

Zusammenfassung Projekt „DrumstickWood“

Ausführlicher Projekttitel:	Technologieentwicklung zur Steigerung der Nachhaltigkeit von Drumsticks und Sicherung deren Materialbasis
Kurztitel/Akronym:	DrumstickWood
Projektlaufzeit:	01.07.2023 bis 31.12.2025

Projektbeteiligte Einrichtungen	Ansprechpartner
IfM – Institut für Musikinstrumentenbau e.V.	Christoph Gilbert
TU Dresden - Institut für Naturstofftechnik (IfN) Professur für Holztechnologie und holzbasierte Bioökonomie	Tobias Dietrich Herwig Hackenberg
ROHEMA Percussion OHG	Maximilian Schlott
Fritz Kohl GmbH & Co. KG	Hannah Lutz

Inhaltsverzeichnis

0	Abstract	2
1	Projektziele	3
2	Projektablauf	4
2.1	Anforderungsdefinition und Materialfestlegung	4
2.2	Prüfstandentwicklung	5
2.3	Erstellen der Datenbasis für Drumsticks	6
2.4	Prozessentwicklung NH3-Modifikation	8
2.5	Prozessentwicklung Schichtholz	9
2.6	Alternative Holzarten	10
2.7	Untersuchungen von Muster-Drumsticks aus alternativen Werkstoffen	11
2.8	Untersuchungen von zusammengefügteten Muster-Drumsticks	13
2.9	Ausbau der I-Ma-Tech-Materialdatenbank	13
3	Projektergebnisse	14
4	Potentielle Nutzung der Projektergebnisse	14

0 Abstract

Ziel des Projekts war die Entwicklung nachhaltiger Alternativen zum bislang überwiegend verwendeten amerikanischen Hickoryholz für die Herstellung von Drumsticks. Hintergrund sind die zunehmende Unsicherheit der Rohstoffversorgung, steigende Transportkosten sowie sinkende Materialqualitäten des importierten Holzes. Gleichzeitig sollte durch den Einsatz heimischer Holzarten und neuer Holzwerkstoffe die Ressourceneffizienz gesteigert und die Abhängigkeit von außereuropäischen Lieferketten reduziert werden. Voraussetzung hierfür war die Entwicklung von Werkstoffen, die hinsichtlich Haltbarkeit, Spielverhalten und mechanischer Eigenschaften mit Hickory vergleichbar sind.

Im Projekt wurden umfangreiche Materialuntersuchungen an heimischen Holzarten, modifizierten Hölzern und Furnierschichtholz durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die mechanischen Eigenschaften von Hickory nur schwer erreichbar sind. Zur objektiven Bewertung der Haltbarkeit wurde eine automatisierte Prüfmaschine entwickelt, mit der praxisnahe Belastungstests durchgeführt werden können. Die Untersuchungen ermöglichten zudem eine Optimierung der bisherigen Hickory-Qualitätssortierung und damit eine deutlich effizientere Nutzung der vorhandenen Rohstoffressourcen.

Die Arbeiten verteilten sich auf die vier Projektpartner. Drumstick-Produzent ROHEMA konzentrierte sich auf die Verarbeitungstechnologien und Fügeverbindungen, das Furnierwerk Fritz Kohl auf die Entwicklung und Herstellung von Schichthölzern, die TU Dresden auf die Materialuntersuchungen und -entwicklungen im Bereich Holzmodifikation/-verdichtung und das IfM auf die Prüfstandsentwicklung und objektive Untersuchung der Drumsticks.

Als vielversprechende Alternative erwies sich insbesondere Furnierschichtholz auf Basis heimischer Birke, das bei geeigneter Verklebung und Verdichtung hohe Biegesteifigkeit, gutes Rückprallverhalten sowie eine hohe Abriebfestigkeit erreicht. Die Haltbarkeit liegt bereits nahe am Niveau von Hickory, wenngleich hinsichtlich Bruchzähigkeit weiterer Entwicklungsbedarf besteht. Fügeverbindungen konnten ebenfalls erfolgreich umgesetzt werden, erfordern jedoch noch Optimierungen zur langfristigen Qualitätssicherung. Die untersuchte Ammoniakmodifizierung führte zwar zu einer Dichteerhöhung verschiedener Holzarten, verbesserte jedoch die Schlagzähigkeit nicht wie erhofft. Als weitere potenzielle Alternative wurde Robinie identifiziert.

Der ausführliche Sachbericht wurde in der Technischen Informationsbibliothek (TIB) veröffentlicht.

1 Projektziele

Für die Herstellung von Trommelstöcken (Drumsticks) wird zu weiten Teilen heller amerikanischer Hickory eingesetzt. Diese Holzart ist bezüglich ihrer klanglichen und spieltechnischen Eigenschaften gut geeignet und hat eine relativ hohe Dichte, vor allem aber sind seine mechanischen Eigenschaften für die hochbelasteten Drumsticks hervorragend. Aufgrund des besonderen strukturellen Aufbaus innerhalb der Zellwand (Mikrofibrillenwinkel) sowie der Zellen (Faserlänge) von Hickory besitzt dieses Holz ein sehr hohes Potenzial mechanische Energie aufzunehmen, womit mechanische Schädigungen offensichtlich deutlich reduziert werden als bei den einheimischen Holzarten.

Beim Spielen wird das Holz im Bereich des Schaftes beispielsweise durch sogenannte Rim Shots stark beansprucht, bei denen neben dem Fell auch parallel der Stahl-Spannring kraftvoll angeschlagen wird, und durch die hohe Punktlast eine Abnutzung bis hin zum Bruch stattfinden kann. Ebenso zählen Schläge auf Beckenkanten und insbesondere der Hi-Hat zu den extremen Abnutzungseinwirkungen im konischen Bereich des Drumsticks und bestimmen erheblich dessen Nutzungsdauer. Besonders anfällig ist der Kopf des Drumsticks, da hier schon kleinste Abplatzungen die Spielbarkeit speziell in Hinblick auf das Rückprallverhalten stark minimieren.

Hickory hat aufgrund der sehr guten Elastizität, Festigkeit und Energieaufnahme die Eigenschaft, auch bei dünner werdendem Querschnitt nicht schlagartig zu brechen, sondern langsam zu Versagen. Dieses Verhalten konnte bisher mit anderen europäischen Holzarten nicht erzielt werden. Drumsticks etwa aus Weißbuche oder Ahorn brechen ohne Ankündigung ab. Dieses Verhalten ist für den Musiker problematisch, da es u.a. zur Schädigung der Schlagfelle führen kann. Weiterhin können nur leichte Sticks aus diesen Holzarten gefertigt werden. Eine weitere, für die Spielbarkeit entscheidende Eigenschaft, ist die gleichmäßige Steifigkeit in tangentialer und radialer Holzausrichtung. Denn deren Ausrichtung erfolgt beim Spiel rein zufällig und kann sich währenddessen variieren. Dies wird über die Ermittlung der Modenfrequenzen in der Fertigung kontrolliert und stellt, neben der Abstimmung im Paar, ein Qualitätsmerkmal dar.

