



## Exposei; $\frac{1}{2}$ Masterprojekt:

Acoustic Emission zur Zustandsüberwachung von  
menschlichen Gelenken und mechanischen Strukturen

Florian Mayerle &  
Tim Dedekind  
Technische Hochschule Ulm  
Fakultät Mechatronik und Medizintechnik  
Albert-Einstein-Allee 55  
89081 Ulm

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Michael Kaufeld

6. November 2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Motivation</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Einsatzmöglichkeiten von Acoustic Emission Testing</b>	<b>2</b>
2.1	Angewandte akustische Prozessüberwachung in der Medizin . . . . .	3
2.2	Zustandsüberwachung in der Medizin . . . . .	4
2.3	Auswerten und Clustern von Daten . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Zielsetzung des Masterprojekts</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Initiale Arbeitsschritte</b>	<b>6</b>
4.1	Schwerpunkte Literaturrecherche: . . . . .	7
4.2	Beschreibung von Test 1, (Bohren von Knochen) . . . . .	7
4.3	Beschreibung von Test 2 (Fräsen von Zähnen) . . . . .	8
4.4	Beschreibung von Test 3, Schallemission am Kniegelenk . . . . .	8

# Abbildungsverzeichnis

1	Intellidrill . . . . .	3
2	SMARTdrill6.0 . . . . .	3
3	Bonedias . . . . .	4
4	SensorToolchain . . . . .	5
5	Knochen Bohren . . . . .	8

---

# 1 Einführung und Motivation

Mechanische und biologische Strukturen geben bei einer Veränderung, wie z.B. einer Dehnung oder einem Bruch messbare Schallsignale ab. Ebenso ist es möglich durch die Aufnahme der Signale über einen längeren Zeitraum hinweg eine Veränderung der Signalcharakteristik zu erkennen. Grund dafür ist beispielsweise der Verschleiß der mechanischen Struktur und somit eine Veränderung der Oberfläche.

Im medizinischen Bereich werden häufig mehrere kommerziell verfügbarer nicht-invasive Techniken wie Röntgen, Ultraschall und Magnetresonanztomografie (MRT) für die Grundlage einer Diagnoseerstellung genutzt. Ebenso wird diese Technik herangezogen, um Operateure während eines Eingriffs mit Informationen, wie der Position des Werkzeugs oder des Zustands des Implantats, zu versorgen. Zudem werden minimalinvasive Verfahren wie zum Beispiel die Arthroskopie durchgeführt, um einen direkten Einblick in den Körper zu erhalten.

Diese Techniken liefern visuelle Daten, die beispielsweise für die Beurteilung der inneren Gelenkstruktur herangezogen werden. Für die Aufnahme und Auswertung der Daten bedarf es jedoch einer speziellen Ausbildung sowie einem hohen Erfahrungsgrad für die Diagnoseerstellung. Zudem liefern diese Techniken meist nur eine statische Informationen über den aktuellen Zustand von Körper, Gerät oder Implantat. Weiterhin ist zu beachten, dass Punkte wie Zugänglichkeit und Behandlungskosten, speziell bei einer MRT-Untersuchung, als nachteilig gewertet werden. Eine kostengünstige nicht-invasive Detektionstechnik welche den Körperschall von Körper oder Gerät analysiert, könnte sowohl für Ärzte als auch für Patienten von großem Nutzen sein.[5]

Schlagwörter: acoustic emission (AE), structural health monitoring (SHM), Signalclustering, Burst-Analyse, Schallemission, Körperschall-Analyse, Vibroarthographie (VAG), VAG-Signale, joint acoustic emissions (JAEs), joint sounds.

## 2 Einsatzmöglichkeiten von Acoustic Emission Testing

Das Acoustic Emission Testing (AT) wird in der industriellen Anwendung in der Prozessüberwachung und ebenso zur Zustandsüberwachung eingesetzt.

In der Prozessüberwachung kann das AT dazu eingesetzt werden, um während eines Fertigungsverfahrens den Zustand des Halbzeugs oder des Werkzeugs zu überwachen. So nutzt die Firma Brankamp die akustischen Signale während eines Stempelvorgangs von Metallblechen, um Stempelbrüche oder Matrizenrisse zu detektieren[2]. Ebenso kann das Messprinzip angewendet werden, um während einer zerspanenden Fräs- und Drehbearbeitung Abnutzung, Rissbildung und Abplatzung am Werkzeug zu erkennen [4].

