

Nicki Bader

Ein Beitrag zur werkstoffbezogenen Designakustik



Untersuchung der Zusammenhänge mechanischer und akustischer Materialeigenschaften und deren Auswirkungen auf die Attraktivität von Gebrauchsgegenständen unter Berücksichtigung der Akzeptanz von nichtstationären Schädigungsgeräuschen bei Leichtbauwerkstoffen und -strukturen mittels designakustischer Werkstoffcharakterisierung

de gustibus non est disputandum
(über Geschmack lässt sich nicht streiten)

Ein Beitrag zur material- und werkstoffbezogenen Designakustik

Untersuchung der Zusammenhänge mechanischer und akustischer Materialeigenschaften und deren Auswirkungen auf die Attraktivität von Gebrauchsobjekten unter Berücksichtigung der Akzeptanz von nichtstationären Schädigungsgeräuschen bei Leichtbauwerkstoffen und -strukturen mittels designakustischer Werkstoffcharakterisierung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt der

Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

Diplom-Designer Nicki Bader

geboren am 24.06.1975 in Halle / Saale

1. Gutacher: Prof. Dr. rer. nat. Peter Holstein
2. Gutacher: Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt
3. Gutacher: Prof. Dr. phil. Peter Luckner

Tag der Einreichung: 24.06.2022

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 24.01.2023

DOI 10.22032/dbt.55770 | <https://doi.org/10.22032/dbt.55770>

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2023000027 | <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2023000027>

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.



ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der Arbeit ist die designakustische Charakterisierung von Materialien unter Berücksichtigung der Zusammenhänge mechanischer und akustischer Eigenschaften.

Ausgehend von diesen sollen deren Auswirkungen auf die Attraktivität von Gebrauchsobjekten untersucht werden, indem die technischen Merkmale mit Gestaltungsprinzipien, wie sie im Industriedesign Anwendung finden, verkoppelt werden. Grund dafür ist die Intention ein Werkzeug zu entwickeln, welches Gestaltern im Ingenieur- und Designbereich bei der Auswahl, Bewertung und Generierung akustischer Gebrauchseigenschaften unterstützt.

Ausgehend davon, dass die kleinsten, zeitlich beschränkten und nicht stationären Signalanteile, wie sie bei der Schädigung von Strukturen entstehen, die Ursachen für die harmonischen, wahrnehmbaren Nutzungsgeräusche von Gebrauchsgütern sind, wurde das Deformationsverhalten von kurz- und langfaserverstärkten Kompositwerkstoffen untersucht, welche mit Sicht auf deren Verbreitung im industriellen Bereich ausgewählt wurden.

Die Experimente zur Untersuchung des zeitlichen und spektralen Verhaltens wurden dabei mittels eines standardisierter Biegeversuchs durchgeführt, welcher mit geeigneter Hard- und Software für die Datenakquisition instrumentiert wurde. Zur Definition dieser Methode wurden mehrere referenzielle Experimente mittels Schallemissionsanalyse, Akustischer Kamera, Hochgeschwindigkeitskamera und verschiedener Mikrofon- und Messhardware durchgeführt. Parallel wurden die entsprechenden signaltheoretischen und psychoakustischen Aspekte untersucht. So konnten die untersuchten Materialien aus akustischer Sicht charakterisiert und hinsichtlich entsprechender Merkmale gruppiert werden. Daraus ergab sich die Erkenntnis, dass die akustische bzw. designakustische Klassifizierung von Werkstoffen von der konventionellen, herkunfts- oder verfahrensorientierten Werkstoffklassifikation abweichen kann.

Die Ergebnisse flossen mit Sicht auf diese Erkenntnis in die Entwicklung des Werkzeugs für die designakustische Analyse und Diagnose ein. Bei der vorgeschlagenen Methode wird aus einer repräsentativen Datenmenge einer materialspezifischen Versuchsreihe auf Basis eines eigens dafür entwickelten Modells ein designakustischer Archetyp synthetisiert, der die generelle Charakteristik der Einzelbruchereignisse und der Gesamtschädigung repräsentiert.

Ausgehend von der These, dass visuelle und akustische Prinzipien in gleicher bzw. ähnlicher Form wirken und bei Kenntnis und Anwendung die Prognostizierbarkeit der Wirkung und Akzeptanz beim Nutzer ermöglichen, wurden die technischen Merkmale der Archetypen mit eigens eingeführten designakustischen Komplementärpaaren verkoppelt. Diese korrelieren mit entsprechenden gestalterischen Merkmalen aus der visuellen Kompositionstheorie, wie sie im Industriedesign Anwendung findet, wodurch die Übersetzbarkeit des Modells in technische und gestalterische Richtung gewährleistet wird.

Die Ergebnisse wurden entsprechend visualisiert und anhand einer ersten Probandenbefragung validiert. Die Weiterentwicklung und Erweiterung der Datenbank zur gezielten Gestaltung von Gebrauchsakustik durch Ingenieure und Designer wäre perspektivisch sinnvoll. Die Ergebnisse liefern einen Beitrag zum noch jungen Feld der Designakustik und zum interdisziplinären Verständnis.

ABSTRACT

The aim of the work is the design-acoustic characterization of materials, taking into account the interrelationships of mechanical and acoustic properties.

Based on these, their effects on the attractiveness of utility objects are to be investigated by coupling the technical characteristics with design principles as they are applied in industrial design. The reason for this is the intention to develop a tool that supports designers in engineering and design in the selection, evaluation and generation of acoustic utility properties.

Based on the assumption that the smallest, time-limited and non-stationary signal components, such as those generated when structures are damaged, are the causes of the harmonic, perceptible sounds of usable consumer goods, the deformation behavior of short- and long-fiber-reinforced composite materials – which were selected with a view to their widespread use in the industrial sector – were investigated.

The experiments to study the temporal and spectral behavior were carried out by means of a standardized bending test, which was measured with suitable hardware and software for data acquisition. To define this method, several referential experiments were performed using acoustic emission analysis, acoustic camera, high-speed camera, and various microphone and measurement hardware. In parallel, the corresponding signal theoretical and psychoacoustic aspects were investigated. Thus, the investigated materials could be characterized from an acoustic point of view and grouped with respect to corresponding features. This resulted in the realization that the acoustic or design-acoustic classification of materials can deviate from the conventional origin – or process-oriented material classification.

In view of this finding, the results were incorporated into the development of the tool for design acoustic analysis and diagnosis. Design acoustic archetype, in the proposed method, represents the general characteristics of individual fracture events and overall damage is synthesized from a representative set of data from a material-specific test series based on a specially developed model.

Based on the hypothesis that visual and acoustic principles act in the same or similar ways and, when known and applied, allow predictability of effect and acceptance by the user – the technical characteristics of the archetypes were coupled with specially introduced design-acoustic complementary pairs. These correlate with corresponding design features from visual composition theory as applied in industrial design, ensuring the translatability of the model into technical and design sectors.

The results were visualized accordingly and validated by means of a first subject survey. The further development and expansion of the database for the targeted design of utility acoustics by engineers and designers would make sense in perspective. The results provide a contribution to those new to the field of design-acoustics and to interdisciplinary understanding.

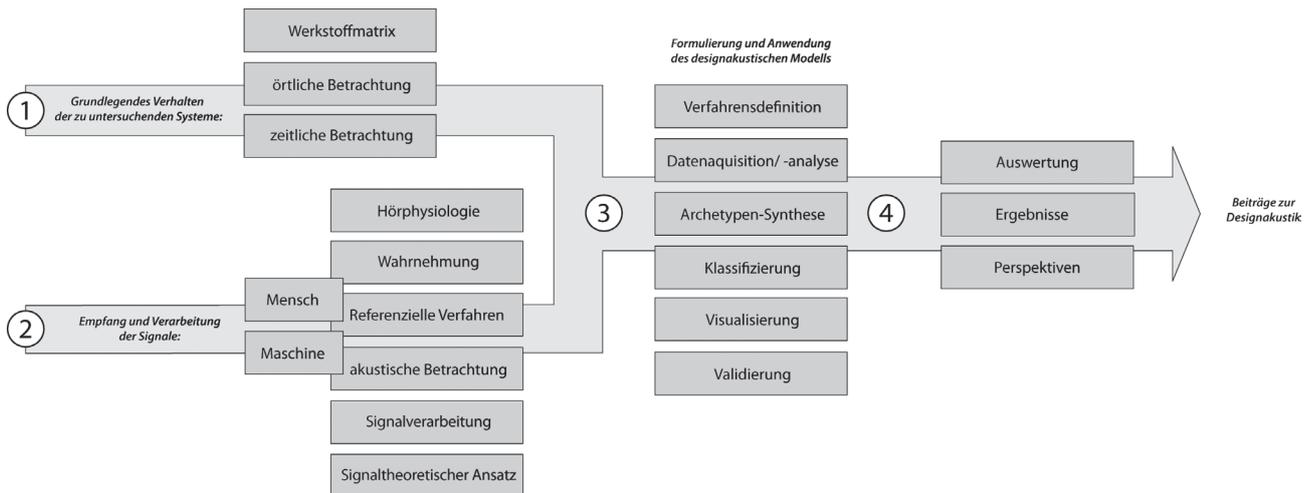
DISSERTATION NICKI BADER

I EINLEITUNG

I.1	Motivation	10
I.1.1	Allgemeine ingenieurtechnische Aspekte	11
I.1.2	Allgemeine designerische Aspekte	12
I.1.3	Verkopplungen ingenieurtechnischer und gestalterischer Arbeitsfelder	13
I.1.4	Bedeutung und Notwendigkeit von Designakustik	13
I.1.5	Zielstellung und Eingrenzung der Arbeit	15

II ENTWICKLUNG DER MATERIAL- UND WERKSTOFF- BEZOGENEN AKUSTIK – EIN GESCHICHTLICHER ZUGANG

II.1	Einleitung	21
II.2	Erste Zugänge zu Klang, Harmonie und Material	22
II.3	Antikes, arabisches und mittelalterliches Wissen (1200 v. Chr. - 14. Jh.)	23
II.4	Von der Renaissance bis in das vorindustrielle Zeitalter	31
II.5	Beginnende industrielle Revolution bis 20. Jahrhundert	37



1 DEFORMATIONSVERHALTEN VON WERKSTOFFEN

1.1	Einleitung	55
1.2	Eingrenzung und Definition der Werkstoffmatrix	55
1.2.1	Synthetische Faserverbundwerkstoffe	56
1.2.2	Natürliche Faserverbundwerkstoffe	60
1.2.3	Naturfaser-Verbundwerkstoffe und Biomatrizes	64
1.2.4	Mineralisch organischer Faserverbundwerkstoff	66
1.3	Lastannahmen und Festlegung der Prüfbedingungen	69
1.3.1	Biegeproben: Faser- und Zwischenfaserbrüche und Delamination	70
1.3.2	Zugproben zur Untersuchung von elementarem Einzelfaser-Versagen	71
1.4	Definition und Herstellung der Material- und Werkstoffproben	73
1.4.1	Natürliche Faserverbunde: Kiefer und Bambus	73
1.4.2	Naturfaser-Kunststoffverbunde: NFK, MDF und WPC	75
1.4.3	Synthetische Faserverbunde: Glasfaser- und Kohlefaserkomposite	77
1.4.4	Mineralisch organischer Faserverbund: Rinder- und Schweineknochen	78
1.5	Mechanisches Deformations- und Bruchverhalten der Faserverbunde	80
1.5.1	Örtliche Betrachtungen zu den verschiedenen Faserverbunden	81
1.5.2	Zeitliche Betrachtungen zu den verschiedenen Faserverbunden	85

2 SIGNALANALYSEMETHODEN – MENSCH – MASCHINE

2.1	Analogien bei Wahrnehmung und Signalverarbeitung	92
2.2	Referenzielle Untersuchungen mittels Schallemissionsanalyse	92
2.2.1	Akustisches Faserverbund-Verhalten im Zugversuch	95
2.2.2	Akustisches Faserverbund-Verhalten im Biegeversuch	98
2.3	Komplementäre Untersuchungen mittels Akustischer Kamera	102

2.4	Allgemeine mathematische und signaltheoretische Betrachtungen	122
2.4.1	Kontinuierliche Signale	124
2.4.2	Transiente Signale	132
2.4.3	Weitere Verfahren der Signalanalyse	138
2.4.4	Werkzeuge für die Signalverarbeitung	140
2.5	Interaktion zwischen mechanischen und akustischen Eigenschaften	140
2.6	Möglichkeiten und Grenzen psychoakustischer Eigenschaften	147
3	DESIGNAKUSTISCHE ANALYSE UND DIAGNOSE	
3.1	Betrachtung und Einordnung referenzieller Konzepte und Forschungen	157
3.2	Designakustisches Modell zur Material- und Werkstoffanalyse und Klassifikation	162
3.2.1	Probenaufbereitung und Versuchsdurchführung	164
3.2.2	Beschreibung der Datenakquisition und Datenaufbereitung	171
3.2.3	Feature-Synthesierung zur Modellierung von Einzel- und Gesamtbruchereignissen	175
3.2.4	Parameterbasierte Synthese material- und werkstoffspezifischer Archetypen	191
3.2.5	Formulierung und Verkopplung designakustischer Komplementärpaare und Archetypen	201
3.2.6	Designakustisches Visualisierungsmodell	208
3.2.7	Validierung der Archetypen und des Visualisierungsmodells	216
4	FAZIT UND ABLEITUNG DER PERSPEKTIVEN	
4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	220
4.2	Perspektivische Betrachtungen zu den Ergebnissen	220
5	ZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN	222
6	QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS	224
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	236
8	DANKSAGUNG	241

I EINLEITUNG

I.1 Motivation

Dies ist eine interdisziplinäre Arbeit. Die Untersuchungen zielen dabei zum einen auf die akustische Ursachenforschung und Charakterisierung von faserverstärkten Leichtbauwerkstoffen bei Schädigung und sollen darüber hinaus den Zusammenhang zwischen Nutzungsakustik und Nutzerakzeptanz hinsichtlich der vom Menschen wahrgenommenen Schädigungsgeräusche erklärbar machen.

Bei der Umsetzung dieser Aufgabe überschneiden sich mehrere Wissensgebiete und Professionen. Die Übergänge sind dabei fließend und könnten sicher auch anders als in der hier vorliegenden Form gewichtet werden. Hier steht der ingenieurtechnische Aspekt im Vordergrund, wobei dieser stark durch Interpretationen aus dem Bereich des Industriedesigns ergänzt wird. Um die sensuellen und psychoakustischen Gesichtspunkte hinreichend genau beschreiben zu können, reichen darüber hinaus auch verschiedene Teilaspekte der Physiologie und Psychologie in die Forschungen hinein. Denn im Ergebnis soll die Arbeit dazu beitragen, den noch relativ jungen Bereich der Designakustik durch die neuartigen Ansätze hinsichtlich der heutigen signalverarbeitungstechnischen Möglichkeiten und der zugehörigen Interpretationsmodelle weiterzuentwickeln.

Die beiden Kernfelder Konstruktion und Design sind dabei weiter zu fassen, als dass der Techniker nur konstruiert und der Gestalter sich auf die rein formalen Aspekte beschränkt. Ingenieurseitig spielen die verschiedenen verwendeten Signalanalysemethoden der Technischen Akustik eine tragende Rolle und werden referenziell durch weitere Methoden der zerstörungsfreien und zerstörenden Materialprüfung ergänzt. Dementsprechend werden diese Verfahren durch Betrachtungen hinsichtlich der Mechanik im Allgemeinen und der Werkstoffmechanik und -akustik im Speziellen, selektiert, beziehungsweise für die Aufgabenstellung bewertet. Der Designer wiederum, dessen Kernkompetenz vordergründig die formale Ästhetik ist, beschäftigt sich weiterführend mit Aspekten der Ergonomie, bzw. der Haptik. Doch darüber hinaus muss man bei der ganzheitlichen Betrachtung der Mensch-Maschine/Objekt-Schnittstelle auch auf den Gehörsinn eingehen und sich entsprechend mit der Designakustik auseinandersetzen. Weiterführend wären auch noch die olfaktorischen Gesichtspunkte zu berücksichtigen, die jedoch in dieser Arbeit zugunsten einer tieferen Durchdringung der akustischen Akzeptanz außen vor gelassen wurden.

Da diese Arbeit, wie beschrieben, auf einer sehr breiten Basis gründet und im Spezifischen eine neuartige Quervernetzung herstellt, sollen beide Zielgruppen – Ingenieure und Designer angesprochen werden. Die grundlegenden Erkenntnisse und Ansätze, die sich daraus ergeben sind reizvoll, um beide „Kulturkreise“ zur Bearbeitung fachübergreifender Themen und zu anderen Betrachtungsweisen zu inspirieren. Die Suche und Formulierung der geeigneten, für die wissenschaftliche Arbeit zielführenden Aufgabenstellung war deswegen ein bedeutsamer Teil der Arbeit.

Költzsch schrieb dazu sinngemäß bezüglich der Ausschreibungen wissenschaftlicher Akademien: „Wichtig ist für eine anständige Preisfrage: Sie muss verzwickt genug sein, um Wissenschaftler intellektuell zu kitzeln. Sie soll aber auch Menschen aus anderen Bereichen neugierig machen. Und so schlicht sein, dass Antworten in fast jeder Form möglich sind – als Essay oder wissenschaftliche Abhandlung, als Kurzgeschichte, Fotomontage, Video oder Skulptur“ [KÖL11].

Ähnliche Intentionen führten auch hier zur Themenwahl. Für den Autor stellt diese Arbeit die subjektive Beweisführung dar, dass beide Tätigkeiten – Designer und Ingenieur – zusammen harmonieren und in Symbiose wissenschaftliche Erkenntnisse hervorbringen können, die das noch relativ neue Arbeitsfeld „Designakustik“ bereichern.

Im Folgenden sollen die Arbeits- und Denkweisen beider Professionen elementar beschrieben werden, um die Kernarbeitsfelder und Überdeckungsbereiche der Arbeit darzustellen.

I.1.1 Allgemeine ingenieurtechnische Aspekte

Der Ingenieur nimmt physikalische und technische Erkenntnisse und schafft daraus etwas Neues, doch nicht immer ist dabei der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten eine Gerade. Ein historisches und bis heute exemplarisches Beispiel aus der mechanischen Ingenieur-Welt, die eng am Arbeitsfeld des Formgestalters liegt, verdeutlicht die grundlegende Arbeitsstrategie und die darüber hinausgehenden Ansätze: Der konstruktiv tätige Begründer der wissenschaftlichen Maschinenlehre Franz Reuleaux (1829-1905) – Professor am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich – war Verfasser der 1854 veröffentlichten „Konstruktionslehre für den Maschinenbau“ [REL1862], welche aufgrund der klaren Gliederung und der mustergültigen Zeichnungen in Ingenieurskreisen auf große Resonanz stieß und getreu dem Motto „So wenig wie möglich - So viel wie nötig“ dem technisch effizienten Grundgedanken der Ingenieure folgte.

Darüber hinaus betrachtete er allerdings im letzten Kapitel seines Werkes den Maschinenbaustil, und suchte nach gestalterischen Aspekten in seiner Systematik, die sich mit der Nutzerakzeptanz, quasi der psychologischen Effizienz in Deckung bringen lassen. Die Gedanken hierzu waren nach heutiger Einschätzung dem Historismus verhaftet, aber trotz dieser Tatsache finden sich darin auch neue und bis dahin nicht von der Architektur übernommene Ideen.

In seinem erstmals 2005 veröffentlichtem Buch „Gestalt und Deformation“ [SCHA09] beschrieb Scharnowski eine beispielhafte Auslegung (siehe Abb. I-a) hinsichtlich dieser schon bei Reuleaux angesprochenen Interpretationsspielräume: „Ein angenehmes Beispiel dekorativer Präsenz von genormtem Walzstahl... Als Träger ... dienen gebogene, 180 mm hohe Doppel-T-Träger. Um eine vordergründige technische Anmutung dieser Bauteile zu vermeiden, wurde auf die Mitte der Profile ein 50er U-Pofil aufgenietet.... Dieser kleine zusätzliche Querschnitt, der... im Bereich der neutralen Faser des großen Profiles befestigt ist, trägt fast nichts zur Stabilität der geschwungenen Träger bei. Er zergliedert wohlproportioniert die großen Stegflächen. So weht ein Hauch von Jugendstil durch die Halle und der Säulenfuß zeigt sich in strenger Klassik.“

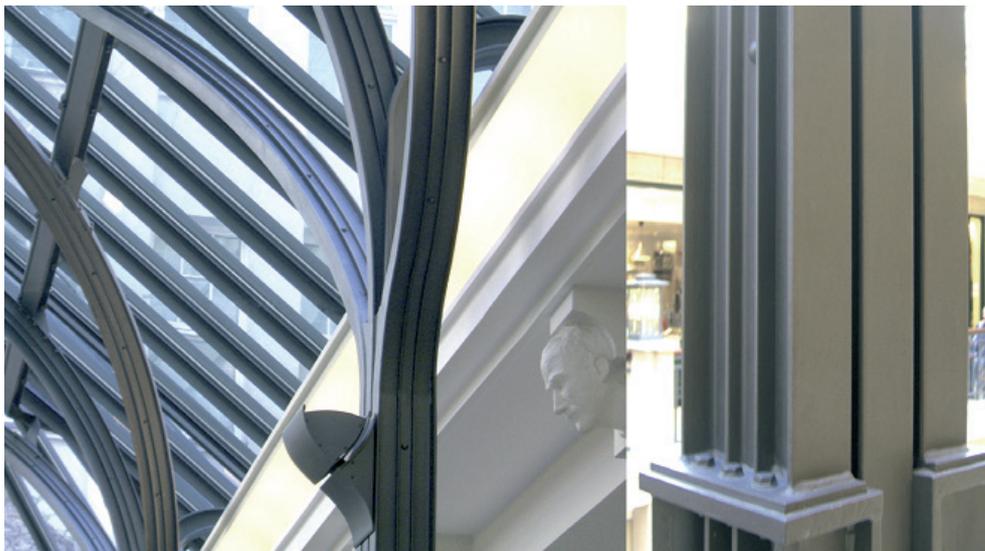


Abb. I-a: „Lichthof mit Walzstahlprofilen nach DIN 1025, die in dekorativer Absicht sensibel kombiniert wurden“ [SCHA09].

Die architektonische und konstruktive Aufgabenstellung wurde somit unter Berücksichtigung der ganzheitlichen Gestaltung über die eigentlich nur zu beachtenden mechanischen Kriterien hinaus gelöst.

Auf die akustischen Fragestellungen der Arbeit bezogen bedeutet dies, neben der rein objektiv mathematischen, bzw. ingenieurwissenschaftlichen Betrachtung, auch Potenzial zur Untersuchung von akustischen Signalen hinsichtlich der subjektiven und, darüber hinaus, der psychoakustischen Wirkung vorhanden ist. Invers wird das tiefere Verständnis für diese Prozesse heute vom sogenannten Sound Engineer im Acoustical Engineering dazu verwendet, um aktiv „Nutzakustik“ zu generieren oder diese passiv über Testreihen zu bewerten. In diesem Fall agiert der Ingenieur bereits im Kernfeld des Gestalters. Dessen Arbeitsweise und die differenzierten Aspekte des Industrial Designs im Speziellen, werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

I.1.2 Allgemeine designerische Aspekte

Der Designer spielt umgangssprachlich und vordergründig auf der Klaviatur der Seele. Schon während des Designstudiums wird in den entsprechenden Grundlehrfächern, wie dem Naturstudium oder der Typografie vermittelt, dass auch in künstlerischen und ästhetischen Belangen nicht alles „reines Bauchgefühl“ ist. Auch die Gesetzmäßigkeiten der Ästhetik und damit verkoppelt der Akzeptanz wirken wie Naturgesetze und sind nicht verhandelbar. Oft lassen sie sich noch nicht direkt quantifizieren oder qualitativ kategorisieren, da die verschiedenen Wirkungsmechanismen und Einflussfaktoren durch das Zusammenspiel und die spezifischen Wirkungsweisen mehrerer Sinne sehr komplex und darüber hinaus überwiegend kontextbezogen sind. Aber gerade die möglichst kompakte Formulierung von Gesetzmäßigkeiten oder die Formulierung von Axiomen, welche wissenschaftlich betrachtet eher ingenieurseitig angesiedelt sind, machen die Arbeiten und Forschungen nachvollziehbar und damit effizienter und aussichtsreicher.

Zu den technischen und formalen Verkopplungen äußerte sich Kramer vom VDI Berlin wie folgt: „Der Ingenieur ist des Formgebers Reservoir an Kenntnissen, sein Führer und Mentor. Das läuft schließlich auf den Formgebungs-Ingenieur hinaus: Ein technisches „Verständnis“, eine technische „Begabung“ des Künstlers reicht dazu nicht aus; sehr wohl jedoch eine künstlerische Begabung des Ingenieurs“ [REE05].

Im gleichen Zusammenhang auf das Thema der Arbeit gemünzt bemerkt dazu Peter Luckner, Leiter des Modellvorhabens „Multisensuelles Design“ an der Hochschule „Burg Giebichenstein“ in Halle polarisierend: „Für Designer wird die psychoakustische Arbeit dort interessant – und im Falle integrativer Gestaltungsarbeit Teil ihres Wirkens – wo die Wesensmerkmale eines Produkts per Geräusch herausgearbeitet, geschärft, verbessert werden. Das erfordert häufig eine naturwissenschaftliche Tiefensicht, für die sich Designer nicht berufen fühlen. So ist, um ein Beispiel zu nennen, wohl das spezifische Molekulargefüge und die damit gegebene Kohäsion dafür verantwortlich, dass dunkles Bier anders klingt als helles“ [LUCK04].

Die Grundvoraussetzung, um Forschungen auf gestalterisch akustischem Gebiet durchführen zu können ist demnach das naturwissenschaftliche, technische Wissen. Gestalterisch setzen derartige Untersuchungen ein geschultes Gehör voraus, um die technisch formulierten Aussagen in ihren Effekten verifizierbar zu machen und zu objektivieren, denn bis dato ist die lückenlose Abbildung der Wahrnehmung technisch nicht reproduzierbar. Kontrollorgan für die Akzeptanz bleibt bis dahin das Subjekt.

Konkretisieren lassen sich die Untersuchungen hinsichtlich der ungeübten Hörschaft über zielgruppenorientierte Versuchsreihen mit Probanden, den sogenannten „Sound Evaluations“. Diese subjektiven Untersuchungen sollen nicht über „guten und schlechten Sound“ urteilen, vielmehr geht es um die empfundene „Soundqualität“. Bei den Tests selbst werden die Daten entweder von Einzel- oder Jurytests erfasst und statistisch ausgewertet. Dabei erfolgen die Vorbereitungen solcher Versuchsreihen hinsichtlich Probandenauswahl, Hörumfeld oder Soundprobendefinition usw. nach streng wissenschaftlichen Kriterien und einer zielorientierten und möglichst fehlerfreien Datenerfassung. Die gewonnenen Informationen sind nach speziell ausgewählten, Korrelations-Auswerteverfahren hinsichtlich der qualitativen Aussagen genauso wertvoll, wie die objektiv gewonnenen. Die Ergebnisse werden meist auf Bewertungsskalen dargestellt (vgl. zu Thema Sound Evaluation [OTAM2001]).

Mit der Beschreibung des Zusammenhanges von menschlicher Schallempfindung – definiert als Hörereignis – und den damit einhergehenden physikalischen Schallfeldgrößen – definiert als Schallereignis – setzen sich die Psychoakustik bzw. die Psychoinformatik auseinander und führen dazu sog. psychoakustischen Parameter ein. Diese werden wiederum, wie vorab beschrieben, durch eine Vielzahl von Urteilen und einhergehende statistische Auswertung validiert und bilden die allgemeine Basis für die Beschreibung der Akzeptanz von Klängen und Geräuschen.

I.1.3 Verkopplungen ingenieurtechnischer und gestalterischer Arbeitsfelder

Konstruktion und Design sind heute quasi zwei Kulturkreise. Beide haben natürlich ihre Spezifik. Es gibt aber auch einen relativ großen Überschneidungsbereich, was wiederum kulturgeschichtlich bedingt ist, da die ersten Formgestalter Mitte des 19. Jahrhunderts aus den Reihen der Ingenieure traten. So werden z. B. William Morris und John Ruskin, zwei bekannte Vertreter der Arts and Crafts Bewegung, oft auch als die ersten Produktdesigner bezeichnet [LOV09].

Aber auch Künstler-Ingenieure wie Leonardo da Vinci, Michelangelo oder Albrecht Dürer nutzten bereits zu Renaissance-Zeiten Wissen und Erkenntnisse aus Kunst und Technik, weil es die Trennung beider, wie sie die industrielle Revolution mit sich brachte, noch nicht gab.

Heute findet man, mit Sicht auf diese Schnittstelle verschieden gewichtete Arbeits- und Forschungsfelder, die diese Trennung zugunsten einer thematisch erweiterten Bearbeitung und respektive der komplexen Wahrnehmung beim Nutzer wieder aufheben (vgl. [REE05]).

Wissenschaftliche und methodische Beiträge zu dieser Verkopplung liefert beispielsweise Hartmut Seegers Abhandlung über das Design technischer Produkte [SEE2005]. Dort finden sich neben weiterführenden Untersuchungen zum methodischen Konstruieren auch erste Verweise zum sog. Multisensorischen Design (S.365 ff.), welches auch die diesbezüglichen akustischen Kriterien untersucht.

Es lässt sich somit konstatieren, dass die heutigen komplexen Notwendigkeiten, bzw. Anforderungen, die bei der Generierung von industriellen aber auch bei manufaktuell oder kunsthandwerklich gefertigten Produkten auftreten, immer mehr den Ingenieur-Designer oder Design-Ingenieur fordern, wobei beide Professionen dieser Aussage sehr weit gefasst sind und in ihrer Spezifik durchaus stark differieren können. Im Folgenden soll deswegen die Bedeutung und Notwendigkeit hinsichtlich der akustischen Ausrichtung begründet werden, da auch bereits Forschungen zur „Designakustik“ in seiner speziellen Form betrieben werden.

I.1.4 Bedeutung und Notwendigkeit von Designakustik

Die Relevanz akustischer Methoden zur Untersuchung von Geräusch- und Schwingungsereignissen gewinnt im vielen industriellen Bereich wie zum Beispiel im Maschinenbau und der Fahrzeugtechnik immer mehr an Bedeutung. Gerade im Letztgenannten konzentrieren sich die Forschungen zum einen auf die Auswertung von harmonischen Signalanteilen hinsichtlich Komfortuntersuchungen, wohingegen auf der anderen Seite die kleinsten, zeitlich beschränkten und nicht stationären Signalanteile untersucht werden, um die Ursachen für die Entstehung der harmonischen Anteile besser verstehen und vorhersagen zu können. Dies ist hinsichtlich der Funktionsoptimierung bzw. deren Prüfung durch im Werkstoff „eingebaute“ Diagnosemöglichkeiten bedeutsam und letzten Endes Verkaufsargument.

Hinsichtlich der Arbeiten zu akustischen Prüfmethoden zur Komfortoptimierung durch Geräuschminimierung sei an dieser Stelle auf die Arbeit von Bader verwiesen [BAD2006]. Diese stellt hinsichtlich der Maschinenüberwachung und -diagnose eine flexible akustische Messmethode zur Detektierung von verzahnungstechnischen Problemen vor und geht explizit auf die Notwendigkeit der Erkennung nichtstationärer Signale in der Fahrzeugtechnik ein. Intention dabei ist es das Gesamtsystem Fahrzeug besser zu verstehen und gezielt zu beeinflussen, da beispielsweise schon bei der Auslegung von Motor- oder Abgasanlagen beide Aspekte – Geräuschminimierung bei gleichzeitigem Sounddesign – berücksichtigt werden.

Auch prozessüberwachende Prüfaufgaben, bei welchen Produkt-Aspekte klassifiziert werden sollen, die sich nicht direkt mit einer physikalischen Größe verkoppeln lassen, haben akustische Ansätze große Relevanz. So basiert beispielsweise eine von Tschöpe entwickelte automatisierte Weichheitsprüfung von Papier [TSC2012] auf der Auswertung akustisch-statistischer Klassifikatoren, deren Merkmale signalverarbeitungstechnisch über die Mustererkennung mittels Fast Fourier Transformation (FFT) extrahiert werden, um so verschiedene Produktionsmargen einer Qualitätsmatrix zuordnen zu können.

Im Bereich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung haben sich verschiedene aktive und passive akustische Prüfverfahren, wie zum Beispiel die Ultraschallprüfung, die Schallemissionsanalyse oder auch die Klangprüfung etabliert. Gerade Letztere hat mit Sicht auf die Arbeit den methodischen Vorteil, dass ein breiter Frequenzbereich einbezogen wird.

Hinsichtlich des wachsenden Prüf- und Dokumentationsbedarfs von faserverstärkten Kunststoffbauteilen im Aircraft- und Automotivebereich werden diese zFP-Methoden (zerstörungsfreie Werkstoffprüfung) momentan dahingehend ausgedehnt und entsprechend der veränderten Prüfbedingungen und Fehlerarten angepasst, bzw. neu entwickelt.

Der Industriedesign-Bereich befasst sich mit der Bewertung und Gestaltung von Produktklängen und Nutzungsgeräuschen im Kontext des „Multisensorischen Designs“ etwa seit den 80er Jahren (vgl. [SEE2005]) und arbeitet quasi am frequenzbezogenen „akustischen Gütesiegel“ äquivalent zur dB(A)-Lautstärkeskala.

Luckner stellt auf Basis seiner im „Multisensuellen Design“ der Hochschule „Burg Giebichenstein“ in Halle gemachten Erfahrungen bereits eine gewisse Etablierung fest: „Das Akustik-Design ist ein Verkaufsfaktor. Seine Anwendung zur Schärfung von Produktmerkmalen hinsichtlich der Kraftäußerung (etwa bei Staubsaugern, Rasierern, natürlich bei Autos, bei Küchengeräten), hinsichtlich der Exaktheit (etwa für Kühlschrankschranktüren), hinsichtlich der Solidität eines Prozesses (etwa Toaster), hinsichtlich einer Feintuning von Merkmalsgeräuschen körpernaher Prozesse (wie beim Fön oder etwa dem Versprühen von Düften) ist teilweise geläufiger Teil des Designprozesses“ [LUCK04].

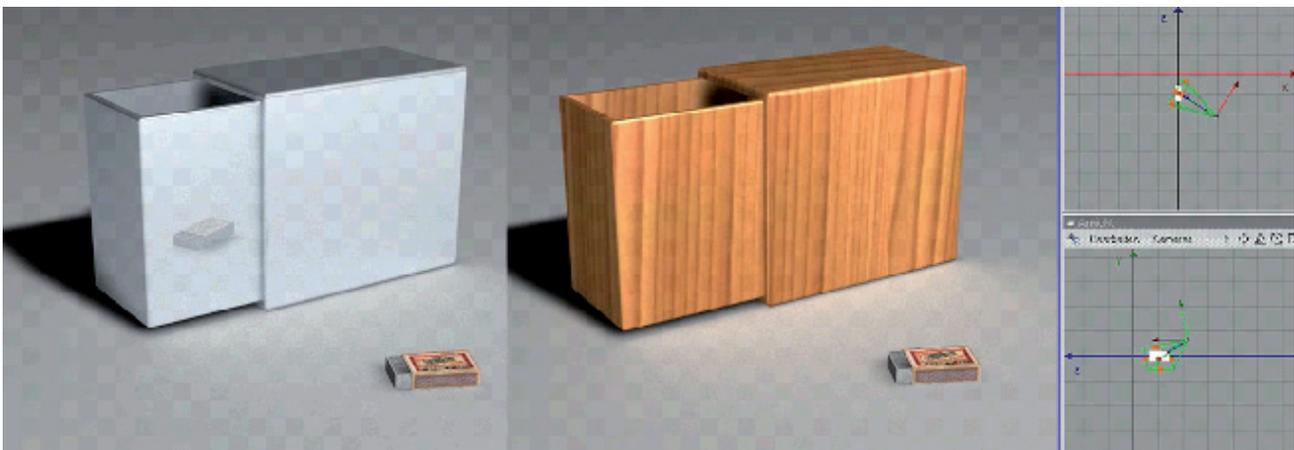


Abb. I-b: Virtuelle Modellierung von Möbeln verschiedener Materialität, aber vergleichbarem Aufbau zur Simulation der differenzierten klanglichen Qualität beim Nutzungsprozess

Forschungsseitig bieten Luckners Arbeiten hinsichtlich eines psychoakustischen Testsystems in Zusammenarbeit mit Blutner konkrete Ansätze zur Simulation, bzw. Modellierung von Klängen beliebiger Gebrauchsgegenstände. Die bildlich dargestellten Objekte werden dafür im CAD (Computer Aided Design) modelliert und animiert, wobei die dabei entstehenden Strukturgeräusche über den Datensatz des 3D-Modells generiert werden sollen. Die spezifischen konstruktiven Unterschiede, zum Beispiel hinsichtlich differenzierter Wandstärken, wurde hier aus Gründen der strukturellen Einheitlichkeit und Vergleichbarkeit noch ausgespart.

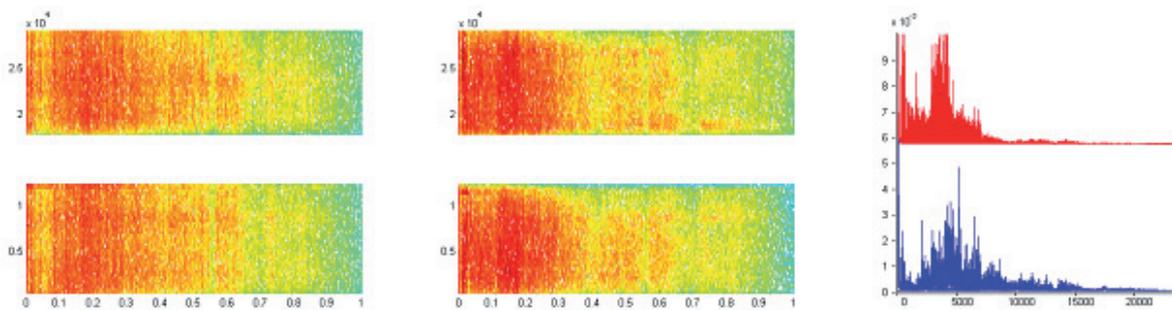


Abb. I-c: Spektrogramme beider Schränke in selber Reihenfolge und Amplitudenspektren von oben nach unten – Metall, Holz

Die aus der Filmsequenz extrahierten Audiofiles zeigen sowohl in den dazugehörigen Spektrogrammen, als auch im direkten Vergleich der Frequenzspektren deutliche Unterschiede und werfen die Frage auf, ob Konstrukteure oder Designer mit dieser Art Darstellung bereits arbeitsfähig sind. Um eine entsprechende Basis für die dem Simulator zugrundeliegenden Materialdatenbank zu erhalten, müssen diese Simulationsdaten natürlich über eine Matrix akustischer Experimente mit Proben gleicher Geometrie aber variierender Materialität zusammengetragen und invers verifiziert werden. Aus diesem Anspruch lassen sich die wesentlichen Experimente dieser Arbeit ableiten, beziehungsweise begründen. Eine entsprechende Eingrenzung des Arbeitsfeldes wird im Folgenden beschrieben.

I.1.5 Zielstellung und Eingrenzung der Arbeit

Als übergeordnetes Werkstoffsystem für die Untersuchung werden die faserverstärkten Leichtbauwerkstoffe gewählt, da diese hinsichtlich ihres Innovationspotenzials am interessantesten erscheinen und weil deren Eigenschaften in gewisser Weise für Untersuchungen manipulierbar sind. Eine Fokussierung der Untersuchungen auf diesen Bereich erscheint aufgrund der Vielfältigkeit und Breite der Objekt- und Werkstoffvarianzen im Gestaltungsbereich sinnvoll. In die Untersuchungen werden hinsichtlich der ökologischen Kriterien und der Nachhaltigkeit auch verschiedene Holzwerkstoffe als Vertreter der nachwachsenden Rohstoffe einbezogen, nicht zuletzt, weil deren Materialität im Design und in der Möbelgestaltung oder der klassischen Tragwerkskonstruktion Verwendung findet.

Gewichtsanteil der Materialien im Auto	1990	2003	2015
Stahl in %	70	33-58	27-49
Aluminium in %	5	14-32	8-27
Kunststoffe in %	8	7-14	14-20

Abb. I-d: Verwendungstrend der verschiedenen Werkstoffe im Automobilbereich [HAR05]

Die stetig wachsende industrielle Verwendung von Leichtbaumaterialien verlangt neben den sehr gut dokumentierten mechanischen Forschungen auch weiterreichende qualitative, auf den Nutzer gerichtete Untersuchungen mittels akustischer Prüfmethoden.

Der ingenieurtechnischen Attraktivität stehen nämlich die akustisch relevanten Akzeptanzprobleme dieser Werkstoffe im materiellen Leichtbau bezüglich Dämpfungs- bzw. Klangverhalten entgegen. Denn a priori lassen sich störende Schwingungen und Eigenresonanzen nicht durch den Einsatz großer Massen „wegdämpfen“. Darüber hinaus lassen sich bisher nur unzureichende qualitative Aussagen hinsichtlich der Nutzungs- und Bruchakustik treffen. Ebenso fehlen bisher geeignete Prüfmethoden, um solche Qualitäts- und Sicherheitsfaktoren auf eine ganzheitliche ökonomische Basis zu stellen, insbesondere wenn man diese Materialklasse auch als Massenprodukt ansieht. Hier fehlen preiswerte und diesbezüglich sichere Prüfverfahren.

Der Werkstoff- und Strukturleichtbau ist bisher also vordergründig durch die Dominanten der Gewichtsoptimierung und Verbesserung der mechanischen Eigenschaften getrieben. Das spezifische akustische Verhalten von Leichtbaubjekten bei Belastung und Übergang zum Bruch unter Einbeziehung der wahrnehmungsbezogenen Aspekte beim Nutzer wurde bisher nicht untersucht und soll deswegen Kern dieser Arbeit sein. Gerade akustische Methoden eignen sich zudem im besonderen Maße zur Bewertung schneller Prozesse, wie sie typischerweise in Leichtbaumaterialien mit ihrer Werkstoffspezifik gehäuft vorkommen.

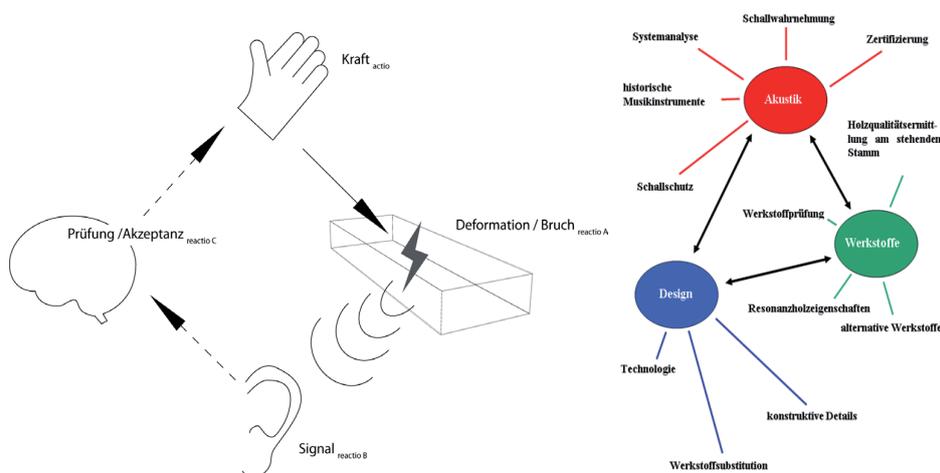


Abb. I-e: Links: Das zu untersuchende Ursache-Wirkungsprinzip auf den verschiedenen Wahrnehmungs- und Verarbeitungsebenen; Rechts: Äquivalente Idee der Verbindung von Akustik, Werkstoffforschung und Technologie am IfM – Institut für Musikinstrumentenbau e. V.

Der erste Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Beschreibung des akustischen Verhaltens von faserverstärkten Leichtbauwerkstoffen und Strukturen unter Kraftereinwirkung und der dadurch verursachten zeitlich kurzen und transienten Schallemissionssignale, die bei Materialschädigung auftreten und welche wiederum die Initiatoren der im Zeitverhalten später auftretenden strukturellen Schwingungsanteile im Frequenzspektrum sind. Dafür wird vorab das grundlegende Verhalten der zu untersuchenden Systeme hinsichtlich der verschiedenen Versagensmechanismen bruchmechanisch untersucht.

Für die Arbeit werden spezifisch gefertigte, geometrisch identische und damit akustisch vergleichbare Biegeproben unterschiedlicher Materialien verwendet. In Anlehnung an bekannte Verfahren der Prüfakustik werden dabei zuerst die zeitlich kurzen und transienten Schallemissionssignale von Rissinitiationsprozessen untersucht.

Die Schallemissionsmessungen werden dabei durch breitbandig ausgelegte und eigens entwickelte AE-Sensoren (AE – Acoustic Emission) auf Piezokompositbasis modifiziert und durch entsprechende hochauflösende Messperipherie und empfindliche Mikrofone ergänzt. Hier verwendete Begriffsbezeichnungen, wie (ultraschall)akustische Emission werden in ihrer Verwendung folgend noch eingeordnet.

Weitreichende Untersuchungen zur Thematik der Erkennung von Fehlermechanismen in faserverstärkten Kunststoffen und deren Differenzierung mittels Mustererkennung aus dem Blickwinkel des Materialverständnisses, auf welche sich die Arbeit teilweise stützt, wurden von Sause veröffentlicht [SAUSE10].

Ein wichtiger Aspekt der Arbeit ist die konsistente Verwendung von Software-Werkzeugen zur Signalverarbeitung. Dies ist besonders wichtig, da die verschiedenen akustischen Messverfahren so eine methodische Klammer erhalten. Die in Matlab [MAT12] programmierten Tools sind gerade mit Sicht auf die Untersuchungen der transienten und schnellen Ereignisse hilfreich. Auch hinsichtlich der zur Charakterisierung notwendigen Mustererkennung, z. B. mittels der schnellen diskreten Wavelet-Transformation, sind diese flexibel anpassbaren Softwarelösungen unverzichtbar. Sinngemäß finden sich ähnliche Lösungsansätze im Kontext der Untersuchungen zur Erkennung von Getriebeproblemen in der Dissertation von Bader [BAD2006].

Um dem ganzheitlichen Anspruch einer designakustischen Untersuchung Rechnung zu tragen werden neben diesen Methoden auch weitere referenzielle Verfahren angewandt. Für die topologischen Untersuchungen und Beschreibungen von Materialfehlern, wie Delaminationen oder Ondulationen, die meist Ausgangspunkt von Risswachstum sind, werden mikroskopische und röntgentomografische Verfahren eingesetzt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird darüber hinaus die oft technologisch begründete Trennung zwischen den Frequenzbereichen durch den Einsatz verschiedenartiger Sensorik aufgehoben, um die Nutzung aller akustischen Daten, welche bei Materialschädigung oder bei struktureller Belastung breitbandig auftreten unter dem Gesichtspunkt der Designrelevanz zu betrachten.

Die verschiedenen akustischen Emissionen im Hörbereich bis hinein in den Ultraschallbereich, verursacht durch Rissinitiierung und Risswachstum von faserverstärkten Werkstoffen, werden dafür auf den phänomenologischen bzw. physiologischen Kontext bezogen, um Erkenntnisse über das Ursache-Wirkungsprinzip zu erlangen und um ein geeignetes Prüf- und Bewertungsmodell für diese Nutzungsgeräusche zu finden.



Abb. I-f: beispielhafte Illustration des Problemfeldes aus künstlerischer Sicht [WEI2010]

Dafür werden vorab die bei Mensch und Maschine differenzierten Mechanismen des Empfangs und der Verarbeitung von Signalen gegenübergestellt, um die Messergebnisse maschineller Systeme mit dem subjektiven Empfang von Signalen über das menschliche Ohr abzugleichen.

Ziel der an die Problemstellung angepassten Datenakquisition und der anschließenden designbezogenen Auswertung ist die nutzerbezogene Charakterisierung von Geräuschen und Klängen. Dafür wird ein vereinheitlichtes Beschreibungsmodell vorgeschlagen, um über ein universelles Werkzeug zur Klassifizierung der Signale, die durch Kraftereinwirkungen verursacht werden, zu verfügen.

Im Hinblick auf die Anwendung und die Verifikation der Verwendbarkeit dieser Beschreibungsverfahren für die akustische Diagnose an komplexeren Strukturen, bzw. Objekten, werden anschließend weitere referenzielle Verfahren eingesetzt. Für die ortsvariable Klangbewertung kommen damit die Modalanalyseverfahren und die sogenannte akustische Kamera [GFAI] als Forschungswerkzeuge zum Einsatz. Auch wenn letztere Technologie gegenwärtig vorwiegend für tiefere Frequenzen ausgelegt ist, wurde versucht, die Untersuchungen für material-spezifische Fragestellungen einzusetzen.

Die folgende Grafik zeigt abschließend den Versuch die verschiedenen Themengebiete, Arbeitsfelder und entsprechende Derivate in eine für die Arbeit relevante Ordnung zu bringen und entsprechend ihrer Relevanz zu wichten. Sie erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit, noch scheint es möglich alle Überlappungsbereiche zu visualisieren. Verschiedene Querbeziehungen einzelner oder mehrerer Felder sind oft beschrieben worden.

Es wird jedoch deutlich, dass trotz des dominant ingenieuren Charakters der bekannten Arbeiten auch andere Aspekte gewichtet werden sollten, um die Aussagen zur Material- und Werkstoffcharakterisierung hinsichtlich der Ausgewogenheit bzw. Ganzheitlichkeit auf die vorab beschriebene breite Basis zu stellen und nutzbar zu machen. Die Kombination der vordergründig abgebildeten Arbeitsfelder soll dafür den Katalysator für die Untersuchungen dieser Arbeit bilden.

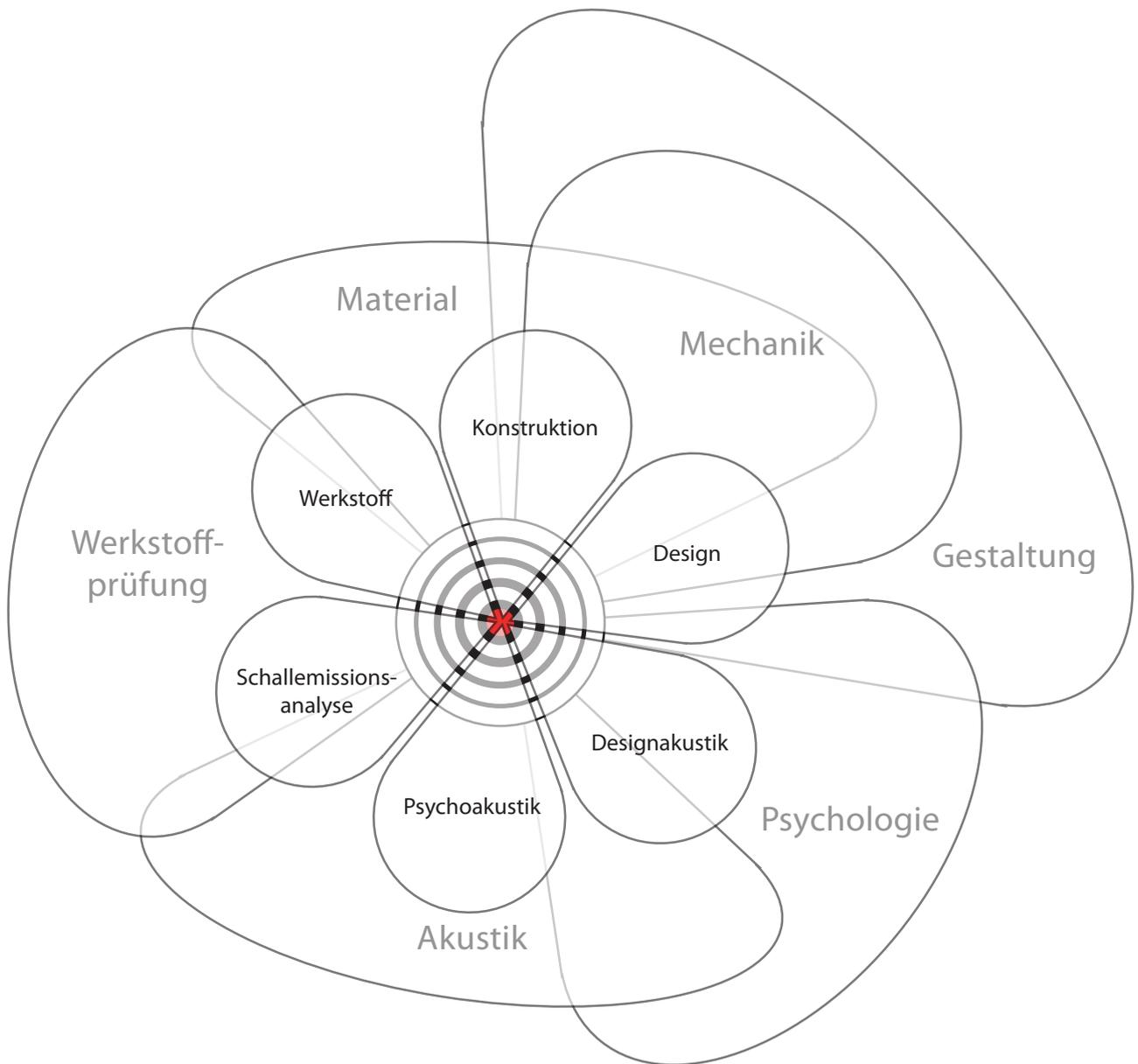


Abb. I-g: Verkopplung der relevanten Arbeitsfelder

II ENTWICKLUNG DER MATERIAL- UND WERKSTOFF- BEZOGENEN AKUSTIK – EIN GESCHICHTLICHER ZUGANG

To understand a science, it is necessary to know its history.
(Autor unbekannt)

Im folgenden Kapitel werden gezielt einige ausgewählte Bemerkungen zur Entwicklung der Akustik und deren Anwendungen gesammelt, die einen spezifischen Blickwinkel auf die geschichtlichen Aspekte bezüglich der Bewertbarkeit akustischer Material- und Werkstoffeigenschaften werfen.

Dort wo die Rezeption von Schallereignissen durch Werkstoffeigenschaften oder Materialveränderungsvorgänge beeinflusst werden, sollen diese in die interdisziplinären Anforderungen des Ingenieurs und gestalterisch geprägten Fachgebietes Industriedesign eingeordnet werden.

II.1 Einleitung

Wie einleitend beschrieben, kann die Akustik ein vielfältiger Problemlöser und Optimierer im Gestaltungs- und Prüfprozess sein. Da sich die Arbeit mit der akustischen Charakterisierung von Werkstoffen und Strukturen auseinandersetzt, erscheint es sinnvoll die kontextuellen Zusammenhänge zwischen den bisherigen Forschungsergebnissen auf diesem Gebiet zu beschreiben.

Die Akustik (griechisch: akuein ακουειν = hören) ist ganz allgemein definiert die Lehre vom Schall und seiner Ausbreitung. Das Thema ist dabei ein komplexes, interdisziplinär bearbeitetes Wissenschaftsgebiet, welches neben den nahe liegenden Fachgebieten wie Physik, Mathematik oder Nachrichtentechnik unter anderem auch die Materialwissenschaften mit einbezieht. Sucht man nach Erkenntnissen bezüglich der wahrnehmungsbezogenen Akustik erweitert sich das Forschungsfeld um Disziplinen wie Psychologie, Kunst, Philosophie und Medizin. Erste konkretere Erkenntnisse hinsichtlich Entstehung, Erzeugung, Ausbreitung, Wechselwirkung und Beeinflussung von Schall wurden bereits in der Antike gelegt, weitere sollten in mehreren Schüben über die Renaissance und ab Mitte des 20. Jahrhunderts folgen [KÖL11]. Dabei ist zu bemerken, dass verglichen mit der Vielzahl und Redundanz der Arbeiten zu den elementaren Grundlagen, noch weitaus weniger Erkenntnisse zur auditiven Wahrnehmung im Speziellen erarbeitet wurden.

Dies ist aus naturwissenschaftlich-technischer Sicht vor allem dadurch erklärbar, dass die Aufzeichnung von Schallereignissen erst ab den 50er Jahren überhaupt möglich war. Im Vergleich mit anderen Messmethoden fällt auf, dass akustische Ereignisse aufgrund ihrer „flüchtigen“ bzw. temporären Charakteristik vergleichsweise spät konservierbar wurden und im Grunde genommen erst mit dem Aufkommen der elektronischen Speicherung und digitalen Signalverarbeitung ein kompletter Zugriff auf die hohe zeitliche und spektrale Dynamik akustischer Ereignisse möglich war.

Aus gestalterischer Sicht sind die Klangkunst bzw. Musik und die damit in Zusammenhang stehenden „Strukturen“, also die Musikinstrumente, zwar tief in der Kulturgeschichte des Menschen verwurzelt, entwickelten sich aber über weite Zeiträume evolutionär. Auch auf dem Gebiet der gestalterischen und physiologischen Wissenschaften finden sich die ersten Arbeiten, welche die intuitiven und tradierten akustischen Gestaltungsmethoden durch naturwissenschaftlich-technische Erkenntnisse verifizieren, um auf dieser Grundlage akustisch zu gestalten und zu optimieren, ebenso ab den 50er Jahren.

Zudem kann sich der Gestalter der Neuzeit aufgrund der fortschreitenden Entmaterialisierung oder Virtualisierung dem Thema der auditiven Gestaltung nicht mehr entziehen. Dies betrifft auch die Prognosen akustischer Eigenschaften und akustischen Verhaltens in virtuellen Simulationen, welche ggf. auch in eine Umsetzung münden. Die Ästhetik als Kernkompetenz muss auf den Hörbereich – im Optimalfall weiterreichend multisensual betrachtet – erweitert werden. Schafer, kanadischer Klangforscher, fasste die Situation bereits in den 60er Jahren folgendermaßen zusammen: „Angesichts der visuellen Dominanz der modernen westlichen Kultur ist es nicht überraschend, dass die Psychologie der auditiven Wahrnehmung ziemlich vernachlässigt wurde. Ein großer Teil der Forschungsarbeiten in diesem Bereich hat sich mit binauralem Hören und der Lokalisation von Lauten befasst, was beides in Zusammenhang mit dem Thema Raum steht. Etliche Untersuchungen haben sich mit der so genannten Maskierung (dem Verdecken eines Lauts durch einen anderen) beschäftigt, einige mit dem Thema der »akustischen Ermüdung« (der Wirkung, die entsteht, wenn man einem lang anhaltenden Laut ausgesetzt ist)...“ [SCHAF10]. Dass diese Aufgabe nur über einen fachübergreifenden Ansatz bewältigt werden kann zeigen die bereits erwähnten jüngeren Arbeiten, von Blutner und Luckner (vgl. [LUCK02]).

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass alle in dieser geschichtlichen Betrachtung aufgeführten Arbeiten auf ein breites Wissensspektrum zurückgreifen und dass sich die federführenden Autoren über ihre Profession hinaus mit weiteren Wissenschaftsgebieten beschäftigten, was bereits eine Lösungsvoraussetzung a priori darstellt. Zu erwähnen ist zudem, dass die vorliegende geschichtliche Betrachtung der Werkstoffakustik keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Vielmehr sollen die zahlreichen Aspekte zur materialbezogenen Akustik hinsichtlich wahrnehmungsbezogener Kriterien, die zur Lösung der hier vorliegenden Arbeit zu Grunde liegen dokumentiert werden.

II.2 Erste Zugänge zu Klang, Harmonie und Material

Lange bevor Ton und Klang in das Bewusstsein des Menschen traten existierten für diesen die Geräusche, also jene Hörempfindungen, die für die generelle Orientierung im Lebensraum, bzw. für die Einschätzung der jeweiligen Situation als Jäger oder potenzielles Opfer essentiell waren.

Auch die Reaktionen bezogen auf Signale des eigenen Körpers, wie organische Geräusche oder zum Beispiel auch Schallereignisse, aufgrund mechanischer Beanspruchung, wie das Klatschen oder Schlagen auf Haut, oder ein Knochenbruch sind seit dieser Zeit grundlegend verankert.

Solche internen oder externen akustische Reize verursachen evolutionär entwickelte unconditionierte oder angeborene Reflexe. Aufgrund der spezifischen Anpassung des Menschen an verschiedene Lebensräume bilden sich auf dieser Basis aufbauend die selbstständig erlernten, also konditionierte Reflexe, welche kontextbezogen sehr verschiedenartig ausgebildet sein können. Die entsprechende Theorie und das durchaus auch kontrovers diskutierte wissenschaftstheoretische Konzept, Verhalten von Menschen und Tieren mit naturwissenschaftlichen Methoden zu untersuchen legte beispielsweise Pavlov mit seinen in den 20er Jahren durchgeführten Konditionierung von Hunden (vgl. [PAV26] bzgl. Hundefütterungsexperiment, Placeboeffekt).

Es sei in diesem Zusammenhang darauf verwiesen, dass bereits auf dieser Ebene kontextuelle Bezüge bei der Bewertung von akustischen Signalen zum Tragen kommen, welche die Auswertung aufgrund einer komplexen Analyse verkomplizieren, oder schlimmstenfalls verfälschen. Die Bewertungsverfahren sind nicht statisch.

An dieser Stelle sei deshalb auf die durchaus unterschiedlichen Ansichten von „Wohlklang“ oder „Harmonie“ und damit Akzeptanz im weitesten Sinne verwiesen, die sich bei den Vertretern dieser geschichtlichen Abhandlung finden lassen. Verschieden Kulturkreise bedingen zum Beispiel auch differenzierte musikalische Entwicklungen – ein Betrachtungswinkel der für diese Arbeit bewusst gewählt wurde, da die Herleitung von material- und wahrnehmungsbezogenen Erkenntnissen oft direkt möglich ist.

Wann genau der Mensch sich erstmals bewusst mit den Geräuschen und Klängen die ihn umgeben und die er selbst generiert beschäftigte, lässt sich heute aus Gründen der beschriebenen Flüchtigkeit des Schalls nicht genau nachweisen. Bis zu dem Zeitpunkt an dem erste Niederschriften mit Hilfe von Zeichen und später unter Anwendung von speziellen Schriften festgehalten werden konnten, wurden diese Erfahrungen und Erkenntnisse verbal weitergegeben.

Dieses Wissen manifestierte sich in ersten steinzeitlichen Klangerzeugern, wie Pfeifen, Flöten und Hörnern die der Homo Sapiens Sapiens vor 45.000 Jahren vorrangig aus Knochen- oder Hornmaterialien fertigte, um potenzielle Jagdbeute anzulocken oder zu große Tiere und Feinde zu vertreiben [HÄU60].

Bald schon verlagerte der Mensch diese vom Pragmatismus getragenen Aktivitäten in den Bereich seines schöpferischen Schaffens, um solche Objekte zu kultivieren und Musikinstrumente zu erschaffen. Die aktive Beeinflussung der akustischen Umgebung ist in allen Kulturen sehr früh mit der Entwicklung von Instrumenten verbunden. Dies implizierte die unbewusste Umsetzung vieler Gesetzmäßigkeiten, wie Materialauswahl und Bauform aber auch die Varianz von Anregungen, wie Blasen, Streichen oder Schlagen, um den Materialklang zu erzeugen.

Das älteste bisher bekannte kulturgeschichtliche Zeugnis dieser Art ist die hier abgebildete Flöte aus einem Geierflügelknochen. Zudem wurde zu diesen Zeiten auch auf Schwirrhölzern, Percussions und Schrapfern musiziert, Instrumente deren Klangerzeugung durch Kratzen, Reiben, Schwingen oder Schlagen bewerkstelligt wurde. Aus Sicht der Arbeit handelt es sich um die gezielte Anregung von Strukturen und im weiteren Sinne um die Spezifik des dabei verwendeten Materials. All diese Instrumente wurden durch dahingehende Erkenntnisse über die Zeit verfeinert.



Abb. II-a: 35 000 Jahre alte Flöte aus einem Geier-Flügelknochen aus der Aurignacien-Kultur (älteste europäische Kultur des Homo sapiens, Fundort Schwäbische Alb)

II.3 Antikes, arabisches und mittelalterliches Wissen (1200 v. Chr. - 14. Jh.)

Im Verlaufe der Zeit nahmen der Umfang an Instrumenten, sowie die Vielfalt der gespielten Rhythmen zu. Aufgrund der Nicht-Archivierbarkeit von Schall und akustischen Ereignissen bildeten sich im Laufe der Zeit – ähnlich der Schriftentwicklung bei den Sprachen – Erzeugungsvorschriften bzw. Notationssysteme heraus, welche die zu wiederholenden Zeit-Frequenz-Informationen relativ kompakt speichern konnten. Die ersten Erkenntnisse und entsprechende Transferwege auf denen sich der gedankliche Austausch vollzog nahmen dabei im Zweistromland und Ägypten ihren Ursprung. Parallel und relativ unabhängig davon entwickelten sich sinngemäß ähnliche Systeme, wie Notenschrift und Musiktheorie im Allgemeinen über den asiatischen Raum, also China und Indien. Ungesicherten Erkenntnissen zufolge gab es wohl bereits im alten Ägypten seit dem 3. Jahrtausend v. Chr. eine Art Notenschrift um Klänge mittels visueller Hilfen weiterzugeben und zu reproduzieren.

Da sich diese Arbeit auch mit geeigneten Analyse- und Beschreibungsverfahren, bzw. der Klangabbildung oder geeigneten Aufzeichnungssystemen auseinandersetzt, sollen an dieser Stelle die Ursprünge und die Entwicklung der Notenschrift und die damit verbundenen relevanten Aspekte dokumentiert und kommentiert werden. Entgegen der heute verwendeten Aufzeichnungssysteme der technischen Akustik, welche die physikalisch-technischen Eigenschaften der Laute mit hoher Auflösung und Genauigkeit abbilden und somit deskriptiv sind, stellt die musikalische Notation eine präskriptive Anleitung zum Erzeugen von Lauten dar [nach SCHAF10]. Dies ist aus heutiger Sicht entfernt mit der Methodik der Mustererkennung vergleichbar.

Das bis dato erste Zeugnis einer vollständigen Notenschrift findet sich auf der Seikilos-Stele einem altgriechischen Grabstein, welcher auf 200 v. Chr. datiert ist.

$\bar{C} \quad \bar{Z} \quad \bar{Z} \quad \underbrace{\text{KIZ}} \quad \bar{I} \quad \bar{K} \quad \dot{I} \quad \dot{K} \quad \bar{O} \quad \bar{C} \quad \bar{O}\bar{\Phi}$
 Ὅ σον ζῆς, φαί νου, μη δέν ὄλ ως σὺ λυ ποῦ·
 $\bar{C} \quad \text{K} \quad \dot{Z} \quad \dot{K} \quad \bar{I} \quad \bar{K} \quad \bar{C} \quad \bar{O}\bar{\Phi} \quad \bar{C} \quad \text{K} \quad \bar{O} \quad \dot{I} \quad \dot{Z} \quad \bar{K} \quad \bar{C} \quad \bar{C} \quad \bar{C} \quad \bar{X} \quad \bar{J}$
 πρὸς ὄλ ἰ γον ἐ σπὶ τὸ ζῆν, τὸ τέ λος ὁ χρόνος ἀπαι τεῖ.

Abb. II-b: Seikilos-Inschrift in altgriechisch

Bereits hier findet sich die von der Schrift entlehnte Konvention, den Fortlauf der Zeit anlog der Schrift von links nach rechts darzustellen. Später flossen als zusätzliche Informationen bezüglich Frequenz, beziehungsweise Tonhöhe vertikal abgetragene Symbole ein (9. Jh. Melodische Floskeln, sog. Neumen; 13. Jh. Mensuralnotation). Hierzu der zeitgemäße Ausdruck der Seikilos-Inschrift, um dies zu verdeutlichen:



Abb. II-c: Seikilos-Inschrift in heutiger Notenschrift

In China findet sich auch hinsichtlich der physikalischen Materialaspekte der Arbeit ein interessanter Fakt: Eine Besonderheit unter den chinesischen Instrumenten bilden die so genannten „Seideninstrumente“.

Diese differenzieren sich neben der Bauart vor allem durch ihre Materialität, da die Saiten entgegen den typischen Werkstoffen wie Darm oder später Metall und Nylon, wie der Name bereits sagt, durch Seide ersetzt wurden und aufgrund des spezifischen E-Moduls des Materials, welches vergleichsweise dehnbar ist, einen individuellen Klangcharakter aufweisen, nicht zuletzt durch die daraus resultierende differenzierte Vorspannung in den Seiden-Saiten. Ein gelungenes Beispiel für gezielte Anwendung von Materialität.

Des Weiteren ist der typische Holzwerkstoff bei der Herstellung von Schlag-, Streich- und Saiteninstrumenten in Asien bis heute der Bambus. Mit seiner spezifischen Dichte ρ von $0,6-0,8 \text{ g/cm}^3$ ist er ein typischer Vertreter der so genannten Leichtbauwerkstoffe. Vorhersehbar aber dennoch für eine nähere Untersuchung reizvoll ist die Tatsache, dass die asiatischen Instrumente anders als abendländische Pendanten klingen.

Diese Materialaspekte spielen bei der Bearbeitung des für die Arbeit gewählten Themas eine tragende Rolle, geht es doch gerade darum, wie sich die individuelle Wahl des Werkstoffs auf die Akzeptanz des Nutzers bei der Bewertung bezogen auf die Gesamtstruktur auswirkt. Neben der eigentlichen Dimensionierung und spezifischen Ausmodellierung eines Gebrauchsgegenstandes oder Objektes bildet die Einflussgröße Werkstoff ein wesentliches Kriterium für die Beurteilung von Haptik, Steifigkeit, Gewicht oder auch Eigenfrequenzverhalten und es gilt eine ungeheure Vielfalt an empirischem Wissen, die zur Qualitätsbeurteilung führt zu berücksichtigen. Vergleicht man weiterführend die chinesische Musik mit der im europäischen Raum, wird schnell klar, dass bedingt durch die soeben beschriebenen differenzierten Ausgangsbedingungen auch vorhandene kulturelle Unterschiede zum Tragen kommen, welche die Empfindungen beim Spielen der Instrumente und beim Hören der gespielten Musik beeinflussen. Wichtig ist demnach die Messungen der Arbeit basierend auf den entsprechenden Ausgangsbedingungen auszuwerten, bzw. den entsprechenden Kontext zu definieren in dem die getroffenen Aussagen ihre Gültigkeit haben. Diese kulturellen, bzw. kontextuellen Differenzierungen werden natürlich dadurch relativiert, dass sich die Kulturen seit jeher in mehr oder weniger großem Ausmaß beeinflusst haben. Aufgrund dieser unscharfen Überdeckungsbereiche erscheint es sinnvoll die kontextuelle Bewertung möglichst nah an die menschliche Physiologie anzulehnen. Um die geschichtlichen Grundlagen der material- und wahrnehmungsbezogenen Akustik bis ins heutige Europa, bzw. zum globalisierten Wissensstand zurückzuverfolgen sollen folgend die relevanten Erkenntnisse antiker griechischer Wissenschaftler erörtert werden, da deren Arbeiten maßgeblichen Einfluss auf die weiteren Forschungen des Hellenismus, der römischen Antike, über den arabischen Raum bis ins heutige Europa hatten.

Diese Ausführungen sollen mit dem griechischen Philosophen Pythagoras von Samos (ca. 570–510 v. Chr.) beginnen. Er entdeckte bei seinen akustischen Untersuchungen am Monochord die logische Verknüpfung zwischen Qualität und Quantität. Dazu benutzte Pythagoras eine Versuchsanordnung in Form eines quaderförmigen, hölzernen Resonanzkörpers über welchen eine einzelne Saite gespannt war. An einer Korpuskante wurde die Saite über eine Rolle umgelenkt und mit einem Gewicht gespannt. Quer zur Saite konnte nun ein beweglicher Steg entlang einer auf der Längsseite aufgetragenen Skala verschoben werden. Pythagoras untersuchte so die Tonhöhe in Abhängigkeit von der Saitenlänge. Ausgehend vom Grundton der ganzen Saite wurde diese

in bestimmten Verhältnissen geteilt, wobei sich die bei diesen Längen erzeugten Töne immer in bestimmten Proportionen zu den geometrischen verhielten. Generell gilt: Teilt der Steg die Saite genau in der Mitte im Verhältnis 1/2, entsprechen die erzeugten Töne dem Frequenzverhältnis 1:2. Man erhält somit die Oktave. Die Teilung im Verhältnis 3/2 erzeugt ebenso das gleiche Frequenzverhältnis und entspricht der Quinte, das Teilungsverhältnis 3/4 der Quarte.

Die Experimente basierten auf dem phänomenologischen Wissen um die mechanischen und akustischen Eigenschaften des Saiten- und Klangkörpermaterials und die strukturelle Auslegung und Dimensionierung dieser, damit Teile schwingen und andere den Klang verstärken. Die formulierten Erkenntnisse zur Harmonie lassen sich ohne weiteres auf materialmodifizierte Experimentieranordnungen übertragen. Bei ähnlichen werkstofflichen Eigenschaften wäre dann auch die Wahrnehmung vergleichbar.

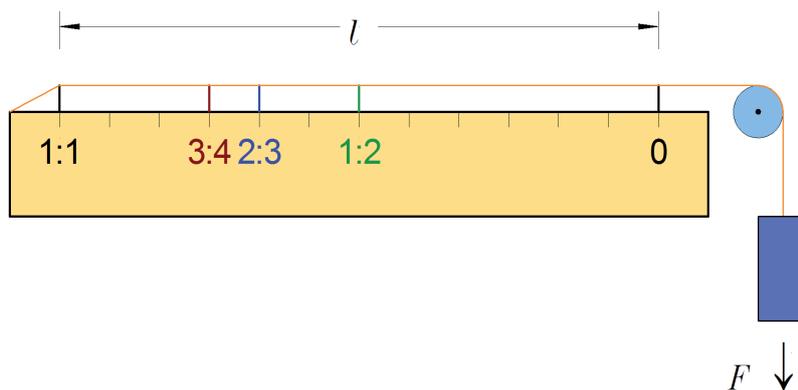


Abb. II-d: Prinzipielle Darstellung des Monochord mit den Teilungen für Oktave, Quinte und Quarte

Ändern sich diese jedoch prägnant würde die Perzeption sicher deutlicher abweichen. Die bewusste Steuerung des Zusammenhangs wurde im weiteren Verlauf des Musikinstrumentenbaus kultiviert und wissenschaftlich untersucht. Auch darauf wird in den weiteren Ausführungen noch genauer eingegangen werden. Die gedankliche Weiterführung dieses Experiments wurde im praktischen Teil dieser Arbeit umgesetzt, indem bei gleichbleibender Struktur und Anregung, bzw. Belastung verschiedene Werkstoffe auf ihr akustisches Verhalten hin untersucht wurden. Auch wenn es dabei um Schädigungsmechanismen und weniger um die klanglichen Eigenschaften geht, gelten – so die These – grundlegende gestalterische Gesetze, deren Anwendung die Wahrnehmung prognostizieren kann.

Inspiziert von diesen Experimenten und mit der sicheren Überzeugung hinter dem sinnlich Wahrnehmbaren, die grundlegende und vom Menschen unabhängige Wahrheit erkannt zu haben, soll Pythagoras diese beispielsweise an den in einer Schmiede harmonisch schlagenden Hämmern verifiziert haben. Durch das Auswiegen der Hämmer soll er festgestellt haben, dass der tiefste Ton vom schwersten Hammer erzeugt wurde und dass bei vier Schmiedehämmern mit den Gewichtsverhältnissen 12:9:8:6 der Grundton und dazu die musikalischen Intervalle Quarte, Quinte und Oktave in diesem Klang der Hämmer auftreten. Weiterführend dazu beschäftigte sich einige Jahrhunderte später in der Renaissance Leonardo da Vinci (1452–1519) mit der Anregung, Dämpfung und Weiterleitung, bzw. Ausbreitung von Schall.

Wie diese lieferten auch andere philosophische, bzw. wissenschaftlichen Ansätze und Arbeiten bemerkenswerte Erkenntnisse zur Akustik, ohne dabei auf Messwerte zurückgreifen zu können. Die phänomenologische Betrachtungsweise weiterer Philosophen, wie beispielsweise Aristoteles oder Platon führten zu einer Reihe von Aussagen hinsichtlich Schallanregung und -geschwindigkeit, Ausbreitungscharakteristik und Echo, auf welche spätere Arbeiten der Renaissance aufbauten.

Auf die Materialaspekte der Arbeit bezogen finden sich beispielsweise Kommentare zur allgemeinen Anregung und Dämpfung verschiedener Materialien. So entstehen laut Aristoteles die Töne, wenn man zwei Dinge aneinander schlägt und so ein Medium in Bewegung versetzt. Er grenzt allerdings noch scharf zwischen Gegenständen, die „Möglichkeit zum Schall“ haben und solchen, die dies nicht vermögen, wie zum Beispiel

Wolle oder Schwamm, ab. Einen spezifischeren Ansatz, der die Dämpfung verschiedener Materialien oder Materialzustände beschreibt, bietet Aristoteles nicht direkt, jedoch fragt er sich dazu: „Warum ist der Chor in einem Theater leiser, wenn die Orchestra mit Stroh ausgelegt ist? Ist es auf die Unebenheit der Oberfläche zurückzuführen, dass die Stimme keinen glatten Boden findet, wenn sie über ihn streicht, und ist sie deshalb weniger gleichmäßig und weniger zusammenhängend, weil sie nicht kontinuierlich ist? ... Warum sind Häuser mit frisch verputzten Wänden nachhallender? Ist es deshalb, weil ihre Glattheit eine größere Möglichkeit für die Brechung bietet? ... man muss jedoch ein Haus nehmen, welches schon trocken ist und nicht eines, welches noch völlig nass ist; für feuchten Lehm gibt es keine Schallbrechung“ [MUZ06]. Gemeint ist hier mit Sicherheit die Schallreflexion.

An anderer Stelle beziehen sich seine Beobachtungen weiterführend zur Schallausbreitung: „Die tiefen Töne fallen aufgrund ihrer größeren Masse schneller zu Boden. Deshalb wirken Klänge, aus der Ferne gehört, höher“ [MUZ06]. Entgegen dieser irreführenden Schlüsse, dass Schallausbreitung also weder frequenzunabhängig noch geradlinig ist, äußert er sich in bemerkenswerter Weise zum logarithmischen Charakter der Sinneswahrnehmungen: „Warum ist das so, wenn eine Person ein Geräusch macht und eine Zahl von Personen machen dasselbe Geräusch gleichzeitig, dass das erzeugte Geräusch nicht gleich ist und es reicht auch nicht entsprechend weiter?“ (vgl. [FVH78]).

Da Schall, nach Aristoteles, wie ein Ball reflektiert wird, folgert er trotz falscher Annahmen richtig, dass dieser eine Ausbreitungsgeschwindigkeit hat, auch wenn er diesen dabei wiederum als etwas von der Luft unabhängiges betrachtet und den Ton als eigenständige Substanz ansieht. Er ordnet dabei den unterschiedlich schallenden Dingen oder Substanzen vom Tastsinn übernommene Ausdrücke wie hoch (scharf) und tief (schwer) zu, wobei hoch dabei subjektiv als schnell, tief als langsam empfunden werden sollen. Er begibt sich mit dieser Art der Klassifizierung bereits auf das Gebiet der wahrnehmungsbezogenen Akustik, und formulierte bereits ähnlich heutiger psychoakustischer Bewertungen.

Auch die bereits erwähnten Aufzeichnungs- oder Notationssysteme für Musik wurden in der Antike durch Euklid von Alexandria (um 365-300 v. Chr.) weiterentwickelt, um frequenzabhängige Effekte besser beschreiben zu können. Er definierte auf Grundlage der Arbeiten des Archytas von Tarent (435-355 v. Chr.) die Grundlagen des heutigen Tonsystems, indem er diese erstmals über die Häufigkeit der Bewegung definierte, also mit den Frequenzen von Schwingungen arbeitete. Baut die Harmonik des Aristoxenos noch auf die rationalen Vielfachen des Tons auf, so ist dieser bei Euklid „weder in zwei noch in mehrere gleiche Teile teilbar“. In seinem Hauptwerk „Sectio canonis“ (Die Teilung des Kanons) führte er beispielsweise auch den Begriff der relativen Tonhöhe ein, was wiederum Aristoteles stark kritisierte, da sich seiner Meinung nach gerade die Tonhöhe nur über die Gehörwahrnehmung beurteilen lässt. Die simple Betrachtung „Zahlen statt Töne“ lässt die Eigentümlichkeit des Musikalischen verschwinden. Akustisches, Musikalisches und Arithmetisches wird nur noch durch Zahlen dargestellt [KÖL10/2].

Claudius Ptolemäus (Klaudios Ptolemaios, um 85-165 n. Chr.) baute in seiner aus drei Büchern bestehende „Harmonica“, auf den Arbeiten zur Gehörwahrnehmung von Aristoxenos und Euklid auf und suchte dort eher unbewusst den Kompromiss zwischen diesen Beiden und den Pythagoreern. Deren Vorgehen bezeichnete Ptolemäus zwar als prinzipiell gehörfreundlich, an anderer Stelle schrieb er jedoch: „Der Gehörsinn muss, zum Zwecke genauer Beurteilungen, um ein rationales Kriterium ergänzt werden. Das ist der harmonische Kanon“. Obwohl er prinzipiell wahrnehmungsbezogen argumentierte, beurteilte er die Tonhöhen quantitativ, wie die Pythagoreer (vgl. [DÜR87]).

Später führte der Benediktiner Odo von Cluny (878-942) in seinem „Dialogus de musica“ für die Namen der Töne des diatonischen Tonsystems von Euklid, welches er über Boethius kannte, die heute gebräuchlichen Tonbuchstaben ein. Diese und andere Tonbezeichnungen, die der Schrift entlehnt sind zeigen bei eingehender Beschäftigung die vielfältigen Möglichkeiten Signale über die Abwandlung gebräuchlicher Aufzeichnungsmethoden zu definieren. Dem Laien allerdings erschließt sich das was diese Systeme konservieren und formulieren nur schwer. Die intuitive Anwendung ist deswegen ein wichtiges Kriterium, nach welchem das zu erarbeitende Notationssystem der Arbeit entwickelt werden sollte.

Oktavbezeichnung	Index-Schreibweise	Apostroph-Schreibweise	Strich-Schreibweise	wissenschaftliche Schreibweise	EDV-gerechte Schreibweise
Subsubkontra-Oktave	C ₃ oder ₃ C	„,C oder CCCC	⏟	C ₋₁	C-1
Subkontra-Oktave	C ₂ oder ₂ C	„,C oder CCC	⏟	C ₀	C0
Kontra-Oktave	C ₁ oder ₁ C	„,C oder CC	⏟	C ₁	C1
Große Oktave	C	C	c	C ₂	C2
Kleine Oktave	c ⁰ oder c	c	c	C ₃	C3
Eingestrichene Oktave	c ¹	c'	c̄	C ₄	C4
Zweigestrichene Oktave	c ²	c''	c̄	C ₅	C5
Dreigestrichene Oktave	c ³	c'''	c̄	C ₆	C6
Viergestrichene Oktave	c ⁴	c''''	c̄	C ₇	C7
Fünfgestrichene Oktave	c ⁵	c'''''	c̄	C ₈	C8
Sechsgestrichene Oktave	c ⁶	c''''''	c̄	C ₉	C9

Abb. II-e: Die Oktaven des gesamten menschliche Hörbereichs (in der Subsubkontraoktave Beginn des Infraschallbereichs, siebengestrichene Oktave Beginn des Ultraschallbereichs)

Betrachte man das Ziel der Arbeit die Akzeptanz von Materialien zu untersetzen so ergibt sich der Ansatz bei den weiterführenden Betrachtungen zu den Strukturen über Visualisierungsmethoden nachzudenken, die auch unerfahrenen Nutzern einen Eindruck der akustischen Qualität geben könnte. Vorstellbar wäre eine neue Art der Visualisierung des Klangspektrums von Maschinen oder allgemein Gebrauchsgütern. Darüber ließen sich dann eventuell auch verschiedene Materialitäten bei gleicher oder ähnlicher Struktur differenzieren.

An dieser Stelle sollen die Ausführungen zu den antiken griechischen Wissenschaftlern ohne Anspruch auf vollständige Aufführung aller für diese Arbeit relevanten Persönlichkeiten enden. Die nun folgenden Vertreter der römischen, arabischen und mittelalterlichen Wissenschaftskreise bewahrten die griechischen Erkenntnisse hinsichtlich der Material- und Werkstoffakustik, bauten darauf auf, konkretisierten, relativierten oder korrigierten diese.

Wie verbindet man Zahlenverhältnisse mit den menschlichen Sinnen? Was passiert augenscheinlich, wenn wir mit Materialität in Berührung kommen und was liegt unseren Reaktionen und Kategorisierungen zu Grunde und ist invers auf kontextuell gleichwertige Konstellationen anwendbar, um allgemeine oder relative Vorhersagen treffen zu können? Um diese Fragen zu bearbeiten werden im Folgenden die Inhalte der oben aufgeführten wissenschaftlichen Kreise genauer betrachtet, um dazu notwendige Grundlagen weiter zu untersetzen.

Neben den Griechen steuerten auch die römischen Philosophen und Wissenschaftler Arbeiten und Erkenntnisse zur Akustik bei, welche die folgenden Generationen beeinflussen sollten. Mit Sicht auf diese Arbeit ist vor allem Vitruv zu erwähnen auf welchen sich später beispielsweise da Vinci bezog.

Im neunten und zehnten Buch der „De architectura libri decem“ des Marcus Vitruvius Pollio gen. Vitruv (ca. 80-10 v. Chr.) finden sich beispielsweise interessante Aspekte zum Umgang mit den noch stark begrenzten Möglichkeiten der Zeitmessung durch Sonnenuhren (vgl. [VIT09]). Ähnlich wie in astronomischer Dimension die Messung der Lichtgeschwindigkeit auch mit primitiven Zeitmesswerkzeugen vorgenommen werden konnte, versuchte man den zeitlichen Charakter der Schallausbreitung mit Zahlen zu belegen. Skalierung und Genauigkeit dieses Instruments sind zwar noch untauglich für die Messung des zeitlichen Verlaufs der Schallausbreitung, jedoch wurde die Notwendigkeit der Zeitmessung erkannt.

Bedenkt man, dass Uhren bis zur Zeit des Hellenismus ein Eliteinstrument einiger weniger Wissenschaftler waren, wird mit dem später folgenden Übergang der Uhr zum Alltagsgegenstand des Normalbürgers eine wichtige Grundvoraussetzung für die Stichhaltigkeit der kommenden wissenschaftlichen Arbeiten geschaffen.

Allgemein finden sich zur Akustik unter anderem der Vergleich der Schallausbreitung mit den Wellen auf einer Wasseroberfläche, Abschnitte zu Reflexions- und Echoerscheinungen und natürlich zur Harmonielehre.

In der Abhandlung „Das Theater und dessen gesunde Anlage“ bezieht sich Vitruv auf die Schallausbreitung im Theater, speziell auf die Wirkung von unter den Sitzreihen eingemauerten Tonvasen, welche nach heutigem Erkenntnisstand als sog. Helmholtz-Resonatoren wirken: „Die ehernen Gefäße in den Theatern, welche die Griechen Echeia (Resonanzen) nennen, die man in den Kammern unter den Sitzreihen in mathematischer Berechnung nach den Tonabständen aufstellt, werden nach musikalischen Akkorden, der Zusammenstimmungen geordnet, indem man die Quart, Quint und Doppeloktave im Umkreise verteilt, damit der Schall von der Bühne, sobald er der Verteilung der Gefäße entsprechend an dieselben anschlägt, durch Verstärkung vermehrt deutlicher und angenehmer zu den Ohren der Zuschauer gelange“ [KÖL10].

Zur realistischen Einschätzung einer solchen Wirkungsweise sei hier angemerkt, dass die Resonatoren in der Art eines Kammfilters im Bereich tiefer Töne Schall absorbieren und damit die Hörbarkeit höherer Frequenzen, insbesondere die Verständlichkeit von Sprechstimmen, verbessern. Überdies erzeugen die Vasen des Vitruv ein wenig Nachhall, was die sehr trockene Akustik der offenen Theater merklich verbessert (siehe dazu Declerq/Dekeyser im Journal of the Acoustical Society of America 2007).

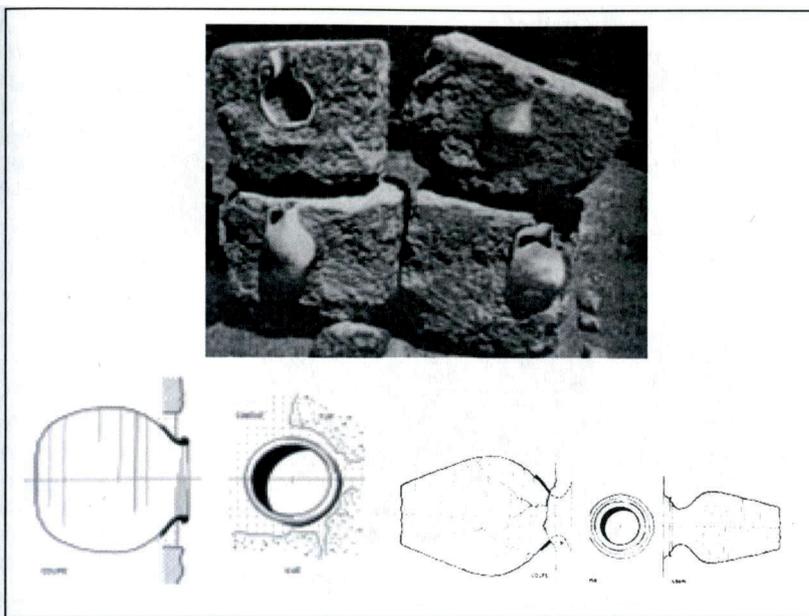


Abb. II-f: in Kirchenwänden verbaute akustische Vasen (11.-16. Jh.) - (aus [KÖL10])

Hinsichtlich dieser Arbeit zeigt dieser Zusammenhang zwischen Konstruktion und Akustik beispielhaft die Ausbaufähigkeit der Betrachtungen des materialbezogenen Zugangs. Weiterführende Untersuchungen, inwiefern sich materielle und strukturelle Einflussgrößen qualitativ und quantitativ beeinflussen wären sinnvoll, da schließlich jedes Material, bzw. Werkstoff an eine Struktur gebunden ist – inwiefern würde sich z. B. die Verwendung hölzerner Resonatoren auf den Gesamteindruck auswirken.

Aus der antiken römischen Gesellschaft sind neben den wissenschaftlichen Erkenntnissen dieser Zeit auch erste gesellschaftliche Regelungen hinsichtlich der akustische Ökologie – quasi ein Vorläufermodell des heutigen Soundscape Designs – dokumentiert. Julius Caesar erließ mit seinem Senatus Consultum von 44 v. Chr. die erste Lärmschutzverordnung: „Von jetzt an sind in der Zeit von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang keine Fahrzeuge mit Rädern innerhalb der Stadtgrenzen zugelassen ... Alle, die während der Nacht in die Stadt gekommen sind und sich bis Sonnenaufgang immer noch darin aufhalten, müssen anhalten und bis zur angegebenen Stunde unbesetzt stehen bleiben“ [PIER99].

Diese Thematik zieht sich wie ein roter Faden bis in unsere heutige industrialisierte Gesellschaft, in der es neben Vermeidung von Lärm zwangsläufig auch um Lärmverminderung, oder neben der quantitativen Betrachtung,

auch um die aktiv/qualitative Gestaltung von Geräuschen und Klängen geht. Beispielsweise wurde der o. g. Begriff der akustischen Ökologie, auf den später noch näher eingegangen wird – seit den 60er Jahren geprägt und untersetzt. Bis heute wird die Akustik dabei meist im Nachgang behandelt. Fehlten Caesar vielleicht noch die werkstofflichen Möglichkeiten den Lärm der durch die Verwendung von Holz und Stein für Rad und Straße zu verringern, bieten sich heute eine Vielzahl von Werkstoffen, um die Emissionen nicht bloß zu verringern, sondern gezielt zu beeinflussen.

Der Zusammenhang zwischen Anregung und Ausbreitung von Schall findet sich in klarerer Form in den Arbeiten des Isidor von Sevilla (um 570-636 n. Chr.). Er verfasste die Enzyklopädie „*Etymologiarum sive originum libri*“. In den Abschnitten zur Akustik verzeichnete er Ausführungen zum Donner: „Mit dem Donner wird aber gleichzeitig ein Blitz herausgedrückt. Jener aber kommt schneller, weil er leuchtend ist. Dieser aber kommt langsamer zu den Ohren. Das Licht aber, welches vor dem Donner erscheint, wird Wetterleuchten genannt. Dieses wird, wie wir gesagt haben, vorher gesehen, weil es ein leuchtendes Licht ist. Der Donner aber gelangt langsamer zu den Ohren.“

Zwar ist die Begründung der Beobachtung fraglich, so beschreibt Isidor damit doch die Unterschiede der Schallausbreitungsgeschwindigkeit in verschiedenen Medien. Dies ist aber werkstoffakustisch wiederum eine wesentliche Einflussgröße zum Verständnis der damit im Zusammenhang stehenden Klangcharakteristik verschiedener Materialien und Werkstoffe.

Wurden im Mittelalter tatsächlich überraschende Erfindungen gemacht, zu denen unter anderem die Räderuhr, Brillen und der Buchdruck zählen, so finden sich kaum weitere Belege akustischer Arbeiten, sieht man von den bereits bei Vitruv beschriebenen Akustischen Vasen, bzw. Resonatoren der mittelalterlichen Sakralbauten (siehe Abb. II-i) ab.

