

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. M. Kaliske, Dipl.-Ing. S. Saft, Dipl.-Ing. C. Jenkel, Dipl.-Ing. R. Lang
 Technische Universität Dresden, Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke
 Bauingenieurwesen
 Dipl.-Rest. A. Haufe, Dipl.-Rest. S. Ehrlich
 Stiftung Händel-Haus

„Statische Strukturuntersuchungen an historischen Tasteninstrumenten“
 Abschlussbericht April 2012

1. Ausgangssituation

Historische Musikinstrumente gehören – wie Baudenkmäler und bildende Kunst – zu den großen Leistungen der abendländischen Kultur. Ihre Bedeutung erschöpft sich nicht alleine in ihrer ästhetischen Dimension. Sie sind zugleich der Schlüssel für die Erforschung und Interpretation alter Musik. Die seit den 1960er Jahren sich etablierende historische Aufführungspraxis für die Aufführung von Musik zwischen 1550 und 1850 wäre ohne die Erforschung historischer Instrumente nicht möglich gewesen. Es gehört deshalb zu den wichtigen Aufgaben aller bedeutenden Musikinstrumentensammlungen, die Instrumente zu erhalten und möglichst spielfähig zu machen.

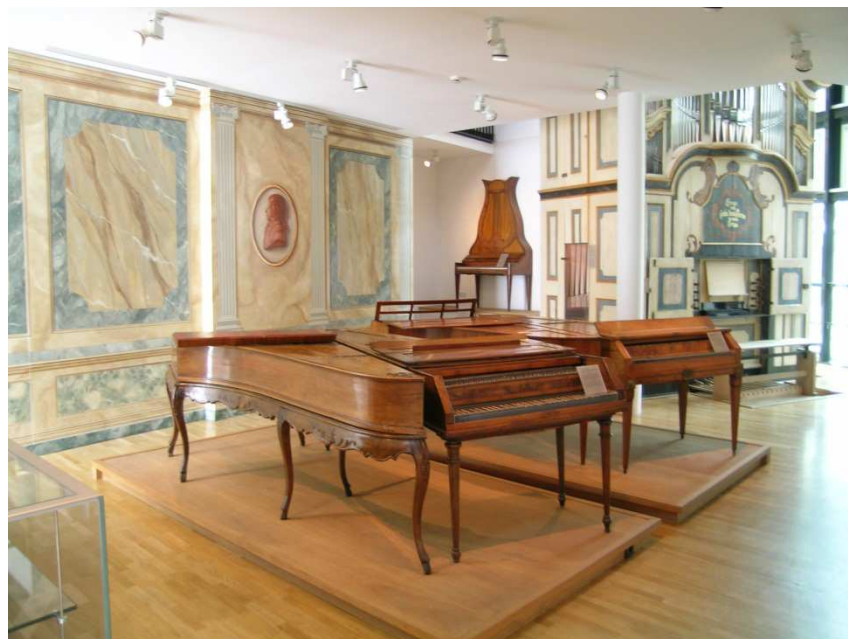


Abbildung 1: *Hammerflügel MS28, Tangentenflügel MS30*

Restaurierungsmaßnahmen sind nur vertretbar, wenn sie die Originalsubstanz nicht gefährden. Hier fehlt es gerade im Bereich der Statik von Hammerflügeln an wissenschaftlichen Untersuchungen, die Grundlage für Restaurierungen wären. Ziel des Projektes „Statische Strukturuntersuchungen an historischen Tasteninstrumenten“ war es, einen Beitrag zum Schließen dieser Wissenslücke zu leisten.

Die erzielten Ergebnisse sind von grundlegender Bedeutung für alle Sammlungen von Tasteninstrumenten. Da die im Folgenden vorgestellten Arbeiten noch immer fortgeführt werden, wird der vorliegende Bericht regelmäßig aktualisiert.

2. Forschungsobjekte

In der Sammlung der Stiftung Händel-Haus befindet sich ein Hammerflügel von Johann Schmidt 1786 (MS28), der für die Aufführung der Werke Wolfgang Amadeus Mozarts prädestiniert ist. Denselben Status besitzt der Hammerflügel von Conrad Graf 1835 (MS44) für die Aufführung von Werken Ludwig van Beethovens. Die Entwicklung des Hammerflügelbaus erfolgte in dieser frühen Phase sehr schnell. Beide Instrumente unterscheiden sich in ihrer Konstruktion erheblich voneinander. Sie sind aber in ihrer Bauweise keine Ausnahmekonstruktionen, sondern typisch für den jeweiligen Instrumentenbauer und den Instrumententypus jener Zeit.

Der in diesen spielbaren Instrumenten vorhandene Saitenbezug bewirkt beim Spannen erhebliche Kräfte und damit Geometrieänderungen an Stimmstock, Gehäusekorpus und Resonanzboden. Seit 1800 hat sich in der Aufführungspraxis die Stimmhöhe verändert, d.h. erhöht und damit auch die Zugbelastung und letztlich die Beanspruchung der Tragkonstruktion verstärkt. Die aus lokaler Überbeanspruchung resultierenden Schadensbefunde zeigen sich z.B. durch Risse oder Stauchungen an den Wirbeln und der Eisenspreize des Stimmstocks (kleinflächige Lastableitung, vgl. Abb. 2a), im Unter- und Resonanzboden (Geometrieänderung vgl. Abb. 2b) sowie an der Stimmstockauflage (Lang-Querholz-Klebverbindung).

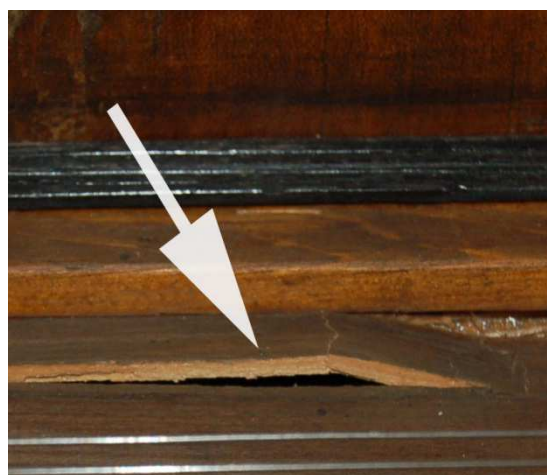
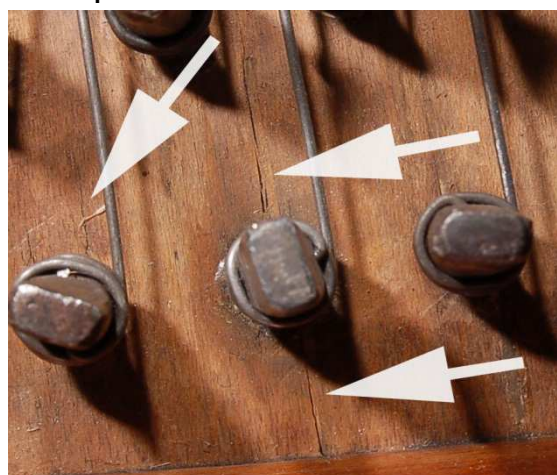


Abbildung 2: a) MS44 Risse Stimmstock; b) MS30 Riss Resonanzboden

Im Sinne einer präventiven Konservierung und für die Erarbeitung von Restaurierungskonzeptionen sind Kenntnisse über statische strukturmechanische Charakteristiken im Instrument von entscheidender Bedeutung. Nur mit diesem Wissen ist es möglich abzuschätzen, ob und unter welchen zulässigen Beanspruchungen ein Tasteninstrument spielbar restauriert werden kann bzw. eine weitere konzertante Nutzung vertretbar ist.

Den Untersuchungen und Schadensanalysen dieser Instrumente kommt somit eine erhebliche Bedeutung zu, ohne die nicht spielbar restauriert werden kann. Aktuell stehen den Musikinstrumentenrestauratoren keine technischen Hilfsmittel zur Verfügung, welche die Erarbeitung strukturmechanischer Eigenschaften und die Prognose des Strukturverhaltens erlauben.

Die Restauratoren der Stiftung Händel-Haus haben jedoch seit 1993 das Verformungsverhalten an den im Händel-Haus konzertant genutzten Instrumenten dokumentiert. Die mittels Nivellieretechnik vermessenen Gehäuseoberkanten, Resonanzbodenflächen und Stimmstockwölbungen können grafisch als Höhenlinien dargestellt werden. Durch die Genauigkeit der Messtechnik konnten an Hammerflügeln über Jahre andauernde Verformungen nachgewiesen werden. Diese Messungen dokumentieren jedoch nur den IST-Zustand mit den jeweiligen Änderungen und lassen keine Prognosen oder gar ein Erkennen der Grenz-Zustände und Schadensursachen zu (vgl. Abb. 3). Dennoch liefern sie wichtige Daten für die Validierung der nachfolgend vorgestellten Modelle.

