

# Zusammenfassung Projekt „WIR! – iMATECH – ModiMusiHolz- Holzmodifikation regionaler Holzarten im Musikinstrumentenbau;

**TP1: Bauteilspezifische Verfahrensentwicklung und mechanisch sorptive Charakterisierung zur Holzmodifikation regionaler Holzarten im Musikinstrumentenbau**

**TP2: Akustische und schwingungstechnische Auslegung und Charakterisierung**

**TP3: Fertigungstechnische Analyse“**

<b>Ausführlicher Projekttitle:</b>	Holzmodifikation regionaler Holzarten im Musikinstrumentenbau
<b>Kurztitel/Akronym:</b>	ModiMusiHolz
<b>Projektlaufzeit:</b>	01.12.2021 – 30.11.2025

Projektbeteiligte Einrichtungen	Ansprechpartner
TU-DRESDEN Institut für Naturstofftechnik (IfN) Professur für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik	Herr Tobias Dietrich
IfM – Institut für Musikinstrumentenbau e.V. Klingenthaler Straße 42 08267 Klingenthal, OT Zwota	Herr Holger Schiema
Berdani feinste Bestandteile GmbH Wohlhausener Straße 15 08258 Markneukirchen	Herr Daniel Hiller

## Inhaltsverzeichnis

0	Abstract .....	2
1	Projektziele .....	3
2	Projekttablauf .....	5
2.1	AP1 Anforderungsdefinition .....	5
2.2	AP2 Thermische Behandlung .....	8
2.3	AP3 Acetylierung.....	11
2.4	AP 4 Thermodens.....	13
2.5	AP 5 Herstellung, Testung, Muster und Optimierung.....	17
2.6	AP6 Katalogisierung .....	26
3	Wesentliche Projektergebnisse.....	27
4	Potentielle Nutzung der Projektergebnisse .....	28

## 0 Abstract

Ziel im Verbundprojekt ModiMusiHolz zwischen den Partnern Berdani Feinste Bestandteile GmbH, dem Institut für Musikinstrumentenbau sowie der Professur Holztechnik und Faserwerkstofftechnik der TU-Dresden ist die verfahrenstechnologische Entwicklung mehrere Holzmodifikationsmethoden zur Materialsubstitution im Musikinstrumentenbau. Dabei wird der besondere Fokus auf die Bauteile Griffbrett, Wirbel, Saitenhalter, Kinnhalter sowie die Decke, den Boden und die Zargen gelegt. Da diese Bauteile sehr unterschiedliche Anforderungsprofile aufweisen, werden drei verschiedene Modifikationsansätze im Projekt untersucht. Decke und Boden werden bisher aufwendig mehrere Jahre luftgetrocknet und laufen in dieser Zeit Gefahr, von Insekten zerstört zu werden. Die lange Lagerzeit bindet zudem Kapital. Durch eine milde thermische Modifikation kann die Lagerzeit erheblich verkürzt werden. Es wurden Versuche dazu durchgeführt, die mechanisch, sorptiven und akustischen Kennwerte bestimmt sowie die Bearbeitung des Materials analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass eine milde thermische Vergütung das Holz künstlich altern lässt. Es wird steifer und manche akustischen Kennwerte verbessern sich. Die Lagerzeit kann stark reduziert werden, da die inneren Spannungen durch diese Behandlung schneller abgebaut werden. Die gefertigten Instrumente sind klanglich ebenbürtig zu klassisch gefertigten.

Die Zargen als verbindendes Element zwischen Decke und Boden kann in stark wechselnden Feuchteumgebungen starke Spannungen auf Boden und Decke übertragen. Dies kann unter anderem zu Rissen führen. Die Acetylierung kann durch eine starke Dimensionsstabilisierung der so behandelten Zarge helfen, diese Spannungsspitzen aus dem Instrument zu nehmen. Es wurden im Labormaßstab Proben modifiziert sowie am Markt erhältliches acetyliertes Holz klanglich und physikalisch untersucht. Die Dimensionsstabilität gegenüber Feuchte ist stark verbessert, klanglich verändert sich das so behandelte Ahornholz kaum. Allerdings zeigen sich bei der Fertigung größere Probleme durch die starke Versprödung des Materials. Fertige Instrumente für Spieltests konnten daher nicht gebaut werden.

Für die Materialsubstitution der Bestandteile Griffbrett, Wirbel, Saitenhalter und Kinnhalter wurde das Verfahren der Verdichtung von einheimischem Buchenholz mit einer Fixierung der Form angewendet. Das üblicherweise angewendete Ebenholz kann durch seine hohe Dichte nicht durch einheimischen Holzarten ausgetauscht werden. Durch die Verdichtung können Dichten von 1200 bis 1300kg/m<sup>3</sup> erreicht werden, die Farbe wird dabei durch eine thermische Fixierung dunkler. Die mechanischen Eigenschaften verbessern sich stark, vor allem die Härte steigt an. Das verdichtete Holz ist auch stabil gegenüber Luftfeuchteschwankungen. Die akustischen Eigenschaften werden zum Teil besser oder bleiben gleich. Die Spieltests zeigten ein leicht verbessertes Klangverhalten.

Insgesamt konnte im Projekt der erfolgreiche Nachweis geführt werden, dass es technologische Möglichkeiten gibt, um der Materialknappheit im Musikinstrumentenbau zu begegnen. Dabei müssen für die verschiedenen Anforderungen der Einzelbauteile auch verschiedene Modifikationsverfahren angewendet werden. Die gebauten Testinstrumente aus einheimischem modifiziertem Holz zeigten alle ein gleiches oder besseres Klang- und Spielverhalten.

# 1 Projektziele

Die aktuellen Aktivitäten sowohl im Rahmen der europäischen REACH-Verordnung als auch des Washingtoner Artenschutzübereinkommens haben zur Folge, dass bestimmte Materialien, die bisher alternativlos im Musikinstrumentenbau eingesetzt wurden, nur noch mit deutlich erhöhtem Aufwand oder ggf. gar nicht mehr verwendet werden dürfen. Auch wenn die aktuellen Beschlüsse im Zusammenhang mit der REACH-Verordnung im November 2021 und der 19.

Vertragsstaatenkonferenz des Washingtoner Artenschutzübereinkommens im November 2022 zu einer Unterbrechung der Restriktionen führen werden, gilt dies nur für einen sehr begrenzten Zeitraum. Für die kommende CITES Konferenz im Dezember 2025 wird beispielsweise eine Höherstufung von Holz für den Bogenbau (Fernambuk) erwartet. Zu beachten sind auch die Entwicklungen im Zusammenhang mit der Europäischen Holzhandelsverordnung. Hinzu kommt, dass bisher bevorzugte Qualitäten bestimmter Hölzer nicht mehr in ausreichender Menge zur Verfügung stehen.

Die geschilderten Probleme machen es dringend nötig, geeignete Ersatzmaterialien zur Substitution von Tropenhölzern im Musikinstrumentenbau zu finden.

Heimische Hölzer als Ersatz für Tropenhölzer weisen erhebliche akustische Unterschiede sowohl untereinander als auch zu den Tropenhölzern aus. Im Projekt sollen modifizierte einheimische Hölzer geschaffen werden.

Ziel des Gesamtvorhabens ist es die Eigenschaften von modifizierten Hölzern im Musikinstrumentenbau genau zu analysieren und zu bewerten. Hierbei ist die akustische Bewertung, die physikalische Bewertung und die Bewertung der Bearbeitung um den Ansprüchen des Musikinstrumentenbaus gerecht werden, Kernziel des Projektes.

Hierzu werden unterschiedliche Muster modifizierter Hölzer bis hin zu kompletten Instrumenten aus modifizierten Hölzern akustisch und mechanisch untersucht und anhand ihrer Materialwerte charakterisiert. Weiterhin werden vollständige Instrumente aus modifizierten Hölzern mit konstruktiv baugleichen Instrumenten aus Standhölzern akustisch verglichen.

Mit Hilfe einer eigens geschaffenen Materialdatenbank für den Musikinstrumentenbau können somit die zu modifizierten einheimischen Hölzer genau auf die für die Akustik der Instrumente wichtigen Materialparameter angepasst werden.

Im Ergebnis sollen verschiedenste Modifikationsstufen mit Hilfe von 3 Verfahrensweisen entwickelt werden. Die Auswahl für die jeweils optimale Modifikationsstufe erfolgt dann mit Hilfe der Materialdatenbank und den Erfahrungen bezüglich der verfahrenstechnologischen Randbedingungen in diesem Projekt.

Ziel des Gesamtprojektes ist es 3 unterschiedliche Modifikationsvarianten für einheimische Hölzer zu entwickeln. Dabei sollen folgende Modifikation der Werkstoffparameter verändert werden:

## Thermische Modifikation

Hier sollen die Hölzer möglichst farblich dunkler erscheinen (optischer Effekt) und einen natürlichen Alterungseffekt erfahren. Die Werte für die Dichte sollen gesenkt werden (leichtere Hölzer). Die mechanischen Eigenschaften wie Elastizitätsmodul sollen möglichst hoch sein. Die Dämpfung soll sich möglichst nur geringfügig ändern, es werden höhere Werte für akustisch verwendbare Hölzer angestrebt. Die Sorption soll verbessert werden, so dass die Quell- und Schwindbewegungen reduziert werden.

Acetylierung:

Bei diesem Verfahren soll durch das Einbringen von Essigsäureanhydrid das Holz dimensionsstabiler unter Beibehaltung der Farbe modifiziert werden. Ziel ist es helle, formstabile Hölzer herzustellen, welche bessere akustische Eigenschaften haben und als dimensionsstabiler Ersatz für Zargen und Boden verwendet werden können. Idealerweise wird der Klang positiv beeinflusst und die mechanischen Kennwerte ändern sich kaum.

#### Verdichtung mit anschließender thermischer Fixierung (Thermodens)

Bei diesem Verfahren soll zunächst die Dichte erhöht werden, dies erfolgt schrittweise sogar einstellbar. Des Weiteren erhöht sich das Elastizitätsmodul und die Härte der modifizierten Hölzer. Das Holz soll im optischen Eindruck deutlich dunkler werden. Ziel ist es akustische Werte von Tropenhölzern zu erreichen. Dabei wird der sogenannte Rückfederungseffekt verfahrenstechnisch thermisch fixiert und die Quell- Schwindwerte nur wenig beeinflusst.