Die Versorgung der Drumstick-Hersteller mit Hickory ist derzeit durch mehrere Faktoren bedroht. Zum einen besteht eine starke Abhängigkeit vom amerikanischen Markt und damit verbundenen Transportwegen mit stetig steigenden Kosten sowie sinkender Zuverlässigkeit der Containerfracht. Alternative Bezugsquellen gibt es nicht. Da Hickory auch im Bereich der Werkzeugstiele und zunehmend im Möbelbau verwendet wird, ist die Instrumentenbaubranche immer der letzte Abnehmer in der Marktkette. Dabei sind konsequenterweise die amerikanischen Hersteller von Drumsticks im Vergleich zu den europäischen bzw. deutschen Firmen im Sinne der Beschaffung im generellen Vorteil.

Das importierte Hickory liegt zudem zunehmend nicht mehr in der notwendigen Qualität vor. Die dabei enthaltene A-Qualität, welche uneingeschränkt für Trommelstöcke verarbeitet werden kann, liegt aktuell noch bei 50%. Weiteres Rohmaterial hat optische Fehlstellen, welche nicht akzeptiert sind, Holzstrukturen welche tendenziell zu einer schlechteren Spielbarkeit führen oder sie erreichen schlichtweg nicht die notwendigen Dimensionen. Eine Weiterverarbeitung von zu kleinen Rohlingen zu Drumsticks ist derzeit nicht möglich. Das Problem der geringen geometrischen Abmessungen qualitativ hochwertiger Tonholzsortimente wurde bereits in der Konzeptbeschreibung „I-Ma-Tech“ verdeutlicht.

Das Kernziel des Vorhabens ist die Steigerung der Nachhaltigkeit durch die mindestens gleichwertige Nutzung europäischer Hölzer und so die Vermeidung weltweiter Transportwege sowie die Reduzierung ungenutzter Ressourcen aufgrund mangelnder Qualitäten. Im Ergebnis des Projekts sollen neue Alternativen für bisherige Hickory-Drumsticks zur Verfügung stehen, die es dem vogtländischen Musikinstrumentenbau erlauben, einheimisches Holz zu verarbeiten.

2 Projektablauf

2.1 Anforderungsdefinition und Materialfestlegung

Im ersten Schritt wurden die für die Untersuchungen relevanten Hickory-Rohlinge seitens ROHEMA systematisch ausgewählt, klassifiziert und dem IfM für weiterführende Analysen bereitgestellt. Ziel dieses Arbeitsschrittes war es, eine reproduzierbare und nachvollziehbare Parameterbasis zu schaffen, die sowohl die unterschiedlichen Qualitätsstufen des Rohmaterials als auch deren Einfluss auf die spätere Drumstick-Fertigung abbildet. Als Qualitätsstufen wurden folgende ausgewählt:

- A-Ware (keine Mängel)
- B-Ware (kleine optische Mängel)
- C-Ware (schräger Faserverlauf)
- Kernholz (sonst nicht verwendet)
- leichter Wimmerwuchs
- starker Wimmerwuchs
- sonstige Wuchsbesonderheiten



Abbildung 1: Unterschiedliche Hickory-Qualitäten

Nach der qualitativen Einordnung erfolgte zusätzlich eine Gewichtsklassifizierung aller Rohlinge in drei Stufen. Je Gewichtsklasse wurden zehn Rohlinge bereitgestellt. Die mittlere Gewichtsklasse bezieht sich immer auf den für die Zielstellung relevanten Bereich. Nach umfassender Klimatisierung wurden die insgesamt 180 Rohlinge systematisch vermessen. Erfasst wurden die genauen Dimensionen und das Gewicht. Mittels Ultraschallmesstechnik wurde die Schallgeschwindigkeiten ermittelt und in Verbindung mit der Dichte hieraus das E-Modul berechnet. Eine weitere Messung erfolgte als freier Stab, bei der der Rohling mit einem Impulshammer angeregt wurde, um aus dem so erzeugten Schallspektrum die ersten Biegemode zu analysieren. Mittels unterschiedlicher Analysatoren und Auswertemethoden wurden so jeweils Modenfrequenz, Dämpfung und Bandbreite, Klangdauer sowie das dynamische E-Modul ermittelt und einheitlich über alle Qualitätsstufen klassifiziert. Bemerkenswert ist besonders die große Streuung bei den Rohlingen mit Wuchsanomalie (Wimmerwuchs), wodurch mehrere dieser im Wertebereich der A-Qualität liegen.

Parallel dazu wurden aus dem Lagerbestand von ROHEMA von der TU Dresden Kanteln unterschiedlicher Holzarten und -qualitäten ausgewählt, um diese zu charakterisieren. Die Charakterisierung von

Hickory diente als Grundlage für die Referenzkennwerte, die ein modifiziertes Holz oder ein anderes einheimisches Holz erreichen muss. Es erfolgten Biegeprüfungen sowie die Bestimmung der dynamischen Elastizitätsmoduli und Dämpfungswerte mittels Modalanalyse. Im Ergebnis zeigte sich, dass Biegefestigkeit und Rohdichte von Hickory im Vergleich zu den europäischen Holzarten sehr hoch sind und dabei ein erwartetes

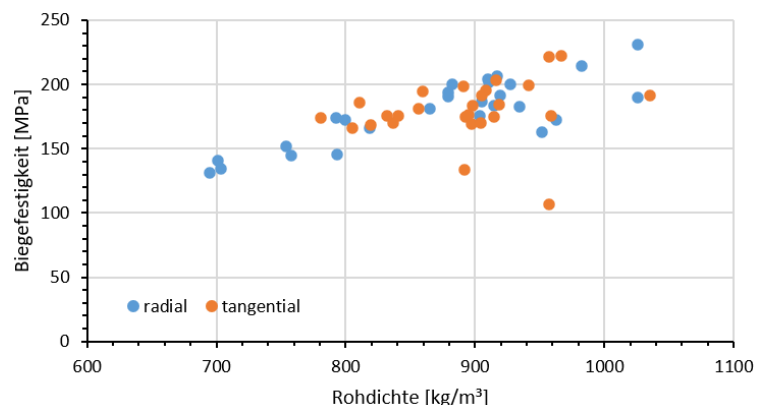


Abbildung 2: Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte von Hickory

ausgeprägtes lineares Verhalten zueinander besteht (Abbildung 2 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Die mittlere Rohdichte liegt bei 890 kg/m³. Die Biegefestigkeit liegt im Mittel bei

sehr hohen 180 MPa, wobei tangential zu radial kein Unterschied messbar war. Das Elastizitätsmodul liegt bei 17.000 MPa. Die Härte nach Brinell liegt bei 60 MPa und verhält sich ebenfalls linear zur Dichte. Dadurch werden auch Härtewerte bis 80 MPa erreicht. Diese hohen Kennwerte für Hickory verdeutlichen, warum genau dieses Holz für Drumsticks verwendet wird. Es ist extrem zäh, hat eine hohe Biegefestigkeit, Rohdichte und Härte bei einem sehr hohen Elastizitätsmodul. Die Dämpfung als Kennwert der Akustik wurde mit 0,01 bestimmt. Dieser Wert wiederum ist auch mit europäischen Harthölzern zu erreichen. Aus den Kennwerten von Hickory wurden die Anforderungen an die NH3-Modifikation und die Schichtholzaufbauten definiert.