Das AT wird ebenso zur Überwachung von vielerlei Zuständen, über einen längeren Einsatzzeitraum hinweg, eingesetzt. In der Bauindustrie wird über die Veränderung der akustischen Emission eines Bauwerks das Risswachstum in Brücken und Staudämme überwacht. Ebenso können Leckagen und Gasverluste an Ventilen über akustische Emission nachgewiesen werden. [4] Diese Art der Zustandsüberwachung wird auch als Structural Health Monitoring (SHM) bezeichnet.

Von diesen industriellen Anwendungen werden im nächsten Abschnitt abgeleitete, medizinische Anwendungen, welche den aktuellen Stand der Technik repräsentieren, aufgeführt.

## 2.1 Angewandte akustische Prozessüberwachung in der Medizin

In der heutigen Medizintechnikbranche gibt es einige technische Entwicklungen, die das Prinzip der Analyse von akustischen Emissionen nutzen, für die aktuell Patente oder sogar bereits realisierte Geräte mit gültiger Marktzulassung existieren. In dem Exposee „Intelli-Drill - Bohren und Messen in einem Schritt“ wird das Konzept einer medizinischen Bohrmaschine vorgestellt, welche mithilfe einer Körperschallmessung die Bohrtiefe ermittelt. Aus der zugehörigen Patentschrift geht hervor, dass die Länge des Bohrkanals mithilfe von drei Sensoren (Axialkraft-, Bohreindringtiefen- und Körperschallmessung) und einem integrierten Computer errechnet wird. [1] Abbildung 1 zeigt das beim Bohren entstehende akustische Profil, worin die Struktur des zerspanten Knochens, über die Unterschiede in Amplitude und Frequenz, zu deuten ist.

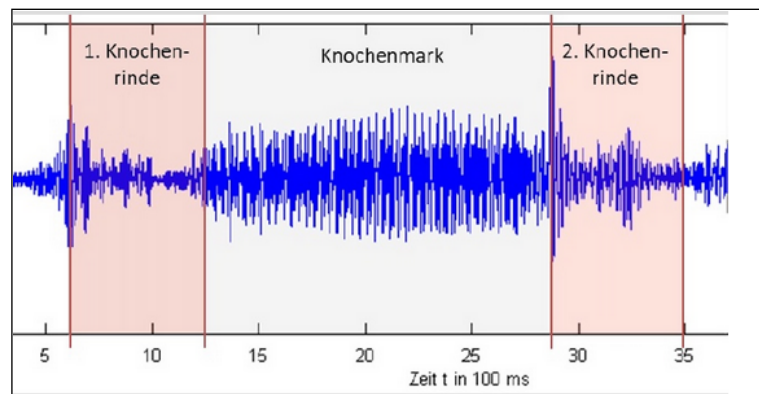


Abbildung 1: Intellidrill - Bohren und messen in einem Schritt (entnommen aus [6])

Ein ähnliches, schon auf dem Markt erhältliches, Produkt „SMARTdrill6.0“ wurde von der Smart Medical Devices INC. entwickelt. Dieses Bohrgerät liefert neben der Tiefenkontrolle und -messung auch ein Performancefeedback und sendet die Daten über eine drahtlose Kommunikation an ein Tablet, welches die problemlose Überwachung oder Justierung der Bohr-Parameter ermöglicht. [7]



Abbildung 2: SMARTdrill6.0 - Intelligenter Bohrer mit Überwachungscomputer (entnommen aus [7])

Ebenso hat die Firma McGinley Orthopaedic Innovations eine Freigabe von der FDA für das entwickelte „IntelliSense“ System bekommen. Dabei handelt es sich um ein, mit dem „SMARTdrill6.0“ vergleichbares, Werkzeug zum Bohren von Knochen.

Die vorangegangenen technischen Beispiele zeigen, dass die Anwendung von AE in medizintechnischen Geräten ein hoch innovatives Feld ist, in welchem immer noch viel geforscht wird um Prozesse durch gezielte Überwachung noch effektiver ausführen zu können.