Ein weiteres Ziel des Teilvorhabens ist es, den Nachweis einer guten Akustik bzw. Spielbarkeit der aus modifizierten Hölzern gefertigten Instrumente beispielhaft für Streich- und Holzblasinstrumente zu erbringen. Hierzu sollen Streich- und Holzblasinstrumente aus favorisierten modifizierten Hölzern gefertigt und anschließend durch Profi-Musiker angespielt werden. Begleitet werden diese Tests durch Befragungen, aufgezeichnete Anspiele, subjektive Hörtests durch Probanden und objektive Messungen der Instrumente hinsichtlich der Schallabstrahlung.

## 2 Projektablauf

Es erfolgte als erstes eine Definition der akustischen Anforderungen an die Bauteile und Erstellung einer bauteilspezifischen Anforderungsliste unter der Berücksichtigung der jeweiligen Musikinstrumentengattung. Hierbei wurden auch die im Projekt „Materialtypisierung“ ermittelten akustischen, schwingungstechnischen, mechanischen, sorptiven und die Bearbeitungsparameter herangezogen, um analoge Eigenschaften im Rahmen der technologischen Verfahrensentwicklung modifizierter Hölzer ermitteln zu können. Ziel war es weiterhin, eine Aussage zur Eignung neuer tropischer Hölzer, welche neben den regionalen Hölzern ebenfalls im Projekt betrachtet wurden, zu erlangen.

Untersuchung der schwingungstechnischen und akustischen Zielparameter der geplanten 3 Holz-Modifikationsverfahren hinsichtlich der Behandlungsregime (Temperatur, Druck, Beladungsgrad, Verdichtung). Es wurden die verfahrenstechnischen Optimalparameter und deren Einfluss auf die akustischen Materialeigenschaften für spätere Ersatzhölzer des Musikinstrumentenbaus ermittelt.

Es sollten die entsprechenden Parameter wie: Zielrohddichte, Elastizitätsmodul und Dämpfung für die jeweiligen Hölzer erreicht werden.

Untersuchung der mechanischen, sorptiven und akustischen Eigenschaften der Materialien unter der Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte). Ebenso wurden die optischen Merkmale aus Sicht der Musikerakzeptanz bestimmt.

Objektive und subjektive Bewertung der Bauteil- und Gesamtinstrumentenmuster. Die objektive Bewertung erfolgte durch die Auswertung von Messungen (z.B. im Reflexionsarmen Raum) und Vergleich des Ergebnisses (z.B. Frequenzspektrum) mit Standardwerkstoffen. Subjektive Bewertung und Einordnung und Vergleich zu baugleichem Standardinstrument erfolgten gemeinsam mit Musikern.

Beurteilung der Bearbeitung. Im iterativen Verfahren wurden die verschieden modifizierten Baugruppen fertigungstechnisch untersucht und die Abläufe und Parameter (Fräsen, Drehen, Bohren, Schleifen, etc.) angepasst.

Katalogisierung der in den vorherigen Arbeitszielen fixierten akustischen Ergebnisse unter anderem in die bestehende Datenbank aus dem Projekt Materialtypisierung.

Einarbeitung der verschiedenen Modifikationsvarianten und deren akustische Werte in der Datenbank für eine spätere Anwendung im Musikinstrumentenbau.

### 2.1 AP1 Anforderungsdefinition

Im Arbeitspaket 1 wurden die Anforderungen an die modifizierten Bauteile hinsichtlich der, schwingungstechnischen und akustischen Kennwerte anhand des Kennwertkataloges aus dem Projekt „Materialtypisierung“ definiert, um analoge Eigenschaften im Rahmen der technologischen Verfahrensentwicklung modifizierter Hölzer ermitteln zu können.

Bzgl. der Anforderungsdefinition der Bauteile wurden die Zielgrößen der akustischen Kennwerte (dynamisches E-Modul, Dichte, Dämpfung und Klangdauer) der verschiedenen Instrumentenbauteile im Detail untersucht und für die jeweilige Holz-Modifikationsvariante festgelegt.

#### Klangdauermessung:

Mit dem Messplatz wurde die Klangdauer einer auf den Knotenpunkten der 1. Schwingungsmode gelagerten Holzprobe mithilfe eines automatisch betätigten Impulshammers sowie mit einem

Mikrofon ermittelt. Weiterhin wurde die Frequenz und die Bandbreite der 1. Schwingungsmode erfasst, somit konnte auch die Materialdämpfung und das dynamische E-Modul berechnet werden.



**Abbildung 1: Modalanalyse zur Ermittlung der Dämpfung und der Klangdauer**

### Ultraschallmessung

Mit dem in Abbildung 2 dargestellten Messplatz zur Ultraschallmessung an Holzproben wurde die Schallgeschwindigkeit längs und quer zur Faserrichtung an Holzprobekörpern ermittelt.

Als Messgerät kam ein Ultraschallmessgerät „Sonowall 70“ der Firma „SONOTEC GmbH“ und Messköpfe im Frequenzbereich 500kHz und 1MHz zum Einsatz. Zur Ankopplung an die Probekörper wurden Koppelfolien verwendet, um eine hohe Reproduzierbarkeit zu erreichen. Die Vorrichtung fand auch bereits im Projekt „Materialtypisierung“ erfolgreichen Einsatz.



**Abbildung 2: Ultraschallprüfung an Holzproben**

Folgende wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse wurden erreicht:

- Die Baugruppen der Streichinstrumente wie (Decke, Boden, Zarge, Griffbrett, Hals und die Nichtkorpuselemente) wurden hinsichtlich der schwingungstechnischen, akustischen, mechanischen und sorptiven Werkstoffparameter untersucht.
- Auf der Basis der Materialkennwerte wie (Dichte, dyn. E-Modul, Dämpfung und Klangdauer, Biegefestigkeit, Härte, Quellung) wurden die zu erreichenden Zielparameter, welche Einfluss auf die Akustik und mechanische Bearbeitung haben untersucht und definiert (Tabelle 1).
- Es wurden neben dem Einfluss des Materials auf den Klang auch Eigenschaften wie die Haptik und Optik analysiert
- Im Bereich Griffbretter gibt es keine neuen tropischen Ersatzmaterialien, aufgrund der besonderen Eigenschaften des derzeit verwendeten Ebenholzes (Härte, Farbe, Dichte)

Folgende Zielgrößen wurden ermittelt:

**Tabelle 1: akustische und schwingungstechnische Zielgrößen der Baugruppen von Instrumenten**

<b>Bauteil /Material</b>	<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Dyn. E-Modul [GPa]</b>	<b>Dämpfung</b>	<b>Klangdauer (1. Mode) [sek]</b>
Decke (Fichte)	0,38- 0,45	9,5-14,5	0,005- 0,0078	0,3 - 0,4
Boden (Ahorn)	0,62-0,67	6,4-13	0,0094- 0,013	0,25 - 0,35
Zarge (Ahorn)	0,62-0,67	6,4-13	0,0094- 0,013	0,25 - 0,35
Hals (Ahorn, und weitere)	0,6- 0,7	6- 14	0,009 – 0,013	ca. 0,3
Griffbrett (Ebenholz)	1-1,3	11-22	0,0045- 0,01	0,3 – 0,6
Nichtkorpuselemente (Ebenholz, Buchsbaum, und andere) (Saitenhalter, Kinnhalter, Wirbel)	>1	>11	>0,0045	> 0,35
Korpus Holzblasinstrumente (Grenadill)	1,25-1,35	>15	0,005-0,0065	0,45-0,65

**Tabelle 2: mechanisch und sorptive Zielgrößen**

<b>Bauteil /Material</b>	<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>E-Modul [GPa]</b>	<b>Härte (MPa)</b>	<b>Quellung Volumen (%)</b>
Decke (Fichte)	0,38- 0,45	9,5-14,5	10-15	15-19
Boden (Ahorn)	0,62- 0,67	6,4-13	20-25	13-17
Zarge (Ahorn)	0,62- 0,67	6,4-13	20-25	13-17
Hals	0,6- 0,7	6- 14	20-30	12-20
Griffbrett (Ebenholz)	1-1,3	11-22	60-85	15-20
Nichtkorpuselemente (Saitenhalter, Kinnhalter, Wirbel) (Ebenholz)	>1	>11	50-85	15-20

## 2.2 AP2 Thermische Behandlung

Im Arbeitspaket 2 wurde die thermische Modifikation in einem Screening auf die Anforderungen (AP1) an die Bauteile untersucht und angepasst. Dafür wurden die Verfahrensparameter der thermischen Modifikation variiert (Zeit/Temperatur/Feuchte). Es wurden die ausgewählten regionalen Hölzer (Ahorn/Fichte) thermisch modifiziert und ihre Eigenschaften bestimmt. Die Arbeiten zu AP 2 gliederten sich in die Arbeitsschritte der Prozessentwicklung und Modifikation sowie in die Kennwertbestimmung. Dafür wurde die Prozesstechnik für die Modifikation angepasst um eine milde thermische Vergütung unter feuchter Druckatmosphäre zu gewährleisten. Nach erfolgreicher Verfahrenvalidierung durch die holzphysikalischen Kennwerte wurden große Bauteile zum fertigen von Testinstrumenten bei der vom Partner gewählten Temperatur von 135°C vergütet. Dazu zählen etwa Fichtendecken-, Ahornhals- und Ahornbodenrohlinge.

