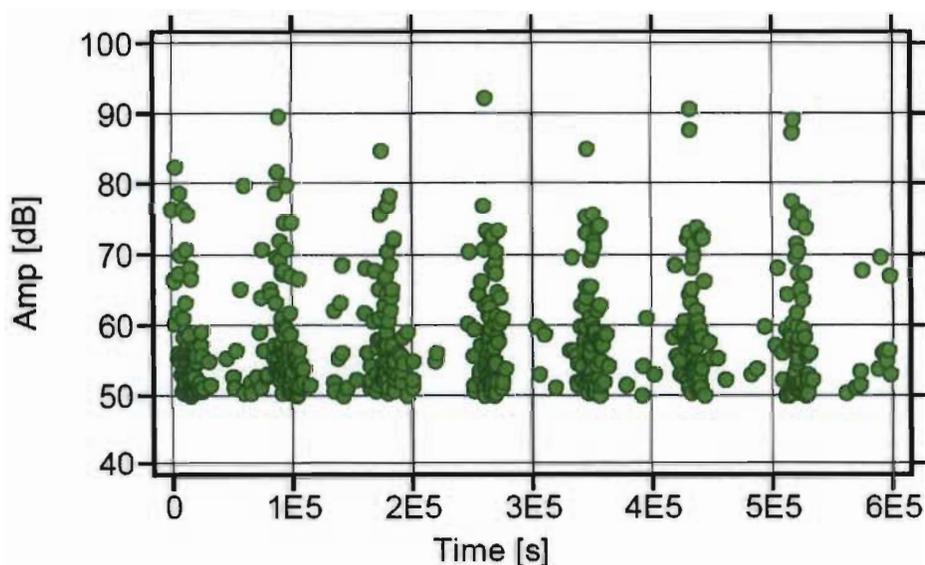


Abbildung 47: Amplitude/Zeit-Verlauf

Der Amplitude-Temperatur-Verlauf zeigt eine Häufung der AE-Ereignisse (im Bereich unter 58 dB) bis etwa $+15^{\circ}\text{C}$, darüber treten nur noch wenige AE-Ereignisse auf (Abb. 48).

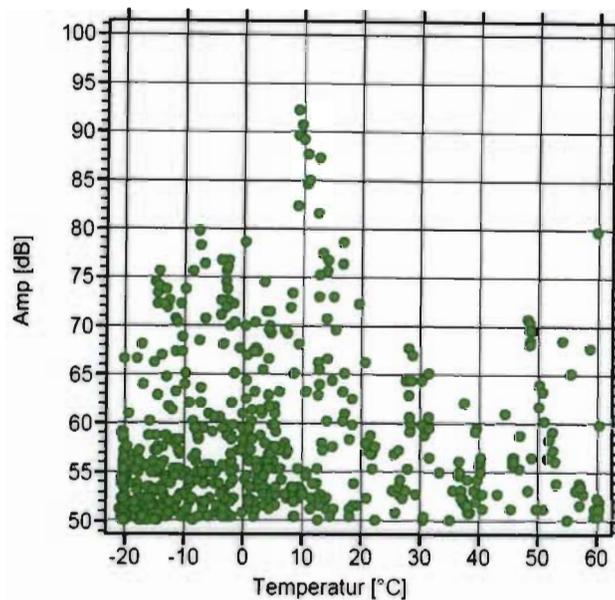


Abbildung 48: Amplitude/Temperatur-Verlauf

4.3. Schwarzenseer Marmor

Die österreichische Marmorsorte Schwarzensee weist ein interessantes Verhalten auf (Abb. 49): die Proben zeigen im ersten Abkühlzyklus kaum Schallemission (maximal 45 Hits bei -20°C). In der darauffolgenden Aufheizung steigt die Anzahl der AE-Ereignisse rapid an und erreicht ein Maximum mit bis zu 440 Hits; danach sind die weiteren Schallemissionssignale sowohl in Heiz- als auch in Kühlzyklen kaum vorhanden (maximal 20 Hits).

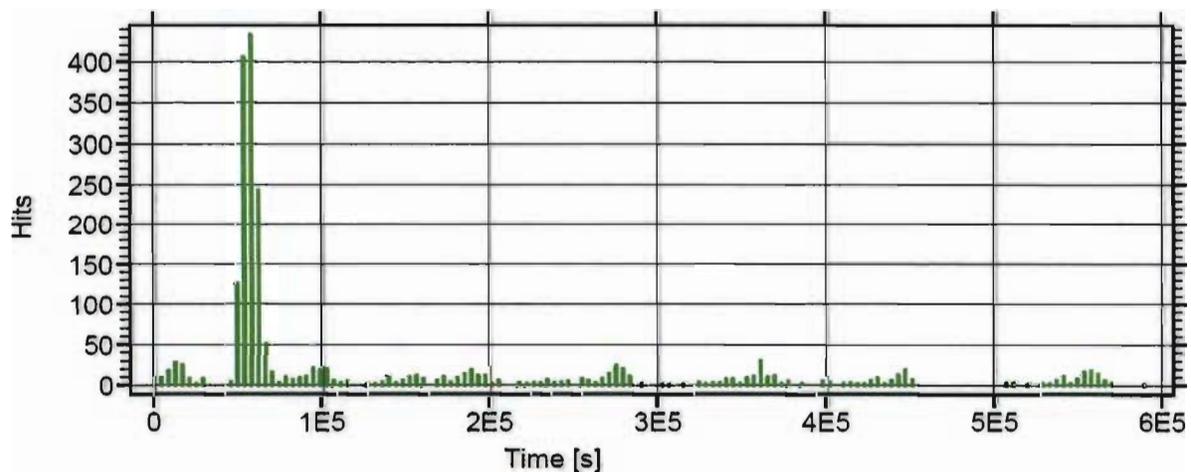


Abbildung 49: Hits/Zeit-Verlauf

Im Bereich -20°C bis 5°C nimmt AE mit 48 Hits kontinuierlich auf 2 Hits ab, ab 33°C bis 60°C , im Bereich der die meisten Schallemissionsereignisse aufweist, steigt die Schallemission bis auf zu 130 Hits an (Abb. 50).

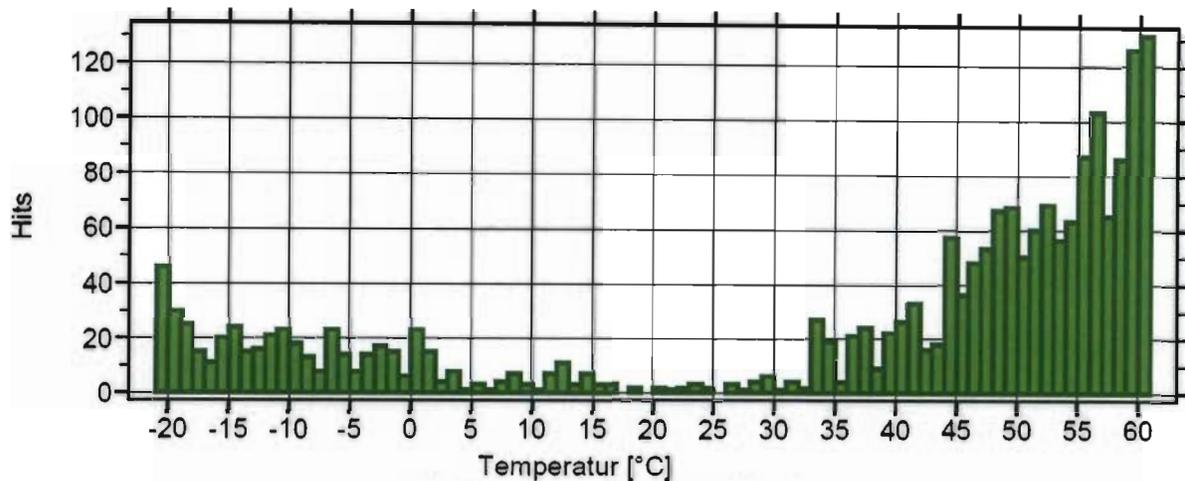


Abbildung 50: Hits/Temperatur-Verlauf

Die Amplitudenbereiche der Abkühl- und Heizphasen sind abgegrenzt und nicht sehr stark ausgeprägt (Abb. 51).