### 2.2 Zustandsüberwachung in der Medizin

In der Medizin wird die Schallemissionsanalyse nicht nur zur Prozessüberwachung, sondern auch zur Zustandsüberwachung eines menschlichen Bewegungsapparats genutzt. Die praktische Anwendung wird in einem von der Firma Bonedias 2019 vorgestellten Produkt (Abbildung 3) deutlich. über die Messung der Schallemission währen einer definierten Bewegung, wie zum Beispiel einer Kniebeuge, erkennt dieses Gerät ein Schallmuster, welches von dem eines gesunden Gelenks abweicht. Im Abgleich mit MRT-Aufnahmen wird eine Übereinstimmung der Befunde beider Technologien von 95% erreicht, womit die Funktionalität dieses Geräts bewiesen wird. Bei den 5% falsch positiv klassifizierten Befunden wird sogar davon ausgegangen, dass die Messung der Schallemission sensativer als die herkömmliche MRT-Diagnostik ist und die Daten genutzt werden können, um vorbeugende Therapien zu ermöglichen. [9]



Abbildung 3: Bonedias - Aufnahmegerät mit Tonabnehmer der Firma Bonedias aus Greifenstein (entnommen aus [9])

Die Idee Körperschall oder bioakustische Signale zu nutzen, um den Zustand von Gelenken im menschlichen Körper zu überwachen wurde bereits 1987 von Gerald F. McCoy et al. erforscht. Dieser untersuchte normale, sowohl als auch symptomatische Gelenke und konnte daraufhin mehrere symptomatische Signaltypen von drei normalen Signaltypen unterscheiden. Er erkannte, dass AE-Testing ein enormes Potenzial als diagnostisches Hilfsmittel bei Erkrankungen des Knies besitzt und baute auf die fortschreitende Entwicklung der Computertechnik, um akkuratere Diagnosetools realisieren zu können. [8]

## 2.3 Auswerten und Clustern von Daten

Das aufgenommene akustische Signal alleine liefern noch keine Information über einen Zustand oder einen Prozess am menschlichen Körper. Dazu müssen die Signale erst nachbearbeitet und analysiert werden. Diese Informationen liefert nicht nur die Amplitude, sondern vor allem das Frequenz und Leistungsspektrum. Zur Untersuchung kann das Signal nun "händisch" ausgewertet werden, in dem man eine Fourier- oder Wavelet Transformation durchführt und Unterschiede im Frequenzspektrum der Signale erkennt. Eine andere Möglichkeit bietet die Verwendung eines Algorithmus zur automatischen Datenclusterung.

Als Cluster wird eine Sammlung von einander ähnlichen Objekten bezeichnet. Außerhalb des Cluster befinden sich alle unähnlichen Objekte. Die Bewertung der Ähnlichkeit erfolgt mit mathematischen Funktionen welche mithilfe verschiedenen Algorithmen berechnet werden. Das Ergebnis der Clusterung lässt sich anschließend automatisch oder manuell bewerten woraufhin der Clusterprozess auf Basis dieser Bewertung spezifisch angepasst werden kann. Zweck der Datenclusterung ist, eine Datenmengen in möglichst unterschiedliche und aussagekräftige Cluster zu unterteilen. So zum Beispiel könnten Signalbereiche der Bohrprozesse am Knochen den verschiedenen Knochenstrukturen oder Ereignissen (Bruch der Schneide, Durchbruch des Bohrkanals) zugeordnet werden. Die Cluster können dann einzeln untersucht, oder mehrere Cluster miteinander verglichen werden. Dies vereinfacht die Analyse von sehr großen Datenmengen. Durch Clusteranalysen ist es auch möglich natürliche Gruppen in den analysierten Daten zu finden. Dadurch lässt sich Wissen über die natürliche Struktur und die spezifischen Eigenschaften der Daten gewinnen. [3], [10] Die in den späteren Versuchen gesammelten Daten sollen mithilfe von Clusteranalysen untersucht werden. Zur Clusterung wird das Signal in Bursts, also kürzere, zeitlich begrenzte Signale, unterteilt, die dann nach Merkmalen wie Peak Frequenz oder Burstanzahl pro Zeit geclustert werden können.