Folgende Ergebnisse konnten im Arbeitspaket 2 erreicht werden:

- Die Thermische Modifikation unter Druckatmosphäre konnte erfolgreich für verschiedene Bauteile in Instrumenten (wie Decke, Boden, Zarge, Hals und bestimmte Nichtkorpuselemente angewendet werden)
- Die Modifikation unter feuchtem Druck ändert die Holzaustragsfeuchte während des Prozesses kaum, die Bauteile können sofort weiter bearbeitet werden
- Die Temperaturen können durch die spezielle Modifikation im Gegensatz zu einer klassischen Thermobehandlung stark reduziert werden
- Die Intensität ist aus der Kombination von Behandlungsdauer mit Prozessfeuchte einstellbar
- Überall dort, wo leichte, steife und optisch etwas dunklere Hölzer benötigt bzw. gefordert werden ist der Einsatz dieser modifizierten Hölzer möglich (Decke, Zarge, Hals)
- Durch die thermische Behandlung sinkt die Dichte und das E-Modul steigt leicht an, eine Verbesserung der Schwingeeigenschaften ist damit gegeben

- Die Ausgleichsfeuchte reduziert sich leicht und die Quellung wird reduziert
- Insgesamt verbessert sich damit die Dimensionsstabilität und die Rissanfälligkeit reduziert sich
- Im akustischen Vergleich zweier Violinen aus mild thermisch modifizierten Hölzern zu Referenz-Violine aus traditionell abgelagerten Hölzern stellten wir fest, dass sich die relevanten Merkmale der Akustik ebenfalls nicht verschlechtert haben
- Im Vergleich der mild thermisch modifizierten Violinen mit Violinen aus stark thermisch modifiziertem Holz stellten wir fest, dass die akustischen Merkmale der mild thermisch modifizierten deutlich besser abschneiden
- Das Optimum der thermischen Modifikation liegt bei 135°C und 12h Einwirkzeit
- auch die Optik wurde von Musikern akzeptiert
- Die Bearbeitung ist generell möglich, aufgrund der leichten Versprödung müssen Vorschübe beim Drehen reduziert werden
- die Aufnahme von Ölen und Leimen ist verbessert durch die Behandlung.

Die modifizierten Hölzer bekommen eine angenehme Farbe (Abbildung 3), die einer natürlichen Alterung nahekommt.



Abbildung 3: Links: thermisch modifizierte Fichte unter Druck; Rechts: Links: thermisch modifizierter Ahorn unter Druck

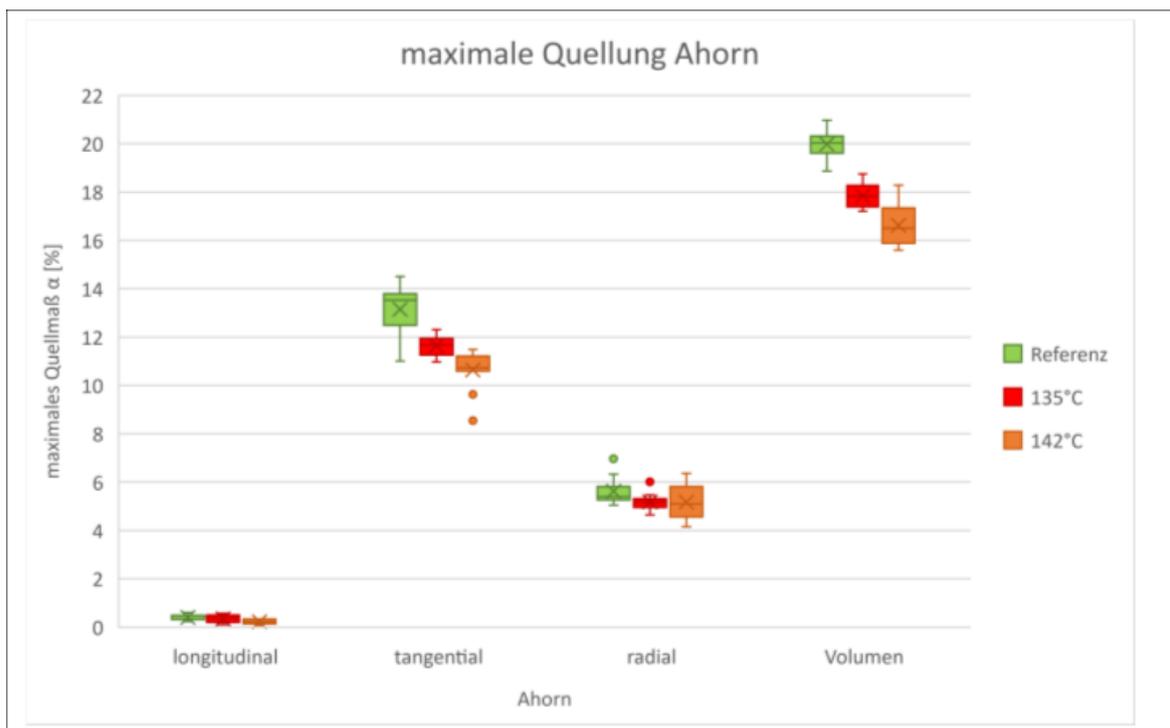
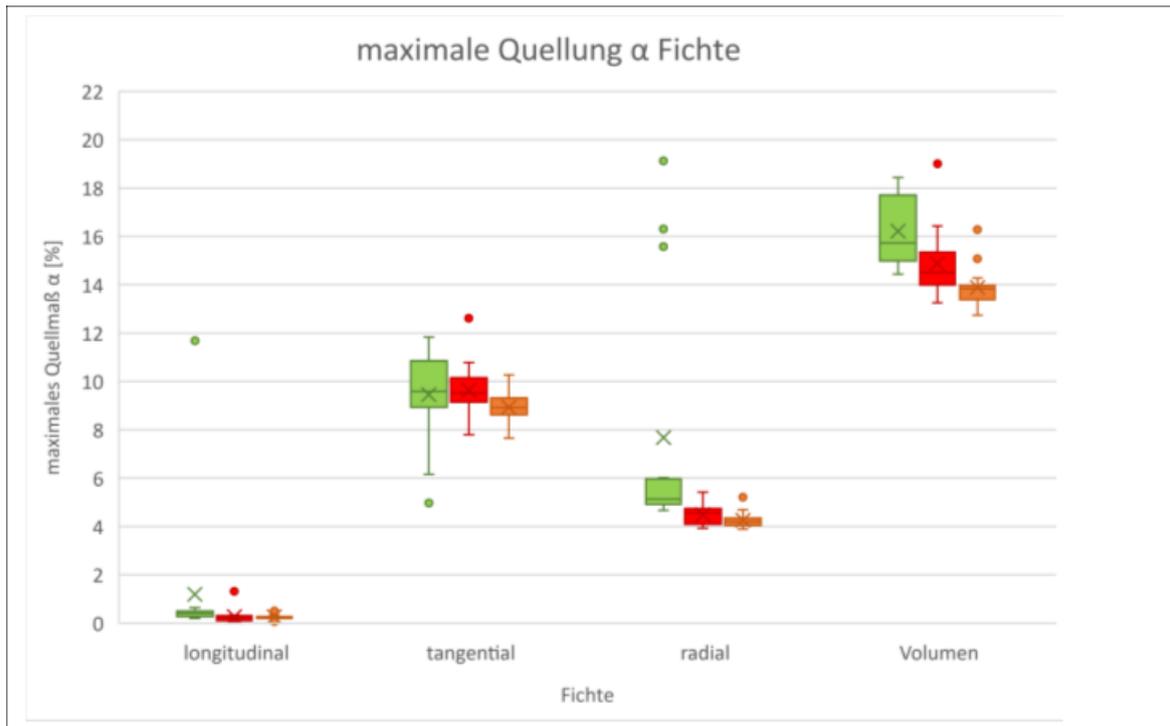


Abbildung 4: Quellung nach Wasserlagerung in allen 3 anatomischen Richtungen, oben: Fichte; unten: Ahorn

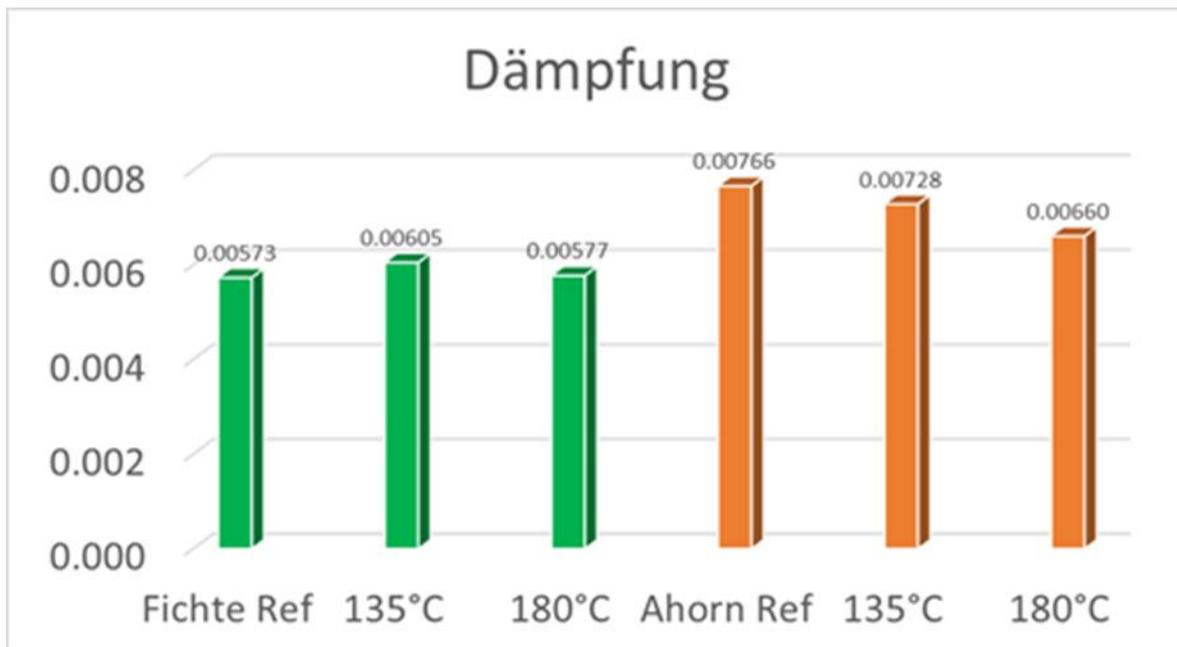


Abbildung 5: Dämpfung in Abhängigkeit der Behandlungsstufen

### 2.3 AP3 Acetylierung

Im Arbeitspaket 3 wurde die Acetylierung auf die akustischen Anforderungen (AP1) an die Bauteile (Zarge) untersucht. Dafür wurden in einem ersten Schritt Ahornproben bei der Firma Accoya modifiziert. Des Weiteren wurde auch das im Industrieprozess verwendete acetylierte Radiata Holz untersucht. Dieses ist sehr leicht und könnte sogar als Deckenmaterial eingesetzt werden. Der chemische Prozess ist kompliziert, könnte aber durch die Firma Accoya für die Instrumentenbauer übernommen werden.