Betrachtet man die Ursachen dafür etwas differenzierter, als die Epoche als finsternes Kapitel aus Sicht der akustischen Wissenschaft abzutun, muss man konstatieren, dass wohl viele Schriften durch Verfall aber auch systematische Vernichtung im Zuge unterschiedlichster Glaubenskriege, Machtwechsel u. Ä. verloren gingen. Erst durch den bereits erwähnten Buchdruck begannen sich die bis dato handschriftlichen Bestände der Bibliotheken wieder zu füllen, wodurch sich die Verbreitung von Wissen in einer Größenordnung potenzierte, die aus heutiger Sicht wohl mit der Einführung des Internets vergleichbar ist. Wie bereits erwähnt ist es den arabischen Gelehrten zu verdanken, dass die wissenschaftlichen Arbeiten der Griechen durch deren Übersetzungen und Kommentierungen indirekt erhalten wurden. Die für diese Arbeit relevanten sollen im Folgenden erwähnt werden.

Abu Nasr Muhammad al-Farabi (um 870-950 n. Chr.) schrieb Abhandlungen zur musikalischen Akustik welche neben generellen physikalischen Inhalten auch Aspekte der Psychoakustik behandeln. Diese verarbeitete er in der von ihm entwickelten Maqam-Musiktherapie. Bei dieser sollen beim Patienten durch Musik Heilungsprozesse aktiviert werden. Al Farabi differenzierte dabei, entgegen der generellen Entspannung durch Klänge, das Hören verschiedener Tonarten welche bestimmten Organen bzw. Körperteilen zugeordnet werden.

Ohne Wertung der therapeutischen Wirkung dieser und anderer Klangtherapien, wie zum Beispiel der tibetani-schen Klangschalenmassage sei hier bemerkt, dass viele dieser Ansätze über die rein akustischen Effekte hinaus auch gerade im niederfrequenten Bereich durch die Vibrationen, die sie hervorrufen auf den Körper einwirken. Bis heute ist z. B. das einfache und vertraute Katzenschnurren, was akustisch betrachtet relativ simpel analysiert bei ungefähr 25 Hertz liegt, therapeutisch kaum untersetzt. Jedoch würden die Meisten bestätigen, dass diese „Vibrationsmassage“ durchaus etwas hypnotisches hat.

Gerade der Übergang zwischen rein akustischen und vibroakustischen Signalen bietet hinsichtlich der Akzeptanzuntersuchungen dieser Arbeit vielfältige Ansätze. Zusammenhänge zwischen taktilen und auditiven Wahrnehmungsmechanismen werden heute beispielsweise an der TU Dresden am Lehrstuhl für Kommunikationsakustik untersucht (siehe [ALT13]).

Erstmalig wurden zur Zeit al-Farabis die Versuche einer Kategorisierung von Geräuschen, bzw. Klängen durch den Geheimbund Ihwan as-Safa (Gesellschaft der Lauteren Brüder) dokumentiert. Der Bund strukturiert nach

dem Kriterium der Schallerzeugung, was bei der Auseinandersetzung mit der Akzeptanz von Klängen die generelle Frage nach den Bewertungsmaßstäben aufwirft. Vordergründig bieten dort die psychoakustischen Parameter einen sinnvollen Ansatz mit Hilfe derer die Körperschallphänomene im taktilen Bereich und die Effekte im Schallemissionsbereich im weitesten Sinne beschrieben werden können.

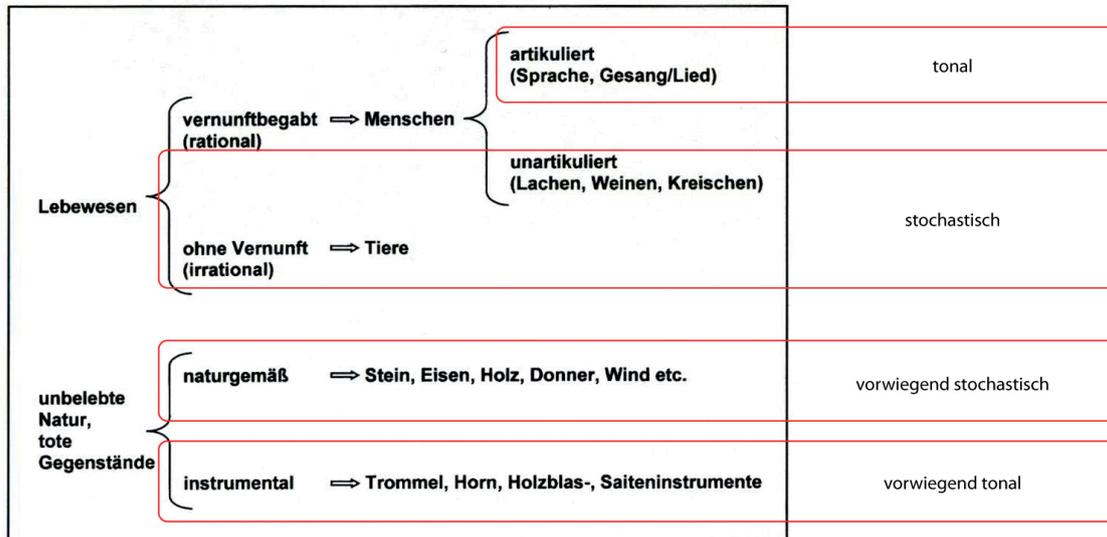


Abb. II-g: Übersicht über die Schallerzeugung nach Ibrwan al-Safa und neuzeitliche Interpretation des Autors hinsichtlich Zufall und Determination bei der Schallerzeugung

Etwa 200 Jahre später beschäftigte sich Ibn Sina (Avicenna) (980-1037) weiterführend mit den bereits bekannten pythagoreischen Intervallen, indem er weitere Konsonanzen, also Wohl- oder Zusammenklänge suchte. Dabei machte er die Entdeckung, dass bei kleineren Intervallen beide Töne nahezu ähnlich in der Tonhöhe sind und das Ohr diese nicht mehr unterscheiden kann (nach F. V. Hunt aus [KÖL10/2]).

Ein wichtige psychoakustische Beschreibungsweise zur differentiellen Wahrnehmbarkeitsschwelle – also den eben noch sinnlich wahrnehmbaren Reizunterschieden, führten sinngemäß folgend im 19. Jahrhundert Weber und Fechner ein. Beide gelten als Begründer der Psychophysik. Das Weber-Fechner-Gesetz als allgemein anwendbaren Zusammenhang zur Ermittlung der Wahrnehmungsbeginn von qualitativen und zur Erkennungsgrenze von quantitativ/ qualitativen Unterschieden.

Nun folgend sollen die Bezüge und Weiterentwicklungen der verschiedenen Wissenschaftsfelder in der Zeit der Neuorientierung und Wiederentdeckung des antiken griechischen Wissens beschrieben werden.

II.4 Von der Renaissance bis in das vorindustrielle Zeitalter

Wie soeben geschildert gab es auch im Mittelalter Arbeiten unter Bezugnahme auf griechisches Wissen, jedoch verdichteten sich die Fülle an Erfindungen und Forschungen im Europa des 15. und 16. Jh. erheblich. Die werkstoff- und materialakustisch relevanten und für die Arbeit hilfreichen Persönlichkeiten und Sachverhalte, die sich mit Werkstoffentwicklung, -prüfung und klang auseinandersetzen, sollen in diesem Kapitel geschildert werden.

Einer der bedeutendsten europäischen Universalgelehrten dieser Epoche war der bereits erwähnte Leonardo da Vinci (1452-1519). In jener Zeit der Wiederbelebung antiker griechischer und römischer Kultur formulierte der Italiener umfangreiche Arbeiten mit naturwissenschaftlichem und auch akustischem Inhalt.

Unter Kenntnis der griechischen Arbeiten finden sich in da Vincis Notizen verschiedene Zitate zum Widerhall bzw. zum Echo, zur Schallbrechung und zur Entfernungsmessung des Schalls. Interessant hinsichtlich des Themas dieser Arbeit sind beispielsweise seine Notizen zur Dämpfung: „Warum der Gegenstand, der nicht aufgehängt ist, nicht tönt und warum der Ton ihm, wenn er aufgehängt ist, schon durch die leiseste Berührung genommen wird: Die angeschlagene Glocke beginnt plötzlich zu zittern, und dieses plötzliche Zittern erschüttert sofort die Luft ringsum, die nun sofort zu tönen beginnt. Wenn sie durch eine leise Berührung angehalten wird, beginnt sie nicht zu zittern und erschüttert daher nicht die Luft, so dass diese auch nicht zu tönen beginnt.“ Da Vinci wiederholt damit die antiken Erkenntnisse zur Anregung, Dämpfung und Weiterleitung, bzw. Ausbreitung von Schall. Er fragt sich diesbezüglich weiter, „Ob der Klang im Hammer oder im Amboss ist“ [VI-TR].

Bemerkenswert ist sein Vergleich mit einem optisch ähnlichen Effekt: „Und das Auge behält die Bilder der leuchtenden Körper doch auch eine Weile in sich“ [VI-TR]. In der heutigen Wahrnehmungsphysiologie wird der Effekt des „kurzzeitigen Einbrennens“ positiver oder negativer Nachbilder auf die Netzhaut als entoptischen Eindruck bezeichnet. Sie entstehen auf Grund der „Ermüdung“ der Fotorezeptoren der Netzhaut in Folge des endlichen Chemismus in den Sinnesorganen. In der Akustik reagieren Individuen, welche wiederholt einem Reiz ausgesetzt sind, der sich als unbedeutend erweist mit immer schwächer werdenden Reizreaktionen. Der Vorgang wird als Habituation bezeichnet und unterscheidet sich vom optischen Effekt vor allem dadurch, dass die Reizschwelle wesentlich geringer und der zeitliche Verlauf länger ist. Er kann beispielsweise nicht durch das Weber-Fechner Gesetz beschrieben werden.

Festzuhalten wäre Da Vincis interessanter Ansatz die adaptiven Reaktionen verschiedener Sinnesorgane gesamtheitlich zu betrachten, um die generellen Mechanismen der Anpassungsfähigkeit zu begreifen.

Zur Weiterleitung von Schall in Flüssigkeiten und Festkörpern sei kurz folgende Passage zitiert: „Wenn du dein Schiff halten lässt und die Spitze eines langen Blasrohrs ins Wasser tauchst und das andre Ende an dein Ohr hältst, dann wirst du die sehr weit von dir entfernten Schiffe hören. Du solltest das auch erproben, indem du die Spitze des Blasrohrs auf den Boden setzt, denn da wirst du hören, wer in der Ferne an dir vorbeigeht“ [VI-IF]. Da Vinci geht nicht auf die verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten, oder die Dämpfung der verschiedenen Medien ein. Vielmehr erkennt er bei seinen akustischen Beobachtungen den logarithmischen Charakter des Schalls, bzw. des Schallpegels: „Von der Stimme. Ob viele schwache Stimmen zusammen ebenso viel Lärm machen werden wie eine starke? Ich sage nein; denn wenn du zehntausend Fliegenstimmen alle zusammenbringen würdest, so wären sie nicht so weit zu hören Wie die Stimme eines Menschen. Und würdest du eine solche Menschenstimme in zehntausend Teile zerlegen, so wäre keiner dieser Teile an Stärke gleich einer Fliegenstimme“ [VI-IF]. In der Grundaussage erkennt Da Vinci, dass der Schalldruckpegel mehrere Größenordnungen überstreicht und dementsprechend schwer fassbar erscheint, zumal er die psychoakustische Größe – die wahrgenommene Empfindung – betrachtet. Rückschlüsse zwischen der physikalischen und psychoakustischen Größe sind auch heute nur eingeschränkt möglich. Zwicker und Feldtkeller stellten in diesem Zusammenhang fest, dass „das Gehör mit wachsendem Schalldruck immer empfindlicher gegen Amplitudenänderungen von Sinustönen wird. Bei einem niedrigen Pegel von 20 dB liegt der eben wahrnehmbare Modulationsgrad bei einem Wert von etwa 10%. Bei einem Pegel von 100 dB erreicht er etwa den Wert von 1%“ [Z+F67].

An dieser Stelle sei neben Da Vinci auch auf Marin Mersenne (1588-1648) verwiesen, der sich, aufbauend auf die griechischen Arbeiten, mit weiterführenden Untersuchungen zur Messung der Schallgeschwindigkeit befasste. Neben der Echomethode benutzte er unter anderem ein Sekundenpendel um den zeitlichen Unterschied zwischen der Sichtung des Mündungsblitzes einer Kanone und dem zeitversetzten Eintreffen des Donners zu messen. Diese Methode zur Zeitmessung vermittelte er unter anderem Christiaan Huygens, welcher auf dieser Basis die ersten Pendeluhren konstruierte, welche die Zeitmessung und damit einen wesentlichen Baustein der Akustik verbessern sollte. An dieser Stelle lässt sich die Interaktion von Möglichkeiten zur Zeitmessung nach damaligem Wissensstand gut erkennen.

In seinem Hauptwerk, der „Harmonie universelle“ befasste sich Mersenne mit der mathematisch-physikalischen Seite der Musik. Er stellte dort Überlegungen zu den musikalischen Stimmungsprinzipien und zur Anwendung der akustischen Skalierung bei Saiteninstrumenten an und experimentierte dazu mit dem Monochord, welches wie bereits beschrieben auch werkstoffbezogen interpretiert werden kann. Wie bereits Galilei erkannte er, dass die Tonhöhe der Saite, durch ihre Schwingungszahl je Zeit bestimmt ist und führte mit der Frequenz ein absolutes Maß ein, welches sich dadurch von den bis dahin gängigen relativen Frequenzverhältnissen der Pythagoreer unterschied (vgl. [LUD35]).

Für seine Arbeiten zu musikalischen Stimmungsprinzipien, wählte Mersenne eine eher unkonventionelle Art der Notation, indem er diese auf seine sog. „harmonische Hand“ übertrug. „Urmodell“ dieses Handsystems war höchstwahrscheinlich die in der mittelalterlichen Musik verbreitete Guidonische Hand – ein Hilfsmittel zur Orientierung im Tonsystem, welches als Anschauungsobjekt und Gedächtnisstütze diente und auf Guido von Arezzo (992-1050) zurückging.

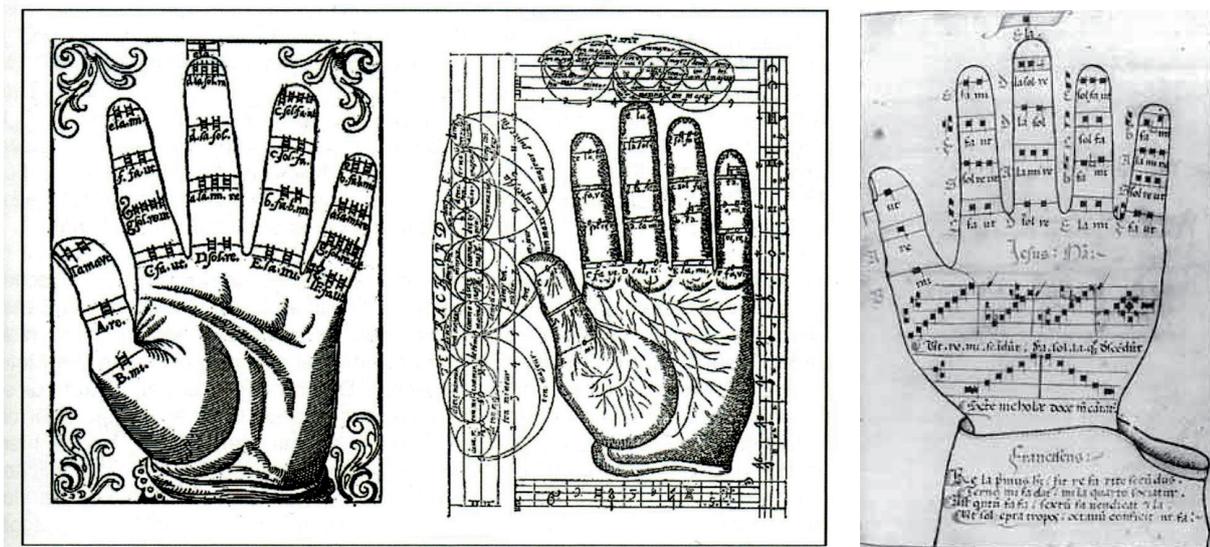


Abb. II-b: (links - Mitte) Die „harmonische Hand“ zur Darstellung von Stimmungsprinzipien

Abb. II-i: (rechts) ähnliche „Guidonische Hand“ aus dem 15. Jahrhundert

Hinsichtlich intuitiver Notationen, wie sie auch für die klangliche Differenzierung von Materialien in dieser Arbeit angestrebt werden, sind solche Beispiele eine Bereicherung, stellen sie doch neben ihrer Eingängigkeit, wenn auch indirekt, einen Bezug zum Menschen bzw. zur Akustik her.

Ähnliche Ansätze zur Strukturierung bzw. Visualisierung harmonischer Zusammenhänge finden sich beispielsweise in der Abhandlung „Harmonice Mundi“ von Johannes Kepler oder im Zusammenhang verschiedener Arbeiten auch bei neuzeitlichen Akustikern wie Schaffer oder auch Blutner.

Hinsichtlich der für die Arbeit interessanten materiellen Bezüge äußert sich Mersenne zur Abhängigkeit der Frequenz von der Materialdichte von Saiten ähnlich Galilei: „Die Tiefe der Töne ist umso größer, je weniger spröde die Körper sind, von denen sie kommen und je besser ihre Teile verbunden, und je besser sie miteinander vereinigt sind. Die Dichte und die Dünne der Körper ist, so scheint es, der Grund dafür, dass die von ihnen erzeugten Töne unterschiedlich in ihrer Tiefe und Höhe sind ...“ (aus Harmonie Universelle in [KÖL10]).

Er formulierte darüber hinaus im 4. Mersenne-Gesetz: „Die Schwingungszahlen von Saiten aus unterschiedlichen Materialien verhalten sich umgekehrt proportional zu den Quadratwurzeln ihrer Dichten.“ Weiterführende Untersuchungen zum Schwingungsverhalten anderer Körper und der Differenzierung von Longitudinal- und Transversalwellen, speziell zur Plattenstruktur sollte später Chladni durchführen.

Im weiteren Zusammenhang schreibt Mersenne zur Entstehung von Missklang, beziehungsweise zu als unharmonisch interpretierten Geräuschen: „Es scheint, dass alle diese Qualitäten, die die Töne unangenehm machen, nichts anderes sind als die Unförmigkeit der Bewegung der Luft, wobei der Ton süß ist, wenn sie sich gleichförmig bewegt, und roh, rau und bitter, wenn sie sich zur gleichen Zeit auf zwei oder mehrere Arten bewegt; was man beweisen kann durch den Ton zweier oder mehr Flöten oder Orgelpfeifen, die ein wenig vom Einklang abweichen, denn ihre Töne einzeln genommen sind süß und angenehm, aber rau und unangenehm, wenn man sie zusammenbringt, weil ihre Bewegungen das Ohr gleichzeitig verschieden schlagen und es von einer Seite zur andern ziehen“ [MER 1627]. Er formuliert damit jene Messgröße, die später in der Psychoakustik als Rauheit eingeführt wird. Er notiert dazu weiter an anderer Stelle des selben Werkes: „Was die Rauigkeit und Bitterkeit der Töne betrifft, kommt sie von der Unregelmäßigkeit der Oberfläche der Körper, die die Luft schlagen und zerteilen, wie es beim Geräusch geschieht, das man beim Feilen von Eisen oder irgendwelchem andern Metall macht: denn die Feile bricht die Luft in ebenso viele Teile, wie sie Körner und Ausbuchtungen hat; und sobald die zerteilte und gebrochene Luft die Gehörnerven schlägt, prägt sie ihnen ihre Bewegung auf, welche ihnen ziemliches Missvergnügen bereitet wie die bitteren Geschmäcke der Zunge und wie die rauen, rohen und schlecht polierten Oberflächen dem Tastsinn.“ Beschrieben hat Mersenne hier offensichtlich die Schwebungen zweier Töne (aus Harmonie universelle in [KÖL10]).

Aufgrund zur damaligen Zeit fehlender Messgrößen benutzte Mersenne – wie in den Zitaten ersichtlich – eine Reihe klangcharakterisierender Umschreibungen. Muzzolini [MUZ06] hat diese gemäß den Abhandlungen Mersennes strukturiert. Diese Charakteristika widerspiegeln den Versuch rein physikalische Parameter wie Pegel, Frequenz, Bandbreite, Dauer oder Modulationsgrad auf gehörgerechte Parameter abzubilden – die Grundintention, die auch der später begründeten Psychoakustik zugrunde liegt. Es sei erwähnt, dass die Psychoakustik lange Zeit eine Widerspiegelung der historischen Entwicklung ohne Kenngrößen war. Bis heute sind einige Parameter, wie z. B. die Rauheit immer noch schwer beschreibbar.

<u>Dimension</u> (mit Bezug auf quantifizierbare Eigenschaften von Objekten, physikalisch deutbar, objektiv):			
spitz, hoch, schrill	tief, leise	korpulent	hohl
schlank, hell	stark, dicht	stark	dicht, reichhaltig
breit	massiv	dünn, winzig	voll
tief	gefüllt	durchdringend	
<u>Accidens</u> [auch Akzidens, hier: qualitative, klangcharakterisierende Eigenschaft mit Bezug auf die menschlichen Sinne]			
bitter	rau	hell	unangenehm
süß	schmetternd	gedämpft	roh

Abb. II-j: Übersicht der Klangeigenschaften von Mersenne (nach [MUZ06])

Auch Athanasius Kircher (1602-1680) beschäftigte sich in seinen Werken „Musurgia Universalis“ (1650) und „Phonurgia Nova“ (1673, im deutschsprachigen Raum unter dem Titel „Neue Hall- und Thon-Kunst“ verlegt) mit akustisch relevanten Themen.

Am Beispiel der seit ca. 1000 v. Chr. bekannten Äolsharfe beschäftigt sich Kircher theoretisch mit der Anregungsproblematik von Materialien: „Wann man eine Darm-Seitten aufspannet, und ... gegen den Wind stellet, so wird man finden, dass die Seitt alsobalden lauten wird, und zwar nicht in dem gebührenden Thon und Stimm, wie sie angezogen und gestimmt ist, sondern gantz anderst, und wird man bald eine terz, bald eine quint, bald eine gedritte quint ... , meistentheil terz, quart und sext hören; ... Ich setze derowegen ... , dass der Wind nicht immerzu mit gleicher Gewalt die Seitten bestreiche, sondern gleichsam mit verschiedenen Strahlen, bald diesen, bald einen anderen Theil, bald mit stärckerm bald schwächerm Gewalt, bewege, und derowegen solch ungleiche Bewegung der Luft und deß Windes die gewisse Ursach solch ungleichen Thons und Stimm seye, ...“ (vgl. [KÖL10]).

Ein Thema von Relevanz, auch für diese Arbeit, da Materialien und Strukturen infolge dieser Anregungsunterschiede bzw. Nutzungsarten, beispielsweise zwischen Impulsanregung oder tribologisch-akustischen Effekten, auch entsprechend anders klingen, beziehungsweise eine differenzierte Systemantwort geben. In der „Musurgia Universalis“ finden sich darüber hinaus Bezüge zum vitruvianischen Menschen, der heute meist in Da Vincis Form zitiert wird. Auch die Guidonische Hand wird erwähnt (vgl. [BIB12]).

Der Chronologie folgend sollen noch Christiaan Huygens und Joseph Sauveur erwähnt werden. Huygens (1629 - 1695) - niederländischer Astronom, Mathematiker und Physiker – beschäftigte sich neben interessanten Fragestellungen zur Theorie des Würfelspiels mit der Wellentheorie des Lichts, was bezogen auf Ersteres die Begründung der Wahrscheinlichkeitsrechnung zur Folge hatte und in Bezug auf Letzteres weit reichende Fortschritte in den Bereichen Optik und Astronomie aber auch der Akustik nach sich zog.

Mit seinen optischen Arbeiten, welche Beugung und Brechung von Licht erklärten, zielte Huygens hauptsächlich auf die Weiterentwicklung des Teleskops. Nachdem Galilei vor ihm beispielsweise noch die Ohren des Saturns beschrieben hatte, konnte Huygens aufgrund der verbesserten Auflösung seiner Geräte die Saturnringe erkennen. Mit seiner Wellentheorie konnte Huygens darüber hinaus aber ebenso die Wellenausbreitung von Schallwellen erklären. Auch das Verständnis von der sich ändernden Ausbreitungsgeschwindigkeit und Ausbreitungsrichtung einer Welle in unterschiedlichen Medien, die Brechung derselben an einem Medienübergang und die Beugung am Rand eines Hindernisses lassen sich seitdem erklären.

Das Huygensche Prinzip besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer neuen Welle, der so genannten Elementarwelle angesehen werden kann. Das Prinzip ist immer noch Grundlage vieler Betrachtungen und Modellierungen. „Heute lassen sich auf Basis dieses Wissens beispielsweise bei der Wellenfeldsynthese natürliche Wellenfronten aus Elementarwellen synthetisieren, um Originalschallfelder zu rekonstruieren“ [SW12]. Ein Beispiel aktiver akustischer Gestaltung.

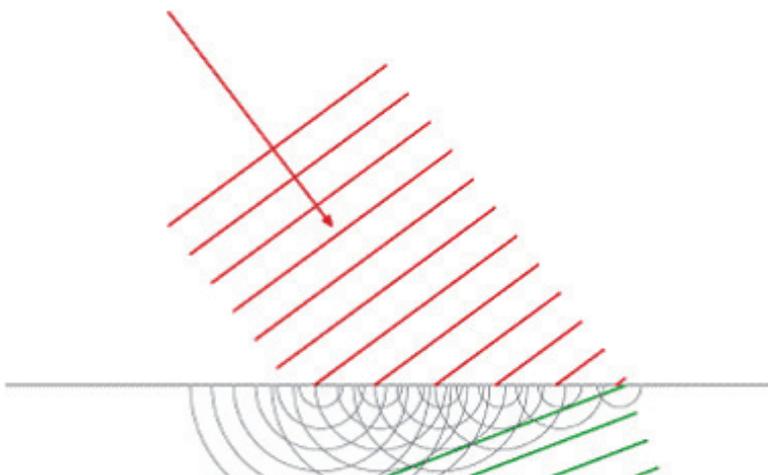


Abb. II-k: Brechung einer ebenen Wellenfront nach dem Huygensschen Prinzip

Darüber hinaus nutzen einige Methoden der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eben diese Effekte aus, um beispielsweise von Materialfehlern ausgehende Signale zu empfangen und auszuwerten. Neben Verfahren wie Klang- oder Ultraschallprüfung haben sich bis heute eine Vielzahl spezieller Prüfmethoden wie zum Beispiel die Schallemissionsprüfung entwickelt. Im Zuge der Verfeinerung dieser Methoden mittels bildgebender Verfahren ist es dadurch heute möglich die Verläufe akustischer Wellen zu visualisieren.

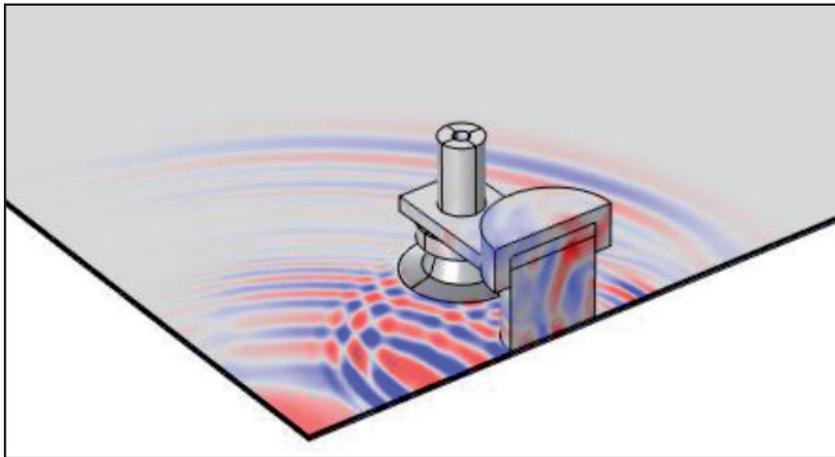


Abb. II-s: beispielhafte Schallfeldsimulation eines Schallemissionssensors auf einer zu prüfenden Platte nach Sause (vgl. ff. auch Chladni)

Joseph Sauveur (1653-1716) gilt durch seine Abhandlung „Principes d’acoustique et de musique, ou système général des intervalles des sons“ [SAV1701] als der Begründer der Akustik als wissenschaftliche Disziplin. Die erste Verwendung der Fachgebetsbezeichnung „Akustik“ ist indes umstritten, da wohl bereits Narcissus Lord Marsh (1638-1713) in seinem Artikel „Philosophical Transactions of the Royal Society of London“ eine Schrift folgenden Wortlauts publizierte: „An introductory Essay to the doctrine of Sounds, containing some proposals for the improvement of Acousticks“ [HU78].

Bei seinen Untersuchungen der Beziehung zwischen der Schwingungsfrequenz und der Tonhöhe entdeckte Sauveur die so genannten stehenden Wellen, welche in akustischer Hinsicht als Schwebungen wahrgenommen werden. Dabei sind zwei Töne, deren Frequenzen sich nur wenig unterscheiden, als ein in der Lautstärke schwankender, modulierter Einzelton zu hören, dessen Frequenz dem Mittelwert der Frequenzen der beiden überlagerten Töne entspricht. Zieht man die Frequenzen übrigens wieder auseinander, so entstehen aufgrund der schneller werdenden, kaum noch wahrnehmbaren Lautstärkeschwankungen, sog. „raue Töne“. Rauh, bzw. Rauigkeit ist hierbei eine Klassifizierung in der Psychoakustik.

Im physiologischen Kontext dazu beschreibt Urban Nathanael Beltz (1703-1776) in seiner „Abhandlung vom Schalle“ [BEL1763] die Anatomie von Außen-, Mittel- und Innenohr und formuliert schon sehr treffend die später durch Békésy erarbeiteten Forschungsergebnisse zum „Aktiven Gehör“, bzw. cochlearer Verstärker.

Darüber hinaus setzte er sich in dieser Arbeit auch verstärkt mit psychoakustischen und philosophischen Problemen auseinander. Zur Grammatik der verschiedenen Schallbeschreibungen findet sich so beispielsweise folgendes Zitat: „...als nach welchen Umständen der Schall im gemeinen Leben nicht nur gewisse Namen, auch Bey- und Zunamen bekommen, indem er, zu Unterscheidung seiner Arten, bald Sausen, Brausen, Getöse, Geräusch, Knallen, Zischen, Klingeln, Tönen, ... bald Donner- und Trommelschlag, Stockschuß, Trompeten- und Pauckenschall, Glocken- und Saitenklang, Widerschall, Resonanz und Echo etc. Bald Menschen- und Thierstimme, Rede und so fort genennet ist, sondern auch darnach in unterschiedlichen Species oder Gattungen und Schall-Arten eingetheilet wird, ja sogar denen zu seiner Entstehung und Fortbewegung befördernden Körpern zugeeignet wird, wenn man z. E. sagt, die Glocke klingt, die Trompete schallt, die Kanone knallt, die Pfeife tönt, der Mensch schreyt, der Löwe brüllt etc...“ [KÖL11].

In ähnlicher Form funktionieren auch die heutigen Beschreibungssysteme, zum Beispiel im Automotive Bereich, wo z B. von scheppernden oder rasselnden Motoren gesprochen wird, um neben der reinen spektralen Bewertung von Schallereignissen eine „Übertragungsfunktion“ zu finden, die mit der Gefühlswelt bzw. der Akzeptanz des Nutzers in Verbindung treten kann.

Unter diesem Aspekt sind weiterführend die Arbeiten von Krüger, Kratzenstein und von Kempelen beschrieben, welche besondere Beachtung hinsichtlich der wissenschaftlichen Erweiterung um multisensuelle Aspekte finden. Neben den vorab beschriebenen verbalen Beschreibungen veröffentlichte Johann Gottlob Krüger (1715-1759), Professor für Medizin in Halle, 1743 seine Untersuchungen zum Farben-Cembalo. Dieses Instrument sollte durch seine spezielle Konstruktion, die synchrone und diachrone Struktur von Musik in eine harmonische Anordnung von Farben übertragen und die Töne quasi optisch beschreiben. Durch die Betätigung einer Taste öffnete sich eine Blende worauf eine dahinter befindliche Kerze verschieden gefärbte Gläser beleuchtete. Die Bewertungsreferenz für diesen, heute im multisensuellen Design mit „Transmutation“ beschrieben Mechanismus war die menschliche Bewertung bzw. Assoziation welche durch die Verkopplung der angesprochenen Sinneskanäle entstand.

„Krüger bezog sich ... auf eine allgemeine Übereinstimmung in der Beurteilung von Konsonanz und Dissonanz, was ... an den mathematisch bestimmbar Relationen zwischen den Tönen liege. Dies habe ihn nun auf den Gedanken gebracht, dass die übrigen Sinne, vor allem das Auge, bei der Beurteilung des Angenehmen nach den gleichen Prinzipien verfahren wie das Ohr ...“ [GES94]. Wichtig sind diese Anregungen, wenn die Beschreibung von Akustik neben den üblichen Formen, wie Tonaufnahme und bildliche Darstellung im Frequenz- oder Zeitbereich um gestaltungs- und akzeptanzrelevante Darstellungsformen erweitert werden sollen, um die Wahrnehmungsaspekte zu berücksichtigen (im Sinne der Arbeit).

Die Redundanzen der in diesem Kapitel beschriebenen Vertreter, z. B. im Bereich der physiologischen Untersuchungen, zeigen wie sich in der Spätrenaissance das Wissen, auch in den verschiedenen Fachgebieten der Akustik, immer mehr verdichtete. Die systematische Aufarbeitung unter Zuhilfenahme der zeitgemäßen Methoden sollte sich mit dem Einsetzen der industriellen Revolution weiter beschleunigen und mit Einführung geeigneter Aufzeichnungsmethoden in der Neuzeit schließlich zu einem sprunghaften Fortschritt auf dem Gebiet der Akustik führen. Eine Auswahl entsprechender Vertreter wird im letzten Abschnitt dieses Kapitels behandelt.

II.5 Beginnende industrielle Revolution bis 20. Jahrhundert

Einer der wichtigsten Vertreter der physikalischen und mathematischen Naturwissenschaften dieser Epoche war Isaac Newton (1643-1727). Sein Hauptwerk „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“ erschien erstmalig 1687 im Verlag der Royal Society. Newton überarbeitete seine Schrift im Verlauf der Jahre bis 1726 mehrfach, wobei er diese stellenweise revidierte und erweiterte und welche einen wesentlichen Beitrag zur Mathematisierung der Akustik leisteten.

Hinsichtlich der Schallgeschwindigkeitsermittlung ist Newtons Werk wichtig, weil er dort auch eine mathematische Theorie der Schallausbreitung von Longitudinalwellen und eine Formel zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit angibt. Daneben sind auch Newtons Experimente zur Verifizierung seiner Berechnungen dokumentiert. Da er die Zeitmessung jedoch noch mit dem Pendel durchführte und auch die unterschiedlichen Temperaturen am Messtag, sowie die Dichte der Luft, die mit dem Luftdruck schwankt, nicht berücksichtigte konnte er seine Werte nicht experimentell verifizieren. „Grund allen Übels war, ...die Zustandsänderung in Schallwellen als isotherm anstatt isentrop anzunehmen. Er erhielt so eine Schallgeschwindigkeit von 290 m/s, die deutlich von dem gemessenen Wert abwich. Erst Laplace berechnete 1816 die Schallgeschwindigkeit unter der Annahme einer isentropen Zustandsänderung und erhielt eine Lösung, die mit den Experimenten in Einklang stand“ [EHR03]. Er fand hinsichtlich des beschriebenen Fehlers heraus, dass Wärmeaustausch aber auch bei sehr niedrigen Frequenzen im Infraschallbereich anteilig möglich ist. Newtons Berechnungen konnten so unter Hinzunahme der Adiabatengleichung vervollständigt werden.

Newton rechtfertigte seine Theorie mit den ersten um 1660 genauer durchgeführten Messungen der Schallgeschwindigkeit von Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) und Vincenzo Viviani (1622-1703) – Mitarbeiter von Galileo Galilei. Deren ermittelter Wert für die Schallgeschwindigkeit in Luft von 1148 ft/sec, bzw. 1077 Pariser Fuß, entsprachen 350 m/s und war damit schon recht nahe der Realität.

Die heute verwendete eindimensionale Wellengleichung für Schall wurde schließlich von Leonhard Euler (1707-1783) formuliert und 1821 erfand Dominique Francois Jean Arago (1786-1853) auf Basis der Huygenschen Unruhe die Stoppuhr für genauere Zeitmessungen, welche er dann für seine eigenen Messungen der Schallgeschwindigkeit zusammen mit Hermann von Helmholtz (1821-1894) benutzte.

Diese Grundlagen der Schallgeschwindigkeitsmessung sollten später auch auf andere Materialien, beziehungsweise auf Festkörper übertragen werden. Weiterführend sind solche Arbeiten zum Beispiel bei Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827) im weiterführenden Text des Kapitels beschrieben.

Im Zusammenhang sei hinsichtlich der genaueren Bestimmung klanglicher Eigenschaften von Festkörpern noch erwähnt, dass John Shore, um 1715 in seiner damaligen Funktion als Lautenist der Chapel Royal die erste Stimmgabel entwickelte. Diese aus Stahl gefertigte, von Shore selbst scherzhaft als „pitch fork“ bezeichnete Gabel, erzeugte eine Tonhöhe von 423,5 Hz und wurde von ihm zum Stimmen seiner Laute genutzt. (vgl. [RAP08]). Shore benutzte somit bei präzise gleichbleibender Geometrie die Werkstoffeigenschaft, um ein Frequenznormal zu definieren.

Mit Sicht auf die Notationssysteme für die Akustik sind an dieser Stelle die bereits erwähnten Arbeiten von Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827) erwähnenswert. Diese basieren auf umfangreichen, von ihm durchgeführten Versuchen, weswegen Chladni heute als Begründer der experimentellen und wissenschaftlichen Akustik als selbstständiges Teilgebiet der Physik geführt wird. Sein Hauptwerk „Die Akustik“ erschien 1802 und ist als grundlegender Beitrag zur experimentellen Festkörperakustik zu werten [CHL1802].

Chladni untersuchte das Schwingungsverhalten von biegesteifen Platten indem er diese verschiedenartig einspannte, mit feinem Pulver oder Sand bestreute und dann mit einem Geigenbogen am Rand zum Schwingen anregte, wobei er die schwingende Struktur dabei an verschiedenen Stellen berührte [CHL1787]. Inspiriert wurde er dabei von Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799), der Figuren von Harzstaub auf Glas- bzw. Harzplatten im elektrischen Feld untersuchte, wobei er die Gleitentladungen auf dem Dielektrikum durch Hinzufügen mit Mennige- und Schwefelpulver sichtbar machte und so eigentlich unbewusst die Effekte mikroskopischer Reibungsvorgänge visualisierte [WAH12].

Bei Chladnis Versuchen bildeten sich nun entlang der akustischen Knotenlinien von dabei erzeugten stehenden Wellen Muster heraus. Er stellte fest, dass einer bestimmten Klangfigur immer ein bestimmter Ton entspricht, aber zu einem festen Ton verschiedene Figuren gehören können. Je komplexer das Bild der Knotenlinien ist, desto höher ist die Frequenz der Schwingung. Diese Experimente waren in gewisser Weise ein Vorläufer der heutigen Modalanalyseverfahren. Bemerkenswert war, dass Chladni die dabei erzeugten, fünf Oktaven reichenden Schwingungsfrequenzen ausschließlich mit seinem Gehör bestimmt haben soll. Chladni wollte durch seine akusto-mechanischen Experimente die Theorie der Plattenschwingungen vorantreiben: „Da es mir gelungen ist, ein Mittel zu entdecken, um jede mögliche Art des Klanges solcher Körper (Platten) ohne Beimischung anderer nicht nur hörbar, sondern auch sichtbar darzustellen, so hoffe ich durch Bekanntmachung meiner Beobachtungen wenigstens einige richtige Voraussetzungen zu genauerer Untersuchung dieses noch sehr unbearbeiteten Theiles der Mechanik liefern zu können, und bin versichert, dass jede Unvollkommenheit meiner Bemerkungen entschuldigt werde, wer aus eigener Erfahrung weiß, wie viele Schwierigkeiten sich einem, der auf angebahnten Wegen die Natur beobachten will, bei jedem Schritte entgegenstellen“ [KÖL11]. Heute finden die grundlegenden und eher ästhetisch orientierten Untersuchungen Chladni beispielsweise in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung Beachtung und werden dort für belastbare Interpretationen genutzt. So setzten beispielsweise Rahammer, Solodov, Derusova und Kreuzbruck in ultraschallthermographischen Untersuchungen visualisierte Bauteildefekte mit chladnischen Klangfiguren in Bezug und konnten diese mit der Dissipation von Schwingungsenergie gleichsetzen [RAH2015]. Die Ergebnisse in Abb. II-u zeigen auch die Skalierbarkeit der Methode im makroskopischen Bereich.

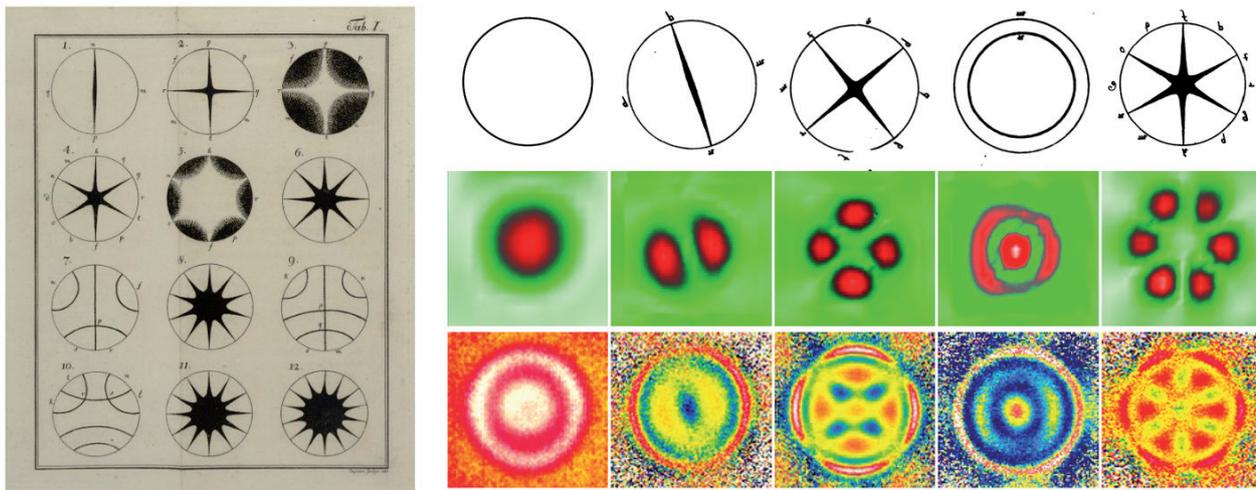


Abb. II-u links: Klangfiguren runder Platten von Chladni aus „Entdeckungen über die Theorie des Klanges“ 1787; rechts: LDR-Thermografie an Flachbodenbohrung. Grundschwingung und vier Schwingungsmuster höherer Ordnung, visualisiert mit Vibrometrie und Thermografie (nach [RAH2015])

Bezogen auf die weiteren Ziele dieser Arbeit hinsichtlich der Aufgabe ein geeignetes Notationssystem für die unterschiedlichen klanglichen Eigenschaften von Werkstoffen vorzuschlagen, stehen die Arbeiten Chladnis exemplarisch für die optische Erfassung und Bewertung von klanglich generierten Strukturen. Diese stehen mit ihrer akustischen und optischen Ästhetik in direktem Zusammenhang. „So werden die Wellenmuster umso angenehmer empfunden, je mehr diese Muster Periodiken aufweisen, also je „wohlgeordneter“ sie unserem Ohr erscheinen. Unser eigentlicher „Empfänger“, das Gehirn, erfährt sowohl auf dem optischen wie auch dem akustischen „Kanal“ einen angenehmen Eindruck“ [WAH12].

Chladni untersuchte darüber hinaus auch schwingende Saiten und Stäbe in Abhängigkeit von ihren Abmessungen und unterschied erstmals zwischen den dabei auftretenden Transversal- und den Longitudinalwellen.

Diese Entdeckung legte Chladni seinen Messungen der Schallgeschwindigkeit in Festkörpern zu Grunde, indem er mittig eingespannte Stäbe zu Longitudinalschwingungen anregte und deren Grundschwingung mit dem Grundton einer gleich langen luftgefüllten Pfeife mit gleicher Schwingung verglich. „Da zwischen Frequenzverhältnis und Verhältnis der Schallgeschwindigkeit im Stab ein linearer Zusammenhang besteht, konnte Chladni die Schallgeschwindigkeiten von Zinn, Silber, Kupfer, Eisen, Glas und in verschiedenen Holzsorten messen. Auf analoge Weise gelang Chladni die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen. Dazu blies er eine Orgelpfeife mit verschiedenen Gasen an und verglich die Tonhöhe mit der, welche dieselbe Pfeife in Luft ergab. Das Frequenzverhältnis ist gleich dem Verhältnis der Schallgeschwindigkeit in dem untersuchten Gas zu der in Luft. Auf diese Weise gelang Chladni die Messung der Schallgeschwindigkeiten in Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxid, Stickstoffoxid und Wasserstoff“ [KÖL11].

Hier trifft Chladni prinzipiell den Kern der Arbeit, denn obwohl die Kenntnisse über die materialspezifischen Laufzeitunterschiede heute vor allem für die Parametrisierung von zerstörungsfreien Prüfverfahren genutzt werden, sind sie auch für die Wahrnehmungsspezifik maßgeblich. Es ist somit naheliegend andere materialspezifische Größen, wie Dichte oder E-Modul zu untersuchen und weitergehend bei Werkstoffen und Struktur über Größen wie Flächenträgheitsmoment oder Steifigkeit und deren Auswirkungen auf die akustische Akzeptanz nachzudenken.

Zu Beginn des 19. Jh. kann man auch den Beginn der Elektroakustik datieren, den Bereich der angewandten Akustik der sich mit der Umsetzung akustischer in elektrische Signale und deren Speicherung befasst. Diese sind unter anderem mit den Namen Thomas Young (1773-1829), Alexander Graham Bell (1847-1922), Édouard-Léon Scott de Martinville (1817-1879) und Thomas Alva Edison (1847 - 1931) verbunden.

Young führte so 1807 die erste technische Tonaufzeichnung durch, indem er einen Stift mit einer Stimmgabel verband und über eine mit Wachs beschichtete, sich drehende Trommel bewegte. Edison beschäftigte sich differenziert vom reinen Ansatz der grafischen Tonaufzeichnung für wissenschaftlich-technische Zwecke mit Wiedergabe und Vermarktung von Tonaufnahmen. 1877 patentierte Edison seinen „Phonographen“, der zur Tonaufzeichnung eine mit einem Stanniolblatt bezogene Walze verwendete, die links und rechts mit Schalldosen für die Aufnahme und Wiedergabe verbunden waren. Edison gelang so der erste Schritt zur Audiokassette, die zu diesem Zeitpunkt zwar noch nicht wissenschaftlich auswertbar war, aber diese zweite wichtige Informationsebene einführte. Diese und weitere erste Ansätze und die damit verbundene Analytik, um in der vordigitalen Zeit an akustische Informationen heranzukommen sind bis heute faszinierend und bildeten die Grundlage für die Signalverarbeitung dieser Arbeit.

Ebenfalls zur Jahrhundertwende – genauer 1877/78 verfasste John William Strutt, der spätere Lord Rayleigh, „The Theory of Sound“. In diesem Werk wurde die Akustik erstmals als ein physikalisches Teilgebiet der Mechanik beschrieben. Zur Schallquellenortung formulierte Rayleigh folgende zwei Sondiermechanismen, welche gleichzeitig in verschiedenen Frequenzbereichen wirken. Die interaurale Pegeldifferenz besagt, dass bei Schallwellen kleiner Wellenlänge bezogen auf den Ohrabstand der Kopf eine Schallabschattung verursacht, wodurch der Schalldruckpegel an dem der Schallquelle zugewandten Ohr höher ist als am abgewandten Ohr. Des Weiteren kommt es bei unterschiedlichen Abständen zwischen Schallquelle und beiden Ohren zu einer sogenannten interauralen Laufzeitdifferenz. Durch weitere Versuche erkannte Rayleigh, dass zur Schallquellenlokalisierung bei Frequenzen unterhalb 800 Hz die interauralen Laufzeitdifferenzen als Ohrsignale bedeutsam sind, während für Frequenzen oberhalb von 1600 Hz allein die interauralen Pegeldifferenzen wirksam sind.

Die Zone zwischen den beiden Duplex-Bereichen zwischen 800 Hz und 1600 Hz liegt nach heutigem Erkenntnisstand im sogenannten Blauertschen Hintenband. Die nach Jens Blauert benannten richtungsbestimmenden Bänder definieren die akustischen Frequenzbereiche, die für das menschliche Richtungshören in der sogenannten Medianebene, also vorn, oben, hinten wichtig sind (vgl. [BLAU1974]).

Der Grund für die richtungsabhängige Filterung ist dabei die spezifische Geometrie des Außenohres und die spektralen Maxima und Minima werden vom Gehör ausgewertet, um daraus entsprechende Indizien für die Einfallsrichtungen abzuleiten. Verglichen mit der horizontalen Lokalisation über Laufzeit- und Pegeldifferenzen

zwischen den beiden Ohren beträgt die Lokalisationsschärfe allerdings nur etwa 10° gegenüber 1° bei horizontaler Lokalisation.

Einen fundamentalen Stellenwert nimmt heute das mathematische Theorem der harmonischen Analyse von Joseph Baron de Fourier von 1822 ein. Bei dieser nach ihm benannte Fourier-Analyse wird der zeitlich periodische Schwingungsverlauf eines Signals in harmonische, bzw. in einzelne Sinusschwingungen zerlegt. Das daraus gewonnene Amplitudenspektrum, oder die Fourier-Transformierte zeigt neben der Verteilung dieser Einzelschwingungen im Signal auch die entsprechende Stärke an, mit der die Einzelfrequenzen zum Gesamtsignal beitragen. „Die Anwendung der Fourier-Analyse auf die Funktionsweise des Gehörs bei der Analyse periodischer Schallvorgänge in ihre Teilschwingungen fand erstmals ihren Niederschlag im sog. Ohmschen Gesetz der Akustik, das auch Ohm-Helmholtzsches Gesetz genannt wird. ...von... Georg Simon Ohm...formuliert und von Helmholtz in modifizierter Form als ein Gesetz der physiologischen Akustik eingeführt“ [HEEL04].

1863 strukturierte Hermann von Helmholtz seine Theorie des Hörens, oder besser die Theorien zu Tonhöhenwahrnehmung in seinem Werk „Die Lehre von den Tonempfindungen“ weiter, um die Zusammenhänge zwischen physikalischer und physiologischer Akustik zu beleuchten. „... so wird es unsere erste Aufgabe sein zu untersuchen, wie viel verschiedene Arten von Empfindungen unser Ohr erzeugen kann, und welche Unterschiede des äußeren Erregungsmittels, nämlich des Schalls, diesen Unterschieden der Empfindung entsprechen“ [HEL1896]. Die physiologischen Aspekte sind hinsichtlich der psychoakustischen Wirkung von Schallereignissen grundlegend wichtig und finden damit auch ihren Niederschlag bei der Bewertung von Werkstoffeigenschaften durch die reine Hörwahrnehmung.

Neben den physiologischen Forschungen wurden ab der Mitte des 19. Jahrhunderts auch die Grundlagen zur quantitativen Beschreibung von Wahrnehmungen und Empfindungen gelegt. Die von Gustav Theodor Fechner begründete Psychophysik beschäftigt sich dabei mit den gesetzmäßigen funktionalen Beziehungen zwischen physikalischen Reizen und den zugehörigen Empfindungen und versuchte ein physisches Maß für das Psychische zu finden. Basierend auf der Theorie von Ernst Heinrich Weber formulierte er das nach ihm benannte Fechnersche Gesetz. Weber erkannte zunächst den grundlegenden proportionalen Zusammenhang zwischen der Steigerung der Reizintensität und der ebenmerklichen Zunahme der Empfindungsstärke. Fechner wiederum erweiterte diese funktionale Beziehung und formulierte, dass sich die subjektiv empfundene Stärke von Sinneseindrücken proportional zum Logarithmus der objektiven Intensität des physikalischen Reizes verhält. Anwenden lässt sich dieses Gesetz prinzipiell auf Sinneseindrücke, wie zum Beispiel Tastsinn oder Helligkeitsempfindung. Auf die menschlichen Hörempfindungen bezogen lässt sich so formulieren, dass die Tonhöhenwahrnehmung logarithmisch von der Grundfrequenz abhängt und eine Verdoppelung der Grundfrequenz die Änderung der Tonhöhe um eine Oktave verursacht. Dagegen gilt das Weber-Fechner-Gesetz nicht für Lautstärkewahrnehmung. Stanley Smith Stevens formulierte dazu im sogenannten Stevensschen Potenzgesetz, dass eine Verdopplung der Lautheit bei einer Erhöhung des Schalldrucks um 10 dB empfunden wird, wobei diese Aussage lediglich für mittlere und hohe Schalldrücke gilt.

Die Kritiker der psychophysischen Ansatzes lehnten derartige elementaristische Ansätze gemäß der Entität des Geistes, wie sie der Philosoph Franz Brentano postulierte, ab. Zu ihnen zählen Carl Stumpf oder Erich Moritz von Hornbostel, der Begründer der vergleichenden Musikwissenschaften.

Einen in diesem Zusammenhang weiterführenden Ansatz psychologischer Akustik stellen beispielsweise die 1946 durchgeführten psychoakustischen Experimente von Pierre Schaeffer dar. Dieser beschreibt sogenannte Lautobjekte („l'objet sonore“) als „Objekt für die menschliche Wahrnehmung und nicht als mathematisches oder elektroakustisches Objekt für die Klangsynthese“ [SCHAE70]. Das Lautobjekt wird dabei als kleinster selbstständiger Partikel einer sogenannten Soundscape wahrgenommen (vgl. [SCHAF10]).

Der grafische Ansatz in Abb. II-v erscheint hinsichtlich des Zieles dieser Arbeit ein entsprechendes Notationssystem zur Einordnung von Belastungs- und Bruchvorgängen von Werkstoffen zu formulieren interessant, da sich die Frage ableiten ließe, ob man Körperschallbrüche „malen“ könnte.

Diese Frage wird im experimentellen, bzw. designakustischen Teil der vorliegenden Arbeit (Kap. 3) bei den Betrachtungen akustischer Notationssysteme weiter vertieft werden.

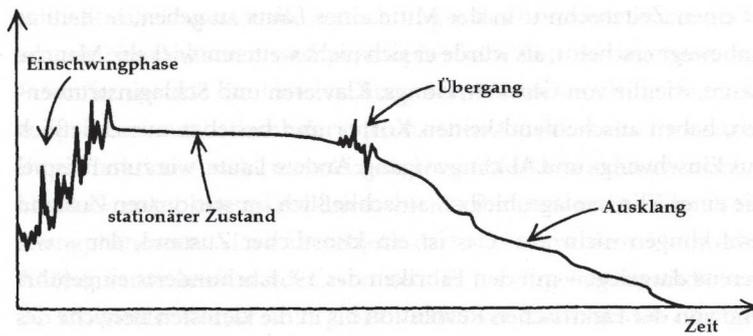


Abb. II-v: Grafische Darstellung eines Lautobjektes von Schaeffer
(Ordinate wird im Text bei [SCHAF10] als Pegel umschrieben)

Vor allem aber der Forscherkreis in Bezug auf Fechner legte „den Grundstein für eine naturwissenschaftliche Psychologie, die Beobachtung Messung und Experiment als Methoden einsetzt und Beobachtungsdaten in Bezug auf mathematisch formulierte Theorien interpretiert. ...Die Psychophysik sollte sich für die Hörforschung als sehr wichtig erweisen, auch deshalb, weil viele Pioniere der psychophysischen Methoden primär psychoakustische Anwendungen im Blick hatten“ [HEEL04]. Später kamen diesbezüglich Gebiete wie etwa das Sounddesign hinzu, welche die gehörbezogene Wahrnehmung mit den Körperschallursachen der Festkörperakustik verbinden sollten.

Wichtige Erkenntnisse im Bereich der Psychoakustik als Teilgebiet der Psychophysik erlangte man zu dieser Zeit durch oder bei der Weiterentwicklung der Telefonie und anderer Wiedergabegeräte der Unterhaltungsindustrie. Entscheidende Beiträge dazu lieferte vor allem Harvey Fletcher, Physiker an den Bell-Laboratorien, der 1933 die stereophone Tonübertragung realisierte. Hinsichtlich der Relevanz für die vorliegende Arbeit sei hier auch kurz der 1946 entwickelte Klangspektrograph der Bell Telephone Laboratories erwähnt. Dieser visualisiert die drei Dimensionen des Schalls (Zeit, Frequenz, Amplitude), wobei die Lautstärke durch Schattierung dargestellt wurde.

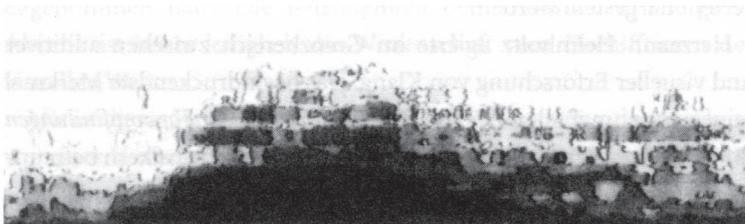


Abb. II-w: Klangspektrogramm der Signalpfeife eines Zuges der Canadian Pacific [SCHAF10]

Spektrogramme, bisweilen auch als Sonagramme bezeichnet dienen anschließend häufig der Analyse von Sprachsignalen, wie zum Beispiel der Laut-Bestimmung in der Phonetik und werden heute zur mehrdimensionalen Klangdarstellung und -analyse in verschiedensten Bereichen, wie zum Beispiel der Bioakustik oder der Technischen Akustik eingesetzt und variieren durch farbliche und räumliche Darstellungsvarianten. Auf die Ausführungen zur Notenschrift als präskriptives Notationssystem lässt sich an dieser Stelle außer dem postskriptiven Charakter der Visualisierungen auch die Ablösung von rein klanglichen Niederschriften feststellen.

Fletcher hatte neben seinen Arbeiten zur Stereowiedergabe auch weitreichende psychoakustische Forschungen zur Frequenzabhängigkeit der Lautstärkeempfindung und zur kritischen Bandbreite betrieben. Letztere eignete sich gut, um das Erkennen von verdeckten Signalen in einem Signal zu untersuchen und zu beschreiben.

Das Konzept wurde von Karl Eberhardt Zwicker und Richard Feldtkeller im von ihnen verfassten Standardwerk der Psychoakustik "Das Ohr als Nachrichtenempfänger" zum heute weithin anerkannten Funktionsmodell des Gehörs – zum sogenannten Frequenzgruppenkonzept – weiterentwickelt.

Nach diesem Exkurs zu den Erkenntnissen der physiologischen und psychologischen Akustik, bzw. Physik soll der Fokus nun aber wieder auf die für die vorliegende Arbeit relevanten Vertreter und Forschungsergebnisse zur Materialakustik und zur technischen Akustik gerichtet werden. Die beschriebenen Fortschritte auf dem Gebiet der Elektroakustik führten nämlich auch zu tieferegreifenden Erkenntnissen in der Technischen Akustik, welche sich unter anderem mit den Geräuschen von Maschinen und Anlagen oder im Kontext der Arbeit mit den Wechselwirkungen zwischen Materialien bzw. Werkstoffen und den daraus bestehenden dynamisch belasteten Konstruktionen befassten. Die seit Beginn der Industrialisierung wachsende Anzahl von industriell nutzbaren Werkstoffen führte zwangsläufig auch zu Veränderungen der akustischen Umwelt. Die technische Akustik befasst sich unter dem Begriff der „Akustischen Emission“ mit dem Phänomen, dass Materialien und Werkstoffe bei Verformungs- und Bruchprozessen Energie in Form von Schallwellen freisetzen. Da diese Signale in der Arbeit zur Werkstoffcharakterisierung genutzt werden, werden hier einige geschichtliche Aspekte der ersten grundlegenden AE-Anwendungen (Acoustic Emission Method) geschildert.

Bereits seit der Bronzezeit kennt man den sogenannten „Zinn-Schrei“, der bei der plastischen Verformung von purem Zinn zu hören ist. Die erste Niederschrift dazu findet sich 1545 in den abendländischen Aufzeichnungen des arabischen Alchemisten Jabir ibn Hayyan genannt Geber, der die Geräusche von Stahl in der Kühlphase des Schmiedens als „rauen harschen Klang“ oder „Krachen“ beschrieb. [GEB1928] Ähnliche Schilderungen sind unter anderem auch von anderen Materialien wie Cadmium, Magnesium, Zink bekannt. Auffällig sind die mangels elektroakustischer Instrumentierung analogen Beschreibungen wie: klicken, rattern, quietschen, mahlen, malmen, zischen, schnappen (vgl. weiterführend [DRO1996]), welche übrigens auch heute noch, z. B. bei der Beschreibung von Bremsgeräuschen eingesetzt werden (vgl. [GRA2015]).

Die Defizite dieser eher qualitativen, subjektiven Beschreibungen erkannte bereits Hooke. Er forderte bereits 1705 für die grundsätzliche Arbeit der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, dass basierend auf der Wahrnehmung und Analyse mit Hilfe der „nackten Sinne“ Instrumente und Maschinen einbezogen werden müssen, welche die Sinne dabei unterstützen und mit denen es darüber hinaus möglich sein sollte die untersuchten Ereignisse zu bestimmen und zu definieren. [HOO1705] Er wies dahingehend darauf hin, dass es durch die zu erwartende höhere Leistungsfähigkeit möglich sein sollte auch jene Eigenschaften zu definieren, welche die „nackten Sinne“ nicht mehr wahrnehmen können, die aber wichtig für die Herleitung der wahrnehmbaren Phänomene sind.

An diesen Ansatz schließen sich sinngemäß die elektroakustisch instrumentierten Experimente, welche von Beginn der 20er Jahre durchgeführt wurden, an. So zeichnete Fuyuhiko Kishinoue 1933 bei seinen Zugversuchen an Holzproben akustischer Signale auf und entdeckte dabei zusätzlich auch Signalanteile im Ultraschallbereich. „Diese wurden später von Bradford H. Schofield als Acoustic Emission bezeichnet, als dieser die vorangegangenen Ergebnisse der Dissertation von Joseph Kaiser (1950) nochmals nachprüfte“ [SAUSE10]. Kaiser hatte in seiner Arbeit Zugproben mehrfach belastet und dabei die Schallemissionen durch kleinste Rissinitiierungsprozesse aufgezeichnet. Dabei stellte sich heraus, dass in einer wiederbelasteten Probe erst ab Überschreitung der vorherigen Belastungsgrenze wieder akustische Signale freigesetzt werden. Er selbst beschrieb es wie folgt: „Bei einer nun folgenden Wiederbelastung traten nur vereinzelt Sprünge auf, bis die ursprüngliche Belastung ... wieder erreicht war und sofort war die Wirkung der Effekte in ihrer ursprünglichen Heftigkeit wieder zu erkennen“ [KAI1950]. Das irreversible Phänomen trägt heute den Namen Kaiser-Effekt.

Zu der Patentschrift 852 771
Kl. 42 k Gr. 34 01

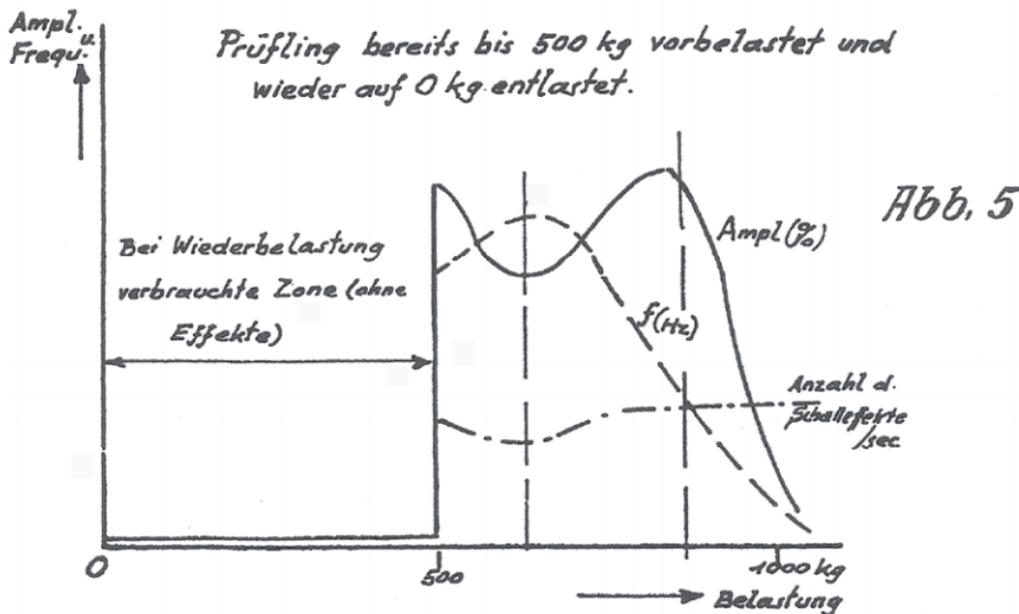


Abb. II-x: Der Effekt, um die vorherige Belastung einer Probe durch die Messung der akustischen Emissionen zu bestimmen, zuerst beschrieben in Dr. Joseph Kaiser Doktorarbeit 1950; J. Kaiser Patent, Nr. 852 771 - Kl. 42 k Gr. 34 01, [TEN2004]

Kaiser erkannte das Potenzial dieser Methode für die zerstörungsfreie Prüfung und patentierte es. „Ein wichtiges Ergebnis der angewandten Versuchsmethode ist die Tatsache, dass nachträglich, ohne den Prüfling zu zerstören, sich Aussagen machen lassen über die Höhe der höchsten Belastung, die das Material bereits ausgehalten hat. Also die Kenntnis der Beanspruchung, die auf dem Material war und nicht nur augenblicklich ist“ [KAI1950]. Das darauf basierende und heute für verschiedene Bereiche normierte Prüfverfahren heißt Schallemissionsprüfung.

Wie bereits oben erwähnt, wurden weitere umfangreiche Forschungen aufbauend auf Kaisers Arbeiten von Bradford H. Schofield und von Clement A. Tatro durchgeführt. Schofield untersuchte die Quelle akustischer Emissionen auf dem Gebiet der Werkstofftechnik und folgerte, dass AE vor allem ein Volumeneffekt und kein Oberflächeneffekt ist [MUR13]. Tatro benutzte das Verfahren, um das Verhalten verschiedener Legierungen zu untersuchen. Er sah, wie Kaiser in Deutschland voraus, dass sich die Schallemissionsprüfung als ein leistungsfähiges ZfP-Verfahren etablieren wird. Nachdem beispielsweise Harold Dunegan 1963 damit begann, Drucktanks mithilfe der Schallemissionsprüfung zu untersuchen, spezialisierte er sich ab 1969 auf dieses Verfahren und gründete die erste Firma für Acoustic Emission Equipment. [DUN1969] 1980 entwickelte Hartmut Vallen in Deutschland eine AE-Messvorrichtung für laufzeitbasierte Messungen auf Basis einer digitalen Signalverarbeitung. Das Unternehmen konzentriert sich bis heute auf die Entwicklung von sehr schnellen Datenerfassungssystemen.

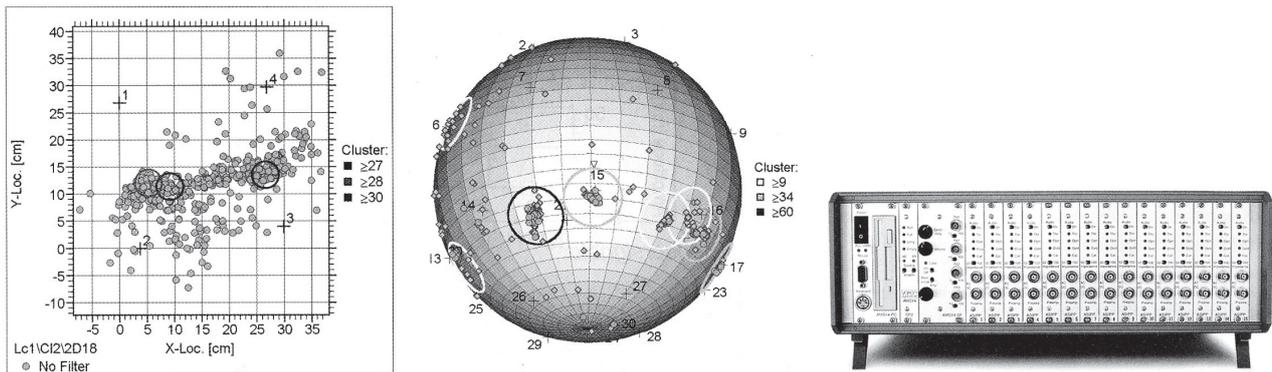


Abb. II-y: Ortungs- und Clusterdarstellung auf Basis des AMSY4 Systems von VALLEN Systeme GmbH [VALL03]

Hinsichtlich der in der vorliegenden Arbeit betrachteten Werkstoffklasse der faserverstärkten Kunststoffe ist zu erwähnen, dass in den USA bereits ab den 70er Jahren AE-Untersuchungen an Kunststoffdrucktanks durchgeführt wurden, um die Eigenschaften der dort verwendeten glasfaserverstärkten Duroplaste (Fibre Reinforced Plastics - FRP) zu bestimmen und deren Lastverhalten zu untersuchen. Angeregt durch den Erfahrungsaustausch mit Harold Dunegan befasste sich Timothy J. Fowler mit der Methodenadaption für diese noch neuen Werkstoffe [FOW2014]. Über mehrere Studien und Feldtests in Kooperation mit Monsanto, Dunegan, Endevco, Pollock und Wadin beobachtete er ein Phänomen, bei welchem in der Werkstoffprobe bereits bei einem Lastniveau unter dem vorher aufgetragenen Last-Maximum signifikante Schallemissionen auftreten. Er benannte den Sachverhalt nach seiner Tochter als Felicity Effect. Das Felicity-Verhältnis beschreibt die Spanne zwischen dem Lastniveau ab welchem die ersten Emissionen einsetzen und dem vorherigen Lastmaximum, ab welchem nach Kaiser theoretisch erst wieder durch Werkstoffschädigung auftretende Signale zu erwarten wären. Diesen Effekt beobachtete Fowler verstärkt in Verbundwerkstoffen und erkannte in ihm einen wichtigen Indikator für den Schädigungsgrad der daraus gefertigten Strukturen. Fowler definierte den Kaiser-Effekt als Spezialfall des Felicity-Effekts, bei welchem das Felicity-Verhältnis 1,0 ist und beide Effekte komplementär zueinander sind [FOW2014].

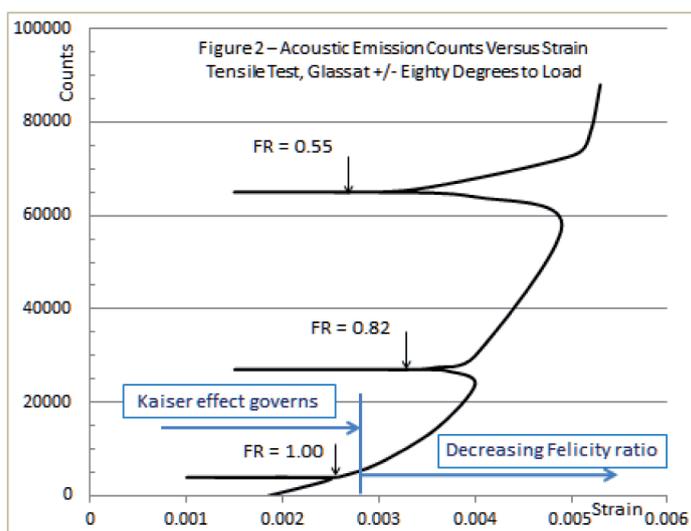


Abb. II-z: Felicity-Effekt: kumulierte Emissionszählungen über mehrere Lastwechsel und die Felicity-Verhältnisse [FOW2014]

Die Schallemissionsanalyse wird heute über die gesamte Bandbreite der Leichtbauwerkstoffe eingesetzt, um deren Sicherheits- oder Qualitätsaspekte zu überwachen. Erst seit den 80er Jahren wurde das Verfahren in den USA und in Japan auch verstärkt bei Holz und Holzprodukten angewandt (vgl. [DRO1996]). Begründet ist dies dadurch, dass „...die Anwendungsbereiche von Holz in den ersten Jahren nach Ende des Zweiten Weltkriegs nahezu vollständig von Metallwerkstoffen und Kunststoffen erschlossen wurden. Erst gegen Ende des 20. Jahrhunderts erfuhr die technische Nutzung des nachwachsenden Rohstoffs Holz, in all seinen Modifikationen, ausgehend vom Bauwesen, eine Wiederbelebung“ [EIC2010].

Bei diesen ersten akustischen Untersuchungen mittels AE wurde der Trocknungsprozess verschiedener Holzsorten überwacht und gesteuert, um zum Beispiel die Rissbildungen zu minimieren. Bei den späteren Arbeiten von Niemz und Lührmann wurde 1992 tiefergehend der „Zusammenhang zwischen dem Trocknungsverlauf und den von den Mikrorissen ausgehenden Schallemissionen untersucht. Die Emissionsrate wurde dabei mit dem Holzfeuchtigkeitsverlust und der Temperaturenniedrigung infolge Desorption verglichen.“ [NIE1992].

Bei all diesen Untersuchungen ist der generell anisotrope Charakter des natürlichen Holzwerkstoffs zu berücksichtigen. Nahezu alle Holzeigenschaften unterscheiden sich in axialer, radialer und tangentialer Richtung. Der tangentielle Schwund bei der Holz Trocknung ist circa doppelt so stark wie radial, so dass meist radiale Risse entstehen. Eine besondere Herausforderung ist aber der starke Einfluss von wachstumsbedingten und schwer zu berücksichtigenden örtlichen Anisotropien. Die für die Fehlerortung wichtigen Informationen zur Laufzeit in Holz müssen faserparallel mit ungefähr 4000 bis 6000 m/s hinsichtlich der quer zur Faser üblichen Geschwindigkeiten von ca. 400 bis 2000 m/s unterschieden werden. Die natürlichen Einflussparameter wie Dichte, Elastizität, Faserlänge, Faserwinkel, Holzfeuchte, und eben auch Äste, Risse, oder andere Schäden, führen neben den Varianzen der verschiedenen Holzsorten so zu breiten Streuungen.

Im Jahr 2003 verfolgten Sonderegger und Niemz den Ansatz, die Schallemissionsanalyse, aufbauend auf den Erkenntnissen zur Holz Trocknung, als Werkzeug zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von sturmgeschädigtem Fichtenholz zu adaptieren. Die Auswertung ihrer Ergebnisse zeigt exemplarisch, wie schwierig die Interpretation aufgrund der oben beschriebenen Eigenheiten des Werkstoffs ist: Die Grundidee der Untersuchungen war, dass die bei Sturmschäden massenhaft anfallenden Hölzer aufgrund von Stauchungen nur beschränkt für konstruktive Zwecke verwendet werden, da diese Fehler für sämtliche Festigkeitsklassen von Schnittholz, Rundholz und Lamellen für Brettschichtholz nicht zulässig sind. Begründet darin, dass die Druckfestigkeit in Längsrichtung der Fasern nur etwa die Hälfte der Zugfestigkeit beträgt, kommt es bei starker Biegung des Baums zum Versagen des Stammes auf der Druckseite, d.h. der windabgewandten Seite. Die oben beschriebenen individuellen Merkmale der Probekörper relativierten die eindeutige Zuordnung von fehlerfreien und geschädigten Stämmen von Sonderegger und Niemz. Der Variationskoeffizient betrug bis zu 167 % [vgl. SON2003].

Die Anwendung der akustischen Methode in diesem spezifischen Szenario der Werkstoffprüfung zeigt die Vielseitigkeit der Anwendungsmöglichkeiten von Akustik. Eine Übertragbarkeit auf die in der Arbeit zu untersuchenden Auswirkungen sich verändernder Materialeigenschaften auf die Akustik liegt deswegen nahe. Heute werden aufgrund der spezifischen Eigenheiten des natürlichen Werkstoffs in der Bauindustrie neben den klassischen monolithischen Holzträgern verstärkt Verbundhölzer wie Sperr- oder Leimholz und Naturfaserverstärkte Kunststoffe eingesetzt, die definierte, oder gezielt gesteuerte Anisotropien aufweisen, um die sehr guten Zugeigenschaften besser auszunutzen. Die Träger oder Strukturen sind quasi fehlerfrei und deswegen präziser zu berechnen und auszulegen. Hinsichtlich der akustischen Emissionen verhalten sich auch diese Verbundwerkstoffe prinzipiell ähnlich den oben beschriebenen klassischen GFK- und CFK-Strukturen (Carbonfaserverstärkter und glasfaserverstärkter Kunststoff).

Bedenkt man, dass der Werkstoff Holz bis zu Beginn der industriellen Revolution Ende des 18. Jahrhunderts ein weit verbreiteter Konstruktionswerkstoff im Maschinenbau war, verwundert es nicht, dass das Interesse diesen Roh- und Werkstoff zu verwenden heute neben der klassischen Anwendung im Bauwesen auch wieder im Maschinenbau auflebt. Beispielhaft sei hier auf die Türme aus Holz für Windkraftanlagen der TimberTower GmbH verwiesen, bei welchen die klassischen Stahl- oder Stahlbetontragwerke substituieren [PRA2008]. Im Fokus solcher Bestrebungen stehen neben der Nachhaltigkeit und den Leichtbauaspekten auch die generelle Wirtschaftlichkeit beim Bau und die Vorteile von Holz beim Ertragen dynamischer Lasten.

Gerade aus letzterem Punkt erwächst das Interesse, ähnlich dem bei den faserverstärkten Kunststoffen, solche Strukturen im Maschinenbau einer Prüfung oder auch einem permanenten Monitoring zu unterziehen.

Abschließend sei zum Thema Acoustic Emission und kreativer Einsatz der Schallemissionsanalyse noch die Arbeit von Stefan Mayr vom Institut für Botanik der Universität Innsbruck erwähnt. Er adaptierte die Methode 2010 interessanterweise, um damit das Wassertransportsystem von Pflanzen zu überwachen und Austrocknungserscheinungen schneller zu registrieren. Dafür wertete er die Signale von Kavitationen, die beim plötzlichen Abreißen von Wasserfäden Im Wassertransportsystem von Pflanzen freigesetzt werden aus (vgl. [MAY2010]). Dies zeigt, dass die Methode potenziell geeignet ist, um über die Werkstoffprüfung hinaus auch in anderen Forschungsfeldern Anwendung zu finden. So stellt die akustische Differenzierung des Zustandes eines sich verändernden Werkstoffes ein Gleichnis für die generelle Unterscheidung und Charakterisierung verschiedener Materialien und Werkstoffe dar.

In diesem Sinne wird die Methode in der vorliegenden Arbeit hinsichtlich der Leistungsfähigkeit für designakustische Untersuchungen im praktischen Teil angewandt und untersucht. Neben den heute weit verbreiteten CFK und GFK-Leichtbauwerkstoffen werden dort auch verschiedene Holzwerkstoffe untersucht, da gerade diese eine wichtige Rolle im Design und in der Architektur spielen. Der nächste Teil der geschichtlichen Abhandlung wendet sich deswegen den Arbeiten der jüngeren Vergangenheit im Spannungsfeld zwischen Materialität und Klangakzeptanz zu. Die beiden Aspekte sind sicher nirgendwo so eng verknüpft wie im Instrumentenbau.

So untersuchte Hermann Meinel – ähnlich dem der Arbeit zugrundeliegenden Ansatz – bereits Mitte der 30er Jahre in seiner Dissertation „Über die Beziehungen zwischen Holzdicke, Schwingungsform, Körperamplitude und Klang eines Geigenkörpers“ [MEI37] den Einfluss der Holzstärke und Holzart und der Lackierung des Geigenkörpers auf die Klangeigenschaften des Instruments. Darüber hinaus betrachtete er die akustischen Auswirkungen der Wölbung auf die Abstrahlungseigenschaften die Schwingungsmoden und Resonanzspektren der Geige.

Für seine Messungen zu den Teiltönen und Resonanzkurven an Geigenkörpern benutzte er ein gegenüber dem aufwändigen Körperschallmessverfahren vergleichsweise einfaches Luftschallmessverfahren mit einem Kondensatormikrofon. Dabei wurde das Instrument mittels einer Anstreichvorrichtung im reflexionsarmen Raum angeregt. Für die Aufzeichnung der Frequenzspektren verwendete Meinel das Suchtonverfahren nach Grütmacher (vgl. [GRÜ1968]).

Die Untersuchungen zeigten, dass die klangliche Güte einer Geige zumindest teilweise durch ihr Frequenzspektrum charakterisiert werden kann. Außerdem lässt sich mit der Frequenzanalyse des Geigenschalls der Einfluss der Geometrie- und Materialeigenschaften untersuchen, um mehr über die modalen Eigenschaften zu erfahren. Seine Messergebnisse zeigten im Rückschluss auf die subjektive Bewertung der klanglichen Güte der untersuchten Instrumente, dass: „Die Geige mit einer übermäßig großen Holzdicke klingt hell, hart, schalmeienhaft näselnd, jedenfalls bei fast allen Klängen (mit Ausnahme einiger hoher) recht unangenehm. Eine Geige mit normaler Holzdicke allgemein klanglich sehr vorzüglich klingt. Die Geige mit ungewöhnlich dünnem Holz besitzt einen Klang, der als zu hohl, zu dumpf, ebenfalls als unangenehm empfunden wird. ...“ [MEI37].

Der Einfluss der Lackierung auf die Frequenzkurven der Geige wird zunächst als gering festgestellt. Allerdings werden die Maxima in den Resonanzkurven verringert, was als Erhöhung der Dämpfung durch die Lackierung gedeutet wird. Das führt nach H. Meinel zu einer Verkürzung der Einschwingvorgänge, d. h. zu einem schnelleren Ansprechen der Klänge. Bei hohen Frequenzen ergaben die Messergebnisse einen stärkeren Amplitudenabfall durch die Lackierung als im tieferen Frequenzbereich, d. h. „bei einem geschmeidigen Lack“ steigt der Grundtonanteil im Frequenzspektrum relativ zum hochfrequenten Bereich an. „Seine 1934 getroffenen, sehr optimistische Aussage steht im Widerspruch zu seiner 1971 (also 37 Jahre später) auf dem internationalen akustischen Kongress (ICA) in Budapest getroffenen Feststellung zur Violinforschung: In Grundlagen- und Zweckforschung zeigt sich allein daraus ein Aufgabengebiet, das, erst angefangen, nur von einem geeigneten Team in jahrelanger Arbeit einigermaßen zu bewältigen ist“ [KÖL11].

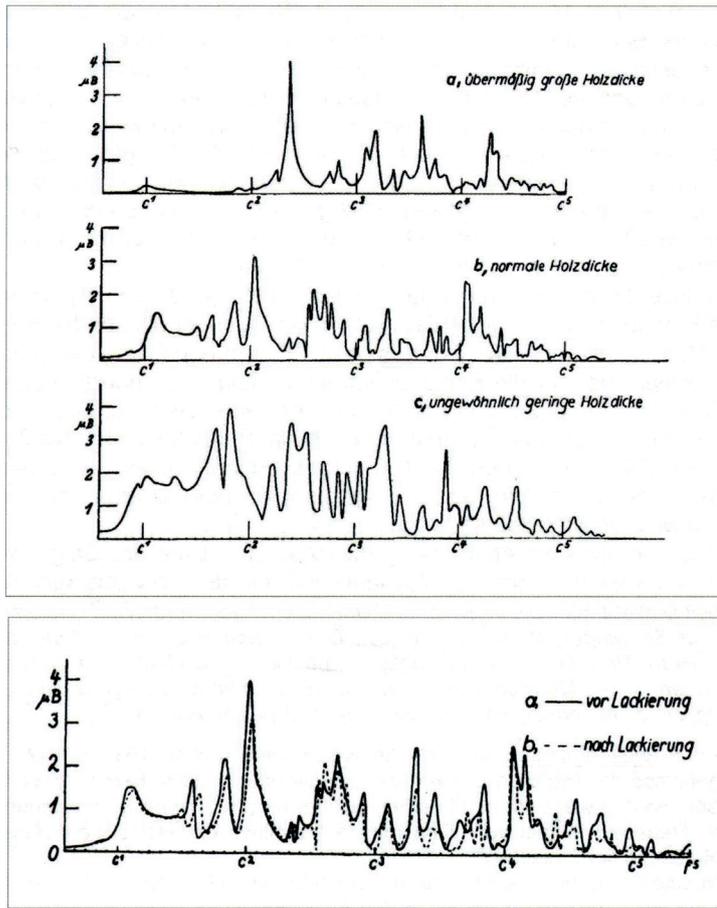


Abb. II-aa: Einfluss der Holzdicke (oben) und Lackierung (unten) des Geigenkörpers auf das Frequenzspektrum einer Geige (aus *Akustische Zeitschrift* 1937; Quelle Archiv Meinel)

Neben Meinel beschäftigen sich bis heute Akustiker mit der Charakterisierung oder gezielten Generierung von Klangeigenschaften bei Musikinstrumenten und speziell mit der Violine. Weitgehende Einigkeit herrscht bis heute darin, dass die Kunst des Geigenbaus und der dabei erreichten Klangqualität seinen Höhepunkt mit den Baumeistern Nicolo Amati (1596-1684), seinem Schüler Antonio Stradivari (1644-1737) und Joseph Guarneri del Gesù (1687-1744) erreichte (vgl. [BUE2006]). Die Entwicklung der Violine war zu diesem Punkt empirisch, von Erfahrung geprägt und auf höchstem Niveau. Die Bewertung der Violine durch den Meister war quasi ein von dessen Hörgewohnheiten geprägter individueller Benchmarktest. Noch heute wird versucht die Bauweise der damaligen Meister nachzuempfinden. Dazu wurden zahlreiche Analysen zu Holzsorte und -dichte oder zum Lack durchgeführt (z.B. [NAG2006]). Heinrich Dünnwald entwickelte Mitte der 80er Jahre in breit angelegten Untersuchungen ein erweitertes Verfahren zur objektiven Bestimmung der Klangqualität von Violinen [DÜN1990]. Er verglich die Frequenzgänge von mehr als 700 maschinell hergestellten Geigen mit den italienischen Spitzenklasse-Geigen um spektrale Qualitätsmerkmale zu extrahieren, welche diese Violinen unverwechselbar machen (vgl. weiterführend [DÜN1991]).

Dass sich eine neuzeitliche, auf Basis der zusammengetragenen Forschungsergebnisse entwickelte Violine mit denen der alten Meister messen kann, zeigt beispielsweise die 2001 von Friedrich Blutner entwickelte NewStrad. Blutner und sein Team griffen dafür neben dem umfangreichen Erfahrungsschatz im Bereich der Psychoakustik auf große Datenressourcen zurück, die aus vielfältigen repräsentativen Erhebungen aus Hörtests und Klanganalysen Hinweise und Kriterien für den eigentlichen Instrumentenbau lieferten [vgl. BLU2015].

Blutner verwendete dazu das von ihm entwickelte, psychoakustische Analyse und Testsystem „PATS“ [BLU2013], welches neben den Kenntnissen des Musikinstrumentenbaus auch Aspekte des Akustikdesigns und der Psychoakustik berücksichtigt – Begriffe, die für eine allgemeiner gefasste akustische Optimierung an der Schnittstelle von Mensch und Umwelt stehen und welche sich vom gemein hin akzeptierten Grundansatz ableiten lassen, dass hochwertige Produkte auch gut klingen müssen.

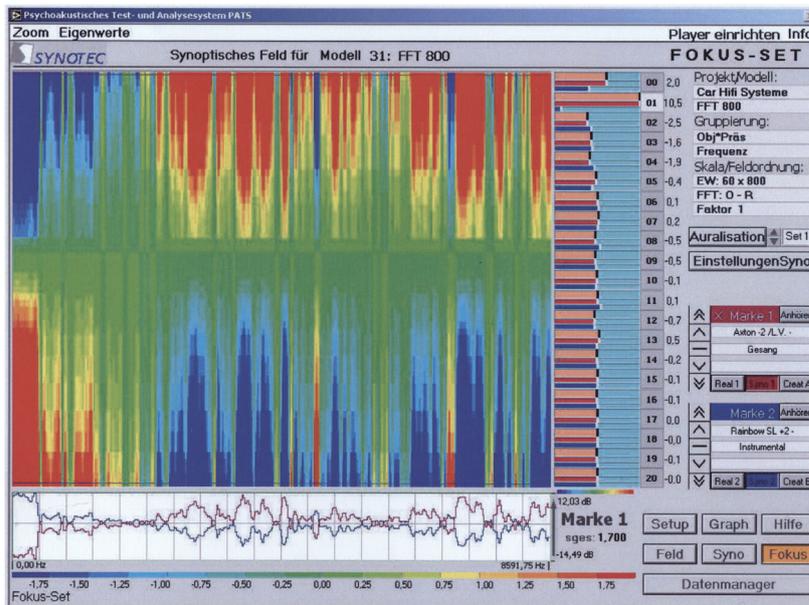


Abb. II-ab: Psychoakustisches Test- und Analysesystem PATS der Firma Synotec

So wird PATS heute zur Gestaltung und Bewertung verschiedenster Produktsounds eingesetzt. Blutner und sein Team generierten zum Beispiel spezielle Auralisationen für die verschiedenen Betriebszustände automobiler Elektromotoren (vgl. [KOLL2009]). Da diese wenig bis keine wahrnehmbaren Geräusche beim „Anlassen“, im Standlauf oder bei der Beschleunigung generieren, wurden solche Klänge wiederum unter Zuhilfenahme verschiedener Orchesterinstrumente generiert und später im PATS modifiziert (vgl. dazu [BLU2009]).

Das System lässt sich aber auch noch auf andere Objekte beziehungsweise Zielsounds anwenden, die nicht ausschließlich zur Klangerzeugung verwendet werden, oder bei denen der Produktsound nicht sofort offensichtlich von hoher Relevanz ist. So wurden verschiedene Lebensmittel und Verpackungen, wie Bier oder Schokolade und Kartoffelchips auf die speziellen Klangeigenschaften hin optimiert.

Die Relevanz solcher Ansätze beschreibt Blutner mit Sicht auf unsere neuzeitliche „Augenwelt“ wie folgt: „Akustisch stinkt unsere Kultur wie das Paris des 18. Jahrhunderts. Geräuschfetzen flattern umher, Motorengeschrei...plärrende Radios und grelles Handyklingeln. Für das Auge optimal ist die Gegenwart für das Ohr eine einzige Qual. Eine Kakophonie von Geräuschen verschmutzt unsere Umwelt“ [MZ2009].

Die Wurzeln dieser kritischen Interpretation reichen, wie einleitend erwähnt, bis zu den Klangforschungen des Kanadiers Raymond Murray Schafer zurück, der die bis dahin weitgehend unbekanntenen Konzepte der Soundscapes (Klanglandschaften) und der darauf aufbauenden akustischen Ökologie entwickelte.

Schafer hatte zu Beginn der 70er Jahre im Rahmen des von der UNESCO unterstützten „World Soundscape Projects“ an der Simon Fraser Universität in Burnaby bei Vancouver begonnen die verschiedenen akustische Erscheinungsbilder von Orten, Räumen, Landschaften und Situationen für die kommenden Generationen und zur Erforschung akustischer Identität aufzuzeichnen.

Inspirativ für die vorliegende Arbeit sind Schafers Ausführungen zum Wandel der Klangwelt durch die Verwendung verschiedener Werkstoffe. Beispielhaft deshalb an dieser Stelle wesentliche Auszüge der Abhandlung „Vom Holz zum Kunststoff“:

„Auf welchem Material eine Gesellschaft gründet, ist von zentraler Bedeutung. Jedes geografische Gebiet der Erde hat spezielle Materialien im Überfluss, die zur Herstellung von Häusern, Geräten und Kunstwerken verwandt werden: Holz, Stein, Bambus oder Metall. Wenn diese Materialien gemeißelt, geschabt, gesägt, gehämmert oder zerbrochen werden, entsteht jeweils ein charakteristisches Geräusch. ...

Wie geht der Mensch mit Holz um? In seiner *Georgica* hat Vergil einen bezeichnenden Wendepunkt in der Technik der Holzbearbeitung ausgemacht. „Nun kam das harte Eisen in Gebrauch, auch Blätter der kreisenden Säge (die Urmenschen spalteten nämlich Stammholz mit Keilen). (Vergil, *Georgica*, Stuttgart 1994, Erstes Buch, Z. 143 ff., ohne Seitenangabe.) Die nächste Stufe der Holzbearbeitung wurde vom kritischen Ohr eines modernen Dichters aufgenommen, von Ezra Pound. Er bettet seine Wahrnehmung bedeutungsvoll in seinen kriegsversessenen *Canto XVIII* (1930) ein...Und das erste, was Dave begeisterte war eine Kreissäge und er durchschnitt einen Ebenholzstamm: wusssschmtttt – zweier Tage Arbeit – in drei Minuten“ [SCHAF10].