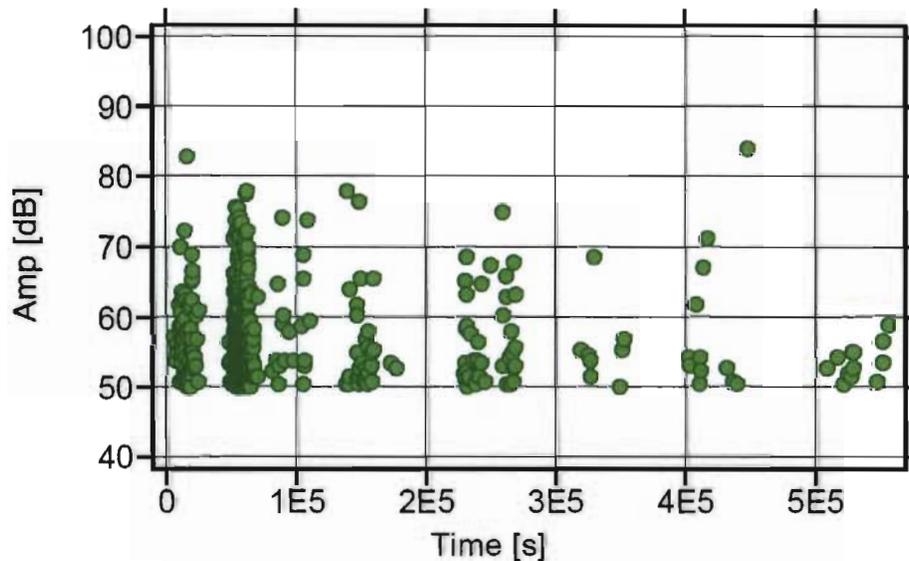


Abbildung 51: Amplitude/Zeit-Verlauf

Der Amplitude/Temperatur-Verlauf weist eine Häufung der AE-Ereignisse mit Amplituden bis 66 dB im Temperaturbereich ab $+45^{\circ}\text{C}$ auf, weiters auch im Bereich unter -15°C , aber mit geringeren Amplituden; im Temperaturbereich von -15°C bis $+45^{\circ}\text{C}$ gibt's es nur vereinzelt Hits (Abb. 52).

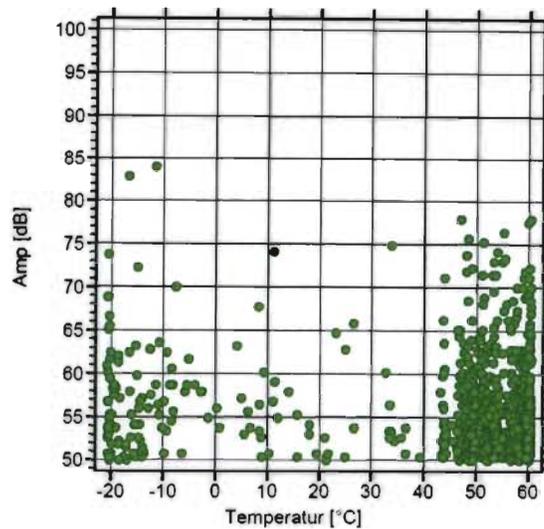


Abbildung 52: Amplitude/Temperatur-Verlauf

Möglicherweise ist das Sonderverhalten des Schwarzenzer Marmors durch die Brekzierungphasen [22] während der Diagenese, d.h. durch mehrmaliges Aufbrechen der Gesteinsstruktur und darauffolgende Kompaktierung in der Gesteinsentstehung, und die damit zu den anderen untersuchten Marmoren völlig unterschiedliche Entstehungsgeschichte bedingt.

4.4. Carrara Marmor

4.4.1. Unverwitterte Probe

Die Ergebnisse mehrere Proben des gleichen Materials (unverwitterter Carrara-Marmor einer neuen Fassadenplatte der Kirche „Am Steinhof“) unterschieden sich nicht grundlegend im Hits/Temperatur- (Abb. 53) und Hits/Zeit-Verlauf (Abb. 54).

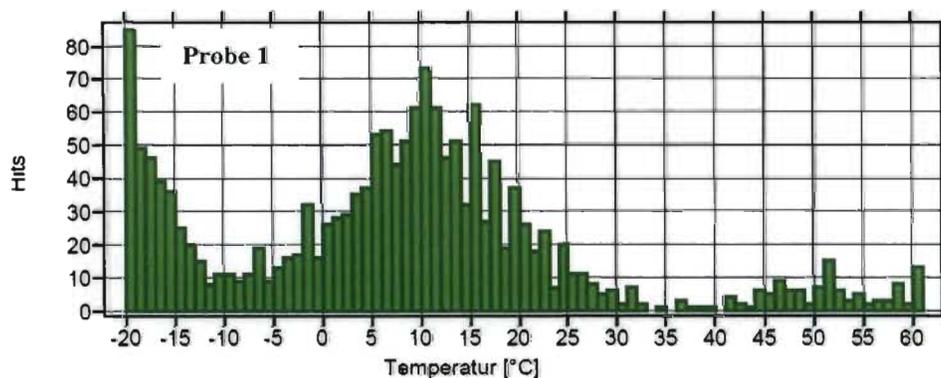


Abbildung 53a: Hits/Temperatur-Verlauf

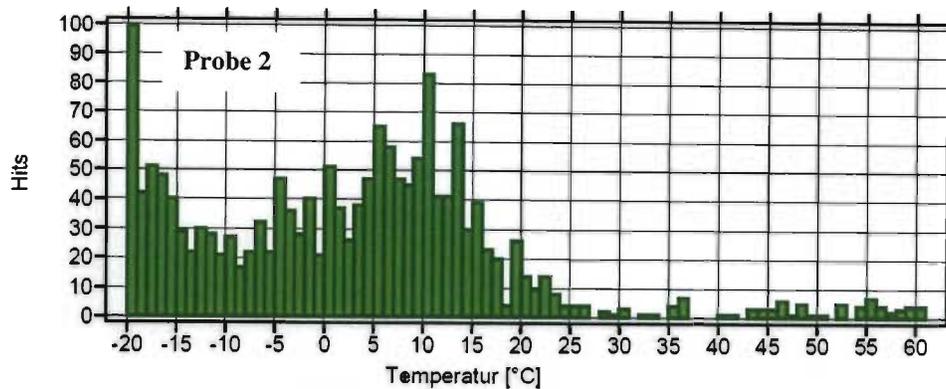


Abbildung 53b: Hits/Temperatur-Verlauf

Die Ergebnisse zeigen die größte Anzahl von AE-Ereignissen im Bereich um -20°C mit über 80 Hits und ein weiteres, etwas geringeres Maximum um $+10^{\circ}\text{C}$ mit etwa 75 Hits.

Auch der Hits/Zeit-Verlauf der Proben ist ähnlich (Abb. 54): die Schädigungen finden übermäßig in den Kühlzyklen statt, in den Kühlzyklen 1, 3 und 5 liegen die Hits etwas höher (um 80) als in den Kühlzyklen 2 und 4 (um 70), wobei die meisten Hits (um 90) im dritten Kühlzyklus auftreten; eine geringe Schädigung ist aber auch im ersten Heizzyklus mit etwa 30 resp. 10 Hits zu bemerken.

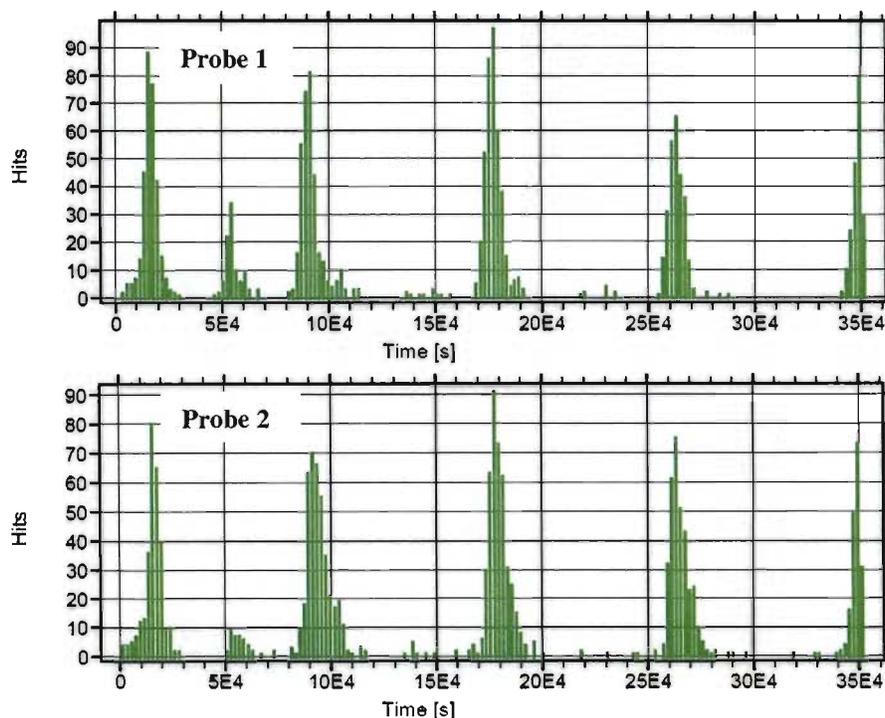


Abbildung 54: Hits/Zeit-Verlauf

Die Proben zeigen stark ausgeprägte Amplitudenbereiche in den Kühlphasen und der ersten Heizphase, und unterscheiden sich nicht im grundlegenden Verlauf der Amplitude/Zeit-Kurve (Abb. 55).