Danach erfolgte die experimentelle Analyse/Untersuchung der akustischen, mechanischen und sorptiven Kennwerte für das Holzmodifizierungsverfahren der Acetylierung. Weiterhin erfolgte eine schrittweise Anpassung der verfahrenstechnischen Parameter in Zusammenarbeit mit der TU-Dresden. Für die Probekörper wurden die optimalen Bereiche ermittelt.

Leider zeigte sich in einem ersten Screening bei der Firma Berdani, dass eine Biegung der Rohzargen im handwerklichen Sinne für dieses Verfahren nicht möglich ist. Durch die starke Versprödung im Prozess bricht das dünne Zargenmaterial beim Biegen und hält die Form nicht. Der Prozess der Acetylierung ist damit zumindest für die im Projekt geplante Modifizierung von Zargen von Streichinstrumenten nicht geeignet.

Das Material wäre ansonsten aus der schwingungstechnischen Sicht hinsichtlich der meisten akustischen Kennwerte durchaus geeignet (siehe Abbildung 9 und 10), jedoch nicht für gebogene Bauteile. Dies könnte in anderen Bereichen des Instrumentenbaus von Vorteil sein und sollte weiterverfolgt werden. (evtl. für Zupfinstrumente). Insgesamt verbessert sich die Dimensionsstabilität stark, was zu einer viel weniger ausgeprägten Rissanfälligkeit führt. Die Instrumente sollten sich außerdem nicht mehr stark verstimmen. Durch die Beibehaltung der Farbe bleibt die gewohnte Optik erhalten. Die mechanischen Eigenschaften ändern sich kaum, das Material wird wie beschrieben allerdings viel spröder.

Folgende Ergebnisse konnten im Arbeitspaket 3 erreicht werden:

- Zargenmaterial aus Ahorn konnte erfolgreich in einem industriellen Prozess acetyliert werden

- Es konnten die schwingungstechnischen, mechanischen und sorptiven Kennwerte von acetyliertem Ahorn bestimmt werden
- Es erfolgte die Überprüfung der akustische Kenngrößen wie (Dämpfung, dyn. E-Modul und die Klangdauer), auch hier wurden die Zielgrößen zum Großteil erreicht, die Dämpfung verschlechtert sich etwas, die Klangdauer ist insgesamt etwas günstiger (Abbildung 6)
- Bei den mechanischen Kennwerten zeigt sich eine deutliche Versprödung und eine etwas geringere Biegefestigkeit, die Dichte sinkt etwas
- dies führt dazu, dass solches Material in Zargen aufgrund der Bruchanfälligkeit für gebogene Bauteile nicht eingesetzt werden kann
- Die weniger dichte Radiatakiefer, die schon kommerziell bei Accoya zu kaufen wäre, zeigt ähnliche Kennwerte wie der bisher genutzte Ahorn (E-Modul, Biegefestigkeit)
- Das Material bleibt nach der Modifizierung hell, dies wird durchaus akzeptiert

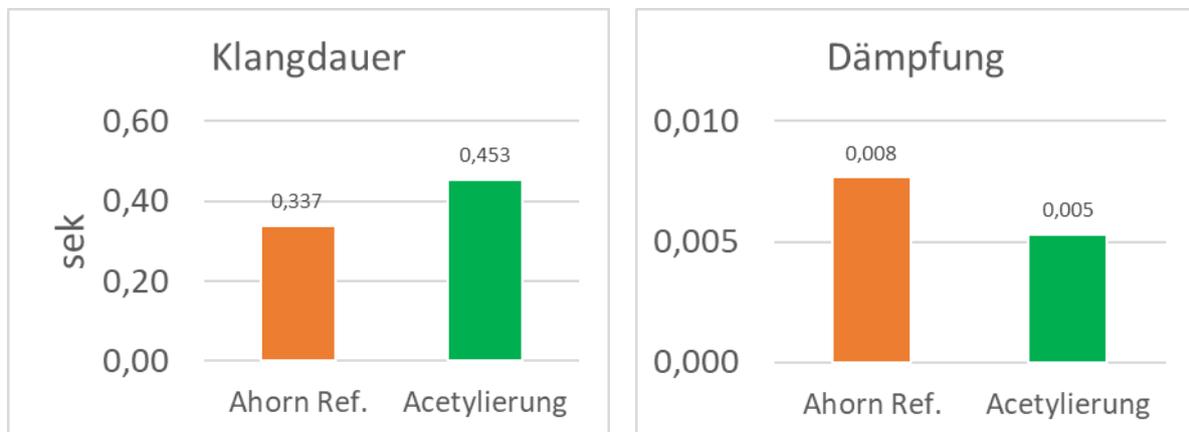


Abbildung 6: Klangdauer und Dämpfung der acetylierten Proben

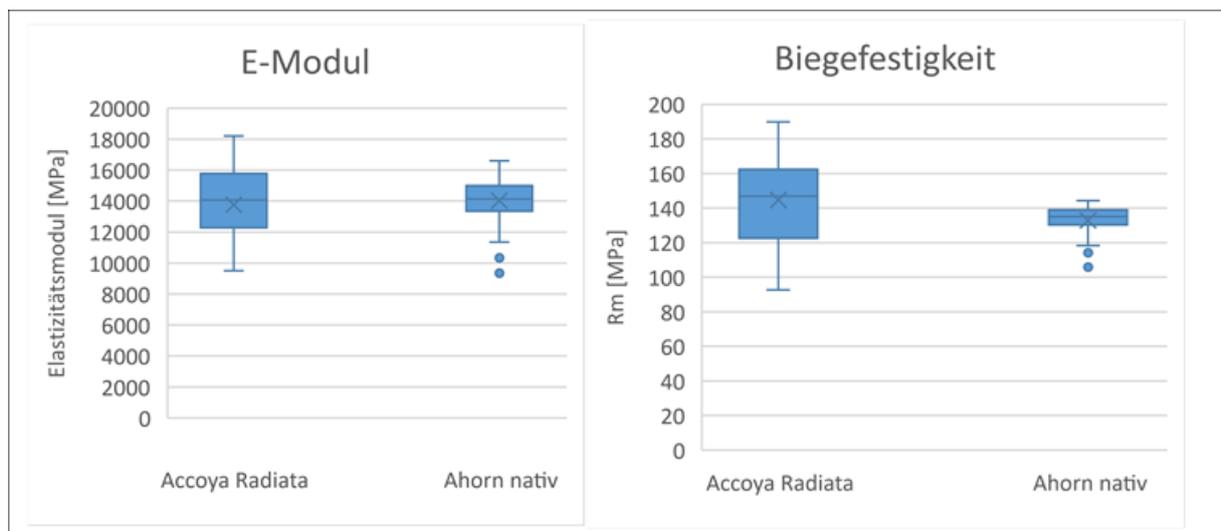


Abbildung 7: Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit von acetyliertem und nativem Ahornholz



Abbildung 8: Risse nach dem Heißbiegen am acetylierten Ahorn

## 2.4 AP 4 Thermodens

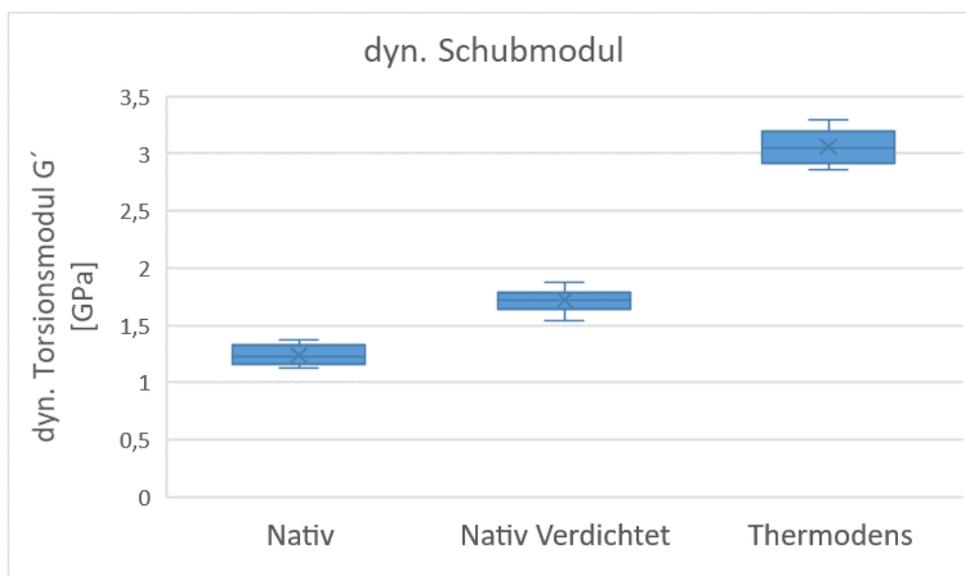
Im Arbeitspaket 4 wurde die Verdichtung mit thermischer Fixierung in einem Screening auf die Anforderungen (AP1) an die Bauteile untersucht und angepasst. Übliche Verdichtungsverfahren bedingen eine Fixierung der Hölzer, ansonsten würde bei Feuchtekontakt das Material zurückspringen. Im Projekt wurde daher der sonst zweiteilige Prozess in einen Prozessschritt überführt. Die Fixierung findet somit während der Verdichtung statt. Dabei konnte in einem Screening gezeigt werden, dass erst bei einem bestimmten Verdichtungsgrad die Fixierung und Farbgebung erreicht werden kann. Durch Variationen von Holzfeuchte, Temperatur und Verdichtungsgrad konnten die optimalen Prozessparameter identifiziert werden. Dabei liegt die Holzfeuchte in einem Bereich zwischen 4% und 8%, die Dichte zwischen 1200 und 1400kg/m<sup>3</sup> und die Presstemperaturen zwischen 150 und 180°C.