## 3 Zielsetzung des Masterprojekts

Hauptziel des Masterprojekts ist es, die in Abbildung 4 dargestellte Sensor-Toolchain zur Erfassung und Clusterung von akustischen Signalen in der industriellen Anwendung drauf hin zu überprüfen, ob diese ebenso für die Anwendung im medizinischen Bereich geeignet ist. Die Toolchain besteht aus der iNDTact-Messsoftware für die Datenaufnahme und Datenauswertung, einem DAQ-Tool (Messchassi NI cDAQ-9188 und Analogwandler NI 9223 von National Instruments), einer Verstärkerbox und dem eigentlichen iNDTact iMPact XS piezoelektrischen Sensor.



Abbildung 4: SensorToolchain - Software, Daq-Tool, Verstärker-Box und Sensor

Idee oder Hypothese ist, dass diese Toolchain sich möglicherweise sehr gut (vergleich-

---

bar) oder gegebenenfalls besser, als bisher eingesetzte Systeme, zum AE-Testing in der Medizintechnik eignet. Diese Hypothese basiert auf folgenden Aspekten:

- **Multifunktionale Mess- und Analysesoftware:** Mit dieser Software ist, in Kombination mit dem Analogwandler, ein Abtasten des Sensors mit einer Rate von bis zu 1MHz möglich. Dadurch können Signale bis hin zu einem Frequenzbereich von 0.5MHz analysiert werden. zudem bietet die Software umfangreiche Analyse und Cluster Möglichkeiten.
- **Präzise Verstärker-Box:** Mit der Verstärker-Box können sehr schwache Signale, mit bis zu 60dB, hoch verstärkt werden, dies ermöglicht die Aufnahme von minimalen akustischen Emissionen am Körper bei der Bewegung von Gelenken. Ebenso kann über das einstellen einer geringen Verstärkung von -40dB sehr hohe akustische Emissionen erfasst werden, welche zum beispieles beim Bohren von Knochen entstehen.

Diese Hypothese wird mit Hilfe einer umfangreichen Literaturrecherche überprüft. Der Fokus dabei liegt darin den Stand der Technik, im Hinblick auf verwendete Sensoren, erfasster Frequenzbereich, Verarbeitung und Filterung der Signale sowie verwendete Analysetools und Quantifizierungsparameter, zu erfassen. Da der Einsatz von AE-Testing im medizinischen Bereich ein breites Feld ist, fokussieren wir uns bei der Literaturrecherche auf das Gebiet der Prozessüberwachung (Bohren, Fräsen, Schaben von Knochen oder Zähnen). Es soll lediglich ein Überblick auf Themen aus der Zustandsüberwachung gegeben werden

Im praktischen Teil soll, über die im nächsten Kapitel beschriebenen Tests, die Einsatzmöglichkeit der Toolchain im medizinischen Bereich erprobt werden. Der Fokus dabei liegt ebenfalls auf dem Gebiet der Prozessüberwachung. Mit dieser Arbeit soll ein Basiswissen geschaffen werden und mögliche Forschungsziele erörtert werden um dann im darauf Folgenden Projekt gezielt an einer Fragestellung arbeiten zu können. Folgend die Ziele noch einmal in wenigen Worten zusammengefasst.

- Aufbau von Wissenshintergrund und technischem Rahmen für weitere Forschung.
- Für welche medizinischen Anwendungen kann die Toolchain verwendet werden?
- Gibt es Vorteile im Vergleich der Toolchain zum Stand der Technik?
- Identifizieren von möglichen Forschungsschwerpunkten basierend auf offenen Fragen nach auf den Stand der Technik.

## 4 Initiale Arbeitsschritte

Die Initialen Arbeitsschritte beinhalten eine umfangreiche Literaturrecherche zum Thema AE-Testing in der medizinischen Prozessüberwachung, sowie erste praktische Tests.

Das Ziel der Tests ist es, zu untersuchen, ob sich der IndTact Impact XS Sensor zur Benutzung im medizinischen Process Monitoring eignet. Dazu wird untersucht, ob sich beim Bohren in Zähnen und Knochen Unterschiede zwischen verschiedenen Knochen- und Zahnschichten erkennen lassen. Anschließend erfolgt ein Test, der die verschiedenen Applikationsmöglichkeiten untersucht, um festzustellen, ob es hier Unterschiede zwischen

den aufgenommenen Signalen gibt. Der vierte Test liefert noch einen Ausblick über eine mögliche Nutzung des Sensors im medizinischen Condition Monitoring. Hier wird mit ersten Tests untersucht, ob sich generell über Acoustic Emission Messungen mit dem IndTact Sensor ein Signal vom menschlichen Körper aufnehmen lässt, welches sich als sogenannter Biomarker eignet.

