

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Optimierung der Messkonfiguration elastischer Eigenschaften
der Methoden RUS (Resonance Ultrasound Spectroscopy) und
RBT (Resonant Beam Technique)

verfasst von | submitted by

Lorenz Rudolf Hofmann BEd

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Education (MEd)

Wien | Vienna, 2025

Studienkennzahl lt. Studienblatt | Degree
programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 199 520 523 02

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree
programme as it appears on the student
record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Unterrichtsfach
Mathematik Unterrichtsfach Physik

Betreut von | Supervisor:

Univ.-Prof. Mag. Dr. Herwig Peterlik

Zusammenfassung

In der Forschungsgruppe „Dynamik Kondensierter Systeme“ an der Universität Wien wird die Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS) schon seit mehreren Jahrzehnten verwendet, um die elastischen Eigenschaften kleiner Probenkörper zu bestimmen. Bei der bis dato verwendeten RUS-Apparatur haben sich Mängel im Bereich der Probenhalterung gezeigt, außerdem konnte bislang nur mit einem einzigen Paar integrierter Ultraschallwandler (Transducer) gemessen werden.

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es, einen Messaufbau für die Ultraschallresonanzspektroskopie zu entwerfen und herzustellen, bei dem Proben einfach und ohne diese zu beengen eingesetzt werden können und diese Position stabil gehalten werden kann. Darüber hinaus ist eine Anforderung an den Messaufbau, dass dieser mit Ultraschallwandlern verschiedener Größe kompatibel ist und in verschiedenen Lagen (horizontal und vertikal) verwendet werden kann. Dafür wird ein Design vorgestellt und getestet, das aus 3D gedruckten Teilen und Werkstücken aus Aluminium besteht.

In weiterer Folge sollten neu angeschaffte Ultraschallwandler für den Einsatz sowohl bei der Resonant Ultrasound Spectroscopy als auch bei der Resonant Beam Technique (RBT) in Bezug auf deren Signal-to-Noise-Ratio (SNR) getestet werden. Dies geschieht durch systematische RBT- und RUS-Messungen mit verschiedenen Kombinationen von Transducern und unter Einsatz unterschiedlicher Proben.

Eine dritte Forschungsfrage ist der Vergleich hängender und liegender Probenlagerung bei der RBT in Bezug auf deren Signal-to-Noise-Ratio und Messergebnisse.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen die Handhabung für RUS- und RBT-Messungen erleichtern, den gezielten Einsatz verschiedener Transducer ermöglichen und das Signal-Rausch-Verhältnis für RUS- und RBT-Messungen verbessern.

Abstract

In the Dynamics of Condensed Systems research group at the University of Vienna, resonant ultrasound spectroscopy (RUS) has been used for several decades to determine the elastic properties of small samples. The RUS-apparatus used to date has shown deficiencies in holding the samples and measurements could only be carried out with a single pair of integrated ultrasonic transducers.

The aim of this master's thesis is to design and produce a measurement setup for resonant ultrasound spectroscopy, in which samples can be inserted using little force and where the position of the sample can be kept stable. Another requirement for the measurement setup is that it is compatible with transducers of varying sizes and can be used in horizontal and vertical position. For this purpose, a concept consisting of 3D printed parts and workpieces made of aluminum was created and tested.

Subsequently, new ultrasonic transducers are tested for use in resonant ultrasound spectroscopy as well as in resonant beam technique (RBT) with regard to their signal-to-noise-ratio (SNR). This is done through systematic RBT and RUS testing with various combinations of transducers and different samples.

A third research question is the comparison of hanging and lying sample storage for RBT in terms of their signal-to-noise ratio and measurement results.

The results of this work should simplify the handling of RUS- and RBT-measurements, enable the use of different transducers and improve the signal-to-noise-ratio for RUS- and RBT-measurements.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Univ.-Prof. Mag. Dr. Herwig Peterlik bedanken, welcher mich im Rahmen dieser Arbeit betreut und unterstützt hat.

Ebenso gilt Mag. Dr. Stephan Puchegger meine Dankbarkeit. Er hat mich beim Umgang mit RUS und RBT und dem Design des neuen RUS Messaufbaus tatkräftig unterstützt.

Besonderen Dank möchte ich außerdem Martin Haßler, BSc MSc aussprechen, der eine effiziente Datenanalyse in Bezug auf SNR für mich erst möglich gemacht hat.

Dank gilt auch meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben, sowie meiner Familie und meinen Freunden, die mich in der Zeit meines Studiums auf vielfältige Weise unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Elastische Materialkonstanten: Der Elastizitätsmodul und die Poissonzahl	5
2.2	Grundlagen zur Resonant Ultrasound Spectroscopy	6
2.3	Grundlagen zur Resonant Beam Technique	8
2.4	Die Berechnung der Materialkonstanten bei der RUS und RBT	9
2.5	Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung elastischer Materialkennzahlen	11
2.6	Die Signal-to-Noise-Ratio	12
3	Beschreibung der Messmethode und Parameter der Messungen	13
3.1	Beschreibung des vorhandenen RUS-Aufbaus	13
3.2	Design, Herstellung und Beschreibung des neuen RUS-Aufbaus	14
3.3	Beschreibung des hängend-hängend-RBT-Aufbaus	17
3.4	Beschreibung des liegend-liegend-RBT-Aufbaus	18
3.5	Beschreibung des Aufbaus für die hängend-liegend-Messungen	19
3.6	Verwendete Messgeräte und Parameter der Messungen	20
3.7	Die Berechnung der Signal-to-Noise-Ratio (SNR)	21
3.8	Verwendete Transducer und deren Eigenschaften	22
3.9	Verwendete Proben	25
4	Messergebnisse und deren Interpretation	27
4.1	Vergleich der Ergebnisse aller Transducerkombinationen	27
4.2	Interpretation zum Vergleich aller Transducerkombinationen	33
4.3	RBT-liegend-liegend bei verschiedenen Auflagewinkeln	33
4.4	Interpretation zu RBT-liegend-liegend bei verschiedenen Auflagewinkeln .	35
4.5	altes und neues RBT-hängend-hängend	36
4.6	Interpretation zu altem und neuem RBT-hängend-hängend	39
4.7	RBT-hängend-liegend	39
4.8	Interpretation zur RBT-hängend-liegend	43
4.9	Interpretation zu den verschiedenen RBT Variationen im Vergleich	44
4.10	altes und neues RUS im Vergleich	45
4.11	Interpretation zu altem und neuem RUS im Vergleich	46
4.12	neues RUS vertikal	47
4.13	Interpretation zum neuen RUS vertikal	49
4.14	Vergleich der Auswertungen bezüglich E-Modul	50

Inhaltsverzeichnis

4.15 Interpretation zum Vergleich der Auswertungen bezüglich E-Modul	50
5 Fazit und Ausblick	53
Literaturverzeichnis	55
Anhang	59

1 Einleitung

Die Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS) hat große Bedeutung in der Materialforschung, insbesondere bei der Untersuchung von Phasenübergängen [27, S. 143-144] oder inneren Spannungen in Festkörpern und das auch bei anisotropen Materialien, Verbundmaterialien oder sehr kleinen Proben [32]. Die Fähigkeit, detaillierte Informationen über die mechanischen Eigenschaften zu liefern, führte zu neuen Erkenntnissen in verschiedenen wissenschaftlichen und industriellen Anwendungen. Zum Beispiel nutzen Wissenschaftler die RUS, um die mechanischen Eigenschaften von Supraleitern zu untersuchen, was zu einem besseren Verständnis ihrer Funktionsweise beiträgt [27, S. 142.].

Die Resonant Ultrasound Spectroscopy nutzt die Eigenfrequenzen eines Materials, um Rückschlüsse auf mechanische Kennzahlen wie den E-Modul oder die Poissonzahl zu ziehen. Die Grundidee besteht darin, ein Material durch akustische Wellen, ausgesendet durch einen elektrisch betriebenen Ultraschallwandler, in Schwingung zu versetzen. Diese akustischen Schwingungen werden durch das Probenmaterial zu einem weiteren Ultraschallwandler geleitet, der wieder ein elektrisches Signal erzeugt. Dieses Signal hat bei den Eigenfrequenzen des Probenkörpers besonders hohe Amplituden. Aus diesen Eigenfrequenzen können die elastischen Konstanten des Materials berechnet werden, wodurch RUS zu einem leistungsfähigen Werkzeug für die Materialwissenschaften und die physikalische Forschung wird [19].

Ein wesentlicher Vorteil der RUS ist ihre Nichtdestruktivität. Im Gegensatz zu anderen Methoden, bei denen Proben möglicherweise beschädigt oder verändert werden, ermöglicht RUS eine vollständige Charakterisierung, ohne das Material zu beeinträchtigen. Dies macht die Methode besonders wertvoll für die Untersuchung empfindlicher oder wertvoller Proben, wie sie in der Luft- und Raumfahrt [11] oder in der Halbleiterindustrie vorkommen [32], [21].

Die Resonant Beam Technique wurde von der Forschungsgruppe Dynamik Kondensierter Systeme weiterentwickelt, um die mechanischen Eigenschaften von Festkörpern bei Temperaturen von bis zu 2000 °C zu bestimmen, wodurch auch Phasenübergänge gut beobachtet werden können. Die Methode ist geeignet zur Untersuchung von anisotropen Materialien und sogar Verbundmaterialien [24, S. 119-123]. Zur Resonant Beam Technique gibt es aus der Forschungsgruppe Dynamik Kondensierter Systeme zahlreiche Veröffentlichungen unter anderem zur Bestimmung der Materialkonstanten stark anisotroper Proben wie Holz [31], besonders leichter und poröser Materialien [30] oder auch der Verbindung von RBT und RUS [29].

1 Einleitung

Die Forschungsaufgabe dieser Masterarbeit ist es, verschiedene neu angeschaffte Ultraschallwandler (auch Transducer genannt) mit der Resonant Beam Technique zu testen und Paare von Ultraschallwandlern mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise-Ratio) zu finden. Bei der Resonant Beam Technique sollten verschiedene Geometrien ausprobiert werden, damit ist gemeint, dass die Probe sowohl auf den Transducer gelegt (liegend) als auch in eine Schlaufe, die auf den Transducer geklebt wurde, gehängt (hängend) werden kann. Als dritte Option sollten diese beiden Lagen auch kombiniert werden. Es sollte zudem ein optimierter RUS-Messaufbau entworfen werden, bei dem die Probenhalterung im Vergleich zur bestehenden RUS-Apparatur verbessert wird und welcher optimalerweise auch als Ganzes vertikal verwendet werden kann. Außerdem sollte der Vergleich von altem und neuem RUS-Aufbau gezogen werden.

Kurz zusammengefasst sollte demnach die Messkonfiguration bei der Resonance Ultrasound Spectroscopy und der Resonant Beam Technique verbessert werden und somit die weitere Arbeit der Forschungsgruppe Dynamik Kondensierter Systeme unterstützt werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden mit der Resonant Beam Technique alle Kombinationen der vorhandenen Transducer durchgetestet und mit Python die Signal-to-Noise-Ratio ermittelt, um die besten Transducerkombinationen zu finden. Diese besten Transducerkombinationen werden mit verschiedenen Proben und in verschiedenen Lagen mittels RBT getestet.

Es wird ein neuer RUS-Messaufbau mit CAD entworfen, mittels 3D-Druck und aus Aluminium gefräst hergestellt und zusammengebaut. Anschließend werden Messungen mit dem neuen RUS und dem alten RUS mit verschiedenen Proben und Transducern angestellt, um die Vor- und Nachteile der verschiedenen Messaufbauten evaluieren zu können.

Im zweiten Kapitel dieser Masterarbeit wird auf die theoretischen Hintergründe, beginnend mit den Materialkennzahlen, die mit der RUS und RBT bestimmt werden, eingegangen. Es folgt eine Beschreibung der Resonant Ultrasound Spectroscopy und Resonant Beam Technique, sowie der Berechnung der Materialkennzahlen aus den Resonanzfrequenzen. Des Weiteren wird die Signal-to-Noise-Ratio als Maß für Signalqualität erläutert.

Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit dem Design des neuen RUS-Messaufbaus, und der Messanordnungen für die RBT, sowie mit der Beschreibung der Messgeräte und verwendeten Proben.

Im vierten Kapitel werden die Messergebnisse der RUS- und RBT-Messserien bezüglich der SNR behandelt. Dabei wird der neue RUS-Aufbau und die Verwendung der neuen Transducer unter Einsatz verschiedener Proben untersucht und interpretiert. Bei der RBT wird insbesondere auch auf den Einsatz verschiedener Lagen eingegangen.

Das Kapitel fünf beinhaltet ein Fazit und eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse. Abschließend sind ein Literaturverzeichnis und im Anhang zusätzliche Informationen zu finden.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die theoretischen Grundlagen, auf denen die Resonant Ultrasound Spectroscopy und die Resonant Beam Technique basieren, eingegangen.

2.1 Elastische Materialkonstanten: Der Elastizitätsmodul und die Poissonzahl

Das Ziel von RUS- und RBT-Messungen ist die Bestimmung von elastischen Materialkonstanten. Zwei solcher Kennzahlen sind der Elastizitätsmodul und die Poissonzahl, welche nachfolgend charakterisiert werden.

Der Elastizitätsmodul, auch E-Modul oder Youngsches Modul genannt, ist ein Maß für die Spannung, welche notwendig ist, um die Länge einer Probe mit Querschnittsfläche A zu verändern, wenn an einem Ende mit einer Kraft $\vec{F}$ gezogen wird. Für isotrope also in alle Richtungen gleiche Materialien gibt es einen E-Modul, für anisotrope Materialien gibt es in verschiedene Richtungen unterschiedliche E-Moduln.

Berechnet wird der E-Modul aus dem Verhältnis der mechanischen Spannung σ zur Dehnung ϵ , daher $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$. Die mechanische Spannung ist dabei die Kraft pro Fläche $\sigma = \frac{\vec{F}}{A}$ und die Dehnung wird beschrieben als Veränderung der Länge $L + \Delta L$ einer Probe im Vergleich zur Ausgangslänge L , demnach $\epsilon = \frac{L + \Delta L}{L}$. Die angesprochenen Größen werden in Abbildung 2.1 veranschaulicht [6, S. 171-172].

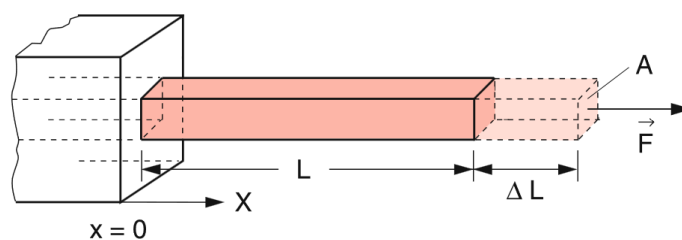


Abbildung 2.1: Skizze zum E-Modul aus [6, S. 171]

Der E-Modul von Keramiken und Metallen liegt üblicherweise im Bereich von Gigapascal (GPa). So hat zum Beispiel α -Eisen einen E-Modul von etwa 218 GPa, während Quarzglas einen E-Modul von etwa 76 GPa aufweist [13, S. 162].

2 Theoretische Grundlagen

Die zweite Materialkonstante, die in dieser Arbeit häufig verwendet wird, ist die Poissonzahl. Die Poissonzahl ν oder auch Querkontraktionszahl ist ein Maß für die Veränderung des Querschnitts eines Materials, wenn dieses an den Enden zusammengedrückt oder auseinander gezogen wird (siehe Abbildung 2.2). Genauer ist sie ein Maß für das Verhältnis der Querkontraktion $-\frac{(d+\Delta d)}{d}$ zur Dehnung ϵ des Materials, daher gilt:

$$\nu = \frac{-\frac{(d+\Delta d)}{d}}{\epsilon} \quad [6, \text{S. 172-173}].$$

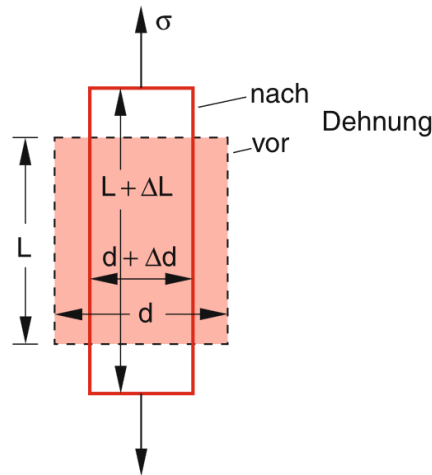


Abbildung 2.2: Skizze zur Poissonzahl aus [6, S. 173]

Um ein Material genau zu charakterisieren gibt es noch weitere Materialkennzahlen der Elastizität, wie den Kompressionsmodul B oder den Schubmodul G , wobei für isotrope Materialien von den vier Materialkonstanten E , ν , B und G jeweils nur zwei unabhängig voneinander sind. Das führt dazu, dass diese bei isotropen Proben direkt ineinander umgerechnet werden können. Die elastischen Eigenschaften isotroper Körper können daher gut durch einen E-Modul und eine Poissonzahl charakterisiert werden [13, S. 160-163].

2.2 Grundlagen zur Resonant Ultrasound Spectroscopy

Die Ursprünge der Materialanalyse mithilfe von Ultraschall, insbesondere der Resonant Ultrasound Spectroscopy (auch Ultraschallresonanzspektroskopie) liegen in der Geophysik der 1960er Jahre [35], [33]. Weiterentwickelt wurde die Technik durch Beiträge von Orson Anderson [23], Harold Demarest [26] und Albert Migliori, der auch Autor des Buches ist an dem sich das Kapitel 2 orientiert [27].

2.2 Grundlagen zur Resonant Ultrasound Spectroscopy

Eine schematische Darstellung eines RUS-Messaufbaus wird in Abbildung 2.3 gezeigt. Für eine RUS-Messung werden über ein Steuerungsprogramm auf einem PC Messparameter festgelegt, der mit einem Netzwerkanalysator verbunden ist. Sobald eine Messung gestartet wird, gibt der Netzwerkanalysator verschiedene Eingabefrequenzen in einem bestimmten Bereich an einen Ultraschall-Transducer weiter, der als Transmitter fungiert. Der Transducer wandelt das gegebene elektrische Signal in Ultraschall um. Dieser Ultraschall wird durch den Probenkörper geleitet und von einem weiteren Transducer, dem Receiver, wieder aufgenommen. Das Signal des Receivers wird vom Netzwerkanalysator verarbeitet. Der Netzwerkanalysator berechnet das Verhältnis der Amplitude des Ausgangssignals, das zum Transmitter geleitet wird, zur Amplitude des Eingangssignals vom Receiver (gain) und stellt dieses gegen die Frequenz des Signals dar. So entstehen die in Abbildung 2.3 dargestellten Kurven. Dabei wird jeweils die Frequenz auf der Abszisse und der gain auf der Ordinate aufgetragen. Mithilfe des PCs und eines geeigneten Auswertungsprogrammes (hier Resonance-Programm von Stephan Puchegger) können die Resonanzfrequenzen gefunden und aus diesen (gemeinsam mit Probenform, Maßen und Masse) die Materialkonstanten berechnet werden.

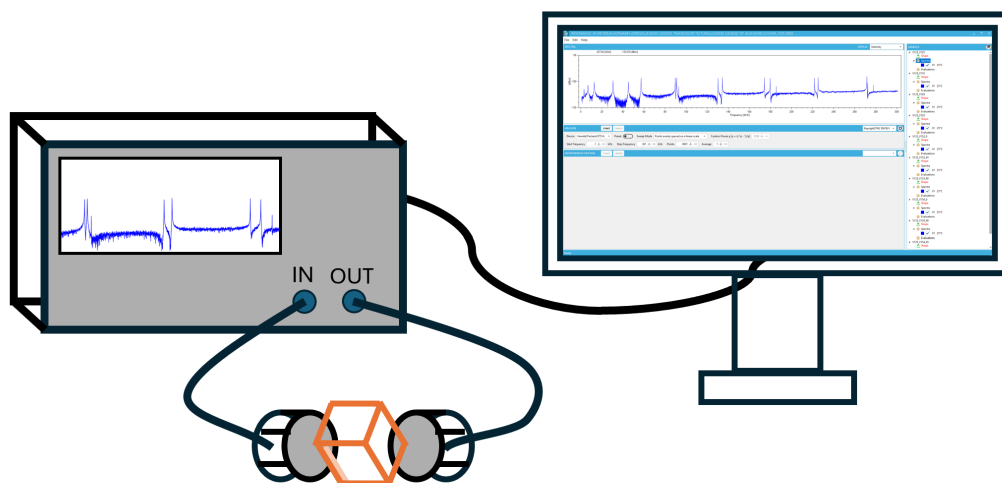


Abbildung 2.3: Skizze eines RUS-Messaufbaus

Für RUS-Messungen muss ein Material eine bestimmte Geometrie aufweisen, um die Berechnung der Materialkonstanten aus den Resonanzfrequenzen zu ermöglichen. Passende Geometrien für die Resonant Ultrasound Spectroscopy sind Würfel bzw. Parallelepipede im Allgemeinen, Kugeln und Zylinder, wobei auch Erweiterungen auf andere Geometrien wie zum Beispiel Hohlzylinder [7] möglich sind.

2.3 Grundlagen zur Resonant Beam Technique

Die Resonant Beam Technique ist eine Abwandlung der Resonant Ultrasound Spectroscopy, bei der längliche Proben zwischen den Transducern eingehängt werden. Entwickelt wurde die Resonant Beam Technique in den 1930er Jahren. Frühe Publikationen dazu stammen von Goens [10] und Förster [8].

Abbildung 2.4 zeigt die schematische Darstellung eines Messaufbaus für die RBT mit Ausnahme des PCs. Der Messaufbau für die RBT ähnelt dem Messaufbau für die RUS, welcher in Abbildung 2.3 dargestellt wird mit Ausnahme von Probenbefestigung und Probenform. Anstatt die Probe direkt zwischen den Transducern zu positionieren, werden längliche Proben in Schlaufen aus Aluminiumoxid- oder Carbonfasern eingehängt, die an den Transducern befestigt sind. Die Probe hängt daher bei der Messung in der Luft. Bei der RBT werden Proben verwendet, welche die Form eines länglichen Quaders oder Zylinders haben, wobei die x-Ausdehnung (siehe Abbildung 2.4) mehr als 5 mal größer ist als Ausdehnung in y- und z-Richtung [31].

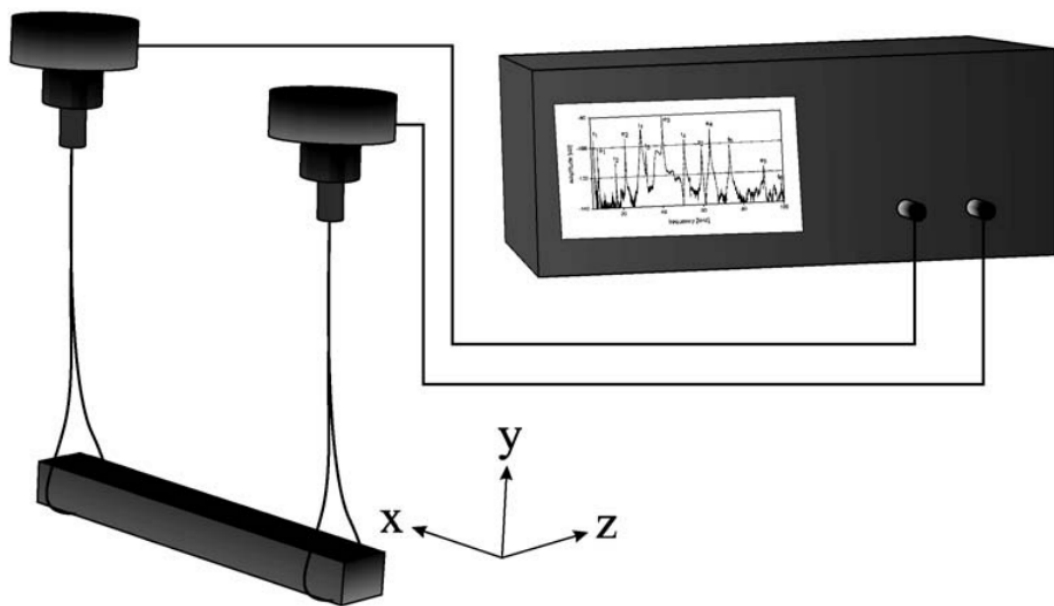


Abbildung 2.4: Skizze eines RBT-Messaufbaus aus [31]

Der wesentliche Vorteil der RBT im Vergleich zur RUS ist die Anwendung zur Bestimmung von Hochtemperatureigenschaften. Dafür wird die Probe in einen Ofen hängen gelassen, sodass sich diese vollständig im Ofen befindet, die temperaturempfindlichen Transducer allerdings außerhalb bleiben. Mit dieser Technik können zum Beispiel die Übergänge von Festkörperphasen in Metallen und deren Legierungen und die mechanischen Hochtemperatureigenschaften von Keramiken untersucht werden [24].