Es wurden an Laborproben die relevanten Parameter Härte, Biegefestigkeit, Dichte, Quellung und Rückfederung bestimmt. Desweiteren wurden die akustisch relevanten Kennwerte bestimmt. Danach wurden Rohlinge für Wirbel mit verschiedenen Verdichtungsparametern verdichtet und der Firma Berdani zum Fertigen von Wirbeln zur Verfügung gestellt. Damit konnten die Ergebnisse von den Laborproben auf die Fertigung übertragen werden. Hier zeigte sich, dass zu hohe Temperaturen bei zu langen Presszeiten zwar zu einer sehr starken Quellungsvergütung mit sehr guter dunkler Braunfärbung führen, die Sprödigkeit jedoch keine saubere Wirbelfertigung zulässt. Letztendlich wurde ein Temperaturfenster von 150-160°C bei ca. 2h Behandlungsdauer für optimal befunden.

Folgende Ergebnisse konnten im Arbeitspaket 4 erreicht werden:

- Die Verdichtung mit Fixierung konnte erfolgreich für verschiedene Bauteile in Instrumenten (Wirbel, Griffbrett, Kinnhalter, Saitenhalter) angewendet werden.
- Die Verdichtung mit Fixierung der Dicke konnte in einem Prozessschritt realisiert werden
- Eine Fixierung findet erst bei sehr hohen Dichten statt
- Die Biegefestigkeit und die Härte nehmen zu
- Die Farbe kann in Richtung dunkelbraun variiert werden
- Das Material ist sehr gut als Ersatz von Ebenholz geeignet

- Die Farbe muss dazu allerdings noch dunkler werden
- Sehr dunkle Farben führen Prozessbedingt jedoch zu einer starken Versprödung
- Die Sorptionskennwerte verschlechtern sich in Verdichtungsrichtung etwas, dies ist im Gebrauch jedoch unproblematisch
- Es erfolgte die Überprüfung der akustische Kenngrößen wie (Dämpfung, dyn. E-Modul und die Klangdauer), auch hier konnten die Zielgrößen erreicht werden
- das dyn. E-Modul steigt längs und quer zur Faserrichtung, die Dämpfung sinkt etwas und die Klangdauer steigt etwas an
- die mittels Thermodens modifizierten Hölzer (d.h. relativ hohe Verdichtung bei moderaten Temperaturen) haben sich akustisch nicht verschlechtert, hohe Dichten sind aus der Sicht der Anwendung für diese Bauteile anzustreben
- Im akustischen Vergleich von Bauteilen aus Thermodens modifizierten Hölzern zu traditionellen Hölzern stellten wir fest, dass sich die relevanten Merkmale nicht verschlechtert haben
- hochverdichtete Buchensortimente konnten erfolgreich zu Wirbeln verarbeitet werden
- Stabilität gegenüber Wärmeänderung und Feuchtigkeit ist gegeben und ausreichend
- Es sind dafür ganz spezifische Verfahrensparameter notwendig, einige Parameteränderungen führen zu ausfransen und Brüchen beim Wirbeldrehen, die Oberflächen sind nicht glatt, sondern mit Struktur
- Grundsätzlich lässt sich das Material aber bearbeiten, teilweise mit Hartmetallwerkzeugen aus der Metallbearbeitung



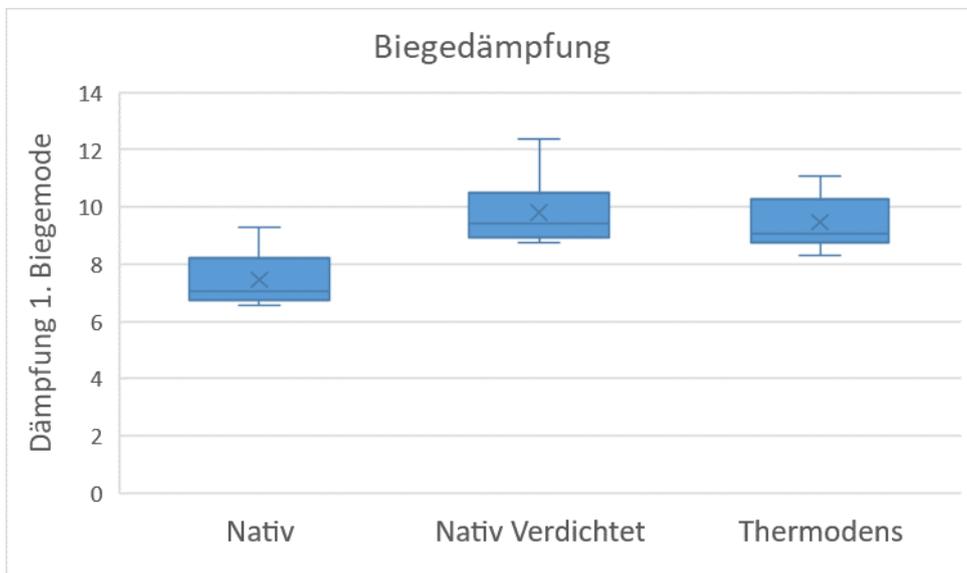
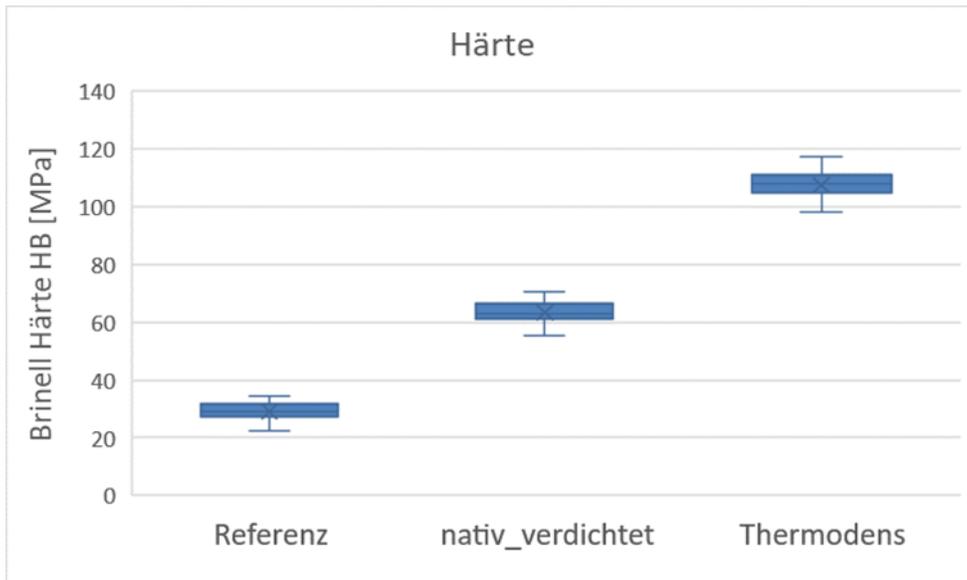


Abbildung 9: Schubmodul, Härte und Dämpfung der Biegemode von Ahorn, Ahorn verdichtet und Ahorn Thermodens



Abbildung 10: Klangdauer und Dämpfung der verdichteten Proben im Vgl.



**Abbildung 11: Verdichtete Laborproben sowie Rohlinge zur Wirbelfertigung**



Abbildung 12: Wirbelfertigung aus verdichtetem Rotbuchenmaterial

## 2.5 AP 5 Herstellung, Testung, Muster und Optimierung

Das Arbeitspaket 5 wurden Musterinstrumente, Violinen und Klarinetten aus modifizierten Hölzern gefertigt. In diesem Schritt konnte verifiziert werden, dass eine Skalierung des Thermoprozesses vom Labormaßstab und des Thermodens-Verfahrens auf die nötigen Instrumentendimensionen übertragbar ist.

Aus den Rohlingen wurden dann von der Firma „Berdani“ Musterviolinen und von der Firma „Mönnig“ Klarinetten gefertigt und vom IfM akustisch vermessen und bewertet. Weiterhin wurden gemeinsam mit der Firma „Berdani“, der Firma „Mönnig“ und dem „IfM“ Musiker-Anspiele unternommen, um die Akzeptanz, das Spielgefühl und das klangliche Verhalten zu überprüfen.

### Frequenzkurvenmessung an Musterviolinen

Zur Bewertung der Klangeigenschaften von Hölzern der milden thermischen Behandlung gegenüber natürlich gealtertem Holz sowie der klassischen Thermobehandlung wurden vom Projektpartner „Berdani“ Musterviolinen angefertigt. Für die Untersuchungen standen somit insgesamt 5 Violinen aus natürlich abgelagertem Holz, 4 aus Holz der klassischen Thermobehandlung bei ca. 180°C und 2 aus Hölzern des milden thermischen Verfahrens bei 135°C zur Verfügung.

Die Messungen der Frequenzkurven erfolgte im reflexionsarmen Raum des IfM. Die Instrumente wurden dazu in einer entsprechenden Vorrichtung fixiert und mit einem Impuls-hammer-Pendel am Steg angeregt. Der infolge dieses Anschlages entstehende Klopfon wird mit drei im Raum verteilten Mikrofonen aufgenommen. Die Aufnahme und Auswertung der Frequenzkurven erfolgten mit Hilfe eines FFT-Analysators.