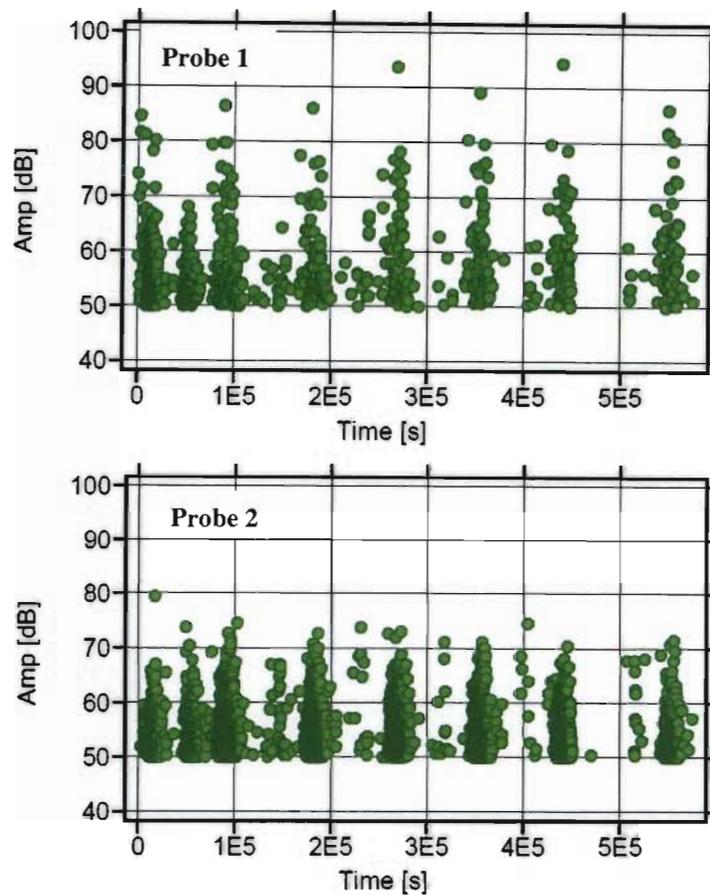


Abbildung 55: Amplitude/Zeit-Verlauf

Man kann anhand des Amplitude/Temperatur-Verlaufs (Abb. 56) feststellen, dass die Proben die meiste AE-Emission im Temperaturbereich unter +30°C mit einem sehr dichten Amplitudenbild bis etwa 65 dB aufweisen und dass ab etwa 40°C mit ca. 60 dB weitere, allerdings deutlich weniger AE-Ereignisse auftreten.

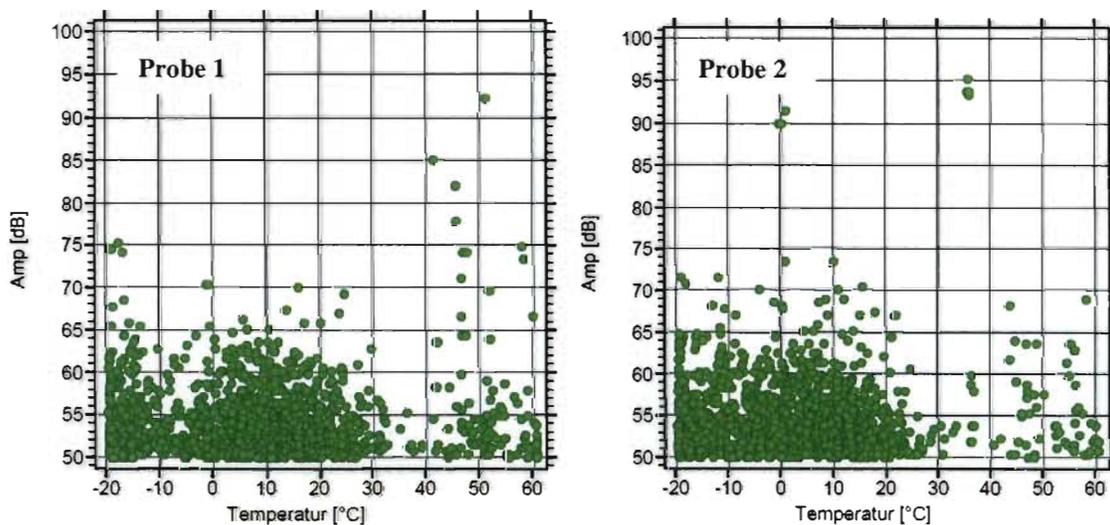


Abbildung 56: Amplitude/Temperatur-Verlauf

4.4.2. Verwitterte Probe

Die verwitterten Carrara-Proben einer Fassadenplatte der Kirche „Am Steinhof“ zeigen ähnliches AE-Verhalten mit verschieden starker Ausprägung, bedingt wahrscheinlich dadurch, dass die Platte eine starke Schädigung aufwies und die Proben deswegen unterschiedlich exponiert waren.

Erwartungsgemäß traten im Vergleich zu den Proben aus unverwitterten Marmor weniger AE-Ereignisse auf, da die Proben ja bereits Schädigungseinflüssen ausgesetzt waren. Allen untersuchten Probenkörpern war gemeinsam, dass im Temperaturbereich zwischen 15°C und 33°C nur minimale bis keine Schallemission stattfand. Der Unterschied in der Anzahl der Hits zwischen den Proben ist durch die verschiedene Witterungsexposition des Probenmaterials während der Verwendung zu erklären (Abb. 57).

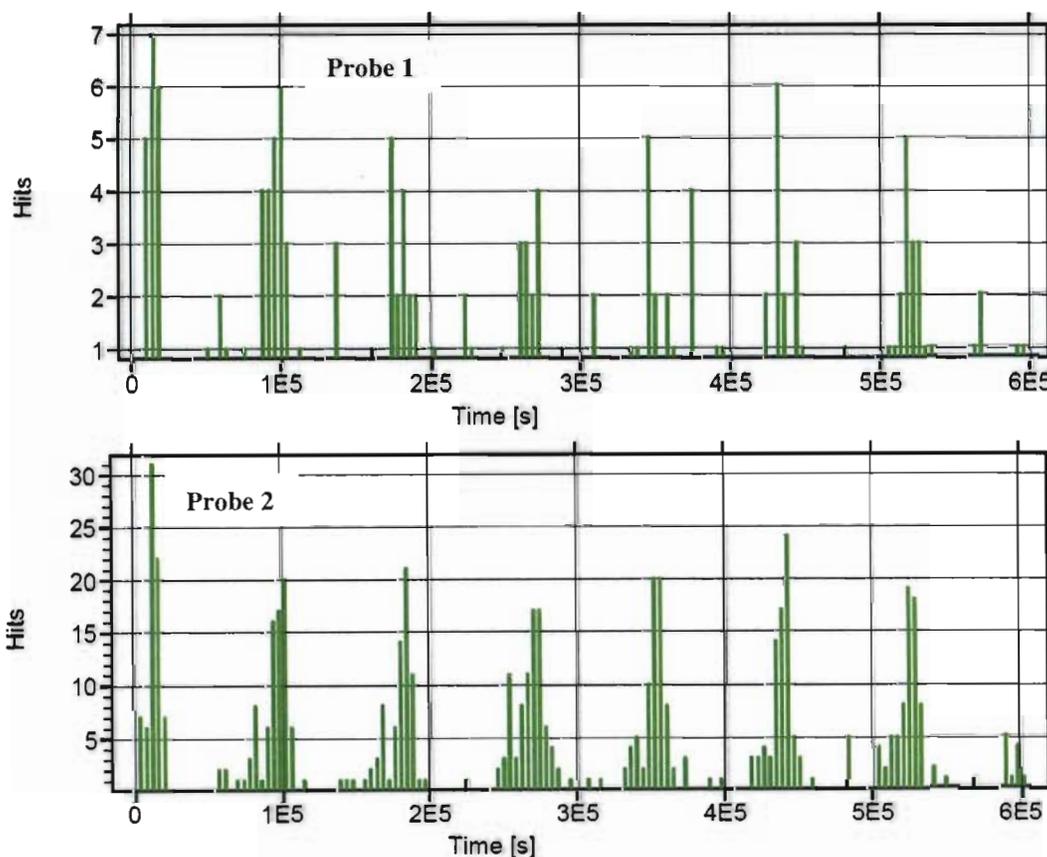


Abbildung 57: Hits/Zeit-Verlauf

Die AE-Signale treten relativ gleichmäßig im Temperaturbereich bis +20°C und verstärkt ab etwa 35°C auf, nur im Bereich zwischen 20°C und 35°C gibt es sehr wenige Hits. Die Häufung der Hits im Bereich über +35°C dürfte darauf zurückzuführen sein, dass bisher