2.4 Die Berechnung der Materialkonstanten bei der RUS und RBT

Die erste physikalische und mathematische Theorie zu den Schwingungen elastischer Festkörper stammt aus dem 18. Jahrhundert. Sie wurde von Euler entwickelt und von Daniel Bernoulli verbessert. Timoshenko überarbeitete zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts die Theorie von Euler und Bernoulli mit Korrekturfaktoren zur Scherdeformation und Rotationsträgheit [34].

Die physikalische Grundlage der Materialanalyse mittels Ultraschall sind freie elastische Schwingungen von Festkörpern. Frei bedeutet hier, dass die Probe in keine Richtung räumlich beeinträchtigt wird und ungehindert schwingen kann. Elastisch bedeutet nicht dauerhaft verformend, daher sind Ultraschallresonanzmessungen nichtdestruktiv.

Ausgangspunkt für die Berechnung der Materialkonstanten bei Ultraschallresonanzmessungen sind Resonanzfrequenzen. Diese Resonanzfrequenzen sind Eigenfrequenzen, also die Frequenzen, mit der ein System schwingt, wenn man es auslenkt und sich selbst überlässt. Ein klassisches Problem der Mechanik ist es, zu einem Schwinger mit gegebenen Massen und elastischen Eigenschaften die Eigenfrequenzen zu finden. Die bei Ultraschallresonanzmessungen benötigte Berechnung ist so betrachtet ein Umkehrproblem.

Eine wichtige Grundlage der Berechnung elastischer Konstanten ist das verallgemeinerte Hooke'sche Gesetz. Dieses verbindet den Spannungstensor σ_{ij} mit dem Dehnungstensor ϵ_{kl} , wobei beide Tensoren $3 \cdot 3 = 9$ Einträge besitzen. Das allgemeine Hooke'sche Gesetz lautet:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 c_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.1)$$

Das Bindeglied zwischen Spannung und Dehnung ist nicht wie im eindimensionalen Fall eine Elastizitätskonstante, sondern der Elastizitätstensor c_{ijkl} mit $3^4 = 81$ Komponenten. Der Elastizitätstensor ist stark symmetrisch. Für vollständig anisotrope Materialien sind daher nur 21 der Komponenten dieser Matrix unabhängig, bei isotropen Materialien sind es lediglich zwei unabhängige Elastizitätskonstanten, daher können die elastischen Eigenschaften isotroper Materialien durch E-Modul und Poissonzahl vollständig charakterisiert werden. Der Elastizitätstensor beschreibt in der linearen Elastizitätstheorie die elastischen Eigenschaften eines Festkörpers, aus ihm lassen sich im Allgemeinen die richtungsabhängigen E-Moduln und Poissonzahlen einer Probe ermitteln.

2 Theoretische Grundlagen

Im Folgenden wird zunächst dargelegt, wie zu einem gegebenen Elastizitätstensor Eigenfrequenzen gefunden werden können. Für RUS und RBT wird dieser Prozess umgekehrt. Um eine einigermaßen übersichtliche Darstellung zu ermöglichen, wird der Probenkörper als ungedämpfter dreidimensionaler Oszillator mit linearem Elastizitätstensor angenommen. Allgemeine Lösungen für spezifische Geometrien können bei Migliori und Sarrao nachgelesen werden [27, S.35-51].

Für die Berechnung der Eigenfrequenz eines harmonischen Oszillators wird üblicherweise der Lagrange-Operator L verwendet.

$$L = \int_V (E_{kin} - E_{pot}) dV \quad (2.2)$$

In diesen Lagrange-Operator fließen die kinetische Energie E_{kin} und die potentielle Energie E_{pot} ein. Der Lagrange-Operator nimmt genau im Fall einer Eigenfrequenz einen konstanten Wert an. Das Finden konstanter Werte von L entspricht dem Finden von Nullstellen in der ersten Ableitung des Lagrange Operators.

Setzt man in diesen Lagrange-Operator Terme für die kinetische und potentielle Energie eines dreidimensionalen elastischen Festkörpers mit Volumen V , Dichte ρ und linearem Elastizitätstensor c_{ijkl} ein, so lässt sich folgende Ableitung finden:

$$\delta L = \int_V \left(\sum_i \left[\rho \omega^2 u_i + \sum_{j,k,l} c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} \right] \right) dV - \int_S \left(\sum_i \left[\sum_{j,k,l} \vec{n}_j c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right] \delta u_i \right) dS \quad (2.3)$$

In dieser Gleichung bezeichnet u_i , $i \in \{1, 2, 3\}$ eine Komponente des Auslenkungsvektors in eine der drei Raumrichtungen x_i und ω die Kreisfrequenz des angenommenen harmonischen Oszillators.

Der Term in der ersten eckigen Klammer in Gleichung 2.3 ist dabei genau die Wellengleichung $\rho \omega^2 u_i + \sum_{j,k,l} c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} = 0$, während der Term in der zweiten eckigen Klammer $\sum_{j,k,l} \vec{n}_j c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} = 0$ die Nebenbedingung des freien Schwingers repräsentiert.

Mithilfe der Rayleigh-Ritz Methode, bei der u_i als Linearkombination von λ Basisfunktionen Φ_λ approximiert wird $u_i = \sum_\lambda a_{i\lambda} \Phi_\lambda$, kann die Gleichung 2.3 numerisch minimiert werden, was dem Finden von Eigenfrequenzen, also Resonanzfrequenzen entspricht.

Bei der RUS und der RBT ist man allerdings mit dem umgekehrten Problem konfrontiert. Die Eigenfrequenzen ω sind bereits bekannt, gesucht ist der Elastizitätstensor c_{ijkl} . Dafür wird mit einem geratenen Elastizitätstensor begonnen, es wird in weiterer Folge ein iterativer Prozess genutzt, um einen Elastizitätstensor zu finden, der optimal zu den gegebenen Resonanzfrequenzen passt. Aus den Einträgen des Elastizitätstensors können anschließend die Materialkennzahlen ermittelt werden [27, S.35-40], [26], [36].

2.5 Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung elastischer Materialkennzahlen

In diesem Unterkapitel werden Alternativen zur Bestimmung von Materialkonstanten mithilfe von Ultraschallresonanz vorgestellt.

Mechanische Prüfmethoden

Methoden der zerstörenden Werkstoffprüfung wie Zug-, Druck- oder Biegeversuche haben gemein, dass sie die Probe einer Belastung aussetzen und die entsprechenden Verformungen gemessen werden [20], [5], [15]. Der E-Modul kann bei diesen Techniken insbesondere bei Zug- und Druckversuchen aus dem Verhältnis von Spannung und Dehnung direkt berechnet werden, der Rechenaufwand ist daher im Vergleich zu den Ultraschallresonanzmethoden geringer. Nachteil dieser Methoden ist, dass die Probe selbst mechanischen Belastungen ausgesetzt wird, was zu einer Veränderung oder Zerstörung der Probe durch den Versuch führen kann, was insbesondere bei schwer zu beschaffenden oder sehr teuren Proben unvorteilhaft ist [20].

Puls-Echo-Ultraschallmessungen

Im Gegensatz zu Ultraschall-Resonanzmessungen wie RUS und RBT gibt es auch Puls-Echo-Ultraschallmessungen. Bei Puls-Echo-Ultraschallmessungen wird ein kurzer Ultraschall-Puls mit hoher Intensität in die Probe geschickt und das Echo des Signals analysiert. Dabei gibt es verschiedene Vorgehensweisen, wie man aus der Überlagerung von Pulsen bzw. aus der Überlappung von Puls und Echo ausreichende Informationen gewinnt, um die Materialkonstanten berechnen zu können [21, S.96-107]. Puls-Echo-Ultraschallmessungen haben Anwendungen im medizinischen Bereich [18], aber auch bei der Materialanalyse, etwa zum nondestruktiven Untersuchen von Rotorblättern aus Windkraftanlagen [17].

Mikro- und Nanoindentation

Bei der Mikro- und Nanoindentation wird eine Diamantspitze mit vorgegebener Kraft auf die Probe gedrückt. Aus der Rückstellkraft und Eindringtiefe wird eine Eindringkurve erstellt. Aus dieser kann der E-Modul und die Vickers-Härte der Probe bestimmt werden [22], [25], [28]. Indentationsmethoden werden vor allem für Untersuchungen im mikroskopischen und nanoskopischen Bereich verwendet, etwa für die mechanische Prüfung von Beschichtungen [1], Mineralien oder metallischen Proben [28], [37].

Vergleich der Messmethoden

Jede der beschriebenen Messmethoden hat eigene Anwendungsbereiche und bietet besondere Vor- und Nachteile. Puls-Echo-Messungen sind nur bei größeren Proben exakt, während die RUS auf kleine Proben beschränkt ist. Die Mikro- und Nanoindentation liefern nur Informationen für oberflächennahe Bereiche und werden eher für mikroskopische Proben verwendet. Mechanische Prüfverfahren sind auf verschiedenste Materialien anwendbar, führen aber oft zur Veränderung oder Zerstörung der Probe.

RUS und RBT sind damit nur zwei von vielen Methoden zur Messung der elastischen Eigenschaften von Festkörpern. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie kleine Proben mit bestimmter Form genau und zerstörungsfrei untersuchen können und decken so eine Nische im Bereich der Messung elastischer Eigenschaften ab.

2.6 Die Signal-to-Noise-Ratio

Die Signal-to-Noise-Ratio (SNR), zu deutsch auch Signal-Rausch-Verhältnis, ist ein Maß dafür, wie sehr sich ein Nutzsignal (Signal) vom Hintergrund (Noise) unterscheidet. Dafür wird das Verhältnis der Leistung des Nutzsignals (P_S) zur Hintergrundleistung (P_N) gebildet. Es gilt daher:

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (2.4)$$

In dieser Arbeit wird die Signal-to-Noise-Ratio in Dezibel angegeben, in diesem Fall gilt demnach:

$$SNR(dB) = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_S}{P_N} [16] \quad (2.5)$$

Die Messdaten, welche aus dem Resonance Programm exportiert wurden, enthielten bereits den „Gain“ in Dezibel, also das Verhältnis der Ausgangsleistung des Netzwerkanalysators zur mit dem Receiver-Transducer aufgenommenen Eingangsleistung [12]. Dieser Gain wurde mit einer Hintergrundfunktion angepasst, um $P_N(dB)$ zu ermitteln. Durch Subtrahieren des Hintergrunds vom Gain wurde ebenso $P_S(dB)$ ermittelt.

Die Berechnung der Signal-to-Noise-Ratio verkürzte sich damit zu:

$$SNR(dB) = P_S(dB) - P_N(dB) \quad (2.6)$$

Es gibt verschiedene Variationen der Signal-to-Noise-Ratio. Üblicherweise wird unter dem Begriff SNR die mittlere Signal-to-Noise-Ratio verstanden, also das Verhältnis der durchschnittlichen Signalleistung zur durchschnittlichen Hintergrundleistung. Darüber hinaus wird allerdings auch die Peak-Signal-to-Noise-Ratio (PSNR) verwendet, also das Verhältnis des Maximums der Signalleistung zur durchschnittlichen Hintergrundleistung [16].

Die Vorgehensweise zur konkreten Berechnung der SNR kann in Kapitel 3.7 nachgelesen werden, die verwendeten Python-Skripte befinden sich im Anhang.

3 Beschreibung der Messmethode und Parameter der Messungen

In diesem Kapitel werden die verwendeten Messaufbauten, Messparameter, Transducer, Proben und Programme beschrieben.

3.1 Beschreibung des vorhandenen RUS-Aufbaus

Abbildung 3.1 zeigt ein Foto des bereits vorhandenen RUS-Aufbaus.

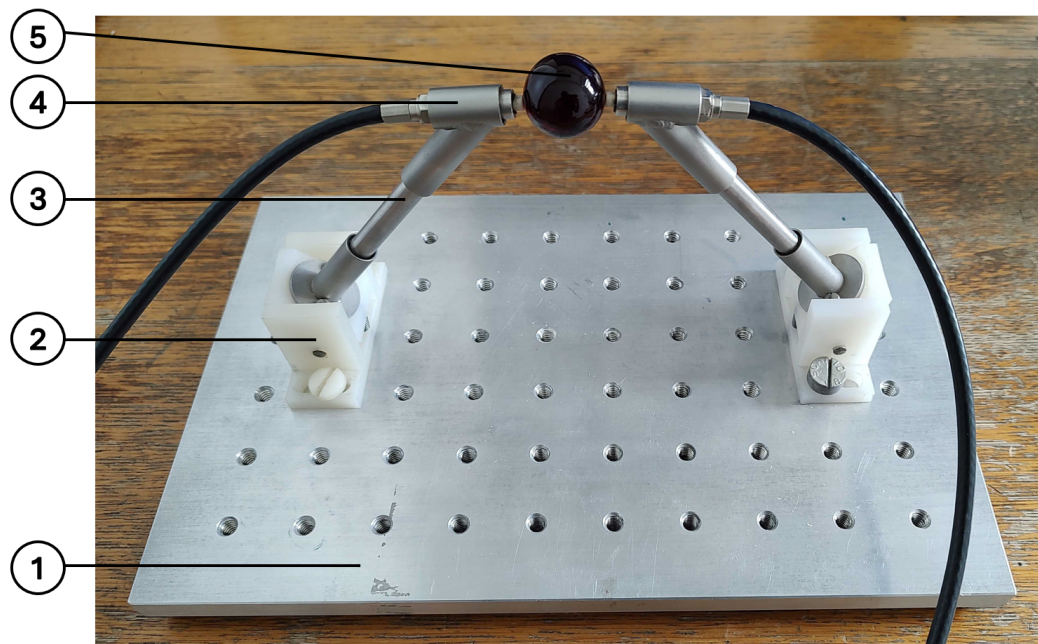


Abbildung 3.1: Foto des vorhandenen RUS-Aufbaus

Dieser Aufbau ist schon seit längerer Zeit (seit ungefähr 1999 bis 2003) im Besitz der Forschungsgruppe Dynamik Kondensierter Systeme. In persönlicher Kommunikation mit Professor Mag. Dr. Herwig Peterlik, dem Leiter der Forschungsgruppe, konnte herausgefunden werden, dass der Aufbau nach Empfehlung von Albert Migliori bestellt wurde und vermutlich von den Los Alamos National Laboratories (Los Alamos, NM, USA)

3 Beschreibung der Messmethode und Parameter der Messungen

hergestellt wurde. Hersteller oder technische Details konnten leider nicht in Erfahrung gebracht werden, jedoch wurden Hinweise auf einen sehr ähnlichen Aufbau in anderen Arbeiten gefunden, siehe [4].

Der Aufbau aus Abbildung 3.1 besteht aus einer Aluminiumplatte ①, auf die Scharniere aus Kunststoff montiert wurden ②. Auf diesen Scharnieren sind federgelagerte Aluminiumteile ③ montiert, welche die Transducer ④ in Position halten. Das Einbringen von Proben ⑤ funktioniert durch das Aufklappen der Scharniere. Die Schwierigkeit im Umgang mit diesem Messaufbau besteht darin, die Probe so einzubringen, dass sie während der gesamten Messung ihre Position stabil hält. Das Einbringen selbst ist eine Herausforderung, denn es müssen gleichzeitig beide Scharniere und die Probe in eine passende Position gebracht werden. Insbesondere bei kugelförmigen Proben besteht die Gefahr, dass die Probe während der Messung aus dem Messaufbau herausfällt. Darüber hinaus kann nur mit den integrierten Transducern gemessen werden.

3.2 Design, Herstellung und Beschreibung des neuen RUS-Aufbaus

Aufgrund der beschriebenen Mängel des bestehenden Aufbaus wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuer Aufbau hergestellt, der die Probleme in der Probenhalterung umgehen und das Arbeiten mit verschiedenen Transducern ermöglichen sollte, eine Fotografie dieses Aufbaus ist in Abbildung 3.2 zu sehen.

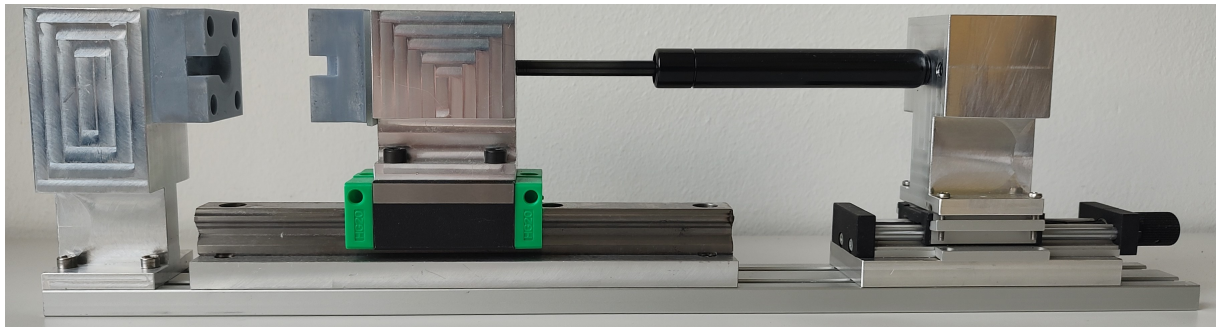


Abbildung 3.2: Foto des neuen RUS-Aufbaus von vorne

3.2 Design, Herstellung und Beschreibung des neuen RUS-Aufbaus

Die Komponenten des neuen RUS-Aufbaus werden in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt und in der Folge näher erläutert.

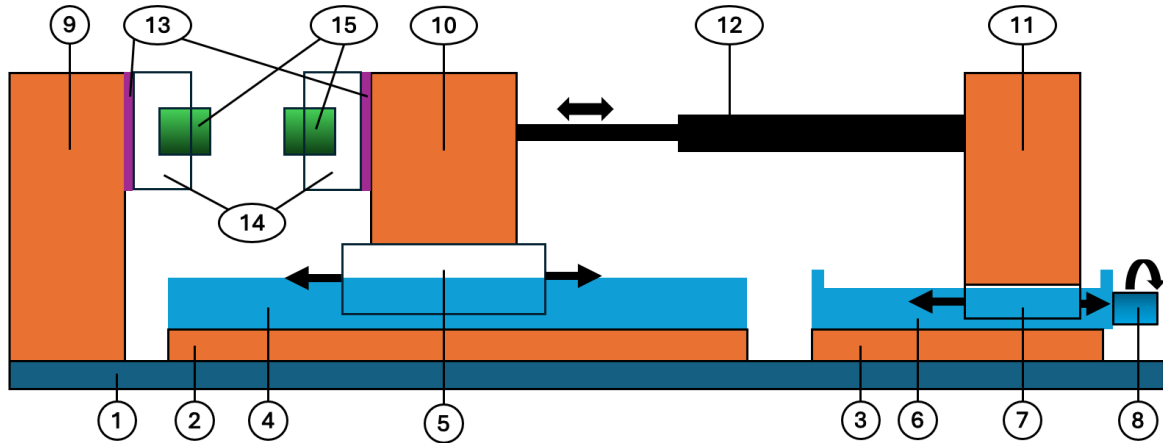


Abbildung 3.3: Skizze des neuen RUS-Aufbaus von vorne

Als Basis für den Aufbau wurde eine Profilschiene aus Aluminium ① mit einer Breite von 40 mm und zwei parallelen Vertiefungen für die Befestigung mithilfe von Profilsteinchen verwendet. Auf dieser Schiene wurden zwei aus Aluminium gefertigte Platten ② und ③ zur Befestigung von Linearschienen montiert. Außerdem wurde, wie links in Abbildung 3.3 zu sehen ist, auch eine Halterung für den Transducer Einsatz ⑨ auf der Profilschiene montiert.

Um den Abstand zwischen den Transducern ⑮ modellieren zu können, wurden Linearführungen ④ und ⑥ mit Schlitten ⑤ und ⑦ verwendet. Eine Verstellschraube ⑧ ermöglicht es den Abstand zwischen den beiden Transducern präzise anzupassen. Das System ⑥, ⑦ und ⑧ ist eine Lineareinheit von Rose und Krieger, die dem Verstellen des Messaufbaus dient, während das System ④ und ⑤ eine HGH20CA Linearschiene mit HG20 Schlitten ist und ausschließlich eine haltende Funktion hat.

Das Bauteil ⑫ ist eine Gasdruckfeder aus Stahl mit einem Hub von 60 mm und einer Nennkraft von 20 Newton. Die Gasdruckfeder soll bewerkstelligen, dass der Druck, der von den beiden Transducern auf die Probe ausgeübt wird, möglichst gering ist und somit die Voraussetzung eines freien Schwingers für die Probe möglichst gut gewahrt bleibt. Es ist durch die Gasdruckfeder nicht möglich, die Proben mit hohem Druck einzusetzen.

Die Teile ⑨, ⑩ und ⑪ des Versuchsaufbaus wurden aus Aluminium gefertigt und dienen zum Fixieren der Gasdruckfeder ⑫ und der Transducer-Halterungen ⑭. Die Transducer-Halterungen ⑭ wurden mithilfe von 3D-Druck aus Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) hergestellt. Um die akustische Kopplung über die Apparatur,

3 Beschreibung der Messmethode und Parameter der Messungen

die zu Störungen und Fehlern in der Messung führen kann, zu vermindern, wurde eine 2 mm dicke Silikonfolie (13) zwischen den Transducer-Halterung und dem Aluminiumteil eingebracht. Außerdem wurde die Transducer-Halterung mit Nygonschrauben montiert. Die zylindrischen Transducer (15) können in die Halterungen durch Stecken angebracht werden. Da der Messaufbau mit zylindrischen Transducern mit verschiedenem Durchmessern kompatibel sein soll, wurden mehrere Transducer-Halterungen (14) mit verschiedenen Ausschnitten für die Transducer hergestellt, diese können mithilfe eines Schraubenziehers durch Entfernen der Nygonschrauben gewechselt werden.

Abbildung 3.4 zeigt die Apparatur von schräg oben, dadurch werden insbesondere die Vertiefungen für die Transducer und die Linearführungen besser sichtbar gemacht werden.