Abbildung 13: Musterviolinen aus Holz verschiedener Behandlungsstufen

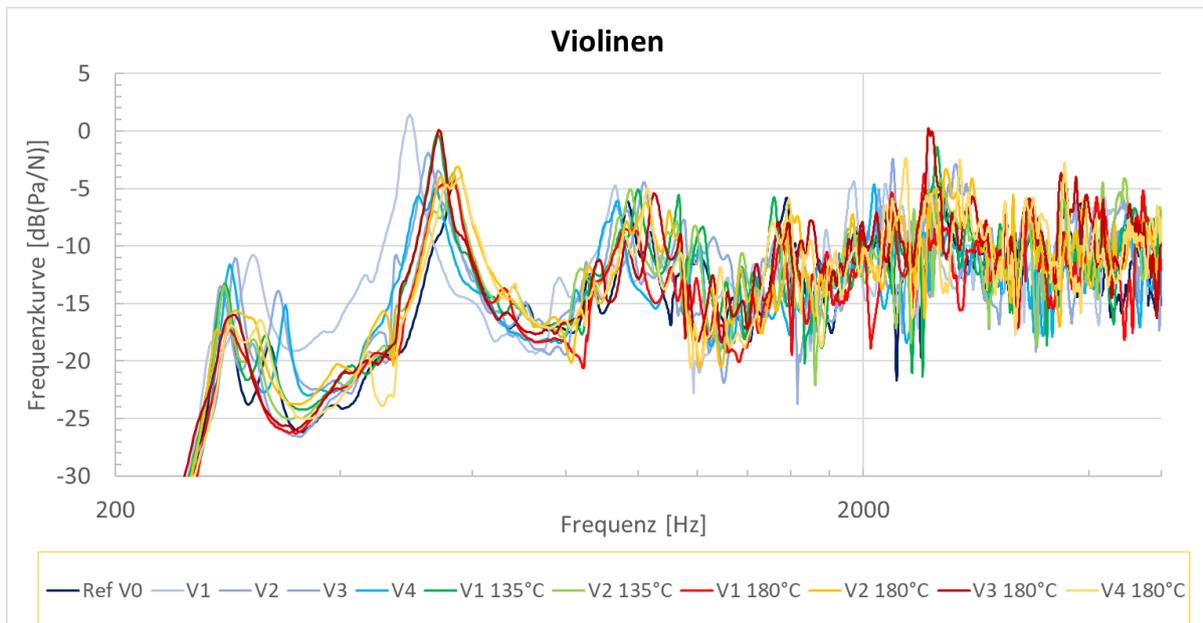


Abbildung 14: Frequenzkurven der Musterviolinen

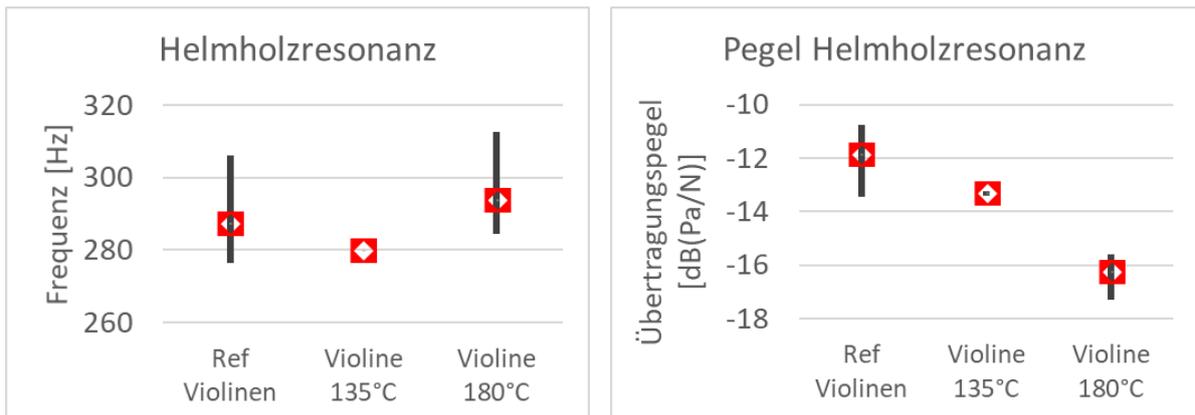
In Abbildung 14 sind die Frequenzkurven aller Musterinstrumente dargestellt. Zur Bewertung der verschiedenen Behandlungsstufen (natürliche Alterung, milde thermische Behandlung und klassische Thermobehandlung) wurden Merkmalswerte aus den Frequenzkurven extrahiert. Ausführlich beschrieben ist die Merkmalsextraktion von Ziegenhals [1]. Die hier betrachteten sind (mit zugehöriger Gut-Tendenz):

- f1      Frequenz der Helmholzresonanz      (tief)
- L1      Pegel der Helmholzresonanz      (groß)
- f2      Frequenz der 1. Deckenresonanz      (tief)
- $\Delta LA$       Maß für die Klarheit      (groß)
- $\Delta LS$       Schärfenunterdrückung      (groß)

- $\Delta LA_{\text{Aus}}$  Maß für die Ausgeglichenheit (klein)
- $L_{\text{ges}}$  Gesamtpegel (groß).

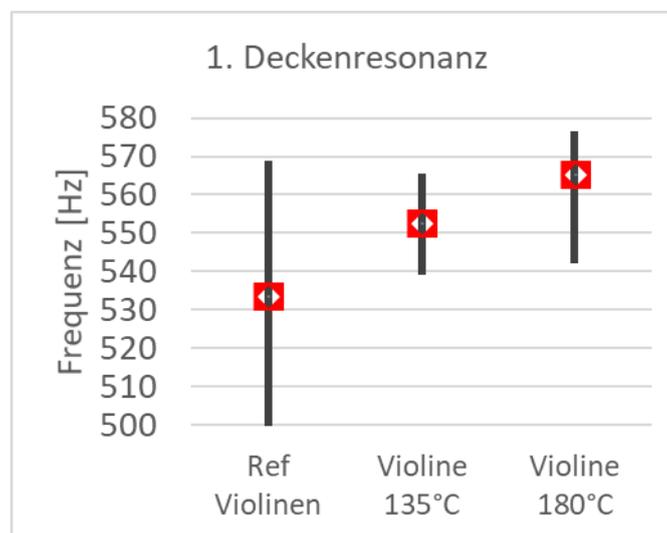
### Bewertung der Merkmalswerte

Zur Bewertung der Merkmalswerte bildeten wir jeweils die Mittelwerte der Merkmale und den Streubereich. Bei der Helmholzresonanz kann festgestellt werden, dass die Violinen der milden thermischen Behandlung, hinsichtlich der Lage und dem Pegel der Helmholzresonanz, im Streubereich der Violinen aus natürlich abgelagerten Hölzern liegen. Die der klassischen Thermobehandlung bei 180°C weisen hier deutlich schlechtere Werte auf (siehe Abbildung 15).



**Abbildung 15: Frequenz und Pegel der Helmholzresonanz**

Dies verhält sich auch bei der 1. Deckenresonanz in ähnlicher Weise (Abbildung 16), auch hier stechen die Violinen aus Hölzern der klassischen Thermobehandlung aus dem Streubereich der Violinen mit natürlicher Alterung heraus, die der milden Thermobehandlung nicht.



**Abbildung 16: Lage der 1. Deckenresonanz**

Schaut man sich die Merkmale der Ausgeglichenheit und Klarheit näher an, so sind die Tendenzen der Violinen aus natürlich abgelagerten Hölzern der milden thermischen Behandlung dichter beieinander und besser bewertet als bei den Violinen der klassischen Thermobehandlung (siehe Abbildung 17).

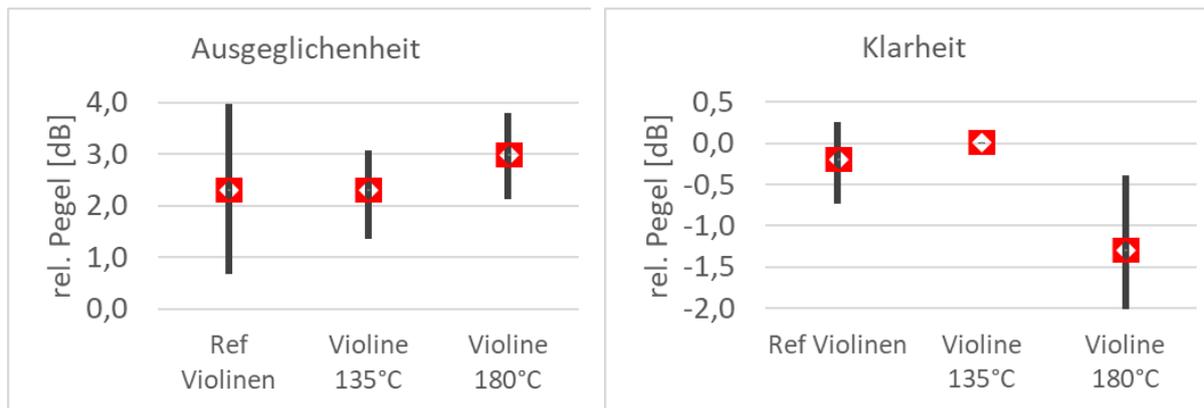


Abbildung 17: rel. Pegel der Ausgeglichenheit und Klarheit

Lediglich das Merkmal der Schärfeunterdrückung (Abbildung 18) wird im Mittel bei den Violinen der klassischen Thermobehandlung etwas höher bewertet, liegt aber insgesamt im Streubereich der Referenz-Violinen.

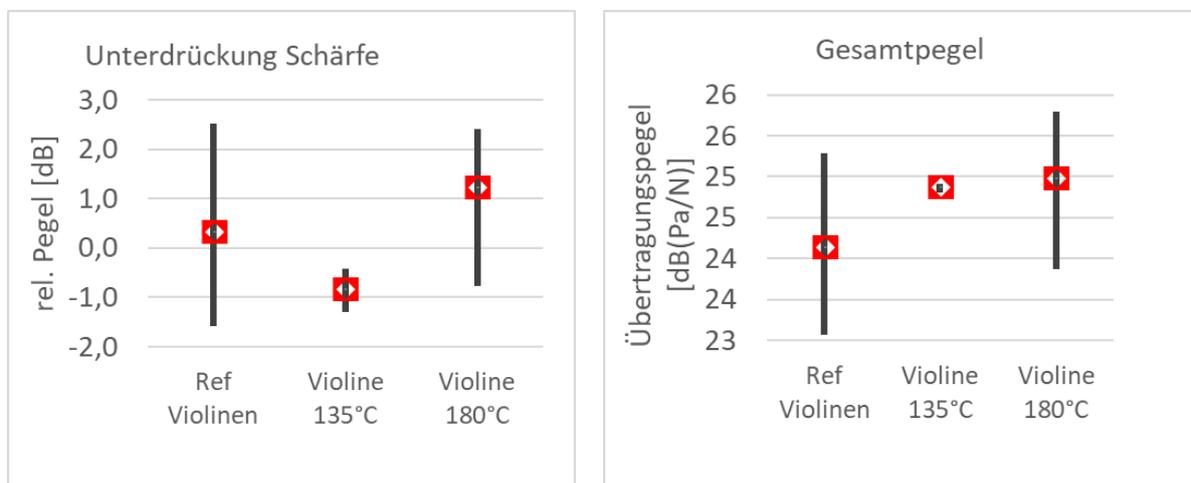


Abbildung 18: Schärfeunterdrückung und Gesamtpegel

Der Gesamtpegel liegt bei beiden Thermobehandlungen etwas höher als bei den Violinen der natürlichen Alterung. Dies lässt sich vermutlich auf die etwas höhere Steifigkeit des Holzes bei sinkender Dichte zurückführen.