2.2 Prüfstandentwicklung

Für den Prüfstand zur Bewertung der Haltbarkeit von Drumsticks wurden vom IfM und ROHEMA die Rahmenbedingungen festgelegt. Grundsätzlich sollen zwei Arten von Belastungsfällen untersucht werden: Rim-Shots und Hi-Hat-Schläge. Ersteres dient der Belastung in der Mitte bei harten Auf-

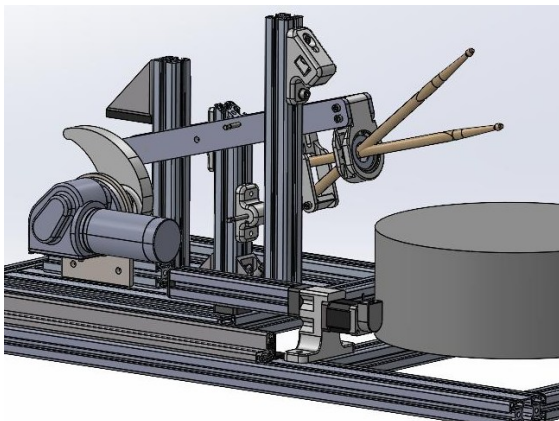


Abbildung 3: Prüfstand-Konstruktion

schlägen, zweiteres dem Abnutzen des Drumsticks an den Beckenkanten im konischen Bereich. Zu Beginn der konstruktiven Auslegung des Prüfstandes war es notwendig die Randparameter festzulegen. Einerseits sollte der Drumstick im ganzen Umfang gleichmäßig belastet werden, wodurch eine Drehvorrichtung notwendig war. Andererseits wurde eine Längenschiebung geplant, um die Belastung über einen definierten Bereich entlang des Drumsticks zu verteilen. Zunächst erfolgten Konstruktion und Bewegungssimulationen mittels SolidWorks. Grundidee war die Schlagbewegung des Sticks durch vorgespannte Federelemente auszuführen. Der Antriebsmotor mit integriertem Getriebe und angekoppelter Kurvenscheibe erfüllt die Aufgabe, nach dem Schlag, den Hebelarm wieder aufzunehmen, ihn zu spannen und wieder freizugeben, um eine erneute Schlagbewegung ausführen zu können. Um möglichst nahe an die reale Spielsituation heranzukommen, wurde der Stick weich gelagert. Alle komplexen Bauteile des Prüfstandes wurden zunächst mittels 3D-Druck hergestellt. Auf diese Weise konnten verschiedene Varianten schnell erprobt und weiter optimiert werden. Eine Fertigung der Aluminium- und Stahlbauteile wurde erst ausgeführt, nachdem die optimale Funktion der einzelnen Baugruppen sichergestellt war. Mittels einer eigens erstellten Softwarelösung ist die simultane Steuerung vom Signal-Interface für die Beschleunigungsaufnehmer, Schrittmotorsteuerung und Labornetzteil zur Antriebsmotoransteuerung möglich.

Der Prüfablauf zur Haltbarkeit wird zweistufig mit unterschiedlichen Belastungsfällen durchgeführt. Er beginnt mit dem Abriebtest mit bis zu 30.000 Anschlägen auf der Hi-Hat. Als Vergleichswert wird der Gewichtsverlust je zehntausend Anschläge herangezogen. Im zweiten Schritt erfolgt der Rim-Shot-

schlägen, zweiteres dem Abnutzen des Drumsticks an den Beckenkanten im konischen Bereich. Zu Beginn der konstruktiven Auslegung des Prüfstandes war es notwendig die Randparameter festzulegen. Einerseits sollte der Drumstick im ganzen Umfang gleichmäßig belastet werden, wodurch eine Drehvorrichtung notwendig war. Andererseits wurde eine Längenschiebung geplant, um die Belastung über einen definierten Bereich entlang des Drumsticks zu verteilen. Zunächst erfolgten Konstruktion und Bewegungssimulationen mittels SolidWorks. Grundidee war die Schlagbewegung des Sticks durch vorge-



Abbildung 4: Prüfstand im laufenden Betrieb

Test bis zum Bruch. Um zuverlässig gleichzeitig Fell und Spannring zu treffen, muss die Schlagposition regelmäßig manuell korrigiert werden, da sonst Ausbrüche am Drumstick dessen Belastung verringern würden. Die Haltbarkeit der untersuchten Drumsticks ist hierbei sehr unterschiedlich und reicht von einigen hundert bis über einhunderttausend Rim-Shots, wie Voruntersuchungen zeigten. Die für die Substituierung interessante mittlere Gewichtsklasse liegt dabei im Bereich von ca. 30.000 Rim-Shots. Es wurde festgelegt, dass der Versuch bei 50.000 Anschlägen beendet wird, auch wenn es noch nicht zum Bruch kam. Durch die gewählten Prüfzyklen ist eine gute Synchronisierung beider Teile gewährleistet und so eine durchschnittliche Prüfung von zwei Drumsticks pro Arbeitstag möglich. Beide Prüfstände zusammen haben im Rahmen der Untersuchungen bis zum Ende des Projektes über 15,3 Mio. dokumentierte Anschläge verrichtet, was einer Gesamtlaufzeit von fast 2.000 Stunden entspricht.

Zur weiteren Untersuchung der anfangs vermessenen Rohlinge wurden diese zu fertigen Drumsticks des Modells 5B weiterverarbeitet. Die Fertigung der Drumsticks erfolgte mittels CNC-gestützter Drehbearbeitung unter definierten und reproduzierbaren Prozessbedingungen. Nach Abschluss der Fertigung wurden die Drumsticks erneut an das IfM übergeben. Dabei wurde die genaue Zuordnung zum jeweiligen Rohling aufrechterhalten, denn nur so können die Projektziele zur Optimierung der Qualitätssortierung umgesetzt werden.

2.3 Erstellen der Datenbasis für Drumsticks

Die fertigen Hickory-Drumsticks wurden im IfM klimatisiert und daraufhin zunächst den **zerstörungsfreien Untersuchungen** unterzogen. Im ersten Schritt wurde mittels der automatisierten Anschlagvorrichtung der Rückprallfaktor ermittelt. Diese ist im Bericht zur „werkstatttauglichen Digitalmesstechnik“ erklärt. Daraufhin wurden am optimalen Drehpunkt anhand von Einzelanschlägen das Kraftspektrum sowie die klingende Modenfrequenzen jedes Drumsticks bestimmt. Aus dem Kraftspektrum wird der spektrale Centroid (Frequenzschwerpunkt) berechnet, welcher als Einzahlwert die Frequenzverteilung über das Spektrum beschreibt. Ein niedriger spektraler Centroid führt zu einem höhenärmeren Klang. Spätere Vergleiche mit anderen Werkstoffen zeigen, dass die hier erreichten Differenzen zwischen den Qualitätskategorien sehr gering sind. Dies trifft auch auf die Rückprallfaktoren zu.

Zum Schluss wurden die Drumsticks im Griffbereich über einen festgelegten Abstand zum Druckpunkt einer Materialprüfmaschine eingespannt und so die Biegesteifigkeit bzw. Federkonstante ermittelt. Aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtung der Jahrringstrukturen im praktischen Einsatz erfolgt dies in radialer und tangentialer Ausrichtung gemittelt über zwölf Biegungen.