5000-4000 v. Chr. wurden Kupfer und Zinn gemischt. Das brachte den wichtigen neuen Klang der Bronze hervor, der später seinen heroischen Ausdruck im Geräusch von Kanonen und Kirchenglocken fand. Bronze war das ursprüngliche Metall Europas. „Ab dem 7. Jahrhundert wurde Bronze für das Gießen von Glocken und anderen kirchlichen Gegenständen verwendet. Im 14. Jahrhundert waren es dann vor allem Rohre für Kanonen, die aus Bronze gegossen wurden“ [KI2013].

Der Mittlere Osten, China (in der Zeit vor der Shang-Dynastie, 1523-1027 v. Chr.) und Indien produzierten im Gegensatz dazu Messing, eine Mischung aus Kupfer und Zink. Dessen andersartiger Klang lässt sich heute in den kunstvollen Gongs und Glocken Asiens vernehmen.

„Glas erzeugt wieder eine andere Klangtypologie. Es wurde in Europa im 12. Jahrhundert eingeführt. 1448 hatten laut Aeneas Sylvius de' Piccolo mindestens die Hälfte der Häuser in Wien Fenster mit Glas. Dieses Material galt als der „weibliche“ Gegenpart zum Eisen. Seine sanften Töne wurden beim Aneinanderstoßen der Trinkpokale hörbar. Glas steht in engem Zusammenhang mit dem Verschwinden von Holz – und damit eines der wichtigsten europäischen Grundlaute, denn die Glasherstellung, wie auch das Schmelzen von Metall, machte die Rodung großer Waldgebiete notwendig. ... Im 20. Jahrhundert wurde Glas allmählich ersetzt. Erst durch Zelluloid, dann durch Kunststoff, das Allzweckmaterial von unvergleichlicher Anspruchslosigkeit, dessen Stimme sich mit einem dumpfen Schlag artikuliert“ (entnommene Passagen aus (SCHAF10)).

Bis in die heutige Zeit haben sich die synthetischen Werkstoffe stellenweise akustisch kultiviert, denkt man beispielsweise an die CFK-Violinen Blutners oder an die naturfaserverstärkten Kunststoffe, die eine gewisse akustische Verwandtschaft mit verschiedenen Hölzern aufweisen und deswegen beispielsweise als Alternative bei Terrassen verwendet werden, um ähnliche oder bessere Trittschallwerte zu erreichen. Die zunehmende Verwendung von Kunststoffen als Leichtbauwerkstoff fordert im Sinne einer ganzheitlichen Gestaltung auch eine akustische Charakterisierung und Optimierung, da sich eine gewisse akustische Aversion gegenüber solchen Leichtbauwerkstoffen bis heute nicht abstreiten lässt. Allgemeiner formuliert lässt sich erkennen, dass die akustische Umweltgestaltung, die über die Lärmbekämpfung hinausgeht und Produkte, Prozesse oder Bereiche unter Einbeziehung des Hörsinnes optimiert, an Relevanz zunimmt und auch deswegen Inhalt der vorliegenden Arbeit ist.

So spielt neben dem Acoustic Design oder der Psychoakustik die Berücksichtigung der Hörwahrnehmung und Hörgewohnheiten im sogenannten multisensuellen Design eine wichtige Rolle. Der Begriff, welcher von Peter Luckner im Rahmen eines zwischen 1999 und 2002 an der Burg Giebichenstein Kunsthochschule Halle durchgeführten Modellversuchs geprägt wurde, umfasst die Gestaltung von Produkten, Räumen und Prozessen mit allen Sinnen. Konkret bezieht das Fachgebiet Erkenntnisse aus Akustik und Olfaktorik in die Designarbeit ein und erforscht deren Einbindung in die Lehre und die Vorteile für die ganzheitlich orientierte Designausbildung. Den Begriff „Multisensuelles Design / Multisensual Design“ ließ sich Luckner, der bei seinen Forschungen neben Psychologen, Technischen Akustikern, Komponisten, Parfümeuren und Klangkünstlern auch mit Blutner kooperierte, als Marke beim DPMA (Deutsches Patent und Markenamt) eintragen.

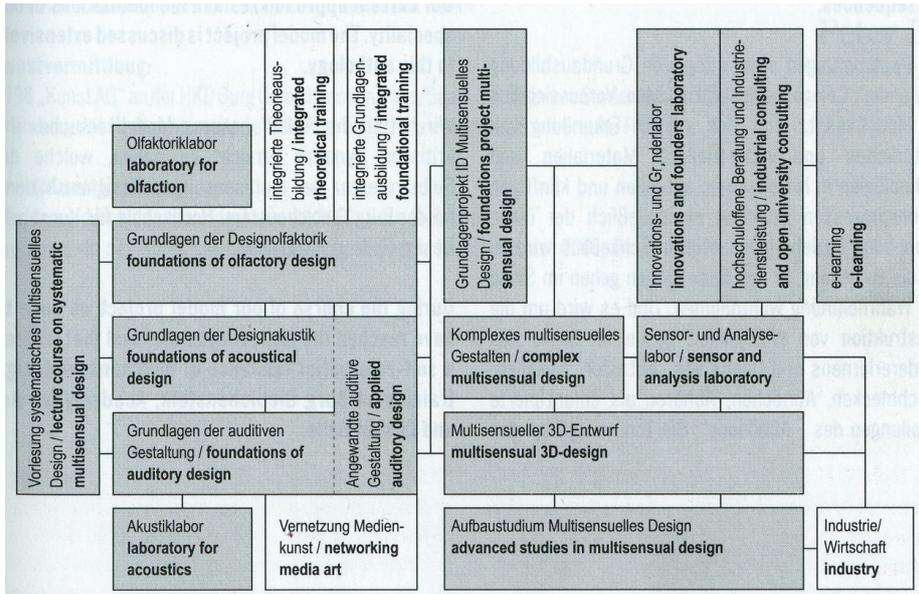


Abb. II-ac: Multisensuelles Design an der Burg Giebichenstein Halle

Heute beschäftigt sich im Sinne der Vielschichtigkeit von Sinneseindrücken auch die Experten der Marketingbranche immer verstärkter mit Theorien wie Multisensory Branding oder Multisensory Enhancement (Multisensorische Marken oder Multisensorische Verbesserung), deren Ursprünge sich zu Vance Packards 1957 erschienenem Werk „Die heimlichen Verführer“ zurückverfolgen lassen. „Packard war der Erste, der breitenwirksam erhellte, warum Kinder knackende Cornflakes lieben, Frauen bevorzugt zur roten Verpackung im Supermarkt greifen oder Menschen der Abenddrink verleidet wird, wenn das metallische „Bling“ des Flaschenhalsschilds durch das dumpfe „Klong“ des Plastiksubstituts ersetzt wird“ [WILL2015]. Auch bei solchen Marktforschungen sind geeignete Analysewerkzeuge und Datenbanken erforderlich, um möglichst interpretationsfreie Ergebnisse zu erhalten.

An dieser Stelle sei auch noch einmal auf den einleitend erwähnten Simulator Luckners verwiesen, welchen er gemeinsam mit Blutner als Simulationssystem zur Modellierung von Klängen beliebiger Gebrauchsgegenstände konzipiert hatte (siehe Einleitung). Die Grundlage für diesen Simulator ist Königs sog. „Akustischer Navigator“ welchen er zusammen mit Blutner, Eberhardt und Wenzel als Werkzeug für die Suche und Analyse großer akustischer Datenbanken in der Tontechnik entworfen hatte. Dieser nutzte dimensionsreduzierende Mappings und erweiterte interaktive Visualisierungstechniken für die Navigation und die visuelle und explorative Datenanalyse in akustischen Datenbanken. Neben der Datenbank-Projektion und Anzeige, war dort auch ein interaktiver Zugriff auf einzelne Sounds und jeweilige Vergleichsmuster vorgesehen, um die Analyse der wichtigsten Merkmale für bestimmte akustische Eindrücke zu extrahieren (vgl. [KOE2015]).

Die vorliegende Arbeit soll an der Stelle ansetzen, wo entsprechend ausgewertete und klassifizierte Daten für die dem Simulator zugrundeliegende Materialdatenbank benötigt werden.

Betrachtet man den gesamten Komplex der verschiedenen Ansätze die akustischen Erscheinungsformen von Dingen, ob gegenständlich oder nicht, zu gestalten, wird deutlich, dass an der Schnittstelle von formaler Ästhetik des Designers und funktionaler Optimierung durch den Ingenieur Nachholbedarf, vor allem hinsichtlich der akustischen Optimierung besteht. Die digitale Messtechnik, die sich seit Beginn der Jahrtausendwende etabliert, bildet dafür die wesentliche Grundlage. Eine methodische Schnittstellentechnologie – die sog. Akustische Kamera – die ein für beide Professionen geeignetes Werkzeug darstellt und welches auch im praktischen Teil der vorliegenden Arbeit Verwendung finden soll, wird deswegen im letzten Abschnitt des Kapitels eingehender beschrieben. Die grundlegende Idee, welche bei der Entwicklung dieser Systeme verfolgte wurde war mit den Augen zu hören.

Dazu erzeugte bereits eine der ersten, 1995 von Heinz entwickelten Kameras aus eingehenden Video- und Audiodaten eines Kamera- und Mikrophon-Arrays sogenannte akustische Fotos oder auch Filme, welche die reale Aufnahmesituation mit darübergelegten ortsbezogenen akustischen Einfärbungen zeigte.

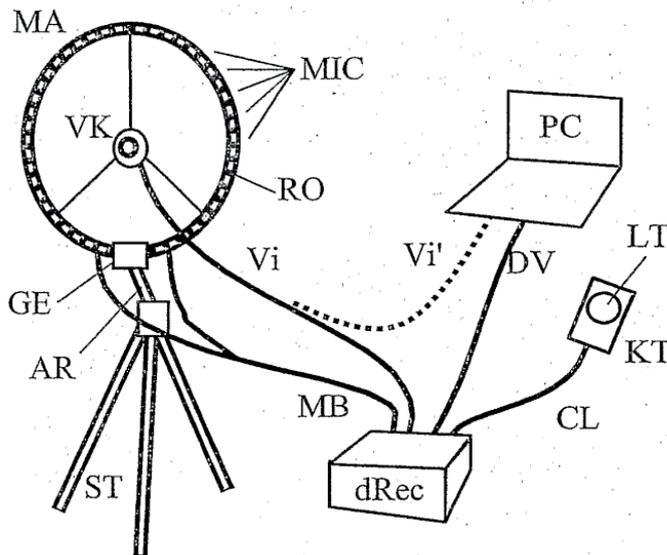


Fig. 1

Abb. II-ad: Bildliche Darstellung des im Deutschen Patent beschriebenen Verfahrens und Vorrichtung zur bildgebenden Darstellung von akustischen Objekten [HEI2004]

Das über mehrere Patente beschriebene Verfahren [HEI2004] veranschaulicht so sehr prägnant die akustischen Abstrahlungsvorgänge der jeweiligen Messsituation. Die zugrundeliegenden mathematischen Verfahren der mittlerweile zahlreich am Markt vertretenen Akustischen Kameras ermöglichen dabei aufgrund der heutigen Rechentechnik z. B. ein relativ gutes Ausblenden von Störgeräuschen oder einen recht großen Abstand von der Kamera zur Geräuschquelle. Den eigentlichen Nutzwert des Messsystems generieren demnach die verschiedenen Analysemethoden und Algorithmen für die entsprechenden Imaging Software-Module. Diese ermöglichen zum Beispiel die gezielte Beseitigung oder Isolierung störender Schallquellen und des Eigenrauschens der Mikrofone durch Autokorrelation.

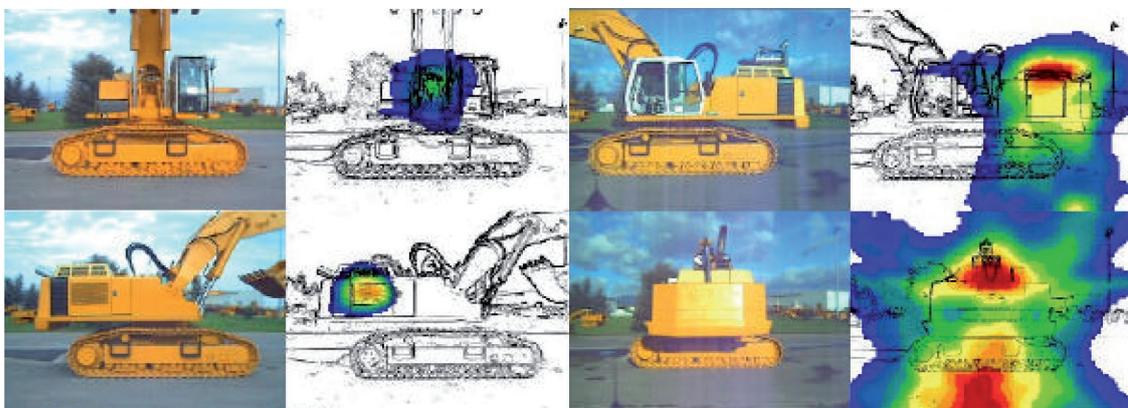


Abb. II-aj: Beispiel für klassische Lärmanalyse mittels Akustischer Kamera: Vier A-bewertete, auf gleiche Schalldruckskala normierte Baggeraufnahmen.

Je nach Spezifik der Aufgabenstellung können solche Softwaremodule z. B. auch ortsbezogene Klanganalysen durchführen. Gerade solche Werkzeuge sind für Arbeiten im designakustischen Bereich interessant. Die akustische Kamera – anfangs für die Lärmanalyse von Maschinen genutzt – wird durch eine wachsende Forschungsgruppe bis heute hinsichtlich verschiedenster Applikationen systematisch weiterentwickelt, sodass die verschiedenen Systeme zu immer leistungsfähigeren Analysewerkzeugen werden. Auch hinsichtlich der für diese Arbeit relevanten Aspekte stehen bereits nutzbare Werkzeuge zur Verfügung, wie beispielsweise Toolboxes für die Analyse klassischer psychoakustischer Parameter.

Der eingangs erwähnte Heinz nutzte das System im weiteren wahrnehmungsbezogenen Kontext gemeinsam mit Blutner, um Schallbilder und Schallfilme von Musikdarbietungen zu untersuchen [HEI2007]. Die dabei beobachteten vermeintlichen Fehlerbilder durch Beugung und Aliasing stellten sich dabei eher zufällig als die von trainierten Ohren wahrnehmbaren sogenannten „aufsteigenden und abhebenden Klänge“ heraus.

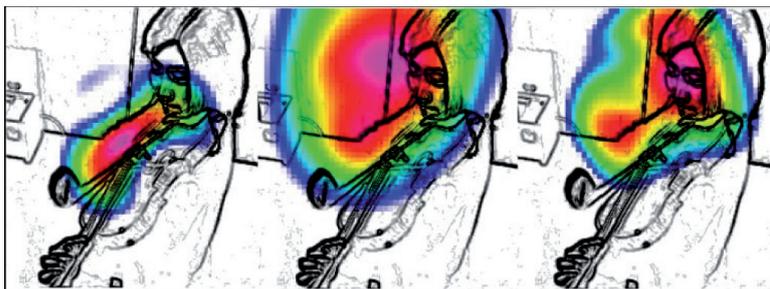


Abb. II-af: Beugung und Feldverschmelzung der Geige bei kurzen Integrationszeiten (40 ms), Filmausschnitte; In der Mitte ist der abhebende Klang zu erkennen.

Heinz dazu: „Als ich mich gerade über einen wegspringenden Fleck ärgerte und mutmaßte, dass es sich um Beugung durch „schiefe“ phasengeschobene Wellenfelder oder um Aliasing handeln muss, belauschte ich zufällig ein Gespräch zwischen Herrn Blutner und dem mitschneidenden Tonmeister Knut Becker. Dieser lobte die Transparenz der Geige x in Szene y. „insbesondere gefalle ihm, dass der Klang abhebt und im Raum steht. Die Geige wirke dadurch sehr lebendig und voluminös.“ Noch vor fünf Minuten hätte ich dieses Gespräch nicht für voll genommen. Die gerade beobachteten Erscheinungen aber deckten sich mit Knut Beckers Erörterungen. Offenbar hören Tonmeister sehr genau zu, ihr Gehör ist trainiert“ [HEI2001].

Im praktischen Teil der Arbeit soll das System in ähnlicher Form verwendet werden, um die Anregungsmechanismen, bzw. deren akustische Auswirkungen zu untersuchen. Es wird vermutet, dass sich so beispielsweise Rissinitiierungsprozesse und Energiefreisetzungen in Form von Schwingungen mit Hilfe der akustischen Kamera sehr gut visualisieren und auswerten lassen.

Die akustische Kamera steht exemplarisch für die heutigen Forschungsmöglichkeiten mit Hilfe komplexer Datenverarbeitung und schnellen, hochauflösenden Messungen. Reizvoll und interessant erscheint dem Autor vor allem das Potenzial hinsichtlich Untersuchungen zur wahrnehmungsbezogenen Akustik, die sich mit Einleitung der großen Erkenntnisse auf dem Gebiet der technischen Akustik langsamer, beziehungsweise sehr branchenspezifisch weiterentwickelte. Die vorliegende Arbeit stellt einen Beitrag dar, um diese Lücke zu schließen.

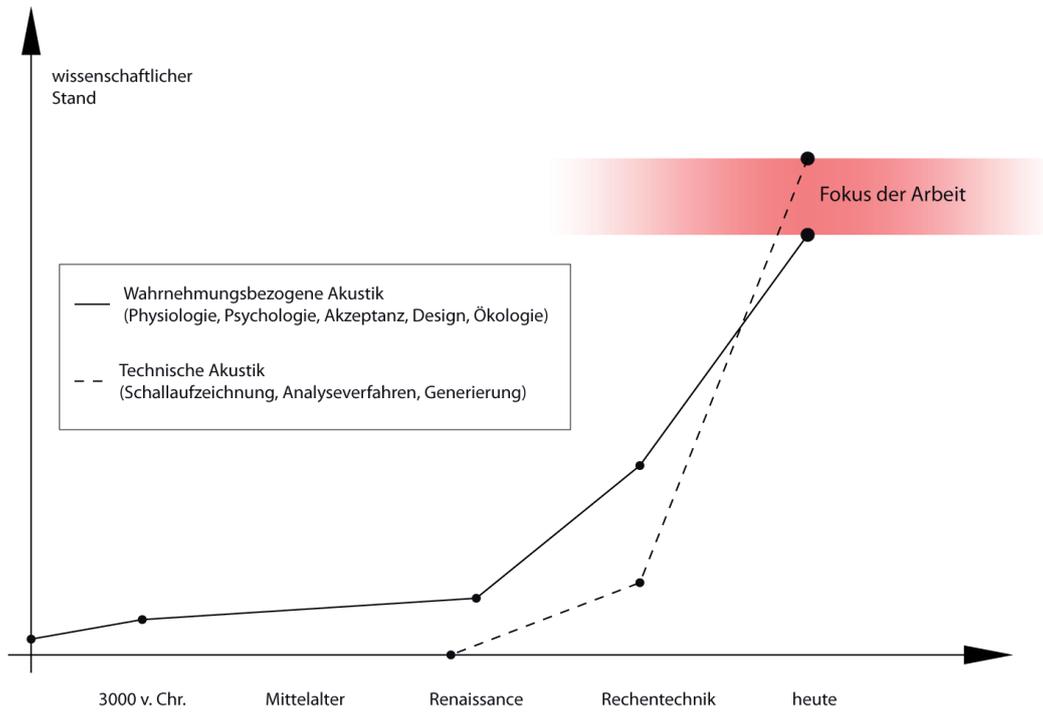


Abb. II-ag: Visualisierung der Potenziale der Technischen Akustik in Bezug auf die Ziele der Arbeit im wahrnehmungsbezogenen Bereich

1 DEFORMATIONSVERHALTEN VON WERKSTOFFEN

„Nicht was, sondern wie man erträgt, ist wichtig.“

[FIN2006]

1.1 Einleitung

Wie bereits einleitend erwähnt, befasst sich die Arbeit mit der Untersuchung des akustischen Verhaltens ausgewählter faserverstärkter Leichtbauwerkstoffe, deren Unterscheidung über die klanglichen Werkstoffeigenschaften und Untersuchung der Akustik unter Last. Diese sollen hinsichtlich der Verbreitung im Design eingegrenzt und bezüglich der beabsichtigten Bearbeitungstiefe genauer spezifiziert werden, um so eine Matrix für die anschließenden deformations- und bruchmechanischen und akustischen Untersuchungen zu definieren. Anhand der daraus gewonnenen Erkenntnisse zu materialtypischen Fehlerarten und Rissinitiierungs- und Versagensmechanismen können die akustischen Signalanalyseverfahren und Bewertungsmodelle im folgenden Kapitel gezielt ausgewählt beziehungsweise erstellt und interpretiert werden.

1.2 Eingrenzung und Definition der Werkstoffmatrix

Generell handelt es sich bei einem sogenannten Werkstoff um ein homogenisiertes Modell des betrachteten komplexen Materials oder einer Materialkombination. Im Falle der Faserverbundwerkstoffe werden Faser- und Matrixmaterialien zu einem speziell angepassten Werkstoff kombiniert. Für beide Komponenten stehen eine Vielzahl von Materialien und leichten Materialabwandlungen zur Verfügung. Gerade bei den verschiedenen Kunststoffen und Harz-Härter-Systemen existieren zahlreiche, an die Anforderungen des zu generierenden Werkstoffs angepasste Rezepturen. Die grundlegenden Untersuchungen werden sich deshalb im Bereich der synthetischen Faserverbundwerkstoffe weitestgehend auf gebräuchliche und weit verbreitete Systeme konzentrieren, um eine möglichst große Bandbreite abzudecken.

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich faserseitig hauptsächlich auf die meistgenutzten Arten – Kohle-, Glas- und Naturfasern. Die seltener verwendeten Spezialfasern, wie Aramid oder Keramik/ Basalt bleiben außen vor.

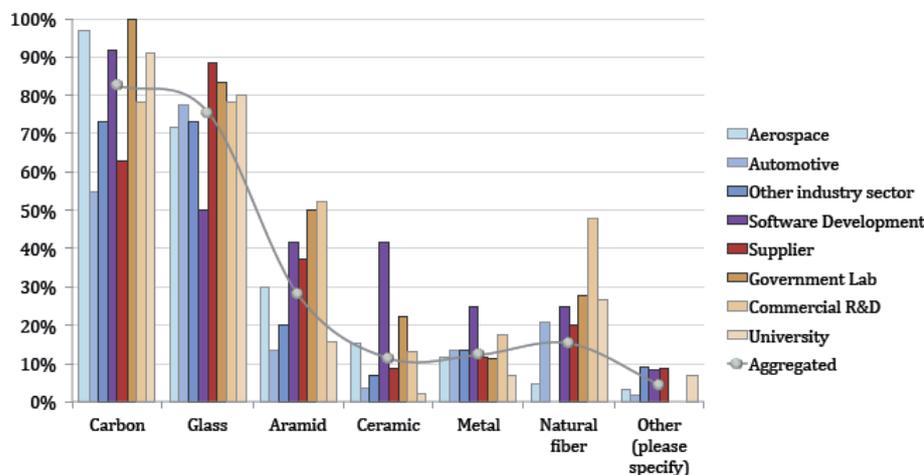


Abb. 1.2.a: Umfrageergebnis NAFEMS Composites Working Group, Survey 2012

Die Werkstoffauswahl wird darüber hinaus durch tierisches Knochenmaterial ergänzt, welches hinsichtlich der entwicklungsgeschichtlichen Relevanz bei der Herausbildung von psychoakustischen Empfindungen und als Modell für mikrokonstruktive Auswirkungen auf die Akustik einer gesonderten Betrachtung unterzogen wird. Dieser Werkstoff ist durch die Fasereinlagerungen des mineralischen Hauptbestandteils Hydroxylapatit im Knochen in gewisser Weise mit keramischen Faserwerkstoffen vergleichbar.

Darüber hinaus wird natürlich Holz, in seiner Rolle als bereits gebräuchlicher Leichtbauwerkstoff und nachhaltiger Zukunftswerkstoff in Architektur und Design mit in die Untersuchungen einbezogen. Auch in diesem Falle bietet die Natur eine breite Varianz vor allem bezüglich der Faserdichte, -orientierung und -dimensionierung. Die folgende Übersicht soll die beschriebene Kategorisierung verdeutlichen.

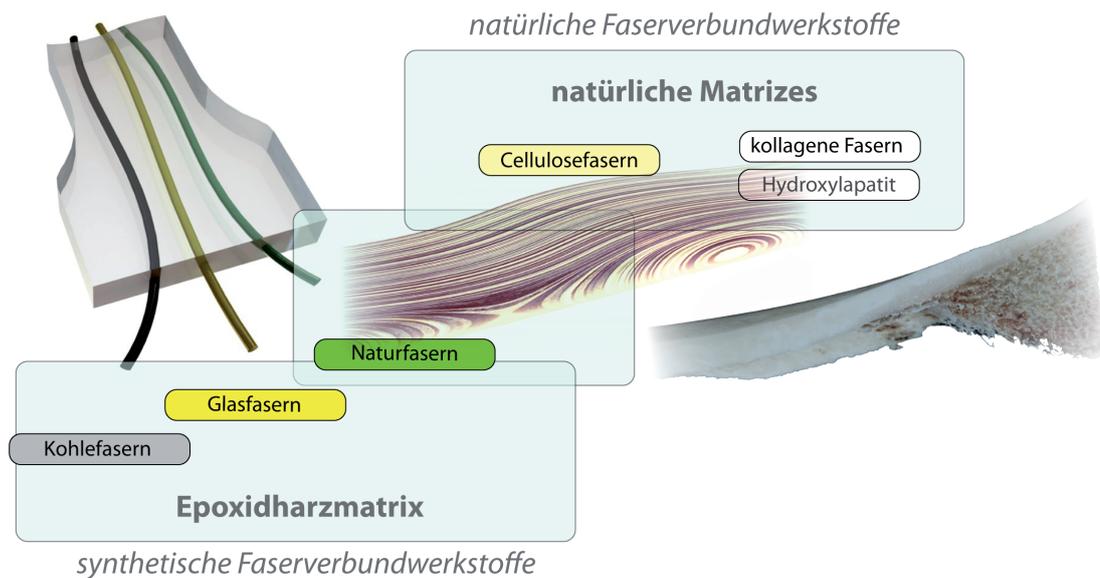


Abb. 1.2.b: Faser-Matrix-Kategorisierung für die Arbeit

1.2.1 Synthetische Faserverbundwerkstoffe

Faserverbundwerkstoffe sind ein Teil der weitaus umfangreicheren Familie von Verbundwerkstoffen. Als solche bezeichnet man Werkstoffe, in denen sich auf makro- bis mesoskopischer Größenordnung mehrere Komponenten mit verschiedenen Gebrauchseigenschaften wie Fasern, Metalle, Keramik, Glas und Polymere miteinander verbinden, um einen Werkstoff zu generieren, der funktionell günstigere Eigenschaften hat, als die einzelnen Komponenten allein. Die wesentlichen Bausteine des Faserverbundwerkstoffs sind Matrix und Fasern. Erstere, welche die Fasern integriert, setzt sich meist aus Harz, Härter und Beschleuniger zusammen und wird mittels dieser Komponenten hinsichtlich der werkstofflichen Parameter gesteuert.

Die allgemein als Faser bezeichnete Komponente setzt sich aus zahlreichen Einzelfasern, sogenannten Filamenten zusammen. Ein Carbonfilament hat einen Durchmesser von circa 6-12 μm . Zur weiteren Verwendung werden diese dünnen Fasern zu Filamentgarnen, sogenannten Rovings, zusammengefasst.

Gängige Rovingtypen bei industriellen Anwendung sind zum Beispiel 200tex (3K), 800tex (12K) oder 1600tex (50K). Die Angabe „tex“ repräsentiert das Gewicht in g/m. Die Zahlenangabe „K“ erfasst, wie viele Einzelfasern zum entsprechenden Garn zusammengefasst sind, wobei der Buchstabe den Faktor 1000 repräsentiert.

Rovings wiederum können dann zu Tapes (Bänder), Schichtwerkstoffen, Laminaten oder verschiedenen Textilarten konfektioniert werden. Ziel der weiteren Verarbeitung ist es dabei die Faserlagen vorzugsweise längs der Kraftwirkungslinien anzuordnen, um so gezielt anisotrope, bzw. in diesem Falle transversal isotrope Werkstoffeigenschaften zu erzeugen. Solche Gelege werden als UD-Schichten (unidirektional) bezeichnet. Hin zu quasi-isotropen Faserverbundwerkstoffen mit gleichverteilten Längs- und Querfasern existieren zahlreiche Zwischenformen von Gelegen, welche dahingehend anhand der Faserrichtungsanteile klassifiziert werden ($0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ$ – z. B. 100/100/0/0 bedeutet quasi-isotrop).

Aus diesen entstehen dann wahlweise durch Tränken, Bestreichen oder Infusion mit Matrix-Material die Laminatwerkstoffe, die aus zwei oder mehreren flächig miteinander verklebten Schichten bestehen.

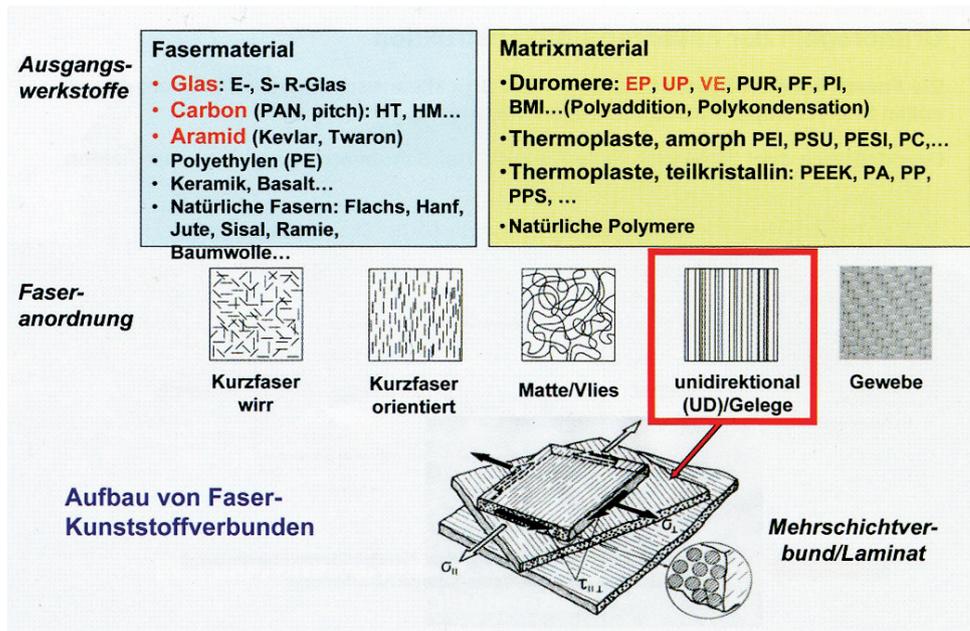


Abb. 1.2.1.a: Aufbaubeispiele von Faser-Kunststoffverbunden

Einer der wesentlichen Vorteile von faserverstärkten Kunststoffen liegt in der geringeren Dichte im Vergleich zu Metallen bei vergleichbarer oder höherer Steifigkeit und Festigkeit. Dies kann aber, wie eingangs erwähnt auch zu akustischen Problemen bei schwingenden Bauteilen führen und mit Sicht auf die Mikroakustik treten ggf. Mikrobrüche oder Mikroreibungseffekte auf. Der Vorteil, dass bei einem Laminat die Bauteil-Eigenschaften, wie zum Beispiel das Dämpfungsverhalten, quasi eine konstruierbare Eigenschaft darstellen, kann dem entgegenwirken. Dies gilt aber zum Beispiel nicht für die einzelnen Gelege-Schichten. In diesem Falle verhält sich der Werkstoff, beziehungsweise das Bauteil akustisch nachteilig, weil der Eigendämpfungsanteil äußerst gering ist. Mit erweiterten Kenntnissen über das akustisch differenzierte Verhalten verschiedener Werkstoffe unter typischer Anregung, wie sie in dieser Arbeit erschlossen werden sollen, wird deren Akustik so quasi konstruierbar.

Ein klangliches Beispiel, wie sich dieser technisch betrachtete Nachteil aus materialgestalterischer Sicht vorteilhaft nutzen lässt, ist der akustisch identische Nachbau einer Stradivari-Violine von F. Blutner aus Kohlefaserwerkstoffen (näherer Informationen bei Synotec Psychoinformatik GmbH). Hier bestimmt das ausgewogene Verhältnis der Werkstoffanteile den klanglichen Charakter. Ein weiterer Nachteil ergibt sich aus dem Deformationsverhalten und dem damit verkoppelten akustischen Verhalten unter Last. Im Gegensatz zum plastischen Verhalten von tragenden Metallbauteilen entstehen bei Bauteilen aus faserverstärktem Kunststoff höchstens kleinere quasi-plastische Verformungen, welche aus unter Last entstehenden Mikrorissen resultieren. Dieser quasistatische Lastfall ist nutzerseitig schwer einschätzbar, da die wesentlichen Versagensindikatoren, die einer strukturellen Zerstörung vorausgehen, sowohl optisch als auch akustisch kaum oder nur unmittelbar vor dem Bruch wahrnehmbar sind. Beim Gebrauch oder in Benutzung ist dieser Werkstoff also nicht nur technisch, sondern auch akustisch anspruchsvoll.

„Aus mikromechanischer Sicht existieren in jedem Faserverbundbauteil bereits unmittelbar nach seiner Herstellung Myriaden von kleinen „Brüchen“, die von Verspannungen zwischen Fasern und Matrix infolge des Reaktionsschwunds des Matrixmaterials und von Abkühlspannungen verursacht wurden. Spätestens bei den ersten Belastungen des Bauteils treten weitere Mikro-Schädigungen hinzu, meist in Form kleiner ... Risse in der Matrix und stellenweiser Ablösungen der Matrix von der Faser“ [PUC1996]. Der tatsächliche Werkstoff ist zudem durch verschiedenartige Inkonsistenzen oder Werkstofffehler strukturell geschwächt oder verändert, sodass gerade dort mit verstärktem Risswachstum und akustisch auffälligem Verhalten zu rechnen ist. Folgend sind deshalb die möglichen Fehlerarten synthetischer Faserverbundwerkstoffe im Meso- und Makrobereich aufgelistet und beschrieben, die bei den weiteren Untersuchungen beachtet werden müssen.

1. beschädigte Fasern oder Knoten in der Faserverbundstruktur (+++)
2. Faltenbildung, genannt Ondulation (+++)
3. trockene beziehungsweise harzarme Bereiche, bei vorbelasteten Teilen Delaminationen, nicht haftende, aber geschlossene Grenzflächen, genannt kissing bonds (+++)
4. Blasen und Einschlüsse von Fremdkörpern (++)
5. Abweichungen vom Soll-Faservolumengehalt bzw. ungleichmäßige Harzverteilung zwischen den Fasern, zum Beispiel ungleichmäßige Verteilung der Fasern an den Kanten und in Radien eines Bauteils (++)
6. nicht ausreichende Oberflächenqualität (+)

Diese Fehlerarten (mit Wichtung akustischer Relevanz/ Klangbeeinflussung) wurden in den aufgeführten referenziellen Experimenten mit Hilfe röntgentomografischer Aufnahmen an neuartig Probekörpern aus thermoplastischen Faserverbundwerkstoff genauer untersucht und an verschiedenen Strukturen nachgewiesen. Dazu wurden verschiedene Probekörper herangezogen, welche stufenweise in der strukturellen Komplexität steigen. Von der ebenen Platte über das gewickelte Rohr, hin zur freigeformten Kalotte treten die beschriebenen Werkstofffehler in dabei unterschiedlichen Kombinationen und verschiedenen Orten im jeweiligen System auf. Dies hat hinsichtlich der tragwerksorientierten Verwendung der verschiedenen Systeme, wie Platte, Säule, Rahmen, Träger oder Kuppel Auswirkungen auf die Rissinitiierungsprozesse und Reibungsereignisse an Fehlstellen und damit auch auf die gestalterischen Aspekte der Geräusch- und Klangeigenschaften der daraus gefertigten Gebrauchsgegenstände.

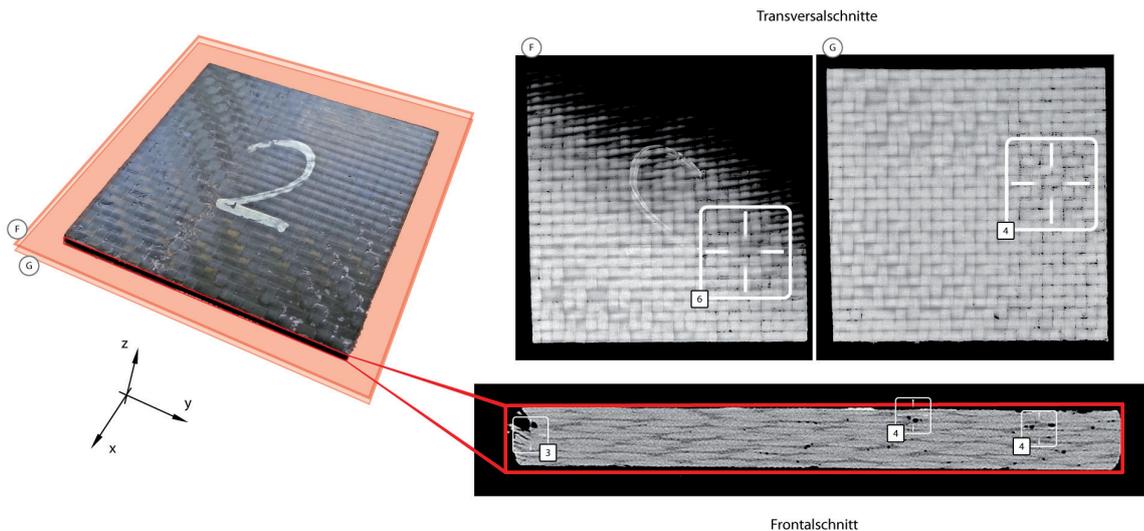


Abb. 1.2.1.b: Röntgentomografische Schnittbilder durch eine Platte aus thermoplastischem Faserverbundwerkstoff mit nachfolgender Fehlerklassifikation des Autors

Bei der im ersten Beispiel untersuchten Platte, welche im Gebrauch durch Biegung beansprucht wird, zeigen sich die für Faserverbunde typischen Delaminationsbereiche (3), welche im speziellen Fall durch unzureichend verklebte Randbereiche a priori vorhanden sind.

Durch den speziellen Fertigungsprozess, bei welchem ein Laser das thermoplastische Matrixmaterial der Prepreglagen aufschmilzt, sind im zentralen Teil des Prüfkörpers Blasen- und Einschlüsse vorhanden (4). Das Fehlen von Matrix an der oberen und unteren Fläche kann äquivalent dazu eine unzureichende Qualität der Oberflächen verursachen (6). Entsprechende akustische Signale sind durch Riss-Initiierung in den Fehlerbereichen 3 und 4 zu erwarten.

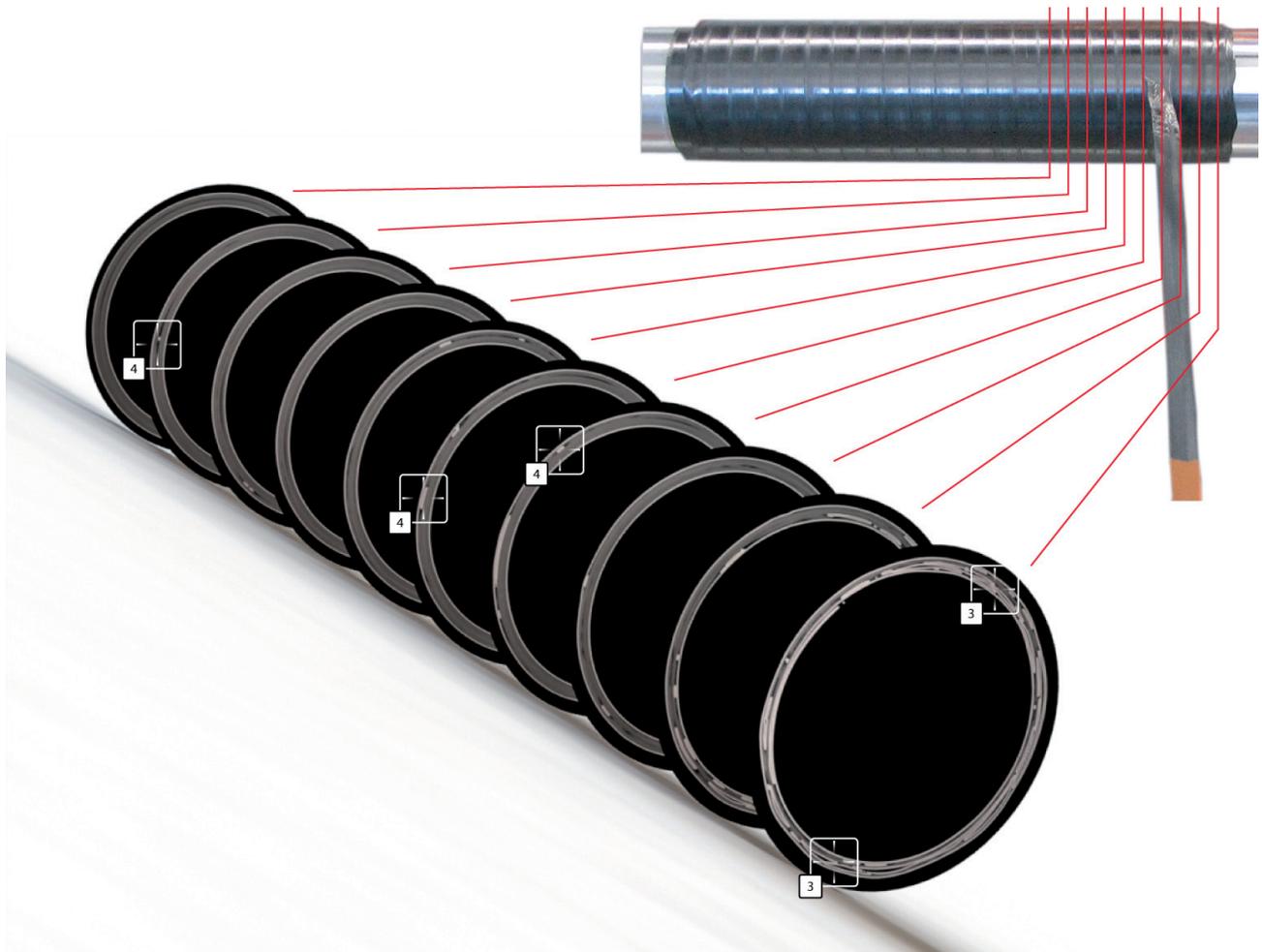


Abb. 1.2.1.c: Visualisierungsstudie des Autors zur Fehleridentifikation und -zuordnung auf Basis röntgentomografischer Untersuchungen an der RWTH Aachen

Was sich beim Wickelprozess zur Fertigung eines Rohres vollzieht, ist in Abb. 1.2.1c veranschaulicht. Auch hier existieren die für einen Prozessbeginn oder Abbruch typischen Delaminationen an den Werkstückenden (3). Durch die stetige einachsiale Krümmung des Fasermaterials im Fertigungsprozess und den damit verbundenen Zug beim Auflegen der Faser treten im Material kaum alleinstehende Blaseneinschlüsse auf. Diese finden sich meist an den Randzonen von Fremdkörpereinschlüssen (4) wieder. Die Oberflächenqualität ist hier durch den gleichmäßigen Wickelprozess gesteuert. Typischerweise werden derart faserorientierte Rohre durch Zug und Druck beansprucht, was aufgrund der hohen Kräfte kaum zu einem direkten Feedback bei Benutzung führt. Aber gerade komplexere Rohrstrukturen aus solchen Einzelelementen, wie zum Beispiel Rahmen, emittieren durch teilweise aufgebrauchte Querkräfte oder Torsionsbeanspruchungen bei Gebrauch akustische Signale.

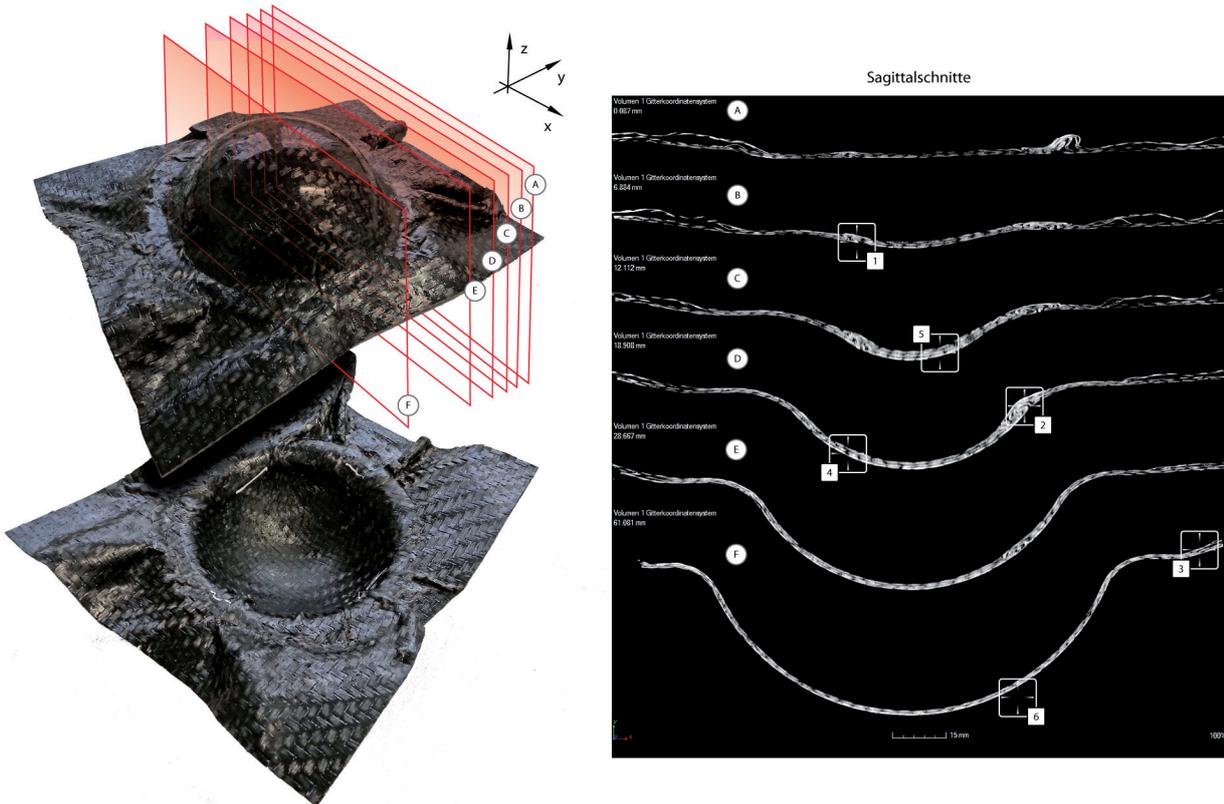


Abb. 1.2.1.d: Darstellung der komplexen Fehlerbilder bei frei geformten Bauteilen, hier am Beispiel einer thermogeformten Kalotte aus Faserverbundwerkstoff

Als technisch aufwändig und fehleranfällig stellt sich die Herstellung dreidimensionaler Strukturen, wie die der Kuppel in Abb. 1.2.1.d dar. Durch die komplexere räumliche Struktur des Matrize-Partirze-Systems beim hier angewandten Formpressen von ebenen Gelegen finden sich im Formteil häufig Ondulationen in den Stauchungszonen (2) und beschädigte Fasern oder Ausdünnungen der Faserverbundstruktur in Bereichen großer Gelege-Streckungen. Matrixbezogen bilden sich durch Passungenauigkeiten in der Form, bzw. geometriebedingte Materialanhäufungen Zonen höchster Pressung aus, die dann wiederum Abweichungen vom Soll-Faservolumengehalt (5) aufweisen. Das inverse Fehlerbild ergibt sich in Bereichen mit Materialmangel. Generell lässt sich auch bei dieser Struktur feststellen, dass überall dort, wo keine ausgewogenen Verhältnisse im Faser-Matrixsystem vorherrschen, potenzielle Ursprünge für Rissinitiationsprozesse liegen, die relevante Gebiete mit stärkerer akustischer Aktivität unter Last im Sinne der Arbeit darstellen.

1.2.2 Natürliche Faserverbundwerkstoffe

Die grundlegenden mechanischen und werkstofflichen Erkenntnisse bei der Entwicklung faserverstärkter Kunststoffe basieren auf den Baustoff-Forschungen zu den Laub- und Nadelhölzern, die vor allem im letzten Jahrhundert intensiviert wurden. Neben diesen werden in den letzten Jahrzehnten in Design und Architektur auch verstärkt verschiedene Bambusarten verwendet, ein Material, welches mit seinen mechanisch-technischen Eigenschaften dem Bauholz weit überlegen ist, jedoch technologisch schwerer handhabbar scheint. All diese Hölzer lassen sich in die Klasse der natürlichen Faserverbundwerkstoffe einordnen und sollen an dieser Stelle aus werkstofflicher Sicht beschrieben werden, da sie nicht nur die Vorlage für die synthetischen Faserverbunde darstellen, sondern in Architektur und Design weit verbreitet sind und somit hinsichtlich ihres akustischen Verhaltens in dieser Arbeit untersucht werden.

Das grundlegende Prinzip des Faser-Matrix Verbundes definiert sich im Holzwerkstoff durch den Zellaufbau. Mikroskopisch betrachtet stellt dabei der Zelluloseanteil der Zellwände den Faseranteil im Material. Dieser liegt bei den meisten Laubhölzern zwischen 50-60 % und bei den Nadelhölzern zwischen 90-95 % (vgl. [SCFR2008]). Die Zellulosemoleküle lagern sich zu reißfesten Fasern zusammen, welche in der voranschreitenden Wachstumsphase durch die Einlagerung von Ligninen verklebt werden und dadurch verholzen. Durch diese Faserintegration wird das Holz versteift und erhält seine Härte und Druckfestigkeit. Der Lignin-, oder technisch interpretiert, der Matrixanteil liegt bei ca. 25 % der Holzsubstanz. Lignin besteht aus phenolischen Makromolekülen und zählt im Sinne der werkstofflichen Unterscheidung zu den Biopolymeren auf welche im Abschnitt Naturfaserwerkstoffe hinsichtlich der verschiedenen Biomatrizes näher eingegangen wird.

Vergleicht man diese mit den beschriebenen synthetischen Faserverbunden fällt auf, dass der Faservolumenanteil bei Holz höher liegt, da sich der Faservolumenanteil bei der Auslegung von Handlaminaten meist um die 60 Prozent bewegt, der Matrixvolumenanteil entsprechend um die 40 Prozent. Bei den mit Holz vergleichbaren Faseranteilen würden diese so dicht liegen, dass der komplette Werkstoff nicht mehr komplett von der Matrix durchtränkt werden kann. Fertigungsoptimierte Verfahren wie die sog. Prepreg-Technologie, bzw. das Vakuum-Infusionsverfahren oder Faserwickel- oder Tape-Verfahren erreichen heute die Werte von Holz. Eine weitere Besonderheit des Holzes ist die röhrenförmige Struktur der Holzzelle, bzw. der Hohlraum, Lumen genannt, im Inneren der umschließenden Zellwand. Dieser kann je nach Holzzustand mit Wasser oder Luft gefüllt sein, was die mechanischen und akustischen Eigenschaften von Grund auf sehr stark beeinflusst. Dieser Parameter beeinflusst zudem im Sinne der Arbeit sowohl das klang-, als auch das bruchakustische Verhalten. Deswegen spielen der Feuchtgehalt und die gleichmäßige Trocknung in der Holzverarbeitung eine wichtige Rolle. Auf der anderen Seite wird dieser Aspekt bei der Herstellung dreidimensional verformter Baugruppen ausgenutzt, um dauerhaft formverändertes Vollholz zu generieren (siehe Abb. 1.2.2.a).

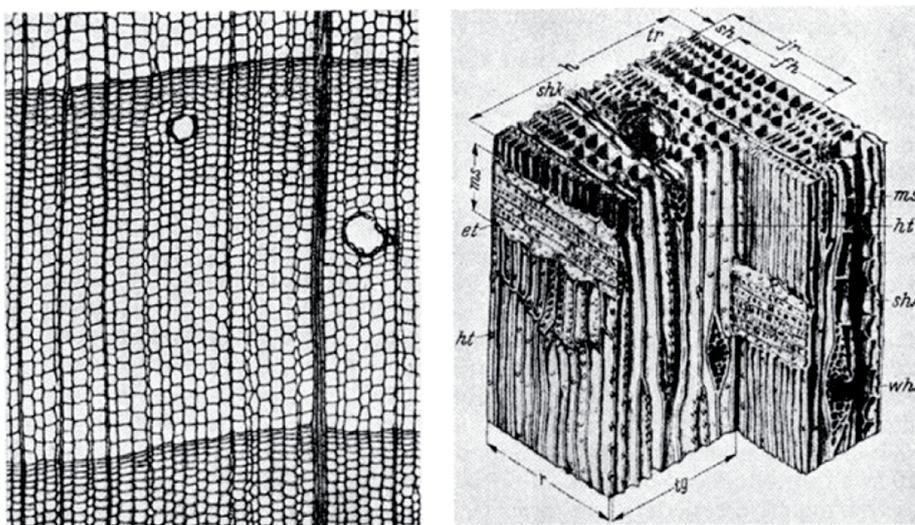


Abb. 1.2.2.a: Querschnitt durch Nadelholz zur beispielhaften Beschreibung der Faserstruktur

Der grundsätzliche Aspekt, der bei der individuellen Verwendung dieses hochwertigen Leichtbauwerkstoffs beachtet werden muss ist, dass Holz ein inhomogener und anisotroper Stoff mit keinem einheitlichen Gefüge ist. „Das Zellwachstum und der Zellaufbau ist durch seine Aufgabe als Tragstruktur für den Baum und die Umwelteinflüsse am Wachstumsstandort geprägt“ [RAN2007]. Genau das kann bei seiner Konvertierung zum räumlich normierten Halbzeug oder allgemein zum Werkstoff von der optimierten Bionik des Baumes im Detail zum Fehler im Tragwerk umschlagen. Nach Ranz [RAN2007] werden deswegen z. B. als Holzfehler alle Abweichungen von der normalen Struktur, Textur und Farbe verstanden und in folgende Arten eingeteilt:

1. Fehler der Stammform: Krummschaftigkeit, Gabelwuchs, Abholzigkeit, Hohlkehligkeit
2. Anatomischer Fehler: Unregelmäßiger Jahrringbau, Rot- bzw. Druckholz, Drehwuchs, Maserwuchs, Harzgallen, Falschkerne, Astigkeit
3. Fehler durch äußere Einwirkungen: Luft-, Strahlen-, Ring-, Hitze- und Frostrisse, Blitzschäden, Schnee- und Sturmschäden (Faserstauchungen), Rinden- oder Sonnenbrand, Überwallungen, Schädlingsfraß

Je nach Sortierung finden sich diese Fehler im Zuschnitt von sog. Vollholz-Halbzeugen, wie Kanthölzer, Latten oder Furnieren wieder und beeinflussen das mechanische und auch das akustische Verhalten unkontrolliert. Um den Holzwerkstoff weitgehend zu homogenisieren wird das Vollholz bei der Herstellung von verschiedensten Holzwerkstoffen in unterschiedlichen Graden zerkleinert, um durch das anschließende Zusammenfügen der Strukturelemente einen in seinen Eigenschaften gezielt definierten Werkstoff zu erhalten. Dabei entscheiden die Größe und Form der Holzpartikel über Art des Holzwerkstoffes und seine Eigenschaften. Die Gleichmäßigkeit, die bei zunehmendem Aufschluss steigt, führt im Gegenzug zur Verringerung der Festigkeit und mit Sicht auf die akustischen Eigenschaften zu einer Erhöhung der Schalldämpfung durch das Material. Diese ist durch die Erhöhung der akustischen Impedanz durch die Vielzahl neuer Übergangsflächen zwischen Faser und Matrix erklärbar, wobei auch die stufenweise Erhöhung der Isotropie der Halbzeuge eine Rolle spielt. Bei gewachsenen Hölzern lassen sich so Schallgeschwindigkeiten von 4000 bis 6000 m/s parallel zur Faser, aber lediglich 400 bis 2000 m/s quer zur Faser nachweisen. Die weiteren Einflussparameter auf die Schallgeschwindigkeit, bzw. die akustischen Eigenschaften sind hier – neben den bereits erwähnten Holzfehlern und dem Feuchtegehalt – Faserlänge und Faserwinkel, Dichte und Elastizität.

Im ersten Homogenisierungsgrad der Holzwerkstoff-Herstellung finden sich die Brettschichthölzer oder Stab- und Furnierhölzer die in ihrer integrierten Form noch stark mit dem Vollholz vergleichbar sind aber vor allem die Fehler der erstgenannten Kategorie beseitigen. Hier werden auf makroskopischer Ebene im Meter- und Zentimeterbereich Leisten, Bretter oder Stäbe miteinander verleimt, um so Werkstoff-Halbzeuge zu erhalten. Diese sind entsprechend der einheitlichen Faserausrichtung der Einzelelemente anisotrop, wie der gewachsene Stamm aber wesentlich verzugs- und fehlerfreier. Werden die unterschiedlichen Schichten in ihrer Faserausrichtung um jeweils 90° gedreht, also gesperrt, entstehen die sog. Sperrhölzer, die je nach Lagenzahl und spezieller Herstellung als Furnier-, Tischler- oder Multiplex-Platte bezeichnet werden. Sie sind mit dem makroskopischen Aufbau der synthetischen Faserverbundplatten aus den beschriebenen UD-Gelegen vergleichbar. Auch hier werden die richtungsgebundenen mechanischen Werkstoffeigenschaften, aber auch das Quell- und Schwindverhalten über die Plattenebene homogenisiert.

Nach dem Stand der Technik werden zur Diagnose des Zustandes und zur Prüfung der genannten Holzwerkstoffe die erwähnten Messungen von Schall-Laufzeiten, bzw. daraus entwickelte Schalltomographie-Verfahren eingesetzt. (vgl. [SON2003] „Schallemissionsuntersuchungen an Biegeproben aus sturmgeschädigten Fichten“). Mit Sicht auf die Arbeit sind jedoch eher die vorgelagerten Rissinitiierungsprozesse und daraus resultierende, hörakustisch wahrnehmbare Schädigungsgeräusche relevant. Als Praxis-Beispiel sei die sog. „Warnfähigkeit“ des Holzes bei Erreichen von circa 70 % der Bruchgrenze genannt, ab welcher das „Knistern“ aufgrund der irreversibel schwindenden Längsdruckfestigkeit hörbar wird (u. A. erwähnt in [MEI2006]).

Die nächsten Stufen der Homogenisierung werden entsprechend der kleineren zu integrierenden Einzelelemente wie Sägenebenprodukte oder Pflanzenholzfasern als Holzspan- und Holzfaserverwerkstoffe bezeichnet. Die Späne oder Fasern werden bei der Fertigung verpresst, wobei die Faserintegration bei den gröberen Partikeln über verschiedene Klebstoffe realisiert wird. Der strukturelle Zusammenhalt bei der Verpressung feiner Fasern basiert hingegen oft lediglich auf der Verfilzung der Holzfasern und den holzeigenen Bindekräften, die durch Wasser und Wärme im Fertigungsprozess temporär deaktiviert werden. Die Grundform der Papierherstellung basiert auf diesem Prinzip. Durch den Grad der Pressung sind große Dichtevarianzen von 230 - 350 kg/m³ bis 800 kg/m³ erreichbar.

Durch die Homogenisierung und reproduzierbare Fertigungsverfahren sind mittlerweile eine Vielzahl dieser Werkstoffe, wie zum Beispiel die verschiedenen Spanplatten, normiert. (siehe EN 309:2005)

Die Holzspan- und Holzfaserverwerkstoffe sind vom makroskopischen Aufbau und von den mechanischen Eigenschaften am ehesten mit Matten-Gelegen (z. B. aus Wirrfaservlies) aus der Familie der synthetischen Faserverbunde vergleichbar.

Als akustische Methoden zur Prozesssicherung und zur qualitativen Beurteilung haben sich nach heutigem Stand vor allem spektrale Methoden durchgesetzt, welche zur Signalanalyse- und Merkmalextraktion verschiedene Rechenmodelle und -verfahren einsetzen. Beispielhaft sei hier auf die Arbeiten von C. Tschöpe am Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Institutsteil Dresden (IZFP-D) und die daraus hervorgehende Dissertation „Akustische zerstörungsfreie Prüfung mit Hidden-MARKOV-Modellen“ verwiesen (siehe [TSCH2011]).

Eine gewisse Sonderstellung unter den natürlichen Faserverbundwerkstoffen nimmt meist gleichmäßig gewachsenes Bambusmaterial ein, da es dem in Europa verbreiteten Bauholz als mechanisch überlegen gilt. Das Grasgewächs erlangt ähnlich dem lignifizierenden Zellaufbau des Holzes durch die Verkieselung der äußeren Rohrwände eine Härte und Festigkeit, welche aber die unserer Hölzer, wie in Abb. 1.2.2.c gezeigt, zum Teil deutlich übertrifft. Aber auch bei Bambus sind die Materialeigenschaften stark schwankend und abhängig von Herkunft, Alter, Feuchtigkeitsgehalt, Klima- und Bodenverhältnissen und Schlagzeit. Weltweit existieren etwa 500 verschiedene Bambusfamilien, was einer Streuung, analog unserer Holzarten gleichkommt.

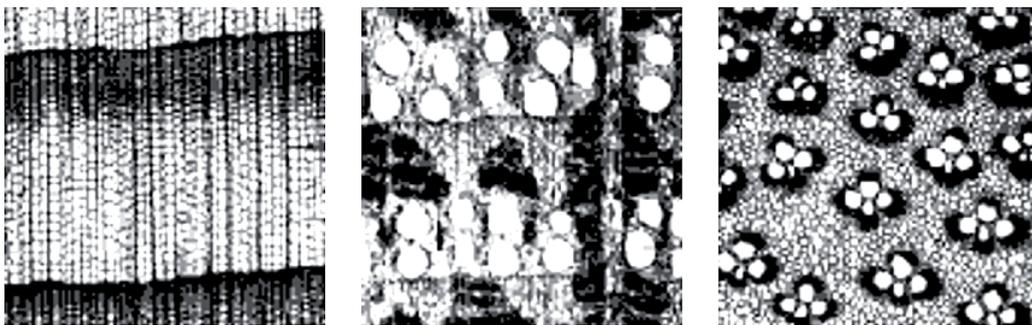


Abb. 1.2.2.b: Vergleich der Faserquerschnitte von Nadelholz (li), Laubholz (m) und Bambus (re), Die Abbildungen zeigen jeweils einen Jahresring im Schnitt bzw. beim Bambus den ganzen Querschnitt

Durch den inversen makroskopischen Aufbau von Bambus – außen hart innen hohl – entgegen hartem innenliegendem Kernholz und äußerem, weicherem Splintholz – ist für die industrielle Anwendung auch eine Homogenisierung, wie sie in der ersten Stufe bei konventionellem Holz beschrieben ist, erforderlich um die mechanischen Vorteile zur Wirkung kommen zu lassen. Dass dieses Potenzial noch nicht ausgeschöpft ist, zeigt folgendes Zitat: „Noch in den achtziger Jahren verglich Janssen den Erkenntnisstand über die mechanischen und technischen Eigenschaften von Bambus mit der Situation des Holzbaus vor ca. 100 Jahren, als eine handwerkliche, auf Tradierung basierende Verwendung von Holz zu stabilen, jedoch oft überkomplizierten und verschwenderischen Bauten führte. Der Schritt von einem Low-Tech-Material zu einem innovationsträchtigen Baustoff, den Holz bereits vollzogen hat, stehe Bambus noch bevor. Eine Vertiefung der Forschung führt dazu, den Materialbedarf zu senken und gleichzeitig Standards für eine sinnvolle Verwendung dieses neuen Materials zu entwickeln“ [TOE2015].

Eigenschaften (kN/cm²)	E-Modul	Druck- festigkeit	Zug- festigkeit	Biege- festigkeit	Scher- festigkeit
Bambus	2.000	6,20-9,30	14,84-38,43	7,63-27,60	1,98
Hickory	1.670	5,20	15,50	11,90	1,10
Birke, gemeine	1.650	4,30	13,70	12,50	1,20
Hainbuche	1.620	6,60	13,50	1,30	0,85
Rotbuche	1.600	6,30	13,50	12,50	1,50
Lärche, europ.	1.380	4,70	10,70	9,90	0,90
Mahagoni, amerik.	1.350	5,00	-	9,90	1,04
Esche, gemeine	1.340	4,40	16,50	1,20	1,28
Eiche	1.300	6,50	9,00	10,00	1,10
Teak	1.300	6,80	11,90	10,50	0,90
Walnuß, europ.	1.250	7,20	10,00	14,70	0,70
Kiefer, gemeine	1.200	5,50	10,40	10,00	1,00
Erle	1.170	5,50	9,40	8,50	0,45
Ahorn	1.130	5,30	10,00	11,70	0,90
Tanne	1.100	4,70	8,40	7,30	0,50
Fichte	1.100	5,00	9,00	7,80	0,67
Pappel	8,80	3,50	7,70	6,50	0,65
Birkenbaum	790	4,60	21,70	8,34	-
Linde	740	4,40	8,50	1,06	0,45
Okumé	300	3,40	2,50	8,20	-
Balsa	260	0,80	7,50	1,60	0,20

Abb. 1.2.2.c: Gesamtbetrachtung der mechanisch-technologischen Eigenschaften von Bambus im Vergleich zu anderen Holzarten, bzw. natürlichen Faserverbundwerkstoffen in kN/cm²

Aktuelle Forschungen zum Baustoff Bambus beschäftigen sich deshalb meist mit der Ermittlung von Materialkennwerten, wie beispielsweise die bei Tönges erwähnte Arbeit von Janssen [JAN1981], in welcher auch die Energiebilanz von Bambus mit konventionellen Baustoffen verglichen wird, um die Nachhaltigkeit zu beschreiben. Weiterführend bzw. aufbauend auf diesen Grundkenntnissen beschäftigen sich beispielsweise die Arbeiten von Silva mit der FEM-Simulation des mechanischen Verhaltens von Bambus (vgl. [SIL2008]) – Ansätze, die für die Ableitung einer weiterführenden akustischen Simulation verwendbar wären.

1.2.3 Naturfaser-Verbundwerkstoffe und Biomatrizes

Abschließend wird an dieser Stelle aufgrund ihrer Relevanz für die Arbeit noch auf spezielle Faserverbundwerkstoffe eingegangen, die sich zwischen den beschriebenen synthetischen und natürlichen Werkstoffen einordnen, da bei diesen entweder Naturfasern in Kunststoff eingebettet werden oder bei diesen Matrizes aus nachwachsenden Rohstoffen, bzw. biologisch abbaubare Matrizes Verwendung finden.

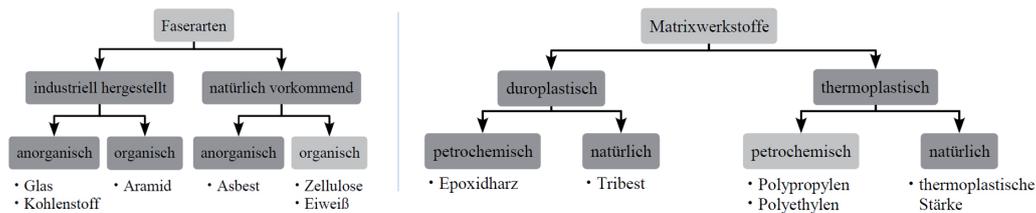


Abb. 1.2.3.a: mögliche Einteilung der Faser und Matrixarten zur Verdeutlichung der Einordnung der Naturfaser-Verbundwerkstoffe und Biomatrizes

Die in Abb. 1.2.3.a rechts unter der Sparte „natürlich“ aufgeführten Matrizes werden bei der Entwicklung und Vermarktung ökologischer und nachhaltiger Werkstoffe oft auch als sog. „Biopolymere“ bezeichnet. Dieser Begriff ist jedoch nach aktuellem Stand der verschiedenen Entwicklungen noch nicht genau spezifiziert und wird unter anderem auch in „Biokunststoff“, „biologisch abbaubarer Kunststoff“ oder „Kunststoff aus nachwachsenden Rohstoffen“ abgewandelt (vgl. [AGR2016]).

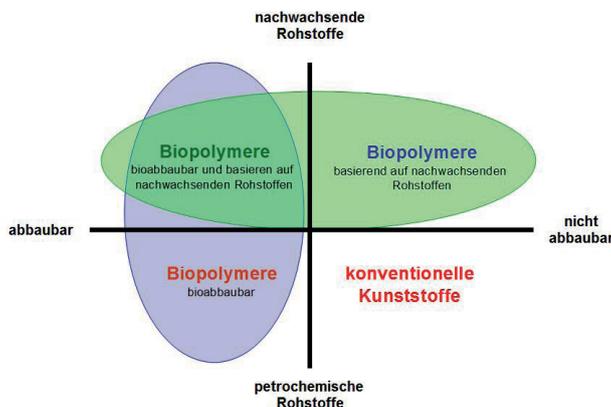


Abb. 1.2.3.b: Einteilungsversuch Biopolymere

Prinzipiell geht es bei der Biopolymer-Herstellung um die Gewinnung von Matrizes aus nachwachsenden Rohstoffen. Bisher werden duroplastische Kunststoffe meist auf Basis von Pflanzenölen oder Zuckerderivaten und thermoplastische Werkstoffe auf Basis von Stärke oder Zellulose hergestellt (vgl. [RIE2000])

Für die Arbeit relevanter – da weiter verbreitet, leichter verfügbar und in der Industrie etabliert – sind aber die sog. NFK-Werkstoffe.

Werden Holz-Komponenten in Kunststoffen gebunden entstehen sog. Holzverbundwerkstoffe, die der Gruppe der naturfaserverstärkten Kunststoffe (NFK) zugerechnet werden. Sie bilden das Bindeglied zwischen den natürlichen und synthetischen Faserverbunden. Zu ihnen gehören beispielsweise das sog. Wood Plastic Composite (WPC), ein Holz-Polymer-Werkstoff der zur Urformung thermoplastisch, z. B. durch Extrusion, oder Spritzgießen verarbeitet wird. Die Holzfaserteile liegen breit gefächert zwischen 50 % bis 90 %. Bei der Matrix wird meist auf Polypropylen oder Polyethylen verwendet.

Neben der auch hier vorangetriebenen Normung im Entwurf der EN 15534 (Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt)) gibt es vor dem Hintergrund der Diskussionen um Nachhaltigkeit und Ökologie zahlreiche Forschungen in diesem Bereich. Für die vorliegende Arbeit bot sich die Möglichkeit WPC-Proben des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik IWM Halle akustisch zu untersuchen. Der Werkstoff selbst wurde vom Bereich „Naturstoffkomposite“ zur Verfügung gestellt, wo dieser hinsichtlich verschiedener werkstofflicher Aspekte untersucht wird ([IWMH2016]).

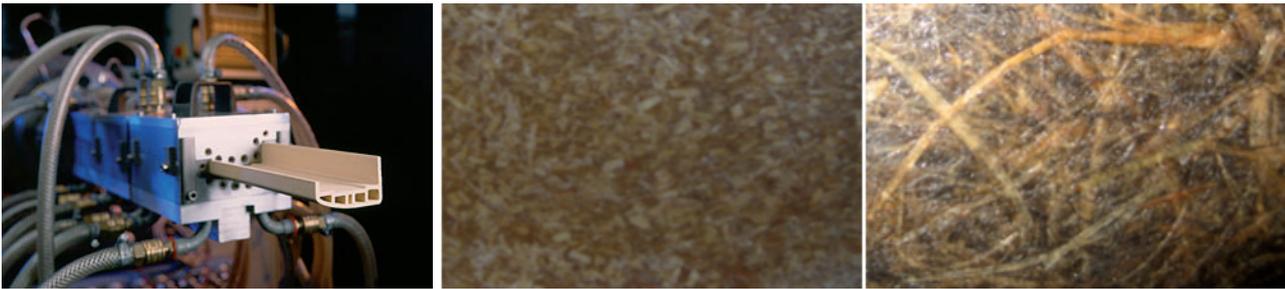


Abb. 1.2.3.c: Rechts: WPC- Extrusion im Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ im ValuePark® Schkopau; Mitte und Links: Materialstrukturen verschiedener Naturfaserplatten

Neben der hohen wirtschaftlichen Relevanz bietet dieser Werkstoff durch die Anpassbarkeit von design- und werkstoffabhängiger Funktionalität, wie z. B. den akustischen Eigenschaften auch ein großes gestalterisches Potenzial. So beschäftigt sich das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Halle (IWMH) beispielsweise mit der gezielten Erzeugung von heterogenen Strukturen mittels geeigneter Prozessführung (siehe Abb. 1.2.3.c). Das Gestaltungspotenzial und damit die Relevanz grundlegender gebrauchts- bzw. schädigungsakustischer Untersuchungen von Holz- und Naturfaserverbundwerkstoffen über die Konstruktion hinaus in Design und Architektur soll zusammenfassend beispielhaft durch die Abb. 1.2.3.d exemplarisch zusammengetragenen Gebrauchsgegenstände bzw. „Tragwerke“ verdeutlicht werden.

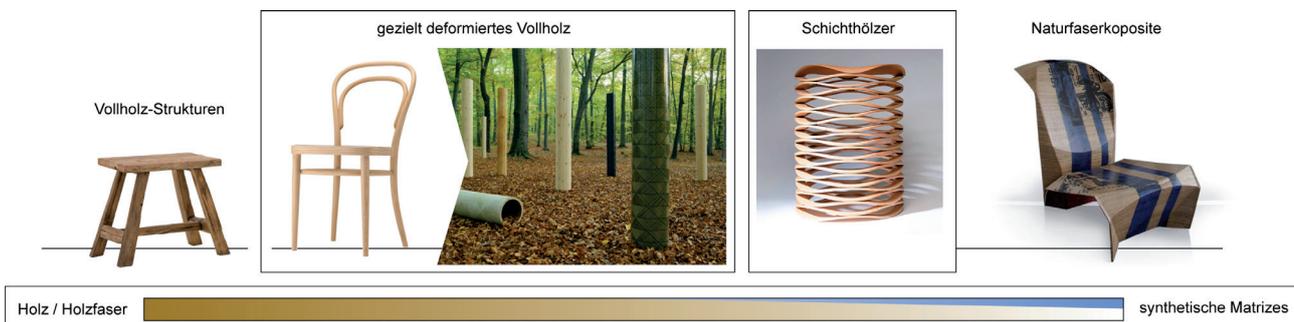


Abb. 1.2.3.d: Bandbreite von Holz und Holzwerkstoffen bezüglich Faserart und Matrixanteil bzw. formaler und verarbeitungstechnischer Aspekte

1.2.4 Mineralisch organischer Faserverbundwerkstoff

Neben den bisher beschriebenen pflanzlichen Naturfaserwerkstoffen sollen im Rahmen der praktischen Untersuchungen auch organische Kompositmaterialien, also Knochengewebe auf Basis kollagener Fasern, untersucht werden. Dieser eher ungewöhnliche Ansatz versucht den kontextuellen Bezug zu den bei struktureller Belastung und Strukturversagen auftretenden psychoakustischen Wahrnehmungsphänomenen herzustellen. Grund dafür ist eine Hypothese dieser Arbeit, welche allgemein besagt, dass die Ähnlichkeit akustischer Signale mit sog. „humanakustischen Signale“ deren Akzeptanz stärker vom eigentlichen Wahrnehmungskontext entkoppelt und die Akzeptanz bzw. Aversionen dieser Signale individuell intensiviert. Bei den im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Biegeuntersuchungen werden deswegen neben Synthetik- und Naturfaserwerkstoff-Proben auch speziell präparierte Knochenproben als Biegeträger unter Belastung und im Versagensfall untersucht, um die Referenz-Charakteristik zur o. g. Hypothese zu ermitteln.

Im Folgenden werden deswegen vorab die werkstoffliche Zugehörigkeit zu den Leichtbau- / Faserverbundwerkstoffen bzw. die generelle Zusammensetzung und der grundsätzliche Aufbau von Knochen beschrieben.

Die Leichtbaudefinition hinsichtlich des Materials erfüllt der Knochen allein durch die Tatsache, dass er mit einer spezifischen Dichte von ca. 1,7 bis 2g/cm³ durchaus vergleichbar mit der von CFK und GFK ist. Darüber hinaus erfüllt die Knochenstruktur auch die strukturelle Leichtbaudefinition, welche sich durch den Quotienten aus Eigengewicht durch ertragenes Gewicht definiert, wenn man zugrunde legt, dass der Skelettanteil mit 17,5 Prozent des Körpergewichts relativ niedrig ist (vgl. [GÜN1948]). Für die Arbeit relevant ist allerdings der materielle Bezug zu den Faserverbundwerkstoffen.

Knochen unterscheiden sich entsprechend der örtlich, bzw. anatomisch konkret vorherrschenden biomechanischen Beanspruchung in ihrem strukturellen Aufbau und in der materiellen Zusammensetzung. Grundsätzlich wird zwischen sog. corticalem (kompaktem) und spongiosen (schwammartigen) Knochen unterschieden. So differenziert sich beispielsweise die Schädeldecke mit ihrer ausgeprägten Gewölbeform und entsprechender Knochendicke rein formal deutlich von der eines röhrenförmigen Oberschenkelknochens mit angepasstem Durchmesser und Wandstärke. Grund dafür ist die typischerweise auf die entsprechende Struktur einwirkende Belastung. Ist der Schädel durch die Gewölbeform hinsichtlich der Aufnahme von punktuellen, impulsartigen Krafteinwirkungen optimiert, nimmt der längsgerichtete Knochen in seiner Säulenfunktion vor allem Druckkräfte, als Träger aber auch Biegebelastungen auf. Festigkeit und Steifigkeit sind hier evolutionär unterschiedlich ausgelegt. Dies wird über die Struktur hinaus durch die spezielle materielle Zusammensetzung der Knochenstruktur unterstützt. Knochen setzen sich allgemein formuliert zu 25 Prozent aus organischen, zu 55 Prozent aus anorganischen Knochenbestandteilen und zu 20 Prozent aus Wasser zusammen [SAN2012].

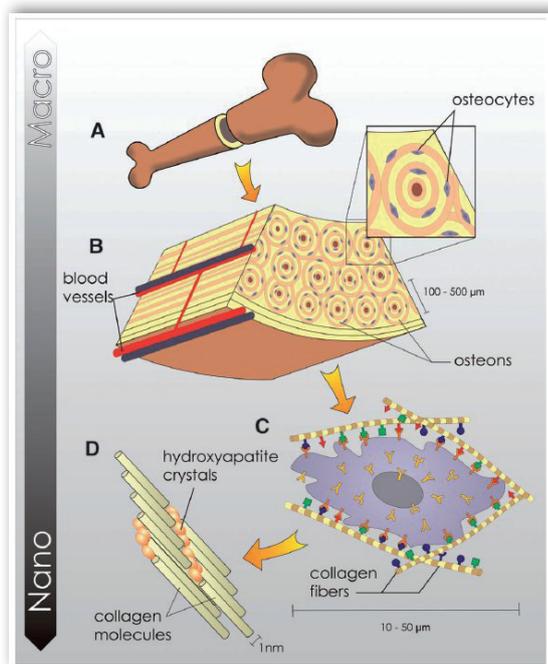


Abb. 1.2.3. e: Makroskopischer Knochenaufbau und zugrundeliegende Knochenstruktur im nanoskaligen Bereich

Der mineralische Hauptbestandteil Hydroxylapatit, bildet bei verstärkter Einlagerung einen hochfesten, harten aber spröden Knochen. Die Zähne sind nach diesem Prinzip strukturiert und können so der Beißkraft von bis zu 780 N standhalten. Wirkt dagegen ein impulsartiger Stoß kann dieser zum Spröbruch führen. Sind im Knochen dagegen mehr organische, kollagene Fasern eingelagert führt dies zu einer Verschiebung der Materialeigenschaft hin zur Zähigkeit. Der Knochen kann sich durch die in ihn eingeleiteten Kräfte erst elastisch verformen, bevor es zum Bruch kommt. Die Grenzen zwischen Sprödigkeit und Zähigkeit sind neben der biomechanischen Beanspruchung auch von der Faserorientierung, vom Alter und dem Gesundheitszustand abhängig.

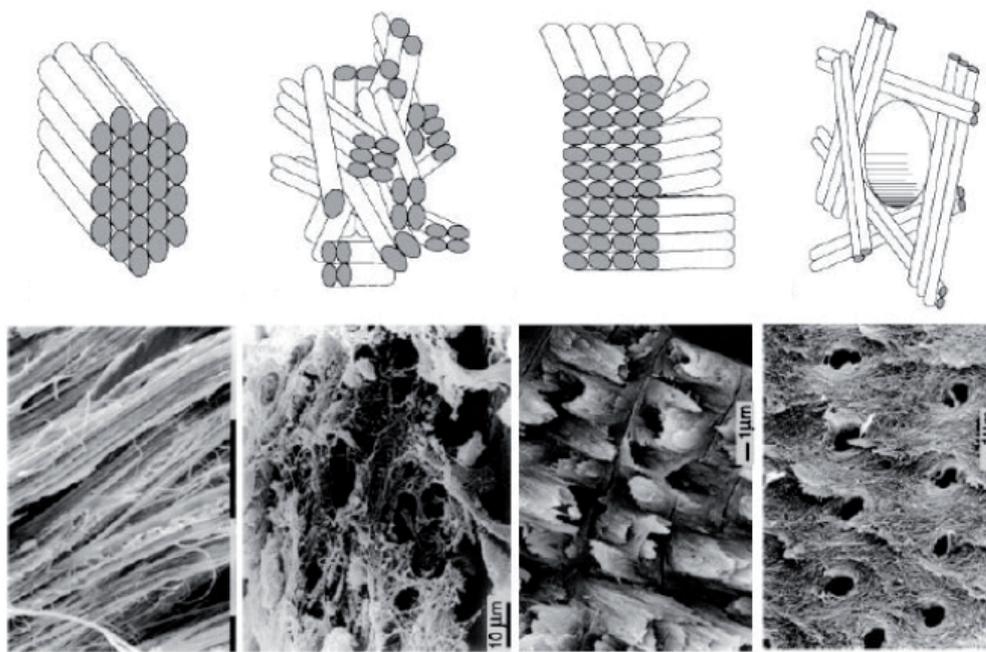


Abb. 1.2.3.f: verschiedene Orientierungen der kollagenen Fasern im Knochen; v.l.n.r.: Parallel-fibered bone (Rinder); Woven Bone (Embryos); Plywood Structure (Fischschuppen); Cylindrical Bone (Dentin)

Die werkstofflichen Forschungen konzentrieren sich nach heutigem Stand besonders auf den Nanostrukturbereich der Knochen, um neuartige Werkstoffe zu entwickeln. So ist zum Beispiel das bei Brenner beschriebene knochenähnliche Konzept von Aluminiumschaum, welcher sich von der Spongiosastruktur ableitet, beschrieben [BRE2006]. Bezüglich der mechanischen Simulation setzt sich beispielsweise Fratzl mit der Modellierung und Simulation der Nanostruktur von Knochen auseinander (vgl. [FRA2000]). Aktuelle Versuche die Materialeigenschaften vom nanoskaligen bis in den makroskopischen Bereich zu modellieren, um so werkstoffliche Ableitungen treffen zu können, sind momentan noch sehr rechenaufwändig.

Klangliche Untersuchungen finden sich im Kontext dieser Arbeiten keine, da dies wahrscheinlich aufgrund der makroskopischen Dämpfung durch die Gewebeschichten zu vernachlässigen ist. Für die werkstofflichen Ableitungen sind diese aber relevant, weshalb Knochenmaterial im Rahmen dieser Arbeit entsprechend einbezogen wird.

1.3 Lastannahmen und Festlegung der Prüfbedingungen

Der Gestaltungsprozess im Ingenieur-, Design- oder Architekturbereich ist geprägt von der intensiven Auseinandersetzung mit der technischen Verwendbarkeit und der Akzeptanz des entsprechenden Objekts beim Nutzer. Man fokussiert dabei auf die Gebrauchsfähigkeit des Resultats. Um diese in gewisser Form kalkulierbar zu machen, trifft man Lastannahmen über die zur erwartenden Einwirkungen auf die entworfene Struktur. Was geschieht bei bestimmungsgemäßer Belastung und wie verhält sich das Objekt im Versagensfall? Ausgehend vom Design- und Gestaltungsaspekt der Arbeit muss berücksichtigt werden, dass die im Bauteil vorherrschenden Beanspruchungen „In der Vielfalt der vom Menschen gemachten Umwelt ... selten in ihrer reinen Form existent sind“ [SCHA09]. Für die weitere Arbeit ist es deswegen sinnvoll die grundlegenden Belastungsfälle, welche sich aus der Vielzahl von Objekten extrahieren lassen, getrennt voneinander zu betrachten:

1. Hauptsächlich durch Biegung beanspruchte Tragwerke (Kragträger, Biegeträger, Rahmen, Platte, usw.)
2. Durch Zug oder Druck beanspruchte Tragwerke (Seil, Stütze, Fachwerk, Scheibe, Kuppel, Membran, usw.)
- (3.) (Sonderform – Durch Drillung beanspruchte Tragwerke – werden nicht betrachtet)

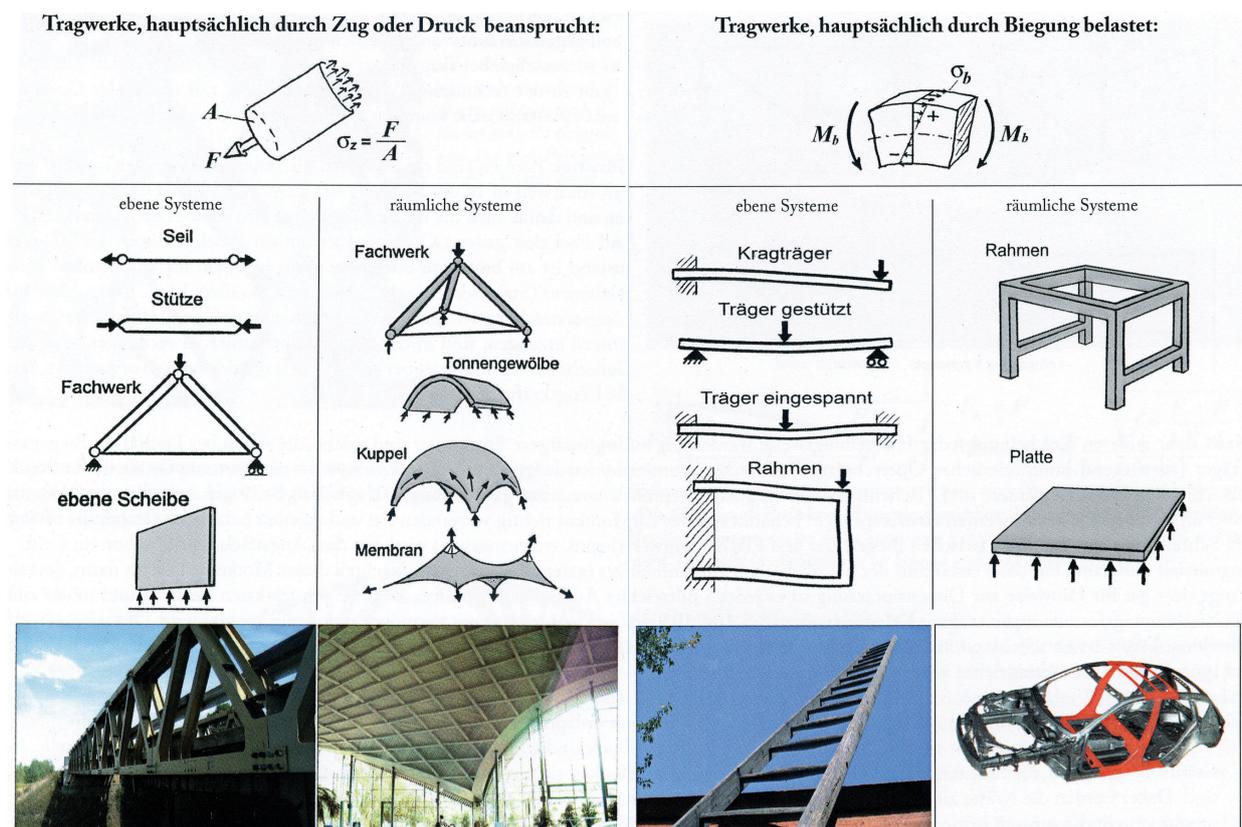


Abb. 1.3.a: Kategorisierung der Belastungsfälle und typische Anwendungen

Bei der Gestaltung von Objekten sind vor allem Deformationen problematisch, was sich mit der allgemeinen These der Statik deckt, dass Strukturen, die Biegemomenten ausgesetzt sind (Klasse 1) generell ungünstiger sind als Formen, in denen die Kräfte gleichmäßig verteilt sind, weil sie in Richtung der längsten Bauteildimension

wirken (Klasse 2). Bei diesen stellt sich dagegen eher die Problematik, dass sich ein Versagen sehr plötzlich und ohne Vorwarnung einstellt. Da die speziellen Rahmenbedingungen bei jedem Schaffensprojekt variieren, können wie bereits erwähnt beide Belastungsformen in unterschiedlichen Überlagerungsgraden auftreten. Davon ließe sich die These ableiten, dass sich biegebelastete Systeme auch akustisch als problematischer bzw. auffälliger darstellen, wohingegen zug- und druckbeanspruchte Strukturen eher unauffällig sind und akustisch erst nahe des strukturellen Versagens auffällig werden, was meist auch gebrauchsuntypischer ist.

Für die Untersuchungen werden deswegen beide Belastungsformen separat untersucht. Im Folgenden werden die entsprechend verwendeten Biege- und Zugproben und die zugehörigen mechanischen Versuchsanordnungen beschrieben, anhand derer möglichst elementare und unverfälschte Erkenntnisse hinsichtlich der Bruchvorgänge gewonnen werden sollen.

1.3.1 Biegeproben: Faser- und Zwischenfaserbrüche und Delamination

Das Schädigungs- und Bruchgeschehen aller beschriebenen Faser-Matrix-Verbunden und Fasermaterialien kann bei Biegebelastung in der Faser selbst, in der Matrix – auch Zwischenfaserbereich genannt – oder an der direkten Grenzschicht zwischen beiden auftreten. Prinzipiell überlagern sich alle drei Vorgänge im Belastungsfall, wobei es materialspezifische Unterschiede z. B. hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs, der Schadensintensität oder der Quantität der beschriebenen Fehlerarten bis zum Strukturversagen existieren.

Da die Experimente neben den Untersuchungen transienter Vorgänge verstärkt in Richtung der akustischen Charakterisierung verschiedener Werkstoffe ausgelegt sind, wird die Geometrie für alle Werkstoffproben vereinheitlicht. Angelehnt an die DIN EN ISO 14125 [DIN14125] welche sich mit der Bestimmung der Biegeeigenschaften faserverstärkter Kunststoffe befasst, wird der in Abb. 1.3.1.a beschriebene Probenkörper für die Biegeuntersuchungen definiert.

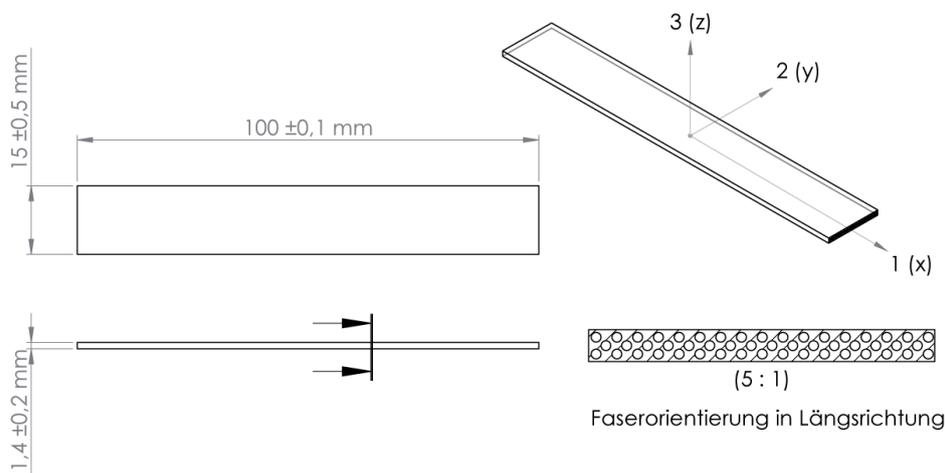


Abb. 1.3.1.a: Biegeprobe gemäß DIN EN ISO 14125 mit Festlegung der Faserorientierung im Bauteil

Derselben Norm entsprechend erfolgen die Tests konform den in der ISO 5893 beschriebenen Bedingungen hinsichtlich der zu verwendenden Biegeeinrichtung und der Biegegeschwindigkeit. Als spezifische Belastungskonfiguration wurde aufgrund der flexibleren Anwendbarkeit der sog. 3-Punkt-Biegeversuch gewählt. Entsprechende Reibungsphänomene an den Lagerpunkten sind bei der akustischen Auswertung zu berücksichtigen.