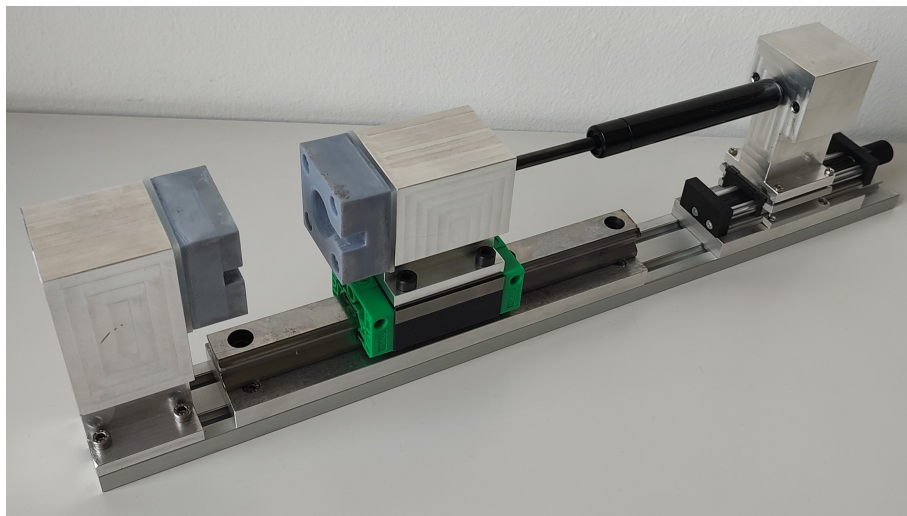


Abbildung 3.4: Foto des neuen RUS-Aufbaus von schräg oben

3.5 Beschreibung des Aufbaus für die hängend-liegend-Messungen

Es wurde auch eine Kombination aus liegendem und hängendem Messaufbau bei den RBT-Messungen verwendet, diese wird in Abbildung 3.7 dargestellt. Dabei wurden dieselben Komponenten wie im hängend-hängend-Messaufbau (Siehe Kapitel 3.3) und liegend-liegend-Messaufbau (Siehe Kapitel 3.4) verwendet.



Abbildung 3.7: Foto des hängend-liegend-RBT-Setups

3.6 Verwendete Messgeräte und Parameter der Messungen

Für die Messungen wurde ein Netzwerkanalysator des Typs Hewlett Packard 8751A verwendet, dieser kann in Frequenzen zwischen 5 Hz und 500 MHz anregen. Um die Messung zu steuern, wurde über einen PC das Programm Resonance von Mag. Dr. Stephan Puchegger verwendet. Ein Screenshot aus dem Programm mit Daten von Messungen mit dem alten RUS-Aufbau ist in Abbildung 3.8 zu sehen.

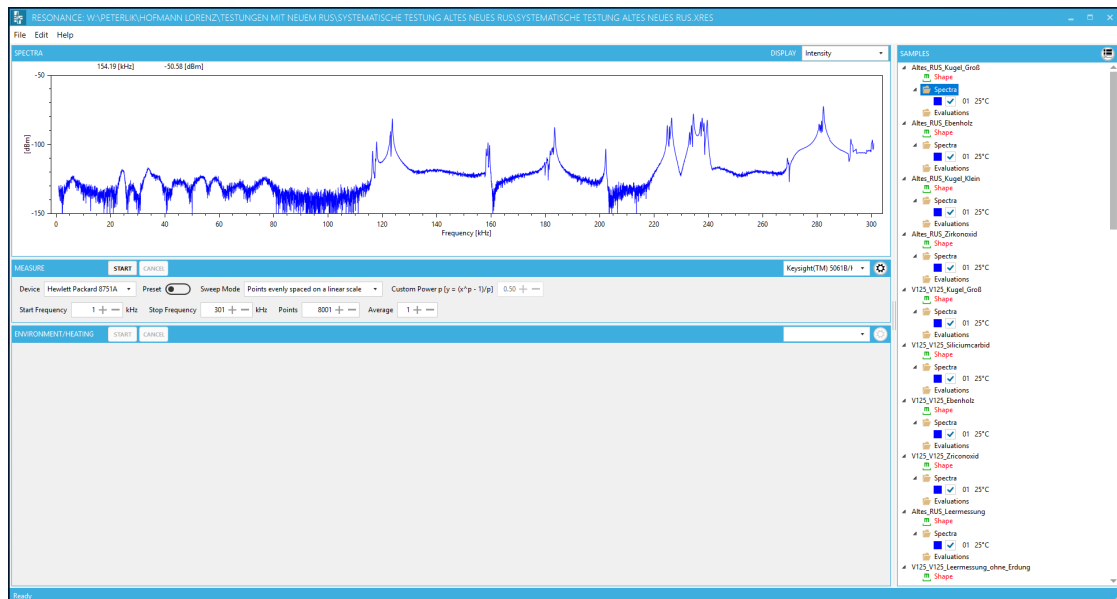


Abbildung 3.8: Screenshot des Mess-Programmes

Das Resonance Programm kann Frequenzspektren aufzeichnen, wobei für jeden Messpunkt die Anregfrequenz des Netzwerkanalysators in Kilohertz [kHz], das Verhältnis von Eingangsleistung zu Ausgangsleistung (Gain) in Dezibel Milliwatt [dBm] und die Phase des Eingangsstroms am Netzwerkanalysator aufgezeichnet wurden.

Über die Peakfrequenzen kann mit diesem Programm unter Berücksichtigung von Form, Masse und Maße der Probe, der E-Modul und die Poissonzahl der Probe berechnet werden. Da das Interesse bei den meisten der hier durchgeführten Messungen aber auf der Qualität des Signals selbst, also der Signal-to-Noise-Ratio lag, wurden die aufgenommenen Frequenzspektren exportiert und in Python weiter verarbeitet.

Im Resonance-Programm wurden folgende Einstellungen für alle Messungen verwendet.

- Es wurde ein Frequenzbereich von 1 kHz bis 301 kHz analysiert. Dies ist nach Erfahrung der Forschenden im Fachbereich Dynamik Kondensierter Systeme ein für viele Proben passender Wert. Passend ist der Wert in der Hinsicht, dass für die

3.7 Die Berechnung der Signal-to-Noise-Ratio (SNR)

Berechnung der E-Moduln und anderer Materialeigenschaften mit dem Resonance Programm die ersten sechs Frequenzpeaks ausreichend sind, diese werden bei vielen Proben mit diesem Frequenzbereich abgedeckt.

- Der Abstand der Datenpunkte auf der Frequenzskala wurde gleichbleibend auf einer linearen Skala gewählt.
- Es wurde mit 8001 Datenpunkten pro Messung gearbeitet. Das hat den Hintergrund, dass in einem Scandurchlauf des Netzwerkanalysators 801 Datenpunkte aufgezeichnet werden können. Bei Pre-Messungen wurden auch niedrigere und größere Datenpunktdichten ausprobiert. Niedrigere Datenpunktdichten wurden ausgeschlossen, da dabei die Peaks nicht immer getroffen wurden, das Spektrum daher nicht reproduzierbar und die Peak-Signal-to-Noise-Ratio nicht zuverlässig berechnet werden konnten. Höhere Datenpunktdichten hätten zu längeren Messzeiten und größeren Datenmengen geführt.
- Auf die Mittelwertbildung zwischen mehreren Messdurchläufen wurde verzichtet, da sich die Messung sehr gut reproduzieren ließ, sofern keine Veränderung der Hintergrundgeräusche vorhanden war.

Darüber hinaus wurden diese weiteren Vorkehrungen getroffen, um möglichst zuverlässige Messwerte zu erhalten:

- Um Einflüsse durch die unterschiedliche Lage der Proben zu vermeiden (vor allem für RBT-hängend relevant), wurden diese jeweils waagrecht (möglichst nicht angewinkelt) eingebracht. Es wurde darauf geachtet, dass die RBT-Proben möglichst am Rand in Kontakt mit der Schlaufe/dem Transducer kamen und die RUS-Proben möglichst symmetrisch an den Ecken zwischen den Transducern fixiert wurden.
- Um eine Störung der Messungen durch den Autor dieser Masterarbeit zu vermeiden, hielt sich dieser während der Messung am anderen Ende des Laborraums auf.

3.7 Die Berechnung der Signal-to-Noise-Ratio (SNR)

Die Berechnung der SNR wurde in einem ersten Anlauf über ein selbst geschriebenes Python-Skript bewerkstelligt. Die Funktionsweise des Skripts war folgende: Die Daten wurden eingelesen und graphisch dargestellt. Anschließend wurden händische Eingaben getroffen, welcher Frequenzbereich betrachtet wird und wie viele Peaks vorhanden sind. Folgende Schritte wurden für die Anzahl der Peaks wiederholt: Es wurde das Maximum des Gains gesucht und rund um den Maximalwert eine vordefinierte Anzahl an Datenpunkten aus dem Spektrum ausgeschnitten. Zur Kontrolle wurde das Spektrum, dem jetzt die Peaks fehlen sollten, noch einmal graphisch dargestellt. Der Hintergrund wurde bestimmt, indem über alle verbleibenden Gain-Werte gemittelt wurde. Aus der Differenz des Gain-Wertes des größten Peaks zum Hintergrundwert konnte die Peak-Signal-to-Noise-Ratio berechnet werden.

3 Beschreibung der Messmethode und Parameter der Messungen

Diese Vorgehensweise hatte mehrere Nachteile. Der erste Nachteil ist, dass Peaks deren Gain niedriger ist als der Hintergrund an einer anderen Stelle nicht gefunden werden können. Der zweite Nachteil ist, dass hier immer nur ein konstanter Hintergrund abgezogen werden kann, dies war aber nur für manche der Spektren eine gute Näherung, bei einigen Spektren stieg der Hintergrund mit steigender Frequenz an. Darüber hinaus ist diese Methode langsam, da für jede Bestimmung der SNR händisch Werte gesetzt werden müssen.

Daher wurde mit freundlicher Unterstützung von Martin Haßler ein weiteres Python Skript erstellt, bei dem diese Schwachstellen umgangen wurden. In diesem Skript wurden die Daten eingelesen und über lmfit eine Hintergrundfunktion angepasst. Als Fitfunktion wurde eine Funktion der Form $f(x) = a \cdot x^b + c \cdot \log(x) + d$ mit den Parametern a, b, c und d verwendet. Der Abszisse ist dabei die Frequenz, während die Ordinate der Gain ist. Diese Funktion wurde gewählt, da manche der Spektren einen Hintergrund in Form einer Polynomfunktion, andere in Form eines logarithmischen Anstiegs hatten. Um dieselbe Funktion für alle Spektren verwenden zu können, wurde diese Funktion gewählt. Die Peaks wurden für die Berechnung des Hintergrundes nicht ausgeschlossen, da nur sehr wenige Datenpunkte den Peaks zugehörig sind und diese den berechneten Hintergrund nur nach oben und damit hin zu einer niedrigeren SNR verfälschen. Die ermittelte Hintergrundfunktion wurde abgezogen. Der größte Wert nach Abzug des Hintergrunds repräsentiert die PSNR. Um die mittlere Signal-to-Noise-Ratio zu berechnen, wurde ein Cutoff-Wert von 5 dB eingeführt. Werte die sich mehr als den Cutoffwert über dem Hintergrund befinden wurden als Peakwerte angenommen. Über diese Peakwerte wurde gemittelt, um die mittlere SNR zu bekommen. Das Skript wurde so geschrieben, dass nacheinander alle Spektren in einem Ordner eingelesen und alle SNR-Werte in einer Ausgabedatei zusammengefasst wurden. Die Python-Skripte in beiden Versionen befinden sich im Anhang, ebenso wie die ermittelten SNR-Werte für die einzelnen Messungen.

3.8 Verwendete Transducer und deren Eigenschaften

Die zu testenden neuen Transducer wurden von Olympus, einem japanischen Produzenten von optischen und elektronischen Geräten, produziert und unter der Marke Panametrics Ultrasonic Transducers vermarktet. Die übliche Verwendung der angeführten Kontakt-Transducer liegt zum Beispiel in der Fehleranalyse und Messung der Dicke von Materialien sowie dem Auffinden und der Vermessung von Delaminationen. Darüber hinaus wird auch die Materialcharakterisierung und die Messung von Schallgeschwindigkeiten als Anwendung angeführt. Es wird eine Verwendung bei Temperaturen bis 50°C empfohlen, als Vorteile dieser Transducer wird die hohe mechanische Widerstandsfähigkeit und die akustische Impedanz in der Größenordnung vieler Metalle hervorgehoben. Alle in Tabelle 3.1 angeführten Transducer waren in Paaren vorhanden. Die Form der Transducer war jeweils zylindrisch, wobei zwischen Innen- und Außendurchmesser unterschieden wird. Der Außendurchmesser bezieht sich auf den Durchmesser des Gehäuses des Transducers, während sich der Innendurchmesser auf die schwingende Platte bezieht,

3.8 *Verwendete Transducer und deren Eigenschaften*

die mit der Probe in Kontakt kommt. Es wurden Longitudinal- und Transversalschwinger verwendet. In der Spalte optimale Frequenz wird jene Frequenz angegeben, bei der der Transducer laut Herstellerangaben optimal schwingt. Der Zusatz-RM in der Bezeichnung der Transducer steht für Right Angle Microdot und damit für den Typ des Anschlusses für die Kabelverbindung. Da sich dieser Zusatz auf alle verwendeten Transducer bezieht und somit kein Unterscheidungsmerkmal der verwendeten Transducer untereinander ist, wird er im weiteren Verlauf dieser Arbeit weggelassen [3].

Die bereits vorhandenen Transducer, die im Folgenden mit dem Kürzel Alt versehen wurden, wurden von Physik Instrumente (PI) GmbH hergestellt und haben den Typ P-840.10 [9].

3 Beschreibung der Messmethode und Parameter der Messungen

Bezeichnung	Modus	optimale Frequenz [MHz]	Innendurchmesser [mm]	Außendurchmesser [mm]	Höhe [mm]
V103-RM	longitudinal	1	12,70	17,78	16,00
V110-RM	longitudinal	5	6,35	8,89	10,67
V125-RM	longitudinal	2,25	9,53	13,46	12,70
V153-RM	transversal	1	12,70	17,78	16,00
V154-RM	transversal	2,25	12,70	17,78	16,00
V183-RM	longitudinal	3,5	6,35	8,89	10,67

Tabelle 3.1: Verwendete Transducer und deren Daten

3.9 Verwendete Proben

Abbildung 3.9 zeigt ein Foto aller verwendeter Proben auf einem Stück Schaumstoff.

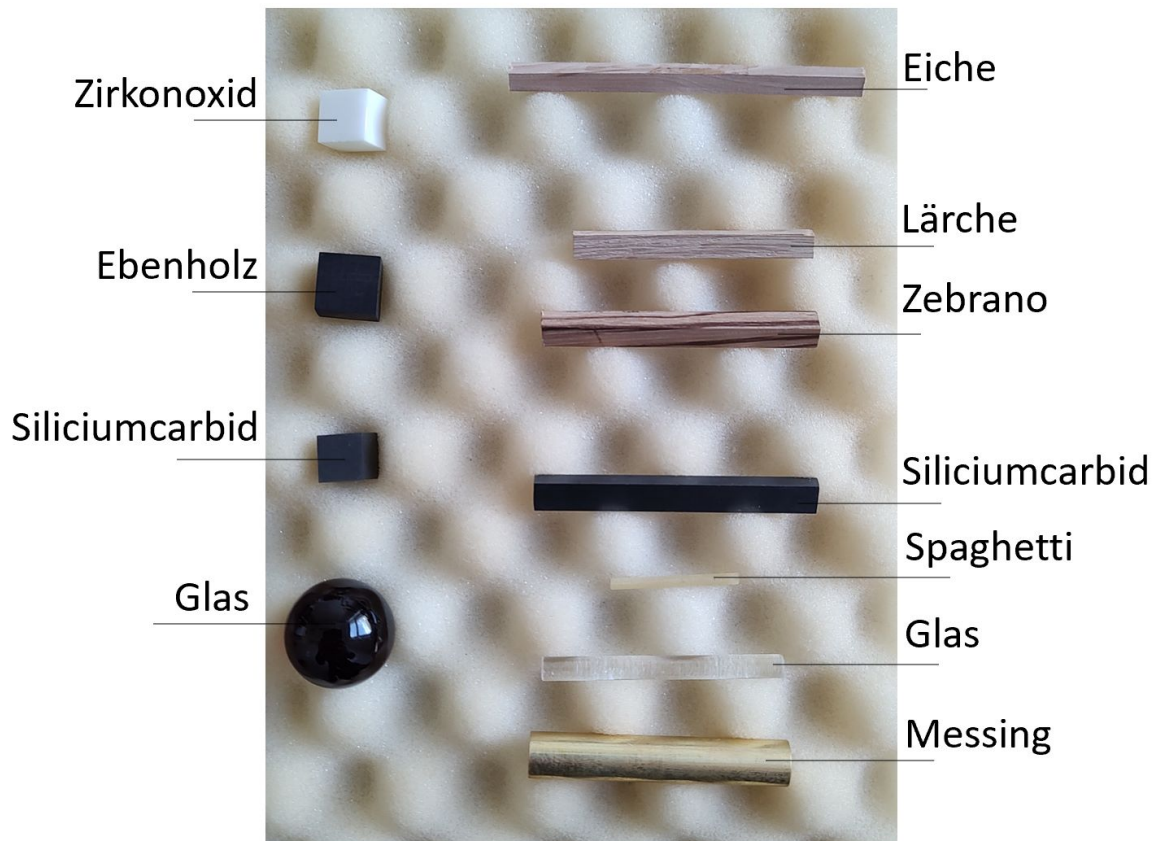


Abbildung 3.9: Foto der gemessenen Proben

Die Form, Maße und Masse der in Abbildung 3.9 dargestellten Proben sind in Tabelle 3.2 angeführt. Bei der Auswahl der Proben wurde darauf geachtet, Proben aus unterschiedlichem Materialien mit verschiedenen Formen zu verwenden, um Messungen unter möglichst unterschiedlichen Bedingungen zu testen.

3 Beschreibung der Messmethode und Parameter der Messungen

Material	Form	Länge [mm]	Breite oder Radius [mm]	Höhe [mm]	Masse [g]
Siliciumcarbid	Balken	$59,89 \pm 0,05$	$6,90 \pm 0,03$	$3,43 \pm 0,03$	$4,4597 \pm 0,0010$
Zebrano	Balken	$58,45 \pm 0,08$	$5,25 \pm 0,05$	$5,63 \pm 0,20$	$1,3311 \pm 0,0010$
Lärche	Balken	$75,15 \pm 0,08$	$5,25 \pm 0,08$	$4,23 \pm 0,10$	$1,3824 \pm 0,0010$
Eiche	Balken	$50,82 \pm 0,08$	$4,68 \pm 0,03$	$5,13 \pm 0,12$	$0,7779 \pm 0,0010$
Spaghetti	Balken	$27,23 \pm 0,10$	$2,04 \pm 0,04$	$2,02 \pm 0,04$	$0,1490 \pm 0,0010$
Zirkonoxid	Würfel	$11,53 \pm 0,05$	$10,99 \pm 0,03$	$8,55 \pm 0,04$	$6,7961 \pm 0,0010$
Siliciumcarbid	Würfel	$9,92 \pm 0,02$	$9,88 \pm 0,02$	$9,91 \pm 0,04$	$3,0274 \pm 0,0010$
Ebenholz	Würfel	$12,64 \pm 0,02$	$12,38 \pm 0,02$	$10,55 \pm 0,03$	$1,9588 \pm 0,0010$
Messing	Zylinder	$54,10 \pm 0,03$	$9,34 \pm 0,08$	-	$31,4434 \pm 0,0010$
Glas	Zylinder	$50,81 \pm 0,03$	$4,99 \pm 0,03$	-	$2,2245 \pm 0,0010$
Glas	Kugel	-	$22,30 \pm 0,13$	-	$15,2857 \pm 0,0010$

Tabelle 3.2: Verwendete Proben und deren Daten

4 Messergebnisse und deren Interpretation

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse mit RUS und RBT bezüglich SNR, E-Modul und Poissonzahl behandelt und interpretiert. Dabei werden jeweils zuerst die Ergebnisse angeführt und direkt im Anschluss eine Interpretation zu den einzelnen Ergebnissen gegeben.

4.1 Vergleich der Ergebnisse aller Transducerkombinationen

Da zu Beginn der liegend-liegend-Messungen kein Signal gemessen werden konnte, obwohl mit der ansonsten sehr signalstarken Siliciumcarbid-Probe gearbeitet wurde, wurden die Transducer außen an der Verbindung zu den Kabeln geerdet. Diese Erdung machte eine Messung möglich.

Nachträglich wurde herausgefunden, dass die Erdung zu einer elektrischen Kopplung und Verschlechterung des Signals führte, vor allem bei den transversalen Transducern. Dass die Kopplung elektrischer und nicht mechanischer Art ist, wurde durch die Verbindung der beiden BNC-Kabel miteinander (Schleife aus isoliertem Erdungsdraht) gezeigt. Besteht eine elektrisch leitende Verbindung über die Schleife, so steigt der Hintergrund stark an. Ist nur eine rein mechanische Verbindung über die Schleife vorhanden, dann ist kaum ein Unterschied zur Situation ohne Erdung messbar. Daher können diese Daten nicht in Relation zu den anderen Daten gesetzt werden und haben eine rein qualitative Aussagekraft.

Ziel dieser ersten Messung war es, die am besten geeigneten Transducerkombinationen zu finden. Daher wurde die Signal-to-Noise-Ratio aller Kombinationen von Transducern unter möglichst einheitlichen Bedingungen getestet. Für diese Messungen wurde der liegend-liegend-Messaufbau aus Kapitel 3.4 verwendet. Als Probe wurde immer der Siliciumcarbid Balken verwendet. Es waren sechs Transducer in jeweils doppelter Ausführung zur Testung vorhanden, wobei zwei Transducer (V153 und V154) eine transversale Schwingungsrichtung hatten. Diese Richtung war allerdings nicht bekannt. Daher wurden die Transversalschwinger in drei verschiedenen Richtungen ausgetestet. Folglich gab es zehn verschiedene Möglichkeiten für die Transducer. Da der Einfluss des Vertauschens von Transmitter und Receiver nicht bekannt war, wurden alle 100 möglichen Kombinationen ausgetestet.

Die Benennung der Transducerkombinationen funktionierte folgendermaßen: Bei einer Transducerkombination z.B. V154.90_V125 steht der erste Transducer (hier V154) für

4 Messergebnisse und deren Interpretation

den Transmitter, während der zweite Transducer (hier V125) für den Receiver steht. Ist zu einem Transducer zusätzlich eine Zahl angegeben (z.B. V154_90), so steht diese Zahl für einen Drehwinkel eines Transversaltransducers.

Ein Spektrum, das in dieser Messserie besonders hohe SNR-Werte lieferte, war jenes der Transducerkombination V125_V125, dieses wird in Abbildung 4.1 dargestellt.

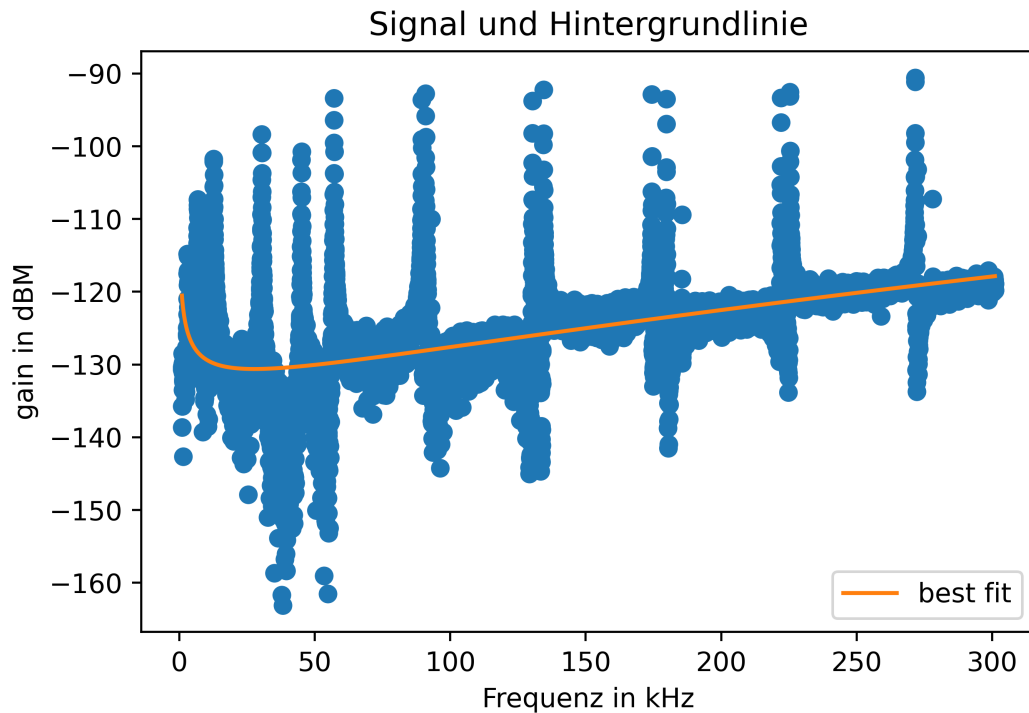


Abbildung 4.1: Spektrum mit hoher SNR

Durch die Auswahl der in Kapitel 3.7 beschriebenen Fitfunktion kam es bei mehreren Spektren zu einem Haken bei niedrigen Frequenzen, da dieser jedoch die SNR nur verkleinert und maximal die ersten 15 kHz beeinträchtigte, wurde dieser nicht weiter behandelt.