keine Schädigung der Platten in diesem Temperaturbereich stattgefunden hat, zumal dieser Temperaturbereich auch kaum in der Verwendungsumgebung der Platten auftritt (Abb.58).

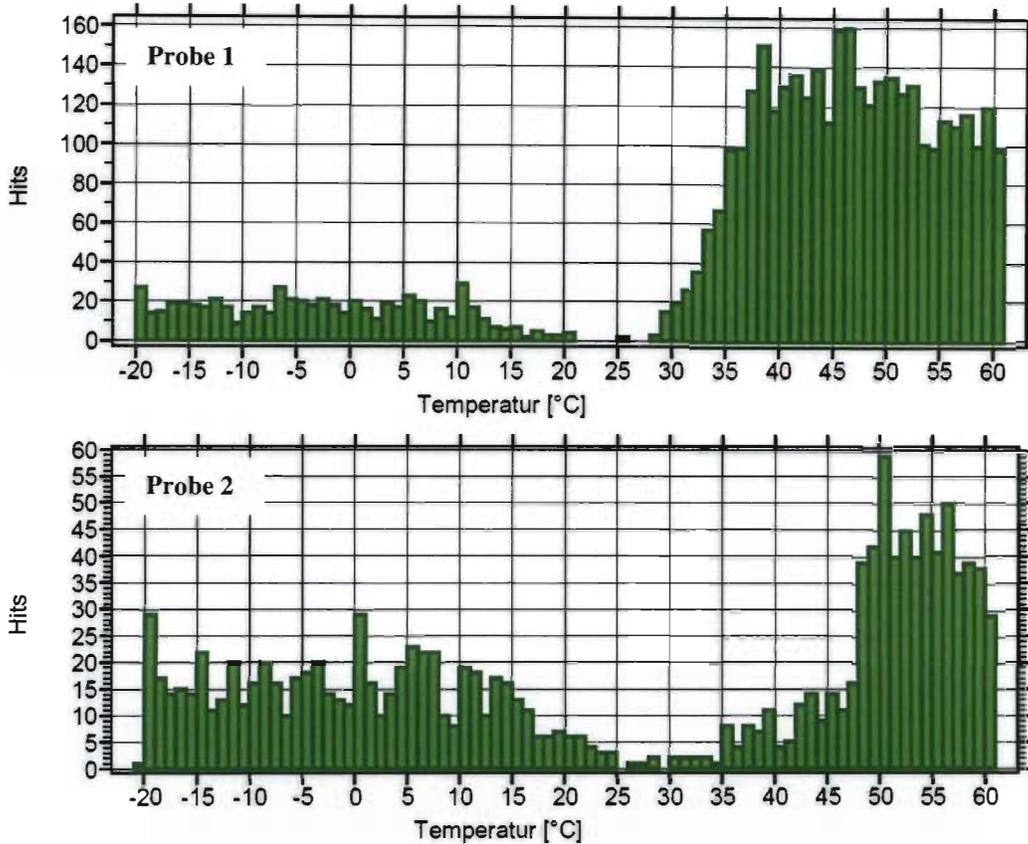


Abbildung 58: Hits/Temperatur-Verlauf

Die Amplitudenbereiche im Amplituden/Zeit-Verlauf (Abb. 59) sind klar abgegrenzt mit größeren Häufungsbereichen in den Kühlphasen.

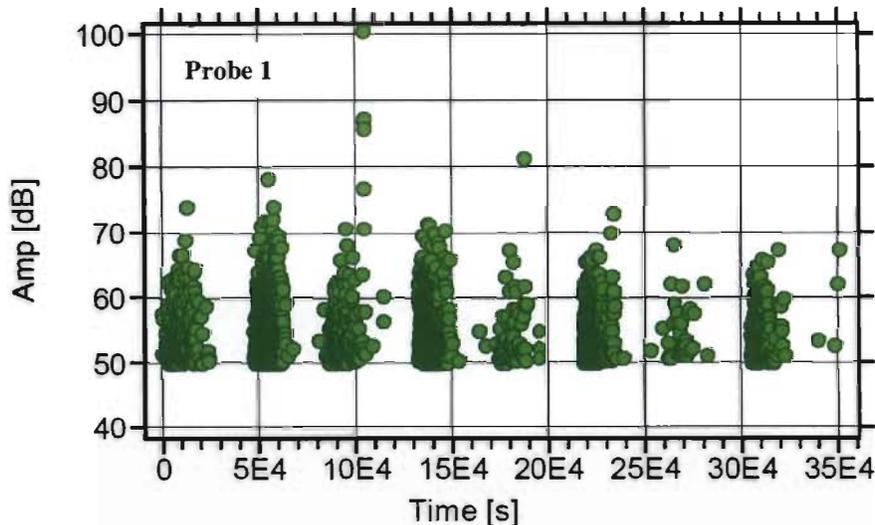


Abbildung 59a: Amplitude/Zeit-Verlauf

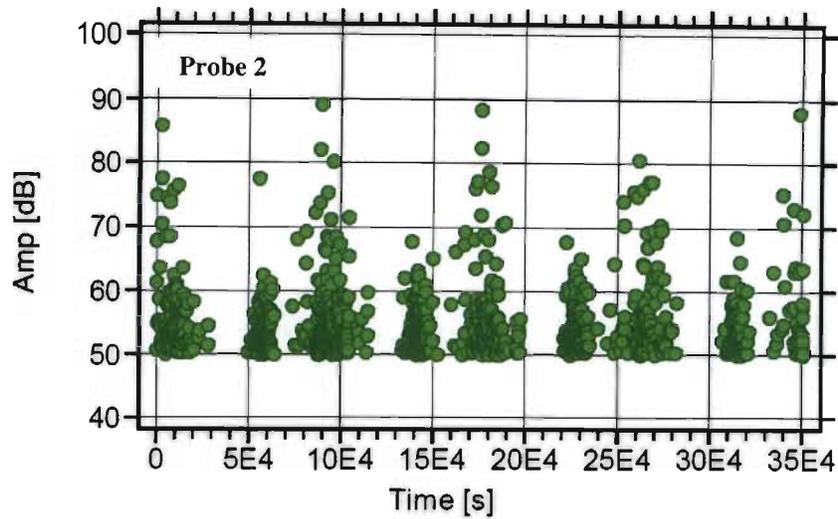


Abbildung 59b: Amplitude/Zeit-Verlauf

Die verschieden starke Ausprägung der AE-Ereignisse (dicht bis um 70 dB vs. spärlicher bis etwa 78 dB) ist wieder durch die verschiedene Vorexposition des Probenmaterials erklärbar; ein abnehmender Trend ist in jedem Fall erkennbar.