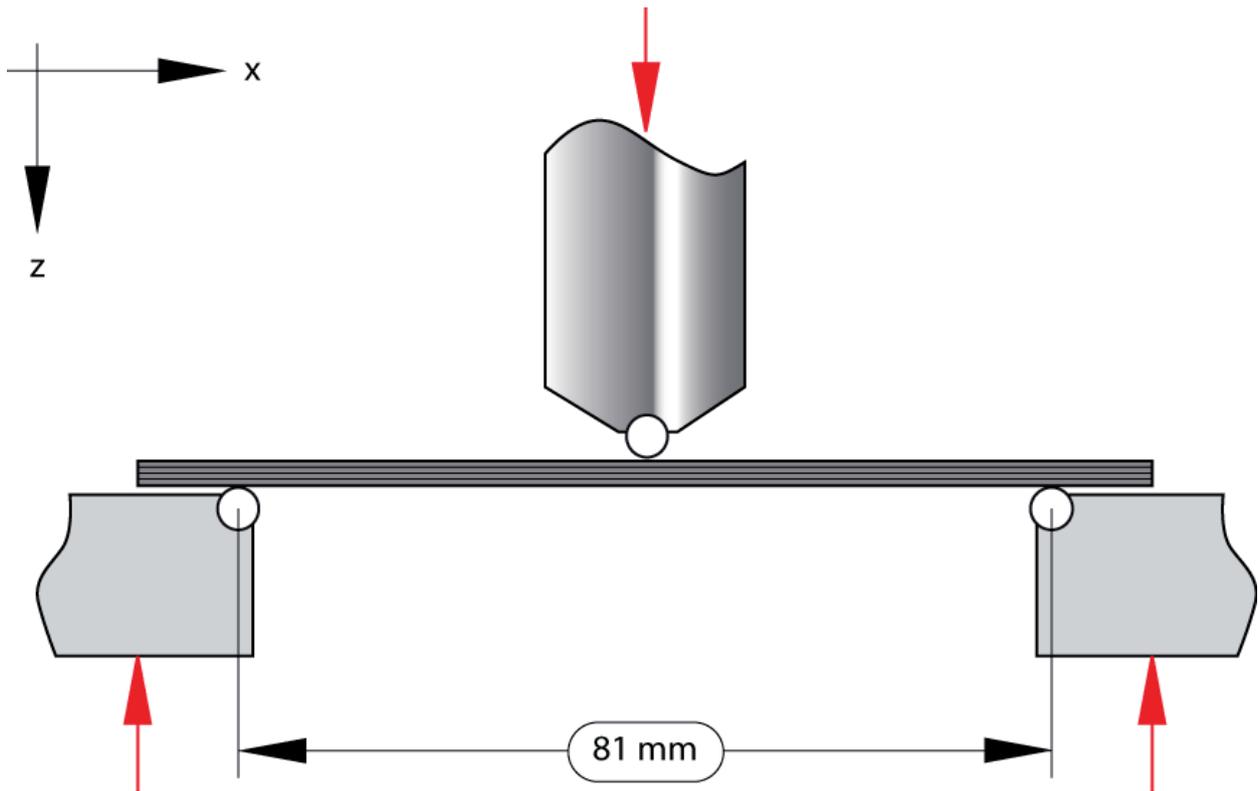


Abb. 1.3.1.b: Schema 3-Punkt-Biegung

1.3.2 Zugproben zur Untersuchung von elementarem Einzelfaser-Versagen

Zur besseren Differenzierung der akustischen Einzelvorgänge sollen neben den beschriebenen Biegeträgern auch Einzelfasern ohne Matrix im Zugversuch untersucht werden. Ziel ist es die beschriebenen Überlagerungen durch die konkrete Charakterisierung des Einzelfaserversagens besser voneinander differenzieren zu können, sind diese doch im Sinne des eigentlichen Verwendungszwecks die hauptsächlich tragenden Elemente des Verbundes. „Im Grunde genommen sind Faserbrüche die einzigen „erwünschten“ Brüche in Faserverbundbauteilen, denn die Fasern sind die eigentlichen Tragelemente, und diese sollten bis zu ihrer Festigkeitsgrenze ausgelastet werden können, bevor irgendetwas anderes bricht“ [PUC1996].

Unter Faserbruch ist dabei keinesfalls der Bruch einzelner Elementarfaser zu verstehen, sondern das nahezu gleichzeitige Versagen einer Vielzahl von Elementarfaser, z. B. in einem Roving, wodurch die Tragfähigkeit der Schicht in Faserrichtung über eine makroskopische Breite weitgehend eliminiert wird. Um die Einzelfaserproben für Zugversuche ohne den Einsatz von Matrixmaterial handhabbar auszusteifen wird der in Abb. 1.3.2.a beschriebene Probenaufbau verwendet. Bei der abgebildeten und eigens für diese Untersuchungen entwickelten Zugprobe wird die eigentliche Faserprobe, bzw. der entsprechende Rovingfaden zur besseren Handhabbarkeit durch übereinander geklebte Papierrahmen gehalten. Nach Erreichen der Vorspannung in der Zugvorrichtung wird die Versteifungshilfe aufgetrennt, wodurch die Faser frei gespannt ist. Darüber hinaus dient der Rahmen noch der Aufnahme von Körperschallsensorik, welche ohne diese Vorrichtung nicht am schmalen Zugträger applizierbar wäre.

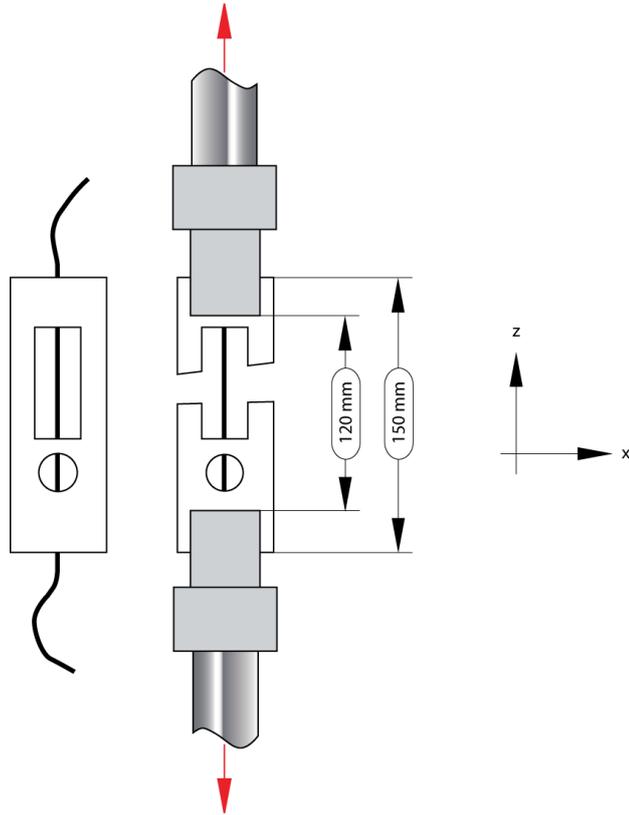


Abb. 1.3.2.a: Schema des Zugversuchs mit Einlegevorrichtung für nicht integriertes Einzelfaserbündel

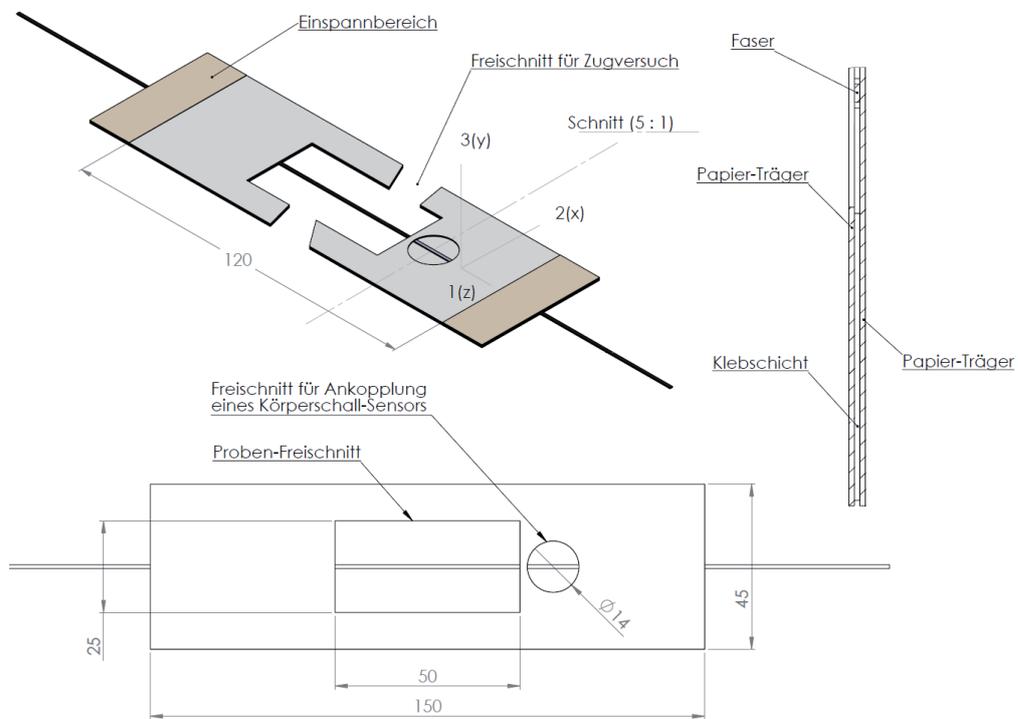


Abb. 1.3.2.b: Zugprobe bzw. nicht integriertes Einzelfaserbündel mit Hilfsträger und Sensoraufnahme

Nach Abschluss der grundlegenden Untersuchungen wäre es sinnvoll auch Tragwerke in Mischform mit verschiedenen Graden der Überlagerung zu untersuchen, um festzustellen, ob diese hinsichtlich ihres akustischen Verhaltens mit den Ergebnissen der Basisuntersuchungen korrelieren. Diesbezüglich dienen die beschriebenen zwei Probenarten mit den entsprechenden Versuchsanordnungen lediglich der grundlegenden Untersuchung und sind Ausgangsbasis für die nachfolgenden spezifischen Betrachtungen komplexerer Strukturen.

1.4 Definition und Herstellung der Material- und Werkstoffproben

Auf Basis der grundlegend beschriebenen mechanischen Randbedingungen wird im Folgenden die Erstellung der material- und werkstoffspezifischen Probekörper beschrieben. Da es je nach Wuchsform oder Fertigungsverfahren breite Streuungen hinsichtlich der physikalischen Material- und Werkstoffeigenschaften gibt, werden die in Abb. 1.4.a vorgestellten Probentypen hinsichtlich ihres Aufbaus bzw. ihrer Artspezifik genauer definiert, um über die Bandbreite der verschiedenen experimentellen Untersuchungen reproduzierbare Grundvoraussetzungen zu gewährleisten.

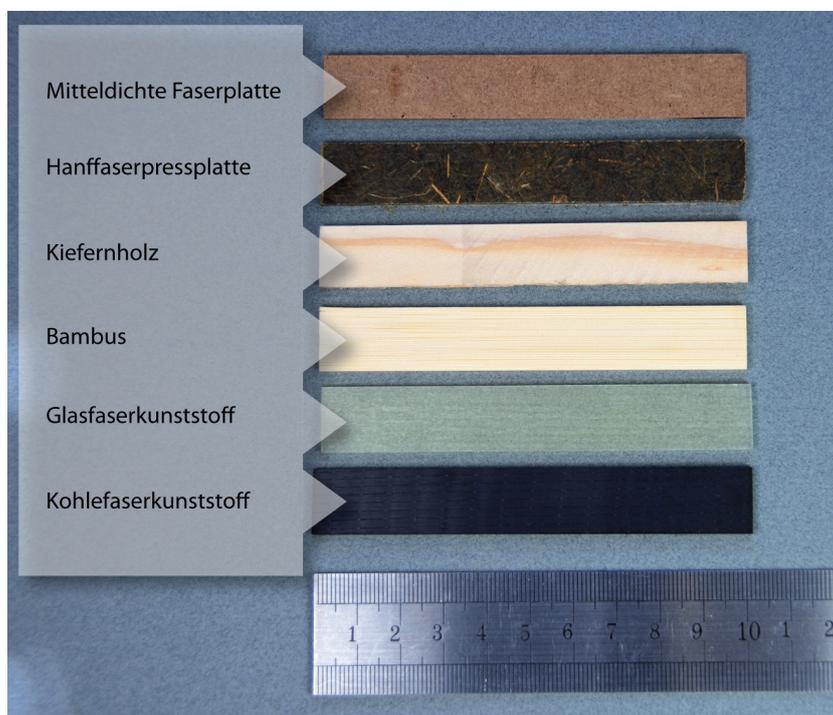


Abb. 1.4.a: Übersicht der experimentell verwendeten Material- und Werkstoffklassen

1.4.1 Natürliche Faserverbunde: Kiefer und Bambus

Die technologisch vermeintlich einfachste Erstellung „baugleicher“ Biegeproben aus Kiefernholz – einem typischen und oft in Konstruktion und Design verwendeten natürlichen Faserverbundwerkstoff – ist aufgrund der beschriebenen natürlichen Streuung der Werkstoffeigenschaften nur möglich, indem alle Proben aus einem Baumstück gesägt werden. Dadurch werden Streuungen durch Artenvarianz, verschiedene Lagerung und Stammschnitte ausgeschlossen. Effekte aus komplizierten Stichprobenansätzen sollen hier deswegen nicht betrachtet werden.

Konkret wurde als Proben-Rohling der in Abb. 1.4.1.a grün hervorgehobene Teil eines Spiegelschnittsegments aus dem Erdstamm einer regionalen Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) verwendet.

Dieses Vorgehen wird damit gerechtfertigt, dass die experimentellen Erkenntnisse in Richtung einer grundlegenden Kategorisierung zielen. Weitergehende Untersuchungen zur akustischen Differenzierung von Laub- und Nadelhölzern, deren Arten und Zuschnittsarten wären sicher aufschlussreich, sind aber nicht Teil dieser Arbeit.

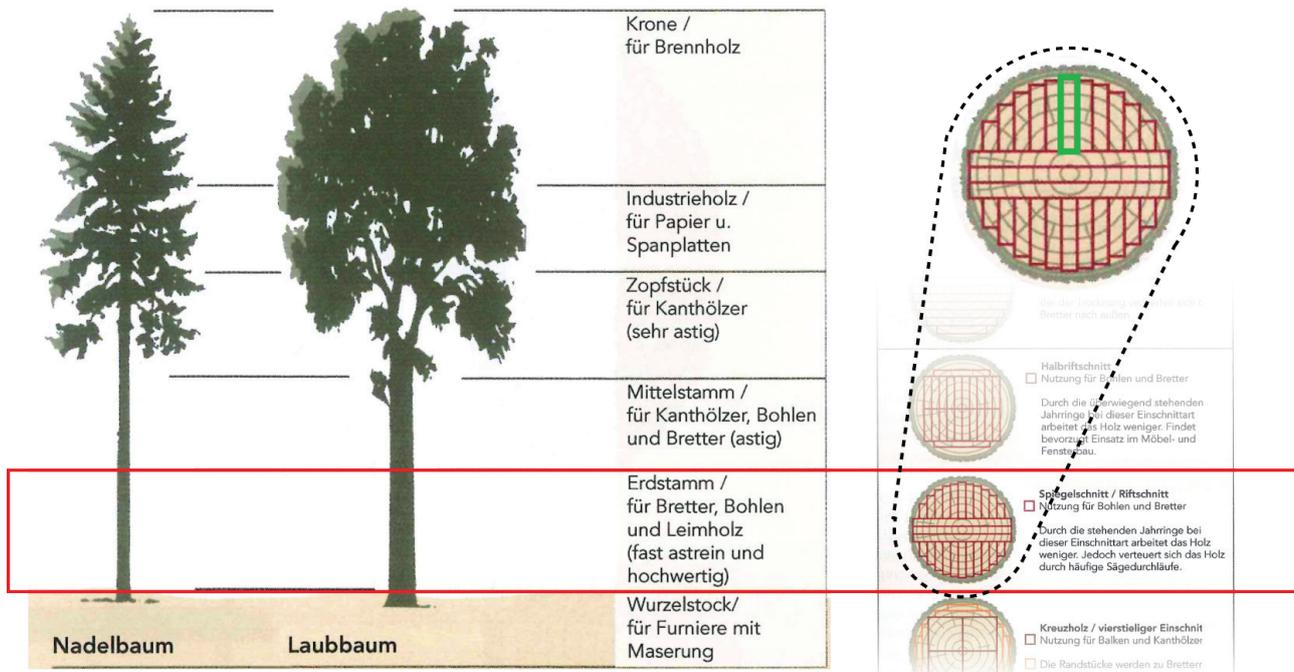


Abb. 1.4.1.a: schematische Darstellung der Erstellung von Kiefernholzproben (prinzipieller Querschnitt grün dargestellt)

Bei der Erstellung der Bambusproben ist vom Selektionsaufwand der Halbzeuge ähnlich zu verfahren, da die Werkstoffeigenschaften ähnlich der unserer Hölzer streuen. Verwendet wurde hier der in Abb. 1.4.1.b gezeigte Abschnitt eines verholzten Bambus der Gattung „Phyllostachys“. Der sog. Moso-Bambus (*Phyllostachys edulis*), vor allem in China, Taiwan und Japan beheimatet, ist eine häufig für den Möbel- und Gartenbau importierte Art.

Der Abschnitt zwischen den Scheidennarben der Knoten beträgt durchschnittlich 150 mm und steigt mit der Wuchsrichtung. Die an den Internodien angesetzten Sägeschnitte wurden entsprechend dem Proben-Nennmaß von 100 mm vermittelt. Anschließend wurden die Halbzeuge mit einem mittleren Durchmesser von 100-110 mm und einer durchschnittlichen Dicke von 10 mm längs aufgetrennt und mit einem Dicktenhobel auf Probendicke und -breite abgerichtet (grüne Rechtecke zeigen die Probenquerschnitte).

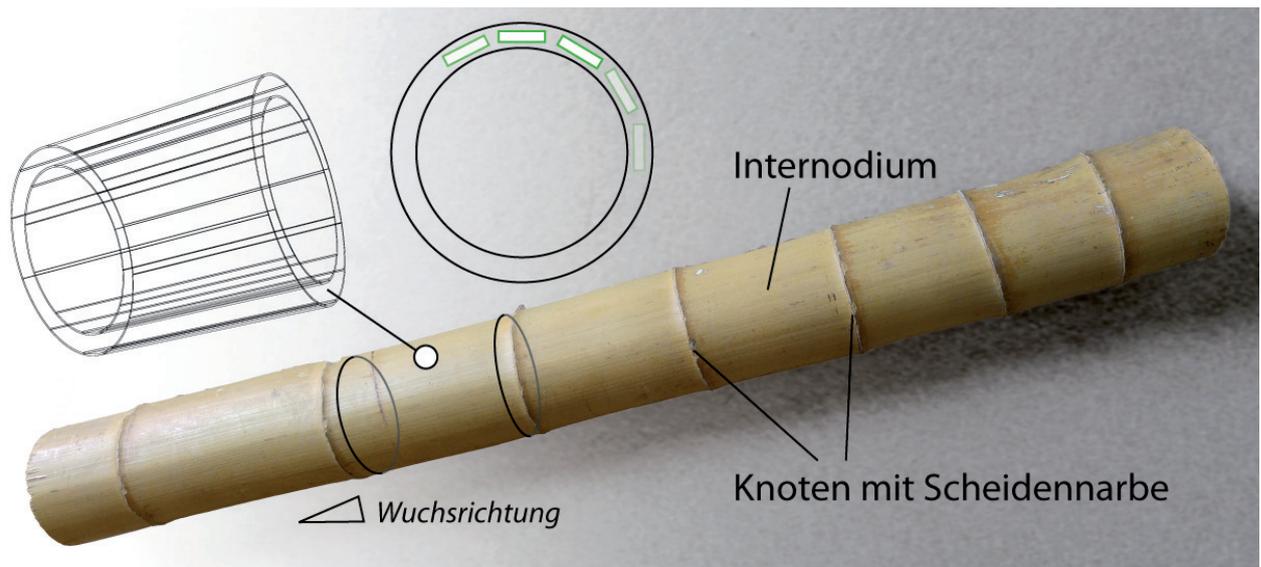


Abb. 1.4.1.b: Probenerstellung bei Bambus mit Kennzeichnung des Probenquerschnitts im Halm

Zur weiteren Bearbeitung wurden die mechanischen Werkstoffeigenschaften durch eigene Messungen am Prüflabor der Polymer Service GmbH „Mechanische Prüfung von Kunststoffen“ des Instituts für Werkstoffwissenschaften an der Hochschule Merseburg ermittelt. Diese sind, wie auch alle anderen Kennwerte, in der Zusammenstellung am Ende des Kapitels 1.4 aufgeführt.

1.4.2 Naturfaser-Kunststoffverbunde: NFK, MDF und WPC

Die Gruppe der Kunststoffverbunde mit Faseranteilen bilden insofern eine Sonderfraktion, da sich die Fasern, technologisch bedingt, bei allen untersuchten Werkstoffen weitgehend isotrop in der Matrix verteilen. Perspektivisch wäre in dieser Werkstoffgruppe auch die Untersuchung verschiedener Sperr- oder Formhölzer als Äquivalent zu quasiisotropen synthetischen Faserverbunden sinnvoll. Da diese jedoch die Schnittmenge der werkstofflich akustischen Eigenschaften und des makroskopischen Aufbaus der unidirektionalen natürlichen und synthetischen Faserverbunde bilden, grenzen sich die Untersuchungen davon ab. Im Folgenden werden die drei einsetzbaren Holz- bzw. Naturfaserverbundstoffe definiert.

Die vom „Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Halle“ zur Verfügung gestellten Naturfaser-Kunststoffplatten (NFK) wurden im Handauflageverfahren und Aushärtung in der Etagenpresse prototypisch gefertigt. Als Faserkomponenten wurden dabei Hanf- und Flachsfasern im Gewichtsverhältnis 50:50 zu einem Wirrvlies verarbeitet und vor der Pressung mit Phenolharz getränkt. Die Platten wiesen im Anschluss bereits eine akzeptable Probendicke von 1,5 mm auf und mussten so lediglich abgelängt werden.

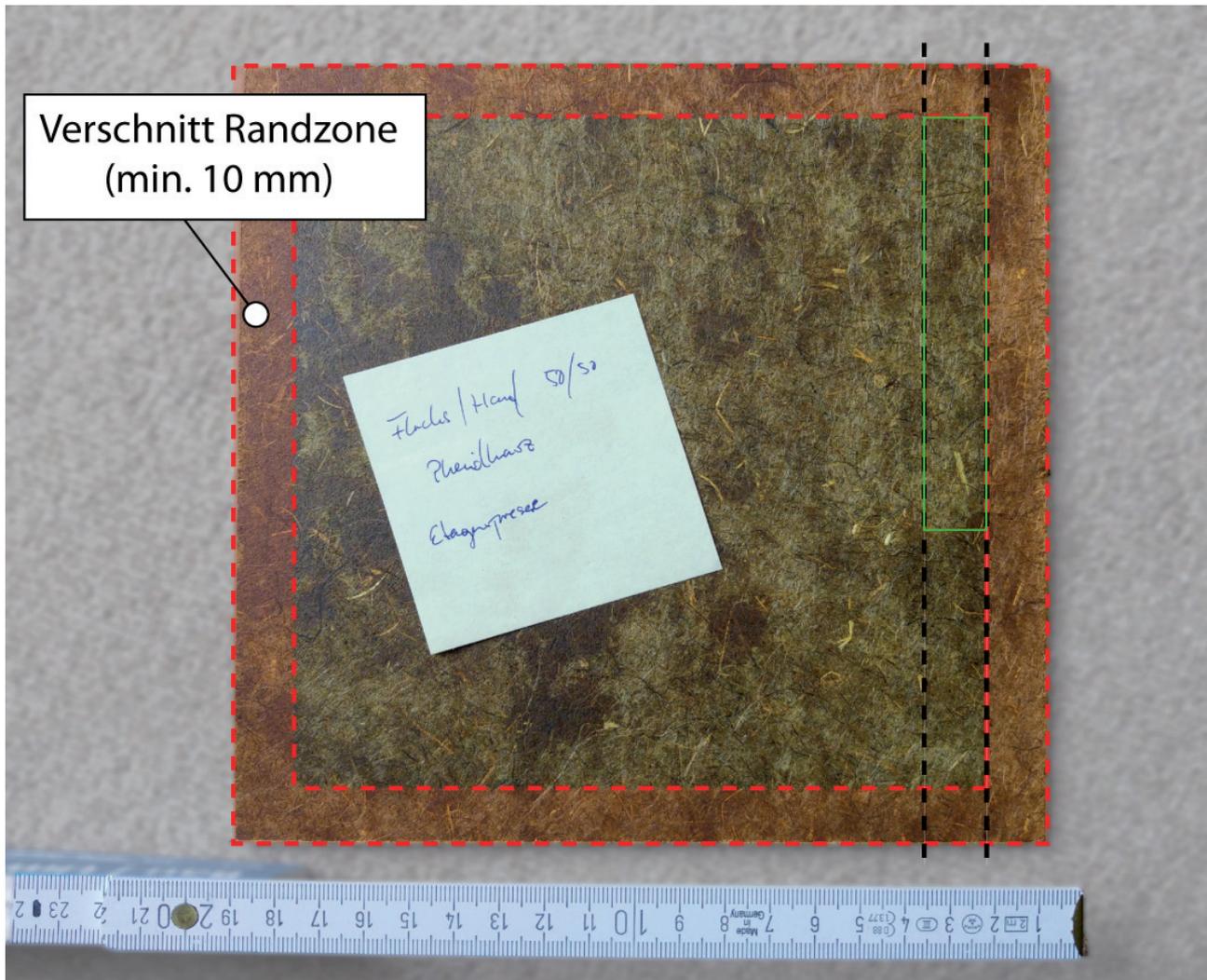


Abb. 1.4.2.a: Prinzip des Probenzuschnitts der NFK-Platten (Bezug: A. Krombholz IWMH)

Für die Erstellung der MDF-Proben wurde handelsübliches Plattenmaterial der Firma Egger verwendet, das für den Möbel- und Innenausbau konzipiert wurde. Der Zuschnitt erfolgte dabei aus einer 30 mm starken Platte vom Typ EGGGER MDF-ST E1 nach EN 622 Typ 5 [EGGST-D1]. Unter der Grundannahme, dass im Halbzeug eine relative Gleichverteilung der Faser- und Matrixanteile vorherrscht, die lediglich einen leichten Gradienten hin zu den Pressflächen aufweist, wurden die Proben immer der mittleren Dickenzone entnommen. Die flächenbezogene Entnahme erfolgte weit gestreut über die Platte (Fläche 1 m x 2 m).

Etwas aufwändiger gestaltete sich der Zuschnitt der WPC-Proben, da Halbzeuge lediglich in Form von stranggepressten Stegplatten vorlagen. Da der Werkstoff aber aufgrund der prozessbedingten latenten Faserorientierung Inhomogenitäten aufweist, bot es sich an, die Proben längs und quer zur Pressrichtung, bzw. zur Faser-Hauptorientierungsrichtung heraus zu sägen, um Untersuchungen hinsichtlich des potenziell akustisch anisotropen Verhaltens durchzuführen. Die mechanischen Kennwerte für die NFK- und WPC-Werkstoffe wurden am „Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Halle“ ermittelt.

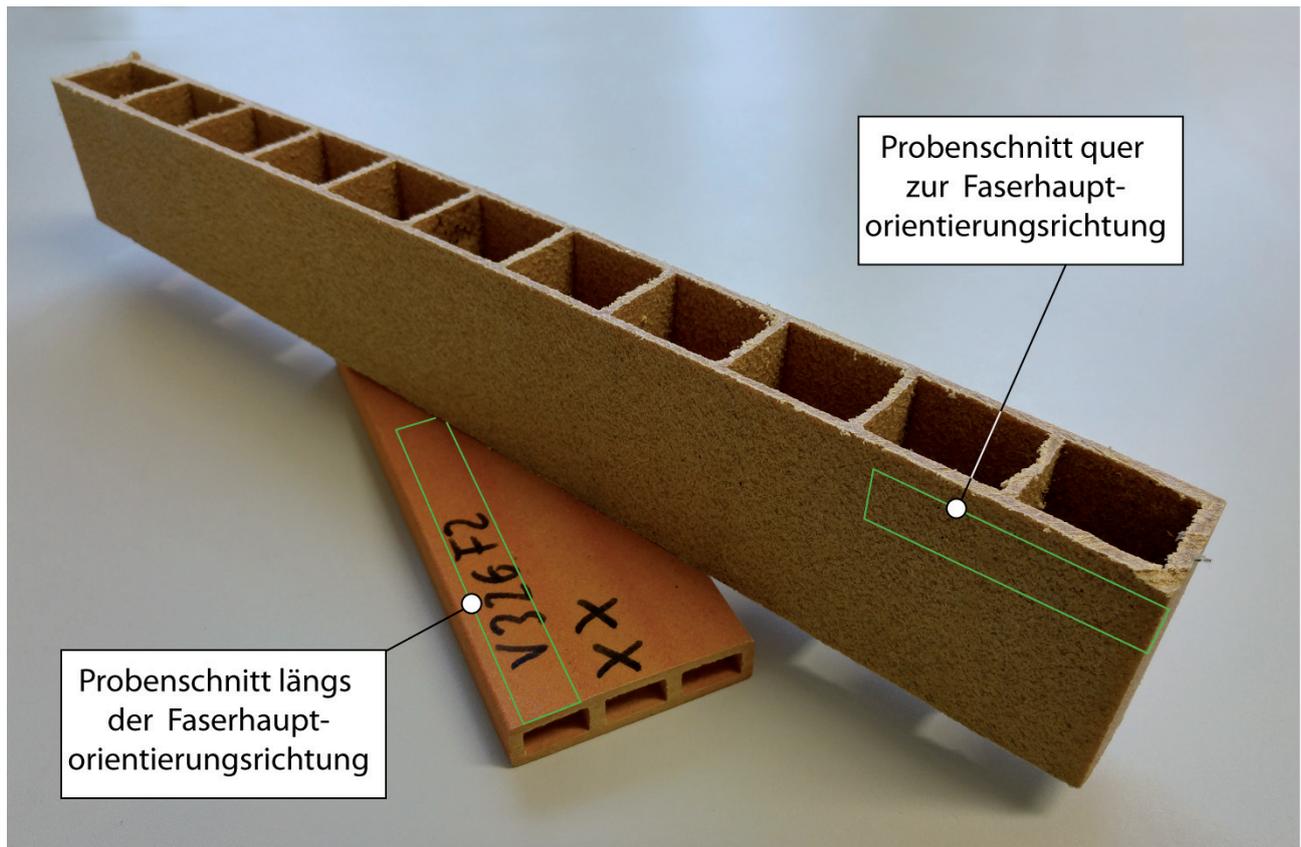


Abb. 1.4.2.b: Probenschnitte der WPC-Strangpress-Profile (Bezug: A. Krombholz IWMH)

1.4.3 Synthetische Faserverbunde: Glasfaser- und Kohlefaserkomposite

Die Erstellung der Kohlefaser-Proben für die grundlegenden Untersuchungen des akustischen Verhaltens erfolgte wie bereits beschrieben in Anlehnung an die DIN EN ISO 14125. Dafür wurde das Prepreg-System „HexPly 913C-HTS(12K)-5-35%“ verwendet [HEX913]. Dieses besteht aus einer unidirektionalen Anordnung kontinuierlicher „High Strength Carbon 12K“-Fasern, welche in eine „HexPly 913 Epoxy“-Matrix gebettet sind, die entsprechend der Nomenklatur einen Harzgewichtsanteil von 35 Prozent im Prepreg einnimmt. Für den Probenschnitt wurde eine Platte von 320 mm x 320 mm beim dem im Datenblatt empfohlenen Härtingszyklus im Autoklaven gefertigt. Dabei wurde die Temperatur in der Aufheizphase konstant um 2 °C/min-1 erhöht und ab Erreichen der empfohlenen Härtingstemperatur von 125 °C für 60 Minuten gehalten, wobei über diesen Zeitraum ein Unterdruck von 5 Bar angelegt wurde.

Die Erstellung der Glasfaser-Biegeproben erfolgte ebenfalls nach DIN EN ISO 14125. Hierzu wurde unidirectionales Glasfaserband Typ „Finish FK 144 Interglass“ der Firma R&G [RG2016] verwendet. Die Epoxidharz-Matrix L wurde im Verhältnis 100:25 mit Härtertyp EPH 161 im Handauflageverfahren als Nasslaminat aufgebracht und unter Vakuumbedingungen bei Raumtemperatur 24 Stunden ausgehärtet. Anschließend wurden die Plattenhalbzeuge für 15 Stunden bei 60 °C getempert.

Der Probenschnitt der 8-lagigen Prüfkörper erfolgte mittels einer wassergekühlten Präzisionssäge mit Diamantsägeblatt und anschließendem Beschleif auf die Toleranzmaße mit 1000er Schleifpapier.

Alle hier beschriebenen synthetischen Faserverbunde wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Faserverbunde und Leichtbau Haldensleben UG [ZfL] gefertigt.

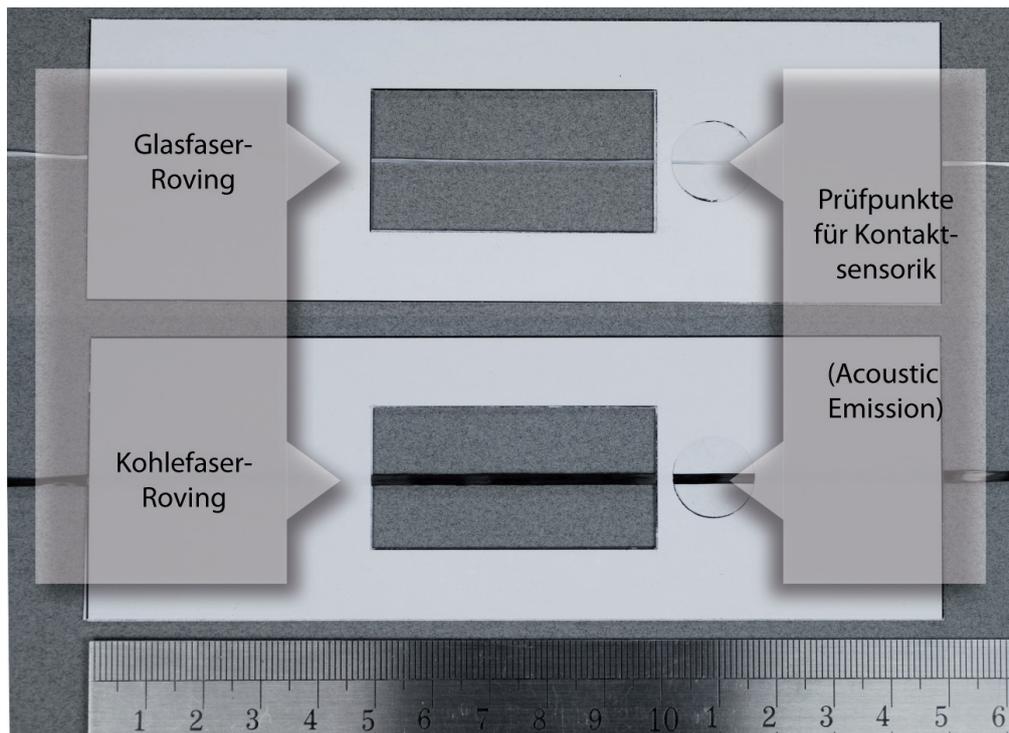


Abb. 1.4.3.a: Zugprobenkörper in Glas- und Kohlefaser-Ausführung f. d. Untersuchungen zum elementaren Einzelfaserversagen

Die Proben für die in Kapitel 1.3.2 beschriebenen Untersuchungen zum elementaren Einzelfaserversagen wurden ausschließlich aus synthetischen Faserverbunden hergestellt, da es bei diesen problemlos möglich ist, Einzelfasern aus unidirektionalen oder quasiisotropen Trocken-Halbzeugen zu extrahieren. Die entsprechenden Probenträger in Abb. 1.4.3.a enthalten die bereits bei den Glasfaser-Biegeträgern verwendete Interfaser und eine Kohlfaser vom Typ Torayca T300J 400 tex (6k).

1.4.4 Mineralisch organischer Faserverbund: Rinder- und Schweineknochen

Wie bereits erläutert werden hinsichtlich der Hypothese, dass die Ähnlichkeit akustischer Signale mit sog. „humanakustischen Signalen“ deren Akzeptanz stärker vom eigentlichen Wahrnehmungskontext entkoppelt und die Akzeptanz bzw. Aversionen dieser Signale individuell intensiviert, Knochenproben benötigt. Bei den im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Biegeuntersuchungen werden deswegen speziell präparierte Knochenproben als Biegeträger unter Belastung und im Versagensfall untersucht, um die Referenzcharakteristik zur o. g. Hypothese zu ermitteln.

Zur Herstellung von Biegeproben für die akustischen Untersuchungen dieser Arbeit werden Humanknochen entsprechend der nahezu identischen materiellen Zusammensetzung durch Schweine- und Rinderknochen substituiert.

Dazu wurde das Ursprungsmaterial entsprechend Abb. 1.4.4.a und b aufgetrennt, das Knochenmark wurde entfernt und der Knochen durch kurzzeitiges Kochen sterilisiert.



Abb. 1.4.4.a links: längs aufgetrennter Oberschenkelknochen vom 18 Monate alten Jungbullen (Rind) mit beidseitig im Bereich der Metaphysen abgetrennten Epiphysen; rechts: Knochenstruktur im Detail zur Festlegung der Probenentnahme für die Biegeversuche



Abb. 1.4.4.b links: analog aufgetrennter Oberschenkelknochen mit gleichem strukturellem Aufbau vom 10-12 Monate alten Hausschwein; rechts: Knochenstruktur im Detail zur Festlegung der Probenentnahme für die Biegeversuche

Die sonst übliche Entfettung wurde zur Erhaltung der möglichst ursprünglichen Knochenstruktur, bzw. zur Erhaltung der kollagenen Bestandteile ebenso ausgelassen, wie die Desinfektion mit niederkonzentrierten Säurelösungen, welche das Kalziumphosphat lösen und das Material weich machen.

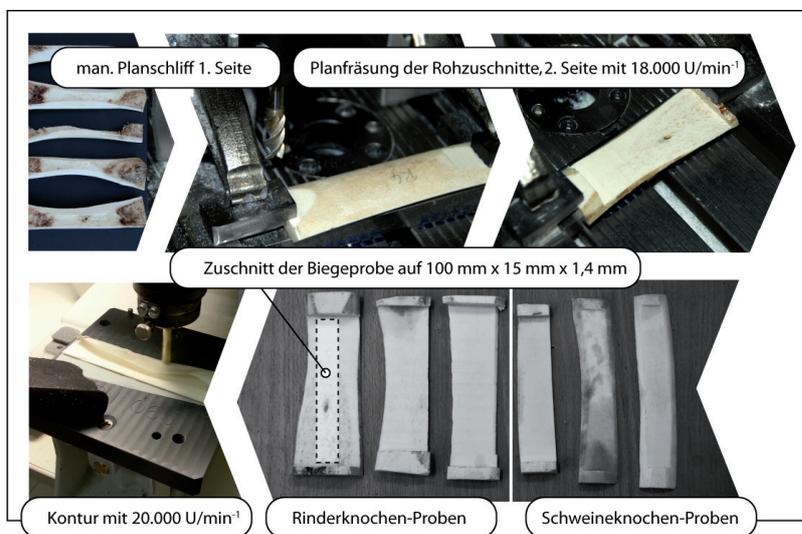


Abb. 1.4.4.c: Probenfräsung mit DMU 50 EVO LINEAR und Gravograph IS400 und die verschiedenen Aufspann-Strategien

Eigenschaften	Kiefer nach [DIN 68364]	Bambus-Rohrwand nach [RWTH2002]	Mitteldichte Faserplatte [EGGST-D1]	Hanfaser-Komposit [IWMH]	Wood Plastic Composite [IWMH]	Kohlefaser-Komposit [ZfL]	Glasfaser-Komposit [ZfL]	Knochen Schwein	Knochen Rind
Feuchtigkeit (%)	12	10	6	11-12	11-12	2	2	20	20
mittlere Dichte (g/cm ³)	0,52	1,15	0,65	1,1	1,4	1,6	1,9	1,6	1,9
Elastizitätsmodul (N/mm ²)	11.000	18.000	2.200	8.000	6.500	110.000	30.000	7.200	7.500
Biegefestigkeit (N/mm ²)	80	150	23	k. A.	58	770	560	170	180
Druckfestigkeit (N/mm ²)	45	70	15	k. A.	k. A.	420	300	180	190
Zugfestigkeit (N/mm ²)	100	120	0,5	66	k. A.	550	450	125	130
Scherfestigkeit (N/mm ²)	10	20	7	k. A.	k. A.	55	46	30	30
Grenzspannung (N/mm ²)	100	130	20	k. A.	k. A.	1300	800	25	30

Abb. 1.4.4.d: Übersicht der mechanisch relevanten Kennwerte aller in Kapitel 1.4 definierten Werkstoff- und Materialproben

Nach Eingrenzung und Definition der Werkstoffmatrix sowie der Beschreibung der mechanischen Belastungsfälle und der mechanischen Kennwerte geht der folgende Abschnitt auf die bruchmechanischen Grundlagen beim Versagen von faserverstärkten Materialien ein.

1.5 Mechanisches Deformations- und Bruchverhalten der Faserverbunde

Das Materialversagen durch mechanische Belastung wird klassisch durch die Theorie der Bruchmechanik beschrieben. Der zu Grunde gelegte Elementarfehler ist dabei immer ein Riss, der sich in Folge der Belastung vergrößert. Die Rissinitiierung ist als Trennung des soliden Materialverbundes durch ausreichend große externe Kräfte definiert, welche die atomaren bzw. intermolekularen Bindungskräfte übersteigen. Prinzipiell setzt die Rissinitiierung an der Stelle höchster Materialspannung ein, wobei die ab Kapitel 1.2.1 ff. beschriebenen Materialfehler und Inkonsistenzen Ausgangspunkt des Risswachstums bzw. Quelle des Bruchs sind. Erreichen die Risse eine kritische Größe, so breiten sie sich instabil und mit großer Geschwindigkeit aus.

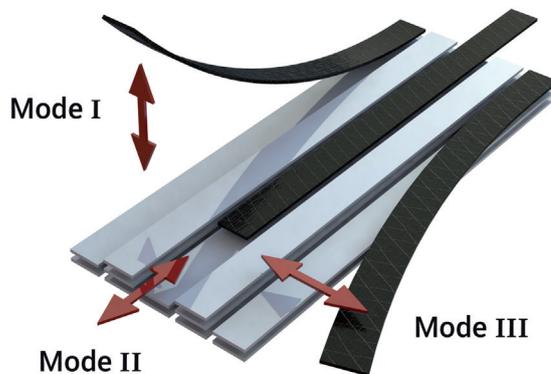


Abb. 1.5.a: grundlegende Rissbeanspruchungsarten der Bruchmechanik über die drei Raumachsen: Rissöffnungsmodus (I), Gleit- oder Schubmodus längs der Kraftwirkung (II) und Gleit- oder Schermodus quer der Kraftwirkung (III)

Die Rissbildung bzw. Rissentstehung bei schwingender und statischer Belastung ist dabei ein lokales Ereignis in der Mikrostruktur, welches durch die genannten Fehler verursacht wird. Die Rissausbreitung vollzieht sich dagegen auf makroskopischer Ebene. Dabei sind die relativ auf die Risswachstumsrichtung bezogenen Bruchmodi in Abb. 1.5.a voneinander zu differenzieren (nach [RIC1989]).

Mode I umfasst dabei alle Normalbeanspruchungen, die ein Öffnen eines Risses, d. h. ein symmetrisches Entfernen der Rissufer bezogen auf die Rissebene bewirken.

Mode II gilt für alle Schubbeanspruchungen, die ein entgegen gesetztes Gleiten der Rissoberfläche in der Rissebene hervorrufen.

Mode III entspricht dem nicht ebenen Schubspannungszustand, der ein Gleiten der Rissoberfläche quer zur Rissrichtung bewirkt.

Dabei sind beim Rissausbreitungsvorgang vor allem die Gegebenheiten an der Risspitze relevant. Die klassische Bruchmechanik als eigenständige Ingenieursdisziplin versucht anhand der Spannungs- und Verschiebungsfelder an der Risspitze Vorhersagekonzepte zu spröden und duktilen Brüchen zu entwickeln. Zur Beschreibung der Spannungsverteilung an Rissen ist die Auswahl eines geeigneten Bruchkriteriums notwendig, um diese bauteilspezifische Größe einem entsprechenden Werkstoffkennwert gegenüberzustellen. Für diese Arbeit wird die Normalbeanspruchung von Rissen unter der im Allgemeinen verwendeten gesamtenergetischen Betrachtung nach dem Griffithschen Kriterium für Sprödbrüche zu Grunde gelegt, welches besagt, dass ein Riss sich fortpflanzt, wenn die frei werdende Bruchenergie die Oberflächenenergie, bzw. die Bruchzähigkeit des Werkstoffs überschreitet.

1.5.1 Örtliche Betrachtungen zu den verschiedenen Faserverbunden

Für die Analyse und Interpretation akustischer Signale der zu untersuchenden Werkstoff- und Materialproben sind strukturelle und tribologische Betrachtungen über den Skalenbereich der mesoskopischen Ebenen sinnvoll. Wichtig ist die gesamtenergetische Betrachtung und Einordnung der verschiedenen irreversiblen Versagensmechanismen, wie Rissinitiierung und -wachstum bis hin zum Bruch. Darüber hinaus werden so auch reversible oder reproduzierbare Phänomene, wie Reibungserscheinungen, die aufgrund von Delaminationen im Material auftreten, akustisch erklärbar.

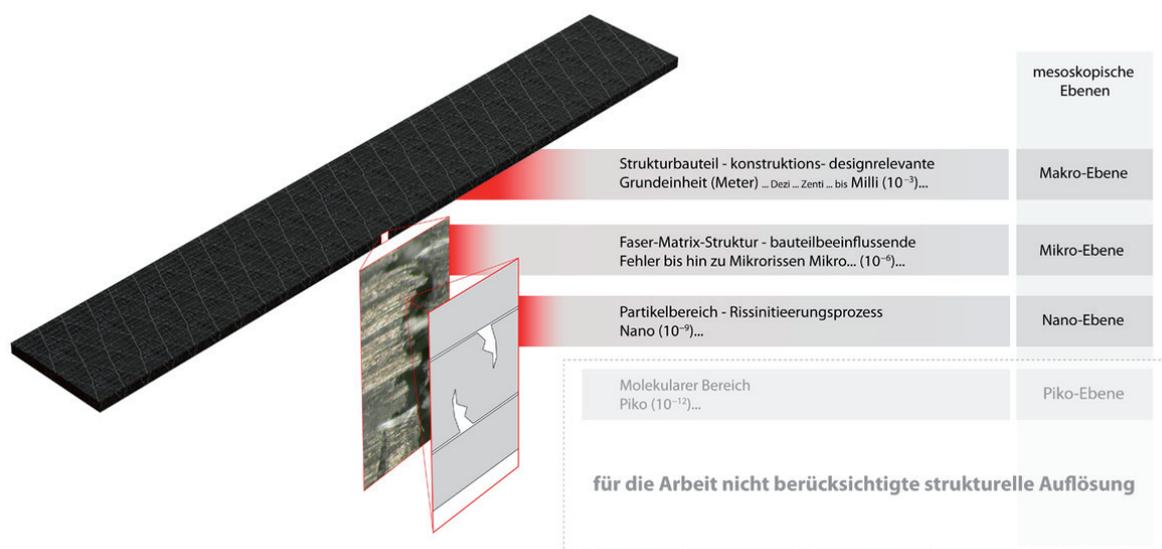


Abb. 1.5.1.a: strukturelle Übersicht der mesoskopischen Skala zwischen Mikro und Nano unter Einbeziehung der f. d. Gestaltung relevanten Makroebene

Die Arbeit konzentriert sich bei der bruchmechanischen, bzw. energetischen Betrachtung auf den mit den zur Verfügung stehenden Werkzeugen und Methoden beschreibbaren Bereich zwischen makroskopischer Bauteilstruktur und mikroskopisch analysierbarem Werkstoffaufbau, bzw. Materialzustand.

Eine Auflösung des Energiespektrums hinein in den atomaren Bereich wird nicht näher betrachtet, da ein akustisch elementarer und für die Untersuchung relevanter Rissinitiierungsprozess mit der eingesetzten Messtechnik erst ab dem nanoskaligen Bereich erfassbar ist und dort eher als Elementarprozess verstanden werden kann, der in Summe nachgelagerte Energiefreisetzen in Form von qualitativ differenzierbaren Schwingungen im Sinne der akustischen Werkstoff- und Materialcharakterisierung anregt.

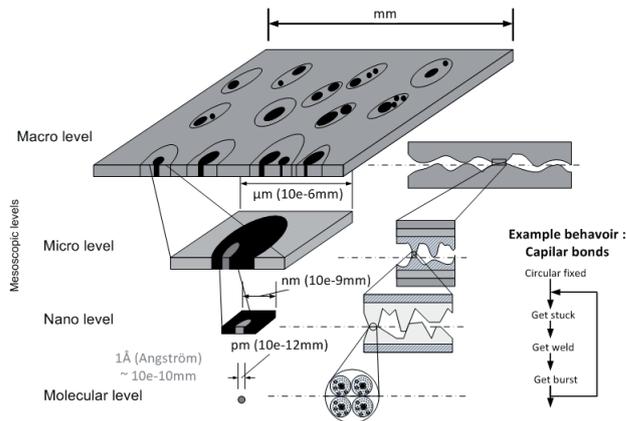


Abb. 1.5.1.b: äquivalentes Modell aus tribologischer Sicht - Skalen der Reibung (nach [NEU2015])

Um orts aufgelöste Bruch-Informationen im Bereich der Mikro- bis Makro-Ebene zu akquirieren, wurden im ersten Schritt entsprechend der in Kapitel 1.3.1 beschriebenen Vorgehensweise verschiedene Werkstoffproben bis hin zum Bruch gestresst und anschließend visuell begutachtet.

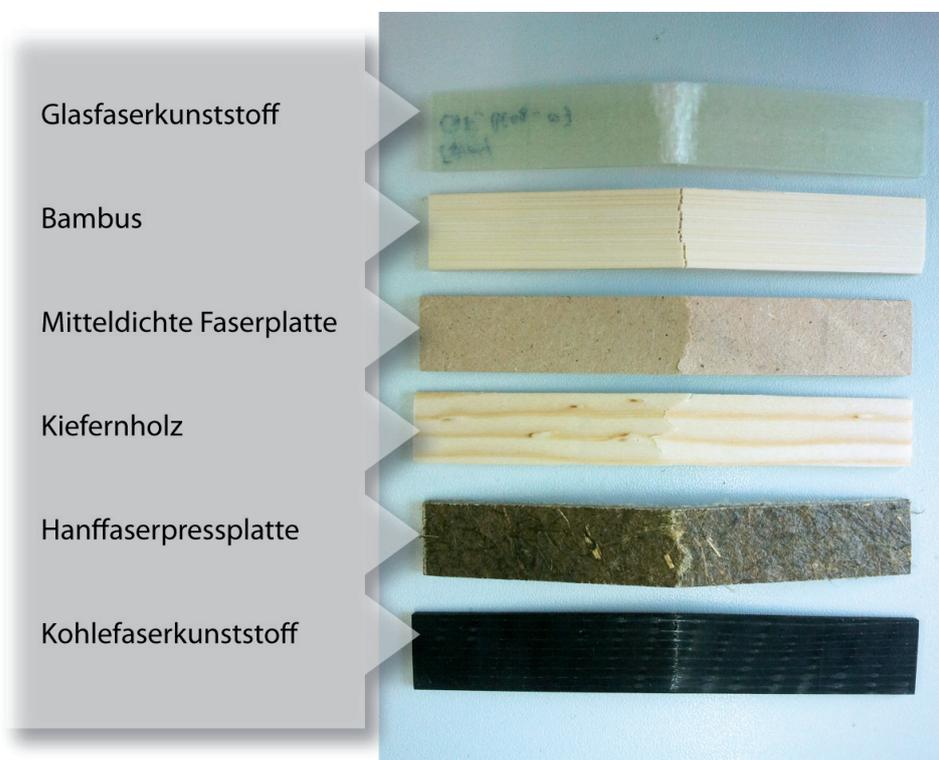


Abb. 1.5.1.c: Übersicht der Material- und Werkstoffproben für die optischen Untersuchungen

Bereits der relative Vergleich der unterschiedlichen Bruchbilder (Abb. 1.5.1.c) in z-Richtung (x-y Ebene; siehe Abb. 1.3.1.a) zeigt prägnante Unterschiede, die auf ein differenziertes akustisches Verhalten hindeuten. So schwankt zum einen der Anteil der Fasern, welche tatsächlich zugseitig frakturiert sind erheblich. Bei den Hölzern und bei Kohlefaserkunststoff ist dieser sehr ausgeprägt, wohingegen bei GFK und NFK-Werkstoffen weitaus weniger Fasern versagt haben. Auf der anderen Seite existieren bei der letztgenannten Gruppe aufgrund der plastoelastischen Matrixanteile (NFK) oder der Wirrfaserorientierung (MDF) Stauchungszonen auf der Druckseite des Biegeträgers. Diese sind bei den Hölzern und bei CFK/GFK weniger ausgeprägt, bis kaum oder nicht vorhanden. Hier werden Absorptionsmechanismen vermutet, die den akustisch relevanten Bruch und Reibungsmechanismen entgegenstehen. Dies führt im Gesamtergebnis bei den Holz- und CFK-Proben beinahe zur Komplettfraktur, welche sich bei den GFK und NFK-Proben nicht einstellt. Bei diesen deformiert sich ein Großteil des Faser-Matrix-Verbundes plastisch und die Proben bleiben deswegen in einem Stück. Aus dieser differenzierten Beschaffenheit der Bruchbilder lässt sich bereits ableiten, dass spezifische, bzw. werkstoffbezogene Unterschiede der Freisetzung von akustischen Signalen im Sinne der energetischen Betrachtung existieren, die sich bei den akustischen Untersuchungen in unterschiedlichen Amplitudenniveaus äußern werden. Die unterschiedlichen Beschaffenheiten der Rissufer, die von feinfaserigen Strukturen bis hin zu scharfen Grenzen reichen, lassen darauf schließen, dass mechanische Differenzierungen, wie Fasergröße, -zustand und -anzahl zu einer akustischen Differenzierung bei der Amplitudenverteilung führen werden.

Die unterschiedlichen Bruchbilder in Abb. 1.5.1.d, e und g wurden mit einem okularlosen, afokalen Stereo-Zoom Mikroskop der Firma „Vision Engineering“ vom Typ „LYNX“ mit 80-facher Vergrößerung dokumentiert, um den ersten optischen Eindruck tiefergehend zu untersuchen.

Im ersten Schritt wurden die zerstörten Proben der Gruppe der natürliche Faserverbunde – Kiefer und Bambus mikroskopiert. Bekannt ist, dass sich das Bruchverhalten von Bambus gegenüber herkömmlichen Holz unterscheidet, da Steigerungsfaktoren der Bruchzähigkeit existieren. Beim Reißen von Einzelfasern erfolgt dadurch kein spontaner Bruch und die Risse, bzw. die eingeleitete Energie wird im Material von der festigkeitsgefährdenden Stelle in Faserrichtung abgeleitet. Das beschriebene Verhalten findet sich in Abb. 1.5.1.d rechts wieder. Beim Kiefernholz hingegen kommt es zugseitig beginnend zur spontanen, impulsartigen Freisetzung der Energie, wobei die Energie vergleichsweise geringer in Faserrichtung abgeleitet wird und ein völlig anderes Bruchbild entsteht, bei dem sich der Riss diagonal zur Faserausrichtung ausbreitet.

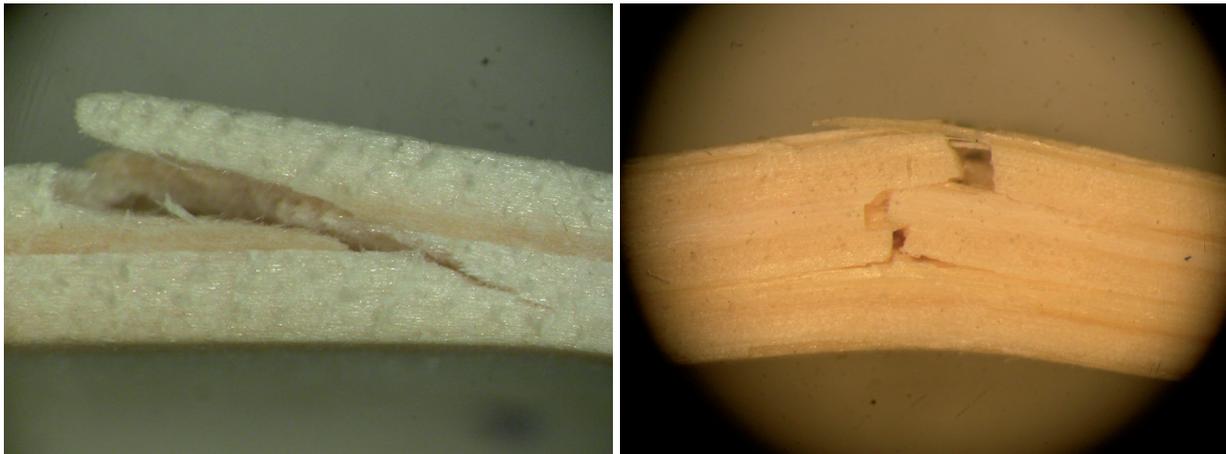


Abb. 1.5.1.d: Bruchbilder natürlicher Faserverbunde; 80facher Zoom; links: Kiefer; rechts: Bambus

Anders als bei den Hölzern liegen die eingebrachten Faseranteile der in Abb. 1.5.1.f abgebildeten Naturfaser-Kunststoffverbunde in wirrer und weitestgehend homogener Verteilung zur Matrix, wodurch sich die Bruchgeometrien dieser quasiisotropen Werkstoffe deutlich von den längsfaserorientierten Fehlerbildern

unterscheiden. So kommt es beim MDF (links) zu Ausfaserungen, die durch alle drei beschriebenen Rissmodi verursacht sind und von 0,3 bis 6 mm reichen. Entsprechend sind auch die Rissufer mit sehr fein strukturiertem Faserauszug ausgebildet. Beim Hanf-Flachs-Werkstoff finden sich vermehrt Mode I und III-Risse, da Fasern von 1 bis 5 cm verwendet wurden, was in Kombination mit der zähen Matrix eher zum Abgleiten der Fasern in den entsprechenden Raumachsen führt. Auf der Druckseite treten zudem deutlich ausgeprägte Stauchungen und Faltungen aufgrund der unzureichenden Faserintegration auf. Die vorab beschriebenen WPC-Proben standen zum Zeitpunkt der mikroskopischen Untersuchungen noch nicht zur Verfügung, verhalten sich aber ähnlich den MDF-Zuschnitten, wobei die thermoplastische Matrix das Bruchverhalten noch stärker in Richtung Zähigkeit verschiebt.



Abb. 1.5.1.e: Bruchbilder Naturfaser-Kunststoffverbunde; 80facher Zoom; links: MDF; rechts: Hanf

Die Tatsache, dass beide Werkstoffe hinsichtlich entsprechender Schallabsorptionsanforderungen konzipiert wurden, erklärt die bereits bei den Versuchen registrierte unscheinbare akustische Charakteristik und verdeutlicht deren Beeinflussbarkeit durch die Auswahl des Matrixwerkstoffes. Die in Abb. 1.5.1.f dargestellte Unterteilung der Matrixarten in amorphe und teilkristalline Matrizes (nach [ENS2016]) fasst die allgemeinen gestaltungsrelevanten Eigenschaften zusammen und leitet Prognosen hinsichtlich des zu erwartenden akustischen Verhaltens ab (Ergänzungen des Autors in Rot).

<p>amorphe Matrix meist transparent oder transluzent geringe Kriechneigung eher sprödes Verhalten gut Dimensionsstabilität spannungsrissempfindlich</p> <p>► Akustik: impulsartig, intensiv, klanghaft</p>	<p>teilkristalline Matrix transluzent oder opak hohe Ermüdungsfestigkeit eher zähes Verhalten gutes Gleitverhalten verschleißfest</p> <p>► Akustik: eher homogen, fiffus, geräuschartig</p>
---	--

Abb. 1.5.1.f: allgemeine Eigenschaften der verwendbaren Matrizes bei Faserverbundwerkstoffen

Das bereits bei Bambus beschriebene Prinzip, dass dem Risswachstum ein geeigneter Materialaufbau entgegenwirkt anstatt die Rissbildung zu unterbinden, findet sich beim Aufbau der untersuchten synthetischen Faserverbundwerkstoffe wieder. So finden sich auch Ähnlichkeiten im Vergleich der Bruchbilder von Bambus und CFK. Auffällig ist der Komplettbruch der CFK-Probe über die Druckseite hinaus, welcher mit der geringeren

Duktilität von CFK aufgrund der wesentlich höheren Festigkeit und bedeutend höheren Steifigkeit im Vergleich zu GFK und Bambus erklärbar ist. Die akustischen Freisetzen der eingebrachten Deformationsenergie, sowie diese selbst, sind in der Testserie vergleichsweise am höchsten. Die Glasfasern der linken Probe weisen dagegen einen auf die Deformation bezogenen klar erkennbaren Gradienten auf, der von der neutralen Faser mit leichten Mode II-Delaminationen beginnend bis zur Zugseite mit Mode I-Brüchen reicht. Die Druckseite zeigt lediglich leichte Stauchungen. Beide Werkstoffe betten die Fasern in eine teilkristalline Matrix ein, was die beschriebene Sprödeheit erklärt. Bei GFK vollzieht sich das Versagen aufgrund der vielen Einzelereignisse in Form von Faserdelamination und -bruch, jedoch kontrollierter. Bei GFK ist eine pauschale Beschreibung aufgrund der strukturellen Anisotropie schwer möglich, weil zwischen unterschiedlichen Versagensarten unterschieden werden muss. Die Festigkeiten in beiden Werkstoffen reagieren zudem sehr empfindlich auf die in Kapitel 1.2.1 beschriebenen Fehler und Änderungen der Fertigungsparameter.

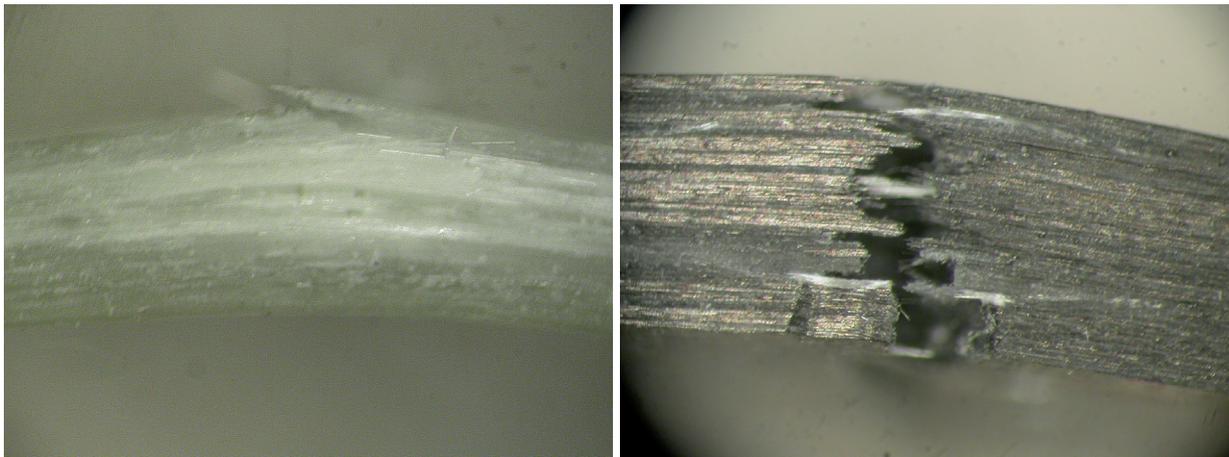


Abb. 1.5.1.g: Bruchbilder synthetischer Faserverbunde; 80facher Zoom; links: GFK; rechts: CFK

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass sich die optische Differenzierung der ausgewählten Werkstoffe auch in unterschiedlichen Bruchbildern widerspiegelt, was mit Sicht auf die akustische Charakterisierung darauf schließen lässt, dass auch dieses Ergebnis klare Unterschiede liefern wird. Sind die Rissufer bei Bambus und CFK klar abgegrenzt, so zeigen die NFK, aber auch die Glasfaserproben erhöht freiliegende Faseranteile an den Bruchgrenzen. Die NFK-Werkstoffe weisen deutlich sichtbare Stauchungen der Druckseite auf wohingegen die übrigen Proben vorwiegend auf der Druckseite geschädigt wurden. Die GFK-Bilder liefern jedoch optische Indizien dafür, dass die Druckseiten aller Werkstoffe akustische Relevanz haben.

Die Hauptrichtung der Bruchgrenze variiert bei Bambus und CFK von quer zur Faser über die NFK und Kiefer, wo diese diagonal verläuft, bis hin zu nahezu faserparallel bei GFK. Kommt es also bei Ersteren hauptsächlich zum Faserriss, dominieren bei den anderen Proben die in Abb. 1.5.a beschriebenen Rissmodi in unterschiedlicher Ausprägung.

Auf die zur Deformation und zum Bruchversagen aufgewandte Energie, die werkstoffspezifisch mit der in akustischer Form freigesetzten Energie korreliert, wird in den Untersuchungen der folgenden Kapitel näher eingegangen. Ebenso wird dort die zeitliche Verteilung der im Werkstoff freigesetzten akustischen Energie vom Deformationsbeginn bis zum Versagen der Struktur quantitativ untersucht.

1.5.2 Zeitliche Betrachtungen zu den verschiedenen Faserverbunden

Neben den ortsbezogenen Aspekten bei Deformation und Bruch von Werkstoffen sind zur Charakterisierung dieser der relative Zeitbezug der verschiedenen Versagensereignisse, wie z. B. Rissinitiierung, Delamination

oder Totalversagen bedeutsam. Auch hier lassen sich mit vergleichbaren optischen Methoden erste Erkenntnisse über Geschwindigkeit und Dauer gewinnen.

Im ersten Schritt wurden die Proben entsprechend dem in Abb. 1.5.2.a dargestellten Versuchsaufbau mit einer digitalen Hochgeschwindigkeitskamera des Typs Photron Fastcam Ultima APX RS - Model 250K (technische Daten unter [PHO2016]) untersucht. Dabei konnten die Lagerbedingungen hinsichtlich einer möglichst akustisch neutralen Vorrichtung vernachlässigt werden, da bei diesen Versuchen ausschließlich zeitlich-optisch analysiert wurde. Hinsichtlich des Objektabstands und der Belichtung wurde das Optimum empirisch ermittelt, um eine möglichst hohe Bild- und Zeitaufösung verwenden zu können. Im Ergebnis ermöglichten die verschiedenen Anordnungsversuche und Kamerakonfigurationen eine Auflösung von 256x352 px bei einer Framerate von 22500 fps und einem Shutter Speed von 1/22500 s.

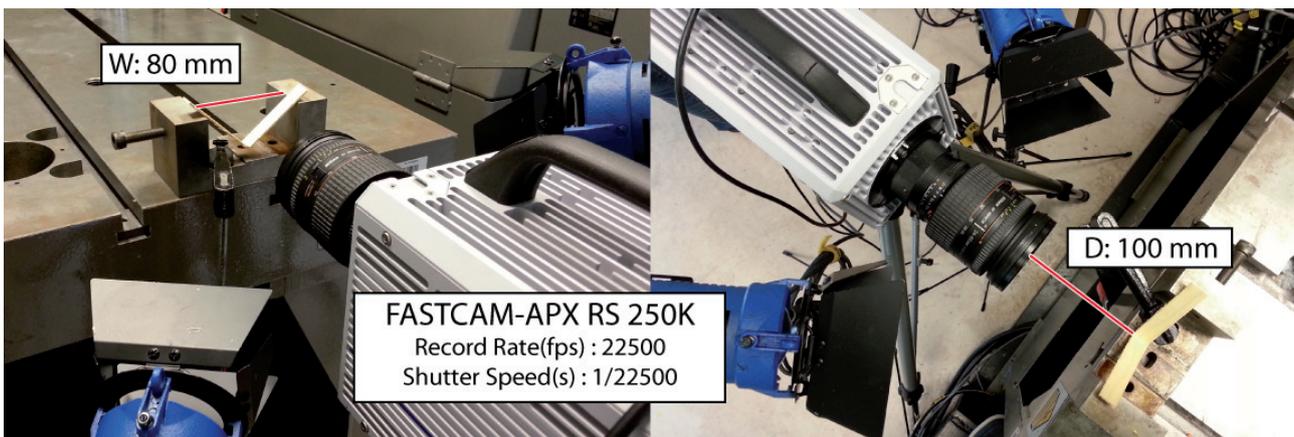


Abb. 1.5.2.a: Versuchsanordnung f. d. zeitlichen Untersuchungen beim Biegeversuch
(Dank an Karl-Heinz Müseler; TU Ilmenau)

Bei ersten Aufnahmen, bei welchen Kiefer-Proben untersucht wurden, war ein mehrstufiges Bruchverhalten zu beobachten. An erste zugseitige Faserbrüche und Delaminationen, nach denen sich das System durch Ableitung der Kräfte in Faserrichtung wieder stabilisierte, schloss sich eine Deformationsphase ohne sichtbare Ausbrüche im Werkstoff an, bevor die nächste Kaskade von Brüchen auftrat. Dieses Verhalten ist auf Faserfraktionierungen mit unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften zurückzuführen, die sich durch das jahreszeitlich bedingte Wachstum (Jahresringe) ausbilden. Sowohl die unterschiedlichen Wuchsausprägungen, als auch die zeitlich abgestuften Bruchkaskaden (Abb. 1.5.2.b; 1-2; 3-4) sind in den Aufnahmen deutlich erkennbar.

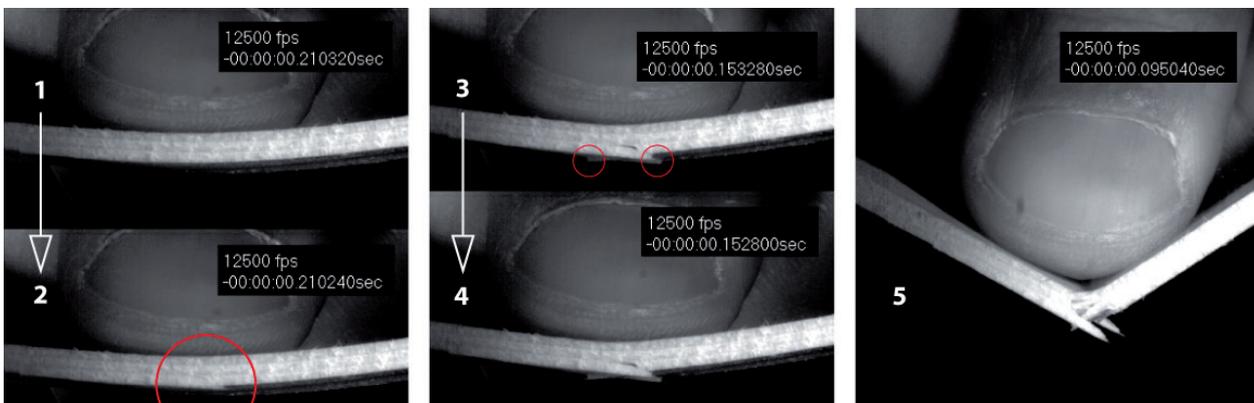


Abb. 1.5.2.b: Bruchereignisse bei der Deformation einer Kiefernholzprobe

Die optisch registrierbaren Bruchvorgänge beim Kiefernholz liegen im Bereich zwischen 0,08 ms (Abb. 1.5.2.b; Bild 1-2) bis ca. 0,5 ms (Abb. 1.5.2.b; Bild 3-4). Die Aufnahmen zeigen, dass der schnelle Prozess von der Rissinitiierung bis zur Zwischenstabilisierung bildlich nicht immer trennbar ist, da das Bild-Zeitraaster von 0,08 ms für diese Vorgänge nur ungenügend auflöst. Dahingegen lassen sich die Deformationszeiträume zwischen den makroskopisch sichtbaren Brüchen sehr gut charakterisieren. Sie liegen in Bereichen zwischen 60 bis 100 ms, wobei sich die Zeiträume mit zunehmender Deformation verringern.

Entgegen dieser zeitlichen Verkürzung sinken die Intensitäten, bzw. die Risslängen der Brüche. Bis zum makroskopischen Totalversagen (Abb. 1.5.2.b; Bild 5) verschmelzen die impulshaltigen Ereignisse zum Geräusch.

Im Vergleich zur Kiefer zeigen die Bambusproben über einen großen Bereich der Gesamtdeformation ein homogenes Bruchverhalten, welches sich akustisch durch ein gleichbleibendes knisterndes Geräusch äußert. Dieses wird durch kontinuierlich auftretende Mikrobrüche im Material verursacht und ist in seiner Gleichförmigkeit durch die homogene Faserstruktur des Bambus begründet. In dieser Phase bleibt die Probe im Vergleich zur Kiefer über einen wesentlich größeren Deformationsbereich optisch unversehrt, ehe sich erste deutliche Risse auf der Zugseite zeigen. Das Risswachstum vollzieht sich aufgrund der gleichmäßigen Fasergeometrie und Verteilung kontrollierter und im Bereich mehrerer Millisekunden (exemplarisch ca. 25 ms in Abb. 1.5.2.c; linke Bildhälfte). Das strukturelle Totalversagen (Abb. 1.5.2.c; roter Rahmen) beim Erreichen der kritischen Deformationsgrenze erstreckt sich über 0,5 ms, was im Vergleich zur Kiefer plausibel erscheint, da das Risswachstum in Belastungsrichtung und relativ zur Gesamtdicke deutlich größer ist. Betrachtet man den relativ großen Betrag des Deformationsweges (Abb. 1.5.2.c; Bild rechts) im Vergleich zur Kiefer erscheint dieses Verhalten plausibel, da der durch das Risswachstum freigesetzte Energieeintrag wesentlich höher ist.

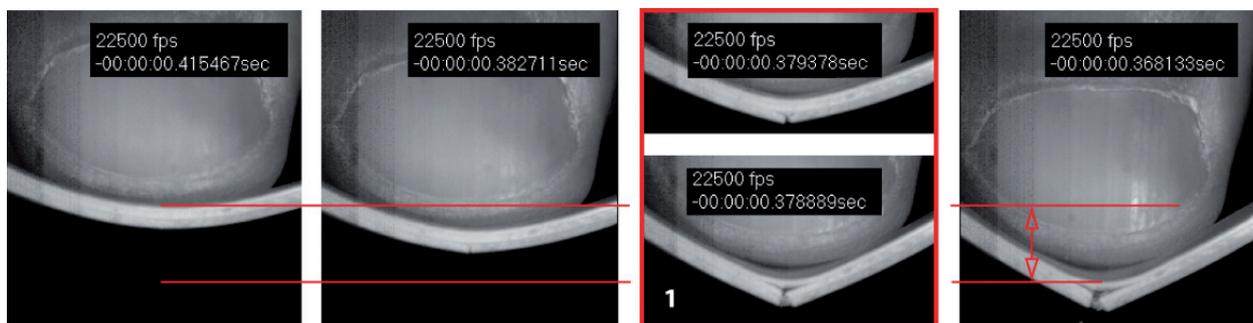


Abb. 1.5.2.c: Deformation und Bruch einer Bambusprobe (Deformationsweg und Hauptrisswachstum bei Versagen hervorgehoben)

Die untersuchten Naturfaserkomposit-Proben und die der mitteldichten Faserplatte verhalten sich bei diesen Untersuchungen annähernd gleich, obwohl die Varianzen durch Faserlänge und -art und die jeweils verwendete Matrix einen Einfluss auf das Deformations- und Bruchverhalten haben. Da im konkreten Lastfall jedoch keine prägnanten Unterschiede feststellbar waren, steht die in Abb. 1.5.2.d verwendete Hanffaserprobe exemplarisch für die zu untersuchenden NFK-Werkstoffe.

Bei der gezeigten Hanffaser-Probe konnte ein komplettes Versagen der Zugseite bis hin zur neutralen Faser innerhalb von 1,4 ms beobachtet werden, was in diesem Fall bedeutet, dass der makroskopische Bruch mithilfe der Kamera gut auflösbar und damit optisch analysierbar ist. Aufgrund der geringeren Festigkeit der Naturfasern im Vergleich zu den vorab gestressten Materialfasern ist der notwendige Energieeintrag, um die Probe zu deformieren und zum Bruch zu führen geringer. Dementsprechend sind auch die in Krafrichtung auftretenden Mode-I-Risse weniger stark ausgeprägt. Die Rissufer zeigen relativ kurzfasernig delaminierte Bereiche, da Fasern weniger steif sind und so Risswachstum längs zur Faser nur sehr begrenzt stattfindet.

Jedoch ist trotzdem eine deutlich ausgeprägte makroskopische Schwingung der Probe nach dem Zerbrechen zu beobachten, welche allerdings schneller abgedämpft wird, als bei den Werkstoffen mit höherem E-Modul. Prinzipiell erscheinen diese Phänomene in den noch folgenden akustischen Messungen in einem gut auflösbaren Zeitversatz und sind somit gut von der f. d. Arbeit relevanten Akustik differenzierbar.

Die Probe zeigt am Ende kein komplettes Zerreißen der Struktur, da die Biegeseite nach dem Strukturversagen größtenteils durch Mode-II-Risse desintegriert wird und die meisten Fasern durch den resultierenden Verlust an Steifigkeit nicht bis zum Bruch belastet werden.

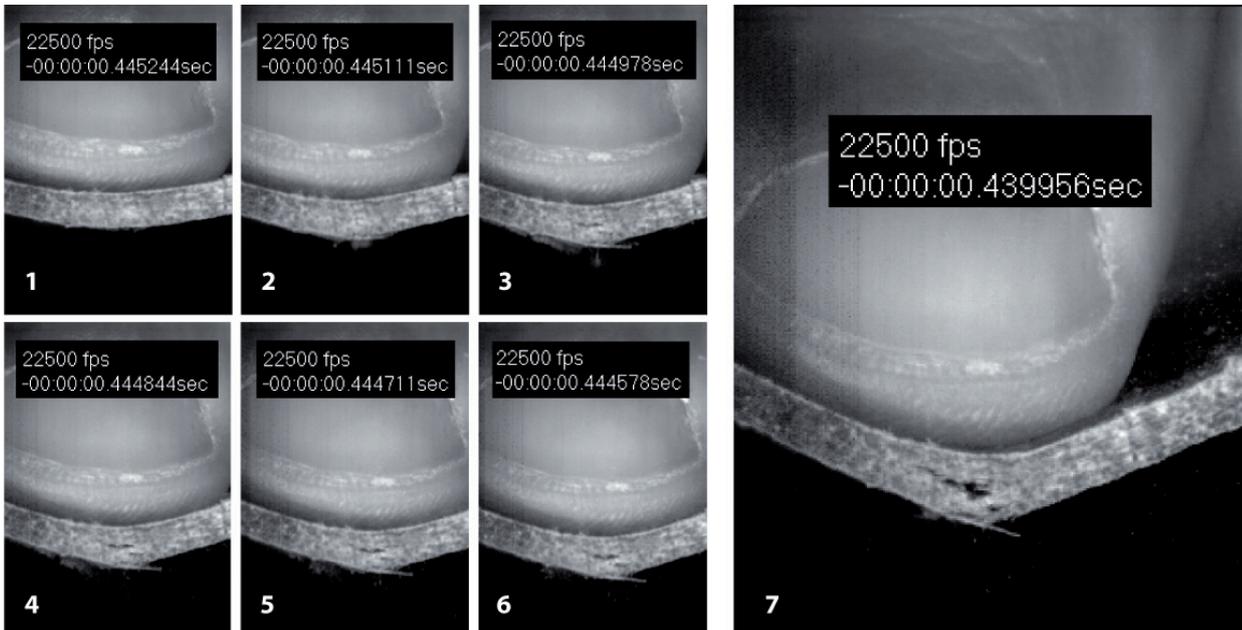


Abb. 1.5.2.d: Ausschnitte einer Bruchsequenz in einer NFK-Probe (Bild 1–6) u. Endzustand (Bild 7)

Die von links nach rechts abgebildeten Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitsaufnahme in Abb. 1.5.2.e zeigen den Bruch einer Kohlefaserprobe im Zeitraum von ca. 0,8 ms von der Deformation über erste sichtbare Vorschädigung in Form von Faser-Delaminationen auf der Zugseite (bei ca. 0,3 ms) bis zum Totalversagen. Erste hörbare Schädigungsgeräusche sind allerdings nahezu über den gesamten Deformationsvorgang wahrnehmbar und damit wichtiger Indikator für den Nutzer. Das Experiment zeigt, dass auch die Brüche bzw. das Risswachstum im CFK-Werkstoff so schnell entstehen, dass die Kamera diese zeitlich nicht mehr auflösen kann.



Abb. 1.5.2.e: Kohlefaserprobe bei Biegebelastung bis zum Strukturversagen

Bei den Experimenten zur Zeit- und Ortsbetrachtung wurden abschließend mit einem High-Speed- und Digital-Mikroskop vom Typ Keyence VW 9000, welches für die Analyse hochdynamischer Vorgänge im Mikrometerbereich konzipiert wurde, experimentiert. Dabei konnte die theoretisch erreichbare Bildrate von maximal 230000 fps, die einer Abtastung von ca. 4,5 μ s entspräche, aufgrund der experimentellen Gegebenheiten nicht verwendet werden. Die in Abb. 1.5.2.f gezeigten Aufnahmen wurden deswegen mit 4000 fps bei 640x480 Pixeln aufgenommen, was einem Raster von ca. 0,25 ms entspricht. Allerdings konnten die Bilder dadurch optisch mit 200-facher Vergrößerung aufgelöst werden.



Abb. 1.5.2.f: Aufnahme des Bruchvorgangs in Kiefernholz mit dem Keyence VW 9000 bei 200-facher Vergrößerung

Die optische Qualität der Aufnahmen zeigen im Vergleich zu denen der APXRS - 250K eine deutliche Steigerung, welche im Ergebnis aber hinsichtlich der Erstgenannten lediglich die dort gemachten Beobachtungen konsolidieren kann. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in den Experimenten erreichbaren 22500 fps und die sich daraus ergebende zeitliche Auflösung von 0,08 ms prinzipiell nicht ausreichen, um die Rissinitiierungsvorgänge bzw. das sehr schnelle Risswachstum zu untersuchen. Eine erste Einordnung der Dauer von sichtbaren Bruchvorgängen kann lediglich in Bezug auf das auf 80 μ s limitierte Raster vorgenommen werden. Die Technologie der Hochgeschwindigkeitskamera ist aber bereits gut verwendbar, um größere, makroskopisch sichtbare Brüche zeitlich zu registrieren und geometrisch einzuordnen. Das Verfahren ist damit sehr interessant für die Untersuchung und Beschreibung der spezifischen Bruch-Charakteristik, da diese die psychoakustische Wahrnehmung steuert und zeigt den komplementären Wert von Akustik und Optik somit gut auf.

Die Experimente zeigen auf der einen Seite wie aufschlussreich direkte Betrachtungen der örtlichen und zeitlichen Phänomene bei Deformations- und Bruchvorgängen sein können, offenbaren aber auch die Grenzen hinsichtlich der optischen Wahrnehmbarkeit von sehr schnellen, transienten oder optisch nicht mehr auflösbaren Ereignissen. Um auch diese Mechanismen zu untersuchen werden im nächsten Kapitel verschiedenen akustische und akusto-optische Methoden eingeführt, um diese hinsichtlich der Verwendbarkeit für die desig-nakustische Analyse zu bewerten.

2 SIGNALANALYSEMETHODEN – MENSCH – MASCHINE

„... Dann wurde ich Schall, und wer Schall wird, wird Welle. Ich wage zu behaupten: Wer weiß, wie es ist, eine Schallwelle zu sein, der ist den Geheimnissen des Universums schon ein gutes Stück näher gekommen. Und nun verstand ich es, das Geheimnis der Musik, ich verstand, warum sie allen anderen Künsten so turmhoch überlegen ist: Es ist Ihre Körperlosigkeit. Wenn sie sich einmal von ihrem Instrument gelöst hat, dann gehört sie wieder ganz sich selbst, ist ein eigenständiges freies Geschöpf aus Schall, schwerelos, körperlos, vollkommen rein und in völligem Einklang mit dem Universum. ...“ [MOE04].

2.1 Analogien bei Wahrnehmung und Signalverarbeitung

Das folgende Kapitel beschreibt, wie die im vorangegangenen Abschnitt geschilderten Deformations- und Bruchphänomene über verschiedene Systeme akustisch empfangen und weiterverarbeitet werden.

Beginnend mit den Ausführungen zu verschiedenen akustischen und akusto-optischen Methoden, welche beispielhafte Zugänge zur Datenverarbeitung widerspiegeln, werden darauf aufbauend die spezifischen mathematischen und signaltheoretischen Grundlagen beschrieben, die zur technischen Rezeption, Ursachenforschung und zur Notation der menschlichen Hörwahrnehmung notwendig sind.

Einleitend sei an dieser Stelle erklärt, dass die Kapitelüberschrift „Signalverarbeitung“ bewusst gewählt wurde, da der eigentliche Vorgang nach Erachten des Autors äquivalent zum Modell der „Wahrnehmung des Menschen“ zu betrachten ist – ebenso wie der Begriff des Signals, oder der Information. In den folgenden Ausführungen werden die verschiedenen Theorien deswegen integrativ in einem Gedankenmodell vereint. Abb. 2.1.a veranschaulicht die beschriebene akustische Kommunikation und stellt entsprechende kontextuelle Bezüge zum integrativen Ansatz der synthetischen Möglichkeiten dar.



Abb. 2.1.a: Gegenüberstellung der humanen und synthetischen Wahrnehmungs- bzw. Empfangs- und Auswertesysteme

2.2 Referenzielle Untersuchungen mittels Schallemissionsanalyse

Um die Rissinitiierungsprozesse und Vorschädigungen im Werkstoff tiefergehend zu untersuchen, werden in dieser Arbeit verschiedene akustische Verfahren verwendet, welche in verschiedenen Frequenzbereichen arbeiten. Dabei variieren diese prinzipiell hinsichtlich der akustischen Ankopplung, da je nach Ausrichtung des spezifischen Experiments sowohl Luft- als auch Körperschallverfahren herangezogen werden. Einleitend soll Abb. 2.2.a exemplarisch verdeutlichen, welches Potenzial akustische Untersuchungen für die Herleitung des akustischen Werkstoffverhaltens haben, weil damit die verschiedenen Schädigungsmechanismen differenzierbar werden und die Signale darüber hinaus anhand psychoakustischer Kenngrößen bezüglich der Nutzerakzeptanz kategorisierbar werden.

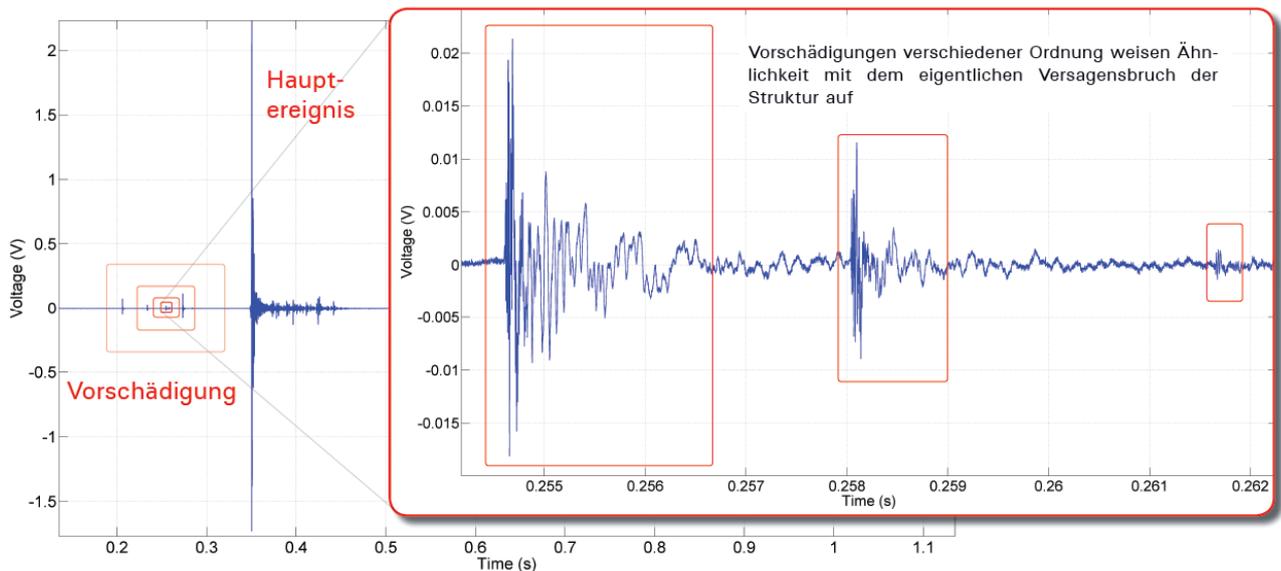


Abb. 2.2.a: Zeitliche Darstellung eines CFK-Bruchs mit initialen Vorschädigungsereignissen hin zum Totalversagen und hoch aufgelöste Darstellung derselben Vorschädigungsereignisse (siehe Beitrag DAGA 2014 des Autors)

Mit Hilfe der in den folgenden Untersuchungen angewandten Schallemissionsanalyse werden vorrangig verschiedene, aus dieser Methode ableitbare Merkmale ausgewertet, welche bei Deformation und Bruch der in Kapitel 1.3.1 und 1.3.2 beschriebenen Werkstoffproben in Form von sog. Bursts entstehen. Die Methode selbst wird in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung verwendet, um Mikrorissereignisse im Bereich von 20 kHz bis 2 MHz zu orten und statistischen Bewertungen zu unterziehen. Auf weiterreichende qualitativ und quantitativ ausgerichtete Experimente, welche im Zuge einer spektralen Auswertung unter Anwendung entsprechender Algorithmik zur angepassten designakustischen Analyseverfahren herangezogen werden, wird über diese Methode hinaus in Kapitel 3 näher eingegangen.

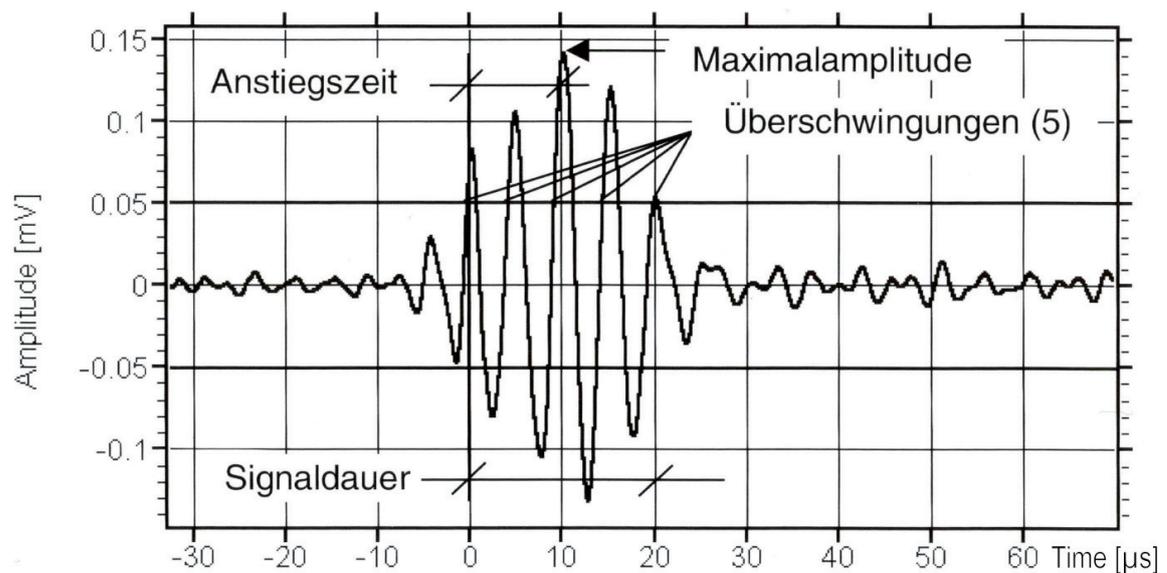


Abb. 2.2.b: Merkmale transienter Signale als Grundlage der Merkmalsextraktion bei der Schallemissionsprüfung (sog. Acoustic Emission Methode)

Die Schallemissionprüfung – im Folgenden Acoustic Emission (AE) genannt – stützt sich meist auf tausende von Bursts, welche statistisch durch Merkmalsextraktion auswertbar sind. Die Methode wertet die Parameter zunehmend signalbasierend aus. Zur Werkstoffcharakterisierung werden dabei meist folgende verfahrenstypische AE-Merkmale verwendet (nach [VALL03]; siehe Abb. 2.2.b):

- Ankunftszeit (Absolutzeitwert vor dem ersten Count)
- Maximalamplitude
- Anstiegszeit
- Signaldauer
- Überschwingungen eines Hits (Counts – Zahl der Schwellen-Überschreitung in einer Polarität)
- Energie (Integral der Momentanwerte des Spannungsverlaufs)
- RMS (Effektivwert des kontinuierlichen Hintergrundgeräusches)

Darüber hinaus können bei den Untersuchungen auch sog. externe Parameter – in diesem Falle die aufgetragene Last – mit der freigesetzten Energie in Bezug gebracht werden. Das Verfahren ist dahingehend begrenzt, dass keine Auswertung der akustischen Originaldaten möglich ist. Die dafür notwendige signalbasierte Auswertung würde einen wesentlich höheren Datenaufwand erfordern. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die aktuellen IT-Entwicklungen dies zunehmend in Form von Signalformanalysen ermöglichen. Durch die Betrachtung der Quantität und Verteilung der registrierten Bursts lassen sich so auch qualitative Aussagen treffen. Das klassische AE-Verfahren konzentriert sich zudem lediglich auf die irreversiblen akustischen Phänomene. Die weiteren in Abb. 2.2.c beschriebenen akustischen Verhaltensweisen lassen sich mit dem AE-Verfahren nur bedingt interpretieren, was durch die noch ausstehende Auswertung der akustischen Originaldaten ergänzend erfolgen soll. Zu beachten ist außerdem, dass die beim Verfahren verwendete Sensorik meist in einem ausgewählten Bereich des Frequenzspektrums, welcher von den Sensoreigenschaften abhängt, arbeitet. Dadurch können Phänomene, die in ihrer Frequenzcharakteristik neben der Resonanzfrequenz auftreten ggf. nicht als Hit im Sinne einer Schwellenüberschreitung registriert werden.