Um eine Gesamtaussage zu treffen, werden die Gesamtbewertungen aller betrachteten Merkmale (Abbildung 19) vergleichsweise wie bei der Bewertung des Deutschen Musikinstrumentenpreises in Form von Punkten aufsummiert. Die Gesamtpunkte aller Merkmale fällt mit steigender Temperatur der Thermobehandlung ab. Während noch alle Violinen der milden Thermobehandlung im Streubereich der Referenzviolinen liegen, erreichen die Musterinstrumente der klassischen Thermobehandlung deutlich niedrigere Punktzahlen. Somit kann eindeutig gesagt werden, dass die milde thermische Behandlung der natürlichen Lagerung hinsichtlich der Bewertung anhand der Merkmalswerte sehr nahekommt. Die Instrumente der klassischen Thermobehandlung schneiden in der Bewertung der Merkmale insgesamt schlechter ab.

Um den Einfluss der modifizierten Anbauteile des Verfahrens der Verdichtung mit anschließender thermischer Fixierung (Thermodens) auf die akustischen Eigenschaften zu bewerten, wurden 2 Instrumente (1 Referenzvioline und 1 Violine des milden Thermoverfahrens) mit folgenden Anbauteilen nachträglich ausgestattet (umgebaut)

- Griffbrett (mit verdichtetem Material)

- Saitenhalter (mit verdichtetem Material)
- Wirbel (mit verdichtetem Material)
- Endknopf (mit verdichtetem Material)

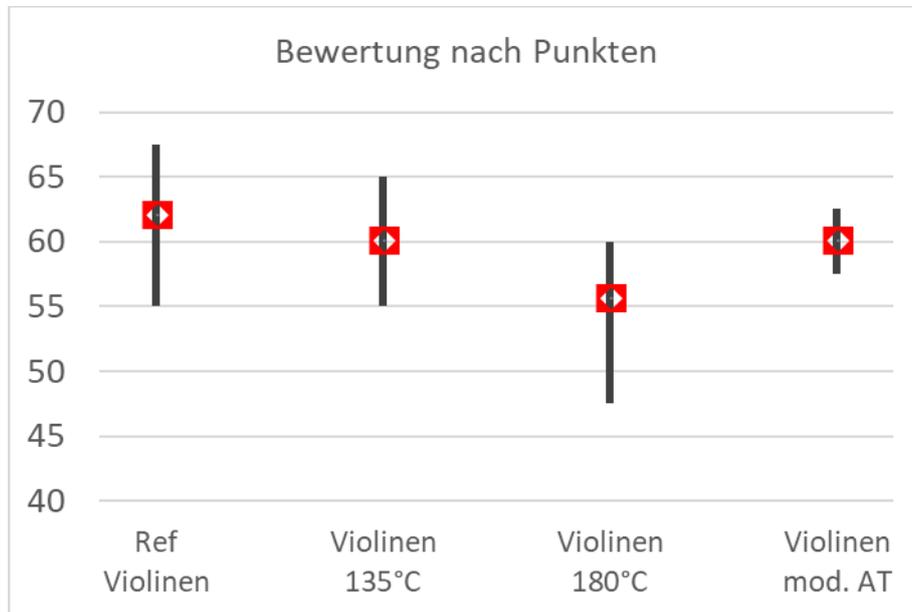


Abbildung 19: Gesamtbewertung nach Punkten

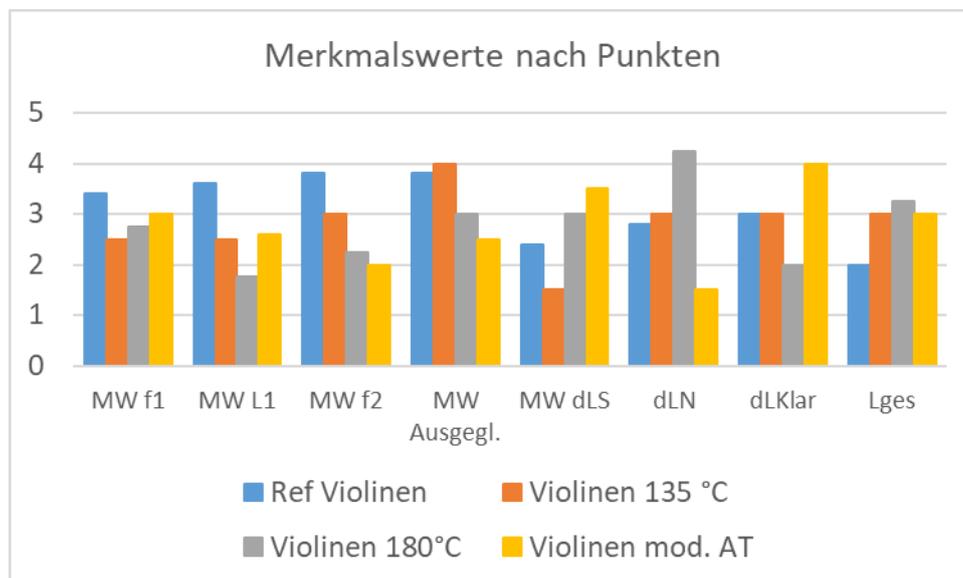


Abbildung 20: Gegenüberstellung der Merkmalswerte der Violinen (gesamt)

In Abbildung 20 sind die Ergebnisse der verschiedenen Modifikations-Varianten gegenübergestellt. Die Violinen mit verdichteten Anbauteilen schneiden in der Gesamtbewertung sehr ähnlich den Violinen der milden thermischen Modifikation ab. Sie liegen ebenfalls im Streubereich der Referenzviolin und deutlich höher als die Violinen der klassischen Thermobehandlung. Gut bewertet wurden hier der Pegel der Helmholzresonanz, die Schärfeunterdrückung, die Klarheit und der Gesamtpegel der beiden umgebauten Instrumente. Die etwas niedrigere Bewertung der Lage der 1. Deckenresonanz (f2) und die Unterdrückung der Nasalität sind vermutlich auf den Umbau und das Wiedereinrichten des Instrumentes zurückzuführen.

## Bearbeitungsergebnisse Thermodens

Folgende Beobachtungen der Bearbeitung des Materials konnten gemacht werden:

### *Fräsen/Drehen:*

- Drehbarkeit an CNC funktioniert
- Drehselbild bei einfachen Geometrien sehr gut, komplexere Geometrien mittelmäßig
- Fräsbarkeit ist sehr gut in horizontale Richtung, keine Ausrisse
- fräsen oder bohren in vertikale Richtung führt zu Verfärbung und teilweise Ausbrechen des Materials
- Geruch beim Fräsen oder Drehen wie Caramel, angenehmer Geruch

### *Sägen:*

- das Sägen an der Bandsäge funktioniert sehr gut, auch kleinste Bögen sind möglich

### *Abrichte:*

- das Material lässt sich gleichmäßig ohne Probleme abrichten
- die Messer sollten sehr scharf sein, ansonsten vibriert das Material

### *Hobeln:*

- das Material lässt sich mit einem flachen Hobel kaum hobeln, innerhalb kürzester Zeit sind die Messer stumpf
- mit einem runden Hobel ist es möglich, die Schneide wird ebenso schnell stumpf

### *Schnitzen:*

- das Schnitzen des Materials ist bedingt möglich.
- sehr hart und man muss sehr viel Druck ausüben.
- hohe Verletzungsgefahr
- Messer werden ebenfalls schnell stumpf

### *Feilen:*

- Feilen geht sehr gut
- feinste Konturen sind genau umsetzbar
- schnelles Verkleben der Feilen

-durch einen Gummistein schnell wieder ablösbar

#### *Schleifen:*

-schnell zugesetzt und verklebt

-beim Bearbeiten an Schleifbändern und die dadurch entstehende Wärme, wird das Material heller und beginnt sich zu verformen

#### *Farbe:*

-Färben auf kleiner Fläche wie Wirbelkopf oder Saitenhalter war sehr einfach möglich

-Färben auf großer Fläche wie Kinnhalter fast nicht möglich, sehr fleckiges Ergebnis

#### *Leim:*

-die Verleimung mit handelsüblichem Kaltleim oder Knochenleim ist gut möglich, nach etwa 4 Stunden ist der Leim trocken und die Teile halten sehr fest

#### *In Verbindung mit Öl:*

-es lässt sich sehr gut ölen, zieht nur minimal ein und ergibt einen schönen Glanz