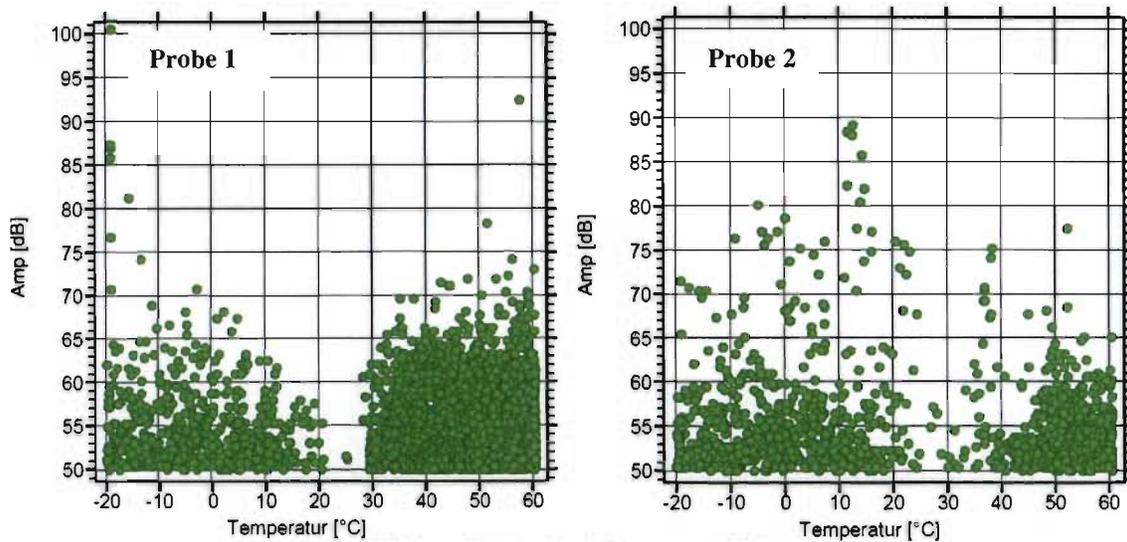


Abbildung 60: Amplitude/Temperatur-Verlauf

Der Amplituden/Temperatur-Verlauf (Abb. 60) zeigt wie der Hits/Temperaturverlauf (Abb. 58) eine Konzentration der Signale im Bereich bis 20°C und über 35°C, mit einer Signalhöhe bis etwa 65 dB, und minimales AE-Auftreten zwischen 20°C und 35°C.

4.5. Vergleich aller Marmorsorten

Beim Vergleich der Ergebnisse der Schallemissionsmessung der fünf verschiedenen Probenarten kann man allgemein feststellen, dass die Schallemission in den Abkühlzyklen am stärksten beim schwedischen Marmor „Ekeberg“ (mit 950 Hits) ausgeprägt ist. AE ist am geringsten beim griechischen Marmor „Snow White of Thassos“ mit 35 Hits, ebenso aber auch bei dem bereits früherer Schädigung ausgesetzten italienischen Marmor „Carrara“ von der Kirche „Am Steinhof“ (bis 50 Hits), der allerdings auch im Neuzustand eine geringe Anzahl von AE-Signalen (bis 100 Hits) aufweist.

Aus der folgenden Abbildung (Abb. 61) ist ebenfalls ersichtlich, dass der Schwarzenseer Marmor zwar auch in den Abkühlzyklen AE-Signale emittiert (bis zu 25 Hits), der Hauptanteil der Schallemission dieses Marmortyps findet jedoch im ersten Heizzyklus mit 425 Hits statt.

Die Tendenz der mit jedem Abkühlzyklus abnehmenden Schallemission ist allen Marmorsorten gemeinsam - am deutlichsten ist diese Tendenz bei Ekeberg, der im ersten Kühlzyklus über 900 Hits und im achten und letzten Kühlzyklus nur noch 250 Hits bietet.

Die Schallereignisse in Abhängigkeit von der Temperatur (Abb. 62) zeigen geringe Anzahl von Hits im gesamten Temperaturbereich für „Snow White“ und „Carrara verwittert“, mit minimalem Ansteigen um 50°C; die Verlaufskurve für „Ekeberg“ ist charakterisiert dadurch, dass die Kurve nach Art einer gleichgerichteten Sinuskurve bis gegen -5°C auf 100 Hits absinkt, bei ca. 35°C erneut ein Minimum (nach einem Maximum von 450 Hits bei 15°C) mit ca. 20 Hits erreicht und danach wieder ansteigt. Einen ähnlichen Verlauf, allerdings deutlich weniger Hits (10%), zeigt die Kurve für „Carrara unverwittert“. Schwarzenseer Marmor weist ab dem Minimum bis etwa 0°C geringe AE (30 Hits) auf, die ab etwa 32°C linear stark bis auf 140 Hits ansteigt; auch bei „Carrara verwittert“ treten vermehrt Hits über etwa 35°C auf.

Die Amplitudenbereiche von Heiz- und Abkühlzyklus sind bei allen Proben erkennbar; „Ekeberg“ weist als einziger sehr dichte Bereiche auch in allen Heizzyklen auf (Abb. 63).

Im Amplitude/Temperatur-Verlauf (Abb. 64) zeigt „Ekeberg“ besonders im Gegensatz zu „Snow White“ ein dichtes Bild an Hits mit signifikanten Einbrüchen um -5°C und +45°C; „Snow White“ und „Schwarzenseer“ zeigen eine Clusterbildung im Bereich um 50°C. Die Proben „Carrara verwittert“ und „Carrara unverwittert“ zeigen ähnlichen Verlauf, AE-Ereignisse bis etwa 20°C und ab 35°C, wobei dieser Bereich bei „Carrara unverwittert“ kaum erkennbar ist.