1. **Test:** Durchbohren von Knochen zur Clusterung des Knochenmaterials
2. **Test:** Fräsen von Zähnen zur Clusterung des Zahnmaterials
3. **Test:** Selbstversuch, Aufnahme von Biosignalen am Knie

## 4.1 Schwerpunkte Literaturrecherche:

Die Literaturrecherche wird auf den Bereich der Prozessüberwachung in der Medizintechnik beschränkt. Folgende Informationen sind von Interesse:

- Prozessparameter (Drehzahl, Druck, .... )
- Quantifizierungsparameter (RMSE, Mean, ...)
- Signalverarbeitung und Filter
- Frequenzbereich
- Sensortypen (MEMS, piezoelektrisch, Kondensator, ...)
- Signalauswertungstools und Algorithmen

## 4.2 Beschreibung von Test 1, (Bohren von Knochen)

Im ersten Versuch sollen Bohrungen an tierischen Knochen durchgeführt werden. In Abbildung 1 werden die unterschiedlichen Knochenschichten (Spongiosa und Kortikalis) dargestellt. Die beim Zerspanen der verschiedenen Schichten entstehenden unterschiedlichen akustischen Emissionen sollen dabei aufgenommen und geclustert werden. Ziel ist es für die verschiedenen Strukturen und Knochendichten akustische Muster zu erkennen um bei der Bearbeitung von Knochen Rückschlüsse auf Bohrtiefe und Materialzusammensetzung schließen zu können. Ebenso soll untersucht werden, wie sich das Signal verändert, wenn der Knochenbohrer aus der Bohrung austritt oder während des Bohrens auf einen Hohlraum trifft. Der akustische Sensor wird, anders als in der Abbildung 1 skizziert in direktem Kontakt mit dem Knochen appliziert. Um den Einfluss der Anpresskraft des Bohrwerkzeugs auf das akustische Signal zu ermitteln wird in die Bearbeitungsplattform eine Kraftmessplatte integriert, deren aufgenommene Daten später mit den Acoustic Emission Daten abgeglichen werden.



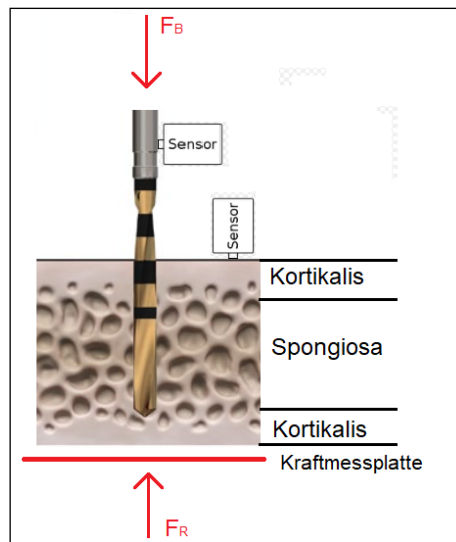


Abbildung 5: Knochen Bohren - Testaufbau (entnommen aus [11, S. 6])

### 4.3 Beschreibung von Test 2 (Fräsen von Zähnen)

Im zweiten Versuch sollen Fräsungen an menschlichen Zähnen durchgeführt werden. Die beim Zerspanen der verschiedenen Schichten entstehenden unterschiedlichen akustischen Emissionen sollen dabei aufgenommen und geclostert werden. Ziel ist es für die verschiedenen Strukturen akustische Muster zu erkennen, um bei der Bearbeitung von Zähnen auf die unterschiedliche Materialzusammensetzung schließen zu können. Ebenso soll untersucht werden, wie sich das Signal verändert, wenn der Fräser von einer Zahnschubstanz auf die andere wechselt.