Im Ergebnis korrelieren die Biegesteifigkeiten erwartungsgemäß maßgeblich mit dem Gewicht. Darüber hinaus zeigte sich, dass die C-Qualität aufgrund des schrägen Faserverlaufs und auch der starke Wimmerwuchs etwas niedrigere Steifigkeiten erreicht. Die Ergebnisse der zerstörungsfreien Untersuchungen zeigen, dass die Differenzen zwischen A- und B-Qualität sowie dem leichten Wimmerwuchs nur sehr gering sind und mit einer alternativen oder ausgeweiteten Stichprobe weiter sinken könnten.

Bereits bei den Voruntersuchungen zeigte sich die Herausforderung der hohen **Haltbarkeit** der Hickory-Drumsticks. Eine wichtige Erkenntnis war hierbei, dass die von Anfang an geplanten, praxisnahen Variationen in der Anschlagposition und der Drehbewegung zwingend notwendig waren, um den Verschleiß nachzubilden, denn nur so lösen sich die Holzfasern großflächig, wodurch es nach und nach zu deren Ausbrechen kommen kann. Beim Anschlag nur einer einzigen Position verhärtet sich diese Stelle durch Verdichtung des Holzes und die Haltbarkeit wird unnatürlich hoch. Dabei kommt es nicht immer zum vollständigen Zerteilen beim Bruch, da der Prüfstand die Schlagstärke auswertet und abschaltet, wenn der Drumstick plötzlich seine Steifigkeit durch einen internen Bruch verliert. Der Drumstick ist dann so weich, dass er nicht mehr spielbar und manuell brechbar wäre.

Der Abrieb beim Hi-Hat-Test zeigte einen großen Materialabtrag bei den sehr leichten Sticks und relativ geringe Unterschiede zwischen mittlerer und schwerer Gewichtsklasse. Weitere Einflüsse der Hickoryqualitäten fallen hierbei nicht auf. Beim Rim-Shot-Test zeigten sich deutlichere Unterschiede. Es besteht eine hohe Korrelation zum Gewicht, womit die in der Branche verbreitete Meinung diesbezüglich bestätigt wird. Eine niedrigere Haltbarkeit zeigen jedoch die C-Qualitäten der mittleren Gewichtsklasse sowie die Drumsticks mit starkem Wimmerwuchs. Letztere zeigen teilweise sehr stumpfe Brüche.

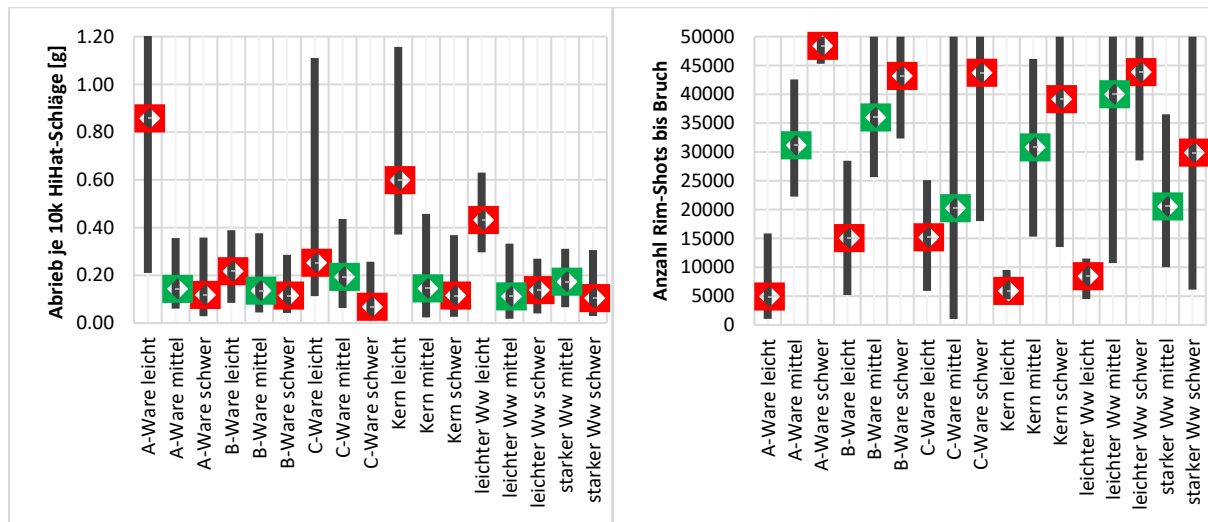


Abbildung 5: Ergebnisse der Hickoryqualitäten bei den Haltbarkeitstests mittels Prüfstandes

Es konnten folgende Feststellungen getroffen werden:

- Die untersuchte B-Ware ist der A-Ware in allen Parametern mindestens gleichwertig. Hierbei ist nur die mittlere Gewichtsklasse vergleichbar.
- Der schräge Faserverlauf der C-Ware hat sich nur in der mittleren Gewichtsklasse negativ auf die Haltbarkeit ausgewirkt und hier auch nicht auf alle Sticks. Die höhere Gewichtsklasse der C-Ware hat im Mittel eine hohe Haltbarkeit, jedoch einzelne Ausreißer nach unten.
- Das Kernholz und leichter Wimmerwuchs zeigen sich grundsätzlich als geeignet, wobei die Streubereiche im Bereich der Rim-Shot-Haltbarkeit zum Teil sehr nach unten reichen.

Im Rahmen der quantitativen Betrachtung der verfügbaren Rohmaterialien ergibt sich folgendes Bild: Bei einer Gesamtproduktion von 950.000 Rundstäben pro Jahr (Prognose 2026) entfallen etwa 8 % (76.000 Stück) auf Riegelwuchs. Davon können nach aktueller Klassifikation rund 65 % (ca. 50.000 Stück) der A-Ware zugeordnet werden. Zusätzlich kann durch eine Anpassung der Qualitätsgrenzen ein weiterer Anteil von etwa 3 % der Gesamtmenge (ca. 30.000 Stück) aus bislang als B-Ware eingestuft Materialien in die A-Ware überführt werden. Insgesamt ergibt sich somit ein zusätzlich nutzbares A-Ware-Potenzial von etwa 80.000 Rohlingen pro Jahr.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass durch eine Anpassung der Qualitätskriterien nicht nur eine deutlich effizientere Nutzung der Hickory-Ressource möglich ist, sondern auch eine signifikante wirtschaftliche Verbesserung erzielt werden kann. Gleichzeitig führt die erweiterte Nutzung von B-Ware zu einer nachhaltigen Reduzierung von Ausschussmaterial und unterstützt damit einen ressourcenschonenden Einsatz des Rohstoffs. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine fundierte Grundlage für die Weiterentwicklung der internen Sortier- und Qualitätsdefinitionen in der Drumstick-Produktion von ROHEMA.