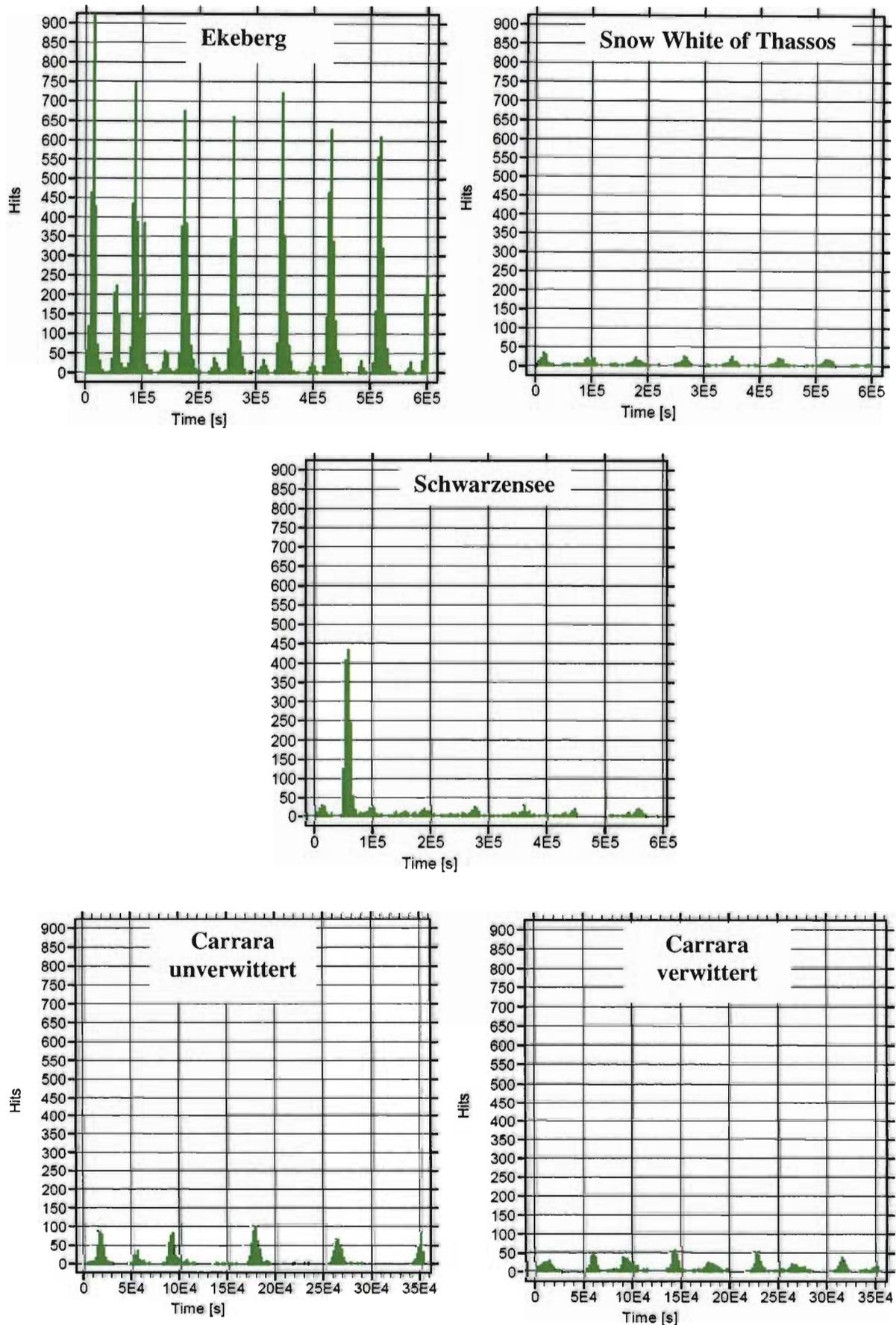


Abbildung 61: Vergleich der Hits/Zeit-Verläufe aller untersuchter Marmortypen

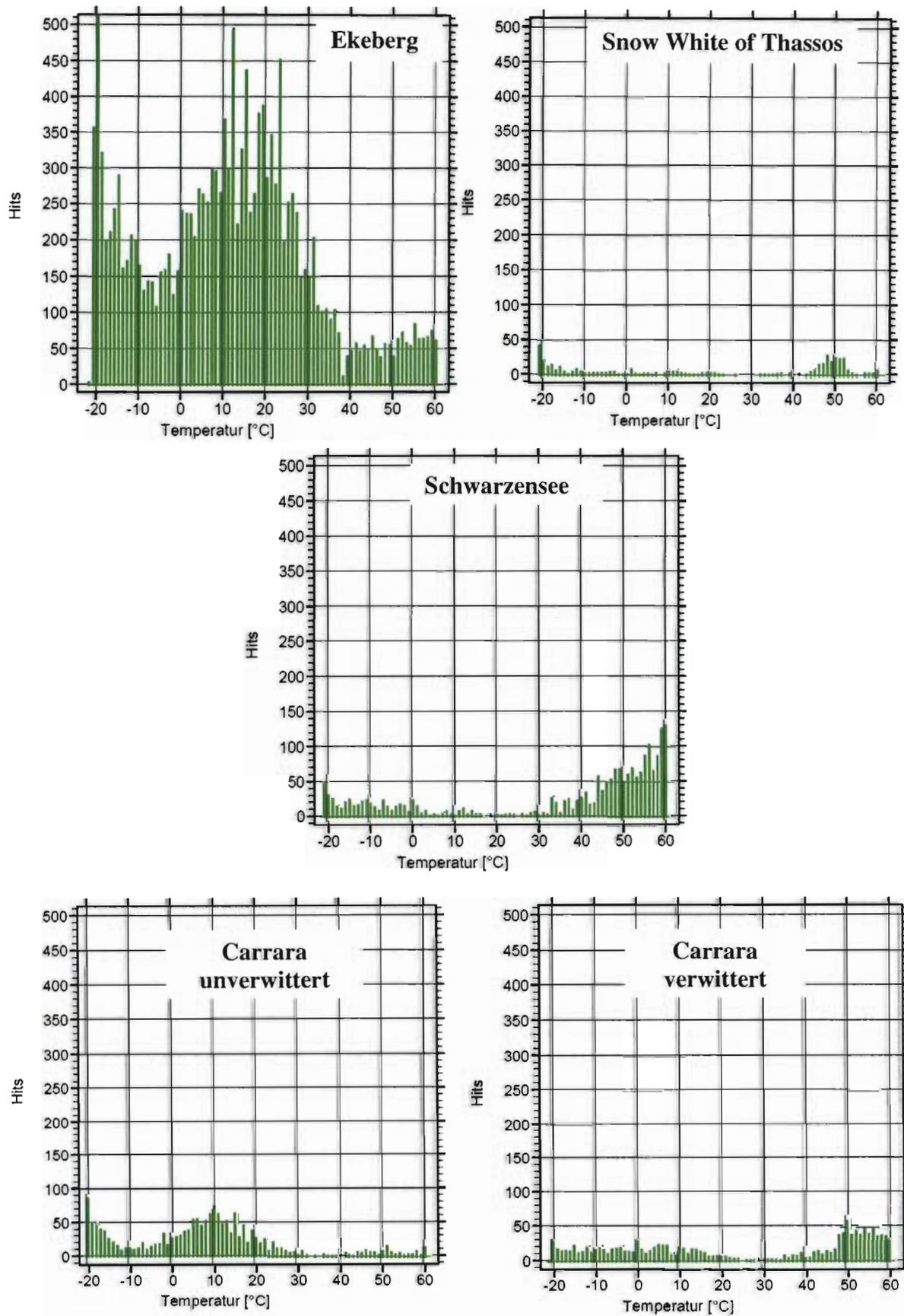


Abbildung 62: Hits/Temperatur-Verlaufskurve der untersuchten Marmorproben

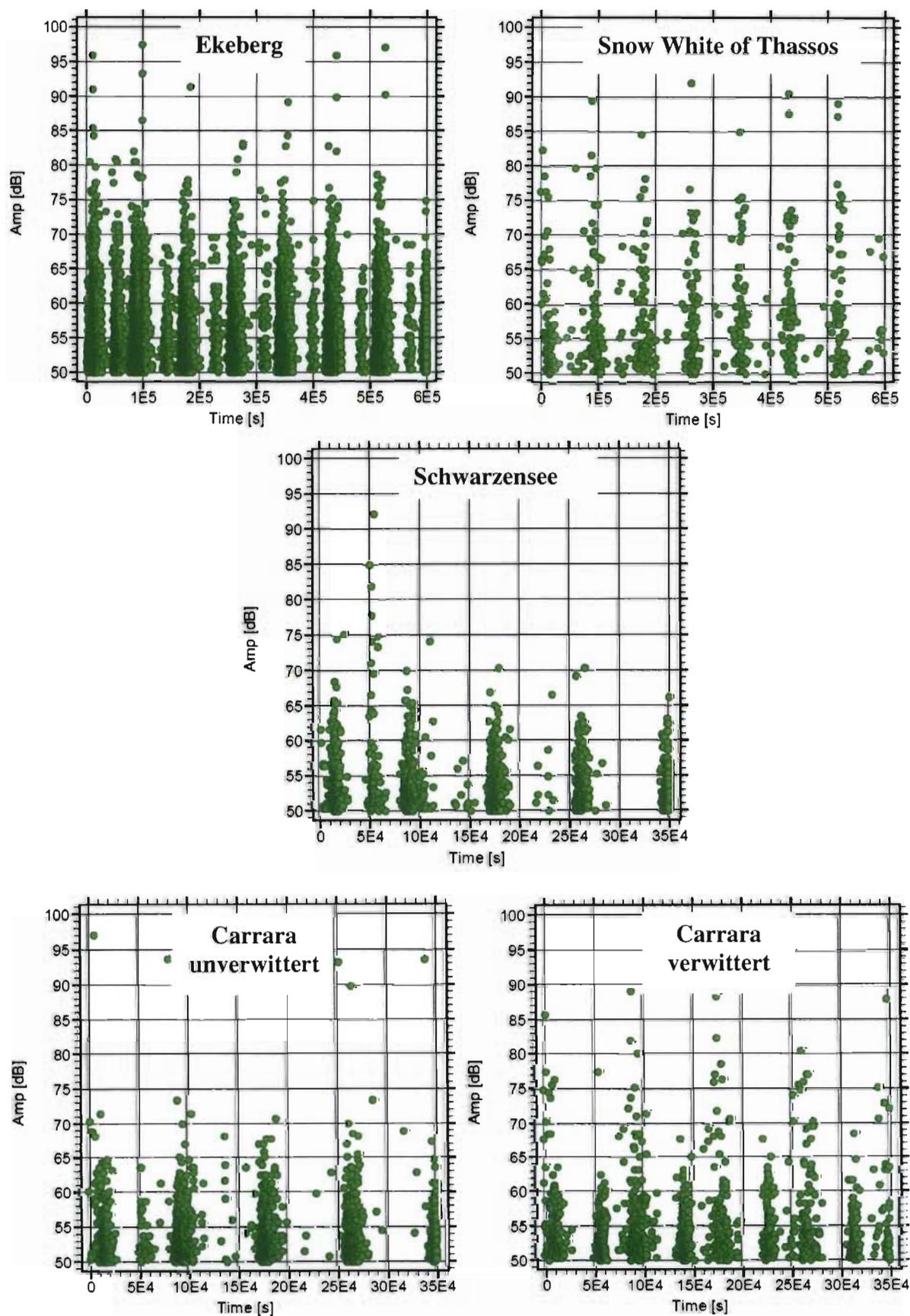


Abbildung 63: Vergleich der Amplitude/Zeit-Verläufe der untersuchten Marmorproben