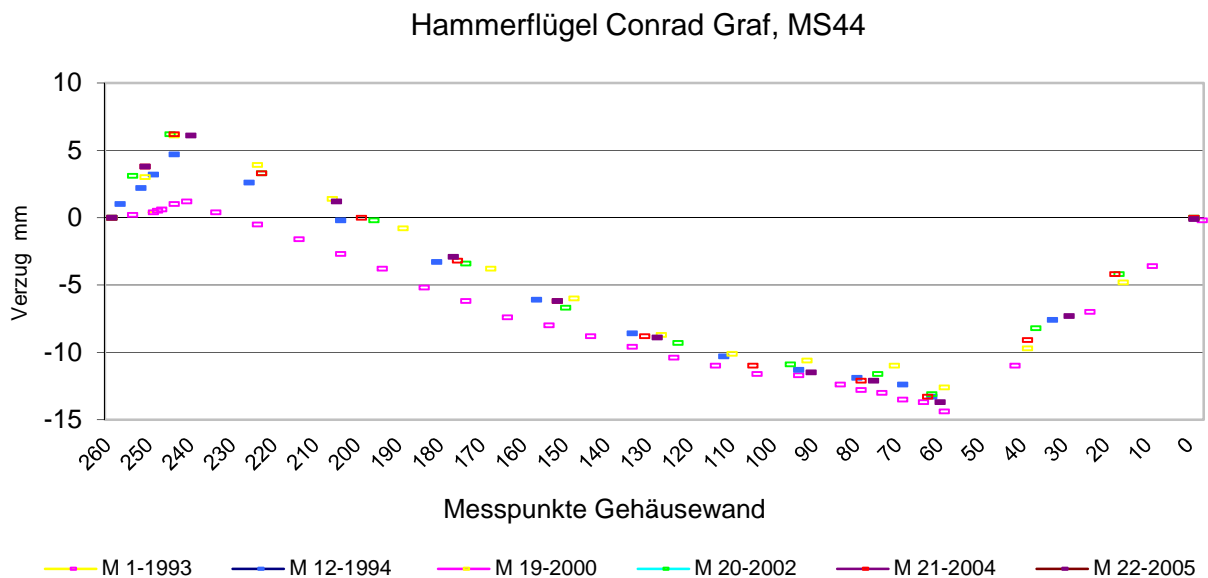


Abbildung 3: MS44 Messpunkte Höhenlinie Gehäuse, Zeitraum 1993-2005

Innerhalb des Projektes wurden weitere Hammerflügel der Werkstatt Conrad Graf mit Unterstützung der Kooperationspartner untersucht. Die Abbildung 4 zeigt gemessene Maximalwerte des Korpus-Verzuges auf den Gehäuseoberkanten. Das Instrument Opus 2787 war zum Zeitpunkt der Messung keiner Saitenlast ausgesetzt.

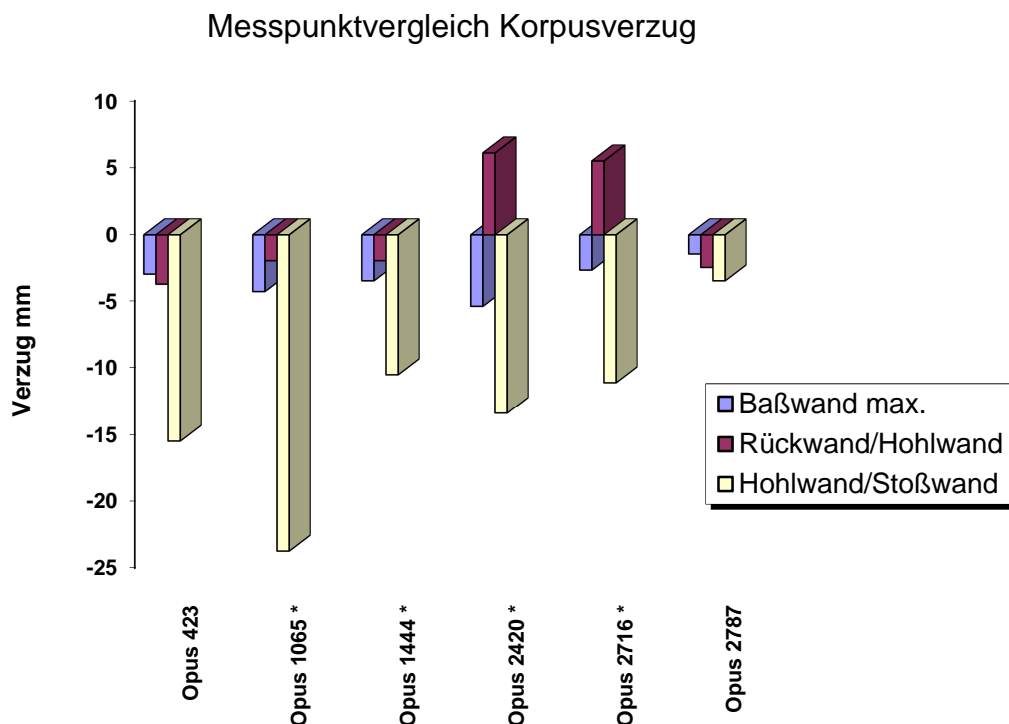


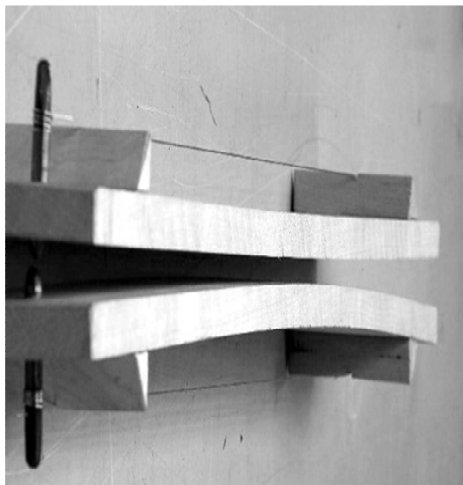
Abbildung 4: Messpunktvergleich verschiedener Hammerflügel von Conrad Graf

3. Zielstellungen

Das Ziel des Projekts ist es, mit Hilfe moderner computergestützter Methoden Modellierungen und Berechnungen durchzuführen, wie sie u.a. im Fahrzeugbau und in der Luft- und Raumfahrtindustrie Stand der Technik sind, um damit das Strukturverhalten zu erforschen und die Ursachen für aufgetretene Schäden und Verformungen zu identifizieren. Neben der mechanischen Beanspruchung durch die gespannten Saiten soll hierbei auch der Einfluss der Holzfeuchte berücksichtigt werden. Zunächst wird der Kurzzeitbereich betrachtet, die Berücksichtigung von Langzeiteffekten ist im Rahmen eines aufbauenden Forschungsprojekts geplant. Der Einfluss des Umgebungsklimas auf das mechanische Verhalten von Strukturen aus Holz ist im nachfolgenden Abschnitt dargestellt.

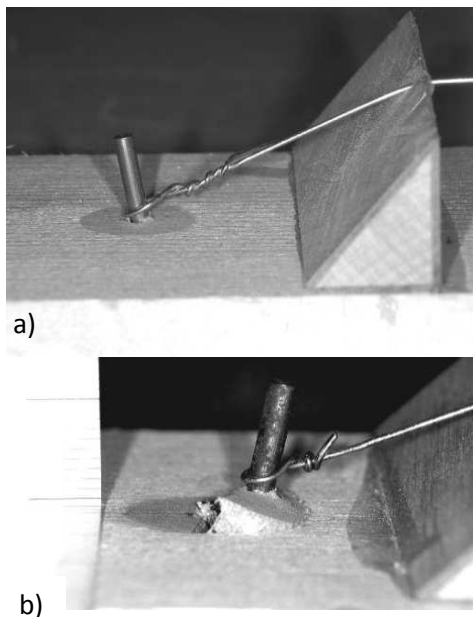
4. Werkstatt-Versuch

„Um mir selber eine Vorstellung davon zu verschaffen, wie sich klimatische Bedingungen bei statisch belastetem Holz auswirken, hatte ich über das Jahr 2008 hinweg einen improvisierten Langzeitversuch installiert: Ich habe aus Ahorn und Fichte jeweils zwei gleiche Mini-Monochorde hergestellt, von denen jeweils eins in einem konstanten Klima lagerte (in der klimatisierten Ausstellung) und das andere einem Wechselklima ausgesetzt wurde. Letzteres wurde in einem Kellerraum des Händel-Hauses mithilfe eines Be- und eines Entfeuchters hergestellt; eine halbe Woche etwa 85 % relative Feuchte und eine halbe Woche unter 30 %. Die Saiten wurden regelmäßig nachgestimmt, um gleichbleibende Kräfte zu gewährleisten.“



„Auch jeder Laie sieht sofort die Unterschiede zwischen den erreichten Zuständen. Die Monochorde, die dem Wechselklima (eine halbe Woche etwa 85 % relative Feuchte und eine halbe Woche unter 30 %) ausgesetzt waren, sind deutlich stärker verzogen, haben größere Einbrüche in Überlastungszonen an der Stegoberkante und weisen Schäden auf, die bei den im Konstantklima gelagerten gar nicht erst auftraten: Die Hartholzdübel zur Aufnahme des Wirbels bzw. Anhangstiftes im Fichten-Monochord sind aufgebrochen.“

Abbildung 5: Monochorde, oben Konstantklima, unten Wechselklima



„Ein Fazit kann nach der Beschäftigung mit diesem Projekt jetzt schon gezogen werden: Gerade weil Musikinstrumente, vor allem aus klanglichen Gründen, oft sehr leicht und ohne Sicherheits-reserve gebaut sind, ist bei statisch belasteten Vertretern, wie bei Streich- und Zupfinstrumenten oder besaiteten Tasteninstrumenten, eine klimatische Stabilisierung der Aufbewahrungsbedingungen umso wichtiger.“

Achim Haufe

Abbildung 6: Anhangstifte Monochord

a) Konstantklima

b) Wechselklima

5. Arbeitsprogramm

Der Kern des Projekts „Statische Strukturuntersuchungen an historischen Tasteninstrumenten“ ist eine computergestützte Modellierung und Simulation der Instrumente. Mit der numerischen Analyse kann der aktuell definierte Zustand der Hammerflügel bewertet werden. Diese Bewertung umfasst vor allem gefährdete und sensible Konstruktionsstellen sowie die Auswirkung bestehender Bauteilschäden. In den numerischen Analysen soll der Einfluss der Holzfeuchte auf das mechanische Verhalten berücksichtigt und untersucht werden. Mit Hilfe der Ergebnisse der Analyse können Restaurierungsmaßnahmen ausgewählt und in einer weiteren numerischen Simulation untersucht werden, um den restaurierten Zustand und den Ausgangszustand zu vergleichen.