2.4 Prozessentwicklung NH₃-Modifikation

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde zunächst ein Verfahren zur Modifikation von einheimischem Rotbuchenholz mit gasförmigem Ammoniak (NH₃) entwickelt und experimentell erprobt. Ziel war es, durch eine kontrollierte Begasung die Eigenschaften des Buchenholzes so zu verändern, dass es als Substitut für das bisher verwendete Hickoryholz eingesetzt werden kann. Die Modifikation soll insbesondere eine Erhöhung der Rohdichte (Eigenverdichtung), eine Verbesserung der akustischen Eigenschaften sowie eine Steigerung der Schlagzähigkeit bewirken. Die Wirkungsweise des Verfahrens beruht darauf, dass Ammoniakgas aufgrund seiner kleinen Molekülgröße und seines ausgeprägten Dipolmoments tief und gleichmäßig in die Holzzellwand eindringt. Dort wechselwirkt es mit den Hydroxylgruppen von Cellulose, Hemicellulose und Lignin, löst die internen Wasserstoffbrückenbindungen vorübergehend auf und führt zu einer Plastifizierung der Zellwand. Beim anschließenden Verdunsten des Ammoniaks bilden sich die Bindungen in einer neuen, kompakteren Anordnung zurück – das Holz verdichtet sich von selbst, ohne dass eine mechanische Pressung erforderlich ist.

Für die Versuche wurde eine eigens konzipierte Begasungsapparatur aufgebaut, deren Kernstück ein druckfester Edelstahl-Autoklav bildet. Die isotherme Prozessführung wird über einen externen Temperierkreislauf realisiert, der den Autoklav über einen Wassermantel auf der jeweils gewählten Solltemperatur hält. Die SPS-Steuerung regelt den Innendruck automatisch innerhalb eines definierten Hysterese Fensters, indem sie das Magnetventil bei Unterschreiten des unteren Sollwertes öffnet und bei Erreichen des oberen Sollwertes wieder schließt.

Die Behandlungsintensität kann über vier voneinander unabhängige Stellgrößen gesteuert werden: **Temperatur, Dampfdruckverhältnis (p_i/p_s), Absolutdruck und Behandlungsdauer**. Die Auswahl der konkreten Parameterwerte erfolgte auf Basis einer ausführlichen Literaturrecherche sowie thermodynamischer Überlegungen zum Phasenverhalten von Ammoniak. Aus den Parameterkombinationen wurden vier Varianten geplant. Zur Bewertung des entwickelten Modifikationsverfahrens wurden die vier Behandlungsvarianten an Rotbuchenholz hinsichtlich ihrer physikalischen, mechanischen und akustischen Eigenschaften untersucht und mit nativem Rotbuchen- sowie Hickoryholz verglichen. Untersucht wurden Rohdichte, Schlagzähigkeit, Bruchschlagarbeit, Biegefestigkeit sowie das schwingungsdynamische Verhalten (dyn. E-Modul, dyn. Schubmodul und Dämpfung) mittels experimenteller Modalanalyse.



Abbildung 6: Optik der Varianten, Rotbuche, V1, V2, V3, V4, Hickory

Als Vorzugsvariante geht aus den Untersuchungen eindeutig Variante 1 (moderate Temperatur: 20 °C und hohes Dampfdruckverhältnis) hervor. Sie ist die einzige Variante, die in allen relevanten Kennwerten Verbesserungen gegenüber nativer Rotbuche erzielt. Eine vollständige Substitution von Hickory durch ammoniakmodifizierte Rotbuche ist auf Basis der ermittelten Werte jedoch nicht möglich – die Rotbuche erreicht selbst in der Vorzugsvariante nur etwa 47 % der Schlagzähigkeit und rund 91 % der Rohdichte von Hickory. Für Anwendungen mit reduzierten mechanischen Anforderungen oder als gestalterische Alternative (Farbgebung) bietet das Verfahren jedoch ein interessantes Potenzial. Daraufhin wurden weitere Hölzer getestet und schließlich ammoniakmodifizierte Birke zur Weiterverarbeitung als Muster-Drumsticks übergeben. Diese erwiesen sich jedoch als nicht haltbar.

Um dennoch zu versuchen, eine erhöhte Dichte zu erzeugen, wurde in dem Arbeitspaket noch ein weiterer Ansatz verfolgt: Es wurden Hickorysortimente, welche wegen zu geringer Dichte aussortiert

wurden, an der TU Dresden auf eine Zieldichte von 900kg/m^3 in einer offenen Pressvariante verdichtet und anschließend zu Drumsticks verarbeitet und getestet. Dabei zeigte sich, dass die Verdichtung generell als alternative Modifikationsmethode geeignet ist. Das Holz ist allerdings nicht feuchtestabil und die Drumsticks zeigten keine Verbesserung beim Abrieb- bzw. Hi-Hat-Test im IfM, jedoch konnte die Rim-Shot-Haltbarkeit deutlich verbessert werden.

2.5 Prozessentwicklung Schichtholz

In einer ersten Versuchsreihe wurden Schichtholzbalken aus europäischem Ahorn mit unterschiedlichen Furnierstärken und Klebstoffsystemen hergestellt. Ziel war die Untersuchung des Einflusses der Furnierstärke auf die mechanischen Eigenschaften und die Verarbeitbarkeit. Als optimal erwies sich ein Bereich von 0,55 bis 1,4 mm, der später auf 0,55 bis 0,90 mm eingegrenzt wurde. Dünnere Furniere verursachten erhöhten Prozessaufwand und Verzug, dickere erschwerten die Weiterverarbeitung.

Als geeignete Holzarten wurden Ahorn, Birke und Elsbeere ausgewählt. Amerikanischer Nussbaum wurde aufgrund eingeschränkter Verfügbarkeit ausgeschlossen. Parallel wurden verschiedene Klebstoffsysteme untersucht. Ein PU-Hotmelt überzeugte hinsichtlich der Verarbeitung, erwies sich jedoch aufgrund zu hoher Elastizität für Drumsticks als ungeeignet. Ein kaltes 1K-PU-System zeigte gute Ergebnisse und wurde weiterverfolgt, während PVAc-Dispersionsklebstoff wegen hoher Feuchteaufnahme, Verzug und mangelnder Formstabilität zunächst verworfen wurde.

Im Verlauf des Projektes ermöglichte eine neue Leimauftragsmaschine für kalte Klebstoffe einen reproduzierbaren maschinellen Auftrag. Die Untersuchungen wurden auf Birke und Elsbeere ausgeweitet. Birke ließ sich problemlos verarbeiten, während Ahorn und insbesondere Elsbeere aufgrund von Wuchsspannungen höhere Anforderungen an den Klebstoffauftrag stellten. Die hergestellten Muster erreichten überwiegend gute mechanische Kennwerte bei geringer Streuung. Schwächen zeigten sich jedoch im Bruchverhalten unter dynamischer Belastung, das überwiegend auf ein Versagen der Klebefuge zurückzuführen war. Eine Sperrlage erhöhte zwar die Quersteifigkeit, führte jedoch zu Problemen bei der Weiterverarbeitung und wurde deshalb verworfen.



Abbildung 7: Besäumte Balken mit Montage-PUR-Klebstoff aus Elsbeere (oben), Birke (mitte) und Ahorn (unten)

Abschließend wurden zwei PUR-Montageklebstoffe sowie Melaminfilme untersucht. Ein PUR-System wurde wegen ungleichmäßiger Strukturen ausgeschlossen, während das zweite eine gute Verarbeitbarkeit und homogene Querschnitte zeigte und für weitere Untersuchungen ausgewählt wurde.