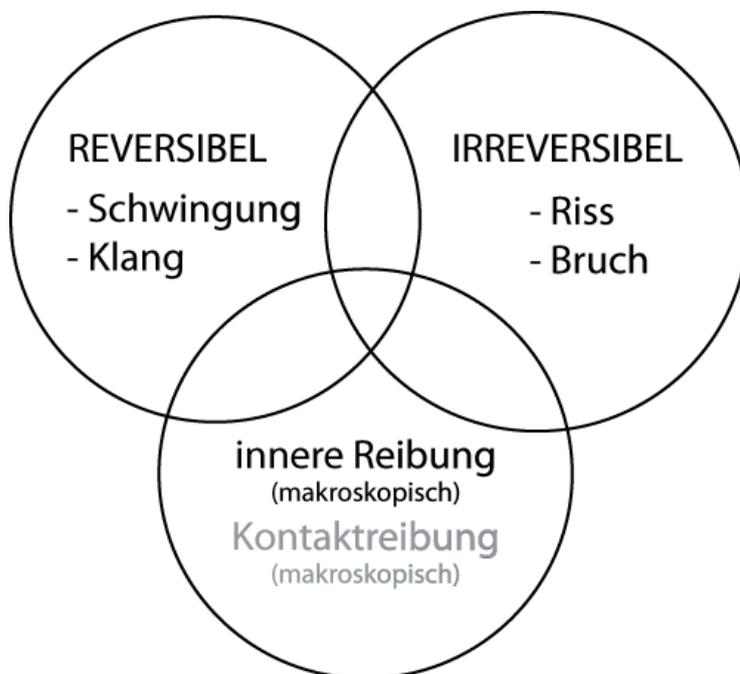


Abb. 2.2.c: Übersicht der grundlegenden akustischen Verhaltensweisen mit Überdeckungsbereichen, welche die verschiedenen Werkstoffe durch individuelle Varianz charakterisieren

Im konkreten Fall wurden die Experimente dankenswerterweise mit fachlicher Unterstützung von Prof. Bierögel und Dr. Schoßig am Institut für Polymerwerkstoffe e. V. in Merseburg durchgeführt. Zur Belastung der verschiedenen Proben kam eine elektromechanische Werkstoffprüfmaschine vom Typ Zwick Z020 (20 kN) unter Verwendung von pneumatischen Klemmen und Biegeeinrichtungen zum Einsatz. An die Proben wurde ein AE-Sensor vom Typ Fuji M204A konventionell mittels Bienenwachs gekoppelt und an ein Schallemissionsprüfsystem vom Typ AMSY 4 der Firma VALLEN-Systeme angeschlossen.

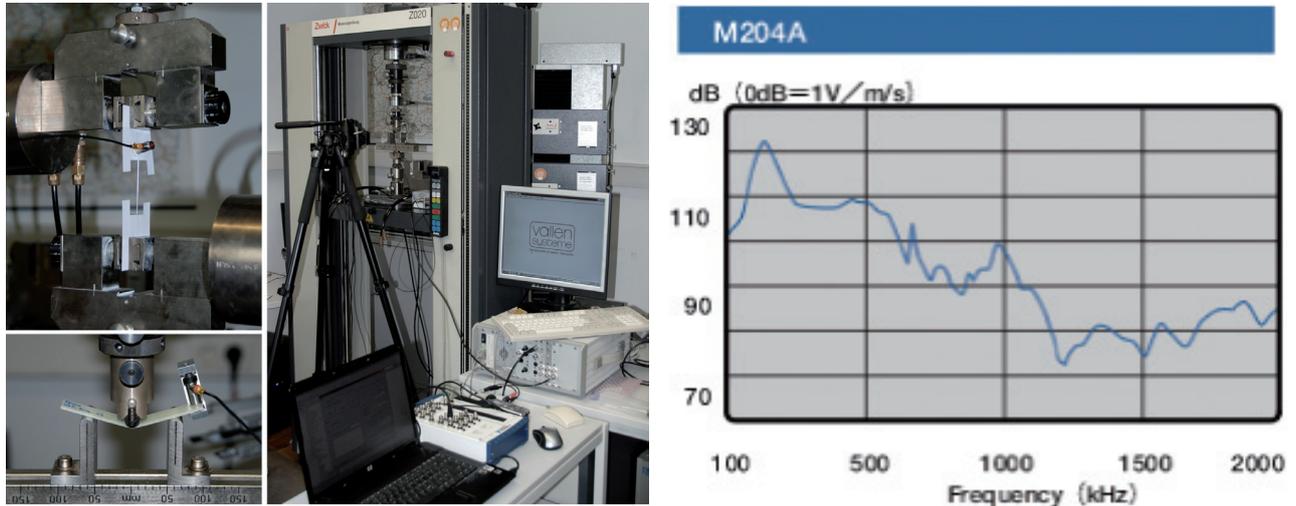


Abb. 2.2.d: AE-Versuchsanordnungen für die verschiedenen Zug- und Biegeversuche (links) mittels AMSY 4 System (Mitte) und AE Sensor M204A; Abb. rechts zeigt die Sensorkennlinie mit der Resonanzfrequenz bei 200 kHz und die entsprechende Signalabschwächung bei anderen Frequenzen gegenüber den max. 120 dB (Sensorkennlinie nicht linear – damit für spektrale Auswertungen nicht geeignet)

2.2.1 Akustisches Faserverbund-Verhalten im Zugversuch

Zur besseren Differenzierung der akustischen Einzelvorgänge „Faserbruch“ und „Faserabgleiten“ wurden in einer ersten Versuchsreihe die in Kap. 1.3.2 beschriebenen Zugproben untersucht. Dabei wurden ungetränkte Glas- und Kohlefaserfilamente verwendet, da sich bei diesen das akustische Faserverhalten ohne Matrix-Einfluss unproblematisch charakterisieren lässt, was darüber hinaus auch elementar für eine inverse Modellierung, bzw. Synthese der akustischen Signale ist. Die Ergebnisse der bei den Hits auftretenden Amplituden, über den Deformationsverlauf bis zum Bruch, werden in Abb. 2.2.1.a gegenübergestellt. Bei beiden Werkstoffen zeigen sich die Fraktionierungen der o. g. Ereignistypen, wobei sich die höherenergetischen Einzelfaserbrüche bei CFK aufgrund der Hochmoduligkeit dieser Fasern gegenüber GFK deutlicher von den niederenergetischen Reibungsvorgängen, welche durch die steigende Belastung der Proben auftreten, abheben. Neben dieser charakteristischen Trennung sind beide Werkstoffe auch gut über die Anzahl der Hits pro Sekunde voneinander differenzierbar, welche bei CFK mit über 140 max. um eine Größenordnung über der von GFK liegen (siehe Abb. 2.2.1.c; links).

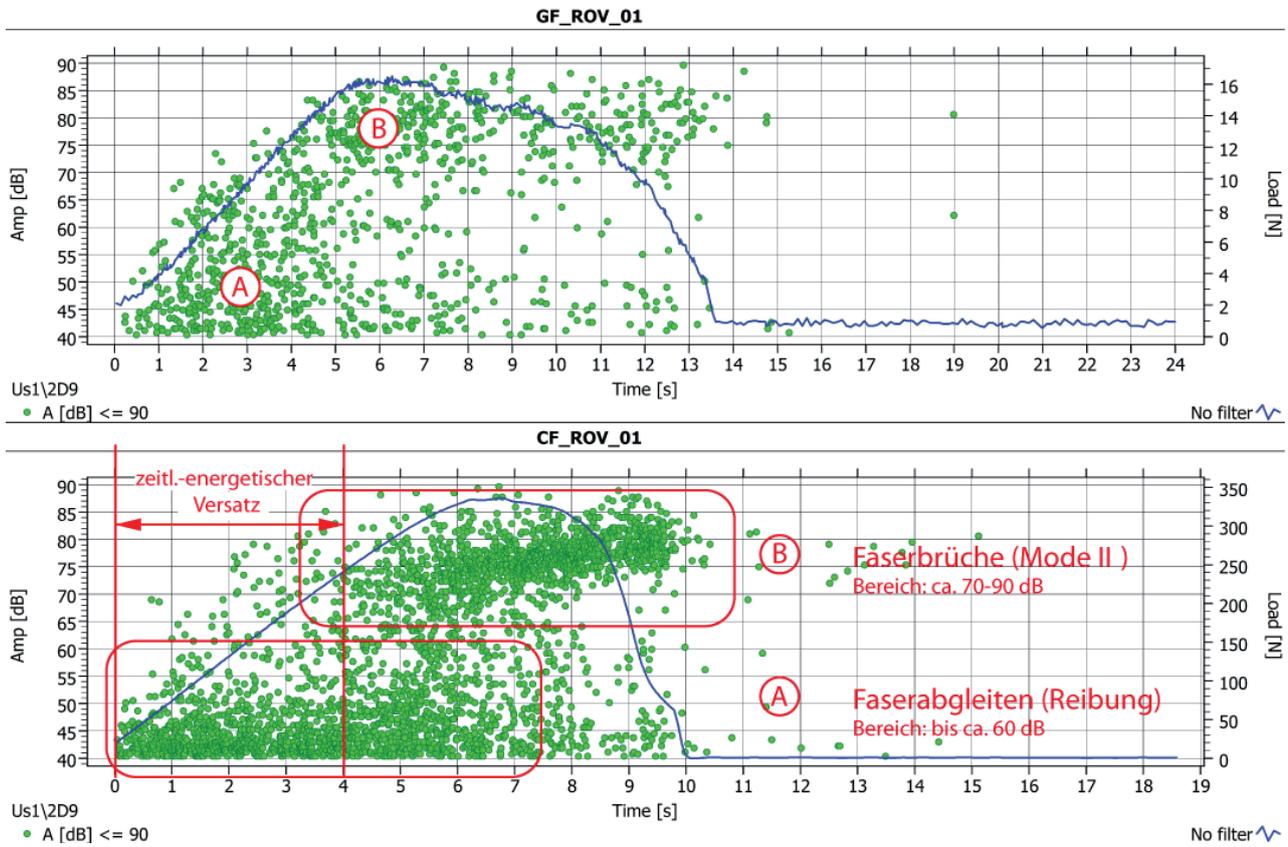


Abb. 2.2.1.a: Gegenüberstellung und grafische Auswertung von zugbelasteten Glasfaser- (oben) und Kohlefaserfilamenten (unten) zur Differenzierung verschiedener akustisch relevanter Mechanismen

Die Anzahl der Gesamthits von CFK übersteigt die von GFK um Faktor 3 (Abb. 2.2.1.c; rechts). Der Kohlefaserwerkstoff liefert somit deutlich mehr Informationen in Form akustischer Signale, in Folge der freigesetzten Energie – er ist sozusagen „kommunikativer“. Zu berücksichtigen ist, dass der Energieeintrag, der notwendig ist, um die Probe zu zerreißen dabei um ein Vielfaches höher ist, obwohl die optischen Deformationseffekte bei beiden Bruchvorgängen vergleichbar erscheinen.

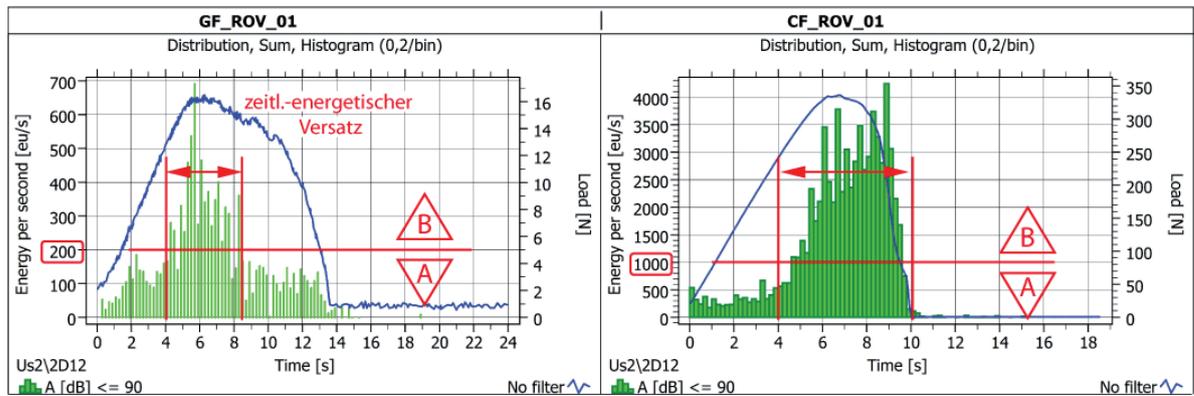


Abb. 2.2.1.b: Energetische Auswertung der Mechanismen mit relativem Vergleich beider Materialien

Die zeitliche Verschiebung der Cluster, bzw. das verspätete Einsetzen von höheren Amplituden im Bereich von ca. 70-90 dB begründet sich bei beiden Werkstoffklassen mit dem steigenden Energieeintrag im Deformationsverlauf, dessen Rate sich bei beiden Werkstoffen deutlich vom niederenergetischen Teil absetzt (siehe Abb. 2.2.1.b).

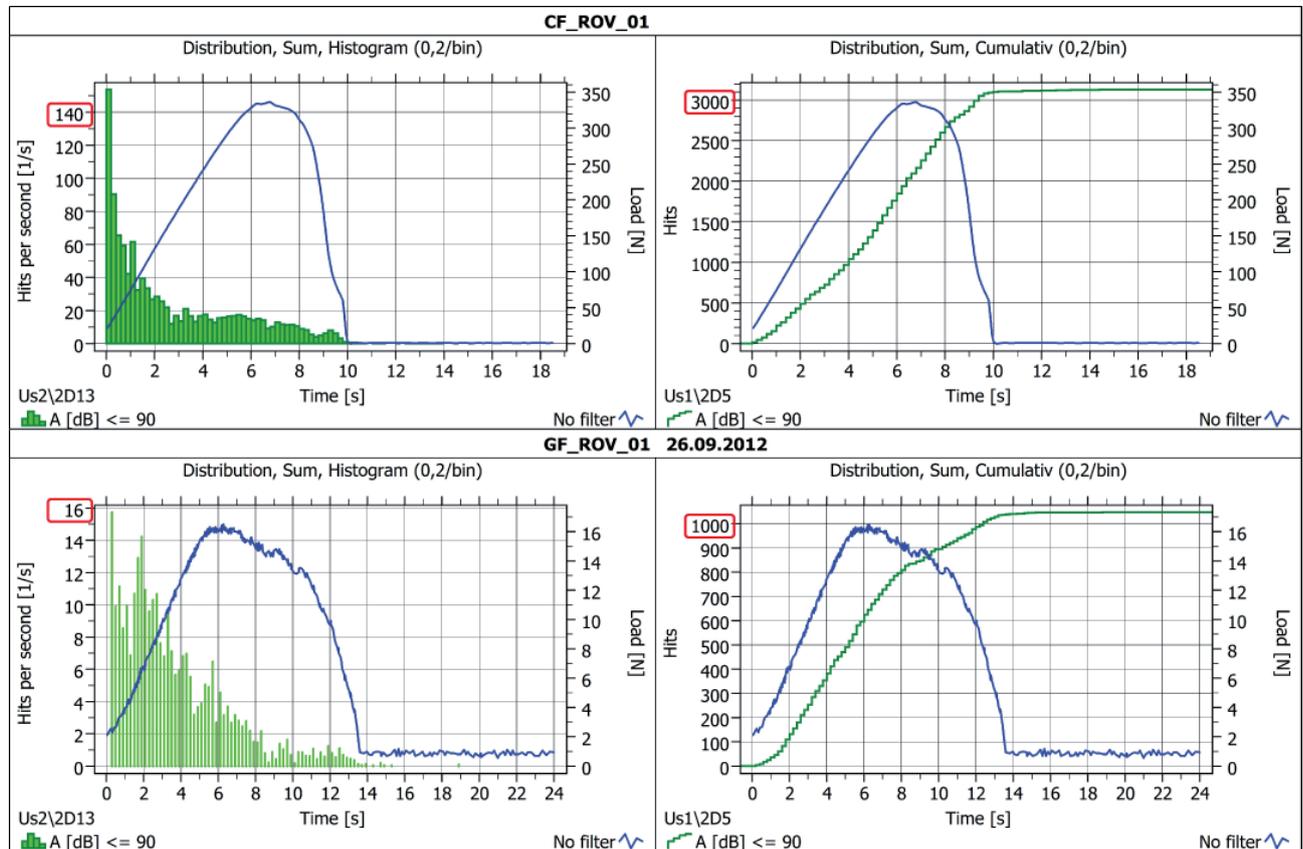


Abb. 2.2.1.c: Vergleich beider Werkstoffe bezüglich der Hittrate (linker Teil) und kumulative Auswertung über den gesamten Bruchvorgang

Hier lässt sich die Energiefreisetzungsrates, welche die beschriebenen Einzelvorgänge begrenzt ins Verhältnis 1:5 (CF : GF) setzen und darüber hinaus feststellen, dass der CFK-Werkstoff bei annähernd vergleichbaren Zeiträumen bis zum Totalversagen der Struktur die Energie auch über einen wesentlich längeren Zeitraum in Form akustischer Signale freisetzt, wobei der Abfall der Hittrate unmittelbar nach Beginn der Belastung wesentlich drastischer ausfällt, als dies bei GFK mit relativ kontinuierlich sinkender Hittrate zu beobachten ist (siehe Abb. 2.2.1.c; links).

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Einzelvorgänge „Faserabgleiten“ und „Faserbruch“ ohne Matrixeinfluss bzw. ohne eine entsprechende Faserintegration sehr gut differenzierbar sind und somit in einer spektrale Auswertung und Charakterisierung der Faserbrüche mittels geeigneter Mikrofontechnik berücksichtigt, bzw. vom übrigen Signalanteil differenziert werden können.

2.2.2 Akustisches Faserverbund-Verhalten im Biegeversuch

Die folgenden Betrachtungen und Auswertungen beziehen sich auf den eingehend beschriebenen Lastannahmefall der Biegung, welcher bei typischer Benutzung der meisten Gebrauchsgegenstände am häufigsten vorkommt (siehe experimenteller Aufbau Abb. 2.2.d; Bild unten links). Untersucht wurden die folgenden Material-, bzw. Werkstoffpaare aus den eingangs beschriebenen Klassen der natürlichen und synthetischen Faserverbunde und der Naturfaser-Kunststoffverbunde:

- Bambus, Kiefernholz
- Hanf- und mitteldichte Faserplatte (MDF)
- Glas- und Kohlefaserkunststoff

Betrachtet man die für eine erste akustische Klassifizierung mittels Schallemissionsanalyse priorisierte Amplitudenverteilung über die Zeit, dann fällt auf, dass das Verhalten bestimmter Werkstoffpaare durchaus vergleichbar ist. So ähneln sich überraschenderweise GFK und Bambus in ihrer prinzipiellen Charakteristik, welche mit einem stetig wachsenden Anstieg der Hitrate, verbunden mit einer gleichzeitigen Erhöhung der entsprechenden Amplituden beschrieben werden kann (Abb. 2.2.2.a).

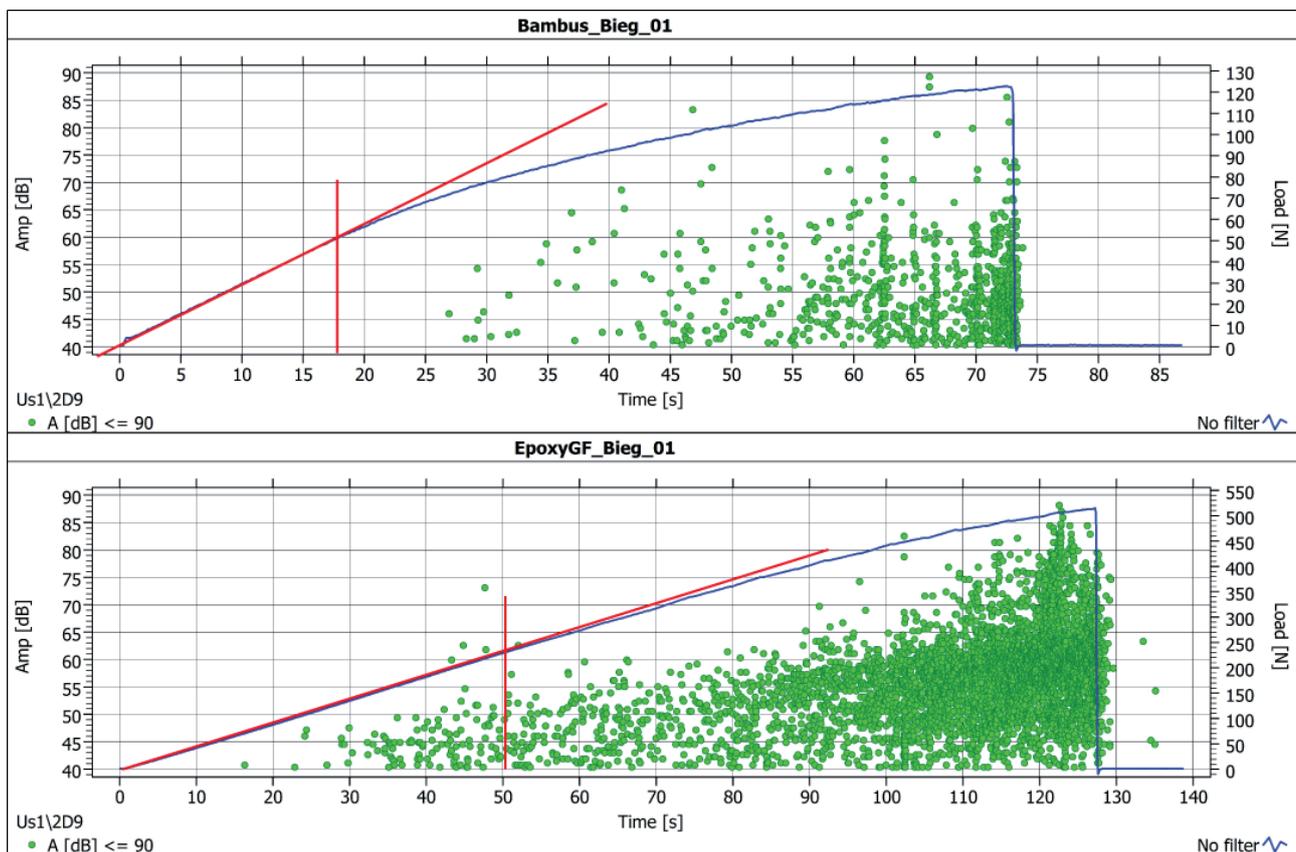


Abb. 2.2.2.a: Ähnlichkeiten in der Hitrate und Signalamplitudenverteilung von Bambus und GFK

Gut zu erkennen ist in dieser Auswertung auch der abrupte makroskopische Bruch, welcher zum Totalversagen führt und infolge dessen die aufgetragene Last ebenso schlagartig abbricht. Beide Kraftverläufe zeigen nach einem anfänglichen linearen Verlauf, welcher jeweils den reversiblen Deformationsbereich beschreibt, die fortschreitende irreversible Schwächung in Form eines sich stetig verringernden Anstiegs.

Die entsprechenden Amplituden beider Proben erreichen dabei vergleichbare Maxima, auch wenn diese bei Bambus bei weitem nicht in vergleichbarer Häufigkeit wie bei GFK auftreten, da auch die eingeleitete Kraft bei GFK um das circa Vierfache höher ist.

Fazit dieses Vergleichs, bzw. dieser Gruppierung ist demnach, dass sich sowohl Bambus als auch GFK zur einer designakustischen Werkstoffgruppe zusammenfassen lassen. Aus der Untersuchung lassen sich in Anlehnung an die einleitend beschriebenen verfahrenstypischen AE-Merkmale folgende beschreibbare spezifische Charakteristika ableiten:

1. Hit-/ Hitratenverteilung
2. Amplitudenverteilung
3. Kraftverlauf (zur referenziellen Beschreibung von 1 und 2)

Bei diesen Merkmalen bleiben, wie eingangs erwähnt, die spektralen Aspekte, welche für die weiterführende Verfeinerung dieses Entwurfs notwendig sind, aufgrund der limitierten Datenmenge des Systems unbeachtet. Diese Aspekte werden in den später beschriebenen Folgeexperimenten weiterführend untersucht.

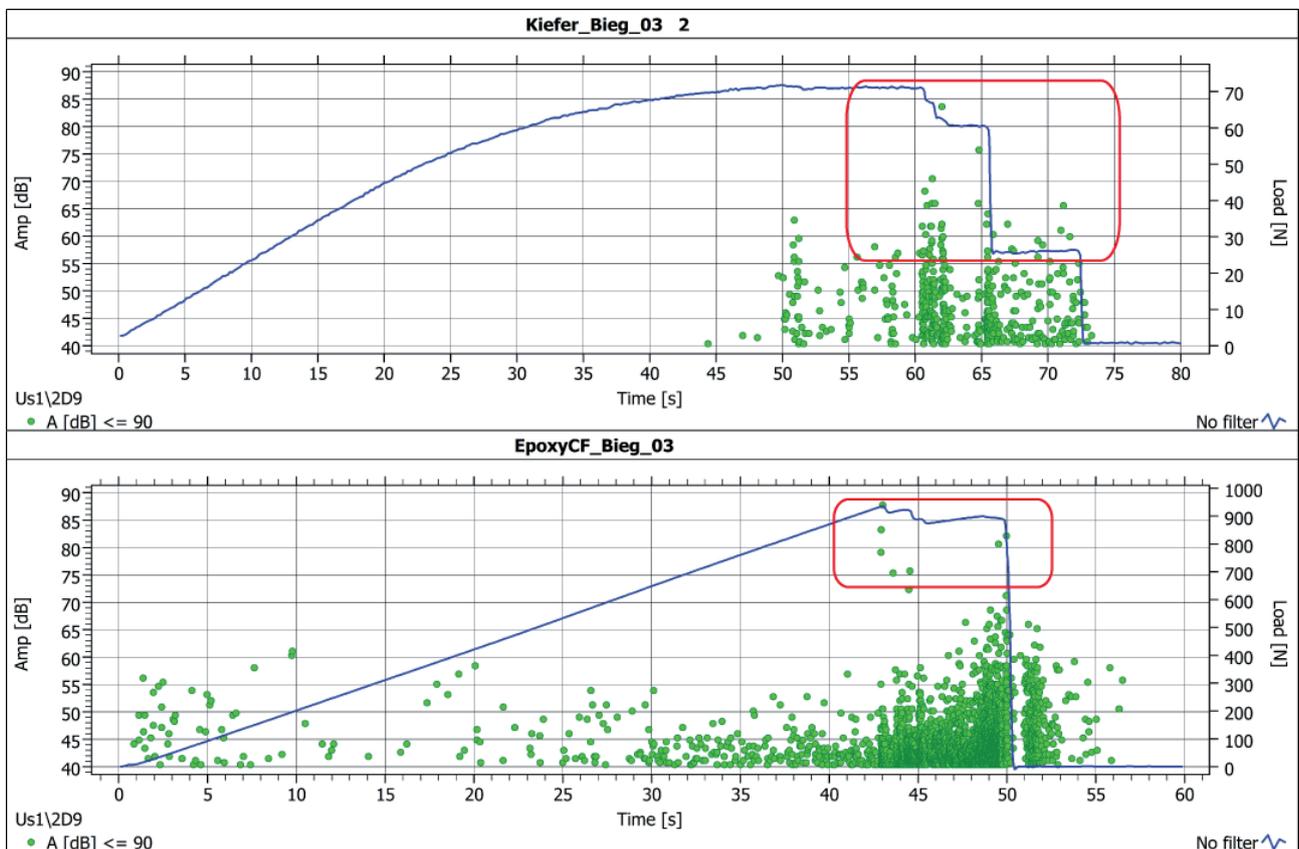


Abb. 2.2.2.b: Akustische Ähnlichkeiten von Kiefernholz (oben) und CFK (unten) aufgrund von vergleichbaren Mechanismen beim makroskopischen Strukturversagen

Deutlich differenzierter stellen sich die eben definierten Kriterien bei Kiefernholz und CFK dar (siehe Abb. 2.2.2b). Charakteristisch ist der strukturell-makroskopisch begründbare stufenweise Abfall der Tragfähigkeit, welcher sich bei beiden Werkstoffen in einer ebenso nach unten abgestuften Hitraten- und Amplitudenverteilung äußert. Beide Werkstoffproben haben aufgrund des inneren Aufbaus Inhomogenitäten in der Faser-Matrix-Verteilung,

welche dazu führen, dass das Biegesystem stufenweise durch das Versagen einzelner Grenzschichten oder Faserbündel geschwächt wird. Die Varianz des Holzes ist quasi eine Gebrauchseigenschaft. Bei CFK setzen diese Effekte bei deutlich höheren Belastungen und direkt dem reversiblen Deformationsbereich folgend ein. Kiefernholz absorbiert aufgrund des Zellaufbaus mehr Energie durch plastoelastische Verformungsreaktionen. Man kann konstatieren, dass beide Materialien gleiche Muster, also mikroakustisch ähnliches Verhalten zeigen, welches sich deutlich von der erstgenannten designakustischen Werkstoffgruppe differenzieren lässt und somit eine zweite Gruppe bildet.

Beim dritten akustisch ähnlichen Werkstoffpaar, welches von Hanffaserplatte und MDF gebildet wird (Abb. 2.2.2.c) zeigt sich gegenüber der zweiten designakustischen Werkstoffgruppe eine deutlich differenzierte Verteilung der Einzelereignisse über die Zeit. Bricht die Anzahl der Hits bei Gruppe A nach Erreichen der entsprechenden Höchstbelastung abrupt ab, so verteilen sich die Hits in Gruppe C mit einsetzender Kraftverringering infolge der Vielzahl von Werkstoffbrüchen entsprechend dieses Abfalls, was beim Hörerlebnis äquivalent einem sich stetig verringernden akustischen Rauschen bzw. Knistern wahrgenommen wird. Das deutlich ausgebildete und leicht abfallende Plateau, welches die designakustische Werkstoffgruppe charakterisiert, wird durch die roten Trapeze in Abb. 2.2.2.c verdeutlicht.

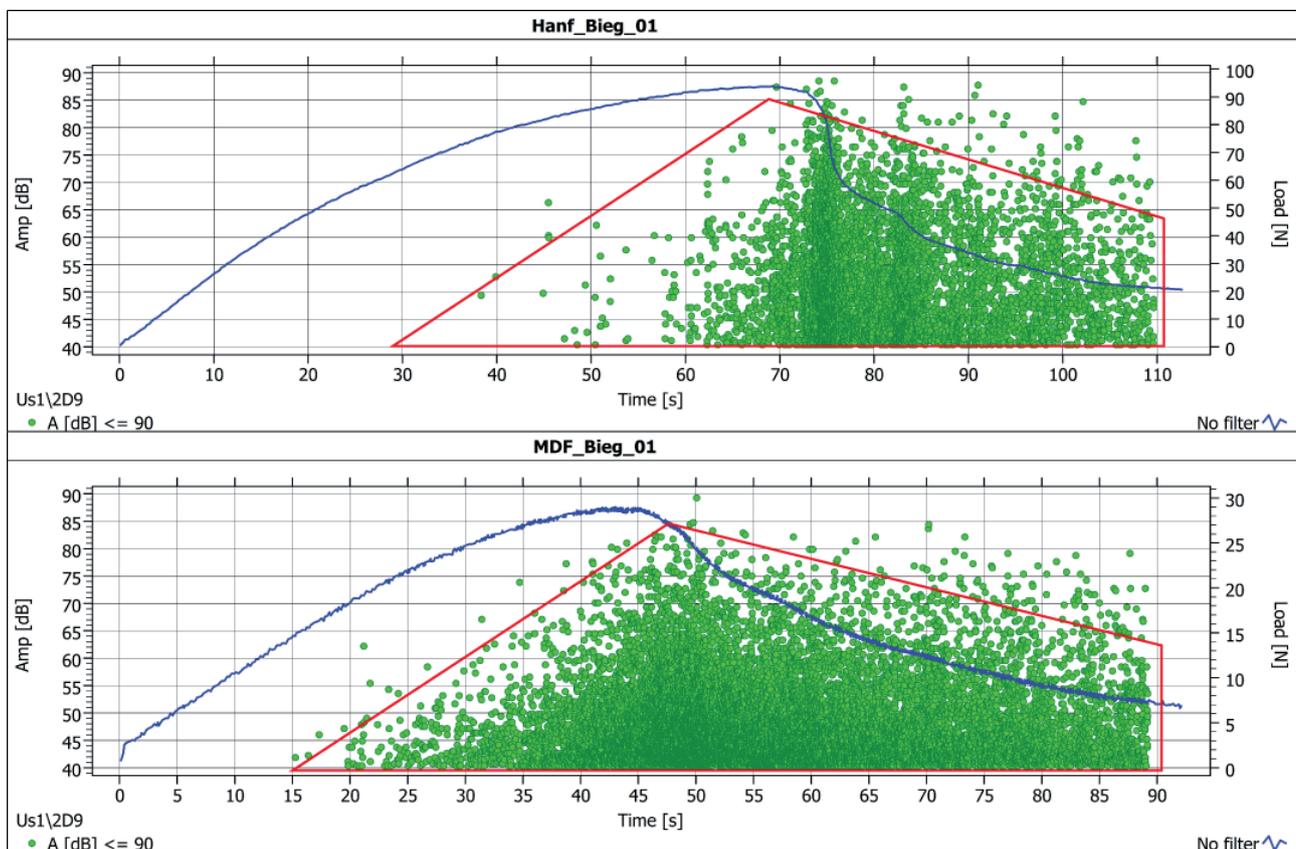


Abb. 2.2.2.c: Dritte akustisch ähnliche Werkstoffgruppe (Hanffaser- und Mitteldichte Faserplatte) mit charakteristischen, stetig leicht abfallenden Hitraten

Diese ähneln sich formal trotz der Festigkeitsunterschiede beider Werkstoffe, obwohl unterschiedliche Lasteinträge notwendig sind, um das Werkstoffversagen einzuleiten – in diesem Fall der dreifache Betrag der MDF-Probe für die Hanfwerkstoffprobe. Auch der Kraftverlauf bis zum Erreichen des Maximums ist bei beiden Proben durch einen leicht sinkenden Anstieg gekennzeichnet, der sich akustisch vor allem beim MDF in Form von sich verdichtenden Hits durch die ursächlichen Mikrobrüche äußert.

Deutlich differenziert zeigen sich lediglich die Hitraten beider Werkstoffe, die bei MDF aufgrund des höheren Faseranteils mit 12 Hits/s doppelt so hoch liegt wie bei der Hanffaserplatte. Der generelle Hitratenverlauf ist jedoch in seiner Charakteristik mit einem exponentiellen Anstieg bis zur maximalen Hitrate und einer vergleichsweise sanften Ratenverringernung bei beiden ähnlich.

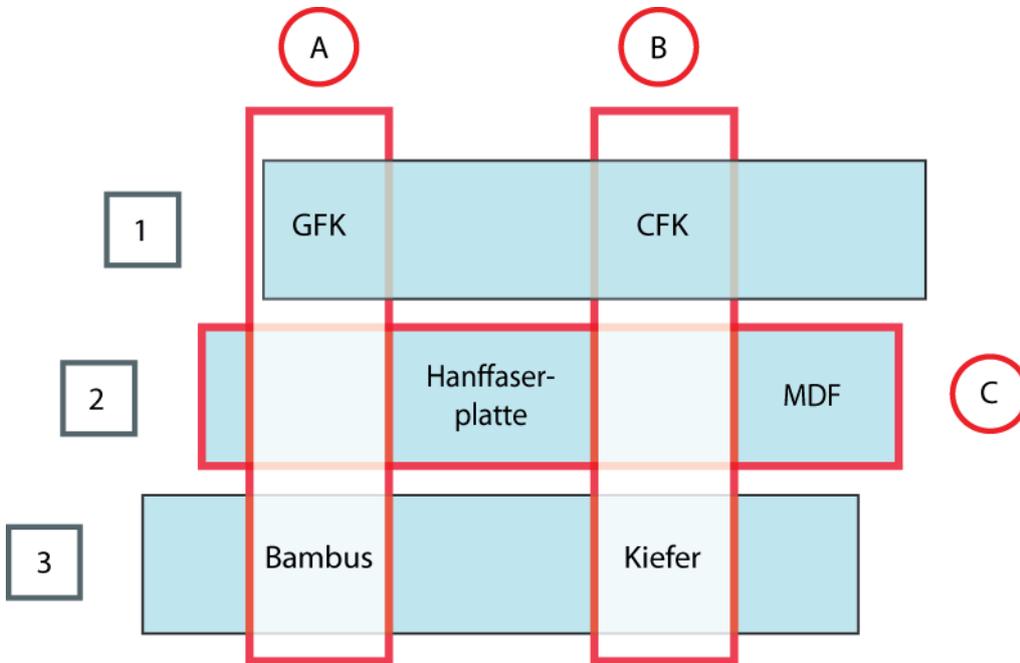


Abb. 2.2.2.d: Herkunfts- bzw. verfahrenstechnische Einteilung (1-3) im Vergleich zur experimentell untersetzten designakustischen Einteilung (A-C)

Das Fazit bezüglich der eigentlichen Aufgabe dieser Arbeit geeignete designakustische Analysemethoden zu entwickeln anhand derer sich Werkstoffe klassifizieren lassen ist, dass sich Elemente der Schallemissionsanalyse prinzipiell als gestalterisches Werkzeug verwenden lassen. Mittels des Verfahrens lassen sich Werkstoffe hinsichtlich ihres akustischen Deformationsverhaltens qualitativ differenzieren. Zu bemerken ist, dass dabei gegenwärtig weder kontextuelle Bezüge noch hörphysiologische Besonderheiten berücksichtigt werden können. Die Ergebnisse der verschiedenen Werkstoffe korrelieren mit den Bruchbildern und mit den parallel dokumentierten Audiodaten. Als Klassifizierungswerkzeug für Gestalter ist die Methode deshalb nur bedingt geeignet und erst durch gewisse Vorkenntnisse beherrschbar.

Als wesentliche Erkenntnis lässt sich aus den Ergebnissen dieser Untersuchung die These herleiten, dass die rein akustische Klassifizierung von Werkstoffen von der konventionellen, herkunfts- oder verfahrensorientierten Werkstoffklassifikation abweichen kann!

Die eigentlichen Deformationsphasen, welche für die verschiedenen Nutzungsszenarien bei der Gestaltung relevant sind, lassen sich bei allen Werkstoffen und Materialien nur bedingt differenzieren. Lediglich der Bruch ist als Phase der plastischen Deformation deutlich erkennbar, wohingegen der Übergang vom elastischen zum plastoelastischen Bereich, der für die Auslegung von Strukturen besonders interessant ist, nicht analytisch ausgewertet werden kann. Dieser Ansatz kann jedoch bei den Untersuchungen mittels Akustischer Kamera im nächsten Kapitel weiterverfolgt werden.

2.3 Komplementäre Untersuchungen mittels Akustischer Kamera

Als eine weitere Methode für die designakustischen Untersuchungen wurde die sog. „Akustische Kamera“ (AK) in die experimentellen Arbeiten miteinbezogen. Die Auswahl dieses Verfahrens erfolgte dabei nicht ausschließlich aufgrund der bildgebenden Qualitäten in Bezug auf den gestalterischen Aspekt der Arbeit. Vielmehr ist diese Methode als komplementär zur vorab beschriebenen Schallemissionsanalyse zu betrachten, da mit ihr die transienten Phänomene von Werkstoffschädigungen darüber hinaus lokalisiert werden können, aber ebenso zeit- frequenzbezogen, auf Basis linearisierter Schallaufnehmer ausgewertet werden können. Bezieht sich die Schallemissionsanalyse auf die in Abb. 2.2a beschriebenen initialen Vorschädigungsereignisse bzw. Rissinitiierungsprozesse, so lassen sich mit der nachfolgend beschriebenen Schallquellenlokalisierung und -auswertung örtlich differenzierte Aussagen zur Schallintensität, Schalleistung und zum Frequenzbereich bezüglich der aus diesen Mikroereignissen resultierenden makroskopischen Hauptereignisse treffen. Die Proben werden somit im Sinne einer Struktur betrachtbar und machen diese hinsichtlich der klanglichen Aspekte bewertbar. Die örtliche Differenzierung exponierter Zonen ist dabei, verglichen mit der des menschlichen Gehörs, leistungsfähiger bzw. besser aufgelöst. So lassen sich die akustischen Beobachtungen sehr gut mit den prognostizierten mikro- und makroskopischen Ereignissen des mechanischen Modells vergleichen. Die örtliche Differenzierung ist aber darüber hinaus gerade dort relevant, wo vorab nicht eindeutig prognostiziert werden kann, an welcher Stelle es zu akustischen Ereignissen kommen wird. Bezogen auf die zu untersuchenden Werkstoffe und Materialien, welche zum Teil hochgradig anisotrop sind oder beispielsweise durch die in Kap. 1.2.1 beschriebenen Fehlerarten Inhomogenitäten im Sinne rissinitierender Strukturen aufweisen, ist die AK ein leistungsfähiges Werkzeug, um neben der integrativen Betrachtung differenzierte Untersuchungen anzustellen. Darüber hinaus bietet das System auch die Möglichkeit zur Kartierung klanglicher, bzw. psychoakustischer Parameter, wie Lautheit, Rauigkeit oder Schärfe, die auch bei der im folgenden Kapitel beschriebenen designakustischen Diagnose mit einbezogen werden, auf welche im Rahmen dieser Untersuchungen im letzten Teil dieses Kapitels eingegangen wird.

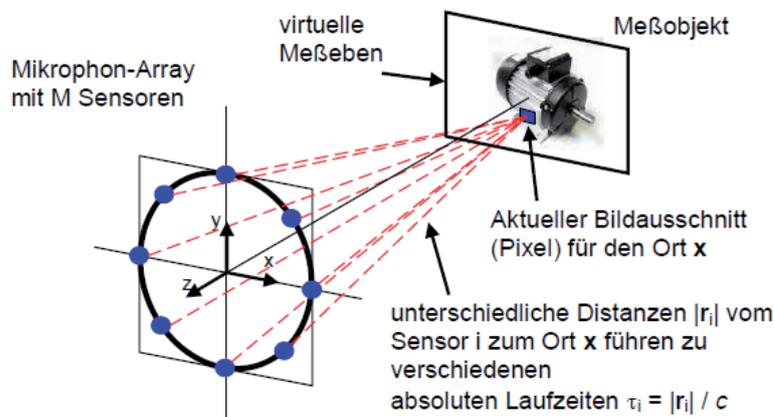


Abb. 2.3.a: Funktionsprinzip der sog. „Akustischen Kamera“ nach [FEI2014]

Grundlegend lässt sich das Funktionsprinzip der Akustischen Kamera als Auswertung relativer Schalllaufzeiten von den Punkten einer Bildebene bzw. -fläche zu einzelnen Mikrofonen eines Arrays beschreiben, wie sie in Abb. 2.3.a dargestellt ist. J. Feierabend beschreibt im zugehörigen Artikel die Funktion wie folgt: „Grundlage des Verfahrens ist es, Laufzeitunterschiede von einem Schallereignis zu jedem einzelnen Mikrofon eines Arrays zu erfassen. In einer durch zeitkohärente Aufsummierung gewonnenen Rekonstruktion des Ereignisses wird der Emissionsort im Fokusabstand ermittelt. Der gefundene Schalldruck wird nach einer Farbpalette, ähnlich

wie bei einer Infrarotwärmebildkamera die Temperatur, auf das optische Bild des Messzenarios kartiert. Unterschiedlich laute Bereiche werden so in verschiedenen Farben dargestellt und es entsteht ein anschauliches Bild der Schalldruckverteilung. Dargestellt wird der effektive Schalldruck am Immissionsort (am Array), d.h. zumeist im Fernfeld, bei dem sich entsprechend dem Huygensschen Prinzip resultierende Wellenfronten herausgebildet haben. ... Beim Beamforming ist der Anwender in der Lage, Emissionen unter Berücksichtigung ihres Entstehungs- und Ausbreitungskontextes zu betrachten“ [FEI2014]. Mit Sicht auf die Untersuchungen der Arbeit ist die Akustische Kamera deswegen ausgewählt worden, da diese die simultane Ortsauflösung transienter Vorgänge an verschiedenen Orten ermöglicht. Die Hardware dafür setzt sich prinzipiell aus einem Mikrofonarray und einem Datenrecorder zusammen, die über eine entsprechende Software angesteuert und mittels derer die Daten nach der Akquisition im Postprocessing variabel ausgewertet werden können. Das Mikrofonarray – der eigentliche Sensor eines Beamforming-Systems – ist dabei je nach Messbedingungen mit 32 bis 144 Kanälen ausgestattet. Jedes dieser Einzelmikrofone, die identische technische Betriebsparameter aufweisen müssen, wird über den Datenrekorder mit bis zu 196 kHz und einer Datenbreite von 24 Bit digitalisiert, was einer anspruchsvollen Datenrate von bis zu 4,7 Mbit pro Sekunde und Kanal entspricht. Die mitunter wegen seiner Aliasing Pattern kritisierte kreisförmige Geometrie dieses speziellen Mikrofonarrays, hat laut Feierabend [FEI2014] folgende Vorteile:

- unendliche Tiefenschärfe im Bildmittelpunkt
- höchste Erfassungssicherheit von Emissionsquellen (trotz unterschiedlicher Signalpegel)
- hohe Kartierungsschärfe

Im Array-Zentrum ist die Videokamera positioniert, welche das entsprechende Szenario filmt, über welches während der Ergebniskalkulation die errechnete Schalldruckverteilung farbkodiert als Overlay projiziert wird.

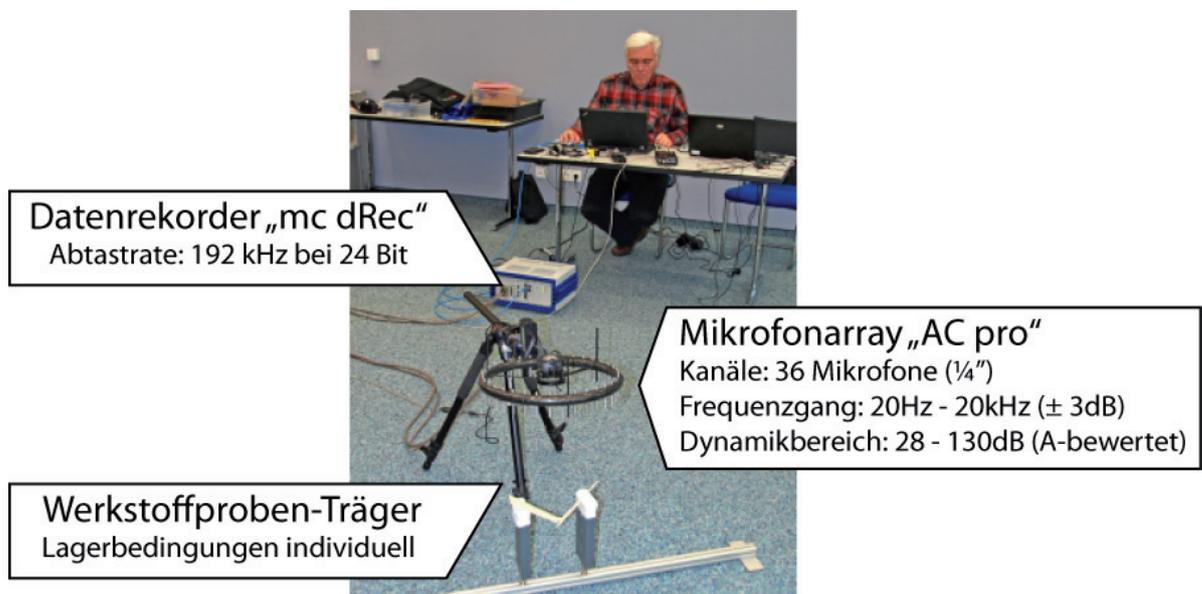


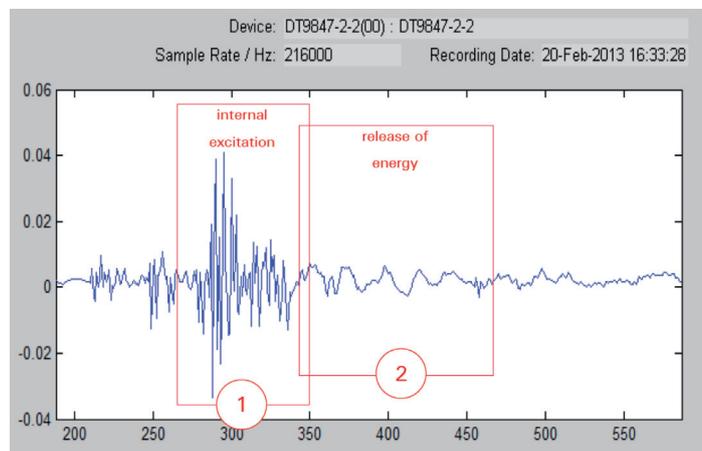
Abb. 2.3.b: Versuchsaufbau f. d. bruchakustischen Untersuchungen mittels Akustischer Kamera (Dank an Herrn Joachim Feierabend; gfai tech GmbH)

Mit dem konkret für die bruchakustischen Untersuchungen verwendeten und in Abb. 2.3.b gezeigte Datenrekorder vom Typ „mc dRec“ wurden die Messdaten mit maximal möglichen 192 kHz bei 24 Bit gespeichert. Die Abbildung zeigt weiterhin das hauptsächlich bei den Untersuchungen eingesetzte Array mit 36 Mikrofonen vom Typ „AC pro“. Dieses hat einen Durchmesser von ca. 35 cm und ist mit dem sich daraus ergebenden Mikrofonabstand für die Signalerfassung bzw. Kartierungen im Frequenzbereich von 1 kHz bis

20 kHz qualifiziert. Außer diesem wurde noch ein 48-Kanal-Array vom Typ „48-75 AC Pro“ mit gleicher Mikrofoncharakteristik verwendet. Dieses kam bei der akustischen Kartierung der komplexeren Strukturbauteile zum Einsatz, bei denen ein größerer Mindestabstand zum Objekt, bzw. zur Schallaufzeichnung notwendig war. Bezogen auf die vorangegangenen AE-Untersuchungen im hochfrequenten Bereich um 200 kHz werden nun komplementäre Messungen im menschlichen Hörbereich – der sich bekanntlich von ca. 16 Hz bis 16 kHz erstreckt – akquiriert. Eine umfassende Darstellung, welche die verschiedenen in der Arbeit verwendeten Methoden hinsichtlich der zugänglichen Frequenzbereiche illustriert, findet sich in Abb. 2.3.s am Ende dieses Kapitels.

Bereits die ersten Testreihen mit den leichter herzustellenden Kiefernholzproben lieferten aufschlussreiche Erkenntnisse. Schon hier ließen sich die einleitend beschriebenen Zusammenhänge die zwischen den mikroskopischen Anregungen und der so freigesetzten Energie, die sich in Form von Strukturschwingungen äußert herstellen, wie sie beispielsweise an den in Kap. 1.2.1 beschriebenen Fehlstellen entstehen und welche vorab dediziert mittels AE-Analyse untersucht wurden. So zeigt Abb. 2.3.c exemplarisch, wie sich die durch die schnellen transienten Signalanteile freigesetzte Energie anschließend in Form von zusammengesetzten langsameren Schwingungen in der Struktur ausbreitet, wodurch die klanglichen Aspekte der Nutzung in den Vordergrund treten.

Abb. 2.3.c: Zusammenhang von interner Anregung und freigesetzter Energie in Form von Schwingungen, welche neben der in Abb. 2.2.a beschriebenen Ähnlichkeit der Bruchereignisse verschiedener Größenordnung beachtenswert f. d. designakustischen Untersuchungen ist [BAD2013]



Die am Beispiel konkretisierte, orts aufgelöste Betrachtung des geschilderten Vorgangs mittels Akustischer Kamera wird in Abb. 2.3.d gezeigt. Gut zu erkennen ist, wie in Folge der aufgebrachten Biegebelastung Faserrisse auftreten und die gesamte Struktur vorrangig an den frei beweglichen Randzonen zum Schwingen angeregt wird.

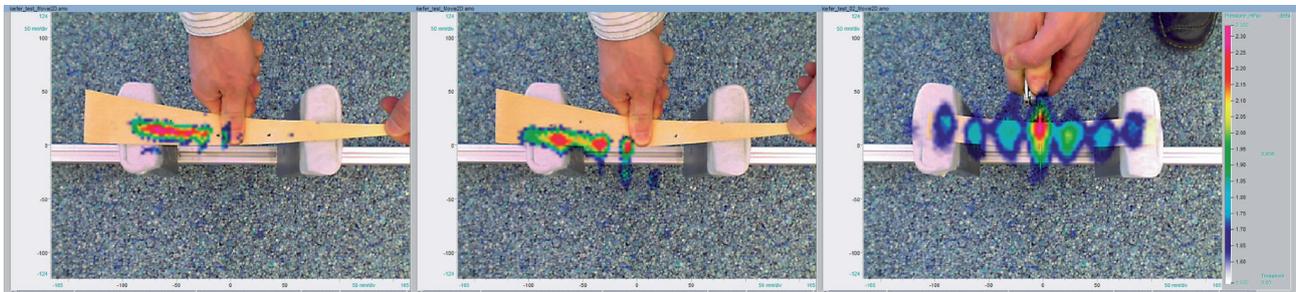


Abb. 2.3.d: links: örtliche Betrachtung eines in plane-Faserrisses bei freier, anwendungstypischer Biegebelastung von Kiefernholz; Mitte: resultierende Schwingung der Materialprobe; rechts: deutlichere, der Lastannahme entsprechende Visualisierung bei gleichmäßiger, kerbartiger Belastung (Snap Shots aus sog. „Acoustical Movie“-Format)

Zum weiteren Verlauf der Untersuchungen sei an dieser Stelle angemerkt, dass die bereits in Kap. 1.4 beschriebene Material- und Werkstoffmatrix von den Experimenten mittels Akustischer Kamera nicht umfassend abgedeckt wird, da diese zum Zeitpunkt der Durchführung noch nicht vollständig definiert war, bzw. aufwändig hergestellte, qualitativ hochwertige Proben erst am Ende aller Untersuchungen zerstört wurden. Darüber hinaus konnten die in Abb. 2.3.e gelisteten GFK-Werkstoffproben nicht auf die in Abb. 1.3.1.b beschriebene Art und Weise deformiert und zum Bruch gebracht werden, da aufgrund der spezifischen Streckgrenze bzw. Zugfestigkeit des Werkstoffes die Lagerbedingungen nicht so gewählt werden konnten, dass die Probe weder durch die Lagerpunkte hindurchrutscht, noch ausreichend Kraft für einen Bruch aufgebracht werden konnte. Dieser spezielle Fall trat bei den glasfaserverstärkten Proben auf, welche aufgrund ihrer Werkstoffeigenschaften, gepaart mit der Schlankheit des Bauteils, in einem unverhältnismäßig großen elastischen Bereich verformbar waren, sodass entsprechend der Belastungsart keine Vorschädigung und entsprechend keine Zerstörung der Struktur möglich war.

Die Versuche wurden in diesem Falle entgegen den in Kapitel 1.3.1 definierten Biegeproben mit sehr unterschiedlich dimensionierten, längeren Probekörpern durchgeführt (siehe relative Dimensionierung in Abb. 2.3.e). Dieser Aspekt kann jedoch mit Sicht auf den eben beschriebenen Fokus der Untersuchungen vernachlässigt werden, da die herzuleitenden, bzw. zu visualisierenden Phänomene auch bei diesen Werkstoffproben auftreten. Vielmehr soll sich so der enge Realitätsbezug zum eigentlichen Ursprung dieser Arbeit, nämlich zur Nutzung von Gebrauchsgegenständen widerspiegeln. Diese bewegen sich oft in den deformationsrelevanten Größenordnungen der hier verwendeten Proben und werden auch wie in den Abbildungen zu sehen vom Nutzer manuell beansprucht.

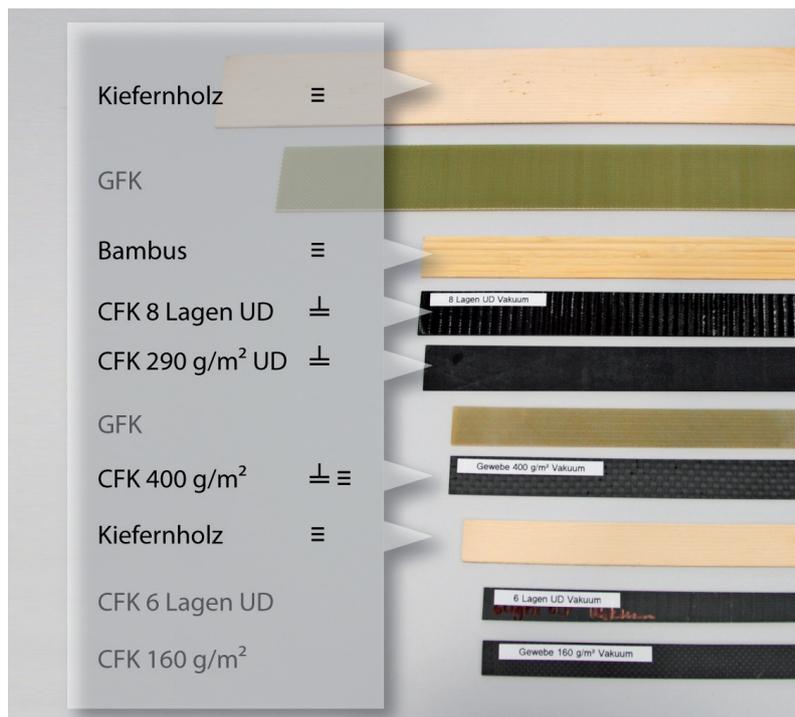


Abb. 2.3.e: Übersicht der für die Experimente verwendeten Biegeproben mit Kennzeichnung der Faserausrichtung (längs (≡); quer (⊥) zur Probenhaupttrichtung (beide bei unidirektionalen Gelegen) Dank für die z. T. aufwändige Herstellung an „zfl - Zentrum für Faserverbunde und Leichtbau Haldensleben UG“; Jürgen Häberle; Julia Schulz

Im Rückblick auf die Beschränkungen bei der Interpretation akustischer Phänomene mit dem AE-Verfahren im mikrostrukturellen Bruchbereich ist dieser Aspekt für die Untersuchungen mittels AK interessant, da mit dem Kameraverfahren wie folgend gezeigt sowohl die designakustisch häufig auftretenden Nutzungsszenarien im elastischen und plastoelastischen Deformationsraum, als auch das eigentliche Strukturversagen voneinander differenziert untersucht werden können.

Darüber hinaus sind mit dieser Methode auch spektrale Auswertmöglichkeiten gegeben, auf welche im folgenden Kapitel noch spezieller im Zuge der designakustischen Werkstoffanalyse eingegangen wird. Für die Auswertungen der Arbeit wurde die Software „NoiseImage“ in Version 4.4.3 verwendet. Mit dieser lassen sich das Spektrum und Spektrogramm ableiten, um relative Vergleiche anzustellen und ggf. Differenzierungsmerkmale für eine designakustische Werkstoffklassifikation zu finden.

Sie ermöglicht neben der Generierung der in Abb. 2.3.d gezeigten „Acoustical Movies“ auch die Auswertung der dazu verrechneten „Basisdaten“ der einzelnen Mikrofone. Diese können über die Softwaremodule „Spectrum, Spectrogram“ berechnet bzw. angezeigt werden. Die grundlegenden Kenntnisse, welche für die Anwendung, bzw. Interpretation der im Folgenden behandelten Zeit- und Frequenzdarstellungen notwendig sind, werden anschließend noch umfassender im Kapitel zu den signaltheoretischen Betrachtungen behandelt. Die dort geschilderten Aspekte hinsichtlich einer möglichst optimierten und fehlerfreien Datenakquisition wurden bei den folgenden Experimenten berücksichtigt.

Bei der erwähnten ersten direkten Auswertung der verschiedenen Bruchproben-Filme vor Ort, erwies sich die Leistungsfähigkeit der Kamera bei der visuellen Differenzierung exponierter, akustisch aktiver Zonen als sehr gutes Werkzeug, um anfangs auftretende Störemissionen, welche durch Auflager-Reibungen verursacht wurden frühzeitig zu erkennen. Bei anschließender Wiederholung der Experimente konnten diese Quellen durch Dämmung der Lagerpunkte weitestgehend unterdrückt werden.

Die auf diese Weise relativ störungsfrei akquirierten Daten der verschiedenen Werkstoff- und Materialproben wurden anschließend hinsichtlich der Fragestellungen der Arbeit ausgewertet. Dabei konnten im ersten Schritt akustische Phänomene, welche nicht zum Deformations- und Bruchvorgang gehören, sehr gut mittels der Synchronität von Bild und Akustik, wie in Abb. 2.3.f gezeigt, identifiziert bzw. diskriminiert werden.

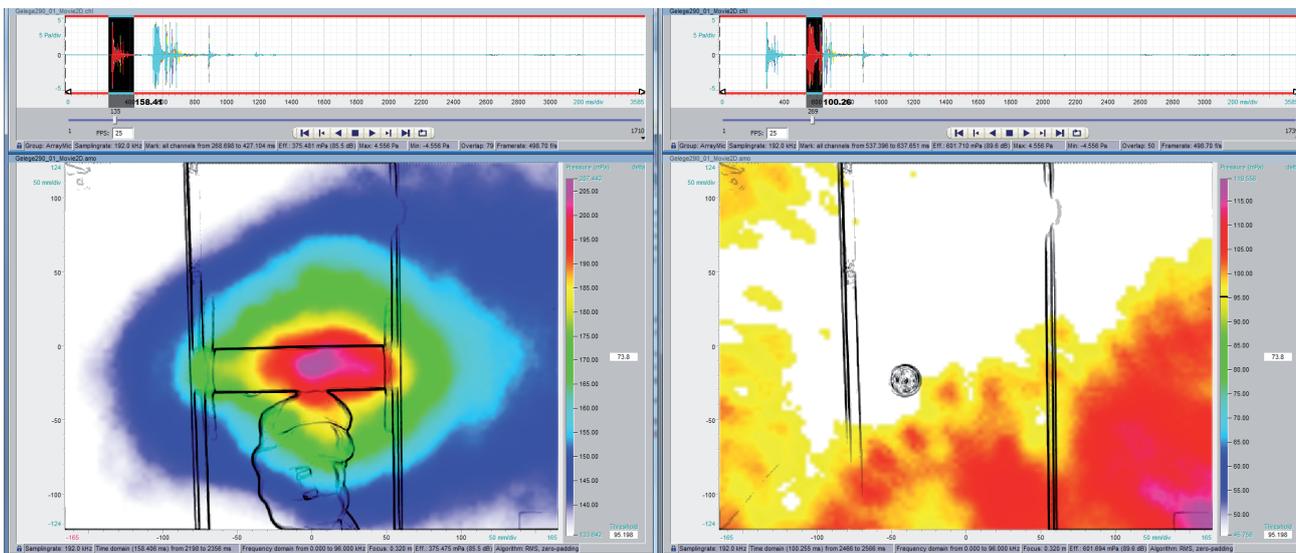


Abb. 2.3.f: visuelle Differenzierung und Selektion der verschiedenen Abschnitte im Zeitsignal durch Plausibilitätsprüfung mittels der synchron akquirierten Videodaten (rechts: relevanter Zeitabschnitt des Hauptbruchereignisses; links: ähnliches, aber nicht verwendbares Signal, verursacht durch Reflexionen oder herunterfallende Teile)

Mit der Übersicht der Schalldruckverteilung aller Mikrofonkanäle über die Zeit lassen sich so die folgenden relativen Vergleiche der verschiedenen Werkstoffe zueinander anstellen.

Zu beachten ist, dass die Aufnahmezeiträume der verschiedenen Proben aufgrund des experimentellen Charakters der referenziellen Untersuchungen nicht miteinander abgeglichen sind und so kein direkter zeitlicher Bezug zueinander möglich ist. Vielmehr erscheint es sinnvoll die einzelnen zeitlichen Verläufe entsprechend den auftretenden Deformationsarten zu unterteilen, um anschließend diese, in jedem Deformations- und Bruchvorgang auftretenden Zeitbereiche der verschiedenen Proben zu vergleichen.

Die drei Phasen der elastischen, plastoelastischen und plastischen Verformung lassen sich bei allen Datensätzen gut voneinander differenzieren, indem man jede Einzelaufnahmen bezüglich der spezifischen Bruchenergie und -verteilung relativ zueinander bewertet.

File	Gesamtlänge in ms	elastischer Bereich in ms		plasto-elastischer Bereich in ms		Spanne in ms	plastischer Bereich in ms		Spanne in ms
Bambus01	8684	0	5766	5766	7755	1989	7755	8684	929
Bambus02	5397	0	2400	2400	4850	2450	4850	5397	547
CFK400_02	8796	0	4115	4115	7972	3857	7972	8796	824
Gelege290_01	1290	0	1071	1071	1071	0	1071	1290	219
kiefer_test	2774	0	1688	1688	2490	802	2490	2774	284
kiefer_test_02	2683	0	1620	1620	1928	308	1928	2683	755
kiefer_test_03	1862	0	770	770	988	218	988	1862	874
UD_8Lagen_02	6884	0	3877	3877	4644	767	4644	6884	2240

Abb. 2.3.g: zeitliche Unterteilung der f. d. Experimente verwendeten Material- und Werkstoffproben durch Differenzierung der Bruchereignisse innerhalb der Komplettd deformation in elastische, plastoelastische und plastische Phasen (in ms-Auflösung lediglich für mögl. genaue Definition der Übergangsgrenzen)

So kann der Aufnahmezeitraum in dem trotz Deformation keine akustischen Signale zu verzeichnen sind der elastischen Deformation zugeordnet werden (grüner Zeitbereich in den Abb. 2.3.h ff.). Der Zeitbereich größter Signalamplituden, welche in dichter Folge auftreten, um sich anschließend wieder relativ schnell dem Grundrauschpegel zu nähern, wird einer vollständigen plastischen Deformation, bzw. dem Totalversagen und kompletten Desintegration der Struktur gleichgesetzt (rot gekennzeichnete Zeitbereich).

Folglich entspricht der Bereich zwischen den vorab beschriebenen Phasen der plastoelastischen Deformation (orange gekennzeichnet). In diesem, durch diverse strukturelle Teilschädigungen gekennzeichneten Bereich werden deutlich niederenergetischere oder vereinzelte Signale mit Intensitäten nahe derer beim Strukturversagen emittiert.

Diese Phase der plastoelastischen Deformation ist mit Sicht auf die Nutzungsszenarien von Gebrauchsgegenständen und auf die Fragestellungen der Arbeit die analytisch interessanteste, da hier ein entsprechendes Nutzerfeedback zu erwarten ist.

Konkret erschien es mit Sicht auf die zur Verfügung stehenden akquirierten Daten sinnvoll ein Probenpaar auszuwählen und tiefgehend zu untersuchen, welche nach den Ergebnissen aus Kap. 2.2.2 entgegen der klassisch technologisch geprägten Klassifikation ein designakustisches Material-Werkstoffpaar darstellt. Im Rahmen der AK-Experimente konnten die CFK-Werkstoffproben dem Kiefernholz gegenübergestellt werden.

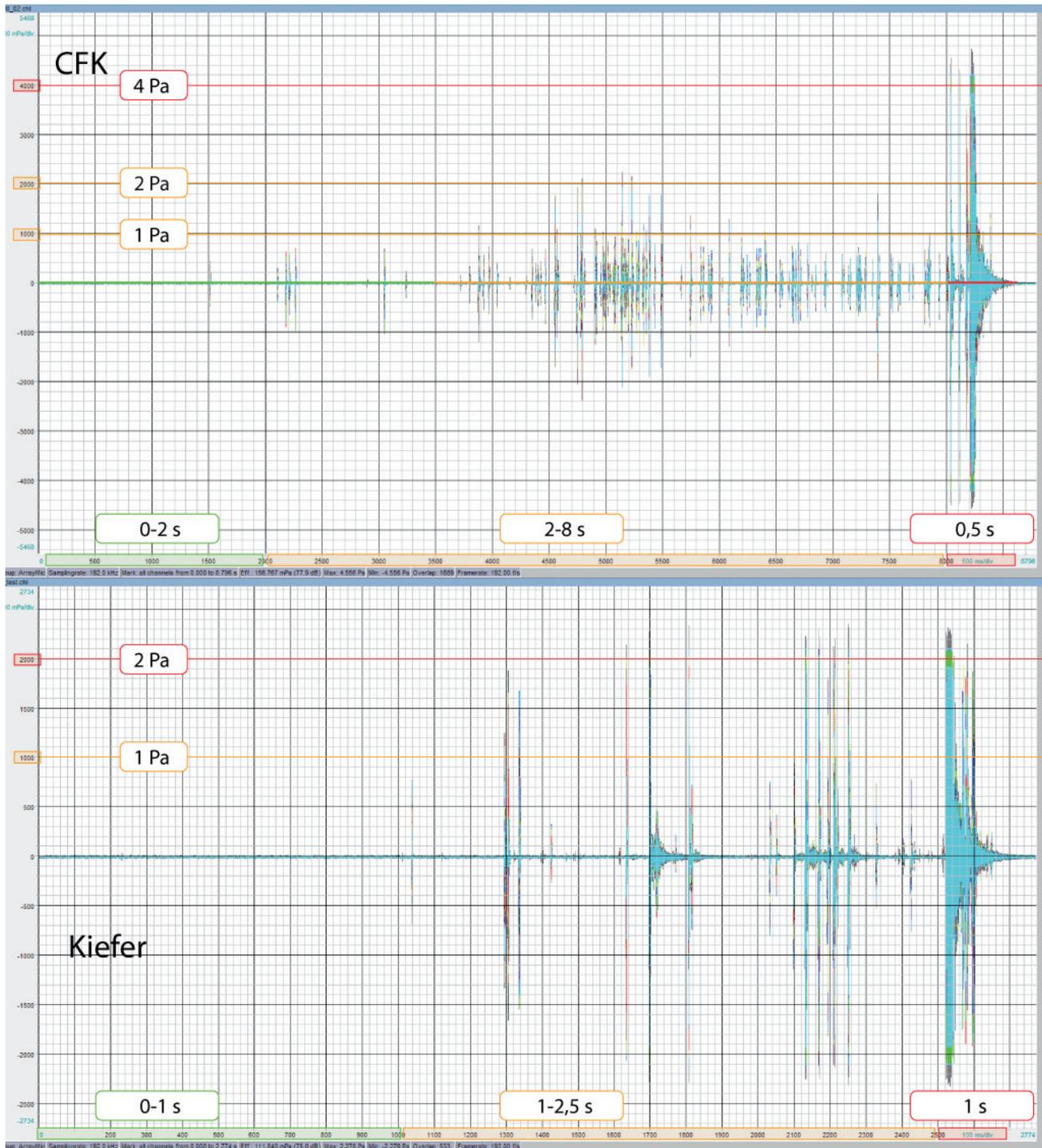


Abb. 2.3.h: Gegenüberstellung der mittels AK akquirierten Zeitsignale am gleichen akustischen Werkstoffpaar nach der in Kap. 2.2.2 experimentell untersetzten designakustischen Einteilung (siehe Abb. 2.2.2.d), Alle relevanten Werte sind zur besseren Lesbarkeit hervorgehoben, da die Screenshots der Software nicht f. d. Druck aufbereitbar waren.

Im Bezug zu den Aussagen hinsichtlich Burst-Hitraten- bzw. Amplitudenverteilung und Kraftverlauf der AE-Experimente fallen bei den zeitlichen Betrachtungen der individuellen Schalldruckwerte ebenso Unterschiede in der Anzahl und der Verteilung von quasi „auflösbaren Ereignissen“ vor dem Hauptbruch, bzw. dem Totalversagen auf. Diese sind beim CFK-Werkstoff aufgrund des homogenen und reproduzierbaren Geleget-Matrix-Aufbaus über einen relativ großen zeitlichen Bereich gleichmäßiger verteilt als beim Kiefernholz. Aufgrund des relativ spröden Charakters der Epoxidharz-Matrix treten die Mikroriss-Ereignisse deswegen auch zahlreicher auf, als beim Kiefernholz, welches aufgrund des bereits beschriebenen Zellaufbaus mehr Energie durch plastoelastische Deformationsvorgänge absorbieren kann, ohne akustisch auffällig zu werden.

Betrachtet man neben der Anzahl und Verteilung die verschiedenen Amplituden der Ereignisse ist erkennbar, dass sich diese beim CFK in drei Cluster unterteilen lassen, welche Spitzenamplituden von jeweils circa 1 Pa, 2 Pa und größer 4 Pa Schalldruck am Mikrofon erzeugen.

Bei der Kiefernprobe sind lediglich zwei Cluster mit Spitzen von ca. 1 und 2 Pa identifizierbar, was makroskopisch betrachtet auf die Unterschiede im strukturellen Aufbau zurückzuführen ist. Setzt man nämlich die jeweils höchstenergetische Klasse dem Totalversagen in Form einer dichten Anzahl von Faserbrüchen gleich, so muss man auch die vorhergegangenen niederenergetischeren Klassen entsprechenden Schädigungsmechanismen, bzw. akustischen Ereignissen zuordnen.

Im Falle von CFK entsprechen die niederenergetischen Signalamplituden den bereits beschriebenen Matrixschädigungen, welche es bei Kiefernholz aufgrund der Duktilität des Faserbindematerials nicht gibt. Dort kann man die Signale auf niederenergetischem Niveau kleineren Faserbrüchen und Abgleitvorgängen (vgl. Mode II und III in Abb. 1.5.a) infolge erster Desintegrationsereignisse zuordnen, welche insgesamt durch die naturgegebene Inhomogenität des gewachsenen Holzes begründet sind (vgl. Kap. 1.2.2) und auch die zeitlich stochastische Verteilung erklären.

Diese Inhomogenitäten finden sich im industriell gefertigten CFK-Werkstoff seltener, treten aber in Form von Fehlern (vgl. Kap. 1.2.1) als Widerspiegelung des erwähnten Clusters mit Werten von ca. +/- 2 Pa auf. Hochenergetische Faserbrüche, wie sie in der plastoelastischen Phase von Kiefernholz zu finden sind, treten an dieser Stelle nicht auf. Dies wiederum deckt sich mit den Nutzererfahrungen, dass Holzstrukturen nach starker Belastung unter Freisetzung akustischer Signale anschließend durchaus teildeformiert sein können und an Tragfähigkeit verloren haben. Dieses Verhalten ist bei CFK-Strukturen ausgeschlossen. Es sei an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt, dass sich das beschriebene Verhalten des Holzes trotz optisch gleicher Endzustände deutlich von der sog. Retardation unter dauerhafter Lasteinwirkung unterscheidet.

Prinzipiell lässt sich an dieser Stelle eine weitere, spezifischere These ableiten, die besagt, dass unterschiedliche Schädigungsmechanismen durchaus zu einer phänomenologisch ähnlichen bzw. gleichartigen akustischen Verhaltensweise im Sinne der designakustischen Betrachtungsweise führen können.

Wie einleitend beschrieben können die akquirierten Daten über die „viso-akustische“ Bewertung hinaus weiterreichend über verschiedene, spezifisch ausgelegte Softwaremodule untersucht werden, um neben der reinen Quantifizierung und der zeitlichen Signalabfolge weitere qualitative Aussagen treffen zu können.

So können diskrete Spektren von ausgewählten Signalpassagen mittels Fourier-Transformation berechnet und interpretiert werden. Ebenso lassen sich über geeignete Methoden zugehörige Spektrogramme ableiten, welche ebenso Aussagen bzgl. der spektralen Verteilung akustisch freigesetzter Energie ermöglichen.

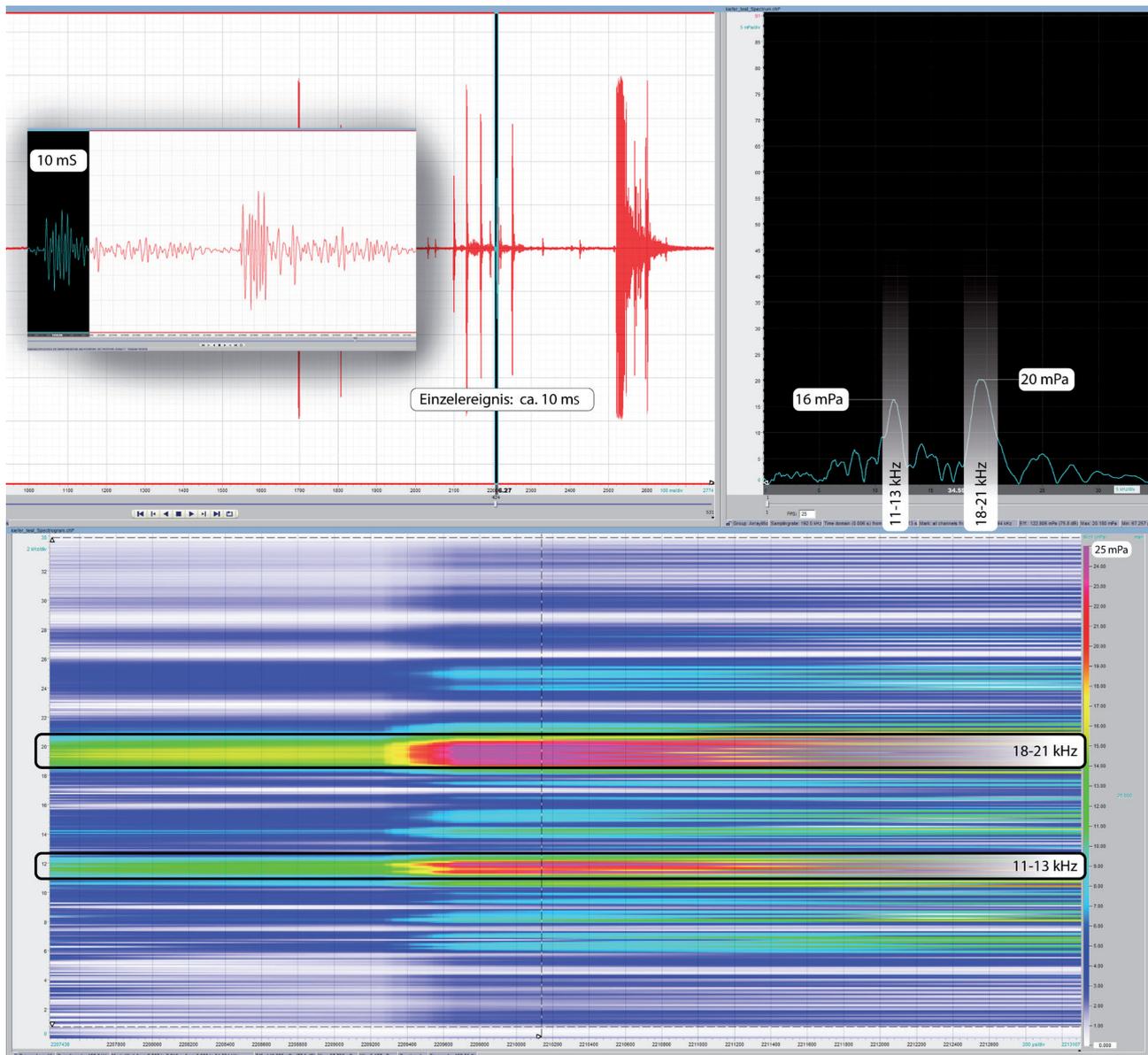


Abb. 2.3.i: Faserbruch im plastoelastischen Bereich bei Kiefernholz mit exemplarischer Visualisierung des zugehörigen Spektrums und Spektrogramms

Für die Kiefernprobe wurde mittels dieser Module die beschriebenen Vorschädigungsereignisse der plastoelastischen Phase untersucht, um sie mit den vermeintlich ähnlichen Phänomenen der CFK-Proben zu vergleichen. In Abb. 2.3.i wurde exemplarisch ein repräsentativer Faserbruch ausgewählt, der sich bei Kiefer in einem Zeitbereich von ca. 10 ms ereignet und der mit Hilfe des zugehörigen Spektrums und Spektrogramms visualisiert wurde. Deutlich ausgeprägt zeigen sich, wie bei nahezu allen Vorschädigungsereignissen, Resonanzen in den Frequenzbändern zwischen 11 bis 13 kHz und zwischen 18 bis 21 kHz. Zu beachten ist, dass die bei der AK verwendeten Mikrofone verlässliche Aussagen im linearisierten Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz (± 3 dB) zulassen.

Interessanterweise zeigten die gleichen Untersuchungen bei Bambus abweichende Charakteristika, da die Frequenzbänder dort zwischen 5 bis 10 kHz und 20 bis 25 kHz liegen. Berücksichtigt man bei den Betrachtungen die Hörgrenze von ca. 16 bis 19 kHz, müssten sich beide Proben in der Tonhöhenwahrnehmung deutlich unterscheiden, was durch die auditive Auswertung der zugehörigen WAV-Files subjektiv bestätigt werden konnte. Anschließend wurden die dichter auftretenden akustischen Ereignisse von Matrixschädigungen im CFK-Werkstoff nach Sichtung der individuellen Spektren und Spektrogramme durch ein repräsentatives Beispiel in Abb. 2.3.j visualisiert, um dieses mit der eben geschilderten Charakteristik von Kiefernholz zu vergleichen.

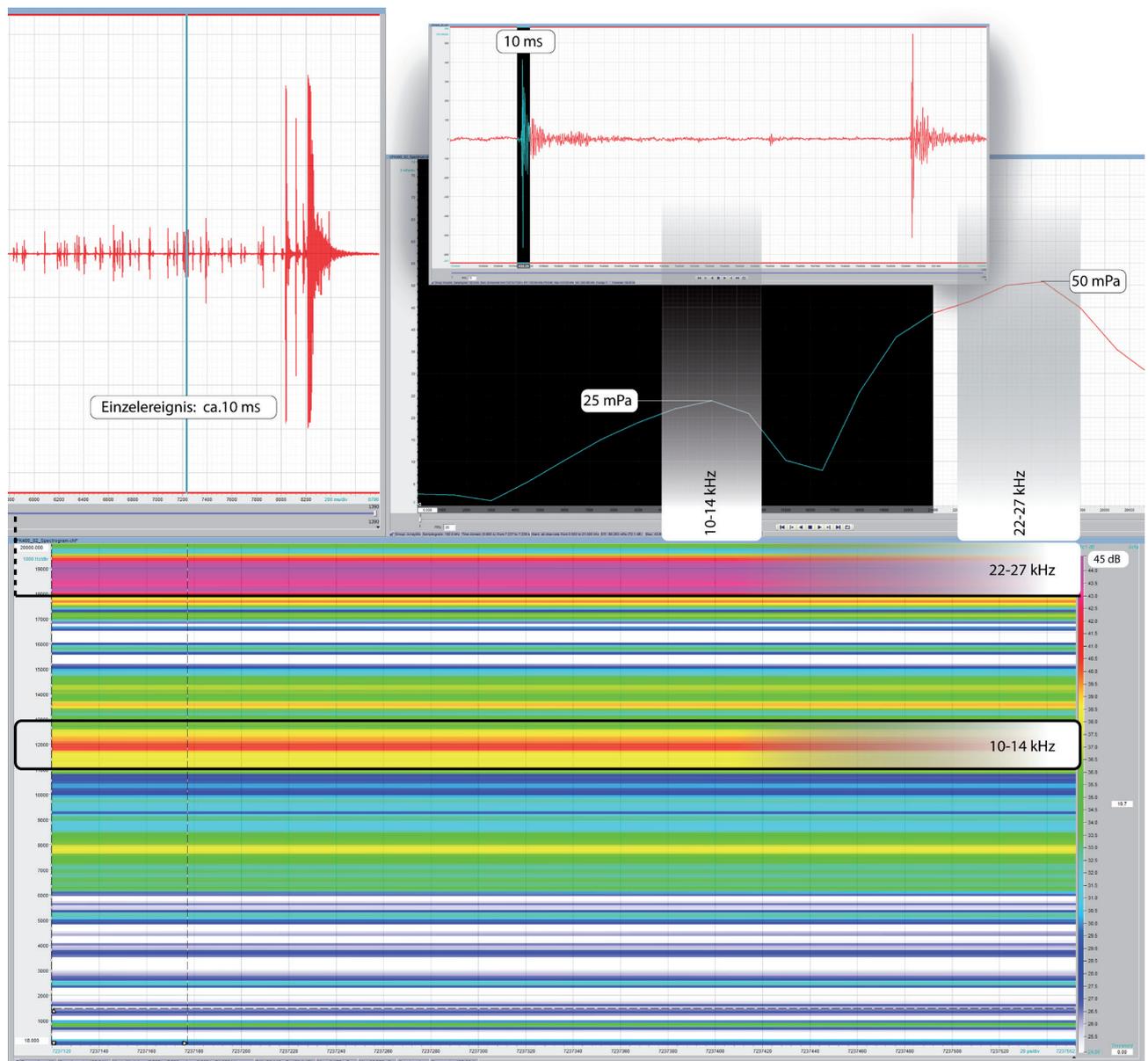


Abb. 2.3.j: Faserbruch im *plastoelastischen* Bereich von CFK mit Visualisierung des zugehörigen Spektrums und Spektrogramms des Einzelereignisses

Dafür konnte die gleiche Fensterbreite von ca. 10 ms, wie sie schon bei Kiefernholz sinnvoll war, angewandt werden. Auch hier zeigen sich ausgeprägte Resonanzen in zwei dicht nebeneinander liegenden Frequenzbändern. Ist das erste Band im Bereich zwischen 10 bis 14 kHz nahezu identisch mit dem von Kiefer, liegt das zweite Band bei CFK mit 22 bis 27 kHz vergleichsweise höherfrequent und ist breiter. Ersteres ist grundlegend darauf zurückzuführen, dass die Rissausbreitungsmechanismen beziehungsweise, Faserbrüche in beiden Proben ähnlich sind. Die höheren Resonanzfrequenzen kennzeichnen die Spezifik des Werkstoffs, wodurch das abweichende zweite Frequenzband somit höchstwahrscheinlich auf die Differenzierungen der Matrices zurückzuführen ist. Diese Frequenzen sind aber aufgrund der Limitierung des menschlichen Hörvermögens bis ca. 16-19 kHz für die designakustische Bewertung nicht relevant.

Da die Analyse der Gesamtspektren der verschiedenen Deformationsphasen für alle Proben durchgehend unspezifisch war, wird zu deren Auswertung großes Potenzial in der Wavelet-Transformation gesehen, welche im Signalverarbeitungskapitel näher beschrieben wird und in der designakustischen Auswertung angewandt werden sollen. Basierend auf den geschilderten Erkenntnissen lässt sich jedoch bereits an dieser Stelle das durch die AE Experimente postulierte designakustische Material- und Werkstoffpaar Kiefer-CFK mittels der untersuchten Teilspektren und unter Berücksichtigung der Hörgrenze und Tonhöhenwahrnehmung bestätigen.

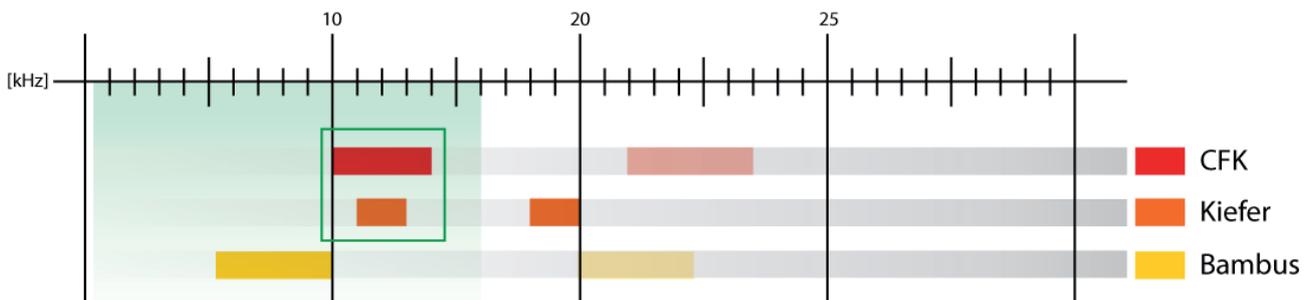


Abb. 2.3.k: Gegenüberstellung und Einordnung der untersuchten Proben, bzw. Resonanzbereiche in den Hörbereich und Kennzeichnung des designakustischen Material- und Werkstoffpaares aufgrund ähnlicher Resonanzfrequenzen im menschlichen Hörbereich

Ähnlichkeiten in den spektralen Ausprägungen bzw. der Werkstoffcharakteristik wären perspektivisch auch bei weiterführenden Untersuchungen von GFK zu erwarten, wenn man diesen die Messergebnisse von Bambus gegenüberstellt. An dieser Stelle wurde darauf verzichtet, da die designakustische Charakterisierung und Klassifizierung primär mit den im folgenden Kapitel beschriebenen erweiterten Signalverarbeitungsmethoden erfolgen soll.

Es bot sich jedoch durch die bewusst verschiedenartig aufgebauten CFK-Proben (siehe Abb. 2.3.e) die Möglichkeit weitergehend auch eine mechanisch ungünstig bzw. falsch ausgelegte Werkstoffprobe zur daraus resultierenden Varianzen in deren akustischem Verhalten zu untersuchen (CFK 290g/m² UD). Dafür wurde die bereits beschriebene quasiisotrope CFK-Probe mit dieser unidirektionalen CFK-Gelegeprobe verglichen, bei welcher alle Fasern quer zur Probenhauptausrichtung orientiert und damit tragwerksseitig quasi wirkungslos sind.

Die Gegenüberstellung der Zeitsignale in Abb. 2.3.1 zeigt deutliche Unterschiede in der Verteilung der auflösbaren Ereignisse. Hinsichtlich der eingeführten Einteilung in die drei genannten Deformationsphasen fällt auf, dass der Bereich der plastoelastischen Deformation bei Belastung der unidirektionalen Probe gegenüber der vorab untersuchten quasiisotropen nicht vorhanden ist. Der elastischen Deformation, welche werkstoffseitig prinzipiell nur durch die Epoxidharzmatrix realisiert wird, schließt sich die sofortige Zerstörung an.

Diese Signale selbst lassen sich dann im Wesentlichen auf einen Hauptbruch zusammenfassen, welcher geometrisch keiner der bekannten Schädigungsmoden zugeordnet werden kann. Energetisch betrachtet finden sich bei falscher Werkstoffauslegung auch keine niederenergetischen Vorschädigungsereignisse mehr, die einer Systemantwort im Sinne einer Warnung gleichkämen. Die Bruchphänomene beider plastischen Phasen gleichen sich zwar mit ca. 4 Pa Schalldruck, jedoch zeigen sich bei der unidirektionalen Probe ausgeprägte Resonanzen in Frequenzbändern um die 5 kHz und bei 18 bis 20 kHz, was durch den differenzierten Höreindruck bestätigt wird.