Das Projekt beinhaltet im Wesentlichen zwei Aspekte. Zunächst werden Materialmodelle zur Beschreibung der Instrumente entwickelt. Diese Grundlagenforschung ist von entscheidender Bedeutung, da die Strukturen nur mit holzspezifischen Modellen, die auch den Einfluss von Klimaschwankungen berücksichtigen, realistisch abgebildet werden können. Anschließend erfolgen konkrete numerische Untersuchungen der Instrumente.

5.1 Arbeitspakete

Das Projekt gliederte sich in die nachfolgend dargestellten Arbeitspakete, die der Stiftung Händel-Haus (HH) oder dem Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke der TU Dresden (ISD) zuzuordnen sind.

- A1 *Dreidimensionale CAD Erfassung der Hammerflügel MS44 und MS28 (HH)*
- A2 *FE-Diskretisierung der Hammerflügel MS44 und MS28 (ISD)*
- A3 *Bestimmung des Materialverhaltens (HH, ISD)*
- A4 *FE-Simulation und Validierung der Modellbildung (HH, ISD)*
- A5 *Iterative Verbesserung der Modellierung (ISD)*
- A6 *Dreidimensionale Erfassung, FE-Diskretisierung und Strukturanalyse des Tangentenflügels MS30 (ISD)*
- A7 *Vergleichende Beurteilung der drei Hammerflügel-Konstruktionen (HH, ISD)*
- A8 *Bewertung der Ergebnisse bezüglich Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen (HH, ISD)*
- A9 *Organisation einer wissenschaftlichen Konferenz (HH, ISD)*
- A10 *Publikation der Ergebnisse und Erfahrungsaustausch (HH, ISD)*
- A11 *Kooperation mit KUR-Förderprojekt Klassikstiftung Weimar (HH)*

Projektträger: Stiftung Händel-Haus

Kooperationspartner: Kunsthistorisches Museum Wien
 Klassikstiftung Weimar
 ETH Zürich

Laufzeit: 2008 - 2011

6. Arbeitsergebnisse

6.1 Arbeitspaket A1/A6

Die Vermessung der Hammerflügel und des Tangentenflügels erfolgte durch direkte Messung mit Längen- und Winkelmessgeräten (Kleinbauteile mit mechanischen Präzisionsmessinstrumenten). Kurvenlinien wurden mittels 2D-Punktraster erfasst. Die Schwundverformung der Bauteile wurde in idealisierte Abmessungen überführt, die Konstruktion wurde analog zum „Neuzustand“ gezeichnet. Zur Erstellung der Volumenkörper wurden gezeichnete Bauteilquerschnitte oder Grundflächen extrudiert. Geschwungene Bauteilformen müssen so an Kurven extrudiert werden, dass im FE-Netz gegenüberliegende Kanten der Volumenkörper gleichviele Zwischenpunkte haben. Im anderen Fall ist eine Vernetzung nicht möglich. Die 3D-CAD-Volumenkörper der Hammerflügel müssen in konstruktiver Verbindung für eine FE-Netzbildung unbedingt fugenlos aneinander grenzen.

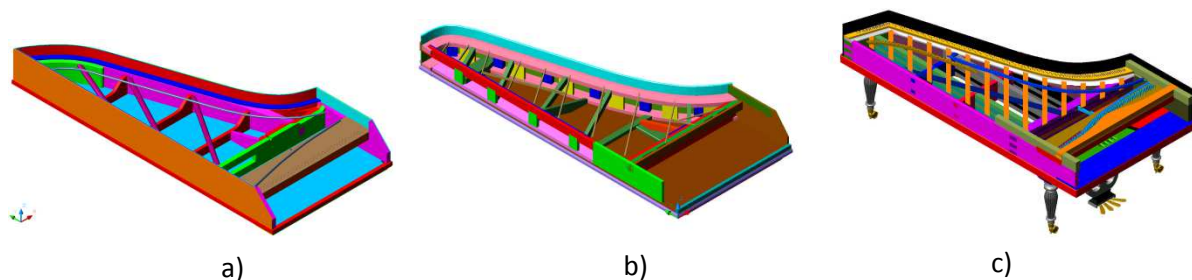


Abbildung 7: a) 3D-CAD-Zeichnung Hammerflügel MS28
 b) 3D-CAD-Zeichnung Tangentenflügel MS30
 c) 3D-CAD-Zeichnung Hammerflügel MS44

6.2 Arbeitspaket A2

Die im Rahmen des Arbeitspaketes A1 und A6 erstellten dreidimensionalen Volumenmodelle werden mittels einer kommerziellen FE-Softwareplattform diskretisiert (vernetzt). Um ein brauchbares FE-Netz zu erhalten, ist eine äußerst exakte importierte Geometrie erforderlich. Modellierungsfehler wie kurze oder überlappende Kanten oder Punkte, die nicht exakt aufeinander liegen sind im Vorfeld zu beseitigen. Im Rahmen der Vernetzung ist weiterhin zu berücksichtigen, dass aneinander grenzende Bauteile gleiche Knoten besitzen müssen (Ziel ist eine Gesamtstruktur). Trotzdem ist eine Unterscheidung der einzelnen Bauteile auch nach der Vernetzung notwendig. Erreicht wurde dies durch eine entsprechende Materialzuordnung. Danach wurden die Bauteile zusammengefügt und die Gesamtstruktur vernetzt. Die Unterscheidung der Bauteile ist im Nachgang über die den Elementen zugeordneten Materialnummern möglich.

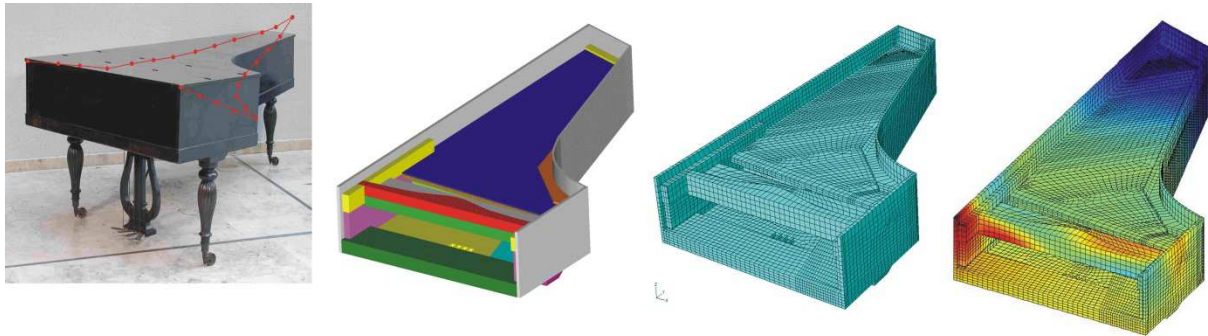


Abbildung 8: Entwicklungsschritte MS44 Objekt-Zeichnung- FE-Netz-Simulation

6.3 Arbeitspaket A3

Für eine zutreffende Beschreibung des hygro-mechanischen Verhaltens der betrachteten Strukturen ist die realitätsnahe Erfassung der Materialcharakteristiken der verwendeten Holzarten Fichte, Tanne, Buche, Eiche, Ahorn, Nussbaum und Kirsche von entscheidender Bedeutung. Eine umfangreiche Literaturrecherche zu diesem Thema ergab, dass für die benötigten Materialparameter der Laubhölzer nur wenige voneinander unabhängige Literaturquellen zur Verfügung stehen (Abb. 9a, 9b). Aufgrund der für das Projekt notwendigen dreidimensionalen Betrachtungsweise sowie der Verknüpfung von Feuchte und Mechanik ergeben sich für jede Holzart neun Größen zur Beschreibung des elastischen Verhaltens, drei Größen zur Charakterisierung des duktilen Versagens, zehn Größen zur Charakterisierung des spröden Versagens sowie drei Größen zur Beschreibung des Feuchtetransports, die jeweils in Abhängigkeit der Holzfeuchte vorliegen müssen. Da einige der in den betrachteten Tasteninstrumenten verbauten Holzarten für konstruktive Zwecke unüblich sind, ist die Datenlage bezüglich der erforderlichen Eingangsgrößen teilweise ungenügend. Daher wurde der im Projekt vorhandene Etat für Materialversuche an Ahornholz eingesetzt.