Jedoch gab es in dieser Messserie auch Spektren, bei denen vor allem bei höheren Frequenzbereichen keine Peaks über dem Hintergrund erkennbar waren, das war zum Beispiel bei der Transducerkombination V154_90_V125 der Fall, siehe Abbildung 4.2. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die y-Skala logarithmisch ist, der Hintergrund steigt demnach um 5 Größenordnungen an. Auf diese Weise wurden vor allem die Signal-to-Noise-Ratios der Kombinationen mit Transversalschwingern stark verringert.

4.1 Vergleich der Ergebnisse aller Transducerkombinationen

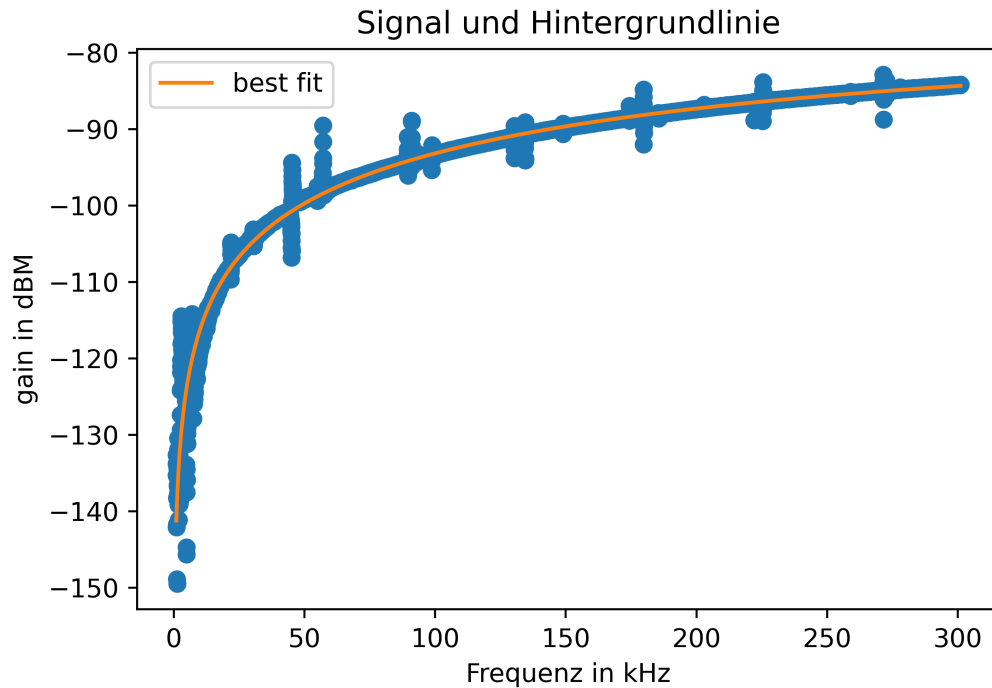


Abbildung 4.2: Spektrum mit niedriger SNR und großem Anstieg des Hintergrunds

Die systematische Bestimmung der SNR wurde mithilfe des zweiten Python-Skripts durchgeführt. Das Ergebnis waren 8 SNR-Werte für jede der 100 Messungen. Die 8 Werte entstanden dadurch, dass sowohl die maximale als auch die mittlere SNR über den gesamten Frequenzbereich und über die Teilbereiche von 0 bis 100 kHz, von 100 bis 200 kHz und von 200 bis 300 kHz berechnet wurden. Da diese Tabelle zu umfangreich ist, um übersichtlich zu sein, ist im Anhang aufzufinden. Zunächst wurde der Wert der mittleren SNR über den gesamten Frequenzbereich für die einzelnen Transducer im Durchschnitt über alle Messungen ermittelt. Daraus lässt sich kompakt zusammenfassen, welcher Transducer generell hohe SNR-Werte liefert, dies ist in Tabelle 4.1 angeführt:

4 Messergebnisse und deren Interpretation

Transducer	Mittlere SNR Transmitter [dB]	Mittlere SNR Receiver [dB]
V103	10,6	9,9
V110	7,0	6,9
V125	12,2	9,8
V153_0	6,9	7,3
V153_45	7,1	8,6
V153_90	9,5	9,3
V154_0	5,7	7,4
V154_45	7,2	6,8
V154_90	6,5	7,8
V183	11,0	9,7

Tabelle 4.1: Mittelwerte für die einzelnen Transducer

Um herauszufinden, in welchen Bereichen besonders große beziehungsweise besonders kleine SNR-Werte auftreten, wurden die einzelnen SNR-Werte in den verschiedenen Frequenzbereichen in Boxplots aufgetragen. Dabei steht Max für die Peak-Signal-to-Noise-Ratio, während Avg für die mittlere Signal-to-Noise-Ratio in einem gewissen Bereich steht. Abbildung 4.3 zeigt diese Boxplots der SNR-Werte aufgetragen nach Frequenzbereichen.

4.1 Vergleich der Ergebnisse aller Transducerkombinationen

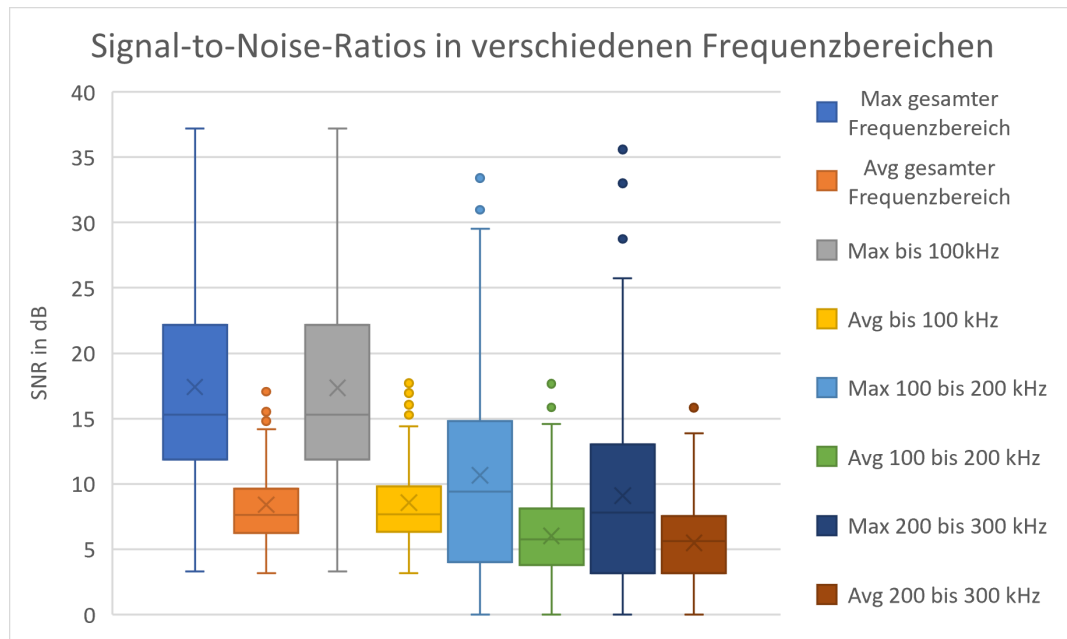


Abbildung 4.3: Vergleich der SNR in verschiedenen Frequenzbereichen

Um die Frage, ob Messungen mit Paaren von Transducern gleichen Typs eine höhere SNR haben zu beantworten, wurde über alle mittleren Signal-to-Noise-Ratios mit gleichen bzw. ungleichen Transducern gemittelt. Bei den Transversalschwingern wurden nur Kombinationen als gleich gewertet, bei denen zusätzlich auch die Ausrichtung der Transducer dieselbe war. Das Ergebnis war Folgendes:

Der Mittelwert über mittlere SNR gleicher Transducer war 8,8 dB, während der Mittelwert für unterschiedliche Transducer 8,3 dB war. Kombinationen gleicher Transducer liefern damit im Schnitt etwas bessere Werte als Kombinationen unterschiedlicher Transducer.

Das Hauptziel dieser Messungen war es, die besten Transducerkombinationen zu finden. Dafür wurden die Transducer nach folgenden Kriterien ausgewählt:

1. Hohe mittlere SNR über den gesamten Frequenzbereich
2. Hohe maximale SNR
3. Vorhandensein von gut erkennbaren Peaks im gesamten Frequenzbereich
4. Auswahl sowohl von Kombinationen von Longitudinal- und Transversaltransducern als auch von Mischungen daraus.

Um ein sinnvolles Maß an weiter zu testenden Transducerkombinationen zu bekommen, wurden 10 Transducerpaare ausgewählt, diese sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Die Transducerkombinationen sind dabei nach der Summe von PSNR (Max SNR) und mittlerer SNR (Avg SNR) absteigend sortiert.

4 Messergebnisse und deren Interpretation

Transducerkombination	Max SNR	Avg SNR
V125_V125	36,3	17,0
V125_V183	37,2	15,8
V125_V103.	35,5	15,7
V183_V125	35,1	14,9
V183_V183	35,0	14,8
V103_V183	34,1	15,5
V183_V103	33,0	14,9
V103_V153_90	27,8	11,6
V153_90_V103	26,6	12,1
V154_45_V153_90	19,8	10,9

Tabelle 4.2: Die 10 besten Transducer aus der liegend-liegend-Messung und deren SNR

Im weiteren Verlauf wurden auf die V183-Transducer Muttern angeklebt, um darauf Schlaufen aus Aluminiumoxid zu montieren und diese für die hängend-RBT-Messungen verwenden zu können. Diese konnten daher nicht mehr für die liegend-Messungen verwendet werden, wodurch für die liegend-liegend-Messungen mit verschiedenen Auflagewinkel die 5 Transducerkombinationen verwendet wurden, in denen V183 nicht vorkam.

Da die Messwerte aufgrund der Erdung nennenswert verändert wurden, wurde mit diesen 5 Transducerkombinationen eine Messserie unter gleichen Bedingungen mit Ausnahme der Erdung durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 4.3 dargestellt, wobei wieder die Sortierung absteigend nach der Summe der beiden SNR-Werte vorgenommen wurde.

Transducerkombination	Max SNR	Avg SNR
V154_45_V153_90	53,7	28,0
V103_V153_90	44,9	24,8
V153_90_V103	45,0	24,2
V125_V125	44,3	23,3
V125_V103	42,8	19,8

Tabelle 4.3: SNR der 5 besten Transducerkombinationen liegend-liegend-10°

4.2 Interpretation zum Vergleich aller Transducerkombinationen

Im Vergleich der Abbildungen 4.1 und 4.2, lassen sich starke Unterschiede in der Höhe des Hintergrundes und der Peaks erkennen, dies spricht dafür, dass die Erdung vor allem die SNR der Transversalschwinger verkleinert hat, das zeigt sich auch in Tabelle 4.1, in denen die Longitudinalschwinger V125, V183 und V103 besonders hohe durchschnittliche SNR Werte haben, während die Werte der Transducer V153 und V154 unabhängig von der Lage niedrig waren. Das steht im Widerspruch der hohen SNR-Werte der Transversalschwinger, die in weiteren Messungen ohne Erdung gefunden wurden.

Die höchsten SNR-Werte aus Abbildung 4.3 konnten im Bereich von 0 bis 100 kHz ermittelt werden, das kann man daran erkennen, dass sich der graue Boxplot der maximalen SNR für 0 bis 100 kHz fast gänzlich mit dem ersten blauen Boxplot der maximalen SNR über den gesamten Frequenzbereich deckt, ebenso für die mittlere SNR. Die SNR-Werte in den Boxplots für die Frequenzbereiche von 100 bis 200 kHz und von 200 bis 300 kHz sind im Vergleich jeweils kleiner. Dieser starke Abfall der SNR bei höheren Frequenzen liegt vermutlich an der Erdung, durch die der Hintergrund für höhere Frequenzen stark anstieg.

Im Vergleich der Tabellen 4.2 und 4.3 fällt sofort auf, dass die SNR-Werte bei der Wiederholung der Messung ohne Erdung wesentlich größer sind. Darüber hinaus hat sich auch die Reihenfolge der Transducerkombinationen in der Tabelle verändert. Die Transducerkombination V125_V125, die bei der ersten Messung die beste aus 100 war ist nun die viertbeste aus fünf, während die Transducerkombination V154_45_V153_90, die nur aufgrund ihrer Eigenschaft als Kombination von Transversaltransducern weiter getestet wurde, nun die besten SNR-Werte liefert. Die erste Messung mit Erdung hat daher nur vergleichende Aussagekraft und das auch nur unter Transducern desselben Typs (transversal oder longitudinal). Da die SNR-Werte bei der Messung mit Erdung durchwegs geringer waren als bei der Messung ohne Erdung, kann von der Verwendung einer Erdung der Transducerkabel nur abgeraten werden, wenn es allerdings einen Anlass geben sollte, Erdungen zu verwenden, dann sind ist die Verwendung der Transducer V125 zu empfehlen.

4.3 RBT-liegend-liegend bei verschiedenen Auflagewinkeln

Alle weiteren Messungen wurden ohne Erdung durchgeführt und sind daher nicht mit den Messungen aus Kapitel 4.1 vergleichbar. Für die Bestimmung des bestmöglichen Auflagewinkels für die liegend-liegend-RBT-Apparatur wurden die Auflagewinkel 0° , 5° , 10° , 20° , 30° , 40° und 45° mit den 5 angesprochenen Transducerpaaren ausgetestet.

Bei Spektren der liegend-Messungen waren bei der gemessenen technischen Keramik bis zu 21 Peaks im Bereich von 0 bis 300 kHz erkennbar, charakteristisch ist zudem, dass auch negative Peaks sichtbar wurden, also Messpunkte, in denen eine geringere Leistung

4 Messergebnisse und deren Interpretation

als die Hintergrundleistung gemessen wird (bei Einzelmesswerten sogar unter -180 dB bei einem Hintergrund von etwa -135 dB). Stellvertretend für diese Messungen ist das Spektrum der Transducerkombination V154_45_V153_90 bei einem Auflagewinkel von 5° in Abbildung 4.4 abgebildet.

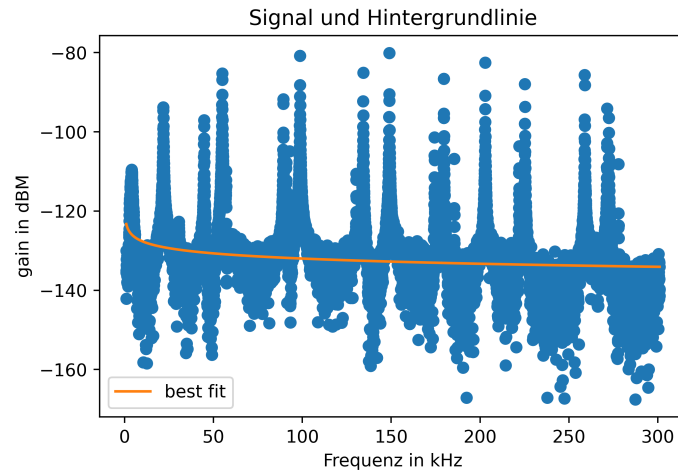


Abbildung 4.4: Spektrum der liegend-liegend-Messungen

Ein Punktdiagramm der mittleren SNR in Abhängigkeit des Winkels ist in Abbildung 4.5 dargestellt. In blau sind dabei die einzelnen Signal-to-Noise-Ratios angeführt, während in orange der Mittelwert für den jeweiligen Auflagewinkel angezeigt wird.

4.4 Interpretation zu RBT-legend-legend bei verschiedenen Auflagewinkeln

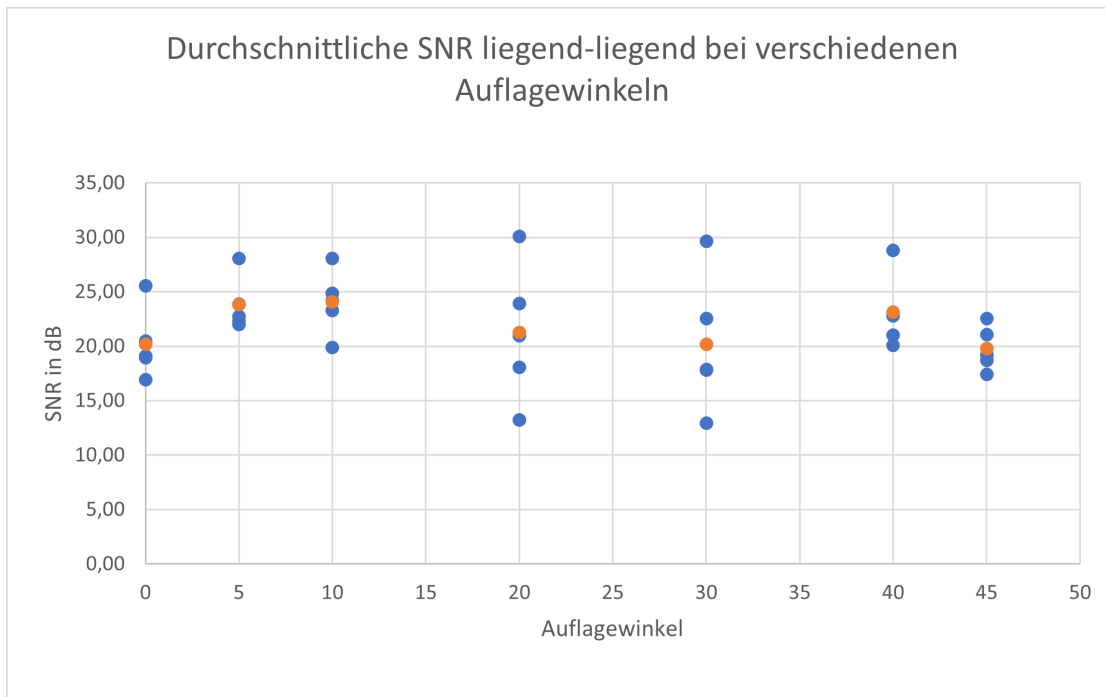


Abbildung 4.5: Vergleich der SNR in verschiedenen Frequenzbereichen - Blaue Punkte stehen für einzelne Messungen, Orange Punkte für die Mittelwerte beim jeweiligen Auflagewinkel.

4.4 Interpretation zu RBT-legend-legend bei verschiedenen Auflagewinkeln

Der Mittelwert der SNR aus Abbildung 4.5 war dabei für den Auflagewinkel von 10° mit 24,07 dB am größten, wobei der Mittelwert für 5° (23,81 dB) nur geringfügig kleiner war. Zudem war die Streuung der Werte bei Auflagewinkeln von 5 und 10 Grad relativ gering. Daher kann auf Basis dieser Messungen für legend-legend-RBT-Messungen ein Auflagewinkel zwischen 5° und 10° empfohlen werden. Zwar wurden bei einem Auflagewinkel von 40° ähnlich gute SNR-Werte erreicht, jedoch war hier aufgrund des Winkels die Gefahr des Verrutschens der Probe während der Messung größer.

Der Ausreißer nach oben bei allen Winkeln außer 45° war immer die Transducerkombination V154_45_V153_90 von zwei Transversalschwingern. Dies ist als überraschendes Ergebnis zu werten, da man allein aufgrund der geometrischen Konstellation vermuten könnte, dass diese bei Auflagewinkeln von 45° besonders gut schwingen. Tatsächlich war die Streuung der Werte bei 45° besonders gering, was eher darauf hindeutet, dass Longitudinal- als auch Transversalschwinger bei 45° ähnlich gut funktionieren.

4.5 altes und neues RBT-hängend-hängend

Bei den hängend-hängend-Messungen wurden die Kürzel Laut und Alt für den Lautsprecher bzw. den Transducer aus dem alten RBT-Aufbau verwendet. Abbildung 4.6 zeigt das Spektrum der Transducerkombination V183_1_V183_2 wobei als Probe wieder dieselbe technische Keramik verwendet wurde, die Anzahl der Peaks war bei diesen Messungen maximal 14.

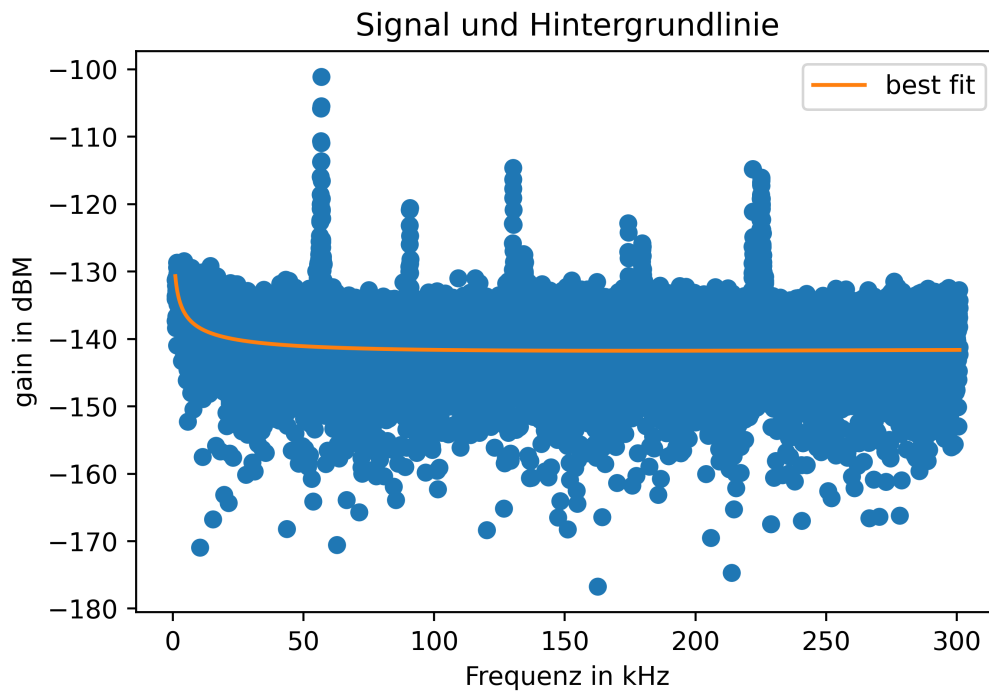


Abbildung 4.6: Spektrum der hängend-hängend-Messungen mit den neuen Transducern

4.5 altes und neues RBT-hängend-hängend

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 4.7 ein Spektrum der gleichen Probe, das mit dem alten RBT-Messaufbau aufgenommen wurde.