Parallel zu den Arbeiten bei Fritz Kohl untersuchte die TU Dresden den Einfluss verschiedener Klebstoffsysteme und einer zusätzlichen Verdichtung auf die Herstellung von Schichtholz. Ziel war es, eine Rohdichte von etwa 900 kg/m^3 sowie mechanische Eigenschaften zu erreichen, die möglichst nah an Hickory heranreichen. Hierzu wurden ein PVAc-Dispersionsklebstoff und ein feuchtigkeitshärtender 1K-PU-Klebstoff mit Birken-Schäl furnieren untersucht. Die Entwicklung erfolgte mithilfe einer statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments), um den Einfluss der wesentlichen Prozessparameter und deren Wechselwirkungen systematisch zu bewerten. In Pilotversuchen wurden geeignete Bereiche für Pressdruck, Klebstoffmenge und Temperatur bestimmt. Anschließend wurden diese Para-

meter in faktoriellen Versuchsreihen hinsichtlich Rohdichte, Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul untersucht. Ergänzend erfolgten mikroskopische Analysen der Klebstofffugen und der Klebstoffpenetration. Die im Labormaßstab ermittelten Vorzugsvarianten wurden schließlich auf einen industriennahen Maßstab übertragen. Dabei kamen eine Leimauftragsmaschine und eine Kompressionspresse zum Einsatz. Die mechanischen Prüfungen erfolgten unter praxisnahen Bedingungen, um eine direkte Vergleichbarkeit mit dem Referenzmaterial Hickory zu gewährleisten.

Die mikroskopischen Untersuchungen bestätigen für beide Varianten eine gleichmäßige Klebstofffuge sowie eine gute Penetration des Klebstoffs in die Gefäßzellen des Birkenfurniers bis in die mittleren Lagen des Verbundes. Die Furnierdicke wurde dabei durch das Verpressen reduziert. Eine Aufschlüsselung der Rohdichteänderung ergab, dass bei der PVAc-Variante etwa 60 % der Dichteerhöhung auf die Komprimierung des Furniers und 40 % auf den Klebstoffeintrag zurückzuführen sind, während bei der PU-Variante das Verhältnis mit ca. 33 % Komprimierung zu 67 % Klebstoffeintrag genau umgekehrt liegt – Folge der höheren Eigendichte des PU-Klebstoffs (1.300 kg/m^3) und der geringeren mechanischen Verdichtung. Die im Hauptversuch ermittelten mechanischen Kennwerte sind in folgender Tabelle dem Referenzmaterial Hickory gegenübergestellt:

Tabelle 1: Eigenschaften der PVAc- und PU-Birkenschichthölzern im Vergleich zu Hickory

Eigenschaft	Einheit	PVAc-Variante	PU-Variante	Hickory (Referenz)
Rohdichte	kg/m^3	884	879	882
Biegefestigkeit	N/mm^2	138	158	180
Biege-E-Modul	N/mm^2	15.267	15.862	16.918
Massenänderung nach Konditionierung	%	-0,84	+0,23	–
Dickenänderung nach Konditionierung	%	-0,46	+0,06	–

Beide entwickelten Schichthölzer erreichen die angestrebte Zielrohndichte zuverlässig. Die mechanischen Kennwerte des Hickoryholzes konnten nicht vollständig erreicht werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Biegeprüfung der Schichthölzer und des Hickorys nach unterschiedlichen Normen erfolgte und die Probekörper aus dem Randbereich der Schichtholzplatten entnommen wurden. Die PU-Variante erzielt die höheren Festigkeitswerte und zeigt zudem eine deutlich bessere Maßhaltigkeit nach dem Pressen. Die Konditionierung führt nur zu einer minimalen Massen- und Dickenzunahme, da der Klebstoff lediglich geringe Mengen Luftfeuchte aufnimmt. Die Bruchbilder der PU-Variante weisen einen schräg durch den Verbund verlaufenden Mischbruch auf, was auf eine sehr gute Verbindung zwischen Klebstoff und Holzsubstanz hindeutet. Zudem treten bei der PU-Variante keine Risse oder Lunker in den Klebstofffugen auf, wie sie bei der PVAc-Variante vereinzelt beobachtet wurden und vermutlich auf lokale Inhomogenitäten beim Klebstoffauftrag zurückzuführen sind. Die PVAc-Variante stellt demgegenüber die wirtschaftlichere Lösung dar, weist jedoch ein Nachschwinden während der Konditionierung auf, das durch die fortgesetzte Verdunstung des Dispersionswassers nach dem Pressen verursacht wird. Beide entwickelten Schichtholzaufbauten zeigen das grundsätzliche Potenzial, Hickoryholz in Drumstick-Anwendungen zu ersetzen.

2.6 Alternative Holzarten

Auf Basis der vorliegenden materialwissenschaftlichen Erkenntnisse bei der TU Dresden wurden alternative Holzarten mit vergleichbaren mechanischen Eigenschaften einbezogen. Dabei wurde insbesondere die Robinie favorisiert, da sie in wesentlichen Parametern, wie Festigkeit, Dichte und Elastizität, Ähnlichkeiten zu Hickory aufweist. Ein weiterer Vorteil der Robinie liegt in ihrer regionalen Verfügbarkeit innerhalb Europas, häufig in Form von Plantagenholz. Für die Untersuchungen wurde gezielt hoch-

wertiges Robinienholz als Rohmaterial eingesetzt. Dabei zeigte sich jedoch, dass die Bereitstellung geeigneten Ausgangsmaterials mit den notwendigen Eigenschaften mit erheblichen Herausforderungen verbunden ist. Ursache hierfür ist insbesondere der charakteristisch unregelmäßige und häufig gekrümmte Faserverlauf der Robinie. Das beschaffte Rohmaterial wies infolgedessen eine Ausschussquote von etwa ca. 40 % auf, was vergleichbar zu den derzeit beobachteten Qualitätsverlusten bei importiertem Hickory liegt. Für die Bewertung der Robinie wurden zunächst Rundstäbe gefertigt und daraufhin identische Qualitätsanforderungen und Selektionskriterien wie bei Hickory angewendet, um eine konsistente und belastbare Vergleichbarkeit hinsichtlich der Materialeignung zu gewährleisten. Im Anschluss erfolgte die Gewichtsselektion der als A-Ware klassifizierten Rohlinge. Dabei zeigte sich, dass lediglich 25 der insgesamt 106 Rohlinge das erforderliche Gewicht erreichten, um für die Herstellung von Drumsticks des Modells 5B geeignet zu sein. Die Auswertung zeigt zudem, dass insgesamt ein Großteil der Rohlinge tendenziell in niedrigeren Gewichtsklassen liegt.



Abbildung 8: Muster-Drumsticks aus Robinie

Die Praxistests mit erfahrenen Profimusikern lieferten sehr positive Rückmeldungen zur Robinie, dabei wurden insbesondere das stärkere Rebound-Verhalten genannt, was die objektiven Messungen bestätigt, als auch die hohe Haltbarkeit positiv hervorgehoben.