Hierfür konnte eine Studentin des Fachbereichs Maschinenwesen der TU Dresden gewonnen werden, die die entsprechenden Versuche unter fachkundiger Anleitung plante, vorbereitete und durchführte. Die notwendige Infrastruktur wurde durch den Fachbereich Holzphysik der ETH Zürich zur Verfügung gestellt. Die Versuchsergebnisse wurden in Form einer interdisziplinären Projektarbeit veröffentlicht und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Insgesamt wurden über 1000 Versuche durchgeführt, um die beschriebenen Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Holzfeuchte zu bestimmen. Die Ergebnisse wurden aufgearbeitet und dienen als Eingangsgrößen für die Simulation der zu untersuchenden Tasteninstrumente. Die durchgeführten Versuche sind jedoch nicht nur für das vorliegende Projekt von großer Bedeutung, sondern leisten auch einen signifikanten Beitrag zur Erweiterung der Kenntnisse über das Verhalten von Ahornholz und können damit auch für andere Wissenschaftler von Nutzen sein. Daher ist die Veröffentlichung der beschriebenen Versuche in Form eines Fachartikels geplant (siehe Abschnitt 6.7.1).

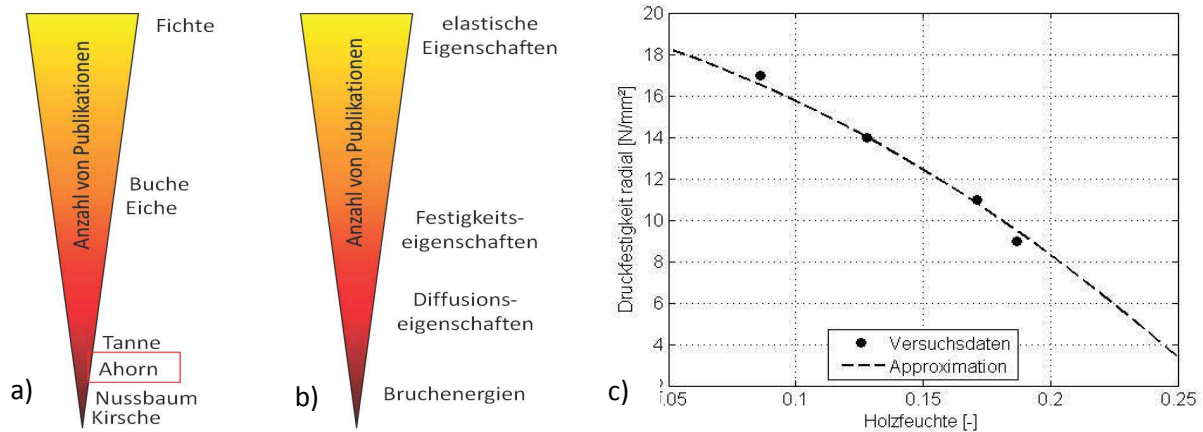


Abbildung 9: a) Datenlage zu ausgewählten Holzarten im Vergleich
 b) Datenlage zu ausgewählten hygro-mechanischen Kennwerten
 c) Einfluss der Feuchte auf die Mechanik exemplarisch für die Druckfestigkeit von Ahornholz in radialer Richtung

6.3.1 Materialmodelle

Die computergestützte Analyse der Hammerflügel erfolgt mittels der Finiten Elemente Methode (FEM) [7], welche in den letzten Jahrzehnten als mächtiges Werkzeug zur numerischen Simulation beliebiger Tragwerke etabliert wurde. Bereits vor Projektbeginn wurden am Institut für Statik und Dynamik (ISD) der TU Dresden Materialmodelle entwickelt, die das grundlegende rein mechanische Verhalten von Holz beschreiben [2, 3, 5, 6]. Die Materialkennwerte werden für eine konstante Holzfeuchte bestimmt. Die Materialeigenschaften von Holz sind jedoch stark feuchteabhängig und bereits geringe Änderungen der Umgebungfeuchte können zu Variationen im mechanischen Verhalten führen. Mit feuchteabhängigen Modellen können „Extremlastfälle“ wie Sommergewitter, die zu hohen Schwankungen in der Luftfeuchte führen, und deren Auswirkung auf das Instrument in der Analyse berücksichtigt werden. Die Restauratoren können somit Maßnahmen zum Erhalt der Hammerflügel in Bezug auf Klimaschwankungen bestimmen. Die zu Projektbeginn vorliegenden Materialmodelle wurden um die Feuchteabhängigkeit erweitert [1, 4]. Die Entwicklung der neuen Modelle war nicht explizit im Arbeitsprogramm vereinbart, bildet aber die zwingende Grundlage für die Arbeitspakete A1-A8.

Holz ist ein anisotroper Werkstoff. Bei geringen Belastungen kann das Verhalten als linear-elastisch beschrieben werden. Größere Belastungen führen zu Schäden im Holz. Die Versagenscharakteristik ist von der Belastungsrichtung abhängig. Unter Schub- und Zugbelastung (insbesondere quer zur Faser) reagiert Holz spröde, d.h. es entstehen Risse. Druckbelastung führt zu duktilem Verhalten. Der Werkstoff verformt sich bei Überlastung plastisch bevor er versagt. Es entstehen irreversible Verformungen. Diese Charakteristika werden mit einem zylindrisch anisotropen linear-elastischen Materialmodell [5], einer Plastizitätsformulierung [2] und einer bruchmechanischen Formulierung [4, 6] berücksichtigt. Um den Feuchteinfluss direkt erfassen zu können, wurden diese Modelle erweitert [1, 4]. Holz besitzt die physikalischen Eigenschaften kapillarporöser Stoffe. Bedingt durch die große innere Oberfläche sind sowohl das Makro- als auch das Mikrosystem in der Lage,

Feuchtigkeit zu absorbieren, wenn eine Holzstruktur einer Befeuchtung ausgesetzt wird (Abb. 10). Da bei steigender relativer Luftfeuchtigkeit Feuchte vom Holz aufgenommen (Adsorption) und bei sinkender Luftfeuchtigkeit Feuchte abgegeben (Desorption) wird, ist Holz ein hygroskopischer Werkstoff. Bei variierender Luftfeuchte „arbeitet“ das Holz und verformt sich (Quellen und Schwinden). Wenn diese Verformungen behindert werden, wie es bei der Hammerflügelkonstruktion der Fall ist, entstehen Spannungen, die zu Schäden im Holzgefüge führen können. Eine detaillierte Beschreibung der erweiterten Materialmodelle ist in den im Rahmen dieses Projektes entstandenen Publikationen zu finden (Kap.7).

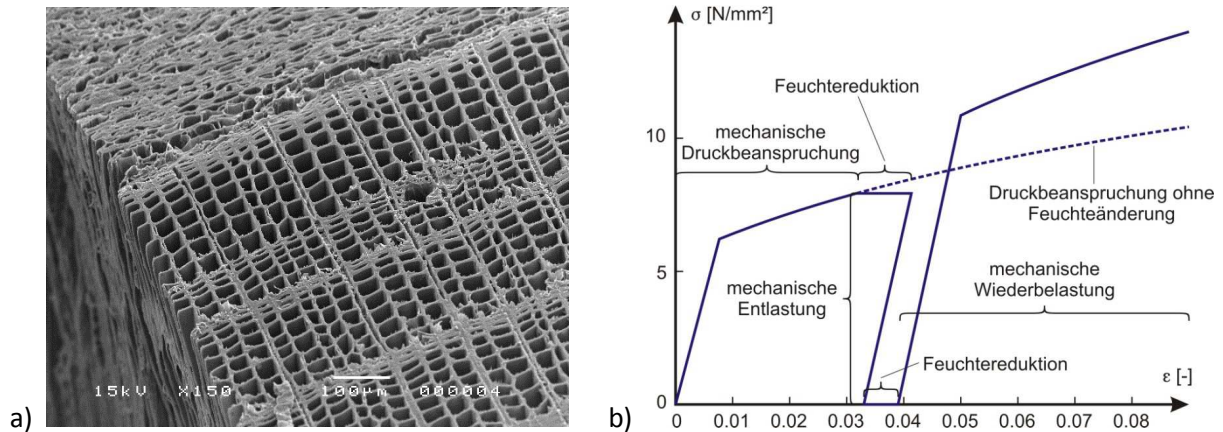


Abbildung 10: a) Nahaufnahme von Fichtenholz
b) Spannung-Dehnungs-Anhängigkeit bei feuchteabhängigem duktilen Versagen

6.4 Arbeitspaket A4/A5

Als erster Schritt wurde die numerische Simulation des feuchteunabhängigen mechanischen Verhaltens des Hammerflügels MS44 unter Annahme rein linear-elastischen Materialverhaltens durchgeführt. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den tatsächlich vorhandenen Deformationen ergibt, dass das globale Verformungsverhalten bereits durch ein Modell mit linear elastischem Verhalten zufriedenstellend abgebildet werden kann. Eine Aussage zum globalen Tragverhalten lässt sich über das Rastensystem treffen: Es trägt vergleichsweise wenig zum Lastabtrag bei. Zur Abbildung lokaler Schäden in Form von Rissen (sprödes Versagen) und plastischen Verformungen (duktilen Versagen) ist eine iterative Verbesserung des Modells in Form von Modifikationen des FE-Netzes (Netzverfeinerung, Einführung kohäsiver Elemente) und der Einsatz der erweiterten Materialansätze erforderlich. Der Einfluss der Holzfeuchte auf das Tragverhalten ist in Abbildung 11 am Beispiel des Stimmstocks MS44 im Bereich der Eisenspreize dargestellt. Die numerischen Simulationen erfolgten mittels eines hauseigenen FE-Codes, der speziell für die Simulation von Strukturen aus Holz entwickelt wurde. Kommerzielle Software-Lösungen bilden das komplexe Materialverhalten nur ungenügend ab.