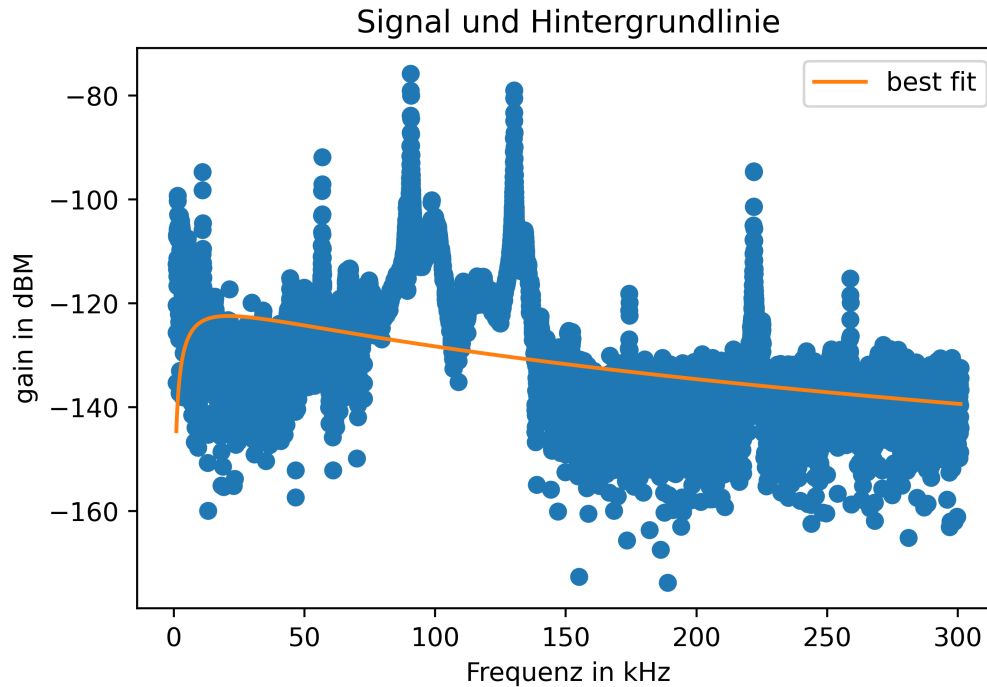


Abbildung 4.7: Spektrum der hängend-hängend-Messungen mit dem alten Messaufbau

In einer Messserie wurden die Transducer des alten RUS sowie die beiden Transducer des Typs V183, auf die eine Mutter angeklebt wurde, gegeneinander ausgetestet. Als Probe wurde auch hier wieder die technische Keramik verwendet. Um die V183-Transducer unterscheiden zu können wurde einer mit 1 und der andere 2 beschriftet. Die gemittelten Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 4.4 aufgelistet.

Transducer	Mittlere SNR Transmitter [dB]	Mittlere SNR Receiver [dB]
Alt	22,4	24,0
Laut	26,0	25,8
V183.1	21,7	20,6
V183.2	19,7	20,0

Tabelle 4.4: Gemittelte SNR der hängend-hängend-Transducertestung

4 Messergebnisse und deren Interpretation

Anschließend wurden Messungen mit verschiedenen Materialien, die in Tabelle 3.9 angeführt sind, sowohl mit dem bereits vorhandenen (alten) RBT als auch unter Verwendung der beiden V183-Transducer angestellt, die mittleren Signal-to-Noise-Ratios sind in Abbildung 4.8 grafisch dargestellt.

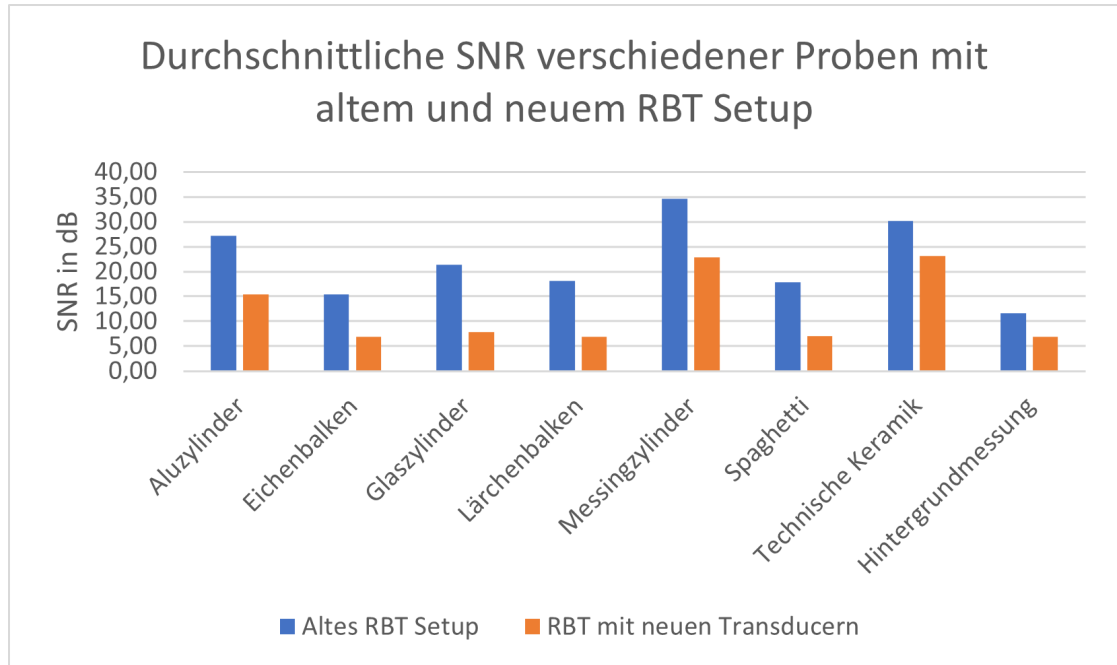


Abbildung 4.8: SNR der hängend-hängend-Messungen bei verschiedenen Proben

4.6 Interpretation zu altem und neuem RBT-hängend-hängend

Die Form des Spektrums in Abbildung 4.6 ähnelt jener der liegend-liegend-Messungen, wobei jedoch weniger Peaks erkennbar sind. Im Vergleich der Abbildungen 4.6 und 4.7 sind in Abbildung 4.7 mehr und eindeutigere Peaks erkennbar.

Der einzige Vorteil der neuen Transducer, den man aus den beiden Frequenzspektren herauslesen kann, ist eine Verringerung des Hintergrundsignals auf etwa -140 dB. Das Hintergrundsignal des alten RBT ist zudem unregelmäßiger, was vermutlich auch dazu geführt hat, dass für die SNR durch die schlechtere Anpassung der Hintergrundfunktion höhere Werte als bei Verwendung einer optimalen Hintergrundfunktion berechnet wurden. Rein optisch und auch bei Verwendung des ersten Python Skripts ist allerdings klar, dass die SNR des alten RBT größer ist als die der neuen Transducer.

Die größte SNR in Tabelle 4.4 konnte bei diesen Messungen beim Lautsprecher festgestellt werden. Bei diesem ist die mittlere SNR als Transmitter höher als bei der Verwendung als Receiver, beim alten Transducer ist das genau anders herum. Demnach ist beim alten Aufbau ein klarer Vorteil bei der Verwendung des Lautsprechers als Transmitter und des Transducers als Receiver gegeben. Ein weiterer Grund dafür ist, dass bei Verwendung des Lautsprechers als Receiver manche Peaks im Spektrum besonders breit aufgenommen werden, was die Auswertung erschwert. Demnach ist die Verwendung des Lautsprechers als Receiver nicht zu empfehlen, auch wenn dieser insgesamt in der Verwendung als Receiver die größte SNR aufweist. Eine weitere Aussage von Tabelle 4.4 ist die, dass durch das Aufkleben der Mutter sich die Transducer stärker unterscheiden, die SNR-Werte von V183.1 sind vor allem als größer als die von V183.2.

Abbildung 4.8 zeigt, dass die mittlere SNR unabhängig von der Probe beim alten RBT-Setup besser ist. Messungen, die eine Bestimmung der mechanischen Eigenschaften zulassen, konnten beim Lärchenbalken und beim Eichenbalken nur mit dem alten RBT durchgeführt werden, nicht aber mit den neuen Transducern. Die Materialkonstanten der Spaghetti konnten gar nicht analysiert werden, die dafür verhältnismäßig große SNR entstand durch die unregelmäßige Form des Hintergrunds.

4.7 RBT-hängend-liegend

Eine Variante der RBT, welche in dieser Form nach Wissen des Autors noch nicht publiziert wurde, ist eine Kombination von hängender und liegender Position der Transducer. Wie bei der hängend-hängend-Messung konnten bei den Spektren der technischen Keramik maximal 14 Peaks beobachtet werden, als Beispiel für ein Spektrum der hängend-liegend-Messungen ist jenes der Kombination des alten Transducers in hängender Position als Transmitter und des V125 Transducers in liegender Position bei einem Auflagewinkel von 5° als Receiver in Abbildung 4.9 angeführt.

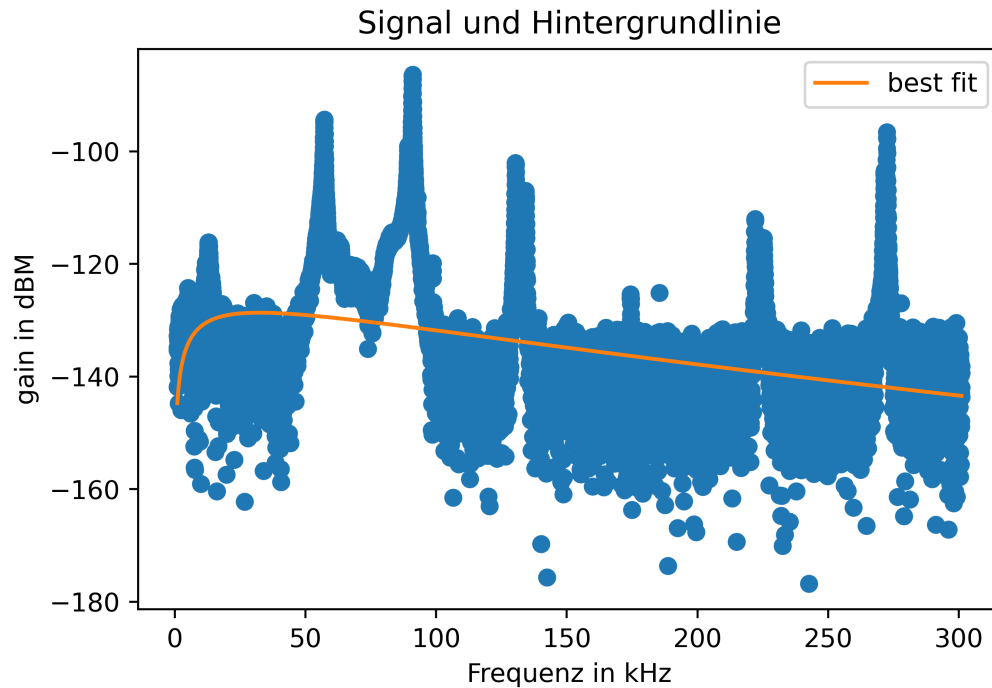


Abbildung 4.9: Spektrum der hängend-legend-Messungen mit hängendem Transmitter

Um zu überprüfen, ob bei Verwendung des hängenden Transducers als Transmitter oder Receiver höhere Signal-to-Noise-Ratios erhalten werden, wurde eine Messung angestellt, bei der nur diese Variable verändert wurde. Das Spektrum mit dem Transducer 125 als liegenden Transmitter und dem alten Transducer als hängenden Receiver ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die SNR-Werte für die beiden Messungen werden in Tabelle 4.5 angeführt.

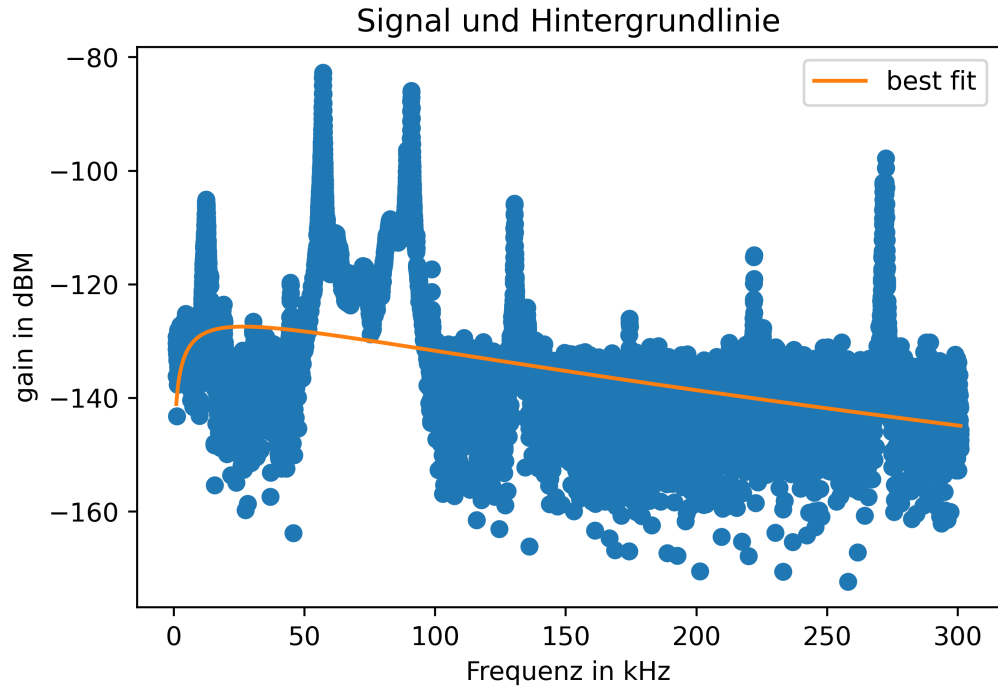


Abbildung 4.10: Spektrum der hängend-legend-Messungen mit liegendem Transmitter

	Max	Avg	Max 100	Avg 100	Max 200	Avg 200	Max 300	Avg 300
Alt_V125-5	45,3	25,0	44,9	24,7	31,6	20,3	45,3	26,2
V125-5_Alt	46,0	26,5	46,0	26,9	28,0	15,4	45,3	26,3

Tabelle 4.5: SNR-Werte bei Vertauschung von hängend und legend

Wie auch beim liegend-liegend-Aufbau wurden Messungen in Abhängigkeit vom Auf-
lagewinkel angestellt. Hierbei ist anzumerken, dass die Messung bei einem Winkel von
 0° nicht sinnvoll möglich war, da sich die Position der Probe während der Messung
veränderte. Messungen bei einem Auf-
lagewinkel von $> 30^\circ$ waren nicht möglich, da die
Probe am Transducer abglitt. Als hängender Transmitter wurde jeweils jener aus dem
alten RBT-Setup verwendet, der Receiver war V125. Die Daten dieser Messungen wer-
den in Abbildung 4.11 gezeigt.

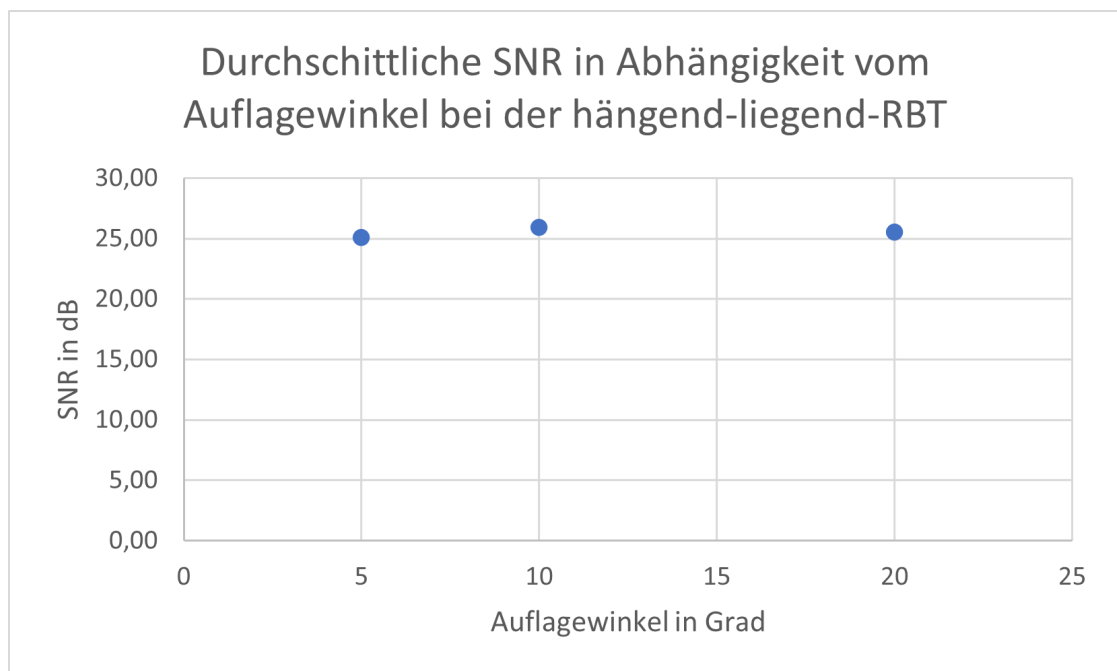


Abbildung 4.11: SNR-Diagramm der hängend-liegend-Messserie in Abhängigkeit vom Auflagewinkel am liegenden Transducer

Um herauszufinden, welcher der neuen Transducer am besten für die Verwendung in einem hängend-liegend-RBT-Aufbau geeignet ist, wurde auch hierzu eine Messserie angestellt. Als Transmitter wurde auch hier wieder jener aus dem alten RBT verwendet, die Receiver sind in Abbildung 4.12 angeführt, der Auflagewinkel war immer 10°.

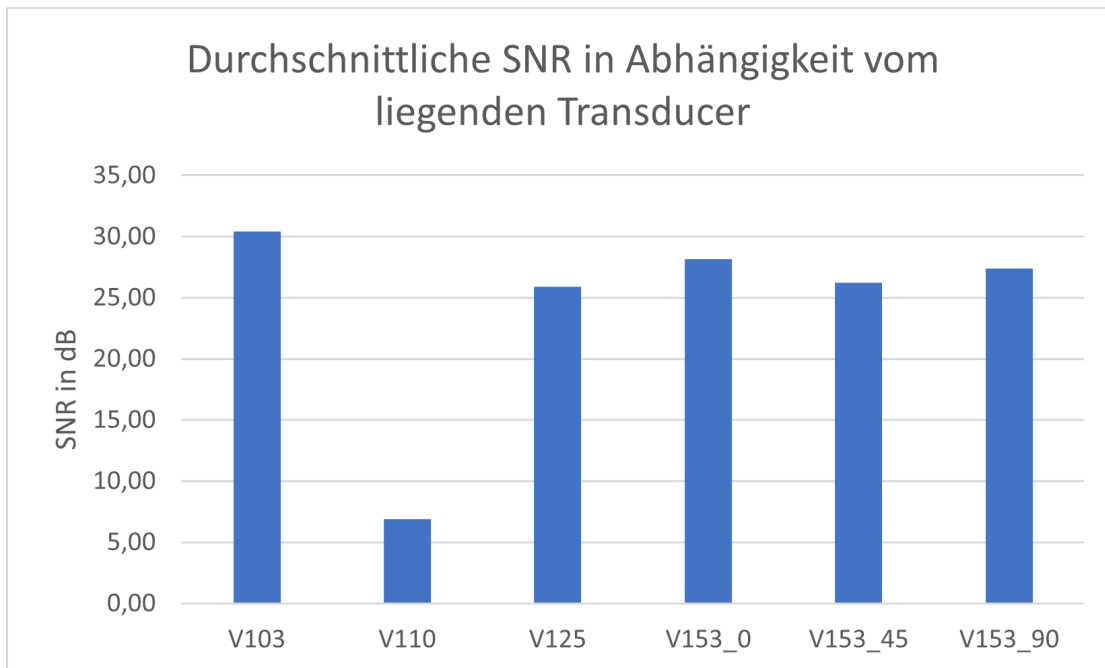


Abbildung 4.12: SNR-Diagramm der hängend-liegend-Messungen mit verschiedenen liegenden Transducern

4.8 Interpretation zur RBT-hängend-liegend

Optisch sind die Spektren in den Abbildungen 4.9 und 4.10 sehr ähnlich zueinander und auch im Vergleich der SNR-Werte aus Tabelle 4.5 der beiden Messungen sind nur geringe Unterschiede erkennbar. Es ist aus diesen einzelnen Messungen kein klarer Vorzug für die Verwendung von liegendem oder hängendem Transducer als Transmitter oder Receiver erkennbar.

Die mittlere SNR aller drei Messungen in Abbildung 4.11 liegen zwischen 25 dB und 26 dB. Damit kann kein Vorzug für einen Aufwinkwinkel erkannt werden. Da, wie sich durch die Messungen in Kapitel 4.1 gezeigt hat, der Receiver (hier liegend) den geringeren Einfluss hat, könnte das eine Ursache für die kleinen Unterschiede zwischen den Aufwinkwinkeln geführt haben.

Bei der Messserie aus Abbildung 4.12 zeigte sich, dass sich der Transducer V103 besonders gut für die hängend-liegend-Messungen eignet. Der Transducer V153 zeigte unabhängig vom Drehwinkel etwas schwächere Ergebnisse, ebenso wie der Transducer V125. Der Transducer V110 wies wie bei den Messungen in Kapitel 4.1 nur eine sehr geringe SNR auf und kann daher nicht für die Verwendung empfohlen werden.

4.9 Interpretation zu den verschiedenen RBT Variationen im Vergleich

Bei den Spektren der liegend-liegend-RBT-Messungen konnten bis zu 21 Peaks identifiziert werden, während bei den anderen Aufbauten jeweils nur 14 Peaks erkannt wurden. Das kann einerseits ein Vorteil sein, da je mehr Peaks den entsprechenden theoretischen Resonanzfrequenzen zugeordnet werden können, die Unsicherheit in der Bestimmung der E-Moduln verkleinert wird. Darüber hinaus ist es bei mehr Peaks leichter möglich einzelne Peaks auszuschließen, da ausreichend weitere Peaks zum Zuordnen vorhanden sind. Jedoch werden bei der liegend-liegend-Messung verschiedene Moden von Schwingungen (flatwise, torsional) gemessen, was die Zuordnung erschwert.

Die jeweils besten mittlere Signal-to-Noise-Ratios der technischen Keramik waren beim liegend-liegend-Versuchsaufbau 30,07 dB, in der hängend-hängend-Variante 26,8 dB und für die Kombination der beiden, dem hängend-liegend-Aufbau 30,4 dB.

Die verschiedenen Varianten unterscheiden sich damit nur geringfügig in der SNR, wobei jene der hängend-hängend-RBT-Messungen etwas geringer war. Es haben alle Varianten der RBT Vorteile. Während bei der liegend-liegend-RBT die größte Anzahl an Peaks erkennbar war, konnte beim hängend-hängend-Messaufbau gezielt eine Art von Schwingungsmoden untersucht werden. Darüber hinaus ist der hängend-hängend-RBT-Aufbau der einzige, der in dieser Form auch für Hochtemperaturmessungen verwendet werden kann. Es besteht allerdings die Möglichkeit durch Ankleben von hochtemperaturtauglichen Stäbchen die liegend-liegend-Messung so zu modifizieren, dass die Probe erhitzt werden kann, ohne dass auch die Transducer erhitzt werden, was Hochtemperaturmessungen erlauben würde.

Bei den hängend-liegend-RBT-Messungen konnten dieselben Peaks wie bei der hängend-hängend-Variante beobachtet werden, allerdings mit einer höheren SNR. Da die Vorteile allerdings gering und die Handhabung im Vergleich zu den beiden anderen Methoden etwas umständlicher ist, kann diese Variante nur für Spezialfälle empfohlen werden.