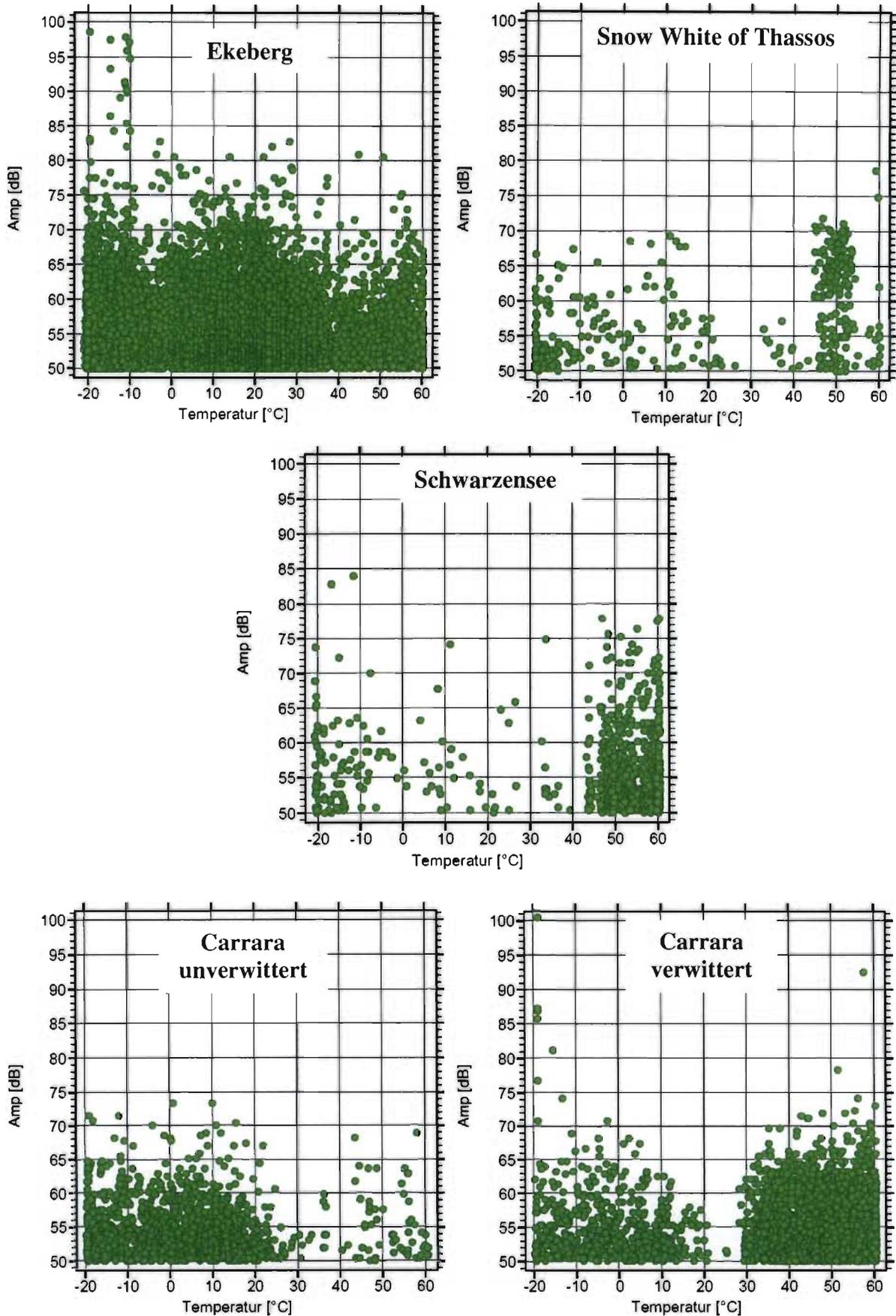


Abbildung 64: Vergleich der Amplitude/Temperatur-Verläufe der verwendeten Marmortypen.

5. Diskussion

Die AE-Methode ist für die Beurteilung von Schädigungen an witterungsbeeinflussten Gesteinen ein bisher kaum angewandter wissenschaftlicher Ansatz.

Allerdings ist die Untersuchung von Schädigungen nicht nur für Wissenschaft und Forschung interessant, sondern es zeigen sich auch starke wirtschaftliche Aspekte. Mit stark steigendem Denkmalschutzbewußtsein und immer besseren Konservierungsmethoden steigen auch die Ansprüche und Kosten für Erhaltung und Bewahrung von Kulturgütern. Die AE-Methode kann hier auch zur Früherkennung und Vorbeugung von Schäden eingesetzt werden, was nicht nur den Arbeitsaufwand für Restaurierung und Wiederherstellung verringert, sondern auch den finanziellen Einsatz drastisch senken könnte.

Auch im Hochbau, mit immer höheren Gebäuden, ist es interessant, Schäden an Fassaden und Bauteilen möglichst frühzeitig zu erkennen, d.h. z.B. bevor Teile herabfallen, damit das Gefährdungspotential für Menschen und Umwelt minimiert werden kann. Auch für diesen Bereich ist die Erforschung von Konservierungsmethoden und deren Haltbarkeit mittels AE sicher nicht unerheblich, da ein Austausch einer Komplettfassade einerseits einen hohen Kostenfaktor darstellt und andererseits fallweise aus Denkmalschutzgründen nicht wünschenswert ist.

Eine Lebensdauervorhersage von Fassadenteilen und eine dementsprechende Datensammlung, nicht nur von Marmor aber auch anderer Gesteinsorten wie z.B. Granite und Kalksteine, die nicht nur Wissenschaftlern sondern auch Architekten, Baumeistern, Steinverarbeitern und Restauratoren oder Denkmalpflegern zur Verfügung steht, wäre ein Fernziel der AE-Forschung, das auch seine wirtschaftliche Berechtigung hat.

Aus wissenschaftlicher Hinsicht ist festzustellen, dass hier nur eine reine AE-Messung durchgeführt wurde; ebenso wurden noch nicht alle Möglichkeiten der Probenpräparation, wie z.B. Konservierungsüberzüge oder Kunstharztränkungen, ausgereizt.

Die Einbeziehung zusätzlicher, bereits in Verwendung stehenden Verfahren, wie Dilatationsmessungen, Quecksilberporosimetrie, Fluoreszenz-Mikro-Foto-Methode, Dehnmessstreifenmethode oder Laufzeitmessungen in die weitere Analyse könnte zu weiterem besserem Verständnis der Mechanismen und Abläufe der Schädigungen führen. Ebenso gibt es keine Systematik von Kennwerten zur Charakterisierung eines Schädigungsverhaltens; bis dato erfolgte keine Miteinbeziehung der Bestimmung von Porengröße, Form und Verteilung im Gefüge vor und nach einer Verwitterung in die Analyse der Ergebnisse der AE-Messung.

Es wäre sicher auch sinnvoll, Erkenntnisse der Bruchmechanik in Hinblick auf Ausbreitung von Mikrorissen und Verhalten von Poren im trocken- oder Nasszustand und im Gefrier- und

Taubereich zu berücksichtigen. Es wurde auch noch nicht untersucht, ob Aufwärm- und Abkühlgeschwindigkeit Einfluss auf das Verwitterungsverhalten haben.

Die Weiterentwicklung der AE-Technik könnte eine Schadensanalyse nicht nur im Labor, sondern auch vor Ort im Freien, direkt am betroffenen Objekt, ermöglichen, wobei auch eine parallele Untersuchung von neuen und alten, besonders exponierten, verwitterten oder bereits Konservierungsverfahren unterzogenen Gebäudeteilen zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten eine interessante Aufgabenstellung ergeben würde.

6. Zusammenfassung

In der gegenständlichen Arbeit wird das Thema Schallemission (Acoustic Emission, AE) behandelt. AE ist die elastische Energie, die während der Deformation von Materialien spontan freigesetzt wird. Mit der AE-Technik können im Labor Schädigungsdefekte (z.B. Rissverlängerungen in Interfaces zwischen Körnern, Gefrierprozesse in Poren) im Gestein in Abhängigkeit von der aktuellen Prüfzeit und der tatsächlichen Temperatur der Probe bestimmt, analysiert und statistisch/graphisch dargestellt werden.