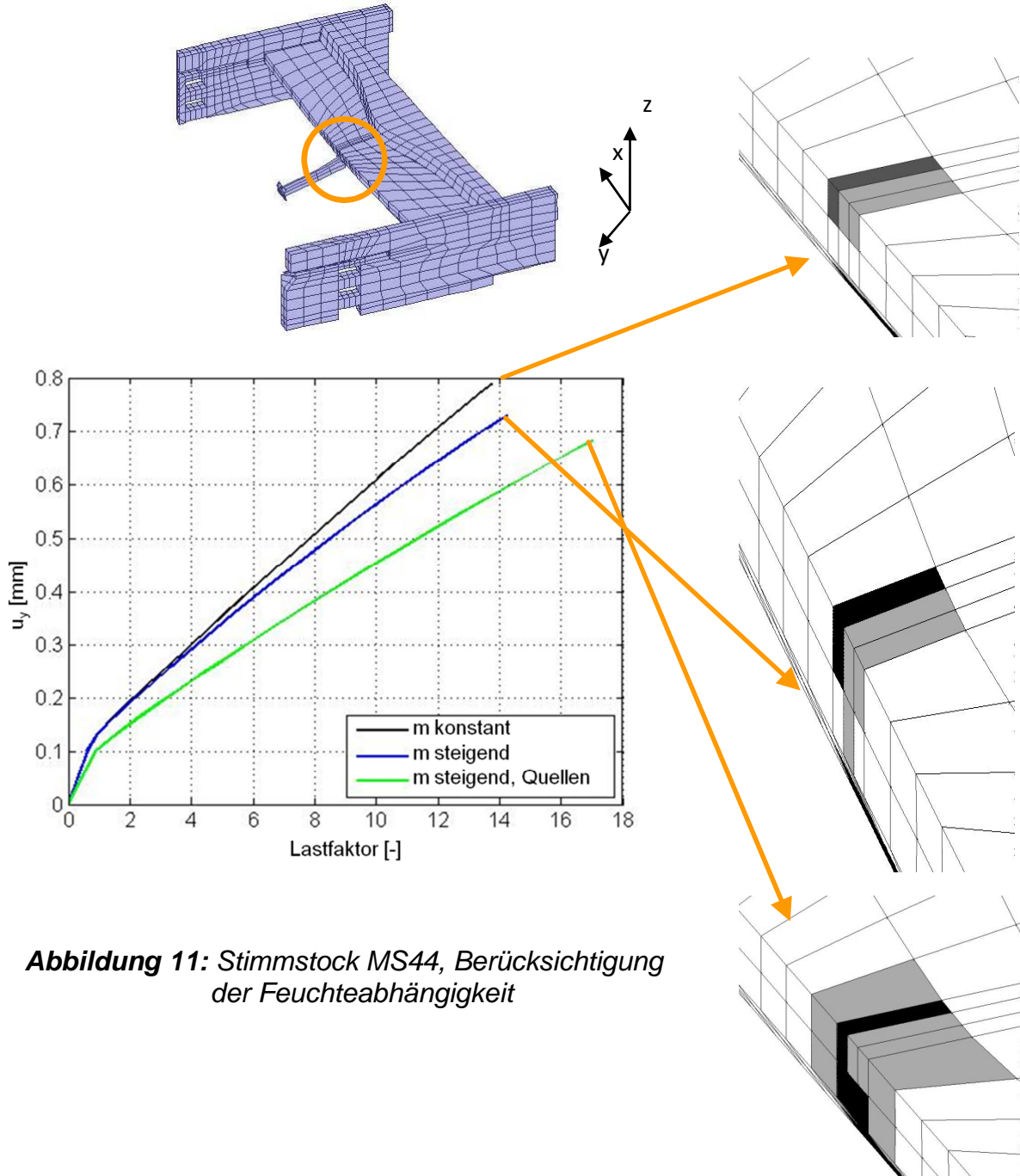


Abbildung 11: Stimmstock MS44, Berücksichtigung der Feuchteabhängigkeit

6.5 Arbeitspaket A6/A7/A8

Der Hammerflügel von Conrad Graf MS44 wurde als Referenzobjekt definiert, da zu diesem Instrument Versuchsdaten vorliegen, mit denen die entwickelten Materialmodelle validiert und verifiziert werden können. Durch die Stiftung Händel-Haus wurde der Hammerflügel vermessen und eine detaillierte dreidimensionale CAD Volumenkörper-Zeichnung im Programm AutoCAD erstellt. Dieses geometrische Modell wurde am ISD in das Programm Abaqus exportiert, um ein FE-Netz zu erstellen (Abb. 12).

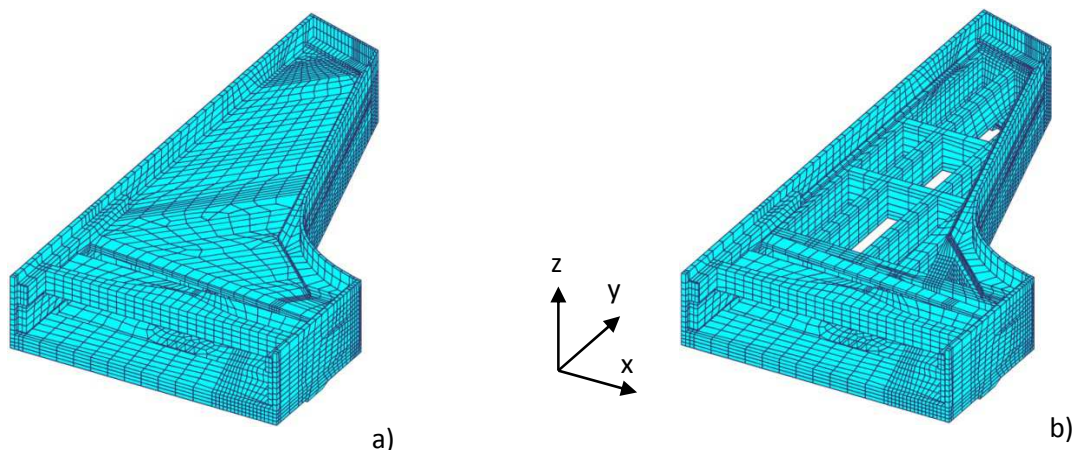


Abbildung 12: FE-Netz MS44 a) mit Resonanzboden
b) ohne Resonanzboden, ohne Rippen

Die Netz-Daten wurden in das eigene FE-Programm des ISD überführt, um das Instrument mit den neu entwickelten Materialmodellen zu simulieren. Zunächst wurde ein Lastfall mit zwei Lastschritten betrachtet:

- Lastschritt 1: Aufbringen des Saitenzuges
- Lastschritt 2: Änderung des Umgebungsklimas von $T = 18^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 40\%$ (Normalklima) auf $T = 28^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} 70\%$ (Sommergewitter) unter voller Saitenlast

Die Klimasituation beim Sommergewitter führt im Vergleich zum Normalklima zu signifikant höheren Verformungen. Der unerwartet hohe Einfluss der Feuchte unterstreicht die Bedeutung der hygromechanischen Materialmodelle. Der oft unterschätzte Lastfall Klimaschwankung kann also durchaus maßgebend sein und sollte nicht vernachlässigt werden. Zum optimalen Erhalt dieses Instrumentes ist ein konstantes Klima von entscheidener Bedeutung.

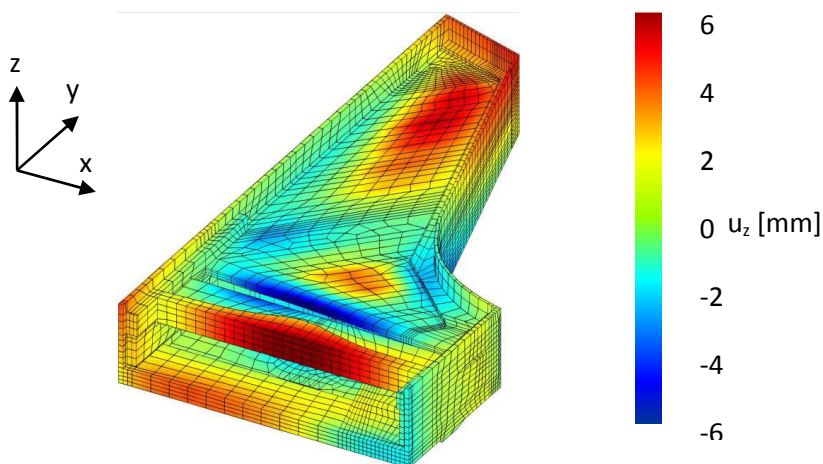


Abbildung 13: Hammerflügel MS44, Verformung in z-Richtung

In Abbildung 13 sind wesentliche Effekte aufgrund von Saitenzug und Feuchteinfluss dargestellt (Verformungen in z-Richtung für beide Lastfälle), die in dieser Weise auch am realen Instrument auftreten. Die Modelle ermöglichen eine sehr gute Approximation der Wirklichkeit und können so Hinweise auf zukünftige Problemstellen gegeben.