Bei den Messungen zeigte sich, dass im Bereich bis 300 kHz die bereits vorhandenen Transducer bzw. der Lautsprecher bessere Signal-to-Noise-Ratio lieferten als die neuen Transducer. Weitere Messungen haben allerdings gezeigt, dass das alte Setup bei Frequenzen über 500 kHz kein sinnvolles Signal mehr lieferte. Dies ist kaum verwunderlich, bedenkt man, dass der Lautsprecher für hörbare Frequenzen bis maximal 20 kHz optimiert wurde. Mit den neuen Transducern konnten bei der technischen Keramik Peaks bei Frequenzen von bis zu 1 Mhz und teilweise darüber hinaus bestimmt werden. Dies ist besonders für die Messung von Materialien mit sehr hohem E-Modul von Vorteil, da bei diesen die Resonanzen bei höheren Frequenzen auftreten.

4.10 altes und neues RUS im Vergleich

Abbildungen 4.13 und 4.14 zeigen Spektren einer Glaskugel, wobei für die Aufnahme des Spektrums einmal der vorhandene (alte) RUS-Messaufbau und einmal die in Kapitel 3.2 beschriebene neue RUS-Messanordnung verwendet wurde. Als Transmitter wurde dabei ein Transducer des Typs V154 und als Receiver ein Transducer vom Typ V153 verwendet.

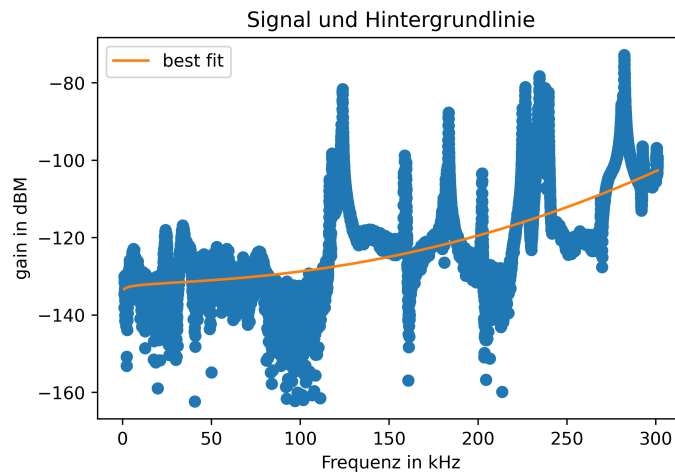


Abbildung 4.13: Spektrum der Glaskugel aufgenommen mit dem alten RUS

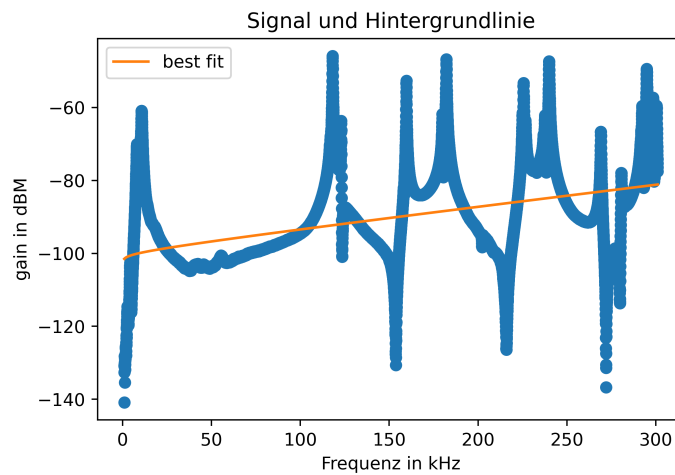


Abbildung 4.14: Spektrum der Glaskugel aufgenommen mit dem neuen RUS

Für den Vergleich der beiden RUS-Apparaturen wurde eine Messserie angestellt, bei der

4 Messergebnisse und deren Interpretation

vier verschiedene Materialien (Ebenholz, Glas, Siliciumcarbid und Zirkonoxid) getestet wurden. Abbildung 4.15 zeigt ein Diagramm der berechneten mittleren SNR-Werte.

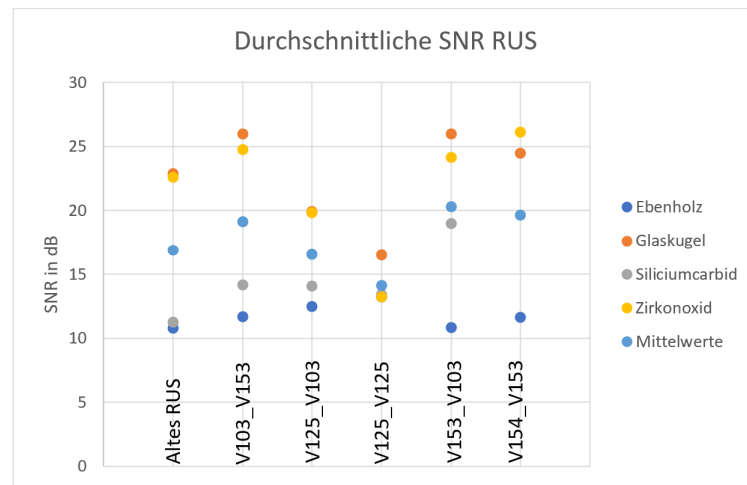


Abbildung 4.15: SNR-Werte aufgenommen mit dem alten bzw. neuen RUS

4.11 Interpretation zu altem und neuem RUS im Vergleich

Im Folgenden werden die Spektren aus Abbildung 4.13 und 4.14, die mit dem alten und dem neuen RUS aufgezeichnet wurden, in Relation gesetzt. Der Hintergrund ist im Allgemeinen bei der alten RUS-Apparatur mit teilweise unter -120 dB niedriger als beim neuen RUS, bei dem der Hintergrund oft über -100 dB war. Dies lässt sich optisch leicht vergleichen (siehe Abbildungen 4.13 und 4.14). Jedoch war der Noise beim alten RUS vor allem bei niedrigen Frequenzen groß, im Gegenzug dazu kann man beim Spektrum in Abbildung 4.14, eine besonders glatte Kurve mit nur sehr geringen Schwankungen im Hintergrund und klaren Peaks erkennen.

Wie in Abbildung 4.15 erkennbar, wurden die höchsten Signal-to-Noise-Ratios bei der Kombination von Transversaltransducern V154_V153 am neuen RUS gemessen. Vor allem die Glaskugel und die Zirkonoxid Probe lieferten sehr gute Signale und entsprechend hohe Signal-to-Noise-Ratios. Die Ebenholz Probe hatte bei allen Messungen die geringste SNR, die beste SNR für das Ebenholz wurde allerdings bei den Kombinationen von Longitudinaltransducern (V125_V103 und V125_V125) gefunden, die ansonsten allerdings wesentlich weniger gute SNR-Werte lieferten. Daraus lässt sich vermuten, dass die Longitudinaltransducer bei Proben mit niedrigem E-Modul bessere Ergebnisse liefern, während die insgesamt besten SNR-Werte durch Kombinationen der Transversaltransducer erreicht werden. Das alte RUS liegt im Vergleich der SNR-Werte zwischen den Werten der verschiedenen Transducerkombinationen des neuen RUS-Aufbaus, wobei es eine Transducerkombination (V103_V153) gibt, die bei allen Proben höhere SNR-Werte

erzielte.

Der neue RUS-Aufbau hat somit sowohl bessere Signal-to-Noise-Ratios, er kann zusätzlich bezüglich der verwendeten Transducer variiert und für die jeweilige Probe optimiert werden. Vor allem Kombinationen von Transversalschwingern könnten für Auswertungen im Forschungsbetrieb relevant werden, da sie sehr gute SNR-Werte bei sehr glatten Hintergrundkurven liefern, was die Auswertung bezüglich der E-Moduln erleichtert. Darüber hinaus kann der neue Aufbau auch vertikal verwendet werden, was die Handhabung vor allem bei kugelförmigen Proben erleichtert und im folgenden Kapitel untersucht wird.

4.12 neues RUS vertikal

Abbildung 4.16 zeigt das Ergebnis der RUS-Messung einer Glaskugel mit dem neuen RUS in vertikaler Ausrichtung.

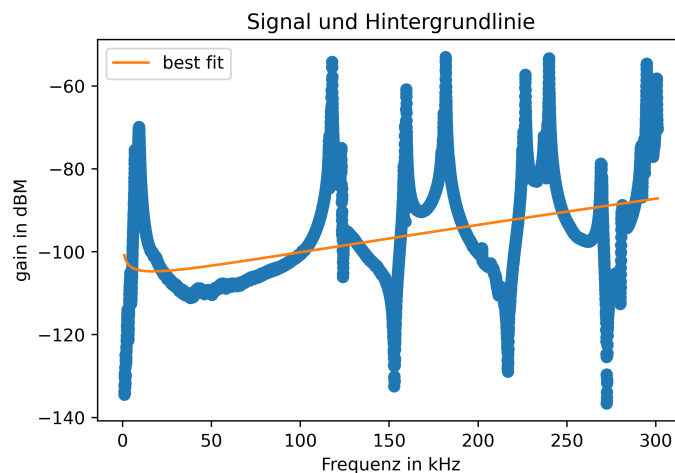


Abbildung 4.16: SNR-Werte des vertikalen RUS

Ziel dieser Messungen war es herauszufinden, ob der untere oder der obere Transducer als Transmitter verwendet werden sollten. Abbildung 4.17 zeigt ein Säulendiagramm der mittleren SNR von zwei verschiedenen Proben, wobei jeweils vertauscht wurde, ob der untere oder der obere Transducer die Rolle des Transmitters bzw. Receivers übernimmt. Bei den linken beiden Säulen ist der Transmitter in der oberen Position, bei den rechten beiden Säulen ist der Transmitter in der unteren Position.

4 Messergebnisse und deren Interpretation

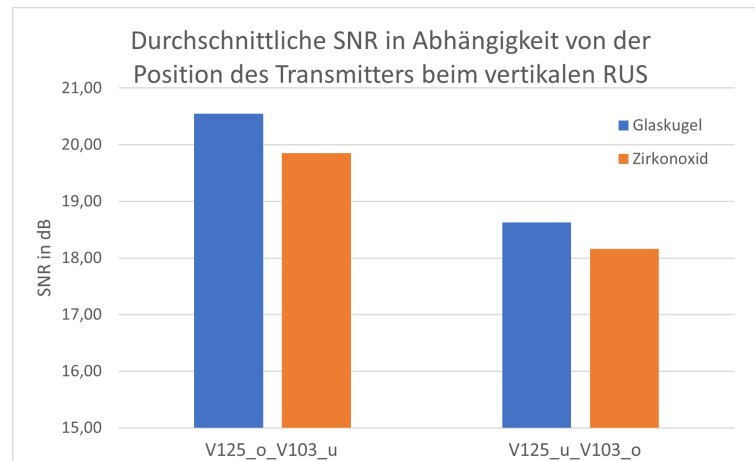


Abbildung 4.17: SNR-Werte des vertikalen RUS in Abhängigkeit der Position des Transmitters

Um herauszufinden, ob transversale oder longitudinale Schwinger sich in der vertikalen Position anders verhalten als in der horizontalen, wurden weitere Messungen angestellt. Die mittleren SNR-Werte, die dabei ermittelt wurden, sind in Abbildung 4.18 abgebildet. Die linken beiden Säulen stehen dabei für eine Kombination aus Longitudinalschwingern, für die mittleren beiden Säulen wurden Transversalschwinger verwendet und auf den rechten beiden Säulen eine Kombination aus beiden Schwingertypen.

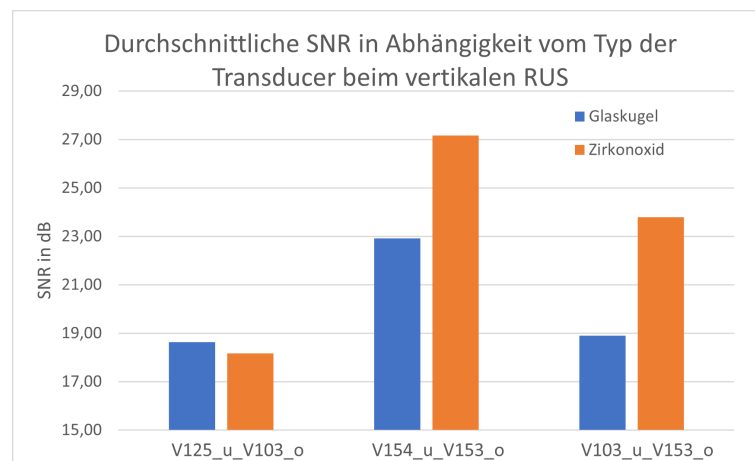


Abbildung 4.18: SNR-Werte des vertikalen RUS in Abhängigkeit des Typs der Transducer

Tabelle 4.6 zeigt die SNR-Werte derselben Proben und Transducer für das horizontale und vertikale RUS im Vergleich. Bei allen Messungen wurde dabei die Transducerkombination von V154 als Transmitter und V153 als Receiver verwendet.

4.13 Interpretation zum neuen RUS vertikal

Probe	Lage	Max SNR	Avg SNR
Glaskugel	vertikal	44,7	22,9
Zirkonoxid	vertikal	49,6	27,1
Glaskugel	horizontal	46,4	24,4
Zirkonoxid	horizontal	50,1	26,1

Tabelle 4.6: SNR-Werte von vertikalem und horizontalem RUS in Gegenüberstellung

4.13 Interpretation zum neuen RUS vertikal

Die Spektren des vertikalen RUS unterscheiden sich kaum von den Spektren des horizontalen RUS. Das wird im Vergleich der Abbildungen 4.15 und 4.16 klar. Der Unterschied in den Messvoraussetzungen zwischen den beiden Messungen war hier ausschließlich die Tatsache, dass die Messung aus 4.16 im vertikalen Zustand geändert wurden. Es werden also dieselben Resonanzfrequenzen in ähnlicher Intensität gemessen.

Wie man anhand von Abbildung 4.18 erkennen kann, sind die mittleren beiden Säulen höher als die anderen, was dafür spricht, dass wie auch schon beim klassischen RUS die transversalen Transducer die besten Signal-to-Noise-Ratios liefern. Auffallend ist dabei auch, dass die Signal-to-Noise-Ratio beim Zirkonoxid in den Messanordnungen mit Transversalschwingern klar höher war, während bei den linken beiden Säulen die der Glaskugel höher war. Das könnte ein Indiz dafür sein, dass die Transversalschwinger insbesondere für das Auswerten von harten Proben mit hohem E-Modul gut geeignet sind, während für eher weichere Proben mit kleineren E-Moduln die Longitudinalschwinger höhere Signal-to-Noise-Ratios aufweisen.

Vergleicht man in Tabelle die Signal-to-Noise-Ratios von horizontalem und vertikalem RUS, so ist zu erkennen, dass sich diese für beide Proben um weniger als 2 dB unterscheiden. Da der Unterschied in den SNRs zwischen horizontal und vertikal so gering ausfällt, könnte man daraus schließen, dass man die Lage des RUS-Aufbaus ohne nennenswerte Verluste variieren kann.

4.14 Vergleich der Auswertungen bezüglich E-Modul

Um zu überprüfen, ob die verschiedenen RBT-Messungen einer Probe zu den selben E-Moduln (E) und Poissonzahlen (ν) führen, wurden mehrere Auswertungen mit dem Resonance-Programm von Stephan Puchegger durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Auswertungen sind in Tabelle 4.7 abgebildet. Die Probe war dabei jeweils der Siliciumcarbid Balken.

Lage	Transducer	Moden	E [GPa]	ν
liegend-liegend	V125_V125	flatwise torsional	$398,6 \pm 5,2$	$0,1911 \pm 0,0081$
hängend-hängend	Alt_V183	flatwise	$400,5 \pm 6,9$	$0,242 \pm 0,033$
hängend-liegend	Alt_V153_90	flatwise edgewise torsional	$398,3 \pm 3,6$	$0,2077 \pm 0,0094$

Tabelle 4.7: E-Moduln und Poissonzahlen der RBT-Messungen

In ähnlicher Weise wurde auch für die RUS-Messungen ein Vergleich der Auswertungen angestellt. Als Probe wurde hier der Zirkonoxid Würfel verwendet. Es waren bei allen Spektren alle drei Moden von Schwingungen erkennbar. Die berechneten E-Moduln und Poissonzahlen können Tabelle 4.8 entnommen werden.

Transducer	E [GPa]	ν
Altes RUS	$217,59 \pm 0,75$	$0,3192 \pm 0,0041$
V125_V103	$217,4 \pm 1,1$	$0,3174 \pm 0,0034$
V103_V153	$217,23 \pm 0,85$	$0,3163 \pm 0,0047$
V154_V153	$216,37 \pm 0,46$	$0,3114 \pm 0,0066$

Tabelle 4.8: E-Moduln und Poissonzahlen der RUS-Messungen

4.15 Interpretation zum Vergleich der Auswertungen bezüglich E-Modul

Die Messergebnisse, welche in Tabelle 4.7 dargestellt werden, sind sehr ähnlich, die Unsicherheitsbereiche der E-Moduln überlappen sich, sie liegen innerhalb des für Siliciumcarbid typischen Bereichs von 390 bis 430 GPa [14]. Es gibt allerdings auffällige Unterschiede in den Moden, die in den verschiedenen Geometrien gemessen werden können. Während bei den hängend-hängend-Messungen starke Peaks nur bei den Resonanzfrequenzen die durch flatwise (der langen Seite nach, Flachkantschwingungen) Schwingungen beobachtet und für die Bestimmung der Materialkonstanten herangezogen werden konnten, wurden

4.15 Interpretation zum Vergleich der Auswertungen bezüglich E-Modul

bei den liegend-liegend-Messungen auch torsionale (Verdrillungsschwingungen) Schwingungen verwendet und bei der hängend-liegend Variante zusätzlich sogar edgewise (der kurzen Seite nach, Hochkantschwingungen) Schwingungen. Die Mehrzahl an miteinbezogenen Schwingungsmoden führt zu einer geringeren Unsicherheit in der Berechnung der Materialkonstanten, wohingegen eine geringere Anzahl von Moden das Zuordnen der Peaks, das für die Berechnung notwendig ist und händisch funktioniert, erleichtert.

In Bezug auf die Poissonzahlen in Tabelle 4.7 ist auffällig, dass sich jene der hängend-hängend Messung signifikant von den Poissonzahlen der liegend-liegend Messung und der hängend-liegend Messung unterscheidet, während sich die Unsicherheitsbereiche der beiden letztgenannten überschneiden. Die Ursache dafür liegt vermutlich in den beobachteten Schwingungsmoden, da bei der hängend-hängend Messung ausschließlich Flachkantschwingungen beobachtet werden konnten. Dieser Unterschied könnte auf einen Gradienten in der Poissonzahl der verwendeten Siliciumcarbid Probe hindeuten. Aufschluss darüber könnte eine zusätzliche Messung der Hochkantschwingungen ergeben, die mit der hängend-hängend Methode allerdings nur schwer umzusetzen ist. Die Vermutung liegt nahe, dass es sich eher um eine Unregelmäßigkeit in der Probe, als um einen Fehler der Messmethode oder Messung handelt.

Gemäß einer Untersuchung am Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren liegt der E-Modul von Zirkonoxid bei etwa 210 GPa und einer Poissonzahl von etwa 0,29. [2] Die Werte aus Tabelle 4.8 erscheinen in diesem Kontext plausibel. Darüber hinaus unterscheiden sich die gefundenen E-Moduln und Poissonzahlen nur innerhalb der Unsicherheitsbereiche voneinander. Einzig auffallend ist, dass die Werte der Kombination V154_V153 am weitesten von den anderen Messungen abweichen. Diese Kombination ist auch die einzige, die ausschließlich Transversalschwinger beinhaltet. Es sollte daher bei weiteren Messungen beobachtet werden, ob hier eine systematische Verschiebung besteht. Die Bestimmung der mechanischen Kennzahlen der Ebenholzprobe wurde versucht, war aber aufgrund von schlecht erkennbaren Peaks im Spektrum nicht möglich.

5 Fazit und Ausblick

Dieses Kapitel fasst die zentralen Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und zeigt mögliche weitere Anwendungen und Entwicklungen.

Die in Kapitel 1 erläuterten Forschungsaufgaben dieser Masterarbeit konnten wie geplant verfolgt werden:

- Durch Messserien konnten passende Transducer und auch Transducerkombinationen gefunden werden, die besonders gute Signal-to-Noise Ratio-Werte aufweisen, diese sind in Kapitel 4.1 angeführt. Es konnte zudem herausgefunden werden, dass die neuen Transducer in einem größeren Frequenzbereich funktionieren, was für die Messung von Proben mit höheren Resonanzfrequenzen ermöglicht.
- Es wurden verschiedene Geometrien bzw. Lagen bei der RBT getestet und es konnten die Vor- und Nachteile der verschiedenen Lagen herausgefunden werden. Beim liegend-liegend-RBT ist die Probeneinbringung besonders simpel, da die Proben nur aufgelegt werden und nicht in brüchige Aluminiumoxid-Schlaufen eingehängt werden müssen, zudem kann mit dieser Methode eine gute SNR erreicht werden. Beim hängend-hängend-RBT ist die SNR niedriger, und es können nur die flatwise Schwingungen analysiert werden, was das Zuordnen der Peaks erleichtert aber die Unsicherheit der Messung vergrößert. Der größte Vorteil der hängend-hängend-RBT ist deren Verwendung für Hochtemperaturmessungen, diese könnten sich beim liegenden RBT als schwieriger erweisen, da die Transducer vor Hitze geschützt werden müssen, was z.B. durch Ankleben eines Röhrchens bewerkstelligt werden könnte.
Im Schnitt über mehrere Messungen hatte das hängend-liegend Geometrie bei ansonsten gleichen Verhältnissen die höchste SNR, außerdem konnten mit dieser Anordnung sowohl die flatwise als auch die edgewise und torsionalen Schwingungsmoden beobachtet werden. Das führt dazu, dass im selben Frequenzbereich mehr Peaks auftreten und die Materialkonstanten mit geringerer Unsicherheit berechnet werden können.
- Es wurde eine neue RUS-Apparatur entworfen und aus gefrästem Aluminium, 3D-gedruckten Teilen, Linearführungen und weiteren Bauteilen hergestellt. Diese RUS-Apparatur wurde optimiert indem für den neuen RUS-Aufbau Kombinationen von Transducern mit großer SNR gefunden wurden. Anschließend wurde der neue RUS-Messaufbau validiert, indem Poissonzahl und E-Modul von Spektren aufgenommen mit dem alten und neuen RUS verglichen wurden. Darüber hinaus wurde das neue RUS auch vertikal getestet, was zu ähnlich verwertbaren Messungen geführt hat.

5 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend hat diese Masterarbeit ihr Ziel, nämlich die Verbesserung der Messkonfiguration elastischer Eigenschaften mit RUS und RBT, erreicht. Im Vergleich von altem und neuem RUS-Aufbau konnten höhere SNR Werte bei sehr ähnlichen ermittelten Poissonzahlen und E-Moduln (ausnahmslos mit überlappenden Messunsicherheitsbereichen) erreicht werden. Außerdem wurden mit den neuen Transducern glattere Messkurven erzeugt, die das Finden von Peaks erleichtern.

Der meiner Meinung nach größte Erfolg ist dabei in der Diversifizierung der Messaufbauten und Messgeometrien von RUS und RBT zu sehen.

- Durch die neuen Transducer sind Messungen sowohl mit Transversal- als auch Longitudinalschwingern möglich. Diese Transducer können zudem unterschiedliche Maße haben. Dadurch, dass die Transducer-Halterungen für die RUS mit 3D-Druck hergestellt wurden, können diese in Zukunft auch leicht auf Transducer mit anderen Maßen angepasst werden.
- Die neue RUS-Apparatur kann auch vertikal für Messungen eingesetzt werden, was den Umgang mit kugelförmigen Proben erleichtert.
- Bei der RBT wurden verschiedene Messkonfigurationen getestet, die unterschiedliche Vorteile haben, wie eine höhere SNR oder geringere Unsicherheiten in der Bestimmung der Kennzahlen elastischer Eigenschaften durch eine höhere Anzahl messbarer Peaks. Man kann damit zudem beeinflussen, welche Schwingungsmoden man messen möchte. Die Mischung aus hängender und liegender Position bei der Resonant Beam Technique wurde im Rahmen der Literaturrecherche bei keiner anderen Quelle gefunden werden. Demnach könnte es sein, dass hier wissenschaftliches Neuland betreten wurde.