-es verzieht sich nicht

#### *Polieren:*

-das Material lässt sich hervorragend polieren

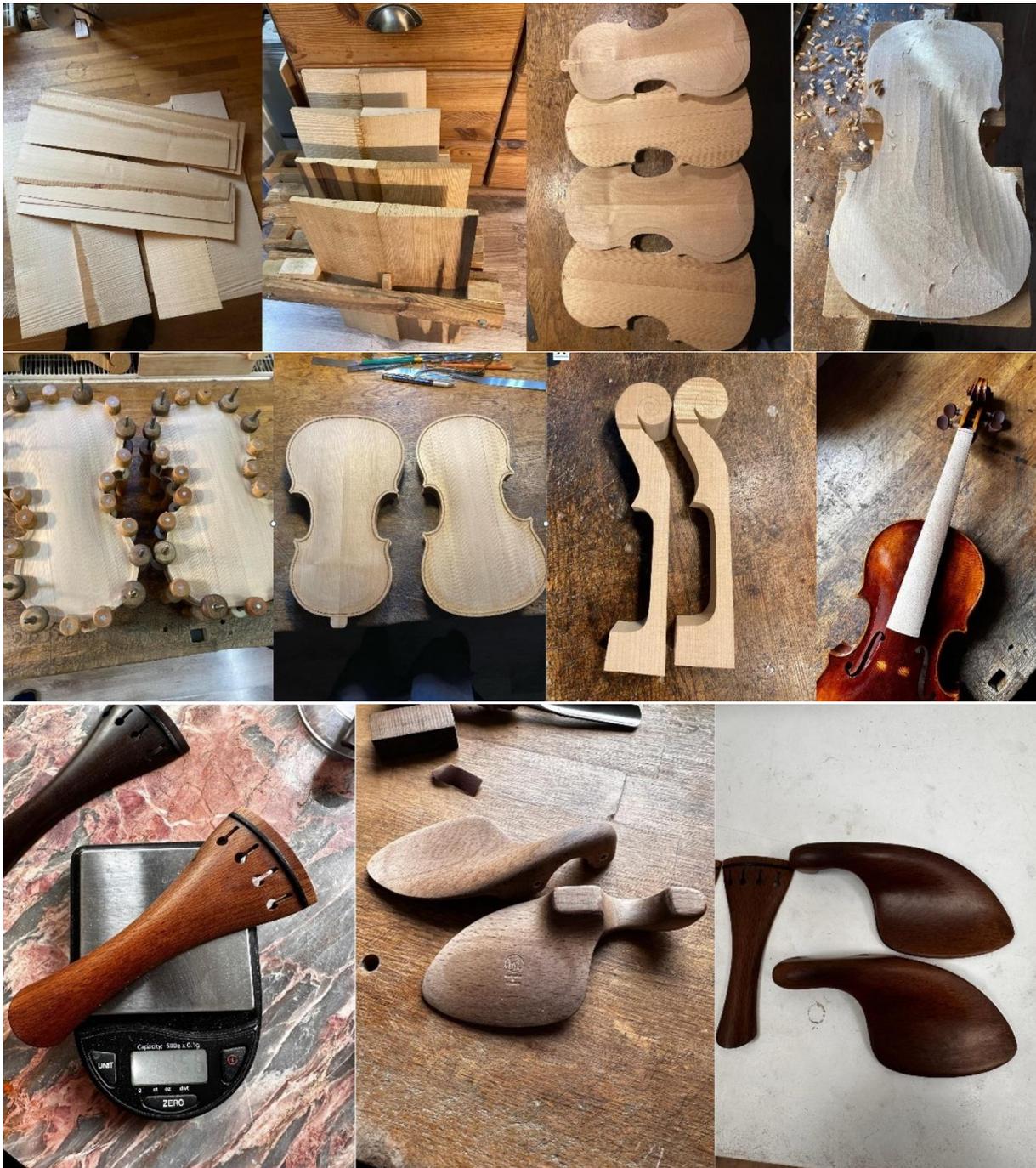
-behält den Glanz

-wenig Polierpaste nötig

-bei zu starker Erhitzung Verfärbung des Materials

#### *Ziehklingen:*

-das Bearbeiten mit Ziehklingen ist nicht möglich



**Abbildung 21: Instrumentenherstellung aus Decke, Boden, Hals und Zarge aus milder therm. Modifikation, Anbauteile aus Thermodens**

Zusammenfassung der Ergebnisse der milden Thermischen Modifizierung und der mittels „Thermodens“ verdichteten Bauteile.

Die Ergebnisse der Messungen und Untersuchungen an Probekörpern und Musterinstrumenten zeigten für die verschiedenen Verfahren der Lagerung bzw. thermischen Behandlung, dass ein neues Verfahren der milden thermischen Modifikation von Hölzern im Sinne einer künstlichen Alterung erfolgreich für Streichinstrumente entwickelt werden konnte. Die mittels „Thermodens“ hergestellten Anbauteile verschlechtern die Akustik der Instrumente nicht. Die Instrumente behalten weitestgehend ihre akustischen Merkmale, die Akzeptanz durch Musiker konnte positiv bestätigt werden.

Der akustische Nachweis der Eignung konnte nicht nur an Probekörpern, sondern auch an Musterinstrumenten erfolgreich erbracht werden. Das Verfahren der milden thermischen Modifikation kommt der natürlichen Lagerung von Hölzern für Streichinstrumente sehr nahe und bietet neben der kürzeren Lagerzeit und schnelleren Verfügbarkeit auch den Vorteil, dass nicht gealterte und lange Zeit abgelagerte einheimische Hölzer für hochwertige Instrumente verwendet werden können.

Gegenüber der klassischen Thermobehandlung bei relativ hohen Temperaturen ( $>180^{\circ}\text{C}$ ), verbessern sich viele Eigenschaften für die Verwendung bei Streichinstrumenten wie Bruchschlagarbeit, Dichte und E-Modul. Für die Eigenschaften wie Dämpfung, Klangdauer und Feuchteinfluss wurde ein Optimum gefunden. Ein sehr großer Vorteil ist auch die Reduzierung der Rissbildung und geringere Dunkelfärbung des Holzes.

Die mittels „Thermodens“ Verfahren hergestellten Anbauteile stellen eine sehr gute Alternative für die immer knapper werdenden Ebenhölzer dar. Die Akzeptanz der Musiker für solche Alternativen wächst zunehmend, dies konnte innerhalb der Musikertests und der Befragungen bestätigt werden.

Die Bearbeitung ist durch die hohe Dichte beim Verfahren Thermodens schwieriger, kann aber mit geänderten Klingen oder Bearbeitungsschritten durchgeführt werden. Die Wahrscheinlichkeit für Ausrisse ist etwas erhöht.

#### Akustische Messungen an Musterklarinetten

Zur Bewertung der Klangeigenschaften von verdichteten Hölzern des Thermodens-Verfahrens wurden durch die Firma „Mönnig“ Muster-Klarinetten (Leistung Dritter) angefertigt.

Für die Untersuchungen standen 1 Referenz Klarinette aus bisher verwendetem Grenadill-Holz und im Vergleich 2 Musterklarinetten aus Hölzern (einheimischer Ahorn), welche nach dem Thermodens-Verfahren gefertigt wurden. Insgesamt sind die Klarinetten alle in ihrem akustischen Verhalten (Intonation und Ansprache) sehr ähnlich und unterscheiden sich nur geringfügig. Der Nachweis der Eignung des verdichteten Holzes mittels „Thermodens-Verfahren“ konnte für Holzblasinstrumente erfolgreich am Beispiel der Klarinette erbracht werden.

Folgende wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse wurden erreicht:

- es wurde das Optimum aus den mechanischen, sorptiven und schwingungstechnisch relevanten Kennwerten ermittelt, es liegt bei ca.  $135^{\circ}\text{C}$  und 12 h Einwirkzeit plus Aufheiz- und Abkühlprozess
- die Ergebnisse der Messungen und Untersuchungen an Probekörpern und Musterinstrumenten zeigten, dass ein neues Verfahren der milden thermischen Modifikation von Hölzern im Sinne einer künstlichen Alterung erfolgreich für Streichinstrumente entwickelt wurde
- der akustische Nachweis der Eignung konnte auch an Musterinstrumenten erfolgreich erbracht werden, hierbei zeigte sich, dass die Lage der Helmholzresonanz und der 1. Deckenresonanz besser abschneiden als die des klassischen Verfahrens bei höheren Temperaturen.
- Dies verhält sich ebenfalls für die Merkmale: Ausgeglichenheit und Klarheit so



### 3 Wesentliche Projektergebnisse

- Ermittlung der Anforderungen der zu modifizierende Bauteile hinsichtlich der mechanischen, sorptiven, schwingungstechnischen und akustischen Kennwerte. Ermittlung der relevanten mechanischen, haptischen, optischen und akustischen Kennwerte der Materialien sowie deren Bearbeitungsanforderungen
- die thermische Modifikation, die Acetylierung und Verdichtung mit anschließender thermischer Fixierung wurden in einem Screening auf die Anforderungen an die Bauteile untersucht und angepasst. Es wurden die ausgewählten regionalen Hölzer modifiziert und ihre mechanischen, haptischen, optischen und akustischen Kennwerte bestimmt. Die Verfahren wurden hinsichtlich der Zielparame-ter der Materialien optimiert
- Die milde thermische Modifikation für Decke, Zarge und Hals ist geeignet, um die Sorption zu verbessern und eine natürliche Alterung zu simulieren. Eine Bearbeitung ist möglich ohne Änderungen der Bearbeitungsstrategie
- Die Kennwerte der Acetylierung sind hinsichtlich der Akustik und Sorption vielversprechend, durch die großen Bearbeitungsschwierigkeiten muss dieser Ansatz hinsichtlich der Verarbeitung weiter untersucht werden
- Die Verdichtung mit gleichzeitiger thermischer Fixierung führt zu einem Tropenholz ähnlichen Ersatzstoff. Die Eigenschaften sind ähnlich denen von Ebenholz bzw. Grenadill
- Alle modifizierten Hölzer zeigen gleiche oder bessere Eigenschaften als das bisher verwendete Holz im entsprechenden Bauteil
- Die Bearbeitungsschritte sind im Betrieb mit etwas Anpassung durchführbar
- Die Skalierung vom Labormaßstab auf große Bauteile für Instrumente ist möglich
- Rohlinge regionaler Holzarten der optimalen Varianten der Modifikationsverfahren wurden bereitgestellt und daraus Bauteile und Muster-Instrumente hergestellt
- Die fertigen Musterinstrumente (Violinen und Klarinetten) wurden akustisch bewertet und durch Spieltests mit Musikern im Vergleich zu bisherigen Referenzinstrumenten bewertet, sie schneiden insgesamt positiv ab
- alle Ergebnisse wurden dokumentiert und in die vorhandene Datenbank eingepflegt

## **4 Potentielle Nutzung der Projektergebnisse**

Mit den gesammelten Projektergebnissen könnten zukünftig Ersatzmaterialien für tropische Hölzer sowie schneller verfügbare Materialien für Decke und Boden selber hergestellt werden. Dabei gibt es noch Anpassungsbedarf, je nach Anwendungsszenario. Es konnte aber gezeigt werden, dass die generelle Technologie dazu geeignet ist. Die Ergebnisse können einerseits von Musikinstrumentenbauern verwendet werden, andererseits auch von Forschungsinstituten. Hier können die Verfahren weiter angepasst und verbessert werden. Daraus ergeben sich zukünftig neue Projekte zwischen den Akteuren.