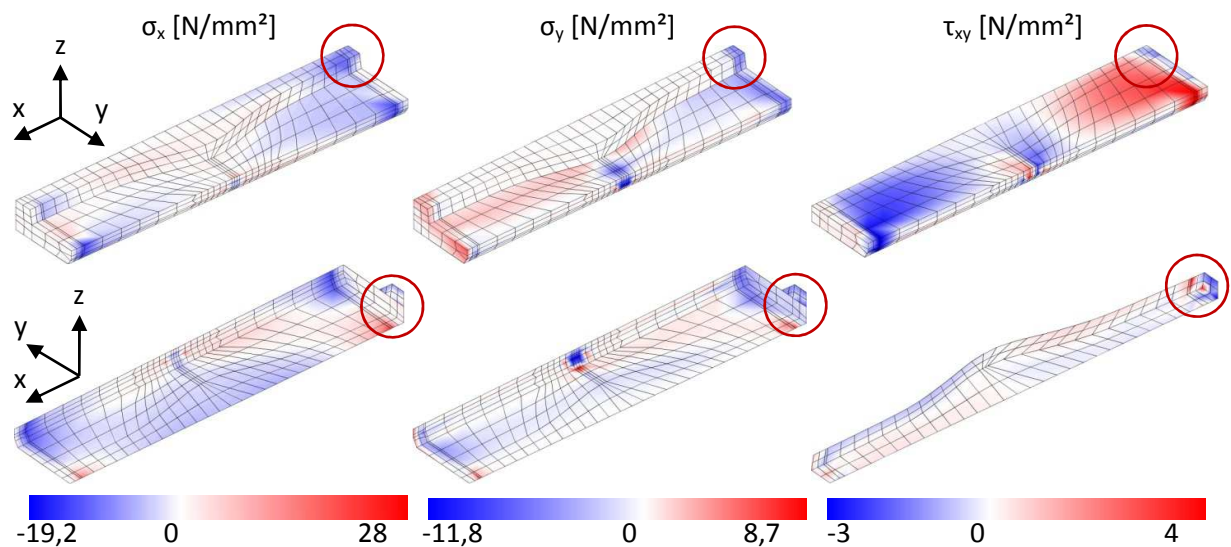


Abbildung 14: Spannungen im Stimmstock (Lastfall 2)

In Abbildung 4 sind die maßgebenden Spannungen, welche zu Schäden am Stimmstock des Hammerflügels MS44 führen, deutlich zu erkennen. Der direkte Vergleich der simulierten und gemessenen Verformungen ist in Abbildung 15 b) dargestellt. Die Verformungsmessung wurde entlang der oberen Kante des Flügels zu verschiedenen Zeitpunkten, d.h. mit unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und Feuchtigkeiten, gemessen. Die Ergebnisse der Simulation stimmen mit der gemessenen Verformung qualitativ gut überein. Die in der Simulation ermittelten Verformungen sind kleiner als die gemessenen Werte. Der im Instrument von 2000 bis 2002 verzeichnete und bis heute weiter zunehmende Verzug der Gehäuseecken ist wahrscheinlich auf Langzeiteinflüsse wie visko-elastisches und mechano-sorptives Kriechen zurückzuführen. Eine weitere Ursache können Steifigkeitsverluste von konstruktiven Holzverbindungen des Rastenrahmens sein. Bei Berücksichtigung dieser Phänomene und des Eigengewichts der Konstruktion, sind ähnlich hohe Verformungen auch in der Simulation zu erwarten.

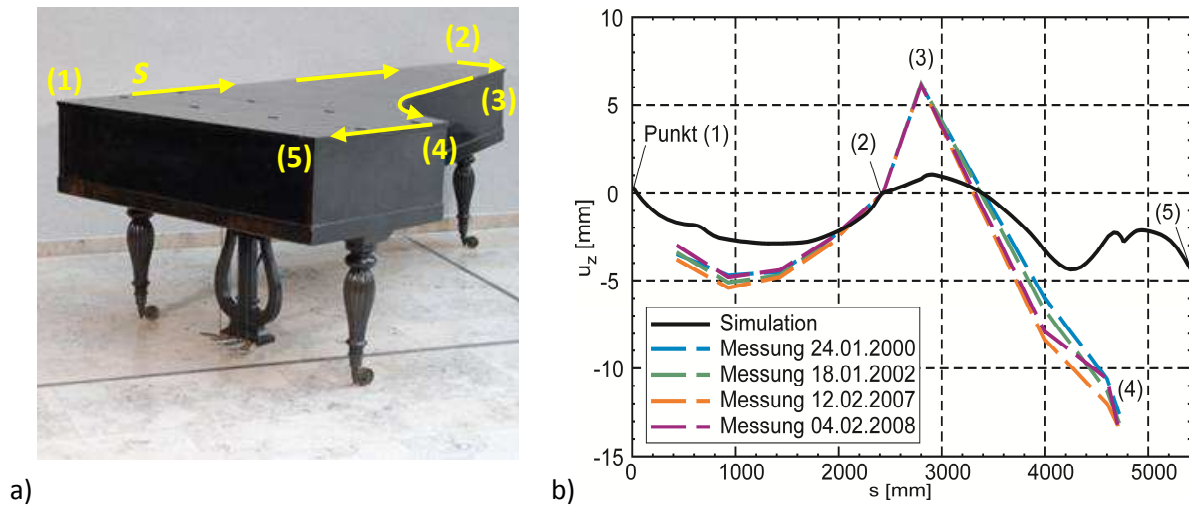


Abbildung 15: a) Messung von u_z Gehäuserand oben MS44
b) Vergleich Simulation und Messungen

Um weitere Schäden vermeiden zu können, sind für die Restauratoren Hinweise zu potentiellen Versagensbereichen bedeutend.

Der Tangentenflügel MS30 wird derzeit intensiv bearbeitet. Das geometrische Modell wurde in AutoCAD erstellt (Abb. 16 a), 16 b) und in Abaqus überführt. Das FE-Netz wurde kürzlich fertig gestellt (Abb. 16 c)) und wird demnächst in das FE-Programm des ISD überführt. Erste Simulationen stehen kurz bevor. Die Erfahrungen mit dem Hammerflügel MS44 zeigen, dass der zeitintensivste Teil der Arbeit die Erstellung des FE-Netzes ist. Sobald dieser Arbeitsschritt durchgeführt ist, können analog zu MS44 zeitnah verschiedene Lastfälle analysiert werden.

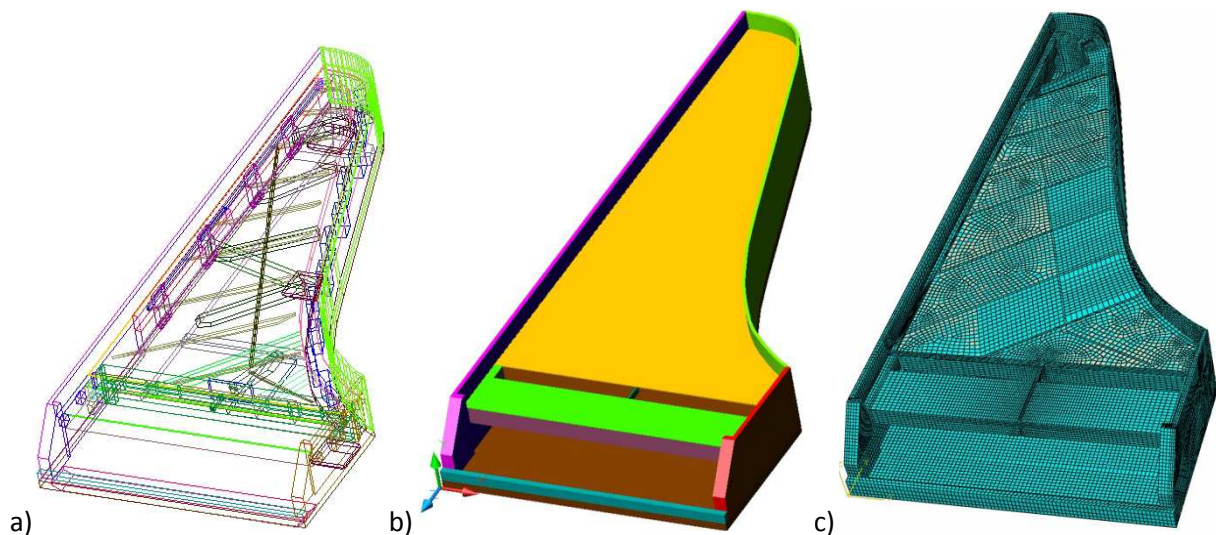


Abbildung 16: a) bearbeitetes Drahtmodell AutoCAD
b) Volumenmodell AutoCAD
c) FE-Modell Abaqus

Über die Vereinbarungen im Projektplan hinaus, bleiben die Stiftung Händel-Haus und das ISD im Kontakt, um die Ergebnisse der Simulationen den Restauratoren jederzeit zur Verfügung stellen zu können und Erfahrungen auszutauschen. Zudem ist die offizielle Fortsetzung der Kooperation im Rahmen eines Folgeprojekts geplant.