Ich persönlich konnte mein Wissen und meine Fähigkeiten durch diese Masterarbeit weiterentwickeln. Ich habe im Zusammenhang mit dem Design der neuen RUS-Apparatur den Umgang mit CAD und technischen Zeichnungen erlernt und meine Fähigkeiten in Python beim Auswerten der Daten verbessert. Ich konnte Einblicke in die Arbeitsweise einer physikalischen Forschungsgruppe gewinnen und Wissen in einem Spezialbereich der Physik erwerben.

Auch wenn diese Arbeit allein kaum wissenschaftlichen Fortschritt bringt, so bringt sie eine Verbesserung der Messmethoden mit sich, die für die weitere Forschung in der Gruppe Dynamik Kondensierter Systeme von Bedeutung sein könnte. Diese Arbeit könnte zudem als Ausgangspunkt für weitere Forschungstätigkeiten verwendet werden. Zum Beispiel zur weiteren Beschäftigung mit der hängend-liegend-RBT oder der Messung mit den neuen Transducern in höheren Frequenzbereichen.

Literaturverzeichnis

- [1] M. A. Alam, U. A. Samad, A. Anis, M. Alam, M. Ubaidullah, and S. M. Al-Zahrani. Effects of SiO₂ and ZnO nanoparticles on epoxy coatings and its performance investigation using thermal and nanoindentation technique. *Polymers*, 13(9):1490, 2021.
- [2] A. Caron, U. Rabe, and W. Arnold. Bruchmechanische Untersuchung an stabilisiertem submikrokristallinem Zirkonoxid mittels akustischer Mikroskopieverfahren. *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung ev.*, (91), 2004.
- [3] Olympus Scientific Solutions Americas Corp. Ultrasonic Transducers, 2016. Erhältlich von http://www.materialevaluation.gr/pdf/Flaw_Detectors/Transducers_And_Probes/UltraSonic_Transducers_Pana_UT_EN_201603.pdf abgerufen am 16.08.2023.
- [4] S. Czink, J. Holoch, R. Renz, V. Schulze, A. Albers, and S. Dietrich. Process-Specific Topology Optimization Method Based on Laser-Based Additive Manufacturing of AlSi10Mg Components: Material Characterization and Evaluation. *Processes*, 11(3), 2023.
- [5] R. Danzer and T. Lube. Werkstoffprüfung keramischer Werkstoffe – ein Überblick. *Proceeding Werkstoffprüfung, Werkstoff - Informationsgesellschaft mbH*, pages 245–264, 2004.
- [6] W. Demtröder. *Experimentalphysik 1 : Mechanik und Wärme*. Springer-Lehrbuch. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 5th edition, 2008.
- [7] C. M. Donahue, M. C. Remillieux, G. Singh, T. J. Ulrich, R. J. Migliori, and T. A. Saleh. Measuring the elastic tensor of a monolithic SiC hollow cylinder with resonant ultrasound spectroscopy. *NDT & E International*, 101:29–33, 2019.
- [8] F. Förster. Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls und der Dämpfung. *International Journal of Materials Research*, 29(1-12):109–115, 1937.
- [9] Physik Instrumente GmbH. P-840 Preloaded Piezo Actuators, 2023. Erhältlich von <https://www.physikinstrumente.com/en/products/linear-actuators/nanopositioning-piezo-actuators/p-840-preloaded-piezo-actuators-101000#specification> abgerufen am 15. 09. 2023.
- [10] E. Goens. Über die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Stäben mit Hilfe von Biegungsschwingungen. *Annalen der Physik*, 403(6):649–678, 1931.

- [11] B. R. Goodlet, C. J. Torbet, E. J. Biedermann, L. M. Jauriqui, J. C. Aldrin, and T. M. Pollock. Forward models for extending the mechanical damage evaluation capability of resonant ultrasound spectroscopy. *Ultrasonics*, 77:183–196, 2017.
- [12] R. F. Graf. *Modern dictionary of electronics*. Elsevier, 1999.
- [13] R. Gross and A. Marx. Festkörperphysik. Von Rudolf Gross und Achim Marx. *Physik in unserer Zeit*, 44(4), 2013.
- [14] G. L. Harris. *Properties of Silicon Carbide*. IET, 1995.
- [15] N. Ilie, K.-H. Kunzelmann, and R. Hickel. Werkstoffkundliche Untersuchungen zu Kompositen. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, 60(6), 2005.
- [16] D. H. Johnson. Signal-to-noise ratio. *Scholarpedia*, 1(12), 2006.
- [17] A. Juengert and C. U. Grosse. Inspection techniques for wind turbine blades using ultrasound and sound waves. *Proceedings of the NDTCE*, 9, 2009.
- [18] B. C. W. Kot, Z. J. Zhang, A. W. C. Lee, V. Y. F. Leung, and S. N. Fu. Elastic modulus of muscle and tendon with shear wave ultrasound elastography: variations with different technical settings. 2012.
- [19] M Landa, H Seiner, P Sedlák, L Bicanová, J Zidek, L Heller, M Everett, and L Pedroza. Resonant ultrasound spectroscopy close to its applicability limits. *Horizons in world physics*, 246, 2009.
- [20] S. Ledworuski, M. Ell, and H.-J. Kühn. Voraussetzungen für die Kraft- und Dehnungsmessung im Zugversuch. *Materials Testing*, 42(4):109–113, 2000.
- [21] R. G. Leisure. *Ultrasonic spectroscopy : applications in condensed matter physics and materials science*. Cambridge University Press, Cambridge, 2017.
- [22] X. Li and B. Bhushan. A review of nanoindentation continuous stiffness measurement technique and its applications. *Materials Characterization*, 48(1):11–36, 2002.
- [23] R. C. Liebermann. The Orson Anderson Era of Mineral Physics at Lamont in the 1960s. *Minerals*, 9(6), 2019.
- [24] W. Lins, G. Kaindl, H. Peterlik, and K. Kromp. A novel resonant beam technique to determine the elastic moduli in dependence on orientation and temperature up to 2000°C. *Review of Scientific Instruments*, 70(7):3052–3058, 1999.
- [25] X. Long, R. Dong, Y. Su, and C. Chang. Critical review of nanoindentation-based numerical methods for evaluating elastoplastic material properties. *Coatings*, 13(8):1334, 2023.
- [26] J. Maynard. Resonant Ultrasound Spectroscopy. *Physics Today*, 49(1):26–31, 1996.

- [27] A. Migliori and J.L. Sarrao. *Resonant ultrasound spectroscopy : applications to physics, materials measurements, and nondestructive evaluation*. A Wiley-Interscience publication. Wiley, New York, NY [u.a.], 1997.
- [28] W. C. Oliver and G. M. Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of materials research*, 7(6):1564–1583, 1992.
- [29] S. Puchegger. Combining resonant beam technique and resonant ultrasound spectroscopy for the determination of the elastic constants of anisotropic materials, 2004.
- [30] S. Puchegger, F. Dose, D. Loidl, K. Kromp, R. Janssen, D. Brandhuber, N. Hüsing, and H. Peterlik. The dependence of the elastic moduli of reaction bonded alumina on porosity. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(1):35–39, 2007.
- [31] S. Puchegger, D. Loidl, K. Kromp, H. Peterlik, and R. Weiß. Extension of the resonant beam technique to highly anisotropic materials. *Journal of Sound and Vibration*, 279(3):1121–1129, 2005.
- [32] R. B. Schwarz and J. F. Vuorinen. Resonant ultrasound spectroscopy: applications, current status and limitations. *Journal of Alloys and Compounds*, 310(1):243–250, 2000.
- [33] N. Soga and O. L. Anderson. Elastic properties of tektites measured by resonant sphere technique. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 72(6):1733–1739, 1967.
- [34] S. P. Timoshenko. LXVI. On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(245):744–746, 1921.
- [35] R. K. Verma. Elasticity of some high-density crystals. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 65(2):757–766, 1960.
- [36] B. J. Zadler, J. H.-L. Le Rousseau, J. A. Scales, and M. L. Smith. Resonant ultrasound spectroscopy: theory and application. *Geophysical Journal International*, 156(1):154–169, 2004.
- [37] Y.-C. Zhang, W. Jiang, S.-T. Tu, and X.-C. Zhang. Fracture toughness assessment of the X80 steel by nanoindentation technique and a modified constitutive model. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 117:103195, 2022.

Anhang

SNR beim Vergleich aller Transducerkombinationen

Hier sind die kompletten Tabellen aller SNR Auswertungen, die im Zuge dieser Arbeit erstellt wurden, angeführt. Innerhalb dieser Tabellen werden Abkürzungen verwendet. In der Kopfzeile der Tabellen wird erklärt, welche Zeile welche Werte enthält. Max steht dabei immer für die PSNR, während Avg für die mittlere SNR steht. Ist zusätzlich eine Zahl angegeben, steht diese für den Frequenzbereich (jeweils die vorhergehenden 100 kHz) für den diese Werte gültig sind. Daher steht 100 für den Frequenzbereich von 0-100 kHz, 200 steht für den Frequenzbereich von 100-200 kHz und 300 für den Bereich von 200-300 kHz.

In der ersten Spalte ist die verwendete Transducerkombination angegeben, wobei der erste Transducer (z.B. V103) für den Transmitter steht, während der zweite Transducer für den Receiver steht. Ist zu einem Transducer zusätzlich eine Zahl angegeben (z.B. V153_45), so steht diese Zahl für einen Drehwinkel des Transducers.

Für den Fall, dass keine Peaks (die den Cutoff-Wert von 5 dB überschreiten) vorhanden waren, wurde ein a in das jeweilige Feld eingetragen.

	Max	Avg	Max 100	Avg 100	Max 200	Avg 200	Max 300	Avg 300
V103_V103	25,7	13,5	25,7	13,8	20,1	12,0	16,0	10,9
V103_V110	15,1	8,5	15,1	8,6	9,2	7,2	7,9	6,5
V103_V125	29,7	15,6	29,7	15,4	29,5	16,9	20,3	13,3
V103_V153_0	16,0	8,9	16,0	8,9	10,1	8,5	6,4	6,4
V103_V153_45	18,3	9,4	18,3	9,5	12,4	9,0	6,1	5,9
V103_V153_90	27,8	13,4	27,8	13,4	24,2	13,9	13,8	9,0
V103_V154_0	22,3	11,2	22,3	11,2	17,9	11,6	12,7	9,3
V103_V154_45	23,8	11,6	23,8	11,8	14,4	10,8	12,7	9,2
V103_V154_90	22,4	12,1	22,4	12,3	19,2	11,7	13,2	9,1
V103_V183	34,1	17,1	34,1	17,5	27,2	15,5	21,4	13,7
V110_V103	19,3	7,9	19,3	7,9	14,7	7,3	13,8	9,2
V110_V110	17,3	7,4	17,3	7,3	16,5	7,5	14,8	10,6
V110_V125	27,1	12,1	27,1	11,1	23,2	14,0	25,7	15,0
V110_V153_0	22,7	10,9	22,5	9,9	22,7	13,1	18,3	11,6
V110_V153_45	27,0	12,1	27,0	12,4	15,8	11,5	14,4	9,9
V110_V153_90	22,5	9,3	22,5	9,3	13,1	9,2	7,7	7,0
V110_V154_0	12,6	6,9	12,6	7,0	7,1	6,9	5,7	5,6
V110_V154_45	15,2	8,3	15,2	8,3	10,5	7,5	12,2	9,0
V110_V154_90	16,3	8,7	16,3	8,9	10,1	7,7	6,0	5,6
V110_V183	21,5	8,8	21,5	8,8	14,2	9,1	14,1	10,0
V125_V103	35,5	18,4	31,9	18,0	33,4	19,5	35,5	18,6
V125_V110	28,1	13,2	28,1	12,7	25,8	14,3	22,2	15,0
V125_V125	36,3	19,3	36,3	19,6	33,6	19,0	28,7	18,2
V125_V153_0	25,0	13,2	25,0	13,1	23,1	13,3	24,5	13,9
V125_V153_45	28,2	15,4	28,2	15,7	15,6	10,2	15,0	9,1
V125_V153_90	30,3	14,8	30,3	15,1	21,1	12,5	12,5	8,7
V125_V154_0	16,5	9,1	16,5	9,1	12,1	9,1	12,6	8,4
V125_V154_45	19,2	10,4	19,2	10,6	13,3	9,0	9,6	8,1
V125_V154_90	15,9	9,6	15,8	9,5	14,8	10,1	13,7	10,1
V125_V183	37,2	18,1	37,2	18,5	21,9	13,7	25,7	15,0

Tabelle 5.1: SNR-Werte der liegend-liegend-Messungen aller Transducerkombinationen

	Max	Avg	Max 100	Avg 100	Max 200	Avg 200	Max 300	Avg 300
V153_0.V103	20,2	11,1	20,2	11,3	13,4	9,7	13,1	9,8
V153_0.V110	13,6	7,8	13,6	7,9	9,4	7,2	8,6	7,3
V153_0.V125	12,4	7,7	12,4	7,8	5,8	5,4	7,2	6,3
V153_0.V153_0	8,0	8,0	8,0	8,0	a	a	a	a
V153_0.V153_45	13,0	8,2	13,0	8,1	12,8	10,1	7,9	7,1
V153_0.V153_90	15,3	8,6	15,3	8,6	a	a	a	a
V153_0.V154_0	13,1	8,5	13,1	8,6	5,4	5,4	8,3	7,7
V153_0.V154_45	11,6	8,1	11,6	8,2	9,8	7,7	7,4	6,5
V153_0.V154_90	11,2	8,7	11,2	8,7	a	a	a	a
V153_0.V183	14,7	8,1	14,7	8,1	9,5	8,4	10,4	7,4
V153_45.V103	17,9	10,4	17,9	10,6	14,2	8,9	10,5	8,2
V153_45.V110	11,6	7,9	11,6	7,9	a	a	a	a
V153_45.V125	11,8	8,0	11,8	8,0	5,8	5,5	8,7	8,0
V153_45.V153_0	15,0	9,5	15,0	9,6	10,4	8,0	9,2	8,1
V153_45.V153_45	12,2	8,2	12,2	8,2	a	a	a	a
V153_45.V153_90	10,5	7,1	10,5	7,1	a	a	a	a
V153_45.V154_0	11,2	7,8	11,2	7,8	a	a	a	a
V153_45.V154_45	9,1	7,1	9,1	7,1	a	a	a	a
V153_45.V154_90	11,8	9,4	11,8	9,4	a	a	a	a
V153_45.V183	17,8	9,0	17,8	9,1	8,1	6,8	11,4	8,6
V153_90.V103	26,6	13,7	26,6	14,0	14,3	9,0	11,7	8,0
V153_90.V110	11,9	7,3	11,9	7,3	a	a	a	a
V153_90.V125	18,3	10,4	18,3	10,6	10,3	7,9	7,3	6,2
V153_90.V153_0	11,6	7,1	11,6	7,2	6,5	5,8	6,9	6,3
V153_90.V153_45	15,3	10,8	15,3	10,9	6,7	6,3	7,0	7,0
V153_90.V153_90	19,7	13,2	19,7	13,3	10,6	7,8	9,5	8,4
V153_90.V154_0	19,1	15,0	19,1	15,0	a	a	a	a
V153_90.V154_45	11,9	8,9	11,9	8,9	a	a	a	a
V153_90.V154_90	13,8	10,6	13,8	10,7	6,9	6,3	7,7	7,7
V153_90.V183	20,5	10,7	20,5	10,9	9,3	7,9	9,2	6,9
V154_0.V103	17,2	9,4	17,2	9,4	13,9	9,7	11,9	8,3
V154_0.V110	8,6	6,5	8,6	6,5	a	a	a	a
V154_0.V125	10,8	7,1	10,8	7,1	5,0	5,0	7,8	7,8
V154_0.V153_0	11,8	8,1	11,8	8,3	5,7	5,6	7,2	6,4
V154_0.V153_45	10,8	7,5	10,8	7,9	7,6	6,1	7,3	6,2
V154_0.V153_90	7,8	6,6	7,8	6,6	a	a	a	a
V154_0.V154_0	9,8	7,7	9,8	7,7	a	a	a	a
V154_0.V154_45	8,3	6,2	8,3	6,2	a	a	a	a
V154_0.V154_90	a	a	a	a	a	a	a	a
V154_0.V183	15,2	8,4	15,2	8,5	5,2	5,2	a	a

Tabelle 5.2: SNR-Werte der liegend-liegend-Messungen aller Transducerkombinationen

	Max	Avg	Max 100	Avg 100	Max 200	Avg 200	Max 300	Avg 300
V154_45_V103	14,4	8,3	14,4	8,6	6,4	5,5	6,6	6,1
V154_45_V110	9,0	6,3	9,0	6,3	a	a	a	a
V154_45_V125	13,9	9,4	13,9	9,5	7,4	7,4	5,7	5,7
V154_45_V153_0	12,1	8,2	12,1	8,3	a	a	5,3	5,3
V154_45_V153_45	15,9	10,0	15,9	10,2	10,3	7,1	6,2	5,8
V154_45_V153_90	19,8	12,2	19,8	12,4	15,1	9,8	13,1	10,3
V154_45_V154_0	10,6	7,6	10,6	7,6	a	a	a	a
V154_45_V154_45	6,9	5,9	6,9	5,9	a	a	a	a
V154_45_V154_90	13,5	9,0	13,5	9,1	7,4	7,4	7,8	6,8
V154_45_V183	14,7	9,0	14,7	9,0	a	a	a	a
V154_90_V103	12,9	8,1	12,9	8,1	a	a	a	a
V154_90_V110	16,5	10,2	16,5	10,2	a	a	a	a
V154_90_V125	14,9	9,8	14,9	9,8	a	a	a	a
V154_90_V153_0	8,6	6,8	8,6	6,8	a	a	a	a
V154_90_V153_45	9,4	8,0	9,4	8,0	a	a	a	a
V154_90_V153_90	14,5	10,1	14,5	10,2	13,1	9,3	8,9	7,3
V154_90_V154_0	6,9	6,9	6,9	6,9	a	a	a	a
V154_90_V154_45	8,2	6,6	8,2	6,6	a	a	a	a
V154_90_V154_90	8,1	6,5	8,1	6,5	a	a	a	a
V154_90_V183	12,6	8,8	12,6	8,8	a	a	a	a
V183_V103	33,0	17,2	30,6	16,4	30,9	18,3	33,0	18,1
V183_V110	28,8	13,3	28,8	13,4	18,6	12,4	18,0	11,8
V183_V125	35,1	17,2	35,1	17,6	27,8	16,0	23,2	13,8
V183_V153_0	25,5	11,9	25,5	12,0	20,0	12,2	11,9	9,1
V183_V153_45	18,3	10,1	18,3	10,3	12,4	8,8	11,7	8,6
V183_V153_90	22,7	11,8	22,7	12,0	15,6	10,1	14,4	10,5
V183_V154_0	20,1	10,2	20,1	10,2	11,7	9,8	12,5	9,5
V183_V154_45	15,1	8,4	15,1	8,6	8,5	6,9	7,9	6,4
V183_V154_90	17,1	11,7	17,1	11,8	7,4	7,4	7,8	6,6
V183_V183	35,0	16,4	35,0	16,8	25,5	14,3	19,2	12,3

Tabelle 5.3: SNR-Werte der liegend-liegend-Messungen aller Transducerkombinationen

Signal-to-Noise-Ratios der liegend-liegend-RBT-Messungen mit verschiedenen Auflagewinkeln

Hier sind die SNR-Werte der liegend-liegend-Messungen unter Berücksichtigung verschiedener Auflagewinkel angegeben. Der durch einen - getrennten Zusatz steht dafür jeweils für den Auflagewinkel der beiden Transducer in Grad.

0 Grad	Max	Avg	Max 100	Avg 100	Max 200	Avg 200	Max 300	Avg 300
V103_V153_90-0	41,5	16,9	27,8	11,1	27,2	10,9	41,5	21,0
V125_V103-0	36,5	18,9	26,1	14,7	33,7	18,8	36,5	21,4
V125_V125-0	42,6	20,4	30,5	14,8	39,4	21,9	42,6	21,6
V153_90_V103-0	42,7	19,1	32,7	14,3	38,0	17,0	42,7	22,1
V154_45_V153_90-0	52,1	25,5	45,8	21,9	46,5	24,5	52,1	28,4
5 Grad								
V103_V153_90-5	43,4	22,0	37,9	20,4	42,8	22,9	43,4	22,5
V125_V103-5	50,1	23,8	38,6	20,9	36,7	22,3	50,1	25,8
V125_V125-5	46,0	22,3	46,0	24,5	39,1	19,5	38,2	17,9
V153_90_V103-5	43,9	22,7	36,3	19,3	43,9	24,2	42,3	23,4
V154_45_V153_90-5	52,6	28,0	51,1	27,5	52,6	28,4	50,8	28,3
10 Grad								
V103_V153_90-10	44,9	24,8	36,2	20,7	44,9	25,8	44,5	26,0
V125_V103-10	42,8	19,8	42,8	22,6	34,3	16,3	35,6	14,6
V125_V125-10	44,3	23,3	35,9	19,0	39,6	23,3	44,3	25,8
V153_90_V103-10	45,0	24,2	35,4	20,1	45,0	25,1	44,2	25,4
V154_45_V153_90-10	53,7	28,0	48,7	25,7	47,3	25,2	53,7	30,7
20 Grad								
V103_V153_90-20	33,7	18,0	33,7	17,9	32,8	18,8	19,1	12,8
V125_V103-20	41,8	20,9	41,8	23,0	39,3	19,7	33,1	13,1
V125_V125-20	45,3	23,9	42,7	23,3	43,3	24,3	45,3	24,2
V153_90_V103-20	34,3	13,2	34,3	16,2	30,2	10,4	16,2	13,4
V154_45_V153_90-20	56,4	30,0	49,8	27,0	50,4	29,1	56,4	31,9
30 Grad								
V103_V153_90-30	41,8	22,5	41,8	22,6	41,0	23,0	39,7	21,8
V125_V103-30	41,2	17,8	41,2	22,0	30,7	14,0	30,1	9,8
V125_V125-30	41,5	17,8	41,5	21,9	26,9	10,0	32,8	10,9
V153_90_V103-30	34,4	12,9	34,4	16,4	27,0	9,9	25,3	11,2
V154_45_V153_90-30	56,7	29,6	51,0	27,2	52,9	28,7	56,7	31,5
40 Grad								
V103_V153_90-40	45,2	21,0	39,3	21,8	36,6	18,4	45,2	21,3
V125_V103-40	39,9	20,1	37,7	21,7	39,9	19,9	38,2	17,7
V125_V125-40	46,9	22,7	46,9	26,0	35,8	14,6	42,8	18,2
V153_90_V103-40	42,9	22,9	42,9	23,4	40,1	23,2	39,4	20,1
V154_45_V153_90-40	54,3	28,7	45,6	25,6	48,0	26,4	54,3	31,4
45 Grad								
V103_V153_90-45	42,5	17,4	40,8	20,4	32,1	15,9	42,5	15,2
V125_V103-45	43,3	21,0	41,0	22,2	43,3	21,3	38,3	18,1
V125_V125-45	44,3	22,5	44,3	24,8	37,0	18,7	43,8	21,0
V153_90_V103-45	42,4	18,7	37,7	19,6	35,3	16,1	42,4	19,7
V154_45_V153_90-45	36,2	19,2	36,2	19,7	29,6	16,1	25,3	14,7

Tabelle 5.4: SNR-Werte der liegend-liegend-Messungen mit verschiedenen Auflagewinkeln

Signal-to-Noise-Ratios der hängend-hängend-RBT-Messungen

Hier sind die SNRs für die hängend-hängend-RBT-Messungen angeführt, wobei wieder Abkürzungen verwendet wurden. RBT_Alt steht für die Verwendung des bereits vorhandenen RBT-Aufbaus. Das Kürzel tc steht für die technische Keramik (Siliciumcarbid), die bereits bei den liegend-liegend-Messungen verwendet wurde, cuzn steht für den Messingzylinder 2/2, wie er in Tabelle 3.9 angegeben ist und oak steht für den Eichenbalken aus ebenjener Tabelle. Die mit _ abgetrennten Indizes 1 und 2 nach V183 stehen für den ersten beziehungsweise zweiten Transducer dieses Typs, diese wurden unterschieden, da es durch den Aufklebevorgang zu Verschiedenheiten zwischen den baugleichen Transducern gekommen sein könnte. Auch hier steht wieder der erstgenannte Transducer für den Transmitter, der zweite für den Receiver, das Kürzel Alt steht für den Transducer aus dem alten RBT-Setup, während Laut für den Lautsprecher steht, der im alten Setup zum Anregen verwendet wurde.