Der akustische Sensor wird entweder in direktem Kontakt mit dem Zahn oder mit indirektem Kontakt zum Zahn an dem Gehäuse des Bearbeitungswerkzeugs appliziert. Um den Einfluss der Anpresskraft des Fräswerkzeugs auf das akustische Signal zu ermitteln wird in die Bearbeitungsplattform eine Kraftmessplatte integriert. Die Daten der Kraftmessplatte werden zur Versuchsauswertung mit den Acoustic Emission Daten verglichen, um den Störfaktor der Anpresskraft zu berücksichtigen.

### 4.4 Beschreibung von Test 3, Schallemission am Kniegelenk

Im Selbstversuch soll zunächst überprüft werden, ob und in welcher Qualität mit dem vorhandenen iNDTact Messequipment akustische Signale in verschiedenen Bewegungsszenarien vom menschlichen Bewegungsapparat erfasst werden können. Ebenso soll untersucht werden, ob das aufgenommene Signal über eine Clusterung der spezifischen Bewegung zugeordnet werden kann. Weiterhin könnten, bekannte defekte am Bewegungsapparat genutzt werden, um beispielsweise zu untersuchen ob sich die akustische Emission, eines defekten Gelenks (Knie/Finger) im Vergleich zum gesunden gegenüberliegenden Gelenk, unterscheidet.

## Literatur

- [1] F. Axel, S. Dirk, G. Gert, S. Michael, und S. Rüdiger. Un388\_patentschrift: Patentschrift, 26.08.2011.

- [2] Brankamp. (ProcessMonitoring: Stanzen, Prägen, Ziehen, Lochen), o.D. URL [http://www.brankamp.com/de/data/files/stanzen/prospekt\\_pw\\_de.pdf](http://www.brankamp.com/de/data/files/stanzen/prospekt_pw_de.pdf). (zuletzt abgerufen am: 03.05.2020).
- [3] Can Önder. Clustering: Hauptseminar machine learnig, 15.01.2004.
- [4] DGZfP-Fachausschuss. Kompendium Schallemissionsprüfung Acoustic Emission Testing (AT), 2018. URL <http://www.dgzfp.de/Portals/24/PDFs/FA/KompendiumAT.pdf>. (zuletzt abgerufen am: 03.05.2020).
- [5] G.-H. Feng und W.-M. Chen. Piezoelectric-film-based acoustic emission sensor array with thermoactuator for monitoring knee joint conditions. *Sensors and Actuators A: Physical*, 246:180–191, 2016. ISSN 09244247. doi: 10.1016/j.sna.2016.05.025.
- [6] I. GmbH. (Bild: Intelli-Drill - Bohren und Messen in einem Schritt), o.D. URL [https://www.innowi.de/de/unsere\\_patente/details/intelli-drill---knochenbohrer-un388](https://www.innowi.de/de/unsere_patente/details/intelli-drill---knochenbohrer-un388). (zuletzt abgerufen am: 21.04.2020).
- [7] S. M. D. INC. SMARTdrill 6.0, o.D. URL <https://www.https://smartmeddevices.com/smartdrill-6-0/>. (zuletzt abgerufen am: 21.09.2020).
- [8] G. F. McCoy, J. D. McCrea, Beverland, W. G. Kernohan, und R. A. Mollan. Vibration arthrography as a diagnostic aid in diseases of the knee. a preliminary report. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 69-B(2):288–293, 1987. doi: 10.1302/0301-620X.69B2.3818762.
- [9] B. Oppermann. Ein geschädigtes gelenk klinkt anders. *Medizin und Technik*, (02): 16–17, 2019.
- [10] Philip Plöhn. Kategorisierung von indizes zur clustervalidierung, 2014.
- [11] D. Sirona. (Bild:Bohrprotokoll spong. Knochen), o.D. URL [https://www.dentsplysirona.com/content/dam/dentsply/pim/de\\_DE/Implants/Implant\\_systems/Astra\\_Tech\\_Implant\\_System/Surgical/Astra%20Tech%20Implant%20System%20-%20Chirurgiehandbuch.pdf](https://www.dentsplysirona.com/content/dam/dentsply/pim/de_DE/Implants/Implant_systems/Astra_Tech_Implant_System/Surgical/Astra%20Tech%20Implant%20System%20-%20Chirurgiehandbuch.pdf). (zuletzt abgerufen am: 21.04.2020).