6.5.1 Arbeitsmittel Farbgrafik

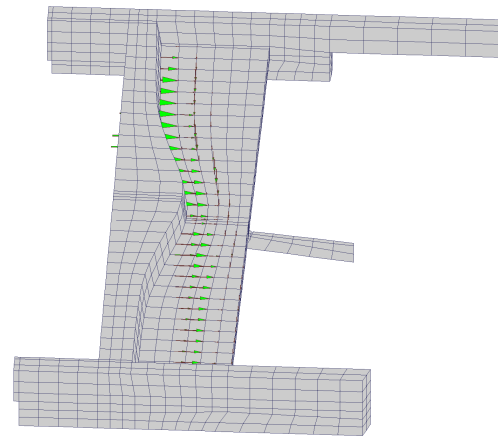
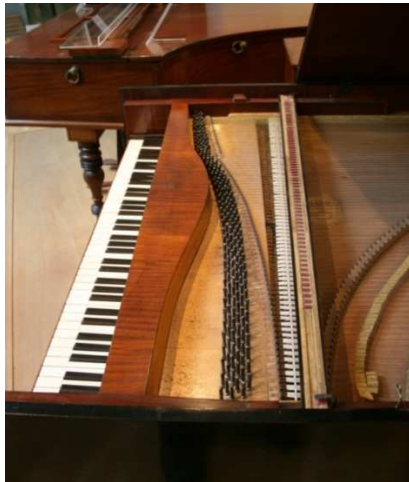


Abbildung 17: a) MS44 Foto Stimmstock b) MS44 Netzgitter Stimmstock

Die Farbgrafiken der FEM-Simulationsdarstellung sind ein noch neues Arbeitsmittel im Bereich der Restaurierung. Generell beachtet werden muss, dass Farben nur der entsprechenden Legende zugeordnet werden können. Eine Übertragbarkeit der Farbwerte zwischen zwei Darstellungen ist nur bei gleichem Legendenmaßstab möglich. Farben sind relativ und kein direktes Maß für eine Gefährdung. In Abbildung 18 zeigt eine Grafik jeweils Werte in einer 3D-Ebene: x, y oder z. Die Zuordnung der Ebene erfolgt über das angezeigte Koordinatensystem.

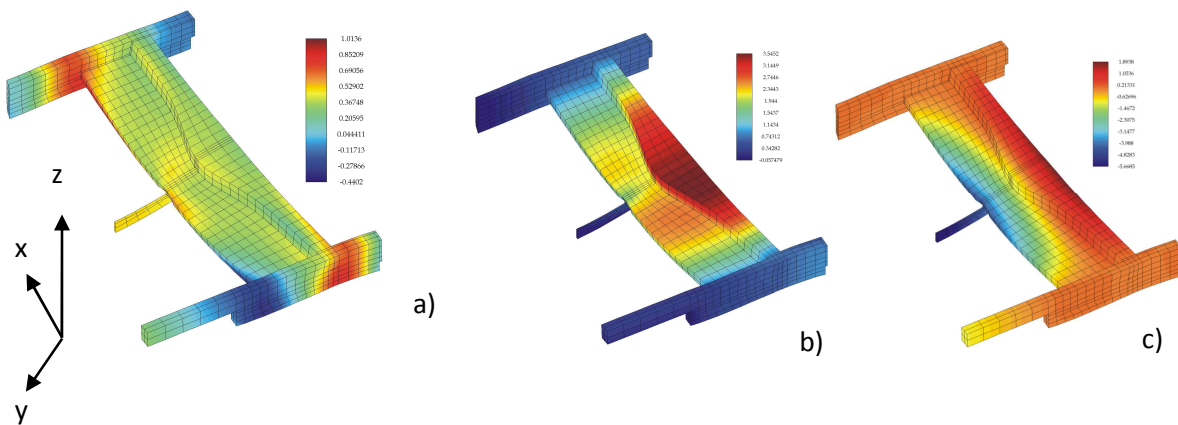


Abbildung 18: MS44 Stimmstock, Verformung durch Saitenzuglast
a) x-Richtung; b) y-Richtung; c) z-Richtung

Abbildung 18 a) zeigt die räumliche Verschiebung des Stimmstockes in seiner x-Einbaurichtung nach rechts (rot) und links (blau). Gleichzeitig besteht eine Verschiebung des Stimmstockes in der y-Einbaurichtung nach hinten (rot) bzw. nach vorn (blau) (Abb. 18b)) sowie eine Verschiebung in z-Richtung nach oben (rot) bzw. unten (blau) (Abb. 18c)). Zu beachten ist, dass gleiche Farben nicht gleichen Beträgen entsprechen müssen. Um eine sensible Farbabstufung und bessere Übersicht zu erreichen, werden oft die Minimal- bzw. Maximalwerte auf die Farbextreme verteilt.

Maxima (rot) 18 a) = +1.0 b) = +3.5 c) = +1.9

Minima (blau) 18 a) = -0.4 b) = -0.05 c) = -5.6

Für eine Auswertung der Grafiken ist stets die Zusammenschau der drei Ebenen wichtig. Der Stimmstock des Hammerflügels MS44 ist mehrlagig aufgebaut. Auf den Ahornblock des Wirbelfeldes ist ein Kämpfer aufgeklebt. Auf Höhe der letzten Bass-Oktave zeigt sich zwischen Wirbelblock und Kämpfer Rissbildung. Erst eine Detailbetrachtung der Schubspannung lässt die konstruktionsbedingte Belastung dieser Stelle erkennen (Abb.19 a), orangener Farbbereich).

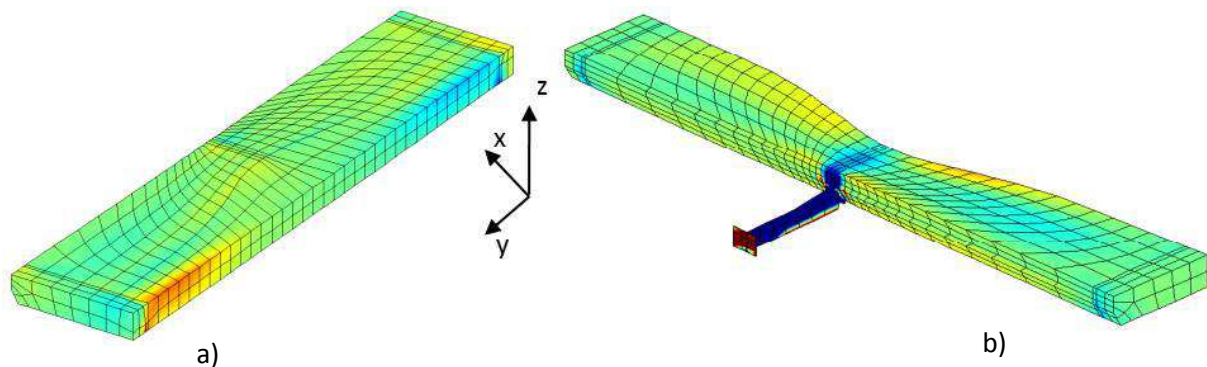


Abbildung 19: a) MS44 Stimmstock Spannung Σ - z; b) Spannung Σ -y

Abbildung 19 b) zeigt im Detail die eiserne Mittelspreize zwischen Stimmstock und Damm (hier nicht dargestellt). Sie ist einer sehr hohen Spannung ausgesetzt und die Belastung der Holzfasern an den Einbaustellen ist sehr hoch. Relativ dazu bleiben die Spannungen an den Auflageflächen des Stimmstocks im Gehäuse gering. Für die Auswertung einer erstellten FE-Simulation ist es hilfreich, sichtbare Schädigungen an Bauteilen tabellarisch zu erfassen und zu charakterisieren. Anhand dieser Aufstellung können dann Detailauswertungen vorgenommen werden. Als kritisch zu betrachtende Konstruktionsstellen (z.B. Risse) sollten nach Möglichkeit separat mit einem feineren FE-Netz analysiert werden.

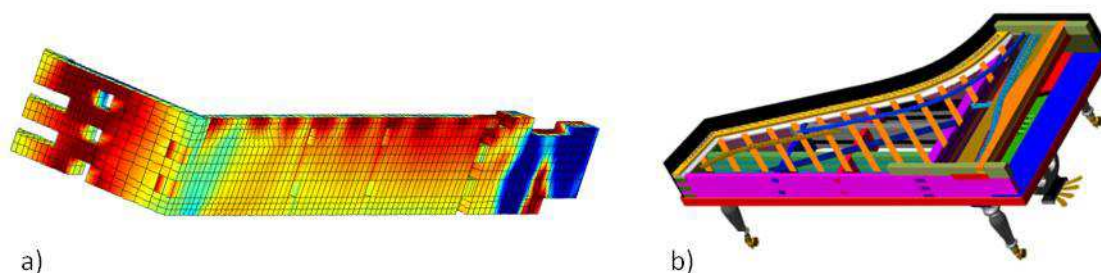


Abbildung 20: a) FEM Spannung z-Richtung Rückwand- und Basswandraste
b) 3D-CAD Zeichnung MS44

Bei der isolierten Betrachtung einzelner Bauteilgruppen können Farbzentren Spannungen anzeigen, deren Herkunft sich erst aus den Nachbarbauteilen erklären lässt. Abbildung 20 a) zeigt die numerisch ermittelte Spannung in z-Richtung (oben/unten) der Rastenkonstruktion der Bass- und Rückwand. Die rhythmischen Rot-Zentren auf der Oberkante entsprechen Kraft-Eintragsstellen durch die Resonanzbodenrippen. Der Saitendruck auf den Resonanzbodensteg wird über die Rippen (Abb. 20 b) orangene Diagonalen) konzentriert auf die Rastenkonstruktion geleitet.

Die Auswertung der Farbgrafiken erfordert eine umfassende Kenntnis der Baukonstruktion, Kenntnisse von vorhandenen Schädigungen und ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen. Das Schädigungspotential kritischer Konstruktionsstellen kann nur durch eine Bewertung der Rechenergebnisse, gegebenenfalls erweitert durch Berechnungen mit einem verfeinerten Netzgitter, erfolgen. Der aktuelle Stand der FE-Simulation zeigt, dass aufgrund der spezifischen Bauweise jedes Instruments Verallgemeinerungen von Konstruktionsprinzipien bei Hammerflügeln nur sehr begrenzt möglich sind (Abb.4).