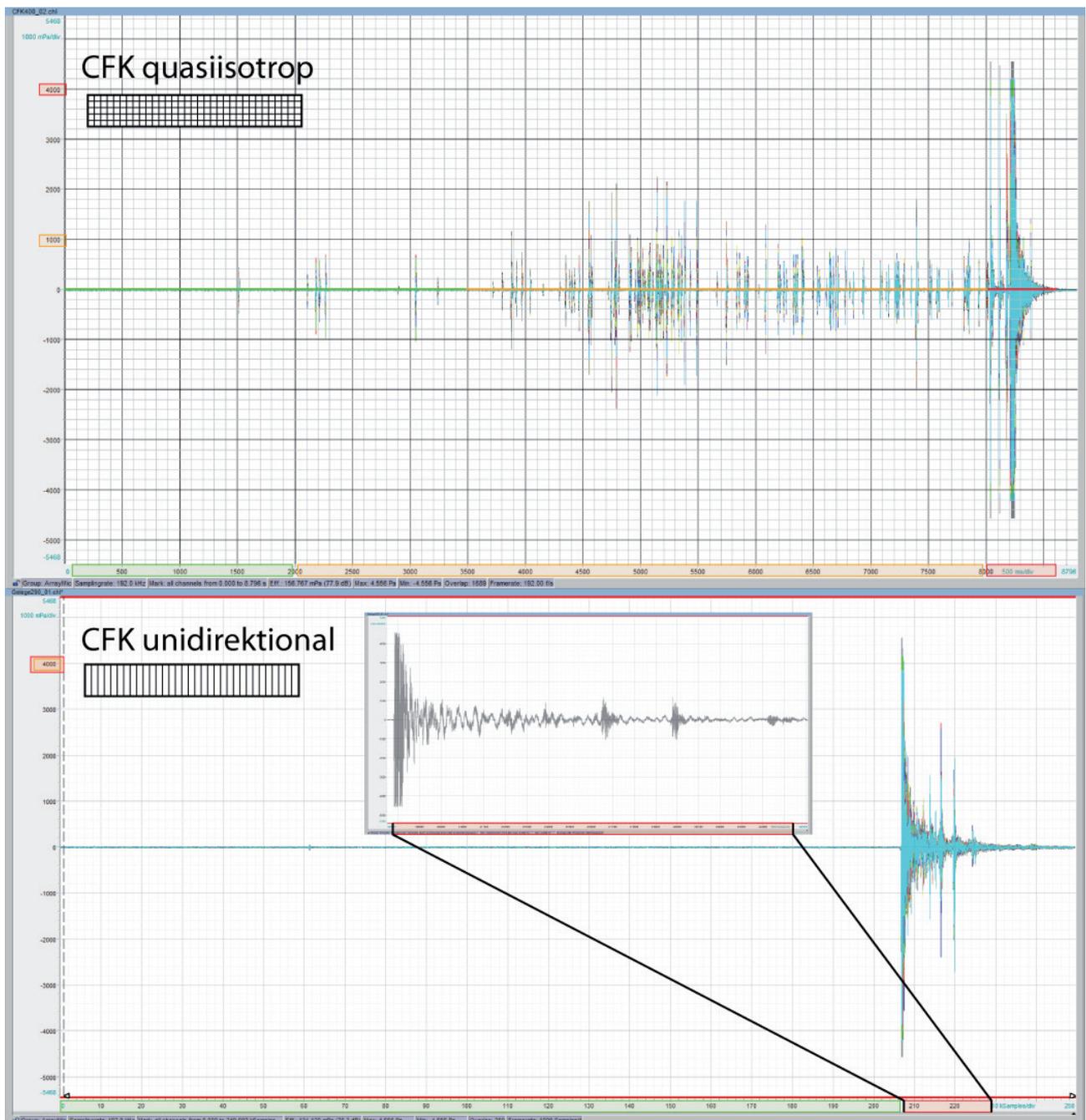


Abb. 2.3.1: Vergleich der Zeitsignale zweier werkstofflich identischer CFK-Proben mit unterschiedlicher Faserorientierung, wodurch diese differenziert klingen (oben quasiisotrop, unten quer unidirektional zur Probenhaupttrichtung mit zeitlich höher aufgelöster Detailsicht des Hauptbruchs)

Es lässt sich konstatieren, dass sich durch das veränderte Deformationsverhalten ein überraschend negatives bzw. unvorhersehbares mechanisches Nutzungsszenario ergibt, wie man es gebrauchsseitig von sehr spröden Gegenständen kennt. Diese werden im Allgemeinen auch nicht biegebelastet, da ihr Verhalten ebenso wenig berechenbar wäre, wie im Falle der bewussten strukturellen Degeneration der CFK-Probe. Auch in designakustischer Hinsicht verschlechtert sich die Gebrauchsqualität erheblich, da neben den fehlenden Warnsignalen durch Vorschädigungen auch ein recht dumpfes Klangbild im Hauptbruch entsteht, was auf die fehlende Güte der Struktur verweist und im Widerspruch zum verwendeten Werkstoff steht.

Somit lässt sich die These ableiten, dass die designakustische Ähnlichkeit trotz werkstofflicher und geometrischer Gleichheit nicht gegeben ist, wenn die durch Deformation hervorgerufenen Schädigungsmechanismen stark voneinander abweichen.

Das Postprocessing der AK ermöglicht, wie eingangs erwähnt, weiterführende psychoakustische Berechnungen der Datenbasis, welche mit Sicht auf die Arbeit ein potenzielles Auswertefeature darstellen. Konkret quantifiziert die AK dabei die drei einleitend genannten Wahrnehmungsgrößen Lautheit, Rauigkeit und Schärfe, um diese psychoakustischen Modelle zu simulieren. An dieser Stelle sei bereits auf die weiterführenden Untersuchungen der Arbeit an der Hochschule Mittweida verwiesen, bei denen die hier geschilderten Ergebnisse in weiteren Experimenten mittels erweiterter psychoakustischer Analysen unter Anwendung der Artemis Suite-Software unteretzt wurden (siehe Kap 2.6).

Bei all diesen Modellen werden die Daten der AK zuerst hinsichtlich der menschlichen Tonhöhenwahrnehmung in Filterbänken verarbeitet. Bei diesen liegen die Bandbreiten äquidistant zur sog. Bark-Skala (nach Heinrich Barkhausen). Diese Skala ist wiederum direkt von den anatomischen Eigenschaften der sog. Cochlea des menschlichen Ohres abgeleitet [NEU2017].

Es sei an dieser Stelle kurz erklärt, dass das menschliche Gehirn Schall in relativ engen Grenzen – sogenannte „kritische Bändern“ – analysiert. Der Frequenzbereich des Eingangssignals von 0 Hz bis 16 kHz ist dem entsprechend in 24 kritische Frequenzbänder mit einer konstanten Breite von 1 Bark unterteilt. Zu beachten ist, dass die Bark-Breiten dabei nicht konstanten Breiten auf der Frequenzskala entsprechen. Ein kritisches Band stimuliert sinngemäß ein bestimmtes Segment der Cochlea.

Zu erwähnen ist auch, dass je nach psychoakustischem Experiment unterschiedliche Übertragungsfunktionen von der Frequenzskala auf eine Tonheits-Skala (Tonhöhenwahrnehmung) existieren. Die hier verwendete Bark-Skala geht auf Zwicker [Z+F67] zurück und ist mit der von ihm eingeführten Mel-Skala verknüpft. Beide sind psychoakustische Skalen für die wahrgenommene Tonhöhe. Eine Verdoppelung des Bark-Wertes bedeutet, dass der entsprechende Ton als doppelt so hoch empfunden wird. Die Bark-Skala ist dabei von 0,2 bis 25 Bark definiert. Beide Skalen werden auf den Kammerton C normiert. Somit gilt:

$$1,31 \text{ Bark} = 131 \text{ Mel} = 131 \text{ Hz}$$

Die nachfolgend ausgewerteten psychoakustischen Parameter „Lautheit, Rauigkeit und Schärfe“, sind direkt vom Schalldruckpegel, dem Zeitverhalten und vor allem dem Frequenzspektrum des Eingangssignals abhängig, weswegen die vorab beschriebene Filterung nach Tonhöhenwahrnehmung immer die Basis bildet. Grundlegende Details zum Verständnis der einzelnen Größen werden im Folgetext bei Einführung dieser geschildert.

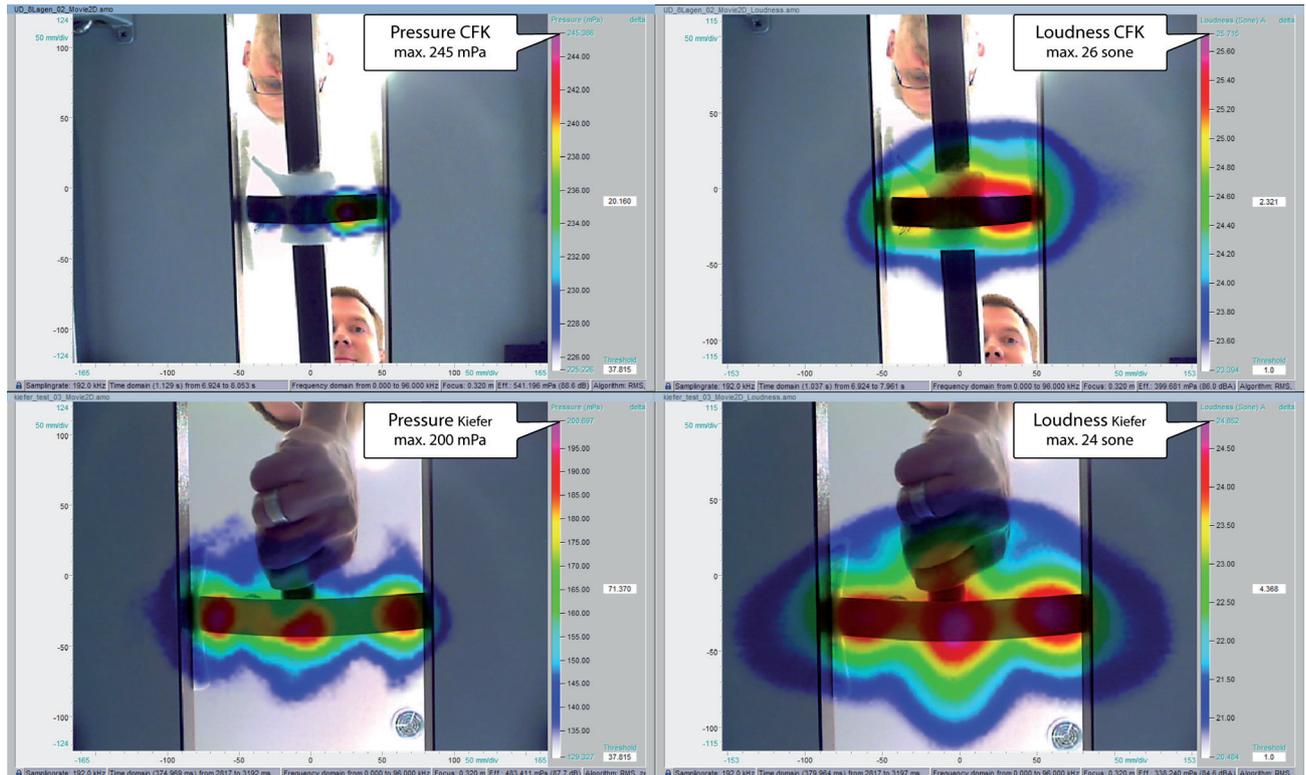


Abb. 2.3.m: Gegenüberstellung der Lautheits- und Schalldruckwerte von Kiefer (unten; links jeweils p in mPa, rechts N in sone) und CFK (oben; gleiche Anordnung)

Für die psychoakustischen Untersuchungen wurde wieder auf das bereits eingehend untersuchte designakustische Material- und Werkstoffpaar Kiefer und CFK zurückgegriffen. Nach der beschriebenen Separation wurden die akquirierten Daten zuerst hinsichtlich der sog. Lautheit untersucht, welche die menschliche Intensitätswahrnehmung repräsentiert und in Relation zum Referenzsignal von 40 dB bei 1 kHz setzt (vgl. [FAZW2007]). Die Lautheit dieses Tons beträgt 1 sone. Die Gegenüberstellung in Abb. 2.3.m zeigt das bekannte designakustische Material-Werkstoffpaar Kiefer und CFK im relativen, frequenzabhängigen Lautheitsvergleich unter Einbezug der bekannten Schalldrücke.

Als grundlegende Aussage lässt sich daraus ableiten, dass die Lautheit beider mit ca. 25 sone gleichwertig ist, obwohl sich die Schalldrücke um ca. 50 mPa unterscheiden. Die äquivalente Differenz von 2 dB Schalldruckpegel wäre für das Ohr bei identischer Frequenzlage beider, unter Laborbedingungen theoretisch sogar differenzierbar. Dies gelingt jedoch im praktischen Anwendungsfall, wo Differenzen ab ca. 10 dB unterscheidbar werden nicht.

Die Zugehörigkeit zum postulierten Werkstoffpaar bestätigt sich auch in der weitergehenden Analyse der entsprechenden psychoakustischen Rauigkeitswerte. Die Rauigkeit ist allgemein als eine psychoakustische Empfindungsgröße definiert, welche die subjektive Wahrnehmung bezüglich frequenz- und amplitudenmodulierten Schallereignisse beschreibt. Die ermittelten Rauigkeitswerte beider Signale liegen in ihren Maxima, wie in Abb. 2.3.n zu sehen, relativ gleichwertig bei ca. 20 asper. Der psychoakustische Parameter Rauigkeit modelliert dabei die frequenzabhängige Analyse der Amplitudenmodulation. Ein Asper entspricht per Definition der Rauigkeit eines mit 70 Hz modulierten 1 kHz-Sinustons bei einem Schalldruckpegel von 60 dB. Grundsätzlich werden bei der Rauigkeitsanalyse weniger die absoluten Werte der Rauigkeits-Analyse berücksichtigt, als vielmehr das Verhältnis der Ergebnisse zueinander, sodass auch leichte Schwankungen, die dem Experiment inhärent sind vernachlässigbar sind, weil sie wenig am Verhältnis ändern (vgl. [HEAD2016]).

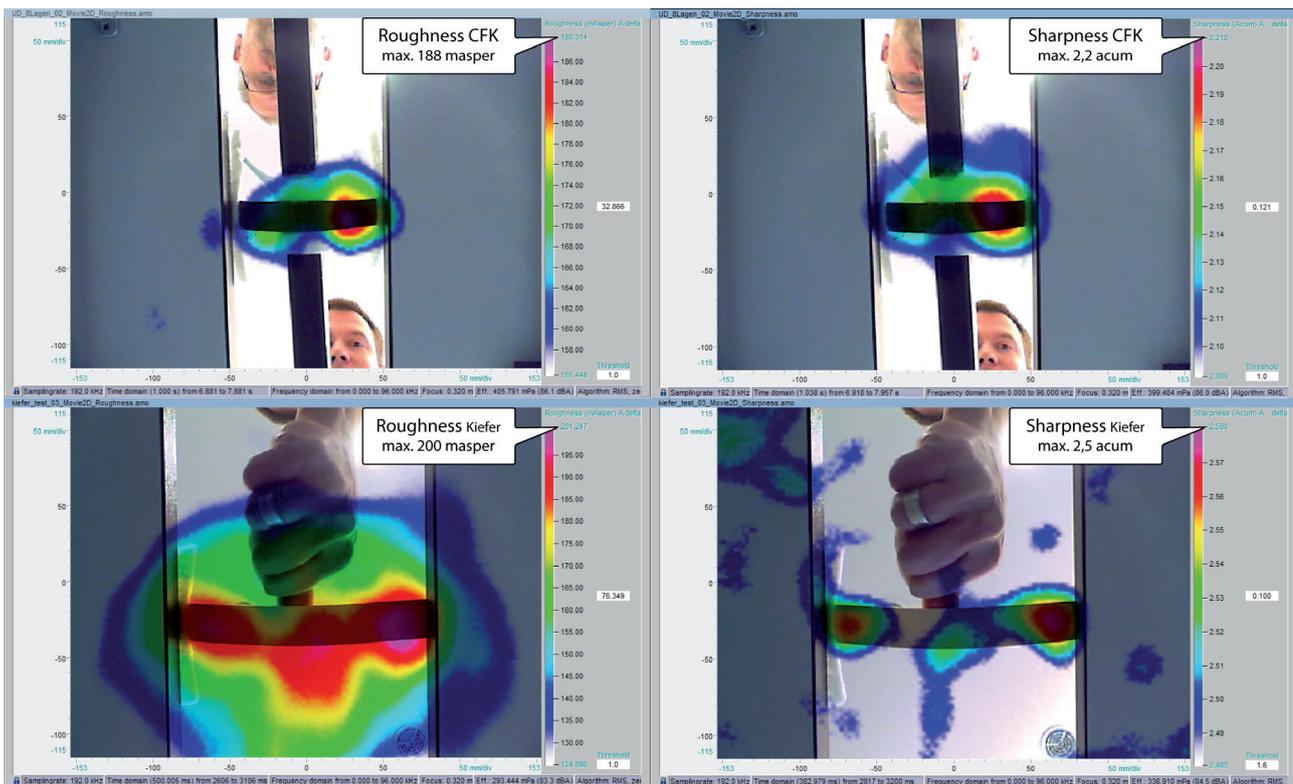


Abb. 2.3.n: Gegenüberstellung der Rauigkeits- und Schärferwerte von Kiefer (unten; links jeweils R in masper, rechts S in acum) und CFK (oben; gleiche Anordnung)

Ähnlich verhält es sich bei der Auswertung des dritten psychoakustischen Parameters „Schärfe“, jener Empfindungsgröße, welche durch die hochfrequenten Anteile eines Geräusches verursacht wird. Diese liegt bei den Untersuchungen von Kiefer und CFK zwischen 2,2 und 2,5 acum und schwankt somit lediglich um ca. 20 Prozent. Zu erwähnen ist, dass die Software der AK den Algorithmus nach Widmann, welcher der DIN 45692 zu Grunde liegt, verwendet [WID1993]. Dieser setzt voraus, dass die untersuchten Geräusche hinsichtlich ihrer Lautheit vergleichbar sind, um eine verlässliche Widerspiegelung der menschlichen Wahrnehmung zu errechnen, was im Falle dieser Untersuchungen, wie bereits beschrieben, gegeben ist. Grundsätzlich bildet die Schärfe, wie die Lautheit, die menschliche Empfindung dabei linear ab. 1 acum ist einem Schmalbandrauschen bei 1 kHz mit einer Bandbreite von 160 Hz (920-1080 Hz) und einem Pegel von 60 dB zugeordnet. Es sei abschließend erwähnt, dass, wenn Lautheitsunterschiede wahrnehmbar wären, die Berechnungen prinzipiell nach der Aures-Methode erfolgen sollten, welche dem Einfluss der absoluten Lautheit Rechnung trägt.

Das AK-Verfahren und die psychoakustische Software der AK wurden im Rahmen dieser Untersuchungen weniger zur Lokalisierung, bzw. Kartierung verschiedenartiger, psychoakustisch relevanter Schallquellen eingesetzt, als vielmehr zur grundlegenden methodischen Untersuchung separierter und geometrisch überschaubarer Proben. Weiterreichende Untersuchungen von komplexeren Gebrauchsgegenständen, die aus mehreren Materialien oder Werkstoffen aufgebaut sind, erscheinen an dieser Stelle aufgrund resultierender Überlagerungen mehrerer psychoakustisch relevanter Quellen und der Wahrnehmung des ganzheitlichen designakustischen Phänomens zu unspezifisch. Deswegen wurden im Rahmen der Arbeit komplexere, aus jeweils einem Werkstoff bestehende Strukturen in Form von Fahrradrahmen untersucht, die als Repräsentation einer einfachen aber akustisch wirksamen Konstruktionsform stehen. Die Erkenntnisse sollen an dieser Stelle zum Abschluss dieses Kapitels geschildert werden.

Untersucht wurden aus einer breiten Auswahl von verschiedenen Modellen zwei Rennrad-Rahmen, die aus historischer Sicht die gebrauchstechnische Spanne vom zeitlosen Klassiker bis zum hochspezialisierten Hightech-Bauteil abdecken. In Abb. 2.3.o sind ein 28“ Diamant-Stahlrahmen Modell 108, welcher zwischen 1954 und 1959 gebaut wurde und eine CFK-Spezialanfertigung der Hochschule Magdeburg Stendal, die in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Faserverbunde und Leichtbau Haldensleben entstand, gezeigt. Zu erwähnen ist, dass es im Sinne der konsistenten Weiteruntersuchung des bisherigen Werkstoffpaares auch Rahmenstrukturen aus Kiefernholz gibt. Der designakustische Vergleich zwischen dem „Klassiker“ und der neuen Generation erschien aber mit Sicht auf den klaren funktionalen Vorsprung, den der neuzeitliche CFK-Rahmen gegenüber der Stahlvariante hat, sehr reizvoll.

Um die Rahmen zu untersuchen, wurden beide freihängend mittels eines Impulses angeregt, um die jeweiligen Eigenfrequenzen untersuchen zu können. Die Methode ist stark an die der Modalanalyse angelehnt, bei welcher neben diesen Eigenfrequenzen auch die Eigenschwingungsformen im Sinne einer strukturdynamischen Untersuchung ermittelt und ausgewertet werden.

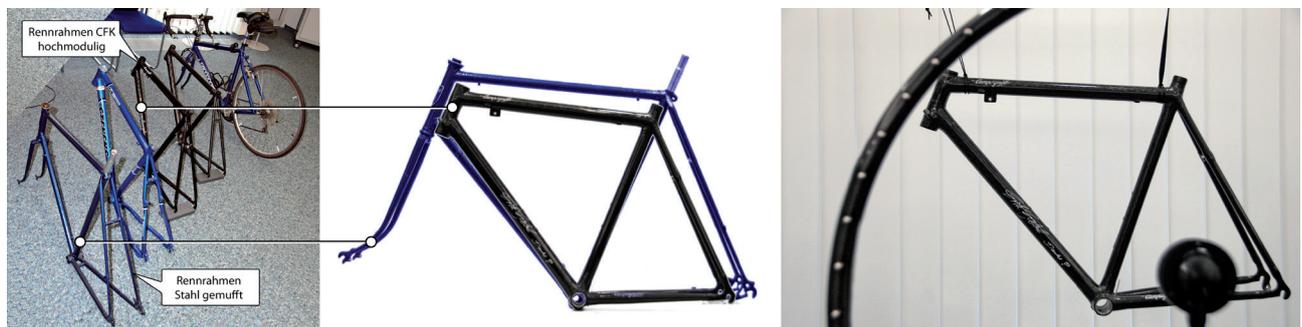


Abb. 2.3.o: Auswahl verschiedener Rahmentypen und geometrischer Vergleich der beiden untersuchten Rahmen. Rechts: frei schwingender CFK-Rahmen (Spezialanfertigung für Erik Zabel – Dank an „zfl - Zentrum für Faserverbunde und Leichtbau Haldensleben UG“; Jürgen Häberle; Julia Schulz für Entwicklung, Bau und Zurverfügungstellung) vor Array Ring 48-75 AC Pro

Beide sind baulich sehr ähnlich, weswegen sie hinsichtlich ihrer geometrischen Gebrauchseigenschaften als quasi gleichwertig betrachtet werden. Der strukturell erwähnenswerte Unterschied neben der Werkstoffauswahl ist, dass der Stahlrahmen aus miteinander vermufften Rohren besteht und somit zwar als Gesamtstruktur mechanisch integriert ist, die Bauweise aber ggf. akustische Auswirkungen im Sinne einer Bauteiladdition haben könnte. Zudem konnte die Gabel auch nicht demontiert werden, was es bei den akustischen Untersuchungen gesondert zu beachten gilt. Nicht unerwähnt sollen die unterschiedlichen Resonanzvolumina beider Bauteile bleiben. Der CFK-Rahmen hat größere Rohrdurchmesser aber deutlich dünnere Wandstärken als der Stahl-Rahmen und somit mehr Klangvolumen.

Zur Erfassung und Auswertung der entsprechenden Systemantwort dieser größeren Bauteile wurde das bereits erwähnte 48 Kanal Array vom Typ „48-75 AC Pro“ verwendet, welches bezüglich der Mikrofoncharakteristik als gleichwertig zum bisher verwendeten Array betrachtet werden kann. Anfänglich wurden, wie bei den vorangegangenen Untersuchungen auch, die jeweiligen Schalldrücke, welche als Systemantwort empfangen wurden, miteinander verglichen. Es lässt sich nach Abb. 2.3.p feststellen, dass beide Rahmen mit ca. 60 dB Effektiv-Pegel gleich reagieren. Die ausführenden Personen bescheinigten bei der Durchführung der Experimente jedoch beiden Rahmen voneinander differierende Klänge mit subjektiv empfundener unterschiedlicher Lautstärke.

Der generelle Unterschied bestätigt sich beim Vergleich der Spektren, welche bereits die Spezifika der jeweiligen klanglichen Verhaltensweisen zeigen. So finden sich im Band von 0 bis 8 kHz leichte Schwankungen in Amplitude und Verteilung. Beim Stahlrahmen treten darüber hinaus noch ausgeprägtere Resonanzen im Bereich von 8 bis 14 kHz auf, die sich bei der CFK-Struktur nicht finden. Gründe dafür sind zum einen die differierenden Materialspezifika und zum anderen die angesprochenen leichten geometrischen Unterschiede, vor allem der Wandstärken. Alle genannten Effekte überlagern einander.

Interessant ist neben diesen Aspekten zudem, dass sich außer dem jeweiligen Maximum an der Anregungsstelle auch Resonanzen der Struktur im Bereich der Tretlagermuffe ausbilden, welche hinsichtlich der weiteren Untersuchungen mit der psychoakustischen Toolbox der AK beachtet werden sollten.

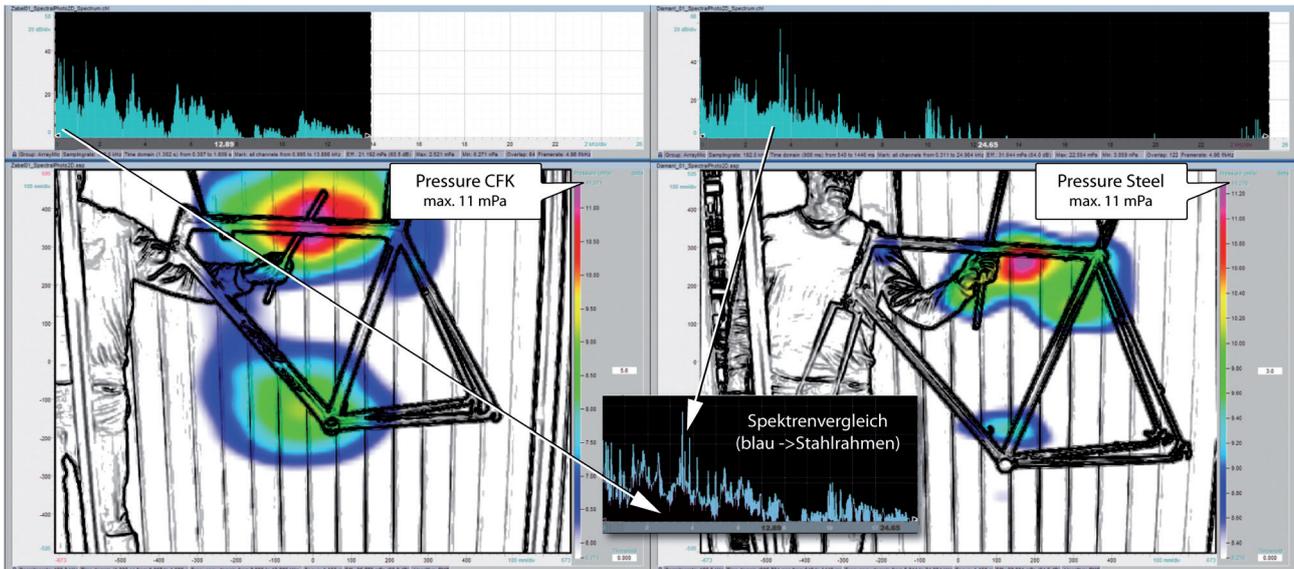


Abb. 2.3.p: Vergleich beider Rahmenstrukturen hinsichtlich der Schalldruckverteilung nach Impulsanregung; Vergleich der resultierenden Spektren in der unteren Bildmitte

Bei der Auswertung des psychoakustischen Parameters Lautheit bestätigt sich der vorab geschilderte Eindruck unterschiedlicher Systemantworten. Trotz gleicher Schalldruckpegel differiert der Wert des Stahlrahmens mit 6 sone um die Hälfte gegenüber dem CFK-Modell und ist damit psychoakustisch betrachtet lediglich halb so laut. Dies ist bemerkenswert, da die benannten höherfrequenten Signalanteile des Stahlrahmens unter Berücksichtigung der frequenzabhängigen Wahrnehmbarkeit bei gleicher Schalleistung prinzipiell besser hörbar sind (vgl. [ISO226:2003]) aber eben nicht so empfunden werden.

Die örtliche Verteilung der Lautheitsmaxima ähnelt denen der rein pegelbasierten Bewertung. Sie treten aber beim CFK-Rahmen deutlicher hervor als beim Stahl-Rahmen und sind insgesamt auch konzentrierter. Beim Stahl-Rahmen ruft die Anregung tendenziell mehr Resonanzstellen in der Struktur hervor, wobei die Gabel bezüglich der Lautheit interessanterweise keinen Einfluss hat und auch bereits bei der reinen Schalldruckauswertung nicht auffällig war. Grund dafür könnte der angesprochene additive Aufbau der Rahmenstruktur sein, welcher keinen akustischen Transferpfad an der Gabelachse zulässt, aber an den gefügten Stellen zwischen Rohren und Muffen andersartig reagiert. Der CFK-Rahmen kann dagegen als monolithisches Bauteil verstanden werden, welches in Analogie zu einer Glocke schwingt. Jedoch ist das Ausschwingverhalten beim CFK-Bauteil durch den Kunststoffanteil in Form der verwendeten Gelegematrix stärker bedämpft als es das äquivalente Zeitsignal nach Anregung des Stahl-Rahmens ist. Dieses unterschiedliche Zeitverhalten ist somit zum Großteil auf die werkstofflichen Unterschiede zurückzuführen.

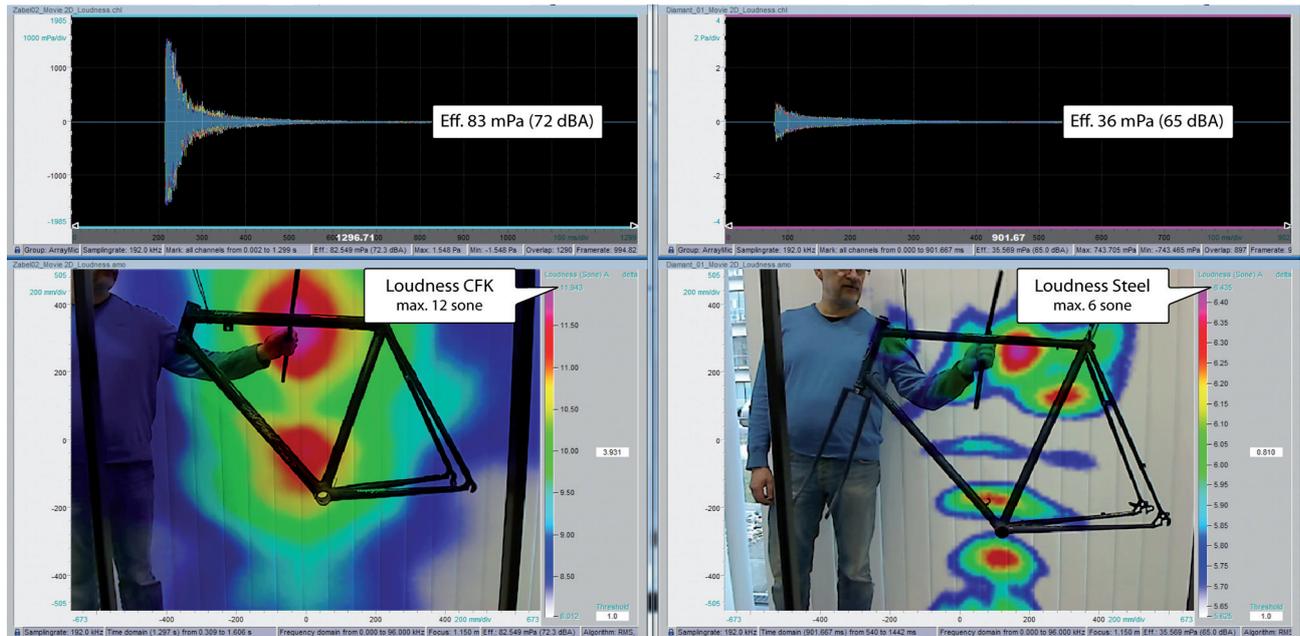


Abb. 2.3.q: Lautheitsvergleich von CFK- und Stahl-Rahmen; Die leichte Differenz der Schalldruckpegel wäre theoretisch kaum wahrnehmbar, die der psychoakustischen Lautheit ist dagegen sehr deutlich.

Bei den Untersuchungen zur Schärfe (siehe Abb. 2.3.r obere Reihe), bzw. bei der Interpretation der Ergebnisse muss wieder der bereits erwähnte Algorithmus zur Schärferechnung nach Widmann beachtet werden, welcher voraussetzt, dass die untersuchten Geräusche hinsichtlich ihrer Lautheit vergleichbar sind, um eine verlässliche Widerspiegelung der menschlichen Wahrnehmung zu errechnen.

Da dies im Falle der Untersuchungen beider Rahmen nicht gegeben ist, können die diskreten Werte die Schärfe betreffend nicht relativ zueinander verglichen werden. Die Betrachtung kann jedoch separiert erfolgen. So konzentriert sich das Maximum der Schärfe beim CFK-Rahmen an einem Punkt nahe der Tretlagermuffe. Eine Auffälligkeit, die sich beim Stahlrahmen nicht in dieser Form findet. Dort streuen die verschiedenen Schärfemaxima über die gesamte Rahmenstruktur, wodurch sich eine relativ homogene Verteilung ergibt. So zeigen sich auch bei der psychoakustischen Schärfe prägnante Unterschiede, die perspektivisch noch durch die erneute Berechnung nach der Aures-Methode in Relation gesetzt werden könnten, da diese, wie eingangs erwähnt dem Einfluss der absoluten Lautheit Rechnung trägt und so die angesprochenen Unterschiede verrechnen kann.

Betrachtet man abschließend die psychoakustischen Rauigkeitswerte beider Strukturen (siehe Abb. 2.3.r untere Reihe) sind diese mit ca. 45 masper nicht nur relativ gleichwertig, sondern auch äußerst gering, verglichen mit den Schallereignissen, welche vorangegangen bei der stufenweisen Desintegration der Biegeproben aufgetreten waren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich im Falle der Rahmenuntersuchungen um klangliche Ereignisse im elastischen Deformationsbereich handelt. Dadurch wird die Bedeutung der Ursachendifferenzierung unterstrichen, die für die Interpretation der psycho- bzw. designakustischen Phänomene essentiell wichtig ist.

Ableiten lässt sich durch diese Erkenntnis auch, dass die werkstoffliche, bzw. mechanische Güte mit akustischer Qualität korreliert – Integration ist somit besser als Addition. Die klangliche Güte repräsentiert quasi die Ästhetik der Unversehrtheit.

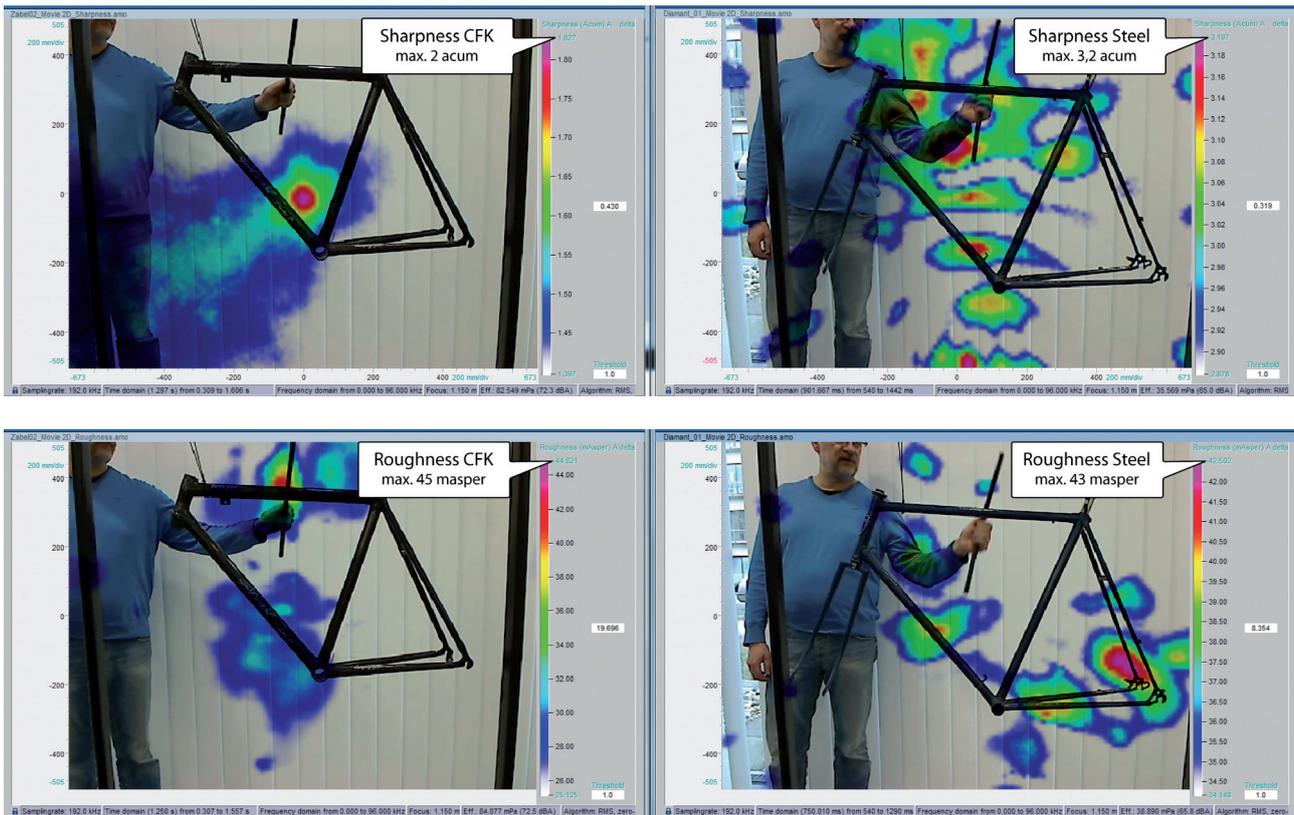


Abb. 2.3.r: Gegenüberstellung der psychoakustischen Parameter Schärfe (oben) und Rauigkeit (unten) des CFK-Rahmens (links) gegenüber dem Stahl-Rahmen (rechts)

Auf den letzten Teil dieser psychoakustischen Experimente bezogen lässt sich prinzipiell festhalten, dass das Ausschwingverhalten von Strukturen ebenso wie die Akustik im Teilschädigungsbereich der plastoelastischen Deformation eine psychoakustische Relevanz hat und somit wichtig für die werkstoff- und designakustische Analyse ist.

Im konkreten Fall zur Bewertung der akustischen Güte beider Fahrrad-Rahmen lässt sich konstatieren, dass die Auswertung der Kameradaten die subjektiv empfundenen Unterschiede bestätigt und vor allem dem Lautheitsparameter zuordnet. Hinzu kommt die beschriebene Differenzierung im zeitlichen Verhalten, bei welchem die angesprochenen Volumen- und Wanddickenunterschiede gegen die erwähnten Dämpfungseigenschaften arbeiten. Die Matrix ist somit sehr komplex, weswegen sich der Autor an dieser Stelle der Wertung enthält und dem Leser den Interpretationsspielraum lässt, zu entscheiden, welcher Rahmen entsprechend der individuellen Erwartungshaltung „besser“ klingt.

Es sei gesagt, dass die Psychoakustik hier konventionell genutzt wird. Transiente Probleme spielen bei den Untersuchungen der Fahrradrahmen eine zu vernachlässigende Rolle, woraus die Motivation für die inhaltlich an diese Experimente anknüpfenden Arbeiten mittels erweiterter psychoakustischer Analysen unter Anwendung der Artemis Suite-Software in Mittweida resultiert.

Insgesamt lässt sich die Akustische Kamera mit ihren Auswertemöglichkeiten im Zeit- und Frequenzbereich in Verbindung mit der Ortungsfunktionalität jedoch sehr gut als Methode im Sinne einer werkstoff- und designakustischen Analyse einsetzen. Sie ergänzt die vorab eingesetzte Schallemissionsanalyse um die klanglichen Auswertemethoden, welche neben den Untersuchungen der Rissinitiierungsprozesse und Vorschädigungen im Werkstoff wesentliche Relevanz für die Beantwortung der Fragestellungen der Arbeit haben. Die Kamera eignet sich somit für phänomenologische Untersuchungen, weniger für die Ursachenforschung.

Perspektivisch wäre aus dieser Sicht eine Akustische Kamera mit kleineren Mikrofonen wünschenswert, um so durch geringere Abstände im Array zu erreichen, dass höherfrequente Signale bis möglichst 100 kHz erfasst werden können, um so die Ursachen und Initiierungsmechanismen der niederfrequenten Reaktionen auflösbar zu machen. Zu erwähnen ist, dass es diesbezüglich bereits Aktivitäten gibt, um den Frequenzbereich der Akustischen Kamera entsprechend auszudehnen, bzw. für spezielle Applikationen bei hohen Frequenzen aufzubereiten (siehe z. B. System ULTRA M der Fa. Distran [DIS2018]).

In Abb. 2.3.s wird die Methode abschließend hinsichtlich des beschriebenen komplementären Ansatzes für die designakustische Analyse bzw. Klassifikation über die verschiedenen Frequenzbereiche eingeordnet. Abgebildet sind die direkt mit dem menschlichen Gehör in Deckung liegenden Mikrofone der Akustischen Kamera, bzw. des bei folgenden Untersuchungen oftmals verwendeten Mikrofons vom Typ MK301 [MG2018]. Darüber hinaus sind die für die Ursachenforschung relevanten höherfrequent abtastenden Ultraschallsensoren auf Piezokompositbasis vermerkt [HOL2013].

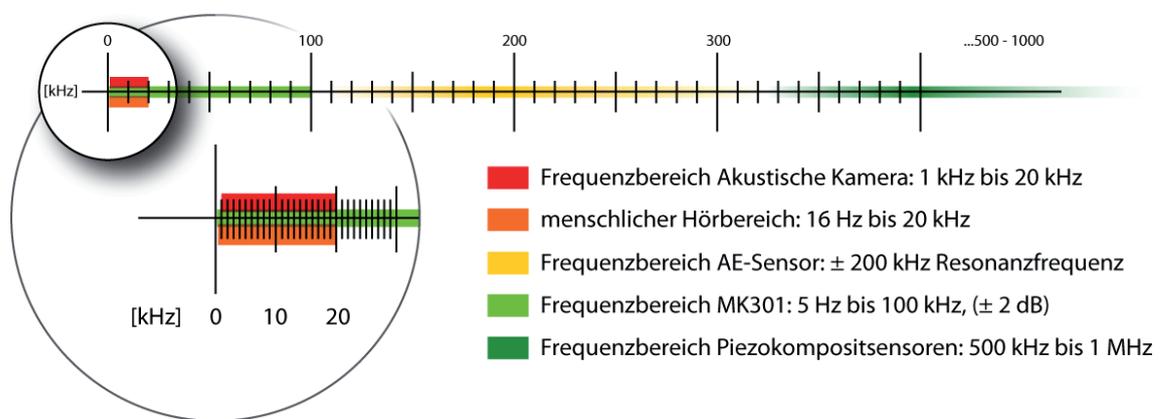


Abb. 2.3.s: Visualisierung der Frequenz-Erfassungsbereiche der verwendeten Messsysteme mit Bezug auf den menschlichen Hörbereich

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass es im Falle der Untersuchungen mittels der Akustischen Kamera nicht möglich war einen hardwareorientierten Zugang mit MATLAB zu schaffen, wie er im weiteren Verlauf des Kapitels geschildert wird. Hier wurden die zur Messtechnik gehörigen Programme genutzt, bzw. entsprechende Konverter zur Formatanpassung an die MATLAB-Module genutzt.

Wichtig ist als nächster Schritt auf dem Weg zur eigentlichen werkstoff- und designakustischen Analysemethode die generelle Methodik der Datenakquise und -auswertung, welche aufgrund der verschiedenen Signale und Sensoren mit den jeweils zugehörigen Mess-Systemen spezifisch erfolgen muss, um die Ergebnisse neben den beschriebenen frequenzbezogenen Unterschieden gerade hinsichtlich der zeitlichen Aspekte vergleichbar zu extrahieren. Dafür sind grundlegende Kenntnisse der Zusammenhänge zur Signalverarbeitung notwendig, welche im folgenden Kapitel geschildert werden. Diese werden anschließend hinsichtlich der werkstoffbezogenen designakustischen Analyse weiterführend herausgearbeitet, um die spezifischen mathematischen und signaltheoretischen Grundlagen, die zur technischen Akquisition, Ursachenforschung, Bewertung und zur Notation von werkstoffbezogener Akustik notwendig sind, zu beschreiben.

2.4 Allgemeine mathematische und signaltheoretische Betrachtungen

Um aus den vorab beschriebenen Experimenten eine spezifische Methode für designakustische Analyse abzuleiten und die geschilderten Auswertungen zu übertragen, muss die Signalanalyse entsprechend dem Wissen zu den phänomenologischen Zusammenhängen zwischen mechanischen und akustischen Eigenschaften angepasst werden. Im folgenden Kapitel werden die in der Arbeit verwendeten Methoden prinzipiell beschrieben, die bei der Signalanalyse und -verarbeitung der Messungen mit verschiedenen Sensoren und Verfahren Berücksichtigung finden. Die Beschäftigung mit den numerischen Aspekten der Signalverarbeitung zielte darauf, möglichst optimale Beschreibungen und einen maximalen Informationsgewinn zu erreichen. Die Bandbreite der Signalverarbeitungsverfahren ist so groß, dass es unmöglich scheint, alle Berechnungs- oder Darstellungsmöglichkeiten auszuloten. Wichtig war vor allem, die für die jeweiligen Prozesse geeigneten Bearbeitungen auszuwählen und zu modifizieren. Eine Herausforderung war das Zusammenführen von unterschiedlichen akustischen Messmethoden. Auf die Herleitungen der grundlegenden Zusammenhänge, welche in der Literatur ausführlich beschrieben sind, wird dabei weitestgehend verzichtet. Jedoch ist es sinnvoll eingangs auf den Zusammenhang zwischen mechanischen und akustischen Eigenschaften und dabei speziell auf die Besonderheiten bei Faserverbundmaterialien und -werkstoffen einzugehen. Die dabei relevanten Größen werden im nächsten Hauptkapitel der designakustischen Analyse wichtig.

Die Auswahl, bzw. die große Bandbreite der im Folgenden geschilderten Auswertemethoden begründet sich darin, dass die unterschiedlichen akustischen Quellen und Anregungsmechanismen, die material- und werkstoffspezifisch auftreten, immer entsprechende methodische und messtechnische Spezifika erfordern. Dies ist insbesondere auch deshalb von Bedeutung, da sich die in der Arbeit verwendeten Verfahren auf eine eher generalisierte Betrachtungsweise von akustischen Eigenschaften aus Sicht des Industriedesigns und der dort gestaltungsrelevanten Material- und Werkstoffauswahl beziehen. Dies spiegelt sich auch in der für die Experimente verwendeten Messtechnik wider. Die notwendige Flexibilität erfordert es, die Vergleichbarkeit der Daten zu bewerten bzw. zu gewährleisten, insbesondere dann, wenn sie mit unterschiedlicher Messtechnik akquiriert wurden. Da material- und werkstoffakustische Vorgänge verschiedene Ursachen haben können und zum Teil über einen weiten Frequenzbereich streuen, ist bereits der Einsatz einer einheitlichen Messtechnik, wie bereits vorab beschrieben, nicht möglich. In den spezifischen Ausführungen der Arbeit zur designakustischen Analyse wird deswegen versucht, dies mit Hilfe der dort eingeführten Software- und Auswertemodule weitestgehend zu kompensieren. Die in der Arbeit verwendeten Prüfkörper und Testobjekte werden zum Teil zerstört oder zumindest so belastet, dass die dabei auftretenden Vorgänge oft irreversibel schädigend bzw. nicht reproduzierbar sind. Das bedeutet, dass neben dem ohnehin stochastischen Charakter der Signale auch die Messungen statistisch interpretiert werden müssen. Eine gewisse Reproduzierbarkeit von Messsituationen kann daher nur über die Qualität der Prüfkörper beeinflusst werden.

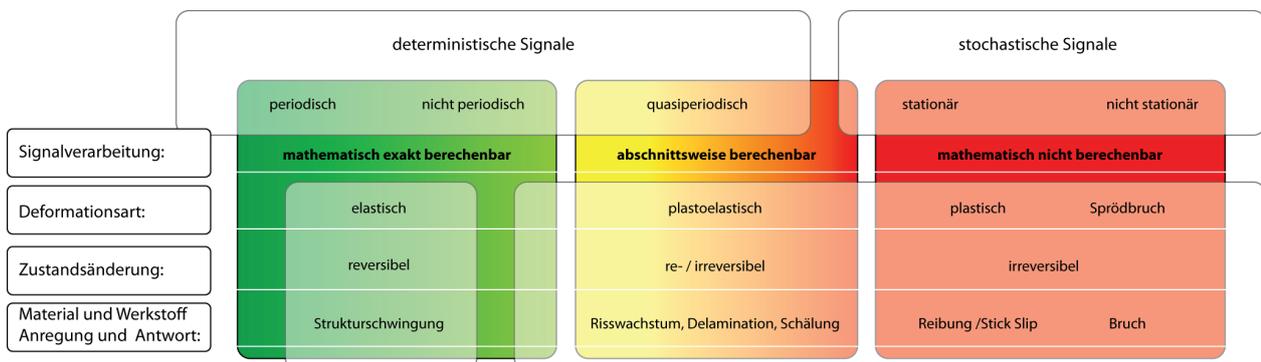


Abb. 2.4.a: Vorschlag zur material- und werkstoffakustischen Strukturierung von verschiedenen, bei Nutzung auftretenden Signaltypen mit Einordnung der initiiierenden Mechanismen aus Sicht der Arbeit

Andererseits kann die Schwankungsbreite der Ergebnisse auch als ein Maß für die Streuungen von Eigenschaften z. B. bei Naturfasermaterialien oder für die Herstellungsqualität, zum Beispiel durch unbeabsichtigte Fehler dienen.

Akustische Vorgänge waren, wie bereits im geschichtlichen Teil der Arbeit beschrieben, lange nur mit nicht zeitaufgelösten Daten beschreibbar. Doch neben dem Frequenzinhalt sind wesentliche Information über Prozesse, Übertragungsverhalten und Dauer von Zuständen vor allem auch in der zeitlichen Dynamik des Signals enthalten. Viele Vorgänge sind mit einer entsprechenden akustischen „Begleitung“ versehen. Wenn man diese, wie in der Arbeit, als Äußerung der Werkstoffe und Strukturen auf das Nutzungsverhalten und den Funktionszustand versteht, so bietet sich eine einzigartige flexible Sondiermethode, um die Eigenschaften der Materialien zu verstehen, bzw. zu differenzieren. Invers betrachtet könnte man darauf aufbauend akustische Eigenschaften simulieren (siehe Ausführungen zur virtuellen Modellierung von Möbeln verschiedener Materialität in Kap. I.1.4) und geeignet bzw. gebrauchsfördernd beeinflussen.

Die Entwicklung digitaler Messtechnik hat also dazu geführt, dass neben eher statisch orientierten Werten wie „Pegel“ oder auch dem gemittelten Spektrum zeitaufgelöste Messungen möglich wurden. Sinngemäß betrifft dies auch die Erfassung sehr schneller (transienter) Vorgänge mittels der Techniken der Schallemission, wo eher einzelne Ereignisse registriert und gezählt, als das signalinhaltliche Informationen extrahiert werden. Diese Entwicklung ist jedoch inzwischen so weit fortgeschritten, dass Zeitaufösungen von Signalen im akustischen Sinne auch für fast beliebig schnelle Vorgänge möglich sind. Die simultane Verwendung mehrerer Sensoren bzw. Messkanäle zur Quellen- und Ursachensuche findet dabei zunehmend Verbreitung. Die Korrelation von Signalen verschiedener Sensoren bietet dabei neue Möglichkeiten zur Identifikation und Lokalisation von Ereignissen. Auch heute noch herausfordernd sind aber transiente Vorgänge, die vergleichsweise schnell sind bzw. relativ hohe Frequenzen enthalten, da die geeigneten Messsysteme so konfiguriert und konditioniert werden müssen, dass die notwendigen Datenmengen beherrschbar sind. So wird dieses Problem beispielsweise bei den akustischen Verfahren in der zerstörungsfreien Prüfung, die unter dem Begriff „Akustische Emission“ - kurz „AE“ - zusammengefasst werden, teilweise umgangen, indem man pragmatische Parameter, sog. „Hits“, als Repräsentanz der transienten Vorgänge zulässt. Dieses Verfahren wurde bereits vorab exemplarisch als referenzielle Untersuchungsmethode im Kap. 2.2 dieser Arbeit verwendet, um erste Erkenntnisse bzgl. des akustischen Verhaltens bei Deformation zu erlangen. Gerade mit Sicht auf die klassische Vibrationsmesstechnik und die historisch gewachsene Differenzierung der dort verwendeten Sensorik und Messhardware im Vergleich zur Schallemissionsmesstechnik lässt sich erkennen, dass die jeweiligen Datenraten aufgrund der verschiedenen Frequenzbereiche deutlich voneinander abweichen und damit verbunden auch unterschiedliche Daten und Datenmengen anfallen können. Die Entwicklungen beider Applikationsbereiche folgten dem jeweiligen Stand der Technik. Die hier exemplarisch vorgestellten Konzepte zur Datenverarbeitung sind mit Sicht auf das Ziel der Arbeit so konzipiert, dass ein einheitlicher Zugang zur Bewertung, Klassifizierung und Modellierung von akustischen Material- und Werkstoffeigenschaften geschaffen wird, falls die jeweiligen Abstraten und Datenmengen beherrschbar bleiben und die Rechenleistung verfügbar ist. Dabei spielt es in erster Instanz keine Rolle, ob die Daten mittels Post-Processing bewertet werden können, oder ob die jeweilige Anwendung Berechnungen in Echtzeit ermöglicht. Dazu wurde die für die jeweilige Problemstellung geeignete Hardware bereitgestellt und konfiguriert. Die modulare Struktur der Software wurde prinzipiell so ausgelegt, dass die Signale einer beliebigen Zeit-Frequenz-Analyse unterzogen werden können. Da meist nur bestimmte Zeitabschnitte für eine Auswertung interessant sind, lohnt sich an entsprechender Stelle ein Vergleich der jeweiligen Methoden, um die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Zugänge zu hinterfragen.

Es sei aber darauf hingewiesen, dass insbesondere bei Monitoring-Problemen sehr große Datenmengen anfallen können bzw. dass Echtzeitbewertungen von akustischen Ereignissen nötig werden. Die entwickelten Mess- und Auswertprogramme sind auch für Entwicklungsarbeiten in dieser Richtung ausgelegt.

Die in der Arbeit untersuchten und bewerteten breitbandigen akustischen Vorgänge überstreichen sowohl den Ultraschall- als auch hörbaren Frequenzbereich. Eine scharfe Trennung bezüglich des Frequenzbereichs, wie sie in klassischen Applikationen oft vorkommt, ist bei den materialbezogenen Fragestellungen der Arbeit aber nicht zielführend und sinnvoll. Für die in der Arbeit beschriebene Methodik bedeutet dies bezüglich der Einordnung des Frequenzbereiches, dass sowohl die experimentellen Verfahren als auch die anwendungsseitigen Aussagen im Übergangsbereich zwischen den hörbaren Frequenzen und dem Ultraschall angesiedelt sind.

Gerade für diesen Frequenzbereich haben sich, inklusive neuer Methodik, Messtechnik und Sensorik neue Anwendungsgebiete, vor allem in der Instandhaltung und Überwachung von Materialien und Konstruktionen, aufgetan. So wird davon ausgegangen, dass alle hochfrequenten Vorgänge auch von simultan angeregten Schwingungen im hörbaren Bereich begleitet werden. Die entsprechenden Anregungen können dabei reversiblen (kontinuierlich, statistisch zufällig) oder irreversiblen Ursprungs (Materialveränderungen, wie Riss, Bruch) sein. Dies kann zu zeitlich auflösbaren oder zu überlagerten, unspezifischen transienten Schwingungen führen, welche dann messtechnisch nicht auflösbar sind. Beide Szenarien bedingen unterschiedliche Herangehensweisen, die zu einer gewissen Differenzierung der Messverfahren und Aussagemöglichkeiten geführt haben. Diese werden im Folgenden skizziert.

Es sei darauf verwiesen, dass die gewählte Differenzierung nicht die einzige Einteilungsmöglichkeit darstellt. So wäre es beispielsweise sinnvoll, Daten auf spezifische Gebrauchsszenarien zu beziehen – ähnlich, wie es bei Betriebszuständen rotierender technischer Systeme, wie Motoren und Getrieben durch Verfahren der Ordnungsanalyse realisiert wird. Aufgrund der Bandbreite akustischer Effekte und Signalformen bei Material- und Werkstoffbelastungen ist ein einheitlicher Zugang zur Signalbewertung nicht möglich. Es kommt eher darauf an die optimale Herangehensweise für die jeweilige Problemstellung zu finden und zu begründen, damit die geeigneten Parameter in vergleichbarer Form aus den Messdaten extrahiert werden können. Deshalb werden im Folgenden einige der Grundlagen der in dieser Arbeit verwendeten Zugänge zusammengestellt und kommentiert. Ziel ist es vor allem die Bandbreite zu beherrschen und entsprechende Gültigkeitsbereiche zu hinterfragen.

2.4.1 Kontinuierliche Signale

Grundsätzlich ist in aufgenommenen Zeitsignalen, welche mit geeigneter Sensorik erfasst wurden die gesamte physikalische Information enthalten. Für den Betrachter ist diese jedoch oft nicht direkt und ohne weitere Verarbeitung interpretierbar. Dafür bieten sich prinzipiell zwei Herangehensweisen. Zum einen kann das Zeitsignal durch die Anwendung von Parametern bewertet werden, wie es z. B. im maschinendiagnostischen Bereich durch Auswertung von Crest-Faktor oder Kurtosis bei kontinuierlich auftretenden Signalen, welche meist durch rotationsgebundene Krafteinwirkung verursacht werden, geschieht. Zum anderen können die Signale aber auch in ihrer frequenzbezogenen Darstellung repräsentiert werden, da sich dort die Übertragungsfunktionen zum Teil viel leichter und verständlicher im Frequenzbereich beschreiben, bzw. interpretieren lassen. Die spektrale Information spiegelt dabei wichtige Systemeigenschaften von Werkstoffen und Materialien wider. Eine zentrale Rolle bei der Bewertung akustischer Signale spielen die Spektren, welche in vielen Fällen erst eine fundierte Interpretation von Systemeigenschaften ermöglichen. Die Spektren müssen dafür erst durch geeignete Transformationen generiert werden. Diese Transformationen des Zeitsignals in den Frequenzraum ermöglichen es dann die Frequenzkomponenten eines Signals mit einer definierbaren Auflösung zu bewerten. Die wichtigste Darstellungsform dafür ist die Fourier-Transformation (siehe auch Kap. II.5, Beginnende industrielle Revolution bis 20. Jahrhundert).

Die Gültigkeitsbereiche dieses Verfahrens unterliegen bestimmten Rahmenbedingungen. So ist die Fourier-Transformation zunächst für stationäre, stetige und unendlich lange Signale. Dies entspricht aber nicht immer den in der Realität vorkommenden Szenarien. Gerade bei der Beschreibung von Bruchvorgängen kommt die Methode an ihre Gültigkeitsgrenzen. Ebenso ist mit Sicht auf die Leistungsfähigkeit die verfügbare Rechentechnik zu berücksichtigen, dass nicht beliebig viele Daten in die Rechenoperationen einbezogen werden können. Dieser Aspekt muss insbesondere bei der Analyse zeitlich stark veränderlicher Signale durch die Methodik der Berechnung und durch das Setzen entsprechender Parameter berücksichtigt werden. Entsprechende Theoreme, welche bei der Frequenzanalyse und der Fourier-Transformation Berücksichtigung finden müssen, werden im Anschluss an die Ausführungen zur grundlegenden Integraltransformation (1-3) näher beschrieben. Den eigentlichen Messungen gingen diesbezügliche Tests voran. Dies betraf vor allem die Amplitudendynamik der lauten und schnellen Bruchvorgänge sowie die systemübergreifenden mechanischen Einflüsse.

Obwohl sich die Fourier-Transformation (1) in den Grundzügen bereits um 1822 formuliert wurde, hat sich die Bedeutung für die Akustik erst in den letzten Jahrzehnten mit Einführung der Rechentechnik als unverzichtbares Werkzeug zur Signalauswertung manifestiert. Das Theorem belegt die grundsätzliche Äquivalenz der Signalbeschreibung im Zeitbereich und der abgeleiteten Frequenzdarstellung, was die Grundlage für die Varianz, bzw. Flexibilität der Messverfahren darstellt. Deren moderne digitale Weiterentwicklungen haben die Spektroskopie zeitsignalbasierter physikalischer Signale überhaupt erst ermöglicht.

Außerdem hat die digitale Umsetzung des mathematischen Ansatzes zu einer starken Flexibilisierung der Anwendungsbreite geführt. Da die akustischen Signale jedoch meist nicht „statisch“ sind und Fluktuationen bezüglich der Intensität und Frequenz enthalten, sind oft erst kombinierte Zeit-Frequenz-Darstellungen in der Lage, das Systemverhalten einer dynamisch belasteten, bzw. „akustisch aktiven“ mechanischen Struktur zu verstehen.

Im Folgenden sollen die Grundlagen dieser Integraltransformation nur soweit behandelt werden, wie sie für das Verständnis in dieser Arbeit benötigt werden. Weitergehende Darstellungen finden sich in vielen ausgezeichneten Monographien (siehe z. B. [BUT1998]).

Zwischen einem Zeitsignal $f(t)$ als Repräsentation des realen physikalischen Vorgangs, wie er in der Akustik auftritt, und dem äquivalenten Signal in der Frequenzdarstellung $F(f(t))$ kann dieser Zusammenhang in Form der (allgemeinen) Fourier-Transformation beschrieben werden.

$$\mathcal{F}(f(t)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

Dieses Prinzip ist an die Voraussetzung gebunden, dass das Signal „stationär“ und im Zeitbereich unendlich sein muss und so als Funktion beschreibbar ist. Da Messdaten in der Praxis endlich sind, bildet die diskrete Variante die Grundlage für die mess- und datentechnische Anwendungen.

$$f[k] = \sum_{n=0}^{N-1} f[n] \exp^{-i2\pi \frac{kn}{N}} \quad (2)$$

Die Diskretisierung (2) stellt hier das mathematische Pendant zur digitalen Abtastung der Messwerte dar. Auf die Rahmenbedingungen der diskreten Formulierung kann hier nicht eingegangen werden. Es werden nur einige grundlegende Auswirkungen beschrieben. Die sogenannte Fast-Fourier-Transformation (FFT) dient als grundlegender Algorithmus der effizienten numerischen Frequenzberechnungen einschließlich der Zeit-Frequenz-Beschreibungen. Die in der Arbeit verwendeten spektralen Darstellungen beziehen sich auf die Amplitudenspektren bzw. Leistungsdichtespektren. Die zugehörigen Phasenspektren stehen dabei für weiterführende Berechnungen zur Verfügung.

$$|F| = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \quad \phi = \arctan \frac{\beta}{\alpha} \quad (3)$$

Amplitudenspektrum

Phasenspektrum

Die korrekte mathematische Beschreibung durch eine Fourier-Transformation impliziert eine Äquivalenz der Information, bzw. der Energie im Zeit- und Frequenzbereich. In beiden Darstellungsweisen sind somit die gleichen Informationen enthalten. Beispielsweise ist der Energiegehalt eines Signals in beiden Darstellungsformen

identisch (4). Damit besteht eine Möglichkeit die Vergleichbarkeit entsprechend transformierter Mess- und Auswertedaten zu prüfen, da aufgrund der schnellen akustischen Vorgänge der Einfluss von Artefakten auf die Daten zumindest hinterfragt werden sollte. Dafür wurden leistungsfähige Verfahren angewandt, welche die für die Experimente und Auswertungen gewählten Verfahren auf ihre Konsistenz prüfen. Bei der vorliegenden Arbeit wurden insbesondere die Regeln zur Behandlung experimenteller Anordnungen als lineare Systeme berücksichtigt. Dies betrifft sowohl zeitliche als auch intensitätsbezogene Zuordnungen. Die Aussage, dass die Energie eines Signals im Zeit- und Frequenzbereich gleich ist, folgt aus der sog. Parsevalgleichung [PAR2006]:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df \quad (4)$$

Diese Gleichung kann zur energetischen Abschätzung der Messergebnisse verwendet werden, um die Plausibilität hinsichtlich eventueller Störungen durch schwierige Randbedingungen zu prüfen. Gäbe es beispielsweise breitbandige Störungen im Zeitbereich, würde das Zeitintegral diese Störungen berücksichtigen. Im Frequenzbereich hingegen kann man die Energie in einem bandbegrenzten Bereich Δf im Verhältnis zum Gesamtsignal bestimmen. Diese Überlegungen sind besonders dann von Interesse, da sich die Abstraten aufgrund verschiedener Messsysteme unterschieden bzw. Filter und Fenster die Daten beeinflussen oder Artefakte durch die Signalverarbeitung berücksichtigt werden müssen. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Datenverarbeitung ist auch die Überprüfung der Signalketten bezüglich der Überlagerung von akustischen Vorgängen bei linearen Systemen. Die ungestörte Überlagerung von akustischen Signalen im Zeitbereich muss sich so auch in einer ungestörten Überlagerung im entsprechenden Spektrum wiederfinden. Eigenschaften wie Homogenität, Additivität und Shiftingvarianz wurden in der Arbeit insbesondere genutzt um Störeinflüsse auf die Messsysteme und die Linearität von Anregung und Sensornutzungsbereich zu überprüfen, bzw. zu hinterfragen.

Neben den beschriebenen Grundannahmen zur FFT (1) sind bezüglich der Behandlung kontinuierlicher Signale noch weitere Rahmenbedingungen genereller Natur zu berücksichtigen, welche weiterführend beschrieben werden.

Aufgrund der unterschiedlichen verwendeten Messtechnik mit notwendigerweise verschiedenen Abstraten ist es so an dieser Stelle lohnend, auf die Auswirkungen des sog. Nyquist-Shannon-Abtasttheorems (5) hinzuweisen ([SHA28] und [WOL2014]). Die wesentliche Aussage besteht darin, dass die Frequenz eines Signals nur dann exakt rekonstruiert werden kann, wenn die Abtastfrequenz mindestens zweimal so groß ist wie die im Signal vorkommende höchste Frequenz. Im Zusammenhang mit den bei der Signalverarbeitung notwendigen weiteren Begrenzungen der nutzbaren Bandbreite, muss deswegen die Zielrichtung der jeweiligen Messmethodik hinterfragt werden. Neben der technischen Verfügbarkeit der „physikalisch optimalen“ Abtastrate sind durch die nicht-stationären Prozesse auch bezüglich der Zeit-Frequenz-Auflösung entsprechende Kompromisse zu machen.

$$f_s > 2f_{max} \quad (5)$$

Im praktischen Einsatz müssen weitere, die nutzbare Bandbreite limitierende Einflüsse berücksichtigt werden. So sind deshalb etwa 20 % des oberen Frequenzbereichs für quantitative Bewertungen nicht sinnvoll nutzbar, da in der Regel kein ideales Tiefpassverhalten erreichbar ist. So wären beispielsweise Amplitudenbewertungen in einem Frequenzbereich von angenommenen 100 kHz Spektrenbreite und entsprechender Abtastrate von 200 kHz nur im Bereich von 0 bis 80 kHz sicher nutzbar und sinnvoll. Bei zu geringer Abtastrate – oft verursacht durch nicht optimal verfügbare Messtechnik – kann sogenanntes „Aliasing“ auftreten. Die in einem solchen Fall entstehende Rückfaltung erzeugt dann zusätzliche Frequenzen, die kaum physikalisch zugeordnet werden können. Dies kann insbesondere bei Frequenzen mit großen Amplituden, die außerhalb des

Messbereichs liegen vorkommen, wenn keine Maßnahmen zur Verhinderung dieser Spiegelfrequenzen, wie z. B. der Einsatz geeigneter Analogfilter getroffen werden. Da die in der Arbeit verwendeten Messkarten nicht in jedem Fall mit Antialias-Filtern ausgestattet waren, wurde diese Fehlerquelle mit zusätzlichen Maßnahmen, wie zusätzlichen Tiefpassfiltergliedern in der Messkette berücksichtigt. Insbesondere bei den Messungen mit Körperschallsensoren spielte dies eine gesonderte Rolle. Die Abschätzung der zu erwartenden Bandbreite ist ohne entsprechende Erfahrungswerte teilweise sehr schwierig. Selbst wenn nur unspezifische Frequenzverteilungen bei höheren Frequenzen Beiträge zur Signalenergie liefern, könnten diese durch Rückfaltung das für die Untersuchungen relevante Spektrum sehr stark beeinflussen. Da in den meisten Fällen Spektren bei niedrigeren Frequenzen in Bandbreiten bis ca. 120 kHz zielführend für die in der Arbeit behandelten Fragestellungen waren, wird eingeschätzt, dass diese Vorgehensweise zu korrekten Ergebnissen führt. Insbesondere bei den Körperschallmessungen liegt ein Teil der Frequenzen oberhalb 100 kHz. Für die Betrachtungen in dieser Arbeit spielt dies aber nur eine sehr untergeordnete Rolle, so dass Messungen mit hochabstastender Technik nur in methodischer Hinsicht durchgeführt worden.

Bei ereignisbasierten Verfahren, wie z. B. der Schallemissionsanalyse ist der unspezifische hohe Frequenzbereich geeignet, die angesprochenen „Hits“, also Zählergebnisse auszulösen. Die Rahmenbedingungen für eine Spektralanalyse werden dabei aus technischen Gründen oft nicht eingehalten. Insbesondere für hohe Frequenzen ist es dazu auch schwierig Sensoren mit einem linearen Frequenzgang zu finden. Im experimentellen Teil der Arbeit wird darauf noch speziell eingegangen, da diesbezüglich Verbesserungen durch neu entwickelte Körperschallsensoren erreicht werden konnten (siehe auch [HOL2013]). Allerdings werden die traditionellen Verfahren der Schallemission vor allem für das Verständnis von Schädigungsprozessen eingesetzt, während in der Arbeit vor allem die Nutzung der akustischen Auswirkungen im Mittelpunkt stehen.

Neben diesen Ausführungen zur Abtastung sind noch weitere systemtheoretische Aspekte wichtig, die sich mit der Zeitdauer bzw. Einschwingdauer und der Bandbreite eines Signals auseinandersetzen, denn prinzipiell wäre es wünschenswert eine entsprechende Zeit- und Frequenzdarstellung gleichzeitig in der notwendigen Auflösung zur Verfügung zu haben. Dies ist jedoch nicht möglich, denn eine hohe Zeitauflösung geht zu Lasten der Frequenzauflösung und umgekehrt. Interessant sind die Analogiebeziehungen zur Unschärferelation. Dieses Prinzip der Unschärferelation wurde von Heisenberg für die Erklärung der Rahmenbedingungen für die simultane Messung von Ort und Impuls eines Teilchens in der Quantenmechanik formuliert. Ort und Impuls lassen sich nicht gleichzeitig exakt bestimmen. Als Pendant formulierte Kämpf Müller die Unschärferelation für die Nachrichtentechnik [SHA28], [HOF05] nach welcher die Zeitdauer oder Einschwingdauer und die Bandbreite eines Signals nicht gleichzeitig beliebig klein werden können – eine Aussage, welche eine auf die Verhältnisse nachrichtentechnischer Systeme angepasste und zur Heisenbergschen Unschärferelation analoge Aussage liefert. Die mögliche Auflösung wird prinzipiell durch das Plancksche Wirkungsquantum h begrenzt.

$$\Delta x \Delta p \approx h \quad (6)$$

In der Signalverarbeitung wird die Beziehung formal identisch für den Zusammenhang der simultanen Auflösung bezüglich Zeit und Frequenz verwendet. Die Unbestimmtheit der Zeit- und Frequenzauflösung wird dabei auf die Varianz der Signale im Zeitbereich (σ_t^2) und im Frequenzbereich (σ_f^2) bezogen:

$$\sigma_t^2 \sigma_f^2 \geq \frac{1}{16\pi^2} \quad (7)$$

Der Quotient $1/16\pi^2$ kann als minimaler Flächeninhalt der Abweichungen betrachtet werden. Dieser Wert kann aber durch die diskreten Messverfahren nicht erreicht werden. Für praktische Anwendungen kann man (vereinfachend) $\Delta f = 1/\Delta t$ annehmen, um so die möglichen Auflösungen in Relation zu setzen.

Dem Wunsch nach einer dem jeweiligen Problem angepassten Zeit-Frequenz-Auflösung kann, zumindest partiell, mit dem folgend noch beschriebenen Verfahren der Wavelet-Transformation (8 und 9) Rechnung getragen werden. Ein Nachteil der Wavelet-Transformation ist aber ihre Nichteindeutigkeit aufgrund der Vielfalt der verwendbaren Basis-Funktionen und die anspruchsvolle Interpretierbarkeit bezüglich der physikalischen Bedeutung. Die Wavelet-Transformation wurde im Rahmen der Arbeit daher vor allem für vergleichende numerische Untersuchungen zur Fourier-Analyse eingesetzt. Die Auswahl von Basisfunktionen beruhte dabei auf Erfahrungswerten (siehe auch [BAD2006]) und numerischen Tests. In der Methode wird insbesondere im Hinblick auf die Differenzierung verschiedener Prozesse im Sinne der Mustererkennung viel Potenzial gesehen. Allerdings ist für einen zielführenden Einsatz auch eine große Datenbasis notwendig, was eine Verwendung des Verfahrens für Einzelphänomene erschwert. Für die Bewertungen dieser Arbeit hat sich aus der Nutzung Wavelet-analytischer Methoden kein Vorteil ergeben. Die Wavelet-Analyse ist insbesondere sensitiv, um das Einsetzen der Bruchvorgänge zu dokumentieren. Bei Sause wird die Waveletanalyse genutzt um Ausbreitungsvorgänge in Kompositmaterialien zu beschreiben [SAUSE10]. Bei höheren Frequenzen zeigt sich ein Einsatzvorteil dieser Methode, wenn im Signal stark dispersive Anteile vorkommen. Dies ist aber bei den in die hörakustischen Betrachtungen einzubeziehenden Frequenzen und im unteren Ultraschallbereich nicht der Fall.

Bei der digitalen Fourier-Transformation – insbesondere von kurzzeitigen Signalen – spielen numerische Artefakte, welche die Signalform, bzw. –auswertung beeinflussen können oft eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Die Bildung von sog. Artefakten muss insbesondere immer dann berücksichtigt werden, wenn Daten und Weiterberechnungen verglichen werden, die mit unterschiedlichen Methoden und Parametern berechnet wurden. Als Artefakte bezeichnet man im Allgemeinen messtechnisch bedingte, durch Eigenschaften der Methode hervorgerufene Ergebnisse, wie z. B. den sog. Leck-Effekt oder kurz Leakage. Diese Auswirkung einer systembedingten Übertragungsschwäche auf das eigentlich nutzbare Signal beschreibt die Tatsache, dass sich, bedingt durch den nur endlich langen Beobachtungszeitraum eines Signals, im Rahmen der Fourier-Analyse im berechneten Frequenzspektrum auch Frequenzanteile finden, die bei einem nur theoretisch möglichen unendlich langen Beobachtungszeitraum nicht vorkämen und dieses verfälschen. Dies hat insbesondere dann starke Auswirkungen, wenn die numerischen Verfahren im Grenzbereich ihrer Anwendbarkeit genutzt werden.

Da für die FFT in der Regel zufällige Signalabschnitte aus dem Zeitsignal „ausgeschnitten“ werden, können die Schwingungen aller vorkommenden Frequenzen in der Berechnung nicht als ganzzahlige Vielfache vorkommen. Dieses „Abschneiden“ führt zu gewissen Verzerrungen wie z. B. der Verbreiterung der Spektrallinien und der stärkeren Betonung von Nebenkeulen. Durch geeignete Fensterungen bei der Auswahl der Signalabschnitte für die Spektrenberechnung werden die Signalländer so behandelt, dass Sprünge vermeidbar sind. Allerdings beeinflusst auch dies die Amplituden der Spektren. Bei Vergleichen, insbesondere von Daten aus unterschiedlichen Experimenten sollte dies berücksichtigt werden. Für eine optimale Anwendung der digitalen Fast-Fourier-Transformation ist die Kenntnis der Auswirkung dieser Operationen wichtig, um den Einfluss auf die Spektrenform zu reduzieren. Bei den transienten Signalformen sind optimale Kompromisse teilweise schwierig. Für die anfänglichen Berechnungen wurde in der Arbeit ein sog. Hanning-Fenster verwendet [HAR1978]. Dass bei der Wavelet-Transformation ähnliche numerische Probleme, die vor allem mit der Behandlung von Randwertproblemen verbunden sind auftreten ist bekannt, wird an dieser Stelle jedoch nicht näher abgehandelt [BAD2006].

Ausgehend davon, dass die Rissinitiierung und die damit verbundenen akustischen Reaktionen dieser Experimente einen asymmetrischen Zeitverlauf mit sehr schnellem Anstieg und langsamerem Abklingen aufweisen, wurde im weiteren Verlauf auch mit asymmetrischen Fenstern experimentiert. Dafür wurden asymmetrische WINDOW-Funktionen eingeführt, die diesem Verhalten Rechnung tragen. Solche Fenster sind insbesondere für Anwendungen denkbar, bei welchen impulsförmige Anregungen, wie die in der Arbeit, die Signalantwort generieren. Andere Beispiele sind die Modalanalyse als eine Anwendung aus der Mechanik oder aus der magnetischen Kernresonanz (NMR). Im vorliegenden Fall erfolgt die Anregung nicht systematisch, sondern last- und materialabhängig und zeitlich nicht determiniert. Für die Anwendung aller Fenstertypen

gilt, dass der Startzeitpunkt für die Auswahl des Fensters sowie der Fensterlänge das Ergebnis beeinflussen. Bei kompletten Zeit-Frequenz-Darstellungen ist dieser Start-Zeitpunkt natürlich zufällig. In der folgenden Abbildung werden verschiedene Fenster synchron zu einem charakteristischen Mikro-Rissvorgang verglichen.

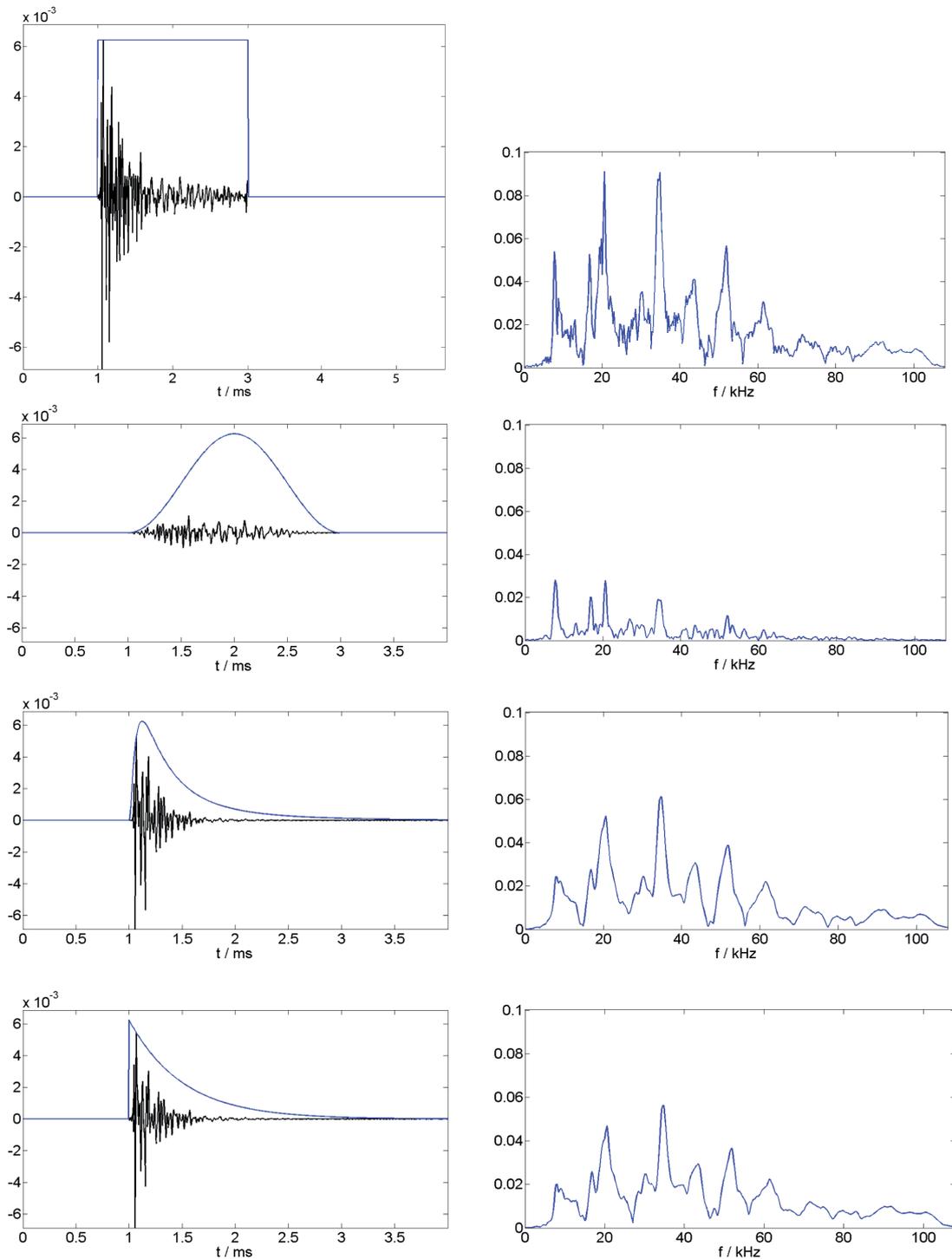


Abb. 2.4.b: Wirkung unterschiedlicher Fensterfunktionen auf die jeweiligen spektralen Komponenten des betreffenden Zeitausschnitts. In der Abbildung wurden jeweils das gleiche Ereignis bewertet. (Von oben nach unten: Rechteck-Fenster, Hanning-Fenster, Log-Gauss-Fenster, Exponential-Window-Fenster)

Auf die Bestimmung der eigentlichen Ereigniseinsätze hat die Auswahl der Fensterung aber wenig Einfluss. Für die Optimierung von Zeit-Frequenz-Bewertungen kann der Einsatz von asymmetrischen Fenstern teilweise Vorteile mit sich bringen. Für die praktischen Auswertungen der Arbeit wurden deshalb die Fenstertypen „Exponential-Window“ und „Log-Gaussian-Window“ eingeführt. Für Letzteres finden sich in der Literatur keine Vorbilder.

Aufbauend auf den Ausführungen zur FFT bietet sich mit der sog. Kurzzeit-Fourier-Transformation (englisch: Short-Time-Fourier-Transform, kurz STFT) eine Methode der Fourier-Analyse, mit welcher sich speziell die zeitlichen Änderungen im Frequenzspektrum bzw. Vergleiche von Spektren kurzer Zeitabschnitte darstellen lassen. Im Gegensatz zur Fourier-Transformation, die keine Rückschlüsse auf das zeitliche Verhalten des Spektrums zulässt, ist die STFT gerade für transiente, also nichtstationäre Signale, wie sie beim Bruch oder Risswachstum auftreten geeignet, weil sich gerade dort die Frequenzeigenschaften in kurzen Zeitabschnitten stark verändern. Zur Transformation wird das Zeitsignal mit Hilfe einer Fensterfunktion in einzelne Zeitabschnitte unterteilt, welche in jeweils einzelne Spektralbereiche überführt werden. Die zeitliche Aneinanderreihung der so gewonnenen Spektralbereiche stellt die STFT dar. Dadurch ist es möglich die Dynamik von Prozessen bei gleichzeitiger Beschreibung der spektralen Inhalte in einem gewissen Umfang zu erfassen.

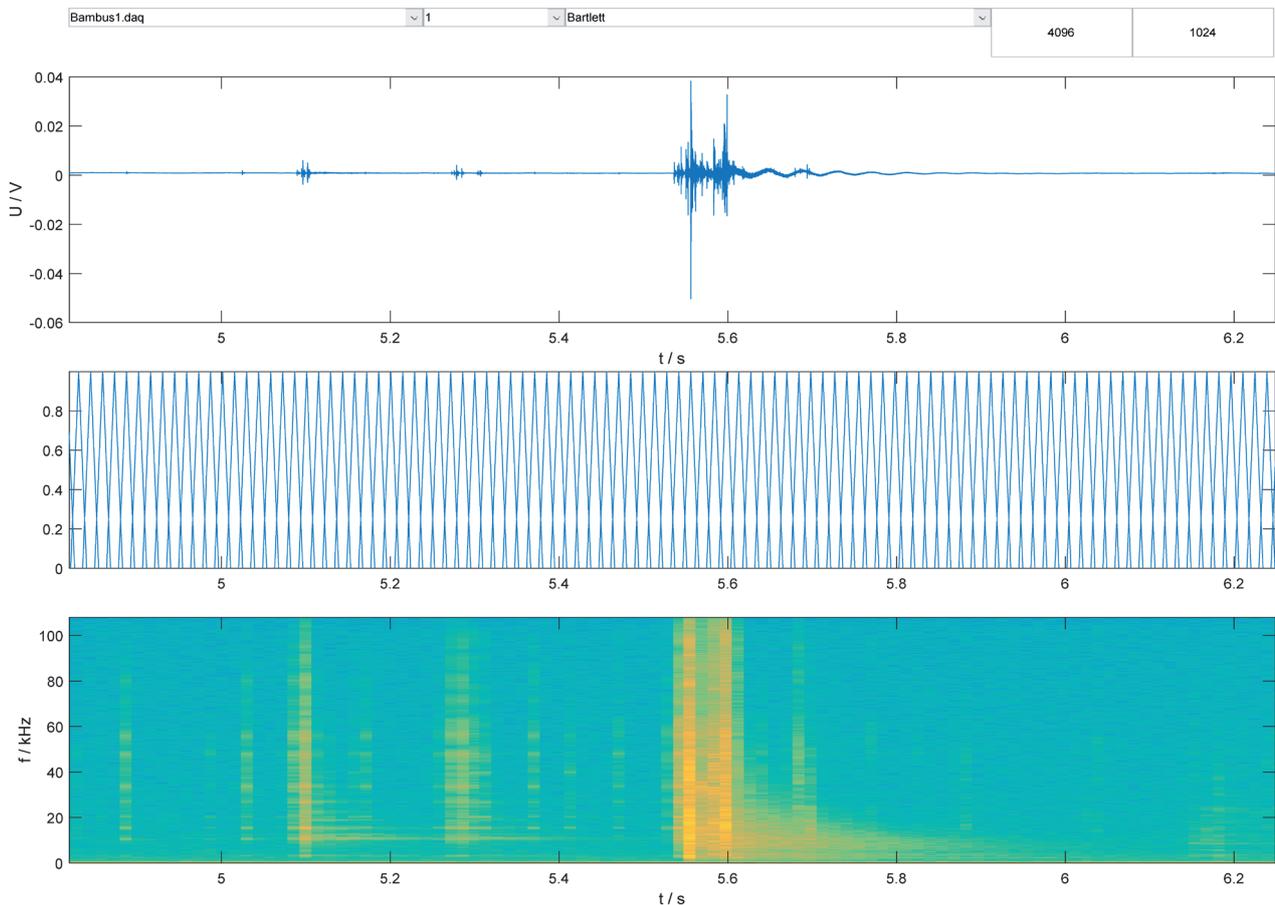


Abb. 2.4.c: exemplarische Darstellung der zeitsignalbasierten Auswertung über entsprechende Skripte. Im Beispiel werden die im Zeitsignal auftretenden Bruchvorgänge bei Bambus (oben) mittels Bartlett-Fensterung (Mitte) im entsprechenden Spektrogramm visualisiert (unten)

Da die Berechnungen mit veränderbaren Einstellungen vorgenommen werden können, ist es oft gängige Methode, verschiedene Szenarien im Post-Processing zu betrachten. Dies kann auch automatisiert in Form von Skripten erfolgen und ist so durchaus systematisch nutzbar. Allerdings muss für solche Prozeduren das komplette Zeitsignal aufgezeichnet werden. Dies ist insbesondere für hohe Abtastraten und lange Aufzeichnungszeiten auch mit leistungsstarker Rechentechnik nicht immer problemlos beherrschbar.

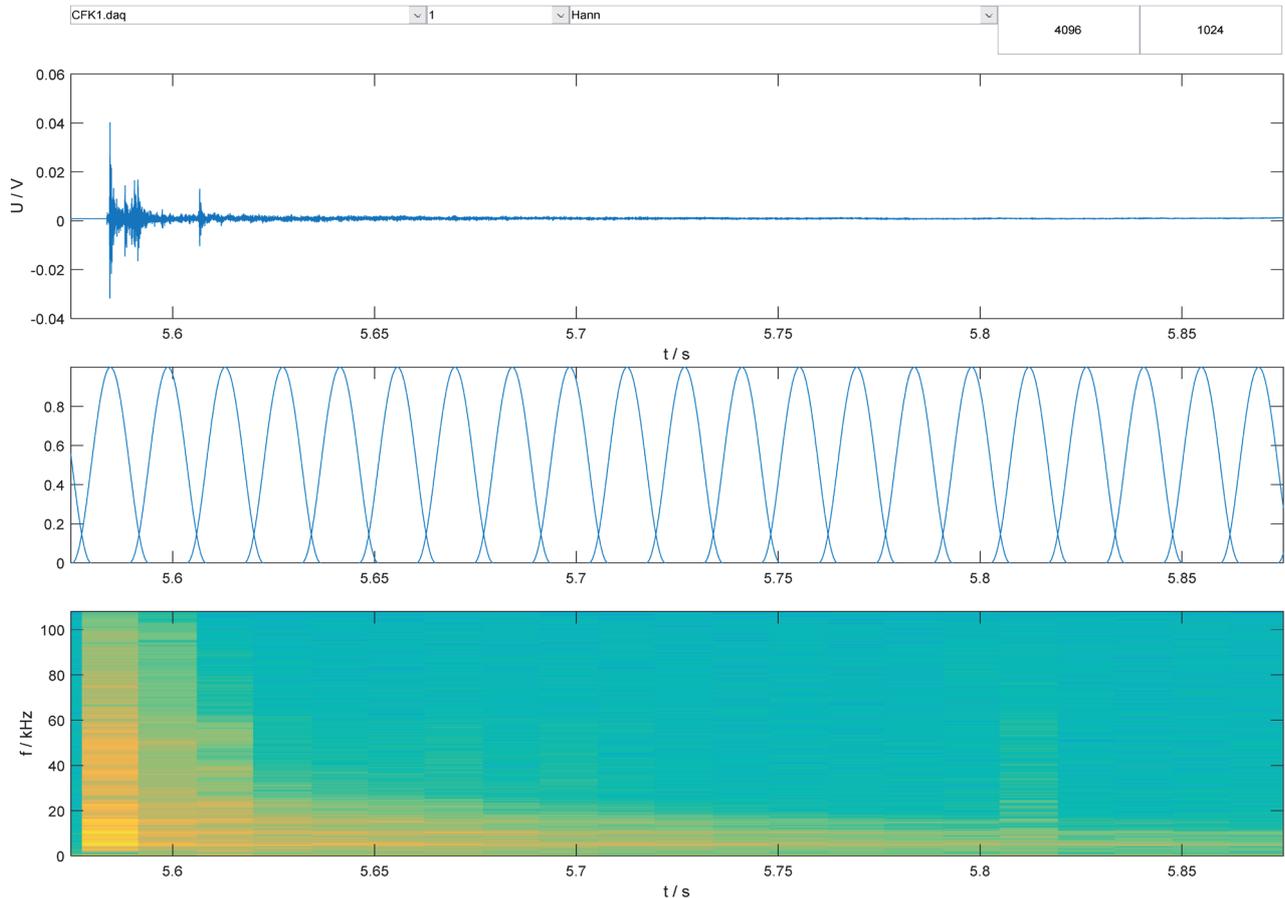


Abb. 2.4.d: Anwendung des gleichen Skripts, wie in Abb. 2.4.c zur Analyse ähnlicher Bruchvorgänge im CFK-Werkstoff unter Verwendung einer Hann-Fensterfunktion

Um für gewählte Zeitabschnitte ein Spektrum definieren zu können, wird auf der Zeitachse ein bestimmter Zeitabschnitt ausgewählt. Ein solcher Ausschnitt wird wie ein Fenster über die Zeitachse geschoben. Nur für diesen Ausschnitt sind die Messwerte ungleich Null. In der digitalisierten diskreten Form der STFT entspricht die Fensterlänge der Länge eines Datensatzes, wie beispielsweise 1k, 2k Länge usw. So stehen für repräsentative Punkte auf der Zeitachse Spektren zur Verfügung, die geeignet in Form von Wasserfalldiagrammen oder Spektrogrammen dargestellt werden können.

Diese Darstellungen erlauben es weitere Parameter zur Auswertung zu definieren. Ein Beispiel ist die Verfolgung von spektralen Maxima während der Zeit eines Bruch- oder Rissvorgangs.

$$WFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot g * (t - \tau) \exp^{-i\omega t} dt \quad (8)$$

In der diskreten Form lässt sich die Fensterungstechnik angepasst für die Problemstellungen der Arbeit wie folgt beschreiben:

$$WFT(\tau, f) = \frac{1}{N} \sum_{\frac{-N}{2}}^{\frac{N}{2}} x(t_n) \cdot g * (t_n - k\tau_0) \exp^{-i\omega_n t_n} dt \quad (9)$$

Es sei darauf hingewiesen, dass die Wahl des Fensters bei der STFT der Datencharakteristik angepasst werden sollte. Wenn möglich, wurde die Wahl der Fensterbreite bzw. der Länge des STFT -Datensatzes in der Arbeit optimal an die gewünschte Auflösung angepasst.