2.7 Untersuchungen von Muster-Drumsticks aus alternativen Werkstoffen

Die von den Projektpartnern entwickelten Muster-Drumsticks wurden am IfM jeweils nach der gleichen Methodik zerstörungsfrei und auf dem Prüfstand vermessen. Die Ergebnisse der Parameter Gewicht, Biegesteifigkeit, Spektraler Centroid, Rückprallfaktor sowie die Haltbarkeitswerte wurden jeweils mit Bruchbildern in einer kurzen Auswertung zusammengefasst und diente als Grundlage für die weiteren Versuche der Projektpartner. Als Referenz dienten jeweils die mittleren Gewichtsklassen der Hickoryqualitäten. Untersucht wurden



Abbildung 9: Muster-Drumsticks aus alternativen Holzwerkstoffen nach den Prüfungen

- Holzarten, die bereits eingesetzt werden, wie Weißbuche, Ahorn (hard maple)
- neue alternative Hölzer, wie die Robinie
- Modifizierte Hölzer, wie Birke (NH3), Fichte (verdichtet), leichtes Hickory (verdichtet),
- Schichthölzer aus Ahorn, Birke und Elsbeere

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse ausgewählter Parameter abgebildet. Darüber hinaus zeigte sich beim Rückprallverhalten nur ein geringer Einfluss des Materials. Viele Materialien zeigen dabei im Mittel sogar ein tendenziell besseres Verhalten als Hickory, liegen aber in dessen Streubereich. Ein deutlich besseres Rückprallverhalten konnte die verdichtete Fichte erreichen und auch Robinie lag noch deutlich über dem Referenzniveau von Hickory. Schlechtere Werte zeigt hingegen die NH3-modifizierte Birke.

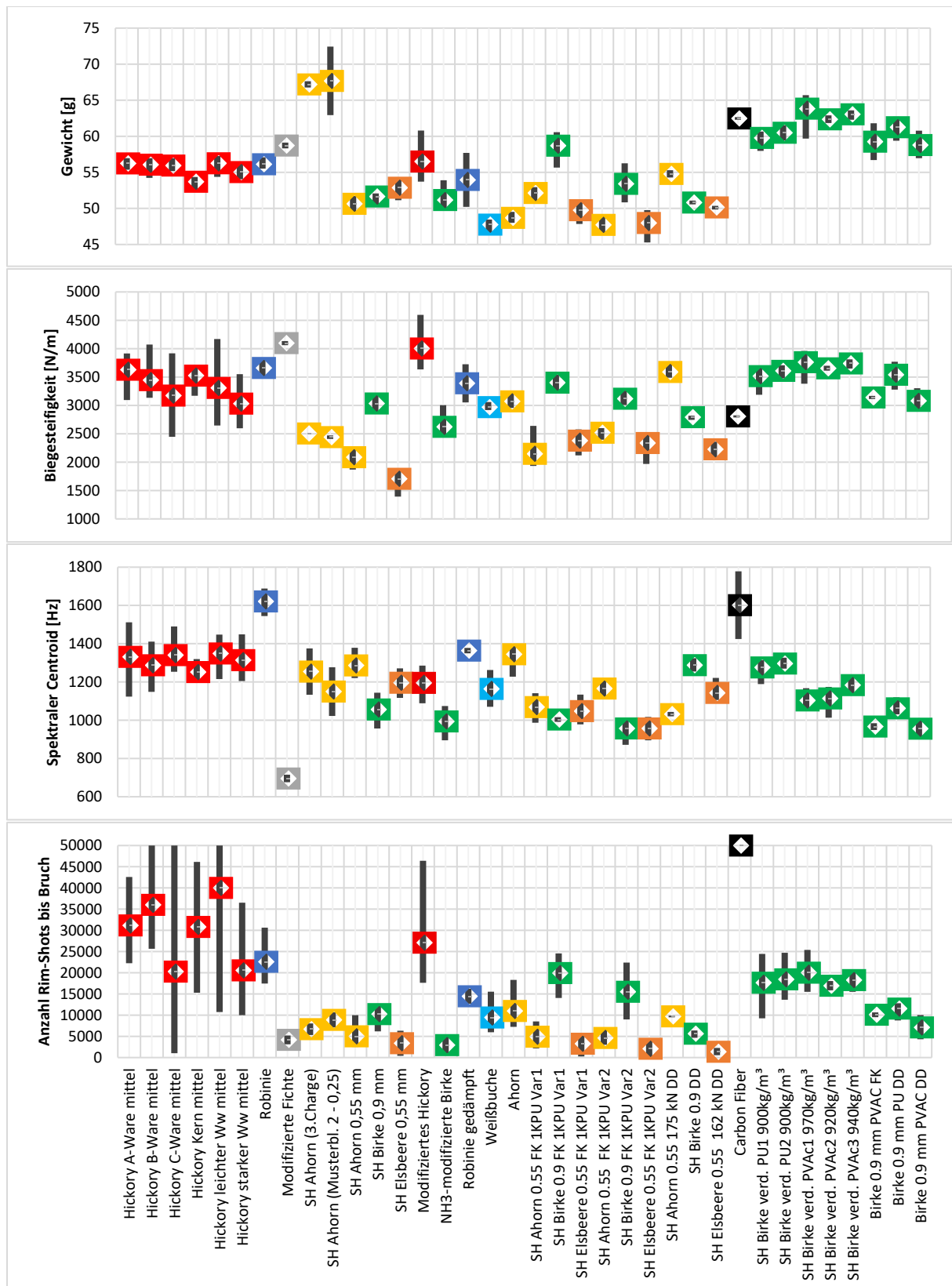


Abbildung 10: Gewicht, Biegesteifigkeit, Spektraler Centroid und Rim-Shot-Haltbarkeit der Muster-Drumsticks aus alternativem Material (die Farbe charakterisiert die grundlegende Holzart)

Während Ahorn und Elsbeere sehr stumpfe Brüche aufwiesen, zeigte Birke das typische „Ausfasern“, vergleichbar dem von Hickory. Ähnlich verhielt sich auch die verdichtete Fichte. Elsbeere erwies sich insgesamt als ungeeignet. Ahorn erreichte zwar einen geringen Abrieb beim Hi-Hat-Test, jedoch eine niedrige Haltbarkeit beim Rim-Shot-Test. Die mit Birke hergestellten Schichthölzer bringen insgesamt die besten Werte hervor.

2.8 Untersuchungen von zusammengefügtten Muster-Drumsticks

Zur besseren Materialausnutzung wurden Fügeverfahren entwickelt, um unterdimensionierte Hickory-Holzabschnitte für die Drumstick-Produktion nutzbar zu machen. Hierfür wurde eine Zapfenverbindung als kraft- und formschlüssiges Verbindungssystem untersucht. Im Mittelpunkt stand die Entwicklung einer Zapfengeometrie, die eine hohe mechanische Belastbarkeit sowie eine zuverlässige und reproduzierbare Verklebung gewährleistet. Besondere Aufmerksamkeit galt der Klebstoffverteilung innerhalb der Verbindungszone. Ziel war es, Lufteinschlüsse und Klebstoffverdrängung zu vermeiden, da beide Effekte die Festigkeit und Dauerhaftigkeit der Verbindung erheblich beeinträchtigen können. Daher wurden zunächst vier unterschiedliche Zapfengeometrien entwickelt und erprobt. Die Versuche zeigten, dass die Klebeverbindung in den meisten Fällen die Schwachstelle darstellte. Löst sich diese, versagt auch die Zapfenverbindung. Einzig bei einer Variante riss der Zapfen bei einigen Sticks im Inneren, was zeigt, dass die Verleimung hielt, aber der Zapfen selbst die Schwachstelle darstellt. Bei anderen dieser Variante brach der Drumstick an gänzlich anderer Stelle.