	Max	Avg	Max 100	Avg 100	Max 200	Avg 200	Max 300	Avg 300
RBT_ALT_Aluzylinder	52,5	27,1	48,2	26,2	52,5	29,4	44,0	25,7
RBT_ALT_Eichenbalken	28,1	15,4	28,1	17,1	24,5	14,8	19,8	12,3
RBT_ALT_Glaszylinder	41,9	21,3	41,9	23,0	38,6	20,1	23,4	11,2
RBT_ALT_Hintergrund	21,5	11,6	18,2	10,5	21,5	13,9	11,9	6,8
RBT_ALT_Laerchenbalken	30,8	18,1	30,8	21,2	16,2	9,3	12,7	7,6
RBT_ALT_Messingzylinder	64,1	34,6	64,1	39,2	47,3	26,4	41,5	22,4
RBT_ALT_Spaghetti	34,9	17,8	34,9	20,2	27,9	16,5	15,4	9,8
RBT_ALT_tc	52,2	30,1	52,2	32,4	44,2	26,8	26,3	16,4
RBT_V183_V183_Aluzylinder	39,2	15,4	39,2	18,1	32,4	12,9	30,3	12,9
RBT_V183_V183_Eichenbalken	11,5	6,9	11,2	6,9	11,4	6,9	11,5	6,9
RBT_V183_V183_Glaszylinder	20,4	7,7	14,0	6,9	17,2	7,7	20,4	8,4
RBT_V183_V183_Hintergrund	11,9	6,9	11,3	6,8	11,5	7,0	11,9	6,9
RBT_V183_V183_Laerchenbalken	12,3	6,9	11,6	6,6	11,8	7,0	12,3	7,0
RBT_V183_V183_Messingzylinder	44,3	22,8	44,3	21,0	40,4	24,1	37,2	22,1
RBT_V183_V183_Sapelli_Balken	13,4	7,1	13,4	7,4	11,3	6,9	11,6	6,9
RBT_V183_V183_Spaghetti	13,0	6,9	11,5	6,8	11,9	7,0	13,0	7,0
RBT_V183_V183_tc	49,4	23,1	49,4	27,5	35,8	17,4	26,9	13,5
RBT_V183_V183_Zebrano_Balken	12,3	6,9	12,3	6,9	10,9	7,0	11,6	6,9

Tabelle 5.5: SNR-Werte der hängend-hängend-Messungen mit verschiedenen Materialien

	Max	Avg	Max 100	Avg 100	Max 200	Avg 200	Max 300	Avg 300
Alt_Laut_cuzn	45,2	23,0	45,2	24,3	37,0	18,0	42,6	22,6
Alt_Laut_oak	26,7	15,8	23,3	14,0	26,7	17,1	9,7	6,6
Alt_Laut_tc	51,6	27,1	51,6	27,2	50,9	27,8	41,0	22,2
Alt_V183_1_cuzn	56,6	28,6	56,6	31,0	37,5	17,9	44,3	26,5
Alt_V183_1_oak	12,0	6,8	12,0	7,0	11,4	6,8	10,9	6,8
Alt_V183_1_tc	45,1	20,3	45,1	22,3	37,9	19,1	35,0	14,4
Alt_V183_2_cuzn	55,8	28,0	55,8	31,2	38,7	19,6	40,6	22,0
Alt_V183_2_oak	14,3	7,8	13,9	8,5	14,3	7,6	12,3	7,0
Alt_V183_2_tc	44,8	19,9	44,8	21,9	37,4	19,0	32,7	12,7
Laut_Alt_cuzn	54,9	28,6	54,9	32,1	35,2	19,3	45,3	25,0
Laut_Alt_oak	22,1	9,9	22,1	12,1	13,3	8,5	11,9	7,4
Laut_Alt_tc	51,8	26,8	51,8	27,7	51,4	26,9	41,1	21,2
Laut_V183_1_cuzn	45,3	23,8	45,3	22,1	38,9	20,9	43,3	25,4
Laut_V183_1_oak	13,0	7,0	13,0	7,3	11,2	6,9	11,2	6,8
Laut_V183_1_tc	48,6	25,5	40,3	22,6	44,9	23,8	48,6	29,3
Laut_V183_2_cuzn	44,1	22,2	44,1	22,5	39,2	21,3	40,8	22,5
Laut_V183_2_oak	15,8	7,0	15,8	7,4	12,7	7,1	9,9	6,4
Laut_V183_2_tc	48,0	25,7	39,5	19,5	48,0	26,8	43,8	26,4
V183_1_Alt_cuzn	62,7	33,1	62,7	36,8	38,3	20,0	36,8	19,9
V183_1_Alt_oak	14,9	7,4	14,9	8,2	11,0	7,0	11,3	6,9
V183_1_Alt_tc	51,8	24,8	51,8	27,8	27,7	17,9	27,9	9,9
V183_1_Laut_cuzn	46,8	25,0	46,6	22,6	40,5	21,6	46,8	27,1
V183_1_Laut_oak	20,6	7,5	18,8	7,5	15,9	7,4	20,6	7,7
V183_1_Laut_tc	48,1	25,7	41,0	24,5	45,1	24,2	48,1	28,8
V183_1_V183_2_cuzn	48,8	20,4	48,8	24,3	34,9	18,4	33,0	16,4
V183_1_V183_2_oak	12,0	6,8	11,0	6,6	11,9	6,9	12,0	6,8
V183_1_V183_2_tc	40,1	14,5	40,1	18,3	27,1	9,9	26,9	12,1
V183_2_Alt_cuzn	62,4	32,2	62,4	36,0	35,6	18,1	36,1	19,9
V183_2_Alt_oak	18,6	8,7	18,6	10,4	11,5	6,8	12,1	7,2
V183_2_Alt_tc	43,2	18,5	43,2	21,3	32,6	16,5	29,8	10,5
V183_2_Laut_cuzn	43,4	21,3	37,9	16,5	43,4	21,6	41,2	22,4
V183_2_Laut_oak	16,6	7,3	16,6	7,1	14,7	7,5	14,8	7,2
V183_2_Laut_tc	47,3	24,5	38,3	17,9	47,3	26,3	42,8	24,2
V183_2_V183_1_cuzn	42,4	15,9	42,4	18,3	27,4	11,7	33,0	15,5
V183_2_V183_1_oak	12,6	6,9	12,6	6,8	11,5	7,0	11,8	6,9
V183_2_V183_1_tc	41,1	16,0	41,1	20,3	26,4	10,2	29,7	11,7

Tabelle 5.6: SNR-Werte der hängend-hängend-Messungen mit verschiedenen Transducerkombinationen

Signal-to-Noise-Ratios der hängend-liegend-RBT-Messungen

Hier sind die SNR-Werte für die hängend-liegend-Testung angeführt, zusätzlich zu den bereits erklärten Kürzeln wurde hier mit - der Auflagewinkel des liegenden Transducers in Grad angegeben.

	Max	Avg	Max 100	Avg 100	Max 200	Avg 200	Max 300	Avg 300
Alt_V103-10	58,3	30,4	58,3	32,5	42,4	24,5	40,2	20,2
Alt_V110-10	12,4	6,9	9,9	6,8	12,4	7,0	11,2	6,8
Alt_V125-10	49,6	25,9	49,6	26,5	36,0	20,3	41,5	25,7
Alt_V125-20	49,3	25,5	49,3	27,5	35,3	21,6	39,6	20,5
Alt_V125-5	45,3	25,0	44,9	24,7	31,6	20,3	45,3	26,2
Alt_V153_0-10	49,3	28,1	49,3	29,2	42,3	24,5	44,8	27,5
Alt_V153_45-10	47,9	26,2	47,9	27,8	35,8	19,3	47,1	24,3
Alt_V153_90-10	47,8	27,3	47,8	28,6	31,7	17,4	45,5	27,4
Leermessung_Alt_V125-10	12,2	6,9	12,2	6,8	12,1	6,9	11,9	7,0
V125-5_ALT	46,0	26,5	46,0	26,9	28,0	15,4	45,3	26,3

Tabelle 5.7: SNR-Werte der hängend-liegend-Messungen

Signal-to-Noise-Ratios der Testungen am alten und neuen RUS im Vergleich

Die SNR-Werte der Messungen am alten und neuen RUS sind nachfolgend angeführt. Der Index Altes_RUS steht für Messungen mit dem alten RUS, bei den Messungen am neuen RUS sind in gewohnter Weise die Transducer angegeben. Nachfolgend nach der Angabe der Messapparaturparameter ist die Angabe des Probentyps.

	Max	Avg	Max 100	Avg 100	Max 200	Avg 200	Max 300	Avg 300
Altes_RUS_Ebenholz	21,0	10,7	21,0	12,1	12,1	7,5	13,0	10,2
Altes_RUS_Glaskugel	45,5	22,8	14,6	8,8	45,5	24,3	36,3	23,1
Altes_RUS_Leermessung	11,6	6,8	11,5	6,8	11,6	6,9	11,5	6,8
Altes_RUS_Siliciumcarbid	22,9	11,2	22,9	13,4	a	a	12,8	7,5
Altes_RUS_Zirkonoxid	44,8	22,6	16,7	9,4	40,6	23,8	44,8	24,5
V103_V153_Ebenholz	28,5	11,6	28,5	14,9	12,2	8,5	8,6	6,4
V103_V153_Glaskugel	47,8	25,9	31,0	24,4	47,8	27,5	36,6	21,4
V103_V153_Siliciumcarbid	30,0	14,1	30,0	19,0	13,6	8,1	13,7	8,5
V103_V153_Zirkonoxid	44,2	24,7	40,2	24,9	40,5	19,7	44,2	26,4
V125_V103_Ebenholz	27,4	12,4	27,4	13,6	10,0	6,5	8,2	5,9
V125_V103_Glaskugel	36,2	19,9	15,6	9,5	36,2	21,5	32,1	18,8
V125_V103_Siliciumcarbid	23,4	14,0	23,4	14,5	6,2	5,5	6,7	5,3
V125_V103_Zirkonoxid	38,7	19,8	14,9	7,7	24,6	11,2	38,7	22,0
V125_V125_Ebenholz	23,9	13,2	23,9	14,0	5,5	5,2	7,2	5,8
V125_V125_Glaskugel	31,9	16,4	16,4	10,9	31,9	17,8	27,5	16,3
V125_V125_Leermessung_Erdung	12,6	7,6	11,0	6,7	12,6	7,9	12,4	7,9
V125_V125_Leermessung_Metallplatte	11,6	6,8	11,6	6,9	9,5	6,4	6,5	5,5
V125_V125_Leermessung_ohne_Erdung	15,5	9,3	11,3	6,8	14,5	9,3	15,5	10,5
V125_V125_Siliciumcarbid	20,6	13,3	20,6	13,4	5,0	5,0	5,3	5,2
V125_V125_Zirkonoxid	29,5	13,2	16,5	10,3	7,0	6,1	29,5	14,9
V125_V125_Zirkonoxid_andere_Richtung	37,2	17,0	15,1	9,4	20,8	10,0	37,2	19,1
V153_V103_Ebenholz	21,4	10,8	21,4	11,1	15,9	10,9	6,0	5,3
V153_V103_Glaskugel	46,6	25,9	32,6	26,5	46,6	27,8	26,2	15,6
V153_V103_Siliciumcarbid	35,5	17,5	35,5	19,6	8,8	6,3	11,3	7,1
V153_V103_Zirkonoxid	45,6	24,1	39,4	23,5	45,6	25,1	45,5	23,8
V154_V143_Ebenholz	30,2	11,6	30,2	15,1	10,1	7,6	7,7	6,3
V154_V153_Glaskugel	46,4	24,4	38,8	26,3	46,4	25,5	37,4	20,5
V154_V153_Siliciumcarbid	33,8	19,0	33,8	20,9	a	a	8,4	6,8
V154_V153_Zirkonoxid	50,1	26,1	40,0	24,1	50,1	29,3	42,6	23,4

Tabelle 5.8: SNR-Werte der Messungen am alten und neuen RUS-Aufbau

Signal-to-Noise-Ratios der vertikalen RUS-Messungen

Für die vertikalen RUS-Messungen wurden die Indizes o und u eingeführt, die dafür stehen, ob sich der jeweilige Transducer im Messaufbau oben oder unten befand.

	Max	Avg	Max 100	Avg 100	Max 200	Avg 200	Max 300	Avg 300
Leermessung_V153_o_V103_u-V	16,5	7,7	13,1	5,7	16,5	9,0	15,4	7,2
V103_u_V153_o_Glaskugel-V	38,9	18,9	29,9	15,4	38,9	20,7	30,5	15,7
V103_u_V153_o_Zirkonoxid-V	44,7	23,8	42,2	22,6	43,0	23,7	44,7	24,2
V125_o_V103_u_Glaskugel-V	39,5	20,5	17,2	9,3	39,5	22,6	32,8	18,3
V125_o_V103_u_Zirkonoxid-V	43,9	19,8	16,7	6,4	34,1	13,5	43,9	23,3
V125_u_V103_o_Glaskugel-V	37,2	18,6	12,7	7,8	37,2	20,6	29,6	16,5
V125_u_V103_o_Zirkonoxid-V	41,6	18,1	13,4	5,6	23,8	8,2	41,6	22,3
V125_V125_Glaskugel-V	35,2	17,3	15,4	7,8	35,2	19,3	30,8	17,5
V125_V125_Zirkonoxid-V	42,2	17,5	10,0	5,5	30,3	11,0	42,2	21,7
V153_o_V103_u_Glaskugel-V	38,6	18,8	29,2	15,0	38,6	20,7	30,4	15,7
V153_o_V103_u_Zirkonoxid-V	45,3	21,4	35,3	15,1	45,3	23,3	42,4	22,2
V154_u_V153_o_Glaskugel-V	44,7	22,9	34,5	23,6	44,7	23,8	37,6	20,6
V154_u_V153_o_Zirkonoxid-V	49,6	27,1	32,2	19,8	49,6	28,2	46,3	27,2

Tabelle 5.9: SNR-Werte der Messungen am vertikalen RUS

Python Skript zur Berechnung der Signal-to-Noise-Ratio Version 1

Nachfolgend sind die Python-Skripte, die zur Berechnung der SNR verwendet wurden angeführt. Erklärungen sind mit # gekennzeichnet.

```
#Import der verwendeten Packages
import csv
import numpy
import matplotlib.pyplot as plt

#Festlegen der Parameter
Freqmin=0
Freqmax=1000
Peakbreite=230
Peakmin=-100
Peakanzahl=1
```

```

#Import der CSV Datei
file = open("Dateipfad", "r")
data = list(csv.reader(file, delimiter=","))
file.close()
dBm=[float(row[1]) for row in data[1:]]
Frequency=[float(row[0]) for row in data[1:]]

#Gesamter Plot
plt.plot(Frequency, dBm)
plt.title("Gesamter Frequenzbereich", fontdict=None, loc='center', pad=None)
plt.xlabel('Frequenz in kHz')
plt.ylabel('Gain in dBm')
plt.show()

#Limitieren des Frequenzbereiches
t=0
for i in range(len(dBm)):
    if Frequency[i]<Freqmin:
        t += 1
del Frequency[0:t]
del dBm[0:t]
r=0
for i in range(len(dBm)):
    if Frequency[i]>Freqmax:
        r += 1
del Frequency[len(dBm)-r:len(dBm)]
del dBm[len(dBm)-r:len(dBm)]

#Erster Plot
plt.plot(Frequency, dBm)
plt.title("Ausgewählter Frequenzbereich", fontdict=None, loc='center', pad=None)
plt.xlabel('Frequenz in kHz')
plt.ylabel('Gain in dBm')
plt.show()

#Bestimmung des Peaks und der Zahl der Datenpunkte
print("Verwendete Einstellungen:", "Zugelassener Frequenzbereich = [", Freqmin, ", ", Freqmax, "] kHz", "Halbe Peakbreite = ", Peakbreite, "Datenpunkte, Minimale Peakhöhe = ", Peakmin, "dBm, Maximalanzahl der Peaks", Peakanzahl)
Peakwertanfang = max(dBm)
print("Höchster Peak bei:", Peakwertanfang, "dBm")
Peakindex=dBm.index(Peakwertanfang)
print("Frequenz des Höchsten Peaks:", Frequency[Peakindex], "kHz")

```

```

print("Zahl der Datenpunkte im Frequenzbereich:",len(dBm))

#Entfernen von Datenpunkten rund um die Peaks
for i in range(Peakanzahl):
    if max(dBm) >= Peakmin:
        Peakwert = max(dBm)
        Peakindex=dBm.index(Peakwert)
        del dBm[Peakindex-Peakbreite:Peakindex+Peakbreite]
        del Frequency[Peakindex-Peakbreite:Peakindex+Peakbreite]
        print("Zwischenzählung der Datenpunkte:",len(dBm))
        if max(dBm) < Peakmin:
            break
print("Zahl der Hintergrunddatenpunkte:", len(dBm))

#Zweiter Plot
plt.plot(Frequency, dBm)
plt.title("Ohne Peaks", fontdict=None, loc='center', pad=None)
plt.xlabel('Frequenz in kHz')
plt.ylabel('Gain in dBm')
plt.show()

#Berechnung der SNR und Ausgabe
s=0
for i in range(len(dBm)):
    s += pow(10,0.1*dBm[i])
m=10*numpy.log10(s/len(dBm))
print("Der Mittelwert des Hintergrunds ist:", m,"dBm")
snr=(Peakwertanfang-m)
print("Die Signal-to-Noise-Ratio beträgt",snr,"dB")

```

Python Skript zur Berechnung der Signal-to-Noise-Ratio Version 2

```

#Import der verwendeten Packages
from glob import glob
from os.path import basename
import numpy as np
from numpy import log
from lmfit import Model
import matplotlib.pyplot as plt

#Festlegen auf einen Dateipfad
fpath = "Dateipfad" + "/*.csv"

```

```

#Einführen neuer Parameter
filenames=[]
avgsnr=[]
maxsnr=[]
avgsnr100=[]
avgsnr200=[]
avgsnr300=[]
maxsnr100=[]
maxsnr200=[]
maxsnr300=[]

#Festlegen des cutoff Wertes für Peaks
cutoff = 5.0

#Definition einer Funktion für LMfit
def poly(x, k, d, j, l):
    """1-d poly: poly(x, k, d, j, l)"""
    return (k*x**l+d+j*log(x))

#Loop durch alle Dateien im Verzeichnis
for file in glob(fpath):
    # Extrahieren der Metadaten aus dem Dateinamen
    fname = basename(file)
    x, y, p = np.genfromtxt(file, skip_header=1, unpack=True, delimiter=",")
    gmodel = Model(poly)
    result = gmodel.fit(y, x=x, k=1, d=-131, j=5, e=1, l=1)
    print(result.fit_report())
    ycorr=y-result.best_fit

#Erstellen des Plots Signal und Hintergrundlinie
plt.title('Signal und Hintergrundlinie')
plt.xlabel('Frequenz in kHz')
plt.ylabel('gain in dBm')
plt.plot(x, y, 'o')
plt.plot(x, result.best_fit, '-', label='best fit')
plt.legend()
plt.savefig(fname+'_Signal.png', dpi=500)
plt.show()

#Eintragen des höchsten Peaks in die Ausgabedatei und Vorsorge für den Fall keines
Peaks b = np.argwhere(ycorr>cutoff)
ypeak=[]

```

```

for i in b:
    ypeak.append(ycorr[i])
xpeak=[]
for i in b:
    xpeak.append(x[i])
if len(ypeak)==0:
    maxsignal='nan'
    m='nan'
else:
    maxsignal=max(ypeak)
    s=0
    for i in range(len(ypeak)):
        s += pow(10,0.1*ypeak[i])
    m=10*np.log10(s/len(ypeak))

```

```

#Plot des Ausschnitts mit den Peaks
plt.plot(xpeak, ypeak, '-')
plt.axhline(y=m, label='Mean', color='red')
plt.axhline(y=maxsignal, label='Max', color='blue')
plt.legend()
plt.savefig(fname+'_Ausschnitt.png', dpi=500)
plt.show()

```

```

#Plot ohne Hintergrund
plt.plot(x, y-result.best_fit, '-')
plt.axhline(y=m, label='Mean', color='red')
plt.axhline(y=maxsignal, label='Max', color='blue')
plt.legend()
plt.savefig(fname+'_ohne_Hintergrund.png', dpi=500)
plt.show()

```

```

#Ermitteln der Peakwerte in den verschiedenen Frequenzbereichen, Eintragen und Ausgabe der SNRs
y100=[]
ypeak100=[]
for i in range(0, 2640):
    y100.append(ycorr[i])
ya100=np.array(y100)
b100 = np.argwhere(ya100>cutoff)
for i in b100:
    ypeak100.append(ya100[i])
if len(ypeak100)==0:
    max100='nan'

```

```

m100='nan'
else:
max100=max(ypeak100)
s=0
for i in range(len(ypeak100)):
s += pow(10,0.1*ypeak100[i])
m100=10*np.log10(s/len(ypeak100))

```

```

y200=[]
ypeak200=[]
for i in range(2640, 5306):
y200.append(ycorr[i])
ya200=np.array(y200)
b200 = np.argwhere(ya200>cutoff)
for i in b200:
ypeak200.append(ya200[i])
if len(ypeak200)==0:
max200='nan'
m200='nan'
else:
max200=max(ypeak200)
s=0
for i in range(len(ypeak200)):
s += pow(10,0.1*ypeak200[i])
m200=10*np.log10(s/len(ypeak200))

```

```

y300=[]
ypeak300=[]
for i in range(5307, 8000):
y300.append(ycorr[i])
ya300=np.array(y300)
b300 = np.argwhere(ya300>cutoff)
for i in b300:
ypeak300.append(ya300[i])
if len(ypeak300)==0:
max300='nan'
m300='nan'
else:
max300=max(ypeak300)
s=0
for i in range(len(ypeak300)):
s += pow(10,0.1*ypeak300[i])
m300=10*np.log10(s/len(ypeak300))

```



```

filenames.append(fname)
maxsnr.append(maxsignal)
avgsnr.append(m)
maxsnr100.append(max100)
maxsnr200.append(max200)
maxsnr300.append(max300)
avgsnr100.append(m100)
avgsnr200.append(m200)
avgsnr300.append(m300)

```

```

Names=np.array([filenames])
with open('dataSNR.dat','w') as file:
for i in range(0,len(filenames)):
file.write(filenames[i] + ' ' +str(maxsnr[i])[1:-1]+' ' + str(avgsnr[i])[1:-1]+' ' +str(maxsnr100[i])[1:-1]+' ' +str(avgsnr100[i])[1:-1]+' ' +str(maxsnr200[i])[1:-1]+' ' +str(avgsnr200[i])[1:-1]+' ' +str(maxsnr300[i])[1:-1]+' ' +str(avgsnr300[i])[1:-1]+' n')

```