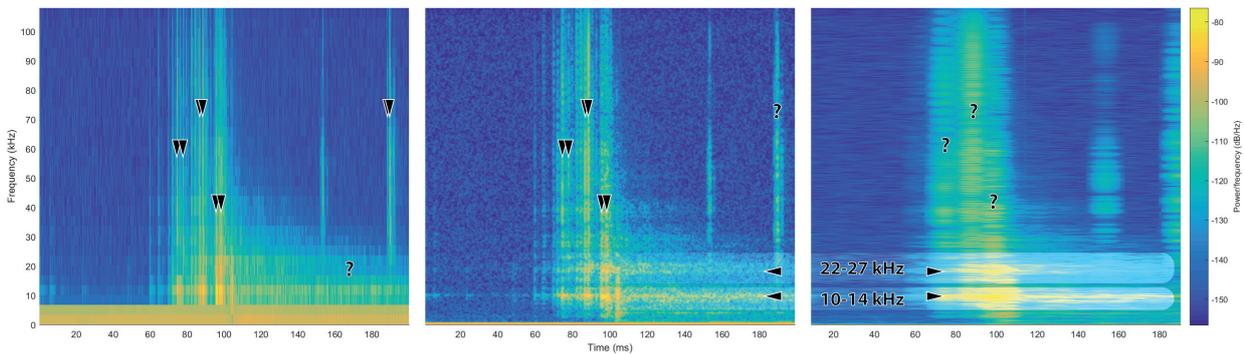


Abb. 2.4.e: Spektrogramme in verschiedenen Zeit-Frequenzauflösungen am Beispiel einer CFK-Deformation (Ausschnitt der plastoeleastischen Phase) – links: hohe Zeitauflösung (gute Visualisierung der Einzelereignisse); rechts: hohe Frequenzauflösung (ermöglicht Erkennung der typischen Resonanzfrequenzen (siehe auch Abb. 2.3.j)); mittig: optimierte Darstellung, um beide Aspekte auswertbar zu visualisieren

2.4.2 Transiente Signale

Wie bereits in 2.4 einleitend beschrieben können neben der relativ komfortablen Auswertung von kontinuierlichen Signalen gerade transiente Signalanteile, wie sie bei Bruch und Rissereignissen in Materialien und Werkstoffen auftreten aus methodischen Gründen meist nur mit vergleichsweise geringerer Auflösung einer Bewertung unterzogen werden. Das akustische Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung, welches unter dem Begriff „Akustische Emission“ bereits erwähnt wurde widerspiegelt den prinzipiellen Zugang zur Behandlung transienter und oft sehr schneller Signale. Die dabei verwendeten Parameter oder „Hits“, welche als Repräsentanz der transienten Vorgänge ausgewertet werden, gehen dabei auf sog. „Bursts“ zurück, welche statistisch durch entsprechend geeignete Merkmalsextraktionen ausgewertet werden (siehe Kap. 2.2, Abb. 2.2.a und 2.2.b). Neben der Maximalamplitude werden auch Marker wie Ankunfts- und Anstiegszeit, Signaldauer oder Energie- und RMS-Werte quantifiziert und ausgewertet. Die individuelle Struktur der Signale spielt eine untergeordnete Rolle. Die meisten Anwendungen der Schallemissionsanalyse beziehen sich dabei auf Vorgänge im hochfrequenten Bereich. Übliche Prüffrequenzen bewegen sich etwa zwischen 20 kHz bis hin zu einigen MHz. Zur praktischen Realisierung dieser Verfahren gibt es auf dem Markt ausgefeilte und hochwertige Systeme (siehe [VALL03], oder Fa. Physical Acoustics). Diese Systeme werden oft mit vielen Sensoren bzw. Messkanälen verwendet. Der Grund dafür liegt in der Applikationsaufgabe, neben der eigentlichen Fehlerdetektion auch die Ortung der Schäden zu übernehmen. Unter Last auftretende Bruch- und Rissvorgänge in technischen Systemen stellen eine Unzahl mikroskopischer akustischer Quellen dar. Reibung tritt ebenfalls auf und kommt somit auch als Quelle für akustische Emissionen infrage.

Die akustischen Eigenschaften ähneln sich in der Regel, so dass sich eine Differenzierung der Quellen nach der „Art“ des Signals sich oft gar nicht lohnen würde, nicht zuletzt weil die Messtechnik vom Speicherbedarf auch überfordert wäre. Die Auslegung und die entsprechende Normung haben sich bei diesen Verfahren daher, auch historisch begründet, auf das Zählen von akustischen Ereignissen beschränkt. Die prinzipielle Signalform wurde bereits in Abschnitt 2.2 dieser Arbeit beschrieben. Jedes Ereignis kann mit dem gleichen Set an Parametern beschrieben werden. Gewisse Variationen bei der automatisierbaren Berechnung sind möglich. Wichtiger als die Signalform sind dabei auch die Laufzeiten der Signale vom Ereignisort zum Sensor. Aufgrund der Vielzahl der Sensoren, die z. B. bei der Prüfung von großen Gastanks verwendet werden, liefern diese Methoden trotz der relativ schlechten Signalkonditionierung gute Aussagen über den Ort der Schallquellen. Diese Methoden sind auch stark statistisch geprägt. Interessanterweise hat der parametergeprägte Zugang zur Datenanalyse bezüglich des Aussagewertes eine gewisse Verwandtschaft mit der Auswahl bestimmter Wavelets. So können gleichartige Ereignisse durch die Wahl eines geeigneten Wavelets leichter in Datensätzen von anderen Signalen (oder auch Störungen) differenziert werden [BAD2006]. Prüfkörper aus verschiedenen Materialien, die sich auch in ihren elementaren akustischen Prozessen unterscheiden, sollten deshalb mit angepassten Funktionen bewertet werden. Zunehmend werden waveletbasierte Bewertungen auch für die kommerziell erhältlichen Systeme verfügbar gemacht, was neben den methodischen Fortschritten auch dadurch begründet ist, dass die Rechenleistung der Mess- und Auswertesysteme drastisch gestiegen ist.

Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass die Vergleichbarkeit, welche bereits in Kap. 2.2 am konkreten Beispiel der referenziellen Material- und Werkstoffanalyse mittel AE bearbeitet wurde, die aufgezeigten parametergeprägten Limitierungen hinsichtlich der Bewertung energetischer Daten hat. Hier wäre es im nächsten Schritt zielführend einen Vergleich mit den Daten aus den „direkten“ akustischen Messungen und denen aus der Fourier-Transformation, die permanent aufgenommen wurden, durchzuführen. Die Vergleichbarkeit der Bewertung der „gleichen Physik“ mit unterschiedlicher Methodik wäre ein vielversprechendes Untersuchungsvorhaben im Sinne des methodischen Baukastens für die werkstoff- und designakustische Analyse.

Die Bewertung eines Schallereignisses erfolgt entweder durch Zählen der Ereignisse oder durch Zählen und gewisse energetische Zuordnungen dieser Ereignisse. Am einfachsten erfolgt dies durch Integration der gemessenen Spannung über der Dauer des Ereignisses.

$$E_{AcEm} = \int_{t_0}^{t_D} w(t) dt \quad (10)$$

E_{AcEm} ist die Gesamtenergie des Events, w bezeichnet die Energiedichte, t_0 den Beginn des Ereignisses, t_D das Ende des Ereignisses. Die Energieeinteilung kann dann in Klassen erfolgen. Ebenso kann eine gewisse Frequenzabhängigkeit berücksichtigt werden, indem bei den Untersuchungen Sensorik mit unterschiedlichen aktiven Frequenzbereichen verwendet wird (siehe auch [SCHO10]).

Ebenso gibt es Ansätze die Hochfrequenzdaten auch direkt zu verwenden. Damit würden sich die AE-Verfahren, zumindest von der Signalverarbeitungsseite her den oben beschriebenen Zeit-Frequenz-Methoden nähern, wie sie in der Akustik verwendet werden. Für die Arbeit wurden beide methodische Zugänge verwendet. Die Nutzung des kompletten Zeitsignals erfordert Techniken und Algorithmen der real-time-Mustererkennung um praktikabel zu sein. Kombiniert mit geeigneten Wavelet-Kernels könnte beispielsweise die Wavelet-Transformation effektiv eingesetzt werden, auf welche im Folgetext noch näher eingegangen wird. Diese Methode setzt allerdings voraus, dass die Mechanismen bekannt sind bzw. unterschieden werden können, da mit der Auswahl des Kernels das numerische Ergebnis beeinflusst wird.

Ein interessanter Vergleich hinsichtlich Potenzial und Leistungsfähigkeit der AE-Verfahren sind die Bewertungsverfahren der Erdbebenvorhersage und -beobachtung. Prinzipiell unterscheiden sich diese von der beschriebenen AE-Methode nur bezüglich der Dimensionen, Frequenzen und Laufzeiten. Da die Ereignisse aber dort seltener sind und wesentliche Information in der Signalform enthalten ist, wird natürlich permanent der gesamte Signalverlauf an jeder Erdbebenstation aufgezeichnet. Da sich die Rechen- und Speicherperformance

in den letzten Jahren dramatisch entwickelt haben, gab es erste erfolgversprechende Anstrengungen, die akustischen Daten bei diesem Schallemissionsverfahren komplett zu nutzen.

Umfangreiche Untersuchungen sind von Sause an Kompositmaterialien wie CFK mit den Methoden der akustischen Emission durchgeführt worden [SAUSE10]. Dabei zeigt sich, dass die Modifizierung der Methode hin zur Nutzung der kompletten Zeit-Frequenz-Information (beispielsweise durch Wavelets, Wigner-Ville-Darstellungen u.a.) eine Beschreibung auf sehr kurzer Zeitskala und damit mikroskopischer Ebene möglich ist. Bei den höheren Frequenzen treten auch verschiedene Wellenarten mit den entsprechenden Dispersionsrelationen auf. Allerdings ist diese Untersuchung auch an Sensoren gebunden, die für Erfassung der geringeren Frequenzen nicht mehr geeignet sind.

Die Untersuchungen im Rahmen der eigenen Arbeiten haben ebenso das Ziel, materialtechnisch verursachte Varianzen im einzelnen Signal zu beschreiben. Dafür wurde in Kauf genommen, dass für die Messtechnik nur Abstraten und Bit-Tiefen zur Verfügung standen, die mit der Anbindung der Hardwaretreiber an die MATLAB-Module kompatibel waren. Für einige ausgewählte Messungen waren zumindest Messungen mit einer Bandbreite von 1 MHz (Abtastung 2 MHz) realisierbar. Damit ist eine gewisse Überlappung der Methodik von technischer Akustik und Schallemission mit Hilfe der gleichen Messdaten gegeben.

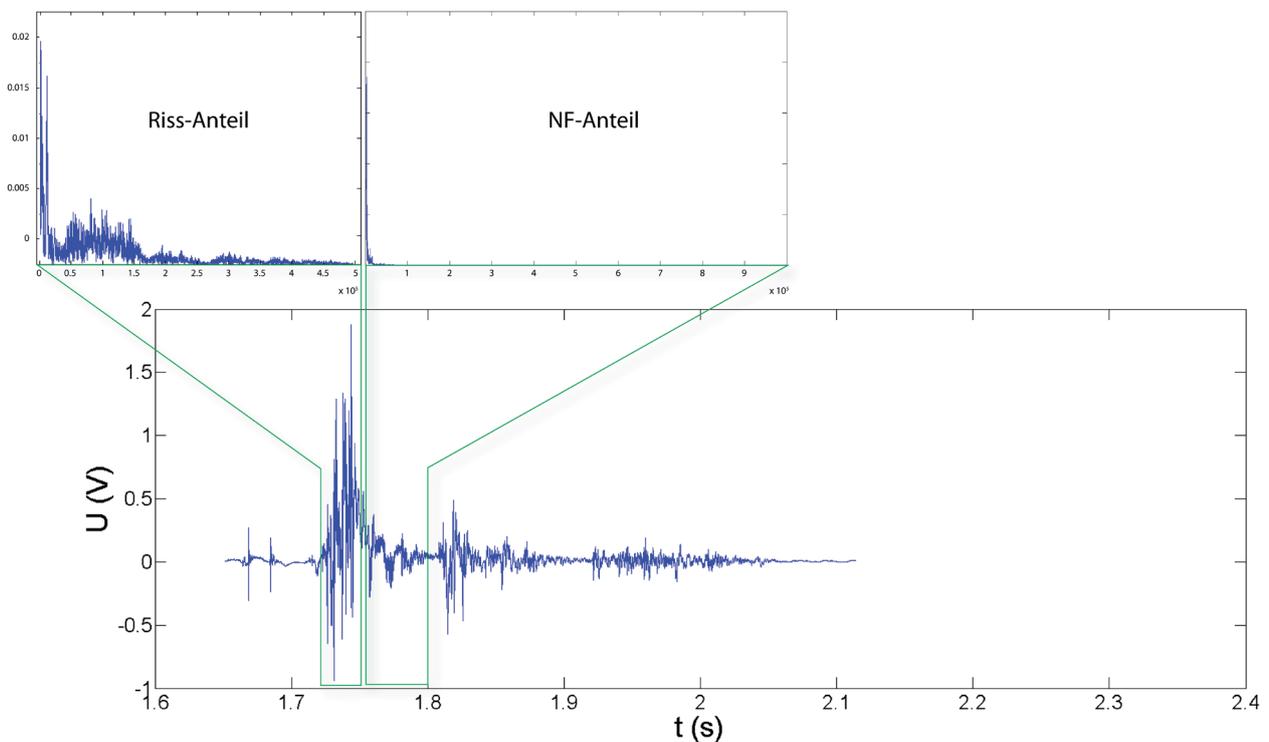


Abb. 2.4.f: beispielhafte Messung mittels Körperschallsensoren mit zeitlicher Zuordnung von Riss- und Niederfrequenzanteilen

In Abb. 2.4.f ist ein repräsentativer Ausschnitt aus einem Belastungsexperiment an einer Bambus-Probe dargestellt. Bei den Experimenten waren die Proben jeweils mit zwei Körperschallsensoren bestückt. Der Abstand der Sensoren betrug ca. 10 cm. Die prognostizierte Bruchzone lag in der Mitte. Die Frequenzverteilung bei der Belastung (Einzelbrüche, Vorbruchbereich, Bruch) war unspezifisch. Dargestellt ist die Verteilung bis 500 kHz. Höhere Frequenzen traten nicht auf. Es wurde weiterhin untersucht, ob die Verteilung der Elementarereignisse auch räumlich über den Bruchbereich (ca. 2 bis 3 cm Breite) nachweisbar ist. Dies konnte allerdings bei den verwendeten Frequenzen nicht nachgewiesen werden. Unter der Annahme einer Schallgeschwindigkeit von

ca. $5 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$ in Faserlängsrichtung würde auch bei den hohen Abtastraten eine Ortsauflösung unter 1 cm nicht realistisch sein. Dies wurde durch die Korrelation der Signale der beiden Messkanäle bestätigt.

Ein möglicher Ausweg wäre hier die Verwendung eines geeigneten (optischen) Luftschallmikrofons [XAR2021]. Allerdings wären hier Aufwand, Nutzen und Kosten in einem extrem ungünstigen Verhältnis. Da die Messungen bei den höheren Frequenzen zu unspezifisch für die verschiedenen Materialien waren, wurden diese Ergebnisse nicht weiter in die Arbeit eingebunden.

Abschließend sei zur Anwendung der Schallemissionsanalyse noch ergänzt, dass dabei dem kleinstmöglichen prinzipiell auflösbarem akustischen Ereignis die parametergestützte Registrierung als sogenannter „Hit“ zugeordnet wird. Es existieren oft überlagerte physikalische Ereignisse, welche lediglich zu dicht liegen, um diese verfahrenstechnisch zu trennen. Zähltechniken versagen dann an dieser Stelle. Andererseits liefern in solchen Situationen auch Vibrationsmethoden nur begrenzt verwertbare Information, wenn nur die mittleren Spektren bewertet werden können. Reibung kann ebenfalls für solche akustischen Emissionen verantwortlich sein. Gerade bei den in der Arbeit untersuchten Kompositwerkstoffen tritt dieses Phänomen verstärkt dort auf, wo Reibungsvorgänge durch Abgleiten der Fasern in der Matrix entstehen und die Faserbrüche überlagern. Obwohl die Unterscheidung zwischen Reibung und Mikrobruch schwierig ist, wurden in der Arbeit einige Experimente in diese Richtung integriert.

Diese belegen, dass die Optimierung der Datenauswertung durch die zielführende und an die Problemstellung angepasste Adaption der gewählten Parameter beeinflussbar ist. Zu beachten ist, dass es bei ungünstiger Wahl zu deutlichen Abweichungen zwischen formal gleichen Methoden kommen könnte.

Einen weiteren alternativen Zugang zur transienten Signalanalyse bietet die bereits erwähnte Wavelet-Transformation.

Ausgehend von dem bereits beschriebenen Prinzip der Heisenbergschen Unschärferelation nach welcher signaltechnisch bezogen Zeit- und Frequenzauflösung nicht gleichzeitig exakt bestimmbar sind, wurde mit der Einführung des Wavelet-Konzepts ein adaptiver Zugang zur Zeit-Frequenz-Beschreibung vorgeschlagen, der bestimmte Nachteile der Fourier-Transformation zu umgehen scheint (siehe [BÄN2005]). Mit dem Begriff Wavelet werden dabei die einer kontinuierlichen oder diskreten Wavelet-Transformation zugrundeliegenden Basisfunktionen bezeichnet, mit welcher das zu analysierende Signal einer Ähnlichkeitsuntersuchung unterzogen wird. Der Nachteil der festen Fensterung des Zeitsignals und der dadurch vorher festgelegten Auflösung wird durch die Wavelet-Transformation umgangen. Ohne an dieser Stelle noch tiefgreifender auf die Hintergründe der Wavelet-Theorie und ihrer praktischen Anwendung einzugehen, scheint die gegenseitige Abhängigkeit der Zeit- und Frequenzauflösung durch die Skalierbarkeit und Verschiebbarkeit durch diese Verfahren so besser auf das Messsignal anpassbar zu sein. Insbesondere für die bereits angeführten Bruch- und Riss-Signale, für welche die Theorie der Fourier-Transformation an die Grenzen gelangt, hat sich der Einsatz von Signalverarbeitungsalgorithmen auf Basis von Wavelets als vorteilhaft erwiesen. Diese Signale mit stark transientem Charakter lassen sich oft geeignet mit einer Wavelet-Transformation beschreiben. Dies liegt darin begründet, dass bei einer Fourier-Transformation lediglich ein Bezug auf die oszillierende Basisfunktionen ($\exp(-i\omega t)$) genommen werden kann, wohingegen bei der Wavelet-Transformation im Prinzip unendlich viele Basisfunktionen verwendet werden, um die Zeitfunktion in den Bildraum zu überführen. Das bedeutet aber auch, dass das Ergebnis nicht eindeutig ist und von der Wahl der Basisfunktion abhängt. Denn im Gegensatz zur Fourier-Transformation besitzen viele Wavelets nicht nur eine relativ gute Lokalität im Frequenzspektrum, sondern auch im Zeitbereich. Diese Lokalität ist dabei im Sinne kleiner Streuung zu verstehen, welche im Ermessensspielraum der Analyse ggf. vernachlässigt werden können. Die kontinuierliche Wavelet-Transformation ist gegeben durch:

$$Wf(a, b) := \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (11)$$

Die Variable a steht für die Eigenschaft der Skalierung, die Variable b steht für einen Parameter, der die Verschiebung des Wavelets beeinflusst. Das bedeutet, dass für langsame Vorgänge ein großer Wert von a ($a \gg 1$) erforderlich ist und für schnelle Vorgänge ein kleiner Wert von a ($a \ll 1$).

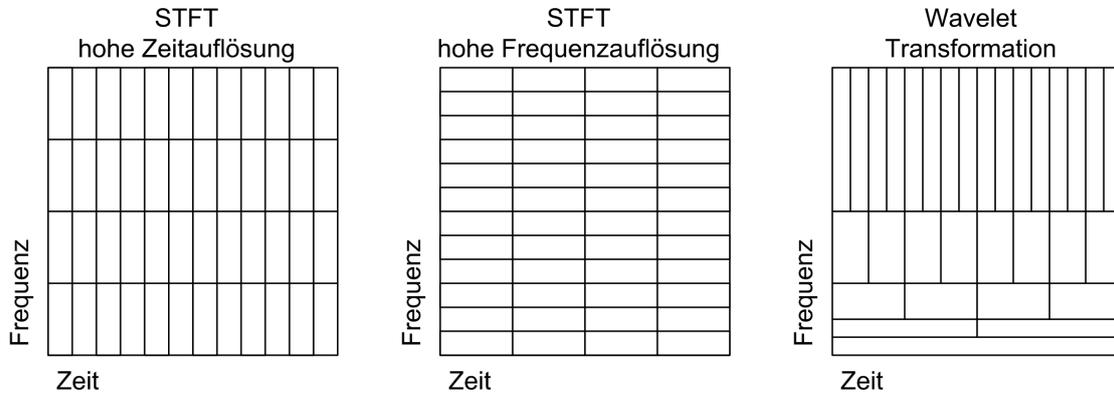


Abb. 2.4.g: prinzipielle Gegenüberstellung der Zeit-Frequenz-Beschreibungen mittels STFT und Wavelet-Transformation (Die links und mittig beschriebenen Auflösungsvarianten sind in Abb. 2.4.e experimentell untersetzt bzw. visualisiert)

Die gezeigten Abbildungen demonstrieren bereits anschaulich den in Kap. II.3 des Geschichtsteils geschilderten Anspruch leistungsfähiger deskriptiver Visualisierungssysteme, akustische Phänomene oder auch Klangereignisse ähnlich der seit antiker Zeit existierenden Notenschrift zu visualisieren, was material- und werkstoffbezogen einen Hauptanspruch dieser Arbeit darstellt.

Zusammenfassend lassen sich die beschriebenen Signalanalyseverfahren aufgrund der geschilderten Spezifika mit Sicht auf die mess- und auswertetechnischen Anforderungen der Arbeit relativ zueinander bewerten. Die Fourier-Analyse liefert eine globale Aussage über den für die Transformation ausgewählten Datensatz. Mit der davon abgeleiteten Kurzzeit-Fourier-Transformation kann dies, wie beschrieben, teilweise umgangen werden, um bei unterschiedlichen Frequenzen arbeiten zu können. Dies wird, wie beschrieben dann erforderlich, wenn transiente hochfrequente und kontinuierliche niederfrequente Anteile simultan im Signal auftreten. Mit der von Morlet und Großmann vorgeschlagenen Wavelet-Analyse sollten verschiedene mit der FFT und STFT verbundene Probleme gelöst werden können. So sollte es mit Hilfe der Wavelet-Transformation möglich sein verschiedene Anregungsmechanismen, wie Bruch oder Reibung differenzieren zu können. Der wesentliche Unterschied dafür beruht auf der Anwendung verschiedener Basisfunktionen im Integralkern, bzw. in der Summation bei den digitalen Umsetzungen. Insbesondere bei transienten Signalen unterschiedlicher Länge, die eine gewisse skalierbare Ähnlichkeit aufweisen, lässt sich die Methode erfolgreich anwenden. Allerdings ist die Methode kein Ersatz für die Verfahren der Fourier-Transformation. In diesem Sinne wird die Wavelet-Transformation lediglich komplementär und ergänzend eingesetzt. Im Sinne einer möglichen Modellierung und Synthetisierung akustischer Werkstoffparameter unterschiedlicher Materialien im Gestaltungsprozess, fand die Methode weniger Verwendung, da sie aufgrund der Ähnlichkeit der Signaltypen zu wenig differenzierte Aussagen lieferte, was in der Ähnlichkeit der Prozesse begründet ist.

Auf die Wavelet-Grundlagen konnte hier nur sehr kurz und unvollständig eingegangen werden. Für weiterführende Betrachtungen wird auf die Literatur verwiesen. Eine ausführliche Einführung der Wavelet-Analyse und auf Probleme der Technischen Akustik und Diagnose ist in der Dissertation von D. Bader beschrieben [BAD2006]. Die dortigen Vorschläge zur praktischen Anwendung, insbesondere zur Auswahl der Basisfunktionen lassen sich zum Großteil auf die Materialakustik der Arbeit übertragen. Zur Auswahl des Wavelet-Typs wurde dort eine automatisierte Optimierung eingeführt, die letztlich zum Erfolg führte. Allerdings erscheint der methodische und rechentechnische Aufwand hoch und die Zielrichtung war unterschiedlich. Trotzdem bietet

sich hier ein perspektivischer Ansatz für weiterführende Arbeiten. Aufgrund der Differenzen der Verfahren im Aussagewert bleiben die Einsatzbereiche eher komplementär. Es wird erwartet, dass gerade die Wavelet-Verfahren insbesondere bei der direkten Extraktion von Signalmustern – beispielsweise in Echtzeit für den Einsatz im (automatisierten) Bauteilmonitoring – noch ein großes Potenzial für praktische Anwendungen aufweisen. Allerdings konnten im Rahmen der Arbeit lediglich erste numerische Experimente realisiert werden.

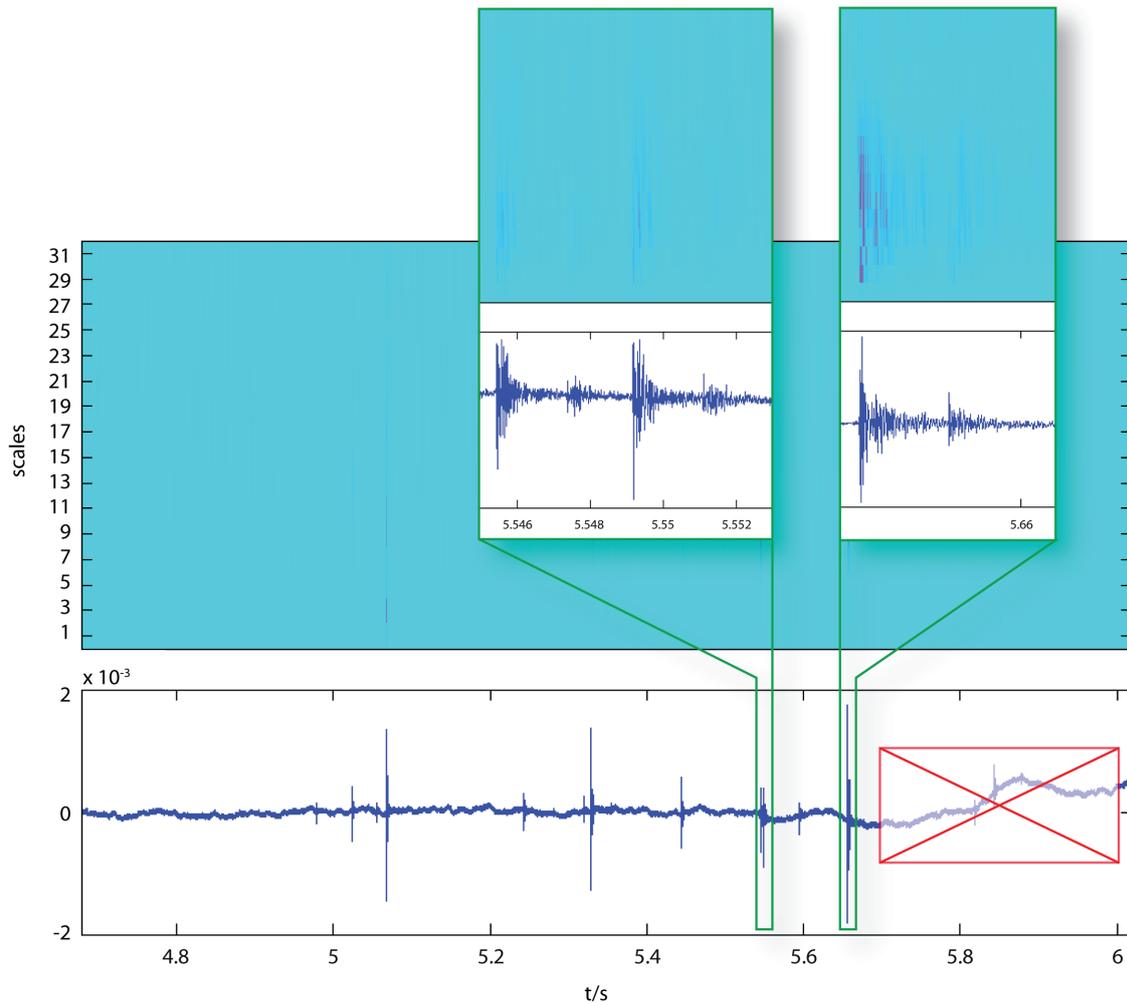


Abb. 2.4.b: Wavelet-Analyse eines Ausschnitts aus einem Belastungsversuch an einer Probe aus Kiefer. Hier wurde ein Daubechie 5 Motherwavelet verwendet, welches eine gute zeitliche Auflösung bei gleichzeitig guter „Reaktion“ auf die Signalform liefert. Zwei Mikroereignisse sind herausgezoomt um die Sensitivität auf den Einsatzzeitpunkt zu demonstrieren

Exemplarisch wurde an einigen Materialien bzw. Proben auch eine waveletbasierte Datenanalyse vorgenommen. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn gut unterscheidbare unterschiedliche Prozesse in den Materialien auftreten. Bei der Wahl des geeigneten Wavelets kann das Ergebnis in Form von Wavelet-Koeffizienten ein starkes Mittel für eine Klassifikation der Prozesse und damit für die angestrebte Werkstoffklassifikation der Arbeit sein. Unterschiedliche Wavelet-Mother-Funktionen erlauben es so, für spezifische Signaltypen mit einer charakteristischen Struktur eine effektive Bewertung dieser Signale zu ermöglichen. Insbesondere wenn die Signale verrauscht sind oder verschiedene Arten von Signalmustern vorliegen, können auf dieser Basis effektiv Signalanteile betont oder sogar klassifiziert werden.

Bei Signalen ohne diese charakteristischen Eigenschaften ist die Auswahl eines bestimmten Mother-Wavelets oft nicht optimal. Es wurden deshalb verschiedene Wavelet-Typen getestet. Ziel der Bewertungen war es nicht, die zeitlichen Positionen der Mikroereignisse zu finden – dies kann mit traditionellen Signalverfahren ebenso effektiv realisiert werden – sondern eventuell Unterschiede in den Elementarprozessen zu manifestieren. Obwohl es in der spektralen Charakteristik der Elementarprozesse Unterschiede im Signalverlauf gibt, die den Materialeigenschaften zuzuordnen sind, war eine spezielle Auswahl von Wavelet-Typen zu einem Material nicht zielführend. Ebenso war bei den Messfrequenzen keine Dispersion nachweisbar, wie es von Sause bei höheren Frequenzen für CFK demonstriert wurde [SAUSE10]. Für alle Materialien wurden die besten Ergebnisse erreicht, wenn ein Mother-Wavelet der Daubechies-Familie eingesetzt wurde (db5, Wavelet-Toolbox von TheMathworks). Möglicherweise wäre es sinnvoll, die Wavelet-Technologie dafür einzusetzen, um Störungen im Signalverlauf, die beim Experimentieren unvermeidbar entstehen, zu eliminieren. Dies ist in Abb. 2.4.h markiert, wo gegen Ende des Experiments (vollständiger Bruch) die Probe nicht mehr korrekt in der Aufnahme gehalten werden kann. Eine ähnliche Vorgehensweise in einem ganz anderen Bereich lässt sich bei Bader finden, wo „nicht verwertbare“ Vibrationssignale bei Untersuchungen in fahrenden Kraftfahrzeugen eingesetzt wurden [BAD2006].

2.4.3 Weitere Verfahren der Signalanalyse

Eine weitere wichtige und leistungsfähige Methode für Datenbewertungen, bei denen die Signaltypen zu Beginn unbekannt sind, ist die Korrelation von Signalen. Gerade für akustische Bewertungen bieten sich häufig derartige Analysen an. Durch das Korrelationsverfahren werden prinzipiell mehrere unterschiedliche Signale miteinander verglichen, um Gemeinsamkeiten zu finden. Darüber hinaus kann ein einzelnes Signal aber auch durch die sog. Autokorrelation mit sich selbst verglichen werden. Diese Verfahren sind neben Ortungs- und Laufzeitanalysen extrem hilfreich, wenn anfänglich noch nicht klar ist, welche spezifischen Methoden bei der Signalauswertung zielführend sind. Ein wichtiges Argument für die Anwendung der Korrelation in dieser Arbeit besteht darin, dass in den Signalen, welche bei den Beanspruchungen verschiedener Materialien und Werkstoffe auftreten, durchaus auch verschiedene Signaltypen vorkommen können, die mit Korrelationsverfahren durchaus effektiv identifizierbar sind.

Die Korrelationsverfahren lassen sich darüber hinaus sehr gut mit den spektralen Methoden kombinieren. Ebenso lassen sich die vorab beschriebenen Wavelet-bezogenen Berechnungen mit Korrelationsdaten durchführen. Interessant hierbei sind die Überlegungen zu kommutativen oder assoziativen Anwendungen (siehe hierzu auch [BAD2006]).

Mit den Daten der im folgenden Kapitel der Arbeit beschriebenen Experimente wurden sowohl Autokorrelations- als auch Kreuzkorrelationsdaten nach den angegebenen Berechnungsvorschriften erzeugt. Insbesondere bei Vorgängen mit ähnlichen lokalen Ursachen wurde dabei erwartet, dass diese mit Hilfe der Korrelation diverse Mechanismen unterschieden werden können. Die Autokorrelation betrifft dabei immer die Messdaten eines Messkanals, die Kreuzkorrelationsdaten werden hingegen von verschiedenen platzierten Sensoren gewonnen. In der Arbeit betraf dies nur identische Sensoren, die unterschiedlich platziert waren. Auf Korrelationen zwischen unterschiedlichen Sensoren wurde aufgrund fehlender experimenteller Möglichkeiten verzichtet, obwohl dies perspektivisch für den Bezug zwischen Luft- und Körperschall verursachende Ereignisse durchaus sinnvoll sein kann.

$$r_{xx} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot x(t + \tau) dt \qquad r_{xy} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot y(t + \tau) dt \qquad (12)$$

Autokorrelation

Kreuzkorrelation

Beispielhaft sind zur Veranschaulichung der Leistungsfähigkeit der beiden Korrelationsverfahren ausgewählte Visualisierungsergebnisse dokumentiert.

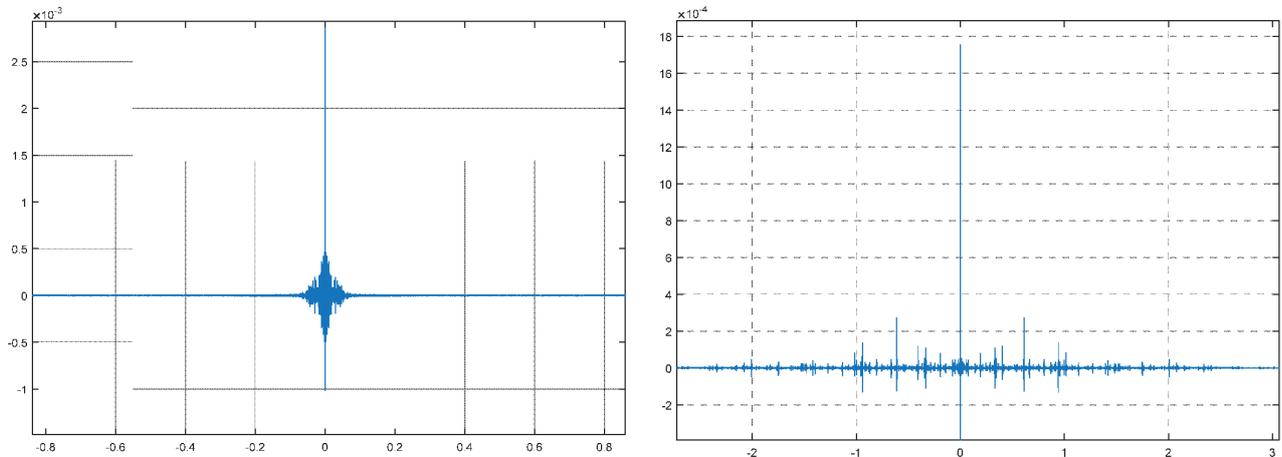


Abb. 2.4.i: Autokorrelationen von WPC und Bambus als exemplarische Gegenüberstellung; Im Beispiel funktioniert die Korrelation für Bambus besser, da die Selbstähnlichkeit der Faserbrüche dominiert (hier nur beispielhaft – im Kap. 3 ausführlicher)

Die Sensoren betreffend ist an dieser Stelle noch auf das jeweils spezifische Übertragungsverhalten einzugehen, da die gemessenen Signale von verschiedenen Einflüssen bestimmt werden. Dort sind bei der Interpretation der Ergebnisse neben der Anregungsart auch die Ankopplung der Sensoren oder die Eigenschaften des physikalischen Übertragungsweges zu berücksichtigen. Aufgrund der nutzungsnahen Situationen bei den durchgeführten Messungen dieser Arbeit, sind Experimente, bei denen die Randbedingungen vernachlässigbar sind, oft nur schwer zu realisieren. Günstige Situationen ergeben sich, wenn einzelne „Glieder“ der Übertragungskette gezielt beeinflussbar sind. Ein einfaches Beispiel ist die Variation der Verstärkung im Empfänger, die immer linear reagieren sollte. Im Zeitbereich sind Faltungsoperationen notwendig, die numerisch aufwändiger zu beherrschen sind. Die Zusammenhänge lassen sich leichter im Frequenzbereich beschreiben. Die Faltung aus dem Zeitbereich lässt sich dann durch eine Multiplikation der Spektren ersetzen. Prinzipiell lassen sich die Systemeigenschaften generalisiert wie folgt darstellen:

$$h_{out}(\omega) = h_{inp}(\omega) \cdot h_{tran}(\omega) \quad (13)$$

Dabei kann sich h_{tran} aus verschiedenen Komponenten zusammensetzen, welche nicht immer zugänglich sind. Ideale Experimente, bei denen sich die Anregungsfunktion einer sog. Dirac-Funktion annähert, sind für das in der Arbeit beschriebene Aufgabenfeld nur schwer zu generieren. Nur dann würde das Messergebnis aber direkt die Übertragungsfunktion liefern. Am ehesten wird dies noch durch die Anregung mit dem genormten Bleistiftminen-Versuch (siehe [DIN2009]) oder z. B. einem spröden Glasbruch gewährleistet. In die Übertragungsfunktion des Systems gehen die Zeitfunktion der Anregung, die Material- und Struktureigenschaften, die Anordnung und Antwortfunktion des Sensors und Eigenschaften der Messanordnung, wie Filter und Verstärkung ein. Die Übertragungseigenschaften der neuentwickelten Ultraschallsensoren stehen nicht a priori zur Verfügung. Die dazu notwendigen Methoden werden gegenwärtig entwickelt (siehe [HOL2013]).

2.4.4 Werkzeuge für die Signalverarbeitung

Obwohl sich die Methoden der technischen Akustik, der Schallemission und verschiedener Ultraschallverfahren natürlich unterscheiden gibt es doch viele Gemeinsamkeiten. Eine wichtige methodische Klammer bilden dabei die eben geschilderten Signalverarbeitungsmethoden und die darauf aufbauenden Softwarewerkzeuge. Die für die Arbeit verwendeten und in MATLAB realisierten Visualisierungs- und Analyse-Module wurden so konzipiert, dass sie zum großen Teil verfahrensunabhängig einsetzbar sind.

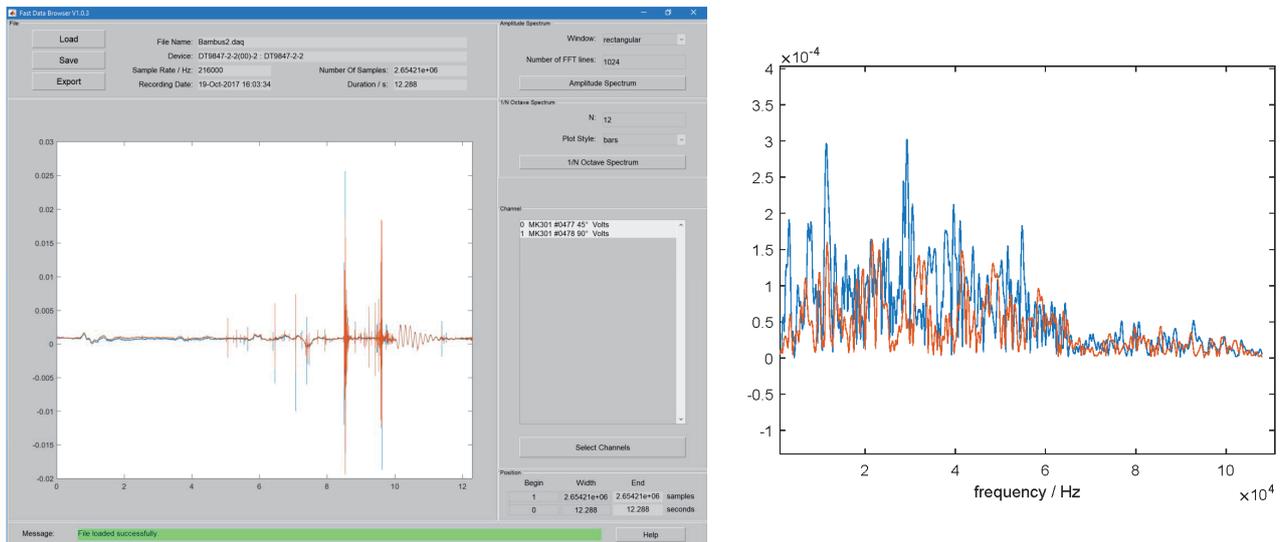


Abb. 2.4.j: links: Hauptfenster des zur primären Datensichtung und -analyse verwendeten Graphical User Interface (GUI); rechts: abgeleitetes Amplitudenspektrum des eingeladenen Bambus-Bruchs mit Teilschädigungsvorgängen

Die im ff. Kapitel der designakustischen Analyse beschriebenen Anpassungen für die spezifischen Zwecke und Ziele der Arbeit wurden über Skripte und Verknüpfungen dieser Module realisiert. Teilweise wurde Messtechnik eingesetzt, die über die notwendigen Treiber für die Hardwareansteuerungen verfügte. Dadurch entstand eine komplette Werkzeugkette, von der designakustischen Material- und Werkstoffmodellierung über die Datenaufnahmen der spezifischen Proben, die effektive und zum Teil automatisierte Verarbeitung der Daten, bis hin zur ergebnisorientierten Darstellung und Gegenüberstellung der Modelle.

Diese Themenbereiche sollen in den anschließenden Kapiteln, welche sich mit der designakustischen Analyse verschiedener ausgewählter Materialien und Werkstoffe und deren Anwendung beschäftigen, behandelt werden. Vorab sollen jedoch noch die relevanten Zusammenhänge zwischen den mechanisch verursachten Signalinitiierungsprozessen und den daraus resultierenden und individuell verschiedenen akustischen Reaktionen beschrieben werden, da diese das letzte Glied in der Kette darstellen, um die Signalverarbeitung für die designakustischen Fragen und Aufgaben der Arbeit zu komplettieren.

2.5 Interaktion zwischen mechanischen und akustischen Eigenschaften

Mechanische Eigenschaften von Materialien und Werkstoffen widerspiegeln sich zum großen Teil in der spezifischen Art der Weiterleitung von Energie. Schwingungen im Festkörper sowie die Abstrahlung von Schallwellen sind eng an die mechanischen Eigenschaften gebunden, die auch im konstruktiven Bereich Beachtung finden. Beispielsweise gehen die elastischen Moduli direkt in die Bauteilauslegung ein, beschreiben aber in gleicher Weise die Ausbreitungsgeschwindigkeit akustischer Wellen im Material. Um den Zusammenhang zwischen

konstruktiv und akustisch gleichermaßen wirksamen Kenngrößen zu illustrieren, sollen die grundlegenden Beziehungen im folgenden Kapitel zusammengefasst werden. Nicht zuletzt, weil diese Zusammenhänge im Sinne der Arbeit dazu beitragen sollen, die akustischen Aspekte im industriellen Gestaltungsprozess näher an die materielle und werkstoffliche Bauteilauslegung heranzurücken und so vielmehr gezielt als intuitiv Verwendung zu finden.

Vom physikalischen Standpunkt ist es naheliegend, generelle mechanische Eigenschaften mit akustischen Eigenschaften in Zusammenhang zu bringen, da akustische Wellen und Felder als mechanische Phänomene mit den gleichen mathematischen Methoden beschrieben werden. Phänomenologisch gibt es zum Teil auch direkte Überschneidungen, wenn man beispielsweise die Vibrationen von dynamisch belasteten Systemen als akustische Antwort bzw. Reaktion auf eine ursächlich mechanische Anregung interpretiert. Invers betrachtet stellt die Akustik wiederum eine geeignete Sondiermethode dar, um mechanische Eigenschaften zu beschreiben. Erweitert man die Betrachtungsbreite dynamischer Belastungen auf die in der Arbeit beschriebenen Deformationsfälle, wird klar, dass auch die dort auftretenden akustisch differenzierbaren Phänomene auf die mechanischen Eigenschaften der zugrundeliegenden Proben zurückführbar sein müssen.

Wie im Kontext der geschichtlichen Entwicklung materialbezogener akustischer Methoden (Kapitel II) diskutiert, ist der phänomenologische Zusammenhang zwischen mechanischen und akustischen Eigenschaften lange bekannt. Insbesondere beim Klang spielen grundlegende mechanische Parameter eine entscheidende Rolle, wie sie bereits bei der Entwicklung verschiedener Musikinstrumente beschrieben wurde. Bis in die Gegenwart wurden diese Methoden verfeinert und weiterentwickelt, um die akustischen Auswirkungen mechanischer Eigenschaften bei der Entwicklung und Qualitätssicherung von Musikinstrumenten gezielt einzusetzen.

So ist es beispielsweise bei den verschiedenen im Musikinstrumentenbau verwendeten Hölzern möglich, durch Laufzeitmessungen deren spezifische Schallleitungsgeschwindigkeit und daraus den Elastizitätsmodul zu bestimmen (vgl. [LUC2018]). Allerdings weisen Messverfahren auf Basis von einfachen Ultraschall-Impulsverfahren Nachteile auf, die eine ausreichende Genauigkeit bei der Bestimmung der Materialkoeffizienten verhindern. Methodische Verbesserungen, die am Ende dieses Kapitels beschrieben werden, führen zu wesentlichen Verbesserungen bei der Genauigkeit und damit für die Anwendbarkeit akustischer Verfahren bei stark dämpfenden Faserverbundmaterialien, wie sie beispielsweise die in der Arbeit verwendeten Hölzer darstellen. Von grundlegendem Interesse für alle Materialien und Werkstoffe sind die generellen Zusammenhänge zwischen den elastischen Eigenschaften und den damit verkoppelten Schallgeschwindigkeiten. Diese Relationen zeigen direkt, wie die mechanischen, bzw. elastischen und die akustischen Eigenschaften interagieren. Die longitudinale Schallgeschwindigkeit hängt dabei vom Verhältnis des sogenannten Longitudinalmoduls zur Materialdichte ab.

Für den Longitudinalmodul gilt nach [NIE2017]:

$$c_{\text{Festkörper, longitudinal}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad M = \frac{E(1-\nu)}{(1-\nu-2\nu^2)} \quad (14)$$

wobei ν das Poisson-Verhältnis und ρ die sogenannte Rohdichte ist. Damit berechnet sich die Schallgeschwindigkeit gemäß folgender Beziehung:

$$c_{\text{long}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu-2\nu^2)}} \quad (15)$$

Das Poissonverhältnis geht in die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit ein. Für die exakte Bestimmung von c muss dies berücksichtigt werden. Typische Werte für Holz sind 0,35 bis 0,5 (vgl. [NIE2017]). Das Poisson-Verhältnis beschreibt das Verhältnis von Längsdehnung zu Querkontraktion. Letztere muss bei genauen

Betrachtungen berücksichtigt werden, was aber weder an dieser Stelle näher ausgeführt werden soll, noch im Fokus der methodischen Entwicklung für diese Arbeit stand.

Für die Transversalwellen ist der Schubmodul die entscheidende Größe. Wenn man sich dabei wieder auf den Elastizitätsmodul beziehen will, muss ebenfalls das Poisson-Verhältnis berücksichtigt werden.

$$c_{trans} = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1}{2(1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (16)$$

G steht in dieser Gleichung für den Schub-Modul. Die Gleichungen für Longitudinal- und Transversalausbreitungsgeschwindigkeiten zeigen, dass wichtige mechanische Eigenschaften mit diesen Schallgeschwindigkeiten verbunden sind und wie erwähnt für die wechselseitige Bestimmung derer genutzt werden können. Wenn man weitergehend die longitudinale und transversale Schallgeschwindigkeit ins Verhältnis setzt, erhält man dann die Möglichkeit, das Poisson-Verhältnis abzuschätzen:

$$\frac{c_{trans}}{c_{long}} = \sqrt{\frac{(1 - 2\nu)}{2(1 - \nu)}} \quad (17)$$

Allerdings werden damit sogenannte dynamische Kennwerte, wie sie beispielsweise für die weiterführend beschriebenen Messungen an Bogenstäben für den Geigenbau mit Hilfe von Stabschwingversuchen Verwendung finden, bestimmt (vgl. [HOLZI2015]).

Mit Sicht auf die in der Arbeit untersuchten Hölzer und Komposit-Werkstoffe, welche in der Regel über mehrere Skalen, meist aber auf makroskopischer Ebene anisotrop sind, lässt sich aus den eben geschilderten Zusammenhängen ableiten, dass der lokale, bzw. mikrostrukturelle Aufbau die mechanischen und akustischen Eigenschaften in den unterschiedlichen Dimensionen stark beeinflussen. Werkstoffparameter, wie Rohdichte und die relative Lage der spezifischen Faserstruktur in Bezug auf die Messrichtung haben, akustisch betrachtet, einen deutlichen Einfluss auf die jeweilige Schallausbreitung, bzw. die dimensional verschiedenen Schallgeschwindigkeiten, welche wiederum direkt mit dem jeweiligen E-Modul, z. B. in Längs- bzw. Querrichtung oder in radialer Dimension verkoppelt sind. Beispielsweise können sich longitudinaler und transversaler Elastizitätsmodul in Holz um einen Faktor 10 bis 20 unterscheiden, woraus sich abschätzen lässt, dass sich die Schallgeschwindigkeiten mit einem Faktor von 3 bis 5 auch stark unterscheiden werden (vgl. [ZIE2015]).

Aufgrund der Artenvielfalt bei den konstruktiv verwendeten Hölzern zum Einen und aufgrund der Vielzahl von verschiedenen Faser-Gelegearten und Matrices bei synthetischen Faserverbundwerkstoffen zum Anderen weichen die Kennwerte zudem auch individuell sehr stark ab. Hinzu kommen die bereits angesprochen Schwankungen, welche durch die Heterogenität der Fehlerbilder in Holz oder auch durch die eingebrachten Fehler im Faserverbund (vgl. Kap. 1.2.1 u. 1.2.2) verursacht werden und die Akustik und Mechanik beeinflussen können.

Eine weitere wichtige Größe, welche in mechanischer Hinsicht bei der Bestimmung von akustischen Eigenschaften berücksichtigt werden muss ist die sogenannte akustische Impedanz. Diese Größe hängt ebenfalls von der Materialdichte und dem Elastizitätsmodul ab. Durch die akustische Impedanz als wichtige akustische Material- bzw. Werkstoffkenngröße werden auch die Reflexionseigenschaften der akustischen Wellen beschreibbar.

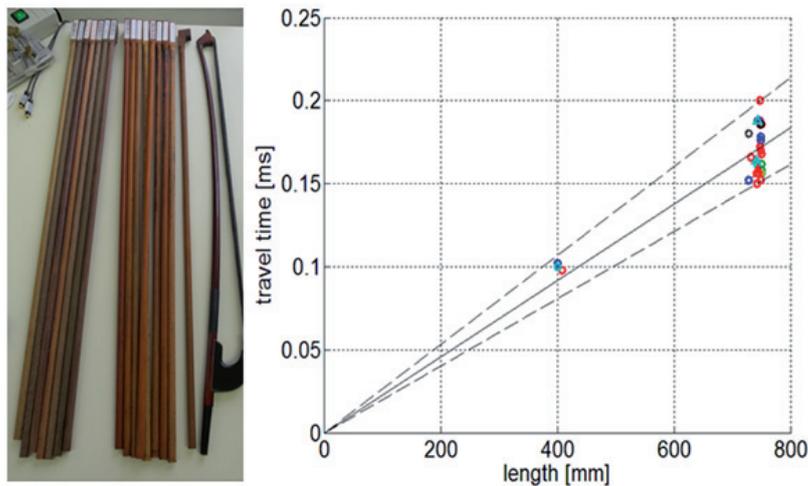


Abb. 2.5.a: Links: Für den Geigenbau typische Bogenstab-Rohlinge; Das rechte Diagramm illustriert die Streuungen zwischen den materialspezifischen Schalllaufzeiten der artgleichen aber wuchsdifferenten Proben

Dies ist gerade auf makroskopischer Ebene von Materialien und Werkstoffen bzgl. der dort auftretenden inneren Grenzflächen von Bedeutung. Sie ergibt sich aus dem Produkt von Schallgeschwindigkeit und Materialdichte:

$$Z = c \rho = \sqrt{E\rho} \quad (18)$$

Darüber hinaus spielt bei der Betrachtung der akustischen Impedanz auch der sog. Verlustfaktor nach [NEW1989] eine Rolle, da gerade in Kunststoffen, wie beispielsweise bei bestimmten Typen von Kompositwerkstoffen und auch „weicheren“ natürlichen Materialien, wie schnellwachsenden Hölzern Vibrationsenergie durch Dissipationsprozesse schnell verlorengeht. Dies kann mit dem sog. Verlustkoeffizienten global beschrieben werden:

$$\eta = \frac{1}{Q} = \frac{\delta}{\pi} = \tan \psi \quad (19)$$

wobei η für den Verlustfaktor, Q für den Gütefaktor und δ für das logarithmische Dekrement, sowie ψ für den Verlustwinkel stehen. Mit Hilfe der Impedanz lässt sich bestimmen, wie effektiv der Schallübergang von einem Medium in ein anderes angrenzendes Material ist. Das Verhältnis der Impedanzen bestimmt wie groß der Intensitätsanteil einer Schallwelle ist, die von einem Medium mit der Impedanz z_1 in ein Medium mit der Impedanz z_2 übergeht. Aus der folgenden Gleichung ergibt sich, dass bei sich stark unterscheidenden Impedanzen die Schallübertragung ineffektiv ist, bzw. der Anteil der Reflexion groß ist. Für die reflektierte Intensität gilt:

$$\frac{I_r}{I_0} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z + Z_1} \right)^2 \quad (20)$$

Besonders auffällig ist dies an Grenzflächen mit großem Dichteunterschied wie beispielsweise zwischen Luft und einem Festkörper. Der gleiche Sachverhalt trifft erst recht auf innere Grenzflächen zu, wie sie beispielsweise bei Desintegration im Faserverbundwerkstoff entstehen. Für die in das andere Medium übertragende Intensität gilt dabei:

$$\frac{I_r}{I_0} = \frac{4z_2z_1}{z_2 - z_1^2} \quad (21)$$

Darüber hinaus gibt es noch weitere Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften und die Schallgeschwindigkeit, die sowohl experimentell, als auch bei der entsprechenden Interpretation der Untersuchungen dieser Arbeit berücksichtigt werden müssen. Dazu zählen beispielsweise umweltbedingte Einflüsse wie der Trocknungszustand bzw. der Feuchtegrad der verschiedenen Materialien und Werkstoffe. Viele Kunststoffe, wie z. B. Polyamide, synthetische Faserverbundwerkstoffe, aber auch Naturfaserkomposite und die Materialien auf rein natürlicher Basis, wie die in der Arbeit verwendeten Nadel- oder Bambushölzer können einen beträchtlichen Anteil an Feuchtigkeit binden. Bei größeren Werten hat die daraus resultierende mechanische und akustische Dämpfung einen merklichen Einfluss auf den späteren Klang der Instrumentenstruktur. So wird bei der vorab zitierten Verwendung von Hölzern im Musikinstrumentenbau eine Holzfeuchte von 8 bis 9 % als geeignet angesehen [ZIE2015].

Ergänzend sei an dieser Stelle erwähnt, dass die verwendeten Lösungsmittel, die bei verschiedenen Werkstoffherstellungsprozessen – z. B. auch bei Naturfaserkompositen – zum Einsatz kommen einen ähnlichen Effekt hinsichtlich der Beeinflussung mechanischer bzw. elastischer Eigenschaften bewirken.

Neben den direkt „materialbezogenen“ Werten wirken sich neben der Feuchtigkeit auch die Temperatur auf die Elastizitätsmodule und die Dichte aus. Folglich werden auch Schallgeschwindigkeit und Schwingungsamplitude beeinflusst beziehungsweise verändert. Es kann aber angenommen werden, dass sich unter den Laborbedingungen, die im Rahmen der Experimente zur Arbeit vorherrschten, gewisse materialspezifische, bzw. materialtypische Gleichgewichtsbedingungen eingestellt haben. Im Rahmen der Arbeit wurde deshalb darauf geachtet, dass keine extremen Trocken- oder Feuchte-Bedingungen bei der Lagerung und bei den Experimenten auftreten konnten, da offensichtlich ist, dass ein hoher Feuchtigkeits- oder Trocknungsgrad, die experimentellen Ergebnisse stark verfälschen könnte.

Beispielhaft soll folgend die bereits angesprochene akustische Methode näher beschrieben werden, mit deren Hilfe mechanische Parameter für konstruktive Anwendungen bestimmt werden können. Dies belegt einerseits die Nutzbarkeit des Zusammenhangs zwischen mechanischen und akustischen Eigenschaften im weiter vorn postulierten Kontext und zum anderen illustriert diese die Flexibilität akustischer Methoden. Es wird sich zeigen, dass die Entwicklung des Verfahrens nur möglich war, weil verschiedene Ideen zur Messbarkeit einfließen.

So ist es bei den verschiedenen im Geigenbau verwendeten Hölzern möglich, durch speziell angepasste Laufzeitmessungen die exakte Schallgeschwindigkeit zu ermitteln, um aus dieser eine für das anisotrope Material Holz gültige Messvorschrift zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls abzuleiten (vgl. [HOLZI2015]).

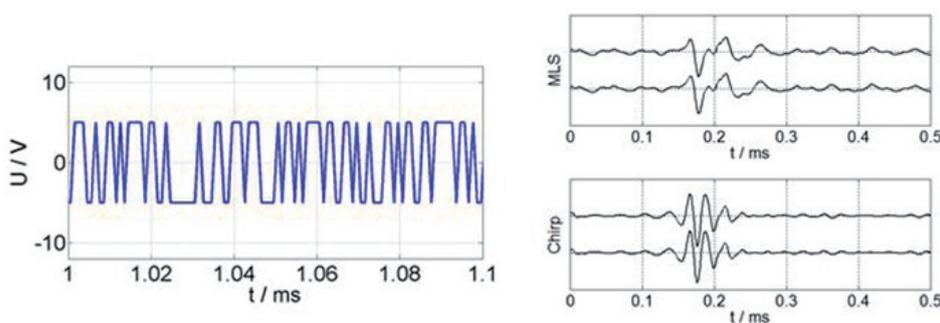


Abb. 2.5.b: Codierte Anregung von Bogenstangen; Links: Teil eines MLS-Sequenzmusters (Maximum Length Sequence), rechts: Nachweis der Reproduzierbarkeit der Laufzeitschätzung für einen Bogen durch Mehrfachmessungen desselben Bogenbalkens für MLS- und Chirp-Anregung. [HOLZI2015]

Allerdings zeigen sich, wie bereits beschrieben gerade bei dem natürlich gewachsenen Material Holz als typischer Werkstoff der in der Arbeit verwendeten Proben gewisse akustische Besonderheiten, die vor allem der starken Dämpfung der Schallausbreitung, der größeren Varianz der Materialeigenschaften und der Anisotropie durch den natürlichen Wuchs geschuldet sind (vgl. Abb. 2.5.a). Die größere Dämpfung bei höheren Frequenzen erfordert so die Durchschallung mit vergleichsweise niedrigen Frequenzen, um die Materialeigenschaften ermitteln zu können.

Für die Bestimmung akustischer Eigenschaften von Holz und vergleichbaren Materialien werden deswegen üblicherweise Messsysteme mit Messfrequenzen bis etwa 100 kHz eingesetzt [LUC2018]. Höhere Frequenzen haben wiederum den Nachteil, dass die erwähnte Dämpfung so stark sein kann, dass Messungen nur noch an relativ kleinen Proben möglich sind und somit Aussagen für Bauteile bzw. konstruktive Aspekte nur eingeschränkt gemacht werden können. Ein großer Nachteil der geringen Frequenzen ist die damit einhergehende geringere Auflösbarkeit von Ultraschallechos.

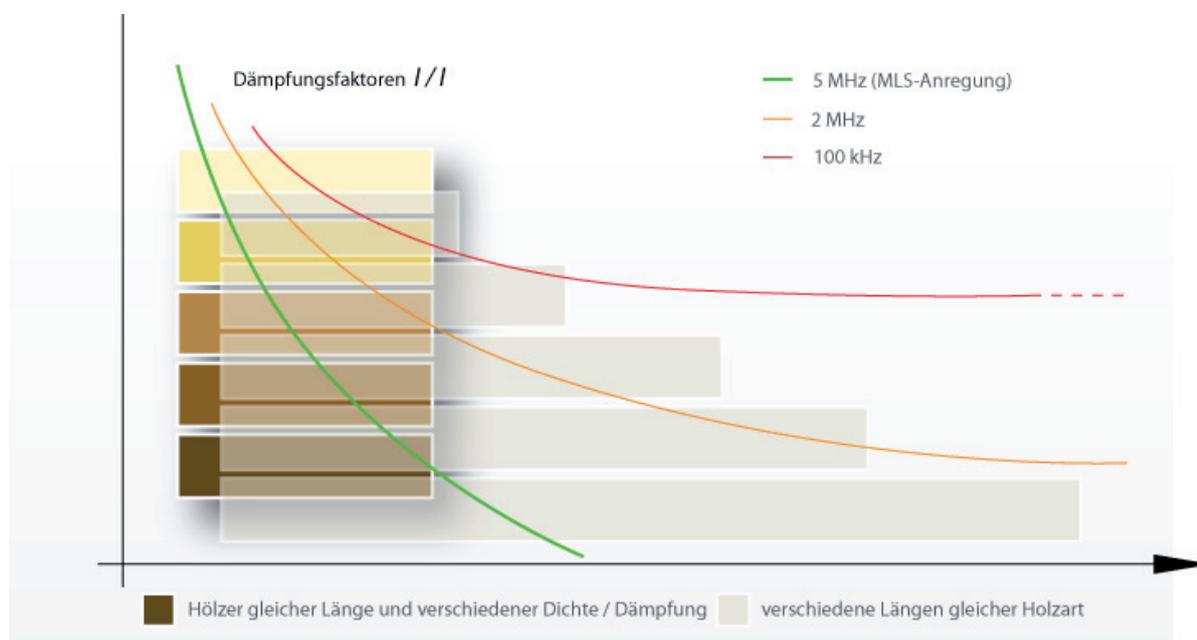


Abb. 2.5.c Schematische Gegenüberstellung der Durchschallung verschiedener Materialien und Strukturen unterschiedlicher Dimensionierungen bei verschiedenen Anregungsfrequenzen (unter Einbezug der Auflösbarkeit)

Da die Bestimmung der Echoamplituden, aus denen die Laufzeiten und damit die Schallgeschwindigkeiten ermittelt werden relativ ungenau ist, wurde ein Verfahren vorgeschlagen, mit dem diese Nachteile mit geeigneten signalverarbeitungstechnischen Verfahren kompensiert werden können. So nutzt das in Abb. 2.5.d gezeigte Verfahren die kodierte Anregung mittels MLS-Sequenzmustern [HOL2004], um die Auflösungsprobleme auszugleichen und so belastbare Aussagen bezüglich der dem Material, bzw. der konkreten Struktur inhärenten Schallausbreitungsgeschwindigkeit treffen zu können.

Obwohl die Dauer der Anregungssequenz länger als die Laufzeit des Schalls im Impuls-Experiment ist, sind die aus der Kreuzkorrelation zwischen Eingangs- und Ausgangssignal bestimmten Echolagen mittels getrennter Sender und Empfänger bei Nutzung geringer Anregungsspannungen (10 V) sehr genau bestimmbar. Damit war ein mechanischer Parameter mit einer bisher aus akustischen Messungen nicht möglichen Genauigkeit bestimmbar.

Die verwendeten Prüfkörper bestanden für die elementaren Untersuchungen aus zylinderförmigen, von 20 bis 100 mm langen Buchenholz-Proben und für die angewandten Experimente aus 500 mm langen Geigenbogenstangen. Letztere bestehen aus Pernambuco-Holz, einem tropischen Edelh Holz aus dem Norden Brasiliens, dessen Verwendung über die Artenschutzverordnungen streng reguliert ist (vgl. [WEB2012]). Auch deshalb haben methodische Entwicklungen für Messverfahren, die in der Qualitätssicherung und Materialauswahl verwendet werden können, eine praktische Relevanz.

Interessanterweise wurde hier ein mechanischer Parameter für eine Anwendung im musikalischen Umfeld mit einer akustischen Methode bestimmt. Eine Besonderheit des Verfahrens besteht darin, dass hier Messproben in Bauteilgröße geprüft werden konnten. Für die Bestimmung von akustischen Eigenschaften kleinerer, wenige Zentimeter langer Materialproben eignen sich höhere, im Ultraschall übliche Frequenzen von 1 bis 5 MHz. Entsprechend der vorherigen Bemerkungen zum Feuchtegehalt der bei den experimentellen Arbeiten verwendeten Hölzer und Kompositmaterialien wurde auch hier der Feuchtegehalt konstant gehalten.

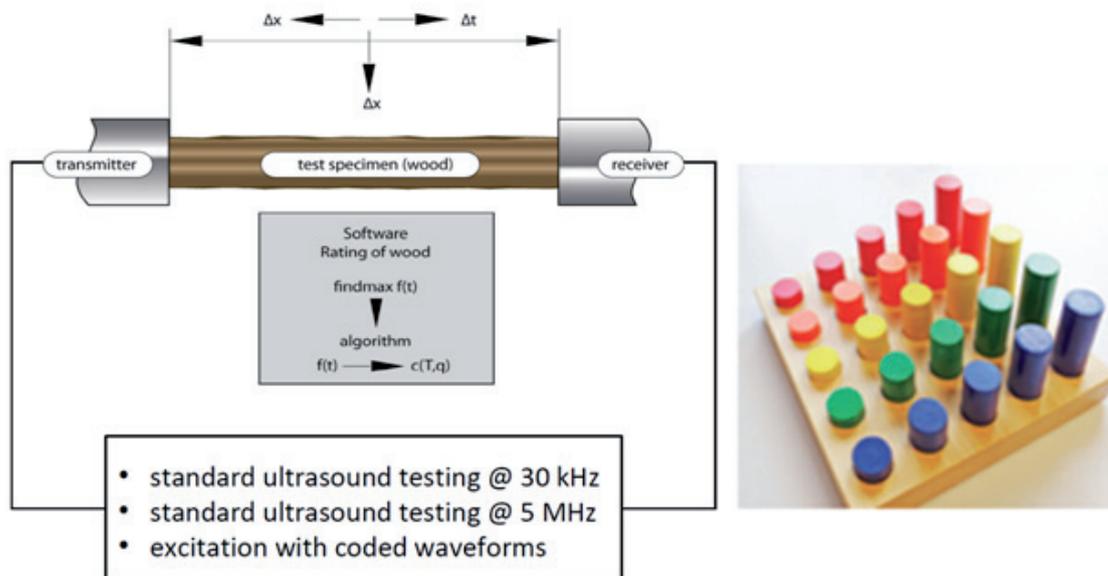


Abb. 2.5.d: Links: prinzipielle Sender-Empfänger-Anordnung für die Laufzeitmessungen und Schallgeschwindigkeitsbestimmungen; Die verschiedenen Längen der Bogenstangen-Rohlinge aus Abb. 2.5.a wurden beim hier beschriebenen Verfahren der kodierte Anregung mittels MLS-Sequenzmustern berücksichtigt. Rechts: die verwendeten Proben f. d. prinzipiellen und die angewandten Experimente

Die Untersuchungsmethode steht exemplarisch für die Vielzahl an experimentellen Hürden und individuellen Besonderheiten, die eine vereinfachte oder pauschalisierte Bewertung, bzw. Charakterisierung oder Kategorisierung der verschiedenen Materialien und Werkstoffe, wie sie als Ziel dieser Arbeit formuliert ist, erschweren können. Sie verdeutlicht jedoch auch, dass es nach der Bewältigung dieser durchaus möglich ist, klar definierte Parameter abzuleiten, die unter Einbezug der vorab geschilderten Zusammenhänge zwischen den verschiedenen akustischen und mechanischen Größen für eine Charakterisierung im Sinne der vorliegenden Arbeit verwendet werden können.

Eine abschließende Betrachtung gilt den klassischen Ansätzen der Psychoakustik, welche an dieser Stelle hinsichtlich ihrer Potenziale und Bezüge zum designakustischen Ansatz dieser Arbeit hinterfragt werden sollen.

2.6 Möglichkeiten und Grenzen psychoakustischer Eigenschaften

In vielen Bereichen der Produktentwicklung ist es inzwischen akzeptiert, dass psychoakustische Bewertungsmaßstäbe eine tragende Rolle spielen. Bei Konsumgütern aber auch bei Maschinen im industriellen Bereich sind derartige Bewertungen inzwischen Standard [SAN2017].

Produkte werden zunehmend auch mit Angaben zu akustischen Parametern verkauft. Dies ist beispielsweise bei Haushaltsgeräten und Werkzeugen der Fall. Die Angaben (meist in dB(A)) beziehen sich dabei in der Regel auf Leistungsgrößen (Schallleistungspegel). Abhängig vom Nutzungseinsatz können jedoch auch psychoakustisch wirksame akustische Phänomene wichtiger sein – beispielsweise, wenn diese als permanentes Hintergrundgeräusch mit tonaler Komponente in Wohnräumen oder vereinzelte Geräusche (Knacken o.ä.) auftreten. Beispiele sind Hinweise in Gebrauchsanleitungen, die mit akustischen Attributen die Bewertung von Produktfunktionen erklären.



Abb. 2.6.a: typische konsumentenorientierte Transkription von unvermeidbaren Produktgeräuschen zur Vermeidung von Reklamationen

Die akustischen Reaktionen der Systeme beziehen sich dabei auf die Schallabstrahlung der zur Nutzung oder zum Betrieb notwendigen eingebrachten Energie. Prominente Beispiele sind vielleicht die Bewertungen im Bereich der Kraftfahrzeuge, da dort der akustische „Komfort“ mitentscheidend für einen Kauf oder auch für Weiterempfehlungen des Produktes sind. Der Klang bzw. die generelle Geräuschkulisse ist inzwischen ein entscheidendes Komfortmerkmal. Dies betrifft die Gesamtheit der Akustik ebenso, wie die von Baugruppen, beispielsweise Getrieben. Zum einen ist das steigende Bedürfnis nach einer akzeptablen oder vielleicht sogar exzellenten Akustik unter dem Gesichtspunkt der ständig wachsenden akustischen Belastung verständlich und sogar zu einem wichtigen Verkaufsargument geworden. Zum anderen existiert noch die – auch historisch gewachsene – Beziehung des Klangs zur Funktionssicherheit, bzw. im technischen Kontext zu Fragen der Zustandsdiagnose und des optimierten Betriebs.

Die Rezeption der Eigenschaften von Schallereignissen durch die Wahrnehmung des Menschen führt zu Aussagen, die sich nicht direkt durch messbare physikalische Größen wie Schallpegel oder -intensität ergeben, sondern durch die wesentlich komplexere Interpretation des Schalleindrucks durch den Hörer. Viele Merkmale, wie zunächst scheinbar objektive Größen, wie Frequenzzusammensetzung oder auch zeitliche Dynamik oder sogar die Informationsdichte zusammenhängender oder aufeinanderfolgender Signalmuster sind isoliert nicht geeignet, um die psychoakustische Wirkung auf Probanden umfassend zu beschreiben. Die subjektive Situation oder auch das Zusammenspiel mit anderen Sinneswahrnehmungen können individuell völlig verschiedenen Wahrnehmungen und Bewertungen hervorrufen. Subjektive Bewertungen nach den üblichen Schemata waren auf die mit dem Einsatz und der Funktion von Materialien verbundenen Probleme und Auswirkungen nicht anwendbar. Dies betraf sowohl die Bewertungsparameter als auch die statistischen Rahmenbedingungen. Bei den im Verlauf der weiteren Arbeiten zum designakustischen Modell durchgeführten Befragungen wäre für Bewertung der materialakustischen Vorgänge sicher eine größere Anzahl von Probanden wünschenswert gewesen. Andererseits widerspricht dies auch der möglichen praktischen Realisierung im Nutzerkreis. Ein weiteres, zu berücksichtigendes Problem war anfangs die fehlende Reproduzierbarkeit bei mehr oder weniger nicht wiederholbaren Vorgängen. Bei Konstruktionen und Gebrauchsgegenständen oder generell in Materialien und Werkstoffen entstehen Geräusche unter verschiedenen Arten von Belastungen bzw. bei Benutzung. Meist sind die Quellen auf Gebiete begrenzt, die eine lokale Strukturveränderung hervorrufen. Solche Vorgänge können Riss- und Bruch- aber auch Reibungsvorgänge sein. Das bedeutet, dass die akustischen Äußerungen sowohl durch strukturhaltende als auch durch strukturverändernde Prozesse hervorgerufen werden können. Dies kann damit sowohl reversible als auch irreversible Vorgänge betreffen und damit unterschiedliche Szenarien bezüglich der experimentellen Versuchsplanung und Auswertung betreffen. Bei den Untersuchungen von irreversiblen Vorgängen wurde deswegen mit einer großen Anzahl von jeweils gleichartigen Proben gearbeitet (siehe Kap. 1.3.1). So können auch die durch die Werkstoffspezifik hervorgerufenen Streuungen, wie sie z. B. bei WPC auftreten, statistisch verwertbar gemacht werden. Bei bruchspezifisch reproduzierbareren Werkstoffen, wie z. B. qualitativ aufwändig produziertem, hochwertigem CFK mussten aufgrund der geringen Streuung und somit hohen Reproduzierbarkeit weitaus weniger Proben untersucht werden.

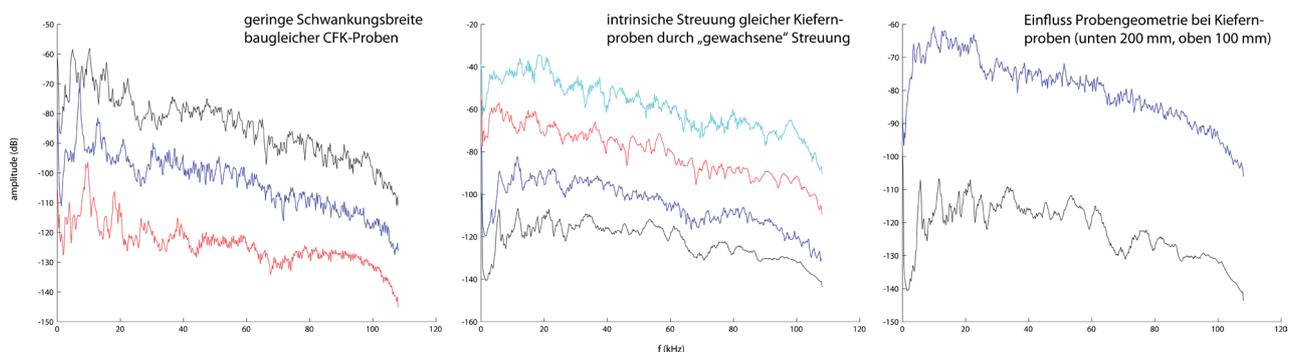


Abb. 2.6.b: Beispielhafte Gegenüberstellung der Messergebnisse von CFK und Kiefer zur nachweislichen Veranschaulichung von Reproduzierbarkeit bzw. Streuung aufgrund der Werkstoffspezifik und Probengeometrie

Neben den „standardisierten“ Proben wurden auch solche mit abweichenden Abmessungen verwendet, um geometriebedingte Eigenschwingungen, die während der Belastungsversuche immer mit angeregt werden, von den zerstörenden Vorgängen oder den Reibungsvorgängen unterscheiden zu können. Die Versuchsanordnung für die Akquisition der psychoakustisch auszuwertenden Audiosignale wurde so gewählt, dass diese möglichst realistischen Nutzungsbedingungen entsprechen. Dafür wurden die Mikrofone in einer Entfernung von jeweils 1 m in einer 90° Anordnung platziert (siehe Abb. 2.6.c).

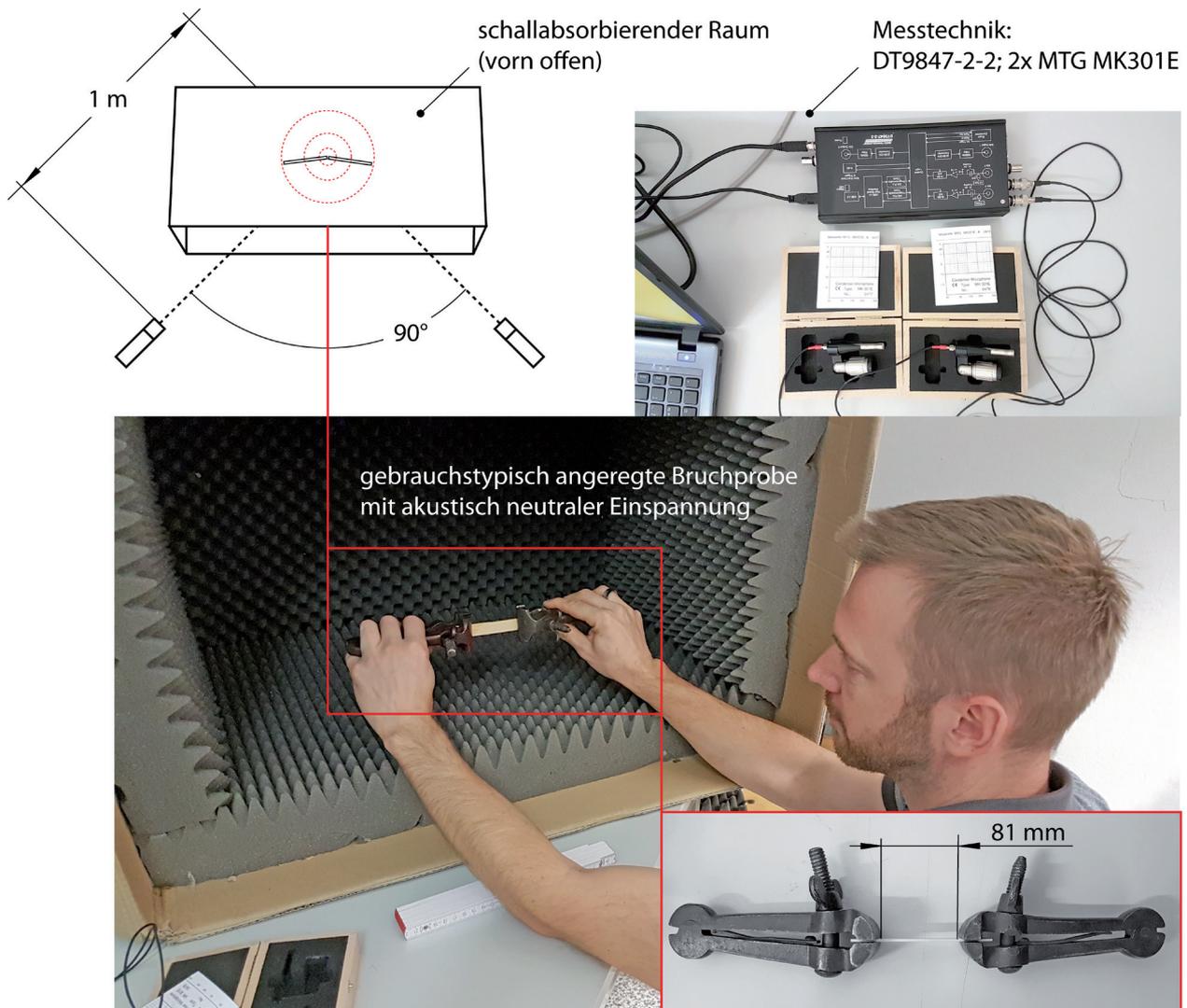


Abb. 2.6.c: schematische Versuchsanordnung (o. li.) und Darstellung der verwendeten Einspannung zur Vermeidung akustischer Lagerreaktionen beim Bruchexperiment (u. re.); für den Versuch wurden o.g. Messkarte von Data Translation [DATR] und Luftschallmikrofone von Microtech Gefell [MG2018] verwendet (Typisierung o. re.)

Die aus den Belastungs- und Bruchexperimenten gewonnenen Daten wurden anschließend so aufbereitet, dass sie mit den psychoakustischen Modulen Artemis-Suite [ART2021] untersucht werden konnten. Die Datensätze wurden mit keiner Frequenz-Wichtung (z.B. A-Bewertung) versehen. Aus den gesamten Datensätzen wurden nur die für die Bewertung relevanten Bereiche in die Berechnungen einbezogen. Bereiche ohne Belastung wurden nicht berücksichtigt.

Im Folgenden wurden die psychoakustischen Parameter Lautheit, Tonalität, Rauigkeit und Fluktuationsstärke, für die entsprechende Berechnungen durchgeführt wurden, betrachtet. Dabei lag der Schwerpunkt bei der Bewertung der zeitveränderlichen Größen. Der Grund hierfür liegt darin, dass sich die Spezifik von Materialien und Bauteilen unter Last bzw. beim Versagen vor allem in der zeitlichen Charakteristik widerspiegeln sollte. Die Berechnungen erfolgten dabei nicht in der Erwartungshaltung, dass die beispielsweise erfolgreich im Automotive-Bereich einsetzbaren Berechnungsvorschriften ohne weiteres auf materialbezogene Probleme übertragen werden können.

Der Einsatz dieser Berechnungen soll als methodisches Mittel verstanden werden, perspektivisch spezifisch angepasste Berechnungsverfahren vorzuschlagen, um die psychoakustischen Auswirkungen der schnellen und stochastisch verteilten akustischen Äußerungen von Materialien unter Belastung zu verstehen. Allerdings spielen auch tonale Komponenten eine Rolle, da bei den materialverändernden Vorgängen auch Schwingungen auftreten, die aufgrund der Methodik der Versuchsanordnungen als Eigenschwingungen auftreten.



Abb. 2.6.d: verwendeter Experimentierplatz für die psychoakustische Auswertung der Bruchexperimente; Seminarraum der Fakultät „Technische Akustik“ in Mittweida, mit freundlicher Genehmigung von Prof. J. Hübelt

Begonnen wurde mit der Auswertung der psychoakustischen Lautheit. Aufgrund der kurzen Zeit ist die psychoakustische Reaktion unspezifisch. Das lauteste Ereignis liegt deutlich über 1 sone, da die Experimente in der Regel bis zum Materialversagen durchgeführt wurden. Andererseits treten vor allem im Bereich der Vorschädigung auch relativ leise Signale auf. Die Lautheit (stationär) wird zielführend vor allem für die Bewertung gleichförmiger Signale eingesetzt und ist ein Maß wie unterschiedlich laut akustische Signale vergleichbarer Energie wahrgenommen werden können. Die in den Experimenten gefundenen Differenzierungen entsprechen in gewisser Weise den energetischen Unterschieden, bzw. Energiefreisetzungen beim Bruch und beim Nachschwingen.

Die Parameter für die Lautheit scheinen sich (in gewissen Grenzen) gruppieren zu lassen. Allerdings zeigt sich, dass gerade die Bauteile, die beim Bruch besonders intensive psychoakustische Wirkungen auslösen, nicht auf den Parameter Lautheit reagieren. Wie später noch festgestellt wird, ist bei diesen der Unterschied zwischen den Vorschädigungen und dem Ereignis mit der maximalen Signalintensität am größten. MDF und WPC weisen formal eine größere Lautheit auf. Dies entspricht nicht der wahrgenommenen Situation. Es wurde davon ausgegangen, dass die dominierende Beeinflussung der Lautheit von der Ausdehnung der bruchverursachenden Region (Rissregion) und durch die Anregung der gesamten Probe („Nachklang“) beeinflusst ist. Die gleiche Probengeometrie sollte hier eine Vergleichbarkeit sicherstellen.

Die spektralen Unterschiede zwischen den Materialien setzen sich aus den Komponenten „Anregung“ – der eigentliche materialverändernde Bereich – und dem Nachschwingen infolge der Anregung zusammen. Der Zeitraum der Anregung ist dabei kürzer als der Bereich des Nachklangs. Ein typischer Wert für das Amplitudenverhältnis der Maximalwerte zu denen der Anregung in den Experimenten ist jener von CFK und liegt bei 2:1. Allerdings sind zwischen den verschiedenen Phasen der Schädigungen auch ereignislose Bereiche für die Berechnung der Daten wirksam.

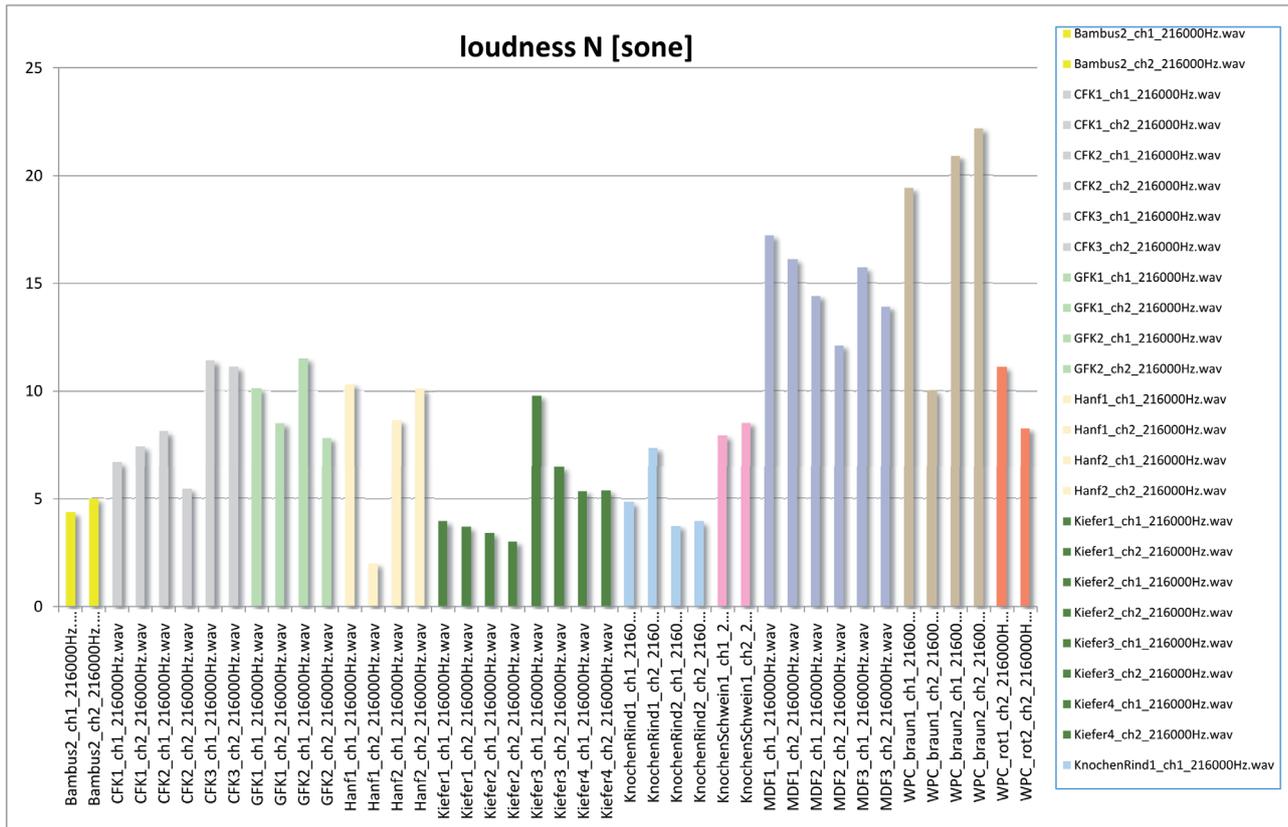


Abb. 2.6.e: Auswertung bzw. Gegenüberstellung der experimentellen Ergebnisse bzgl. des psychoakustischen Parameters Lautheit

Bei höheren Frequenzen dient die psychoakustische Schärfe als Maß für die Lautheit. Bruchvorgänge erzeugen Frequenzen bis weit in den Ultraschallbereich hinein. Damit soll vor allem der „scharfe“, unangenehm hohe Frequenzanteil an der Gesamtenergie beschrieben werden. Die Aussage des Parameters Sharpness ist in den Experimenten jedoch unspezifisch. Eine Differenzierung im Rahmen der materialspezifischen Untersuchungen ist mittels des Merkmals nicht möglich.

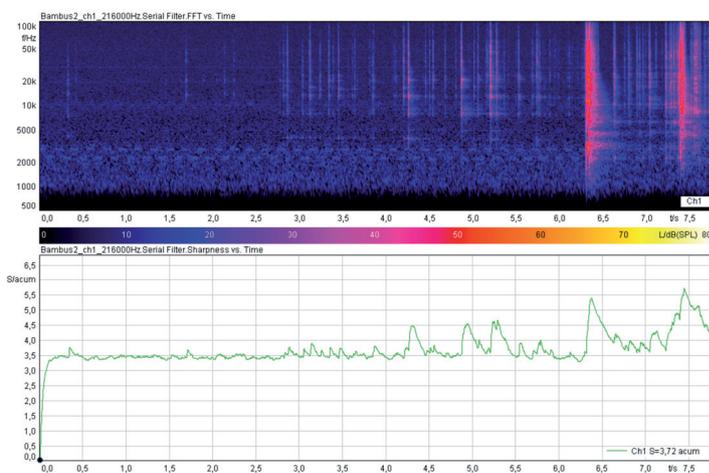


Abb. 2.6.f: spektrales Verhalten von Bambus, Hier ist vor allem in der Vorschädigung der Anteil an Schärfe größer als im Gesamt-Signal (o: Spektrogramm Sharpness_1kHz_FIR)

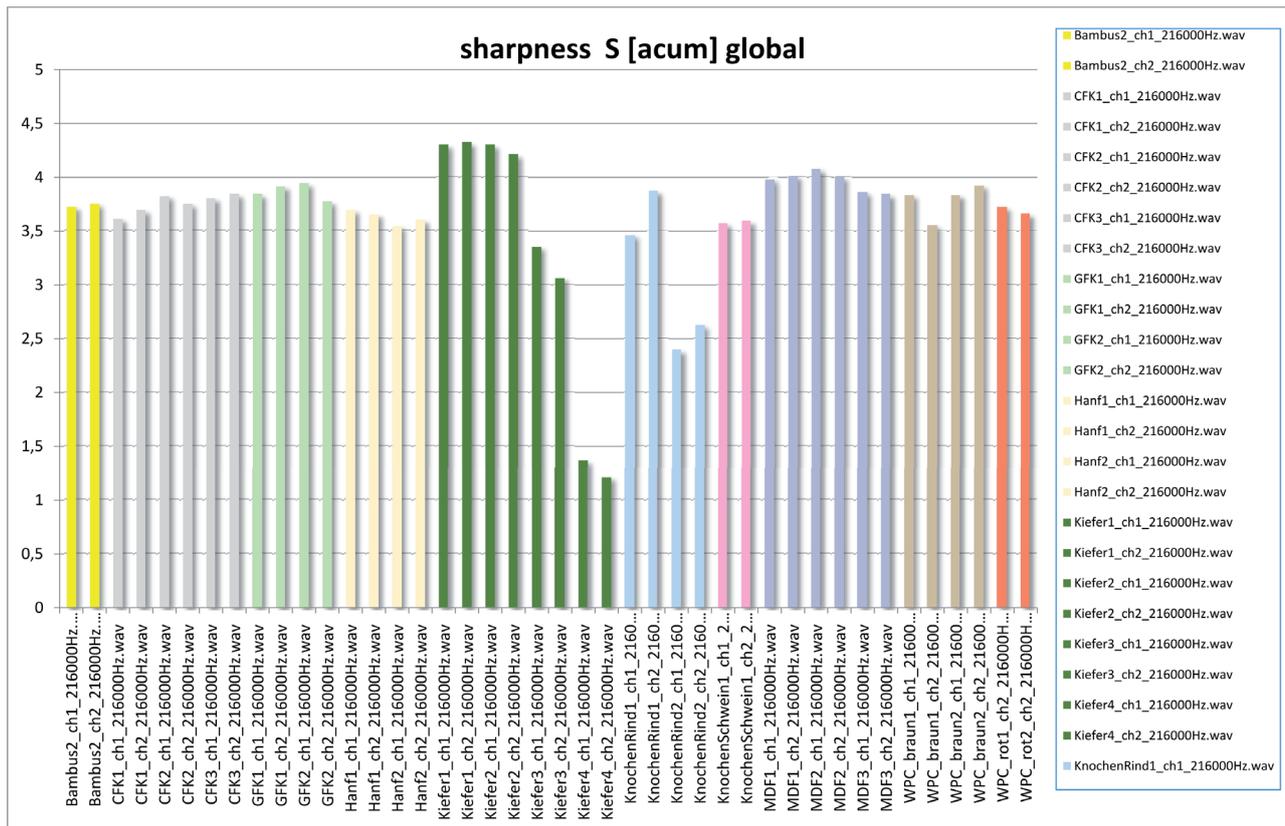


Abb. 2.6.g: unspezifische Auswertung bzw. Gegenüberstellung der experimentellen Ergebnisse bzgl. des psychoakustischen Parameters Schärfe

Die psychoakustische Tonalität wurde berücksichtigt, da die Eigenfrequenzen anteilig tonale Komponenten als Überlagerung zur bruchbedingten Breitbandigkeit liefern sollten. Allerdings sind die verwendbaren Blocklängen klein. Die Probekörper mit dem „schnellsten“ Bruchverhalten und der größten Steifigkeit (CFK) liefern größere Tonalitätswerte. Allerdings streuen diese erwartungsgemäß. Die einzelnen Bruchvorgänge lassen sich teilweise auflösen. Allerdings steht für die tonale Bewertung jeweils nur ein geringes Zeitfenster zur Verfügung. Bei der Bewertung wurde davon ausgegangen, dass die Spektren von Zeitausschnitten bezüglich der Frequenzcharakteristik vergleichbar sind. Aufgrund des kurzen Zeitfensters der Elementarereignisse sind die tonalen Komponenten durch die schnelle zeitliche Fluktuation der Signalamplituden sozusagen „maskiert“. Mit der Tonalität lässt sich zumindest eine gewisse Differenzierung der Materialklassen erreichen. Im Wesentlichen gehen hier die Nachklangeigenschaften und damit die Eigenfrequenzen der Proben ein.