Daraufhin wurde die Zapfendimension variiert, welcher Einfluss auf Stabilität und die effektive Klebefläche hat. Dazu erfolgten sowohl Ansätze über CAD-Simulationen als auch über die Berechnung des Flächenträgheitsmomentes. Es wurde daraufhin eine weitere Messreihe mit drei unterschiedlichen Zapfendurchmessern durchgeführt. Diese zeigten durchweg eine gute Haltbarkeit und nur selten Brüche an der Zapfenverbindung. Jedoch löste sich dennoch teilweise die Verleimung, was sich maßgeblich am fehlenden Rückprallverhalten nach Testende zeigte. In einer weiteren Versuchsreihe zeigte sich dann das Problem einer zu geringen Passgenauigkeiten zwischen Zapfen und Hülse wodurch die eingebrachte Klebermenge zu gering war und die Haltbarkeiten deutlich niedriger ausfielen.



Abbildung 11: Gelöste Zapfenverbindungen infolge einer unzureichenden Klebstoffverteilung

Es wurde nachgewiesen, dass die Zapfenverbindung technisch funktioniert und haltbarer als der Drumstick selbst sein kann. Gleichzeitig können Verformungen des Holzes nach dem Drehprozess sowie geringfügige Schiefstellungen der Fügeverbindung zu Maßabweichungen und einer verminderten Geradheit des Drumsticks führen. Dadurch werden die Qualitätsanforderungen des Endprodukts beeinträchtigt. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Fügeverfahren für Drumsticks ein hohes Potenzial zur besseren Nutzung von Hickory-Ressourcen bieten, jedoch weiteren Entwicklungsbedarf aufweisen.

2.9 Ausbau der I-Ma-Tech-Materialdatenbank

Als interessantes neues Material stellte sich das Birkenschichtholz heraus. Hierfür wurden unterschiedliche Varianten mit Klebstoffsystemen auf Basis von PU und PVAc gefertigt und daraus die Proben in Standardgeometrie von der TU Dresden hergestellt. Die Verfahrensweise erfolgte dabei, wie im Projekt „Materialtypisierung“ festgelegt. Der Werkstoff weist ein hohes E-Modul auf, jedoch auch eine relativ hohe Dämpfung, wodurch es als direktes Klangholz ungeeignet scheint. Für andere Bauteile im Musikinstrumentenbau stellt es jedoch einen guten Alternativwerkstoff dar, da sich eine hohe Dichte erreichen lässt, welche sich über die Fertigungsparameter einstellen lässt.

3 Projektergebnisse

Die Untersuchungen zeigten, dass das bisher verwendete Hickoryholz im Vergleich zu heimischen Holzarten deutlich bessere mechanische Kennwerte aufweist, insbesondere E-Moduli und Festigkeiten.

Es konnte erfolgreich eine automatisierte Prüfmaschine zur praxisnahen Bewertung der Haltbarkeit entwickelt und aufgebaut werden. Mittels dieser wurde die bisherige Hickory-Qualitätssortierung untersucht, wodurch Optimierungsmöglichkeiten festgestellt werden konnten. Eine deutlich bessere Ausnutzung der Hickory-Ressourcen ist damit nun möglich. Die von den Projektpartnern entwickelten Muster-Drumsticks wurden spieltechnisch, klanglich und verschleißbezogen bewertet. Dabei zeigte sich, dass die Fügeverbindungen eine haltbare Option darstellen können, es aber noch weiterer Entwicklungen zur Qualitätssicherung bedarf.

Geeignetes Schichtholz kann mit Weißleim oder PU mit bestimmten Parametern und unter zu Hilfe-nahme der Verdichtung des Presspaketes erfolgreich hergestellt werden. Dabei wurde mit Birke die beste Haltbarkeit erreicht, wenn auch noch etwas unter dem Hickory-Niveau und einer stärkeren Betonung tiefer Frequenzbereiche. Auch hiermit erscheinen Weiterentwicklungen vielversprechend.

Die Ammoniakmodifizierung ist grundsätzlich anwendbar mit Birke, Rotbuche und Esche, da sich die Dichte durch eine gesättigte Ammoniakbehandlung erhöhen lässt. Die Schlagzähigkeit erhöhte sich dabei aber nicht wie gewünscht, wodurch diese Hölzer nicht für die Verwendung für Drumsticks geeignet sind. Als alternatives Holz konnte zusätzlich noch Robinie als geeignet identifiziert werden, jedoch hat es Nachteile in der Verarbeitung, wodurch ein stärkerer Maschinen- und Werkzeugverschleiß entsteht und sich die Verfügbarkeit auf leichtere Gewichtsklassen konzentriert.

4 Potentielle Nutzung der Projektergebnisse

Die Projektergebnisse schaffen eine wesentliche Grundlage für die langfristige Sicherung der Materialbasis im Drumstick- und allgemeinen Musikinstrumentenbau. Durch die gewonnenen Erkenntnisse zu modifizierten Hölzern, Schichtholzsystemen und alternativen Holzarten konnten geeignete Werkstoffe identifiziert und erfolgreich zu Drumsticks verarbeitet werden. Dabei zeigte sich, dass Furnierschichtholz auf Basis heimischer Holzarten grundsätzlich geeignet ist, die mechanischen Anforderungen an Drumsticks weitestgehend zu erfüllen. Insbesondere konnten Biegesteifigkeit, Rückprallverhalten und Abriebfestigkeit auf ein mit Hickory vergleichbares Niveau gebracht werden. Eine wesentliche Herausforderung besteht jedoch weiterhin im Bruchverhalten unter hochdynamischer Belastung. Die Verbesserung der Bruchzähigkeit und der Verklebungstechnologie stellt daher einen zentralen Schwerpunkt der weiteren Entwicklungsarbeiten dar.

Für ROHEMA bieten die Projektergebnisse ein erhebliches Potenzial zur nachhaltigeren und wirtschaftlicheren Herstellung von Drumsticks. Die Erkenntnisse zur Haltbarkeit unterschiedlicher Hickory-Qualitäten ermöglichen eine Optimierung der Sortier- und Auswahlkriterien, wodurch die Materialausnutzung verbessert und Ausschuss reduziert werden können. Gleichzeitig tragen die untersuchten alternativen Werkstoffe und Holzmodifikationen langfristig zur Diversifizierung der Rohstoffbasis bei. Die entwickelten Prüf- und Bewertungsverfahren schaffen zudem eine objektive Grundlage für zukünftige Qualitätsstandards in der Drumstick-Produktion.

Auch für die weiteren Projektpartner ergeben sich erhebliche Vorteile. Das im Projekt aufgebaute Know-how im Bereich der Materialentwicklung, der Prüftechnik sowie der Prüfverfahren eröffnet neue Forschungs- und Entwicklungsfelder im Bereich der Schlaginstrumente und darüber hinaus. Die kontinuierlich erweiterte Materialdatenbank steht den Bündnispartnern künftig als Grundlage für die Entwicklung und Bewertung weiterer modifizierter Materialien zur Verfügung und erleichtert die Übertragung der Projektergebnisse auf andere Anwendungen.