6.6 Arbeitspaket A9

Zum Erfahrungsaustausch mit Wissenschaftlern, die sich mit der Analyse von Musikinstrumenten und deren Erhalt beschäftigen, wurde im Rahmen des Arbeitspakets A9 die Organisation einer wissenschaftlichen Konferenz vereinbart. Vom 12. - 13. Mai 2011 fand die internationale Fachtagung *Analysis and Description of Music Instruments using Engineering Methods* (Ingenieurwissenschaftliche Analyse und Beschreibung von Musikinstrumenten) im Händel-Haus Halle statt. Auffallend war die große Bandbreite der betrachteten Strukturen und Instrumente, die von Bildern auf Holzpanelen wie der Mona Lisa bis zu Musikinstrumenten wie Lauten und Orgeln reichte. Die Teilnehmer haben ihren Erfahrungsschatz um interessante Erkenntnisse erweitert und die Konferenz kann als sehr erfolgreich beschrieben werden. Im Zusammenhang mit der Konferenz wurde ein Tagungsband durch die Stiftung Händel-Haus und ISD der TU Dresden veröffentlicht (Kapitel 6.7.4).

6.7 Arbeitspaket A10

Im Arbeitspaket A10 wurde die Dokumentation des Projekts durch Publikationen vereinbart, welche im Folgenden aufgelistet sind.

6.7.1 Dokumentation der Versuche

A. Martienßen: *Ermittlung physikalischer Kennwerte von Ahorn (Acer pseudoplatanus L.)*. Interdisziplinäre Projektarbeit, Institut für Holz- und Papiertechnik Professur für Holz- und Faserwerkstofftechnik, TU Dresden, 2011

W. Sonderegger, A. Martienßen, Ch. Nitsche, T. Ozyhar, M. Kaliske and P. Niemz: *Investigations on the physical and mechanical behaviour of sycamore maple (Acer pseudoplatanus L.)*, Holz als Roh- und Werkstoff, submitted

6.7.2 Fachartikel

M. Kaliske, C. Jenkel, S. Saft, E. Resch: Computational Models for Wooden Structures, Computational Technology Reviews, 2: 145-176, 2010

S. Saft, M. Kaliske: *Numerical simulation of the ductile failure of mechanically and moisture loaded wooden structures*, Computers & Structures, 89: 2460-2470, 2011

6.7.3 Konferenzbeiträge

M. Kaliske, C. Jenkel, S. Saft: *Werkstoff Holz – Modellierung und numerische Simulation*, 15. Dresdner Baustatik-Seminar - Materialmodelle und Tragwerksplanung, Dresden, 2011

M. Kaliske, S. Saft: *Modelling of Failure in Hygro-Mechanically Loaded Wooden Structures*, International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures (CFRAC), Barcelona, 2011

M. Kaliske, C. Jenkel, S. Saft: *Computational Modeling in Wood Mechanics*, 9th World Congress on Computational Mechanics, Sydney, 2010

S. Saft, M. Kaliske: *Numerical Modelling of Wood for the Restoration of Historical Pianofortes*, IV European Conference on Computational Mechanics, Paris, 2010

S. Saft, M. Kaliske: *Supporting the Restoration of Historical Pianofortes by Numerical Simulation*, COST Action IE0601 - International Conference, Hamburg, 2009

S. Saft, M. Kaliske: *Numerical Simulation of Historical Pianoforte*, 3rd GACM Colloquium on Computational Mechanics, Hannover, 2009

M. Kaliske, E. Resch, J. Schmidt: *Numerical Simulation of the Strength of Wooden Structures: Application to Historic Pianoforte*, International Conference on Wood Science for Preservation of Cultural Heritage: Mechanical and Biological Factors, Braga, 2008

6.7.4 Tagungsband

C. Birnbaum, S. Ehricht, M. Kaliske, S. Saft [Hrsg.]: *Analysis and Description of Music Instruments using Engineering Methods*, Verlag Stiftung Händel-Haus, Halle/Saale, 2011

Beiträge:

J. Gril: *Mechanics of Painted Wooden Panels from the Cultural Heritage: the Case of Mona Lisa*

P. Niemz, K. Kránitz, T. Gereke: *Properties of Recent and Naturally Aged Wood*
C.J. Bergsten: *Organs in Harmful Environments*

J. Angster, Z. Dubovski, S. Pitsch, A. Miklós: *Impact of the Material on the Sound of Flue Organ Pipes (Acoustic and Vibration Investigations with Modern Measuring Techniques)*

S. Marburg, S. Fuß, F. Möbius: *Simulation and Experiment for Intonation of a Recorder*

M. Kob: *Generation and Radiation of the Singing Voice*

R. Schmidt, J. Gier, S. Urban, F. Ellmer, S. Götz: *Zum Schwingungsverhalten der Laute*

K. Eichelberger: *Klimatische Belastung der Musikinstrumente bei Herstellung, Transport und Gebrauch*

A. Rupp, M. Pitzner: *Die Glocke – Ein hochbeanspruchtes Musikinstrument: Schadensursachen und Schadenserkenkung*

A. Haufe: „Spielt das denn noch?“

M. Kaliske, S. Saft: *Static Structural Analysis of Historical Keyboard Instruments*

P. Steinhäuser: *The double Bass - Insight Gained from FE Simulations*

H. Fleischer: *Vibro-Acoustic Measurements on the Violoncello*

N.J. Giordano: *The First Piano Made in America: A Structural Analysis of the Grand Pianoforte of Johann Behrent*

R. Bader: *Vibrational Analysis of the Soundboard of a Kirkman Harpsichord of 1766 Using Microphone Array Techniques*

S. Le Conte: *The Use of Multidisciplinary Mechanical Tools for Reconstitution and Restoration of Ancient Musical Instruments*

6.7.5 Radiobeitrag

Interview 26.3.2009 BR 2 und mdr figaro

6.8 Arbeitspaket A11

Im KUR Projekt „Historische Tasteninstrumente in den Sammlungen der Klassik Stiftung Weimar“ wurden vier Hammerflügel und ein Tafelklaviere restauriert. Statisch schwierige Fragestellungen bestanden beim Schenck-Hammerflügel und beim Boisselot-Hammerflügel. Die für eine FEM-Untersuchung zwingend notwendige 3D-Cad Zeichnung lag beim Schenk-Hammerflügel nicht vor.

Das Greifenberger Institut für Musikinstrumentenkunde hat vom Boisselot-Hammerflügel mit einem 3D-Faro-Messsystem eine 2D-Papierzeichnung gefertigt.

Diese Zeichnung diene auch als Grundlage für eine konzertspielbare Kopie des Hammerflügels. Das Originalinstrument wurde konserviert, ohne eine Spielbarkeit herzustellen. Eine FEM-Untersuchung wurde daraufhin nicht gefordert. Im Rahmen der Fachtagung „Konservierung und Restaurierung historischer Tasteninstrumente in den Sammlungen der Klassik Stiftung Weimar“ (September 2008) wurde das Konzept des Forschungsprojektes 0049 vorgestellt und mögliche Anwendungen auf weitere Hammerflügelkonstruktionen diskutiert.

7. Literaturverzeichnis

- [1] M. Kaliske and S. Saft: *Static structural analysis of historical keyboard instruments*. In C. Birnbaum, S. Ehricht, M. Kaliske, and S. Saft [Hrsg.]: *Analysis and description of music instruments using engineering methods*, Verlag Stiftung Händel-Haus, Halle/Saale, 2011
- [2] E. Resch: *Zuverlässige numerische Simulation von Holzverbindungen*, Dissertationsschrift, TU Dresden, 2011
- [3] E. Resch, M. Kaliske: *Three-dimensional numerical analyses of load-bearing behavior and failure of multiple double-shear dowel-type connections in timber engineering*, *Computers & Structures*, 88: 165–177, 2010
- [4] S. Saft and M. Kaliske: *Numerical simulation of the ductile failure of mechanically and moisture loaded wooden structures*, *Computers & Structures*, 89: 2460–2470, 2011
- [5] J. Schmidt: *Modellierung und numerische Analyse von Strukturen aus Holz*. Dissertationsschrift, TU Dresden, 2009
- [6] J. Schmidt and M. Kaliske: *Models for numerical failure analysis of wooden structures*, *Engineering Structures*, 31: 571–579, 2009
- [7] O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor: *The Finite Element Method*, Butterworth Heinemann, Oxford, 2005

8. Bildnachweis

Abbildungen	1, 2, 3, 4, 7, 15a, 20b: Archiv Stiftung Händel-Haus
Abbildungen	5, 6: A. Haufe
Abbildung	10a: http://de-wikipedia.org/wiki/Holz
Abbildungen	8, 9, 10b, 11 - 14, 15b, 16 - 19, 20a: ISD der TU Dresden

9. online-Adressen

- http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_bauingenieurwesen/sdt/forschung/historischetasteninstrumente
- <http://www.haendelhaus.de/de/Restaurierungsatelier/Forschungsprojekte.html>
- http://www.kulturstiftung-des-bundes.de/cms/de/programme/restaurierung/kur_programm_zur_konservierung_und_restaurierung_von_mobilem_kulturgut_3164_96.html