Schallemissionsmessung (Acoustic Emission Testing, AT) ist eine zielführende, zerstörungsfreie Untersuchungs- und Diagnosemethode für Bauingenieurwesen, Denkmalschutz und Restaurierung. Die eigentliche Messung erfolgt mittels einer AE-Anlage im Labor; die Proben werden in einer Klimakammer (Dewar) einem gesteuerten Temperaturwechselprozess zwischen -20°C und $+60^{\circ}\text{C}$ unterzogen, wobei mit flüssigen Stickstoff gekühlt und durch einen Heizkörper elektrisch geheizt wird; ein Kälte-Wärme-Zyklus (es wird mit Abkühlung begonnen) dauert 24 Stunden. Es können maximal sechs Probenkörper je Versuchsreihe untersucht werden. Die Messung und die daraus gewonnenen Daten werden über einen Computer mittels LabView-Anwendung gesteuert und verarbeitet.

Durch Anwendung im gegenständlichen Fall sollen für verschiedene Marmortypen eine Prototypisierung eines Messverfahrens zur Ermittlung von Kennwerten zur Charakterisierung des Schädigungsverhaltens durch Witterungseinflüsse insbesondere Temperaturschwankungen im Gefüge entwickelt werden. Folgende Marmorsorten wurden untersucht: Ekeberg (aus Schweden), Snow White (aus Thassos, Griechenland), Schwarzenzer Marmor (aus Oberösterreich) und Carrara (verwittert und neu; Fassadenplatten der Kirche Hl. Leopold am Steinhof, Wien). Bei allen noch nicht bewitterten Proben zeigte sich das gleiche (erwartete) Ergebnis in unterschiedlich starker Ausprägung: anfänglich gibt es eine große Anzahl von Schallemissionsereignissen, die nach weiteren Temperaturwechselbeanspruchungen abnehmen.

Dies würde nahelegen, dass nach einer bereits eingetretenen Schädigung das Schädigungspotential abnimmt, weil in Mikro-Rissen und Poren ein Gefriersprengprozess als Hauptschädigungsursache nicht mehr stattfinden kann. Diese Hypothese soll durch weitere Untersuchungen an weiteren Marmor- und auch anderen Gesteinssorten (z.B. Granite, Kalksteine, Quarzsandsteine) im Labor und durch Feldversuche gefestigt werden.

7. Literaturverzeichnis

1. Tschegg E.K., Widhalm C., Eppensteiner W., (1999), Ursachen mangelnder Formbeständigkeit von Marmorplatten, Z. der deutschen geolog. Gesellschaft, 150/2, 1999, 283-297.
2. Sheremeti-Kabashi Flurije, (2002), Untersuchungen der Gefügeanisotropie von Carrara-Marmor und deren Einfluss auf die Verwitterung, Dissertation an der Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität, München.
3. Fleischer G., Rohatsch A., (2003), Untersuchungen zur Generalsanierung der Kirche St. Leopold am Steinhof in Wien; Referateband, Institut für Bauschadensforschung, Österr. Forschungsinstitut für Chemie und Technik, Wien, 27.3.2003, pp 8 - 24.
4. Köhler W., (1991), Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara-Marmor in Potsdam-Sanssouci, - Steinschäden - Steinkonservierung, Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland, Hannover, Nr. 2; 50-54.
5. Bouineau A., Perrier R., 1995, La décohé sion granulaire, maladie des revêtements de facades en marbre. Mines et Carrières – Industrie Minérale Août-septembre 147, 32-35.
6. Royer-Carfagni G., (1999), Some considerations on the warping of Marble facades: the example of Alvar Aalto's Finland Hall in Helsinki, Construction and Building Materials 13, 449-457.
7. Trewitt T.J., Tuchmann J., (1988), Amoco may replace marble, Proceedings of the headquarters, ENR March, 11-12.
8. Grimm W.D., (1999) , Beobachtungen und Überlegungen zur Verformung von Marmorobjekten durch Gefü geauflockerungen, Z.dt. geol. Ges. 150/2, pp 195-235.
9. Poschlod K.; (1990), Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluss auf die Verwitterung, Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen :Reihe B, Allgemeine angewandte Geologie 7, 1-62.
10. Final Technical Report (1996), Contract: BRE2-CT94-1559, Project No: CR-1815-91, Leader: Tschegg E.K., CRAFT, Prevention of Deformation of Marble Cladding Panels.
11. Final Technical Report, (2006) Contract N°: G5RD-CT-2000-00233, Project No: GRD1-1999-10735, Leader: Schouenborg, Björn., TEAM, Testing and Assessment of Marble and Limestone.

12. Widhalm C., (1998), Anisotrope physikalische Eigenschaften und Formbeständigkeit von Marmorwerkstoffen”, Dissertation an der TU Wien, Labor für Materialwissenschaften, Betreuung von Prof. E. Tschegg,
13. Fleischer G., (2002), Beurteilung von Ultraschalluntersuchungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege, Dissertation an TU Wien, Inst. f. Ingenieurgeologie, Betreuung von Prof. A. Rohatsch.
14. Rüdrieh J. M., (2003), Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierten Marmore, Dissertation an der Georg-August-Universität Göttingen, Geowissenschaftliches Zentrum, Betreuung von Prof. S. Siegesmund.
15. Malaga-Starzec K., (2003), Microscopic and macroscopic studies of initial weathering of natural stones used as building materials, Thesi at Department of Chemistry of Göteborg University, Sweden.
16. Olsson A.M., (2005), Laboratory Testing of bowing Potential of marble, Master-Thesis at The Earth Science Center, Göteborg University, Sweden.
17. Koch A., (2005), Deformation von Fassadenplatten aus Marmor: Schadenskartierungen und gesteintechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden, Dissertation an der Georg-August-Universität Göttingen, Geowissenschaftliches Zentrum, Betreuung von Prof. S. Siegesmund.
18. Widhalm C., Tschegg E.K., Eppensteiner W., (1996), Anisotropic Thermal Expansion Causes Deformation of Marble Claddings, ASCE Journal of performance of Constructed Facilities, Vol.10, No.1, 1996, pp 5-10.
19. Miller R., McIntire P., (1987), Nondestructive Testing Handbook, Acoustic Emission Testing Volume 5, American Society for Nondestructive Testing.
20. Reinsch D., (1991),Natursteinkunde, Ferdinand Enke, Stuttgart.
21. Vallen Systeme GmbH, (2008), Schallemissionsprüfung Grundlagen-Gerätetechnik-Anwendung, <http://www.vallen.de>.
22. Moshhammer B., Leuprecht M., (2005), Zur Stratigraphie, Fazies und Geochemie des Schwarzenemarmors, Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, Band 145 Heft 1 S. 79–106, Wien.
23. Widhalm C., Tschegg E.K., Eppensteiner W., (1997), Acoustic Emission and Anisotropic Expansion when Heating Marble, ASCE Journal of performance of Constructed Facilities, Vol.11, No.1, 1997, pp 35-40.

24. Schouenborg B., Grell B., Brundin J.A., Alnaes L., (2000), Bowtest for cladding panels of marble, Nordtest-project 1443-99, SP Report 2000:28, Borås.
25. Tschegg E., (2009), Forschungsantrag –Umwelteinflüsse auf die Schädigung und Zerstörung des Gefüges an Gesteinen.
26. Herndler S., (2004), Schallemissionsmessung zur temperaturabhängigen Schädigung von Marmor, Projektarbeit, TU Wien.
27. Wikipedia, www.wikipedia.at,(2011).
28. Kieslinger A., (1934), Gesteinskundliche Untersuchungen an alten Grabsteinen, Geologie und Bauwesen 6, 1-21.
29. Ehrenfried K., (2003), Skript zur Vorlesung Strömungsakustik, TU Berlin.
30. Natursteindatenbank, www.naturstein-datenbank.de, (2011).
31. Wolters J., (1989), Anwendung der Schallemissions-Meßtechnik zum Beschreiben von Versagensmechanismen in partikelgefüllten Thermoplasten, VDI-Verlag, Düsseldorf.
32. Borghamns Natursten AB, www.borghamnsten.se, (2011).
33. Athenian Marble Ltd., www.thassosmarble.com, (2011).
34. Finlandia Hall Ltd., www.finlandiatalo.fi, (2011).
35. Centre expéremintal de recherches et d'études du BTP, www.gingergroupe.com, (2011).
36. Köhler W., (1990), Das französische Figurenrondell im Park Sanssouci, Fraunhofer-Informationszentrum, Stuttgart.
37. Presse- und Informationsdienst der Stadt Wien, www.wien.gv.at, (2011).

Abbildungen ohne Verweis: eigene Abbildungen (Katharina Umlaub).