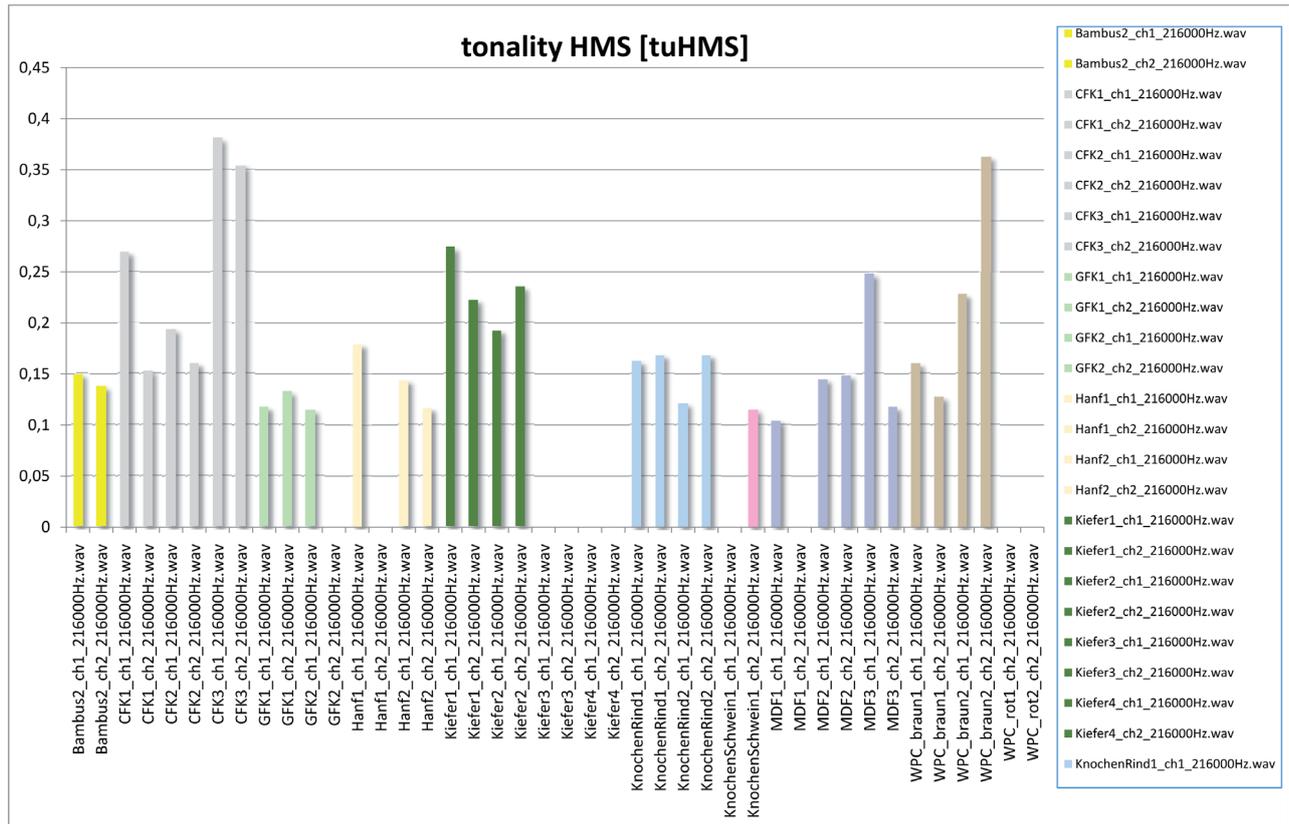


Abb. 2.6.h: Auswertung bzw. Gegenüberstellung der experimentellen Ergebnisse bzgl. des psychoakustischen Parameters Tonalität

Bewertet wurde auch die psychoakustische Rauigkeit, die insbesondere auf relative niederfrequente Modulationen reagiert. Die Gruppierung der Materialien wird dabei vor allem durch die zeitlichen Abstände der Bruchereignisse bestimmt. Ein systematischer Befund bezüglich der Differenzierung verschiedener Materialien wurde bei Sichtung der experimentellen Auswertung nicht festgestellt.

Bei der Berechnung der psychoakustischen Fluktuationsstärke wurde erwartet, dass der transiente Charakter der bei Belastung auftretenden akustischen Emissionen sich am ehesten wiederfinden lässt. Diese Annahme scheinen die Daten auch zu unterstützen. Insbesondere die schwache Reaktion des Parameters bei den Materialien MDF und WPC entsprach dem Höreindruck, letzteres traf überraschenderweise auch auf die Proben eines Knochentyps zu. Dies ist in gewisser Weise auch zu erwarten, da die Bruchexperimente a priori durch transiente Signalanteile dominiert sind und die Fluktuationsstärke Modulationen bei etwas höheren Frequenzen berücksichtigt. Damit ist die Fluktuationsstärke bei der Verwendung der verfügbaren „klassischen“ Bewertungsparameter der am besten „wirkende“ Wert. Die Ergebnisse lassen zumindest die Überlegung zu, dass die transienten Anteile und Charakteristika zielführend in eine Bewertung eingebunden werden sollten. Allerdings sind die Frequenzen in den Bruchexperimenten natürlich zum Teil wesentlich höher. Die Fluktuationsstärke ist besser zur Differenzierung der Materialklassen geeignet. Außerdem kommt sie dem eigentlichen Anliegen des Vorhabens näher, die transienten Anteile stärker in die psychologisch orientierte Wichtung einzubeziehen.

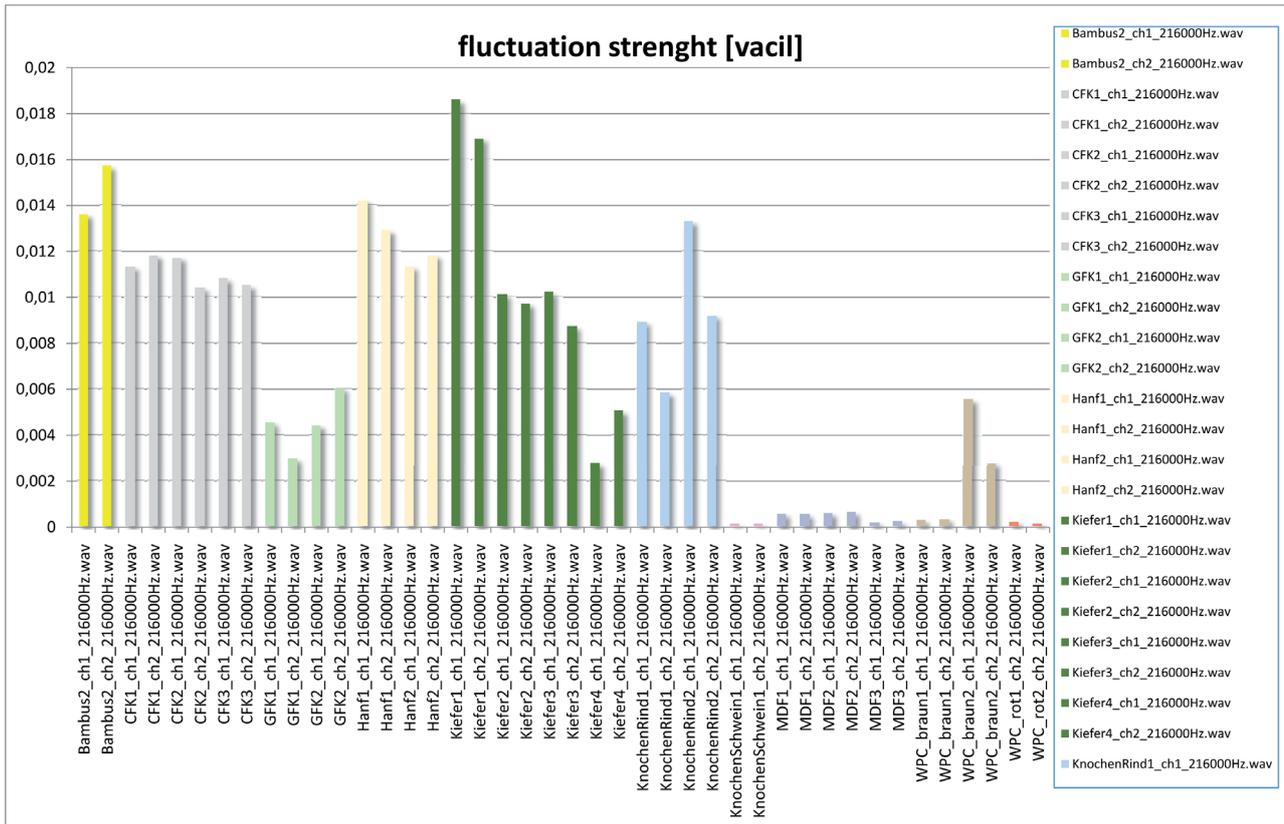


Abb. 2.6.i: Auswertung bzw. Gegenüberstellung der experimentellen Ergebnisse bzgl. des psychoakustischen Parameters Fluktuationsstärke

An dieser Stelle sei abschließend noch erwähnt, dass neben der Bewertung einzelner Parameter auch psychoakustische Ansätze bzgl. zusammenfassender Metriken, wie z. B. von Zwicker und Fastl [FAS05] existieren, welche die Einbeziehung mehrerer psychoakustischer Parameter verlangen. So wird dort vorgeschlagen für einen kombinierten psychoakustischen Parameter, genannt Lästigkeit (eng. Annoyance), Schärfe, Fluktuationsstärke und Rauigkeit zu kombinieren. Die Lautheit ist dabei die am stärksten wirksame Größe. Die Wichtung der Beiträge hängt allerdings von den jeweiligen Situationen und Einsatzgebieten ab. Das dort gegebene Beispiel einer tickenden Uhr belegt deutlich, dass die Fluktuationsstärke durch die Regelmäßigkeit einen wesentlich größeren Einfluss auf die Lästigkeit haben wird. Das belegt aber auch, dass mit einem Ansatz nicht alle vorkommenden akustischen Situationen bewertet werden können. Jede Familie von „akustischen“ Problemen wird einen spezifischen Zugang (Fastl: Rezept) benötigen.

Bezüglich dieses Ansatzes wurden die psychoakustischen Untersuchungen der Arbeit zwar nicht vertieft, es sei jedoch auf das in Kap. 3.2 vorgeschlagene Bewertungsmodell verwiesen, welches auf grafischer Ebene eine ebenfalls kombinierte Beurteilung ermöglicht.

Zusammenfassend erweist sich die Anwendung der für verschiedene akustische Bewertungen im technischen und anderen Bereichen entwickelten psychoakustischen Parameter auf die transienten Fragestellungen der Arbeit aufgrund der Definitionen als schwierig. Die klassischen Auswertungen deuten an, dass die entsprechenden Parameter mit einer gewissen Systematik auf die akustischen Vorgänge der belasteten Materialien reagieren. Dies betrifft besonders Berechnungen, die gewisse Variationen im Signal berücksichtigen, wie z. B. die Fluktuationsstärke. Interessant ist, dass sich die psychoakustischen Parameter entsprechend der Materialklassen gruppieren lassen und zusammenhängende Eigenschaften haben. Die trifft insbesondere auf die Lautheit und die Fluktuationsstärke zu. Allerdings ist die Interpretation nicht eindeutig. Der Parameter

Schärfe ist für alle Materialien kaum differenziert, da insbesondere bei den hohen Frequenzen das spektrale Verhalten kaum Unterschiede aufweist. Die Werte für die Tonalität streuen ebenfalls erheblich. Die bisher betrachteten psychoakustischen Parameter beziehen sich letztendlich auf Modulationen einer „konstanten“ akustischen Situation. Es zeigt sich aber auch, dass eine an das Nutzungs- und Akzeptanzverhalten angelehnte Bewertung im Sinne der Arbeit eine stärker auf das zeitliche Verhalten ausgerichtete Beurteilung verlangt. Die Schwierigkeiten bei der Nutzung der traditionellen psychoakustischen Bewertung führten zu der Überlegung, die unter Belastung von Materialien und Strukturen emittierten Signale einem Bewertungssystem für transiente Signale zu unterziehen. Für die materialbezogenen Vorgänge sind die zeitlich strukturierenden Vorgänge bedeutsamer als frequenzbezogene Aussagen. Trotzdem werden diese auch in der in Kapitel 3 beschriebenen Modellierung – berücksichtigt, da sie die generelle Einordnung bestimmen.

Abschließend werden alle geschilderten Zusammenhänge dieses Kapitels zwischen mechanischen, akustischen Eigenschaften perspektivisch im folgenden Schaubild visualisiert, um diese mit den in Kapitel 3 folgenden, vorgeschlagenen designakustischen Komplementärpaaren zu verkoppeln, welche wiederum Bezüge zu den zuletzt beschriebenen psychoakustischen Eigenschaften haben:

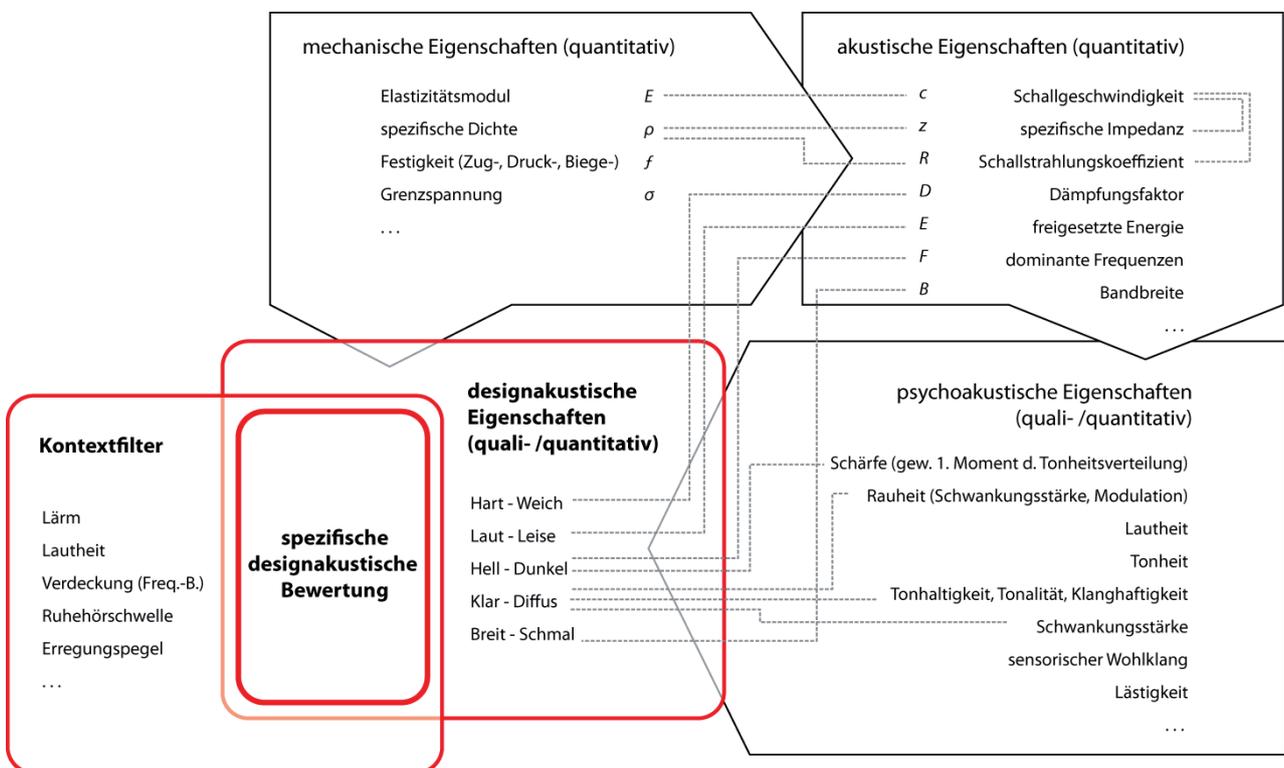


Abb. 2.5.e: Zusammenhänge der physikalischen Einflussgrößen (mechanisch, akustisch) auf die durch Nutzung bzw. Anregung resultierende Systemantwort (obere Zeile) und den klassischen psychoakustischen Eigenschaften mit Sicht auf die Formulierung eines Designakustischen Eigenschaftsmodells unter Einbezug kontextueller Größen (rote Rahmen)

3 DESIGNAKUSTISCHE ANALYSE UND DIAGNOSE

„Die Akustikingenieure sind vielleicht noch keine wirklich guten Hörer, aber sie sind immerhin dabei, ihr Instrumentarium unserer Art des Hörens anzupassen“ [SCHAF10].

3.1 Betrachtung und Einordnung referenzieller Konzepte und Forschungen

Bezogen sich die vorangegangenen Ausführungen auf die mathematischen und signaltheoretischen Aspekte und gingen auf die Interaktion zwischen mechanischen und akustischen Eigenschaften und die klassischen psychoakustischen Aspekte ein, so formuliert das folgende Kapitel die wahrnehmungspsychologischen Betrachtungen, welche zur Formulierung eines designakustischen Bewertungsmodells notwendig sind. Eingehend werden psychoakustisch verwandte Konzepte und Forschungen vorgestellt und diese bezüglich der Relevanz für die Arbeit eingeordnet.

Darauf aufbauend wird die bereits einleitend in den Zielstellungen und Eingrenzungen der Arbeit (I.1.5) beschriebene Werkzeugkette von der geeigneten Datenakquisition und -verarbeitung, über die designakustischen Material- und Werkstoffcharakterisierung bis hin zur ergebnisorientierten Klassifizierung Material- und Werkstoffklassen und deren Visualisierung formuliert, tiefergehend beschrieben und verifiziert.

Sucht man, wie bereits im Kapitel II beschrieben, die inhaltliche Auseinandersetzung mit Akustik im Allgemeinen und mit der material- und werkstoffbezogenen Akustik im Sinne der Arbeit, so erscheinen die aktuellen Konzepte und die bis heute etablierten Fachrichtungen auf den ersten Blick heterogener, als sie tatsächlich sind. Allen gemein ist die auditive Beschreibung oder Gestaltung von Umwelt, Raum oder Objekt in Bezug auf den Menschen. Oft werden dabei weitere Sinneskanäle einbezogen, da sich das Gehörte im Sinne einer ganzheitlichen Wahrnehmung nicht von den anderen Sinneskanälen trennen lässt und im Kontext mit Umwelt, Raum oder Objekt steht.

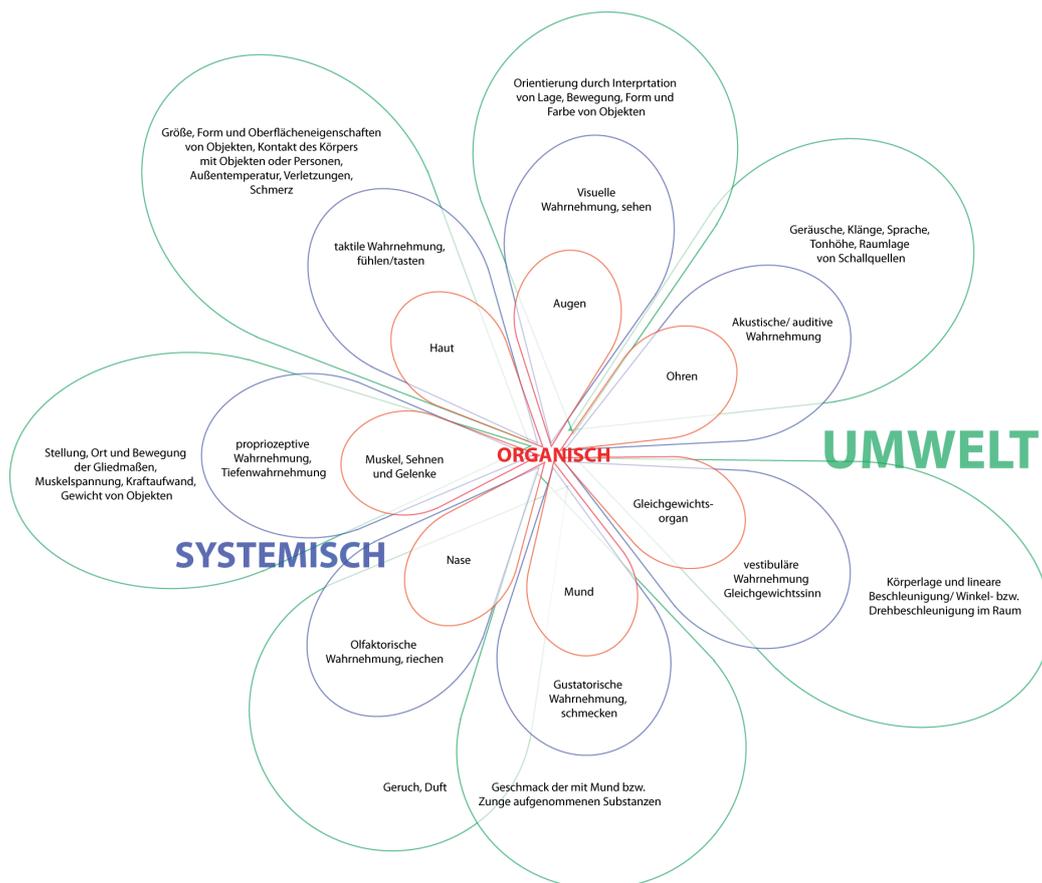


Abb. 3.1.a: Verkopplung der menschlichen Sinnesorgane mit den systemischen Wahrnehmungsleistungen, in Bezug auf die Interaktion zur Umwelt

Auf die wahrnehmungsbezogene Beschreibung, Bewertung und Gestaltung von Tönen und Klängen aus ursprünglicher, bzw. klassischer Perspektive, wurde bereits in Kapitel II an verschiedenen Beispielen von Klangerzeugung, Musik und Musikinstrumentenbau eingegangen. Diese sollen hier nicht weiter behandelt werden.

Ebenso relevant wie die klanglichen Zugänge im Hinblick auf das akustische Verhalten von Materialien und Werkstoffen sind jedoch die auditiven Phänomene, die sich unter dem Begriff „Geräusch“ im Sinne zeitlicher und spektraler Geräuschmuster zusammenfassen lassen, da diese in der Gebrauchsakustik eine ebenso wichtige Rolle spielen, wie die dort auftretenden Klänge.

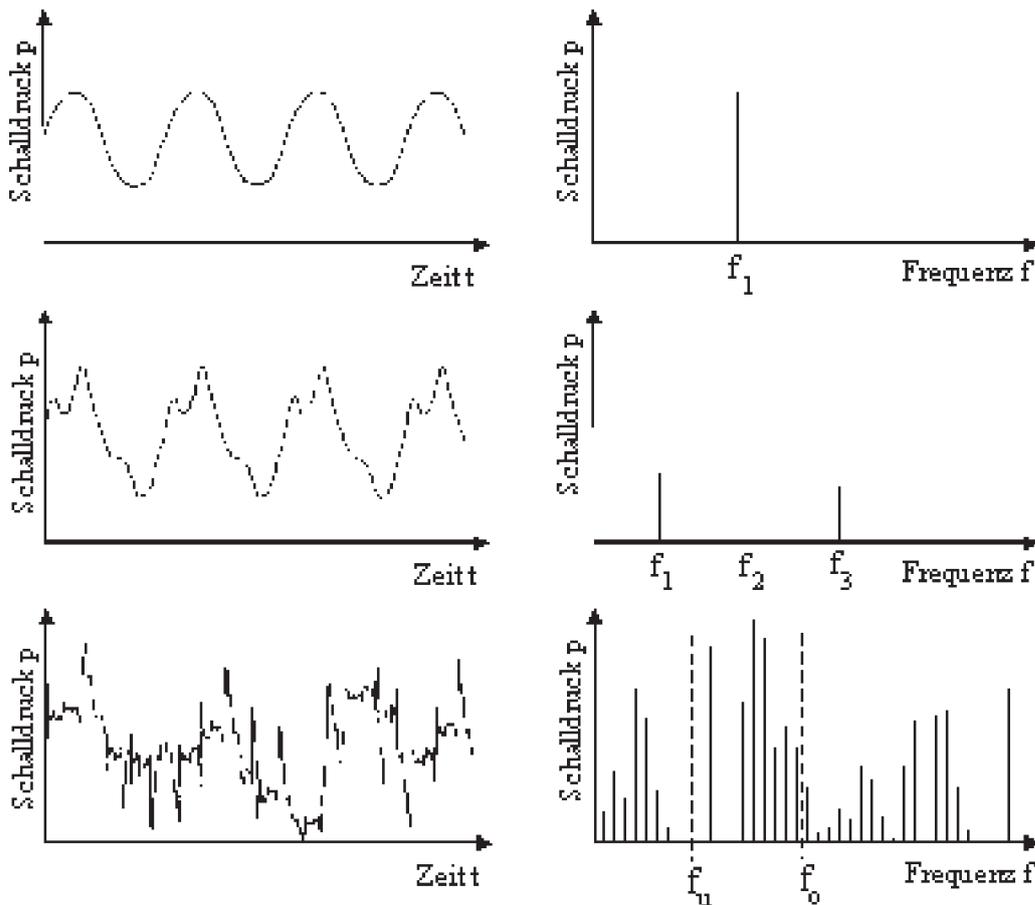


Abb. 3.1.b: prinzipielle zeitliche und spektrale Differenzierung Ton, Klang und Geräusch (v. o. n. u.)

Begründet in dieser Relevanz finden sich deswegen auch Arbeiten, welche sich mit dem Thema Geräusch auf gestalterischer Ebene auseinandersetzen. Nur kurz sei hier auf die künstlerischen Arbeiten von Luigi Russolo verwiesen, der sich in seinem 1913 formulierten Manifest „L'Arte die rumori“ (Die Kunst der Geräusche vgl. [RUS1916]) ausgehend von dem Geräuschpegel moderner Großstädte und Maschinen mit der Erzeugung von sog. „Geräusch-Musik“ auseinandersetzte und diese über ein geeignetes Beschreibungsvokabular charakterisierte (Heuler, Dröhner, Klirrer, Scharrer, Knaller, Gurgler, Summer oder Zischer, in Intensitätsabstufungen: basso, medio, acuto, piu acuto). Diese Verkopplung von Klang und Geräusch und die qualitative und quantitative Bewertung beschreibt hier auf künstlerischer Ebene im Kern beispielhaft den Ansatz des in der Arbeit vorgeschlagenen designakustischen Bewertungsmodells.

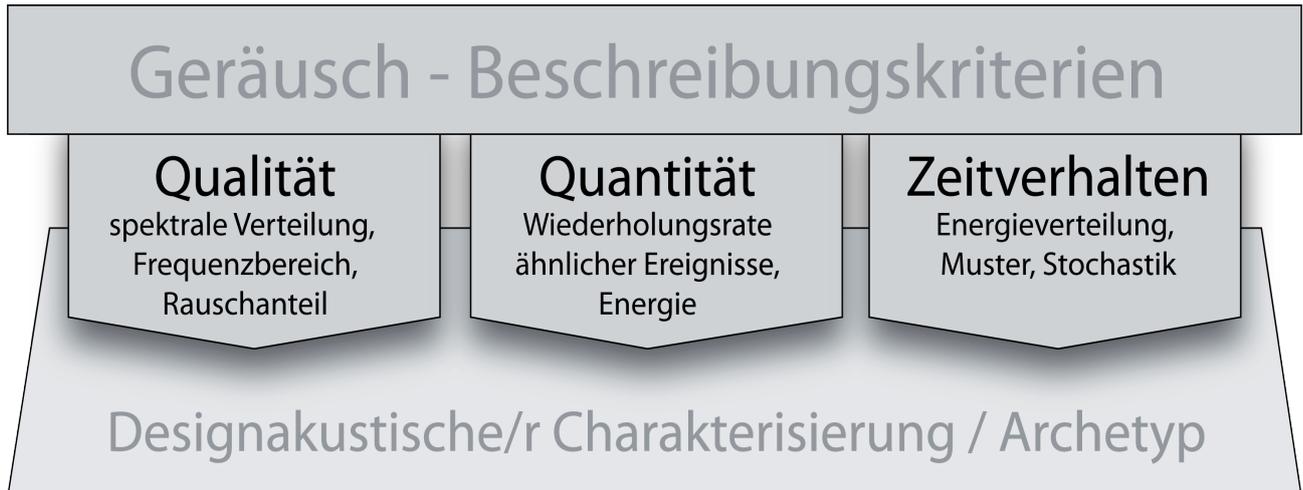


Abb. 3.1.c: prinzipielle Beschreibungskriterien, wie sie bei der Klanganalyse angewendet werden, greifen ebenso für die Beschreibung von Geräuschen

Aus den beschriebenen und anderen freien künstlerischen Zugängen sind an der Schnittstelle zwischen Kunst, Gestaltung und Ingenieurwissenschaft bis heute verschiedene spezifische Design-Fachrichtungen erwachsen, deren Positionierung und aktueller wissenschaftlicher Stand, soweit ein Bezug zur vorliegenden Arbeit besteht, im Folgenden kurz eingeordnet werden sollen.

So stand im Industrial Design, welches an der Schnittstelle Kunst, Handwerk, Industrie- und Ingenieurtechnik anzusiedeln ist, zu Beginn der Entwurf serieller bzw. industrieller Produkte im Vordergrund, wohingegen die Psychologie der auditiven Wahrnehmung noch weitestgehend vernachlässigt wurde. Einige Verweise, welche die intensive Auseinandersetzung mit den Wechselwirkungen von Produktakustik und Design belegen, lassen sich ab den 1950er Jahren finden. Zu dieser Zeit begannen Gestalter wie Loewy damit, sich fachlich darauf zu fokussieren, da mit wachsender Anzahl gleichartiger Industriegüter neben Form und Funktion auch die Differenzierung über ein gutes Produktsounddesign immer relevanter wurde – auch um den Marktwert weiter zu steigern: „Ein Kühlschrank muss schön sein, also muss er auch – gut klingen. ... , dass ein geräuschvoller Betrieb schlechte Gestaltung verrät und Lärm unnötige Energievergeudung bedeutet“ [LAN1992].

Der „Klang“ als Feedback von Funktion und Qualität, wie er sich analog auch für das designakustische Modell dieser Arbeit definiert, ist darüber hinaus als grundlegende Überwachungs- und Kontrollfunktion des Ohres im Arbeitsprozess, als Funktionsbestätigung oder Qualitätsmerkmal zu verstehen: „Ein Schlossermeister, der das Gesellenstück prüft: Es muss beim Schließen des Schlosses klingen „wie Musik“, Schubladen, die beim Betätigen „flutschen“, Handwerker ermittelt über das Klopfen, ob Luft in den Rohren ist, Früchte werden abgeklopft, um akustisch zu prüfen, ob diese reif sind“ (Langguth in [LUCK02]).

Bis heute haben sich diverse Vertiefungsrichtungen mit akustischem Bezug ausgebildet. Versucht man die oft synonym verwendeten Begrifflichkeiten, wie Akustik Design, Audio Design, Sounddesign, Produktsounddesign, Klangdesign, Soundscape Design oder eben auch Designakustik einzuordnen, wird die interdisziplinäre Vernetzung des Gestalters deutlich.

So systematisierte beispielsweise Schafer, Komponist und Klangforscher, in seinem 2010 erschienenen Beitrag „Die Ordnung der Klänge – Eine Kulturgeschichte des Hörens“ die verschiedenen Arbeitsrichtungen und formulierte die folgende Systematik (nach Langguth in [LUCK02]):

1. Herkömmliches Klangdesign und Produktsounddesign. Lärmvermeidung und Geräuscheindämmung (Hausgeräte, Lebensmittelbranche, Auto und Verkehr)
2. Raumklang und Raumakustik (Installationen in Theatern und Museen)
3. Sounddesign in Hörfunk und Film
4. Corporate Sound und Neue Medien
5. Soundscape und Akustische Ökologie

Kann man Begriffe, wie Klangdesign, Akustik- oder Audio Design, Sounddesign etc. aktuell im Zuge der Digitalisierung und Virtualisierung durch verstärkten Einsatz von Software als immer körperloser interpretieren, so verraten Namen, wie Produktsounddesign, Designakustik oder Soundscape Design die Verkopplung mit physischen Objekten oder Räumen. Das letztgenannte Arbeitsgebiet wird künftig ohne Zweifel immer relevanter, soll aber in dieser Arbeit nicht tiefergehend betrachtet werden. Die genannten objektbezogenen Fachrichtungen setzen sich mit dem komplementär relevanten Teil des gestalterischen Prozesses auseinander, welcher die akustischen Gebrauchseigenschaften von Gegenständen bzw. Objekten untersucht. Da Menschen, trotz Virtualisierung, auch weiterhin objektbezogen interagieren werden, und gerade im Bereich der Werkstoffentwicklung und des nachhaltigen Materialeinsatzes immer neue Fragestellungen entstehen, ist dieses Thema quasi als Bindeglied einzuordnen und deswegen Kern dieser Arbeit. Am weitesten kultiviert wurde die strukturdynamische und werkstoffbezogene Gebrauchsakustik aus der ingenieur-technischer Sicht als Werkzeug im Automobilbereich (z. B. wird der Klang der zuschlagenden Tür als besonders wichtig betrachtet: „... rühmte sich der Generaldirektor von Chevrolet, als die 1957er Modelle herauskamen: „Dieses Jahr haben wir das schönste Türklappern herausgebracht, das wir je hatten – den Klang des großen Wagens ...““ [VAN1957]). Dort zeigt sich die Relevanz von Akustik am Beispiel eines der wichtigsten Konsumgüter unserer industrialisierten Gesellschaft. Die inhaltlichen Fragestellungen reichen dabei von lärm- und komfortbezogenen Themen zur Geräuscheindämmung und -kultivierung bis hin zu markenspezifischen Aspekten, um fahrzeugtypische Differenzierungs- bzw. Alleinstellungsmerkmale zu etablieren. Diese Betrachtungstiefe setzt sich auch in anderen Bereichen, wie z. B. der Werkzeugüberwachung an Maschinen immer weiter durch.

Heute haben sich entsprechend der verschiedenen Baugruppen und Wirkprinzipien eigene Disziplinen mit zum Teil sehr spezialisierten Fachgruppen herausgebildet. Zu den lärm- und komfortbezogenen Themen finden sich heute zahlreiche spezifische Arbeiten, z. B. zur Schalldämpfung oder -dämmung von Abgasanlage, Fahrzeuginnenraum, Motorengeräusch, Reifenabrollgeräusch oder Fahrtwindgeräusch. Zahlreiche weitere ließen sich aufzählen.

Hier sei auf die Arbeiten von Haverkamp verwiesen, der sich im Kontext des Automobilbereichs mit Fragestellungen der synästhetischen Wahrnehmung des Fahrgastes auseinandersetzt. Das Fachgebiet der Synästhesie untersucht die Verknüpfungen verschiedener Sinneswahrnehmungen, bei denen ein Sinn direkt durch einen Stimulus angeregt wird und dadurch eine weitere Wahrnehmung eines anderen Sinnes auslöst wird, ohne, dass dieser selbst stimuliert wurde (vgl. [HAV2009]). „Die am häufigsten diskutierte Form der Synästhesie ist die Auslösung visueller Wahrnehmung durch auditive Stimulierung („Farbenhören“), bei der Farb- und (seltener) Formwahrnehmungen von Schallereignissen ausgelöst werden.“ [HAV2008]. Laut Haverkamp sollten neben dem Hören weitere Sinne in die Betrachtungen einbezogen werden. Die Beschreibung der Wahrnehmung kann dann durch sog. Intermodale Analogien, Assoziationen oder Metaphern erfolgen. Auf die kognitive Stufe der Verbindung durch mathematische oder physikalischer Analogienbildung geht Haverkamp nicht genauer ein, wodurch die synästhetischen Beschreibungen real aber nicht spezifisch quantifizierbar bleiben.

Ähnlich ausgerichtete Untersuchungen finden sich bei den Arbeiten von Luckner, der versucht die Akustik aus der gestalterischen Haltung heraus zu beeinflussen, indem er diese in den Gesamtkontext der menschlichen Wahrnehmung einbindet. Das Ergebnis wird dabei ebenfalls metaphorisch als die Aufsummierung der gestalterischen Gesamtwirkung beschrieben. Er begründet dies wie folgt: „Nun entzieht sich der Bereich des Auditiven ja nicht komplett dem Messen und Bewerten. Die Frage ist nur, ob die gemessenen Daten relevante Aussagen für eine ästhetische Einordnung des Materials geben. Zu diesem Aspekt gibt es zwar zahlreiche

Untersuchungen, die Kategorienbildung von Klängen und Tönen betrieben haben, aber aus den oben genannten Gründen sind die daraus gewonnenen Erkenntnisse eben nur Bruchstücke einer gesamtheitlichen Erfahrung, mit persönlichen, kulturellen und sozialen Konnotationen“ [LUCK02].

Luckner bezieht sich bzgl. der Quantifizierbarkeit von Akustik zur Einordnung in den gestalterischen Prozess z. T. auf die Arbeiten von Blutner (siehe Kap. II.5), der seinerseits im Fachgebiet der sog. Psychoinformatik forscht, einem „... Teilgebiet der Akustik im Grenzbereich zwischen Wahrnehmungspsychologie, Marktforschung und Ingenieurwesen“ [BLU2013] mit dem Ziel die akustischen Eigenschaften von Produkten gezielt zu gestalten. Dabei werden für Schalleurteilung klassische psychoakustische Analysen verwendet, welche darüber hinaus über statistische Auswertung und ein sog. „Mapping“ auf die Wechselwirkungen der Sinneseindrücke untersucht werden. Ähnlich dem Gedanken der Arbeit folgend werden bei Blutner Geräusche, bzw. Produktsounds synthetisch erzeugt, um so Zielsounds zu generieren, die den Produkten ein individuelles akustisches Profil geben, um so Eigenschaften, wie z.B. Qualität unterbewusst zu kommunizieren. Um diese Prozesskette methodisch reproduzierbar abzubilden, wird ähnlich dem Ansatz der Arbeit ein Softwarewerkzeug – das sog. PATS (psychoakustisches Test- und Analysesystem) – verwendet, welches die einzelnen Prozessschritte bearbeitet [BLU2009]. Dies zeigt, dass sich eine komplette Reduktion auf akustische Beschreibungen, auch wenn diese komplex sind, nicht in jedem Fall zielführend sein kann.



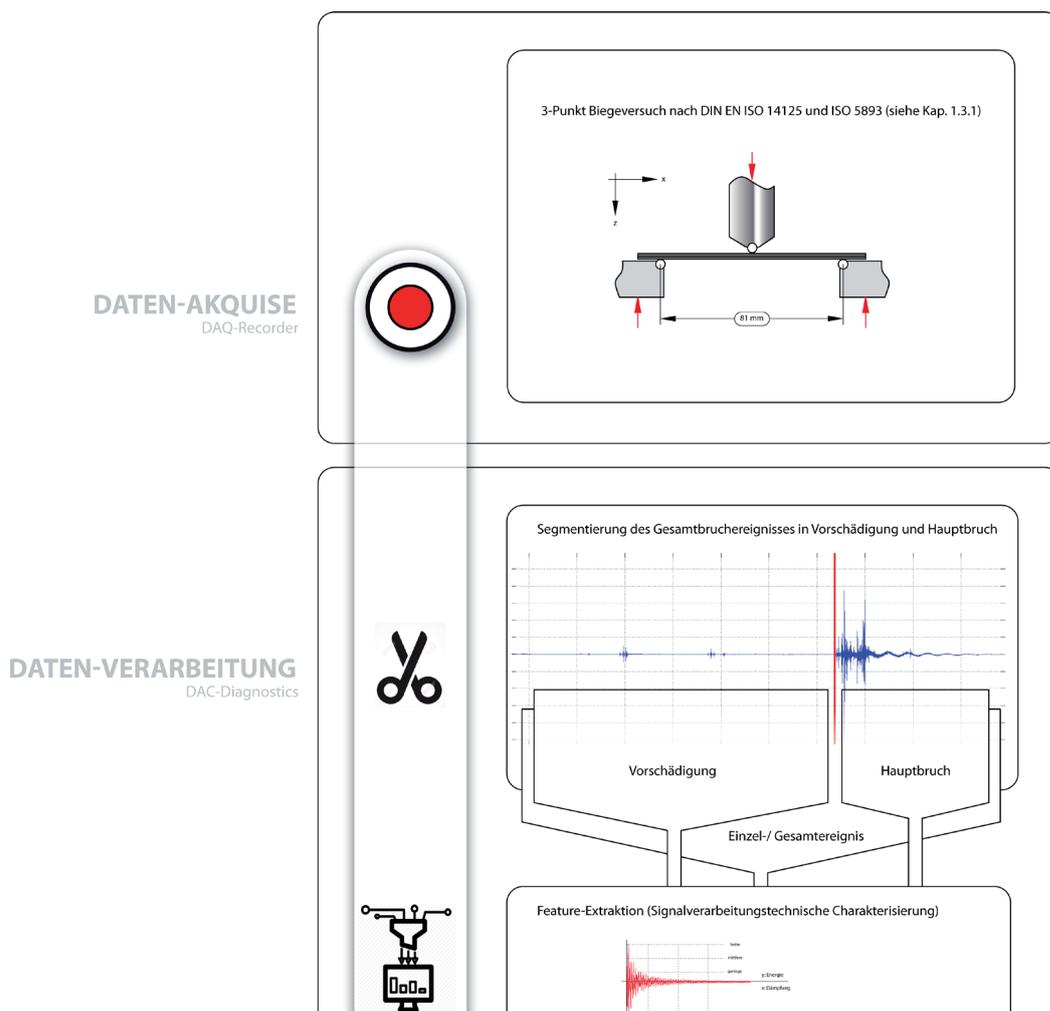
Abb. 3.1.d: Strukturierung des psychoakustischen Werkzeugs „PATS“ (psychoakustisches Test- und Analysesystem) nach Blutner [BLU2009]

Obwohl es bei Blutner hinsichtlich der Zielsoundsynthese, bzw. Auralisation gewisse Ähnlichkeiten zu dem in der Arbeit vorgeschlagenen Methode gibt, unterscheidet sich das im folgenden vorgeschlagene Modell vor allem durch den klar abgegrenzten werkstofflichen Bezug und zielt so sehr spezifisch und grundlegend auf die Material- und Werkstoffauswahl bei der Produktgestaltung und weniger auf die strukturellen Gesamteigenschaften eines Produkts.

3.2 Designakustisches Modell zur Material- und Werkstoffanalyse und Klassifikation

In Reflexion auf die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen komplementären Untersuchungen und Auswertungen, unter Berücksichtigung der geschilderten referenziellen Konzepte und Forschungen zu Materialien, Werkstoffen und deren akustischer Wahrnehmung, Akzeptanz und Gestaltung wird im Folgenden ein auf die spezifischen Belange im Industrial Design angepasstes designakustisches Modell zur Material- und Werkstoffanalyse und zur Klassifikation vorgeschlagen.

Dabei werden die notwendigen Schritte, die zu einer gezielten, gestalterisch orientierten Material- und Werkstoffauswahl führen ausführlich beschrieben. Darüber hinaus werden auch weiterführende, bzw. vertiefende Experimente und Untersuchungen, die mit der Formulierung des Modells in Zusammenhang stehen, beschrieben und eingeordnet. Einleitend gibt das folgende Schaubild einen grafischen Überblick zur vorgeschlagenen Methode.



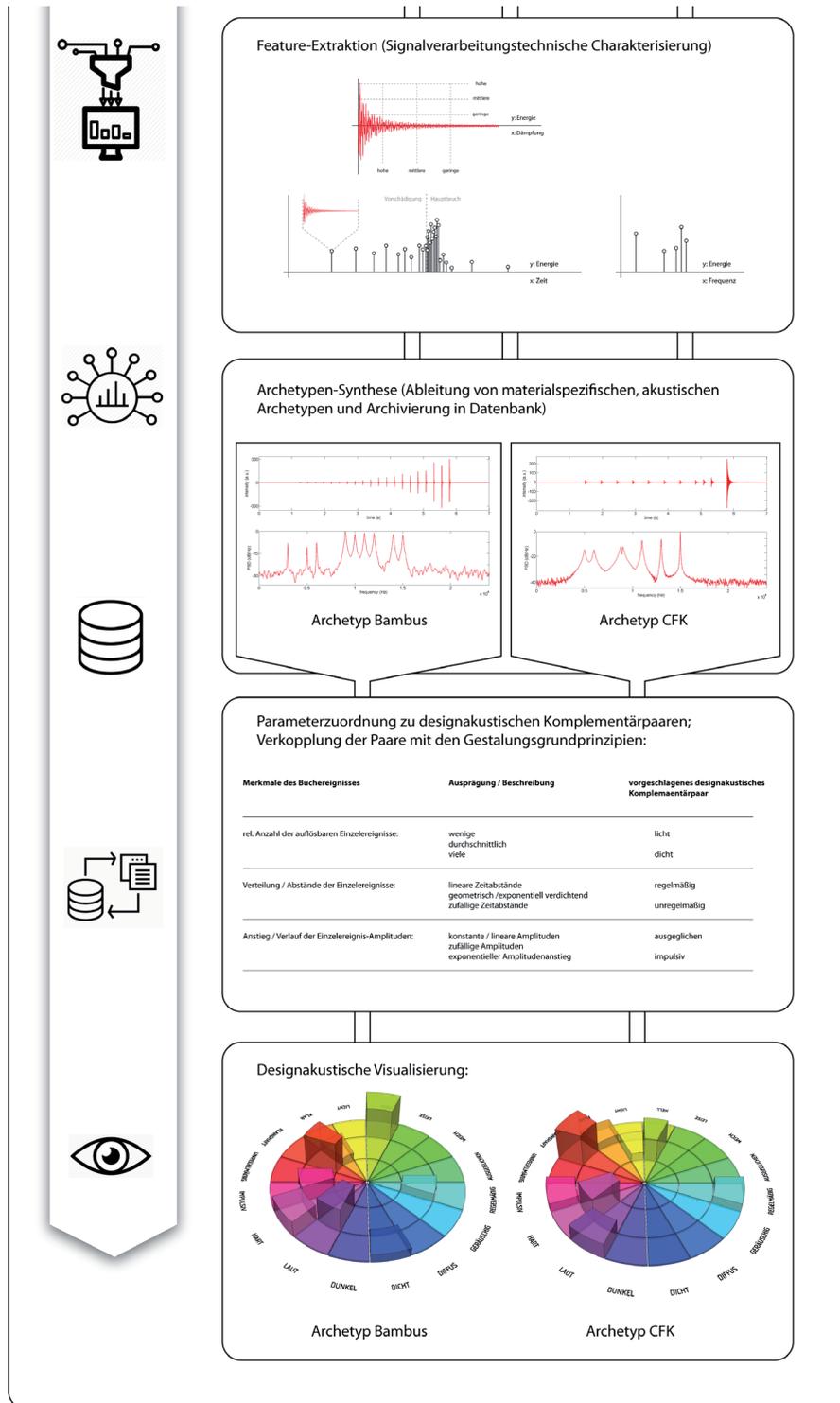


Abb. 3.2.a: Schema der designakustischen Analyse mit den grundlegenden Systembausteinen zur Versuchsdurchführung, Datenakquisition, Analyse, Synthetisierung, Klassifizierung und Visualisierung

Generell untergliedert sich der für die designakustische Bewertung von Materialien und Werkstoffen vorgeschlagene Arbeitsablauf in die folgende Schritte:

1. Probenaufbereitung und -deformation über standardisierten 3-Punkt Biegeversuch mit geometrisch egalisierten Werkstoff- und Materialproben (ausführliche Beschreibung siehe Kap. 1.3.1)
2. Datenakquisition und Datenaufbereitung / Datensegmentierung der relevanten Schädigungsphasen (siehe auch Kap. 2.4.4)
3. Synthetisierung der material- und werkstoffspezifischen Features für den globalen Werkstoffbruch und die einzelnen Schädigungsphasen (auf Grundlage der ab Kap. 2.4 ff. Betrachtungen und Grundlagen) für die Modellierung von Gesamtbruchereignissen
4. Modellierung / Ableitung von spezifischen und allgemeingültigen Material- oder Werkstoffarchetypen
5. Ähnlichkeitsanalyse / Klassifizierung und Einordnung der ermittelten designakustischen Archetypen
6. Datenvisualisierung der Ergebnisse unter Anwendung der designakustischen Visualisierungsmethode

3.2.1 Probenaufbereitung und Versuchsdurchführung

Die geometrische Aufbereitung der Proben wurde bereits im Kapitel 1.3.1 hinlänglich beschrieben. Dort wurde auch die Anlehnung an die DIN EN ISO 14125 [DIN14125] erwähnt, die sich dadurch begründet, dass gleichartige Bedingungen, wie sie bei der klassischen Werkstoffprüfung vorausgesetzt werden, auch für die akustische Charakterisierung von Materialien sinnvoll eingesetzt werden sollten. Anhand der vereinheitlichten Probendimensionierung sollten möglichst elementare und unverfälschte Erkenntnisse hinsichtlich der Bruchvorgänge gewonnen werden. Die akustischen Gesamteigenschaften beim Bruch werden jedoch nicht nur von der Bruchzone und den dort ablaufenden Vorgängen erzeugt. Die freigesetzte Energie induziert auch ein Nachschwingen in der Probengeometrie (siehe hier Kap. 2.3, Abb. 2.3.d). Die Frequenzen sind dabei niedriger als jene, die an den Bruchzonen auftreten und werden neben den mechanischen Eigenschaften im Wesentlichen auch durch die spezifische Geometrie bestimmt (siehe dazu auch die Ausführungen zu Chladni Kap II.5, Abb. II-u).

Im Rückschluss, dass die gegenständliche Welt der Gebrauchsgüter oft nicht aus normierten, geometrischen Körpern besteht, sondern aus einer Vielzahl verschieden ausgeformter Gegenstände, an dieser Stelle deswegen einige Bemerkungen zu den akustischen Einflüssen der Geometrie auf die klanglichen Aspekte, die beim perspektivischen Transfer der experimentellen Ergebnisse auf differenzierte, bzw. komplexere Geometrien Berücksichtigung finden müssen, da die Klangeigenschaften neben den zeitlichen Komponenten wesentlicher Bestandteil der designakustischen Charakteristik sind.

Die verwendeten quaderförmigen Proben mit der beschriebenen Geometrie von $100 \times 15 \times 1,4 \text{ mm}^3$ erzeugen, wie bereits erwähnt eine Reihe von Schwingungsmoden, deren Spezifik und Geometrieabhängigkeit als Teil dieser Arbeit über Variationen der Struktur (Länge der Probe) und darüberhinausgehend auch durch einen Materialwechsel bei gleichbleibender Struktur simulativ untersucht wurden. Als Werkzeug wurde hierzu die Software WaveImage der Fa. Gfai Tech [WAV21] für die simulative Berechnung der Modalanalysen gewählt, welche unter dem Gesichtspunkt der kleinen, experimentell schwer prüfbar Strukturproben sehr gut geeignet ist.

Die durch die Simulation nachzuweisende These war, dass sich bei gleicher Geometrie aber unterschiedlichen Materialeigenschaften oder bei gleichem Material aber unterschiedlicher Geometrie gleiche Schwingungsmoden finden, welche lediglich frequenzseitig verschoben sind.

Dazu sei angemerkt, dass die akustische Reaktion der Prüfkörper auf Belastung bzw. Deformation sowohl reversible als auch irreversible Anteile enthält. Auf impulsförmige Anregungen, wie sie durch den Bruchvorgang generiert werden, folgt ein Schwingverhalten der Struktur, das durch die mechanischen Eigenschaften der Probe, die Anregungsbedingungen und die experimentellen Rahmenbedingungen gegeben ist.

Wie bereits gezeigt wurde, gibt es vor dem Hauptbruch, der zur totalen Zerstörung der Probe führt, viele Mikrorisse, die lokal als impulsförmige Anregungen Energie in die Struktur einbringen. (siehe Kap. 2.3 ff.) Dabei ist die Probe noch formstabil. Obwohl die Probe schon kleine irreversible Schädigungen aufweist, wird das klangliche Verhalten davon kaum beeinflusst.

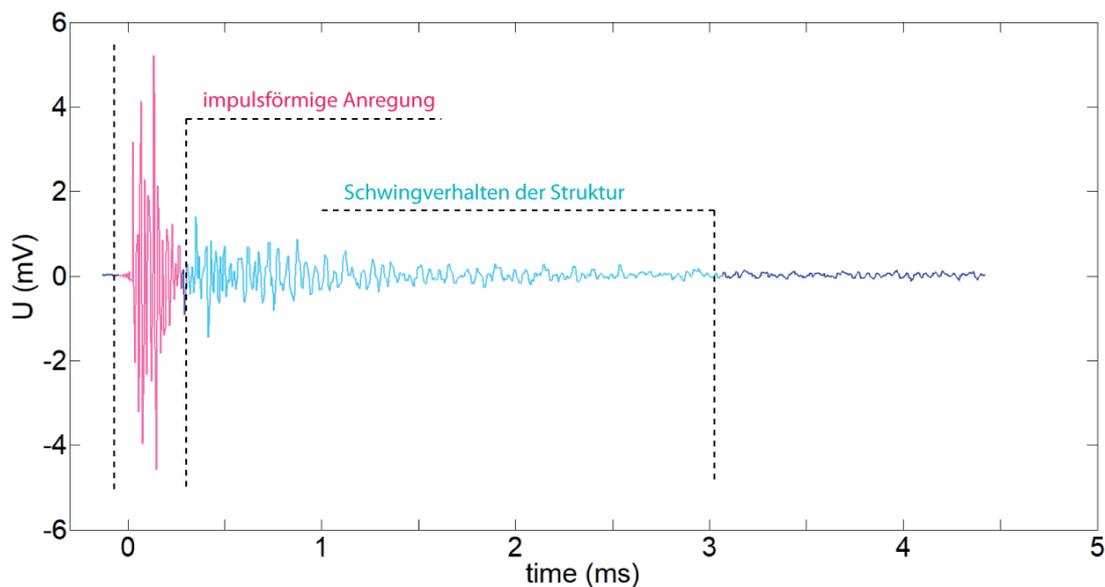


Abb. 3.2.1.a: Mikroriss und Systemantwort am Beispiel von Bambus im Sinne des Modalexperiments

Jede dieser Anregungen geht nach der kurzen Rissphase in Schwingungen über (Abb. 3.2.1.a). Diese Situation ist vergleichbar mit der akustischen Anregung bei der Modalanalyse durch den Impulshammer. Die Anregung im quasi „modalen“ Experiment übernehmen die kurzzeitigen mikroskopischen Rissereignisse. Diese konzentrieren sich im Zugbereich des Biegeträgers in einer Zone von etwa 10 mm in Längsrichtung über die komplette Probenbreite. Unabhängig von der Anregungsenergie sind die dabei entstehenden spektralen Antworten weitgehend identisch.

Da die Proben für eine konventionelle Modalanalyse sehr klein sind und mehrere mechanische Sensoren kaum platzierbar wären, wurde auf ein Experiment verzichtet. Es sei darauf hingewiesen, dass es inzwischen Entwicklungen gibt, die geregelte und reproduzierbare Anregungen extrem kleiner Strukturen ermöglichen [HER2021]. Allerdings wäre eine sinnvolle Erfassung der Schwingungen nur sehr aufwendig mittels Laservibrometrie möglich. Da das Schwingungsverhalten aber nicht im Fokus der Untersuchungen stand, wurde lediglich das prinzipielle Schwingungsverhalten simuliert. Dabei kam es nicht auf eine exakte Widerspiegelung der Schwingformen und die Verteilung der Eigenfrequenzen, sondern auf die prinzipiellen Relationen bezüglich der Variation von Materialparametern und Probenformen an.

Verglichen werden im Folgenden virtuelle Proben unterschiedlicher Längen mit den (mittleren) Materialparametern von Kiefernholz, sowie Proben gleicher Geometrie mit den Werten für Kiefer und CFK. Es wurde erwartet, dass sich sowohl geometrische Änderungen als auch andere Materialeigenschaften in den Simulationsergebnissen niederschlagen (vgl. [GLI2020]).

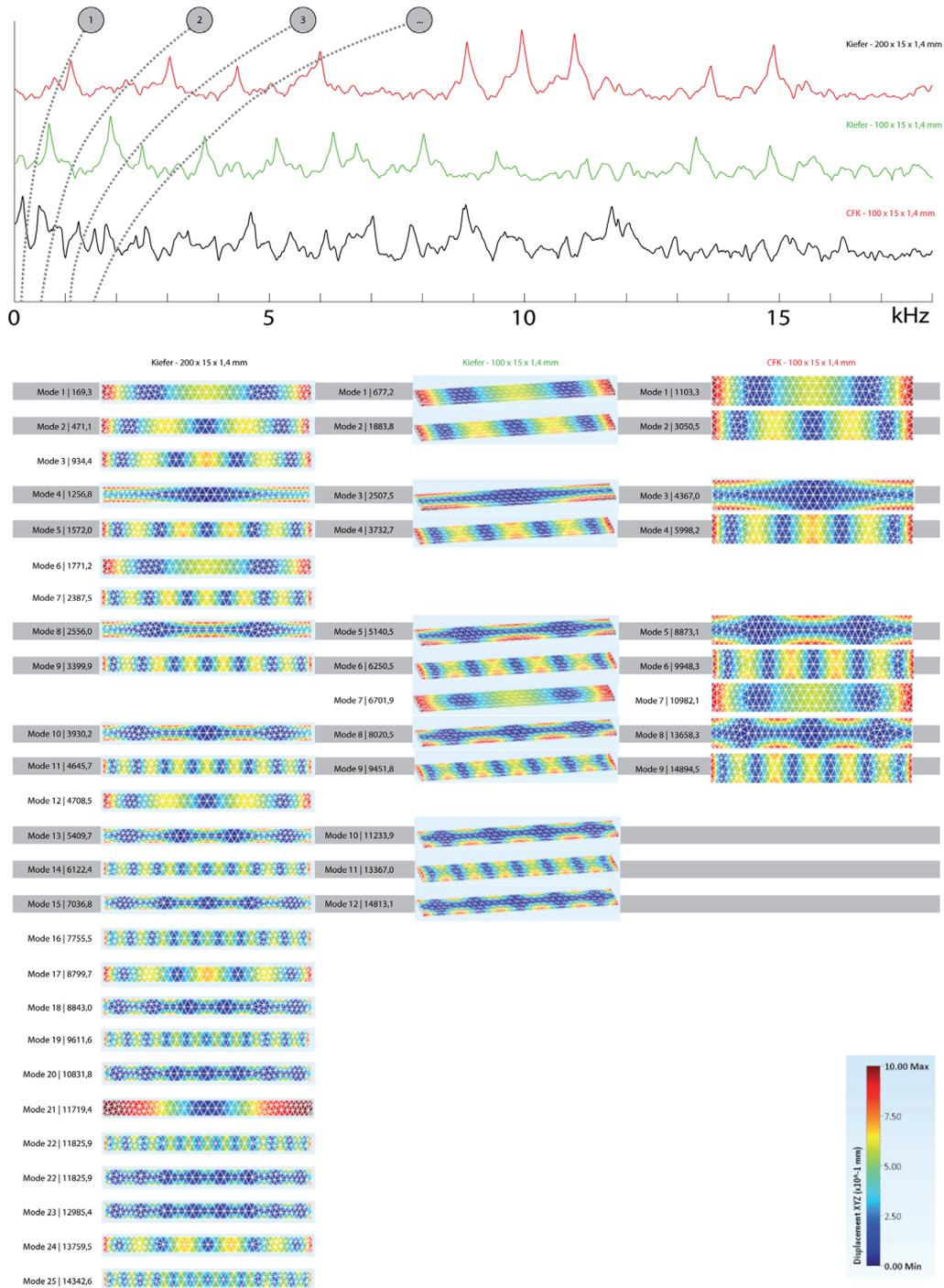


Abb. 3.2.1.b: Gegenüberstellung und grafische Auswertung der unterschiedlich dimensionierten Kiefernholz-Proben (linke und mittlere Spalte) und der materialvariierten CFK und Kiefernholz-Proben bei gleicher Geometrie (mittlere und rechte Spalte)

Die Berechnungen wurden, wie bereits erwähnt mit der Software WaveImage [WAV21] ausgeführt. Dabei wurde das sog. Mesh automatisch generiert. Da die Modendichte bei höheren Frequenzen sehr stark zunimmt, und nicht mehr von den breiten Frequenzverteilungen, wie sie durch die Rissinitiierung auftreten zu unterscheiden sind, wurden nur Frequenzen bis etwa 15 kHz berechnet. Damit wird der Frequenzbereich, in dem die Beeinflussung durch Materialeigenschaften und Probengeometrie wirksam sind gut erfasst.

Um die Simulation mit den 3-Punkt-Biegeversuchen kompatibel zu halten, wurde bei den Berechnungen von einer freien Aufhängung ausgegangen. Eine ähnliche Vorgehensweise wurde beispielsweise bei der Untersuchung zum modalen Verhalten von Holzprüfkörpern vorgeschlagen [KOU2017]. Die folgende Tabelle listet die für die Simulationen verwendeten Materialparameter auf.

Software	WaveImage
Module	Finite Element Analysis
Frequency Range	1.0 - 15000.0 Hz
Damping Interval	0.100000 - 0.500000 %
Mesh Element Size	0.002 - 0.004 mm
Nodes	2071
Elements	958
Material (Component 1)	CFK (NR)
Elastic Modul	8.80e+10 Pa
Poisson Ratio	0.30000
Elastic Modul	1500 kg/m ³

Software	WaveImage
Module	Finite Element Analysis
Frequency Range	1.0 - 15000.0 Hz
Damping Interval	0.100000 - 0.500000 %
Mesh Element Size	0.002 - 0.004 mm
Nodes	2071
Elements	958
Material (Component 1)	Kiefer (NR)
Elastic Modul	1.10e+10 Pa
Poisson Ratio	0.49000
Elastic Modul	500 kg/m ³

Abb. 3.2.1.c: Auflistung der für die Simulationen verwendeten Materialparameter für Kiefernholz und CFK (jeweils typische mittlere Material- bzw. Werkstoffwerte, Auszug aus Analyse gfai tech GmbH)

Für alle Simulationen wurde die sog. MAC-Matrix (Modal Assurance Criterion) berechnet. Dabei traten keine Abweichungen von der Hauptdiagonale auf, was eine eindeutige Zuordnung der Reihenfolge der Moden und Übereinstimmung der Schwingformen zulässt. Die einfache Probengeometrie erleichtert damit die Zuordnung vergleichbarer Moden. Die Simulationen zeigen dabei folgendes qualitatives Verhalten: Die vergleichbaren Schwingmoden des Materials mit dem höheren Elastizitätsmodul (CFK im Vergleich zu Kiefernholz) liegen bei höheren Frequenzen. Dieses Verhalten findet sich auch bei realen Bauteilen wie z. B. bei gleichartigen Elementen aus unterschiedlichen Hölzern für Musikinstrumente [GLI20]. Somit lässt sich die These, dass sich bei gleicher Geometrie aber unterschiedlichen Materialeigenschaften oder bei gleichem Material aber unterschiedlicher Geometrie gleiche Schwingungsmoden finden, welche lediglich frequenzseitig verschoben sind, bestätigen.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind besonders in Bezug auf Schritt vier – die Synthese / Archetypen-Extraktion – der vorgeschlagenen Methode zur designakustischen Material- und Werkstoffanalyse und -klassifikation relevant. Der Tatsache, dass Struktur und Material die Akustik beeinflussen, kann somit Rechnung getragen werden, weil sich die quasi „eingefrorene“ Modellierung des Klangs der definierten Probe mit den gewonnenen Daten besser beschreiben lässt. Dass der klangliche Anteil bei größeren Strukturen, wie realen Konstruktionen oder Gebrauchsgegenständen variiert, muss dann entsprechend berücksichtigt werden.

Nicht unerwähnt bleiben soll, dass darüber hinaus bei größeren Strukturen auch akustische Signaturen, ausgelöst durch Reibungsvorgänge an entsprechenden Fügestellen auftreten können, welche denen von Mikrorissen und Bruchvorgängen ähnlich sind. Einzubeziehen sind hier auch sich lösende adhäsive Verbindungen, wie zum Beispiel Verleimungen, wie sie im Möbelbau typisch sind.

Zur Einordnung und Bewertung wurden deshalb auch einige Experimente mit geleimten und verzinkten Holzelementen durchgeführt. Für diese Experimente wurden zwei Proben typen präpariert:

1. Verbindung nur auf Klemmung / Presspassung
2. Geleimte Verbindung / Klebeverbindung

Die bei Belastung der Struktur auftretenden physikalischen Prozesse können sich dabei aus den folgend beschriebenen Einzelereignissen zusammensetzen:

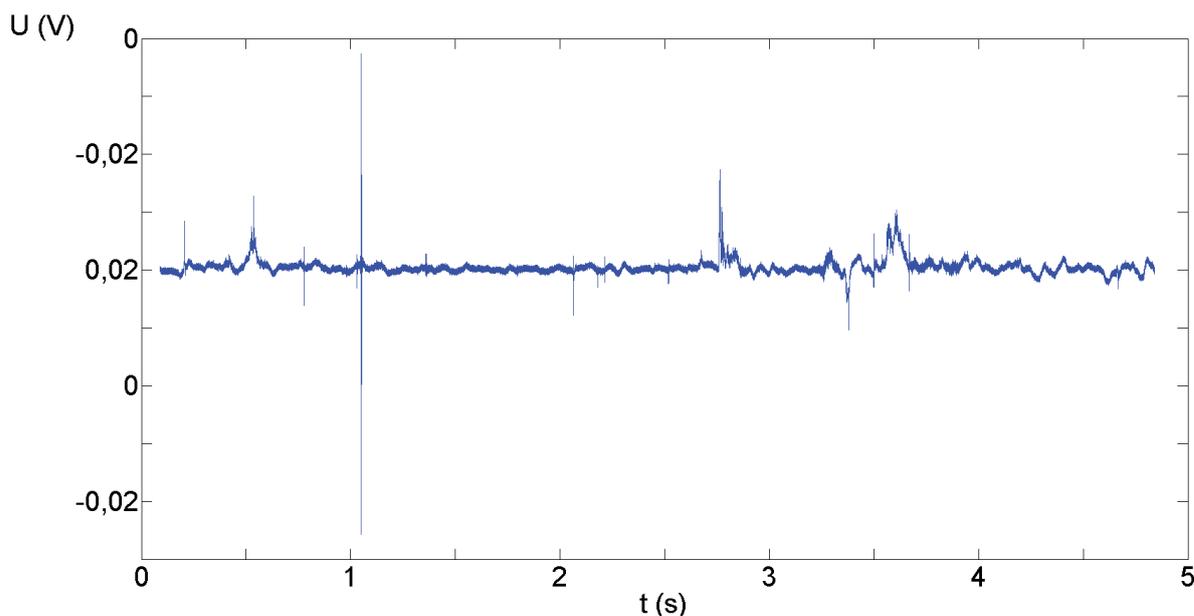


Abb. 3.2.1.d: Gleitreibung der auf Klemmung präparierten Verbindungsstellen (verzinkt wegen möglichst großer Kontaktfläche) emittiert nur wenige akustische Signale und lediglich kleinere bruchähnliche Ereignisse aufgrund von Unstetigkeiten, ähnlich Stick-Slip. Die Signale sind aufgrund ihres geringen Energiegehalts gut von tatsächlichen Brüchen differenzierbar

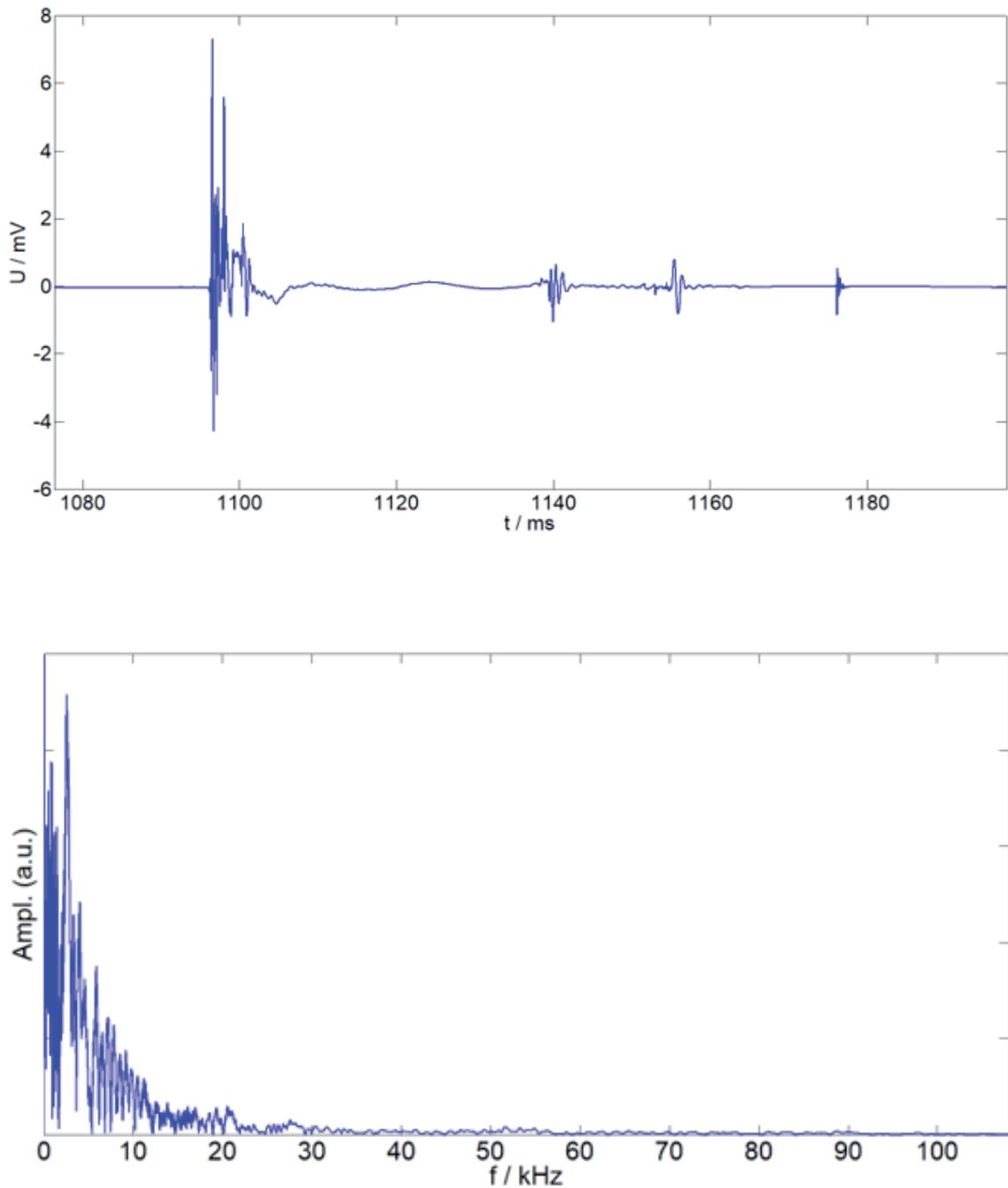


Abb. 3.2.1.e: oben: Lösen der Klebeverbindung (Bruchvorgang zwischen Grenzflächen); unten: Aus dem zugehörigen Spektrum (Power Density) geht hervor, dass keine höheren Eigenfrequenzen angeregt werden.

Bei Belastung geleimter und verzinkter Holz-Proben (Winkelform) löst sich zunächst die Leimverbindung. Im Zeitverlauf zeigen sich ähnliche Mikroereignisse wie bei Bruchexperimenten. Allerdings ist das spektrale Verhalten (hier gemittelt über den Zeitausschnitt) unterschiedlich und würde eine Unterscheidung der Ursachen durchaus ermöglichen.

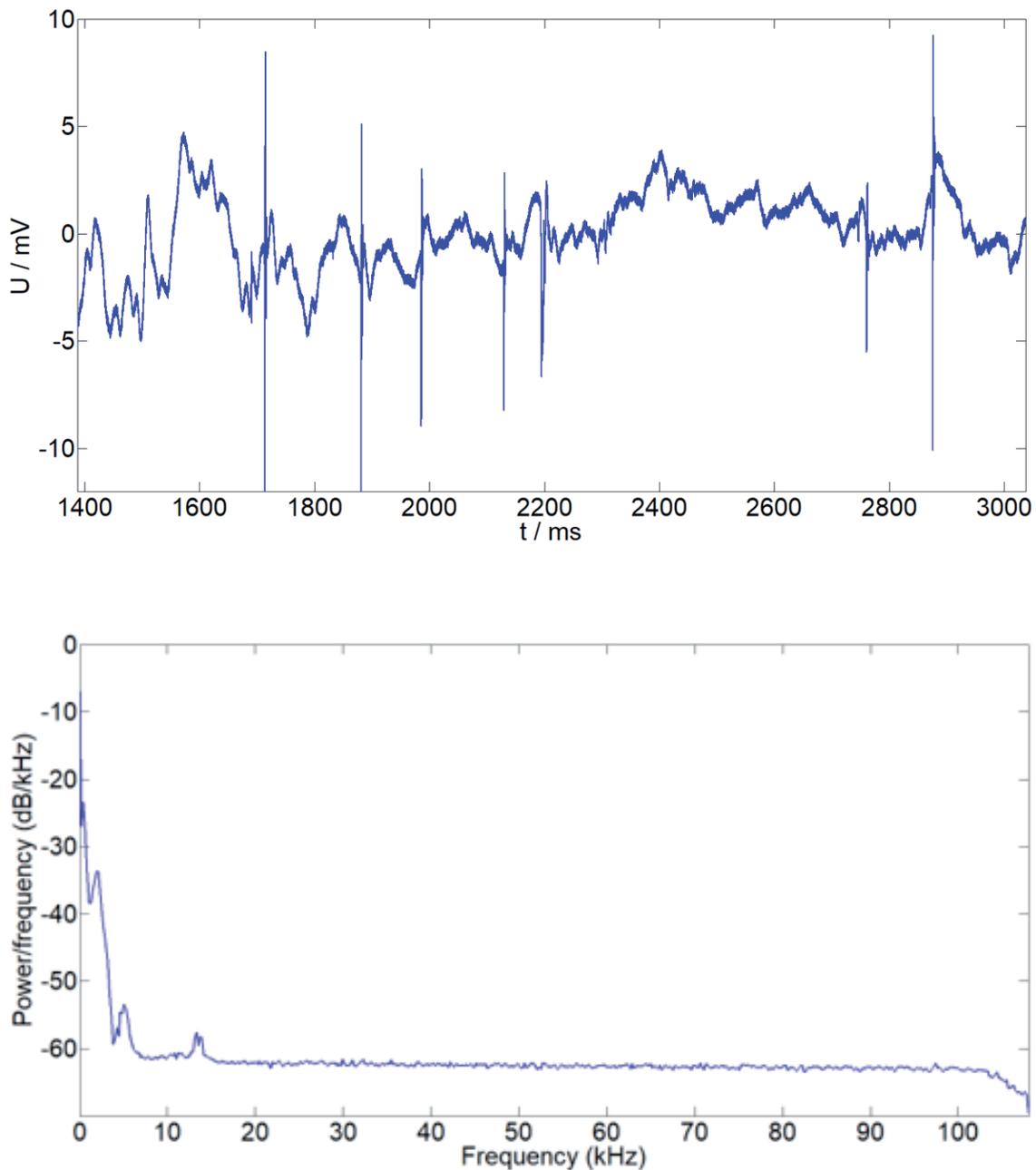


Abb. 3.2.1.f: oben: Zeitverhalten beim sog. Stick-Slip-Effekt aufgrund der Haftgleitreibung. Dieses Verhalten tritt auf, wenn die Haftreibung größer als die Gleitreibung ist. Es entsteht das typische „Stick-Slip-Muster“; unten: Aus dem zugehörigen Spektrum (Power Density) geht hervor, dass keine höheren Eigenfrequenzen angeregt werden

Aufgrund der stochastischen Mikrotopologie ist eine strenge Unterscheidung der Effekte teilweise schwierig. Diese war aber auch nicht Ziel der Untersuchungen, bzw. der Arbeit. Da diese Prozesse aber ähnliche Auswirkungen auf die designakustische Material- und Werkstoffanalyse und Klassifikation, wie die im Fokus stehenden Bruchereignisse haben können, sollten diese bei perspektivischen Untersuchungen, welche sich tiefgehend mit dem makroskopischen Kontext auseinandersetzen stärkere Beachtung finden, da sie für die gesamtheitliche Bewertung der Gebrauchsakustik ebenfalls bedeutsam sind.

3.2.2 Beschreibung der Datenakquisition und Datenaufbereitung

Im Folgenden sollen die an das Experiment und die Fragestellung angepasste Software-Werkzeuge beschrieben werden. Da die unter mechanischer Belastung auftretenden akustischen Reaktionen einen weiten Frequenzbereich überdecken, konnte dieser nicht mit einem einzigen Datenerfassungssystem akquiriert werden. Vielmehr wurden verschiedene Sensoren und Messkarten eingesetzt, die unterschiedliche Bereiche zum Teil überlappend abdecken konnten (vgl. [DATR], [LAB12]).

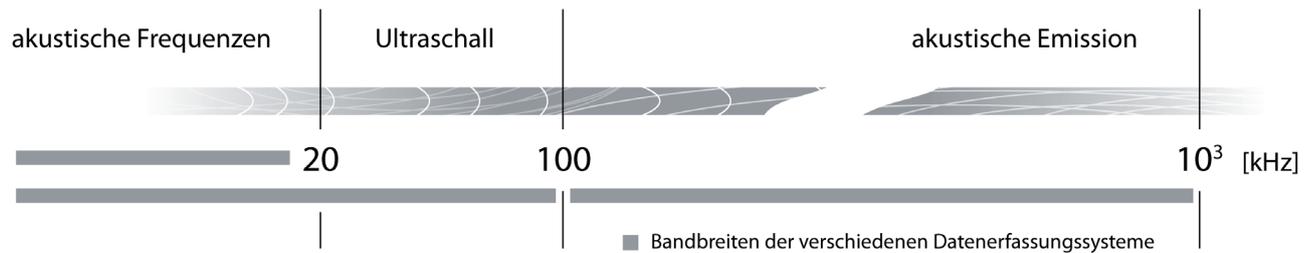


Abb. 3.2.2.a: designakustisch relevante Bandbreiten im Vergleich zu den Bandbreiten der zugehörigen Datenerfassungssysteme (vgl. mit der auf die Sensorik bezogenen Darstellung in Abb. 2.3.s)

Die konkret verwendete Hardware und die zugrunde gelegte Messanordnung wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln detailliert beschrieben, weswegen bezüglich der Positionierung der verwendeten Mikrofone vom Typ MTG MK301E der Firma Microtech Gefell auf Kap. 2.6, Abb. 2.6.c verwiesen sei. Diese wurden über die eingesetzte Messkarte vom Typ DT9847-2-2 der Firma DataTranslation [DATR] angesteuert. Der Lastauftrag und die Auflagerung erfolgte, wie in Kap. 1.3.1 und 3.2.1 beschrieben in Anlehnung an die DIN EN ISO 14125 [DIN14125]. Für den Lastauftrag wurde die bereits bei den Untersuchungen zur akustischen Emission verwendete elektromechanische Werkstoffprüfmaschine vom Typ Zwick Z020 genutzt (siehe Kap. 2.2, Abb. 2.2). Diese Werkzeugkette deckt den Hardwareteil der designakustischen Material- und Werkstoffanalyse und -klassifikation ab. Darüber hinaus wurden in den referenziellen Experimenten auch ultraschallakustische Sonden verwendet (vgl. [T10] und [HOL2013]).

Die für die Arbeit entwickelte Software in Form von designakustischen Analyse-, Synthese- und Visualisierungsmodulen wurden in MATLAB realisiert und so konzipiert, dass sie zum großen Teil verfahrensunabhängig einsetzbar sind. Sie wurden hinsichtlich des vorgeschlagenen Arbeitsablaufs für die designakustische Bewertung von Materialien und Werkstoffen über Skripte und Verknüpfungen miteinander verkoppelt, um den in Kap. 3.2 beschriebenen Arbeitsablauf abzudecken.

Um die Experimente mit einer einheitlichen Strategie planen und durchführen zu können, wurde ein Daten- und Softwarekonzept entworfen, das für alle Messaufgaben geeignet ist. Es wurden vorwiegend Messkarten ausgewählt, welche über die MATLAB-Toolbox „DAQ“ von „TheMathworks“ [MAT12] angesteuert werden können bzw. eine geeignete Schnittstelle für die Konvertierung in das entwickelte MATLAB-Format verfügen. Das bedeutet, dass alle Daten in einem einheitlichen Format vorliegen. Damit können alle experimentellen Daten mit den gleichen Werkzeugen weiterverarbeitet werden. Somit ließ sich datenseitig eine breitbandige akustische Betrachtung realisieren. Dies widerspiegelt die in Abb. 3.2.2a veranschaulichte physikalische Situation, die bei den Belastungsexperimenten auftritt. Im Folgenden werden Aufbau und Abhängigkeiten der Software-Module in Bezug auf das Schema der designakustischen Analyse aus Abb. 3.2.a erläutert.

Die Operationen der Module können, wie folgend visualisiert verknüpft werden. Dabei ist sowohl die Nutzung über die GUIs, als auch über Skripte möglich.

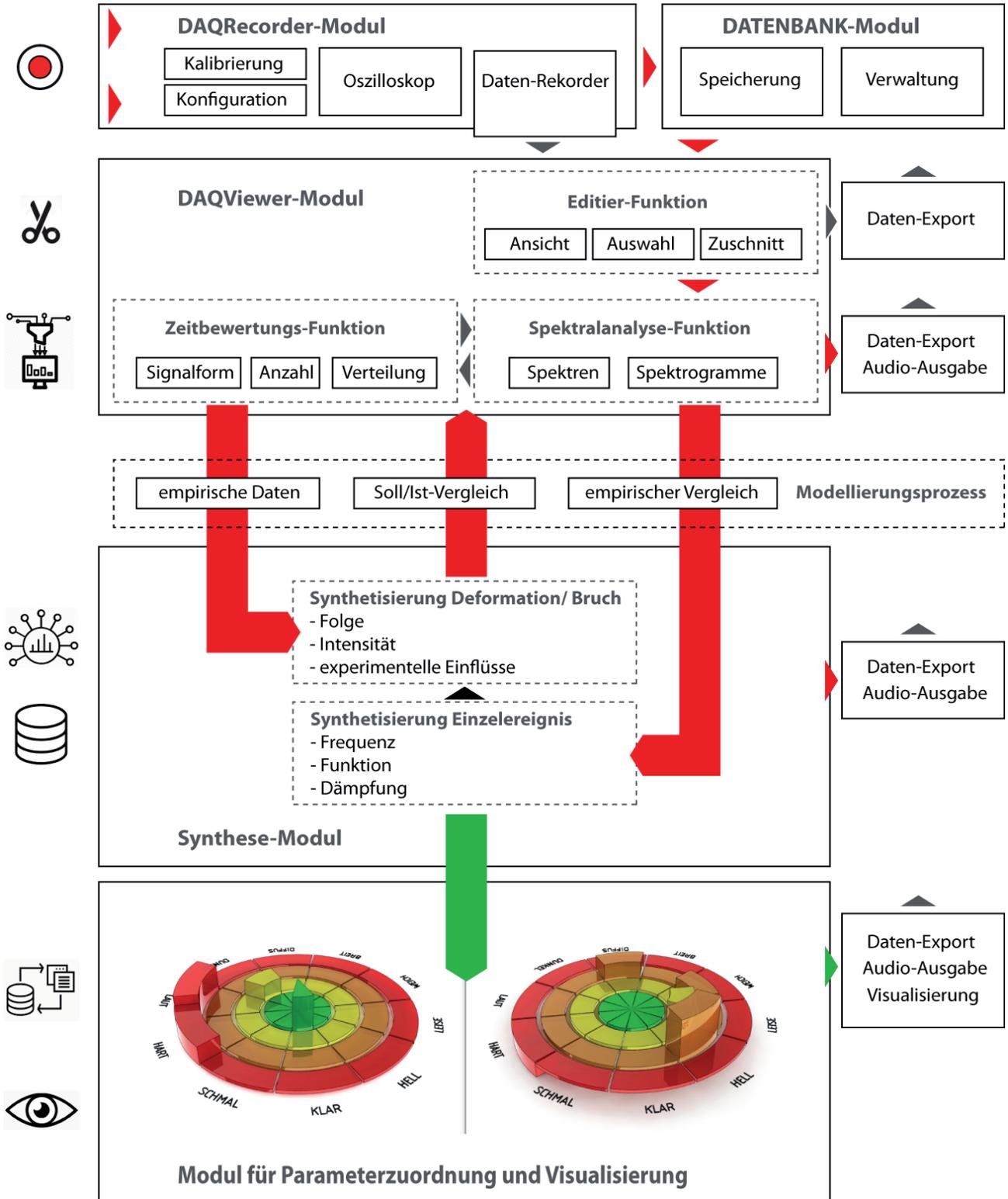


Abb. 3.2.2.b: Umsetzung des Ablaufs der designakustischen Analyse in MATLAB-Module. Die wiederkehrenden Grafiken aus Abb. 3.2.a dienen der Zuordnung vom jeweiligen Modul zur Analyse-Phase

Im ersten – dem sog. DAQRecorder-Modul – werden die über unterschiedliche Eigenschaften verfügenden Messkanäle individuell konfiguriert, bzw. abgefragt. Die wichtigsten Eigenschaften, die es hierbei zu berücksichtigen gilt, sind die spezifischen Abtastraten und Empfindlichkeiten der verwendeten Messketten, bestehend aus Sensorik und angeschlossener Elektronik (Vorverstärker, Messkarte). Ebenso integriert in dieses Modul ist die essentielle Funktionalität für die Kalibrierung der Messkette.

Die Konfiguration kann dabei aus zwei Modi heraus bedient werden. Zu Beginn der Analysen ermöglicht die komfortablere Anzeige via Oszilloskop detaillierte, aber nicht speicherbare Echtzeitanalysen für Zeitsignale, Spektren u. ä.. Dieses Modul wurde deswegen vorwiegend für die Bestimmung der experimentellen Parameter der irreversiblen Versuche eingesetzt, um den Prozess möglichst sicher und stabil zu halten und um potenzielle Fehler bei der Datenakquisition, wie z. B. die Übersteuerung der Aufnahmen weitestgehend auszuschließen. Zur Aufzeichnung der experimentellen Daten bei irreversiblen Versuchen wurde dann der Daten-Recorder-Modus verwendet. Die dort integrierte Anzeige ist lediglich für Kontrollzwecke vorgesehen und kann ausgeschaltet werden, was insbesondere bei hohen Abtastraten sinnvoll ist. Der Recorder kann wahlweise für permanente, willkürlich gestartete und beendete, oder auch getriggerte Aufnahmen konfiguriert werden. Für die meisten Experimente wurde der manuelle Modus verwendet, da das Einstellen einer geeigneten Trigger-Bedingung für geringe Belastungen schwierig ist, bzw. die Intensität der ersten Vorschädigungen nicht hinreichend genau prognostiziert werden kann. Dahingegen kann jedoch der generelle Start der Belastung an der Prüfmaschine ohne Probleme zeitsynchron oder auch leicht nachgelagert zum Start des Datenrecorders erfolgen, da der akustisch relevante Bereich lediglich in sehr seltenen Fällen dem des kompletten Lastauftrags entspricht. Bei den meisten Materialien, selbst bei sehr spröden ist das Fenster der zu Beginn auftretenden elastischen Deformationsphase groß genug, sodass keine mikrostrukturellen Schädigungen in der Probe auftreten, die durch dieses Vorgehen verpasst werden könnten.

Die akquirierten Daten wurden sowohl im Daten-Recorder-Modus als auch über den gesamten im Datenbank-Modul von MATLAB gespeichert, um diese bedarfsweise im MATLAB-Workspace weiterzuverarbeiten oder diese von dort flexibel zu exportieren, oder beispielsweise in hörbare Signale zu konvertieren.

Zur daran anschließenden Sofortanzeige des Messergebnisses und zur Erfolgskontrolle des Experiments wurden die Daten in das DAQViewer-Modul übergeben. In diesem können die für die Analyse relevanten Zeitbereiche, in denen die Deformation zu akustischen Systemantworten führen für die weitere Bearbeitung komfortabel zugeschnitten werden. Dabei wurden die Bereiche der Aufnahme separiert, die das Gesamtbruchereignis vom Beginn der ersten sensorisch registrierbaren Vorschädigung bis zum sog. Hauptbruch, der zum Totalversagen der Struktur führt, repräsentieren. Die ausgewählten Zeitabschnitte können dabei flexibel für beide Messkanäle, entweder einkanalig oder mehrkanalig erfolgen. Der zweite Messkanal wurde bei den Experimenten der Arbeit zur Plausibilitätsprüfung hinzugeschaltet. Die Zuschnitte können weitergehend entweder als Zeitsignal exportiert, gespeichert oder an eine weiterverarbeitende Ebene übergeben werden, wobei in der weiterführenden Analyse dieser Arbeit die Rückgabe an den MATLAB-Workspace verwendet wurde. Dort wurden vor allem verschiedenen Berechnungsformen für Spektren appliziert, deren Ergebnisse dann ebenfalls wie die Zeitsignale weiterverarbeitet werden konnten.

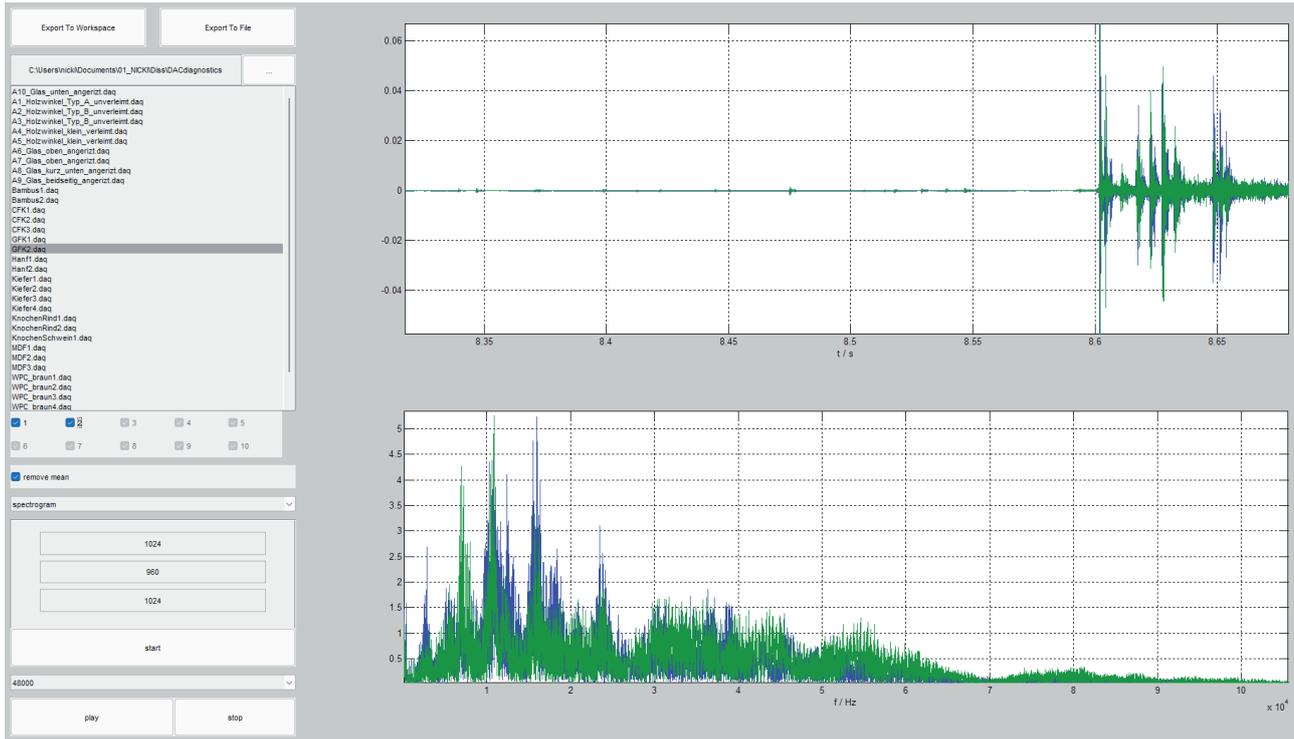


Abb. 3.2.2.c: GUI für die Verarbeitung der belastungsakustischen Experimente mit den beschriebenen Bearbeitungs- und Analysefunktionen und entsprechenden Export-Funktionen (2 Messkanäle mit zugehörigen FFTs f. d. angezeigten Zeitbereich)

Aus den Funktionen dieser generellen Module wurden GUIs für die Verarbeitung der belastungsakustischen Experimente abgeleitet, die eine effektive und vergleichbare Bearbeitung aller Messdaten zuließen. Diese Module enthielten dabei auch Funktionen zur Datenoptimierung, bzw. -aufbereitung. Da beispielsweise bereits kleine Offsetspannungen im Signal, die experimentell unvermeidbar sind, zu einer erheblichen Beeinflussung der Auswertungsqualität führen können, wurde eine Offset-Korrekturfunktion integriert. Auch wurden in die GUI die Exportfunktionen für das Zeitsignal und die spektralen Berechnungen, wie Fouriertransformation, Power Spectral Density, Einhüllende und Spektrogramme implementiert. Als eine erweiternde Funktion zur automatischen und parametergesteuerten Identifikation von Bruchereignissen auf der Zeitachse wurde neben den klassischen Auswertungen, wie Spektrum oder gleichgerichtetem Zeitsignal die sog. PeakFinder-Funktion umgesetzt und angewendet.

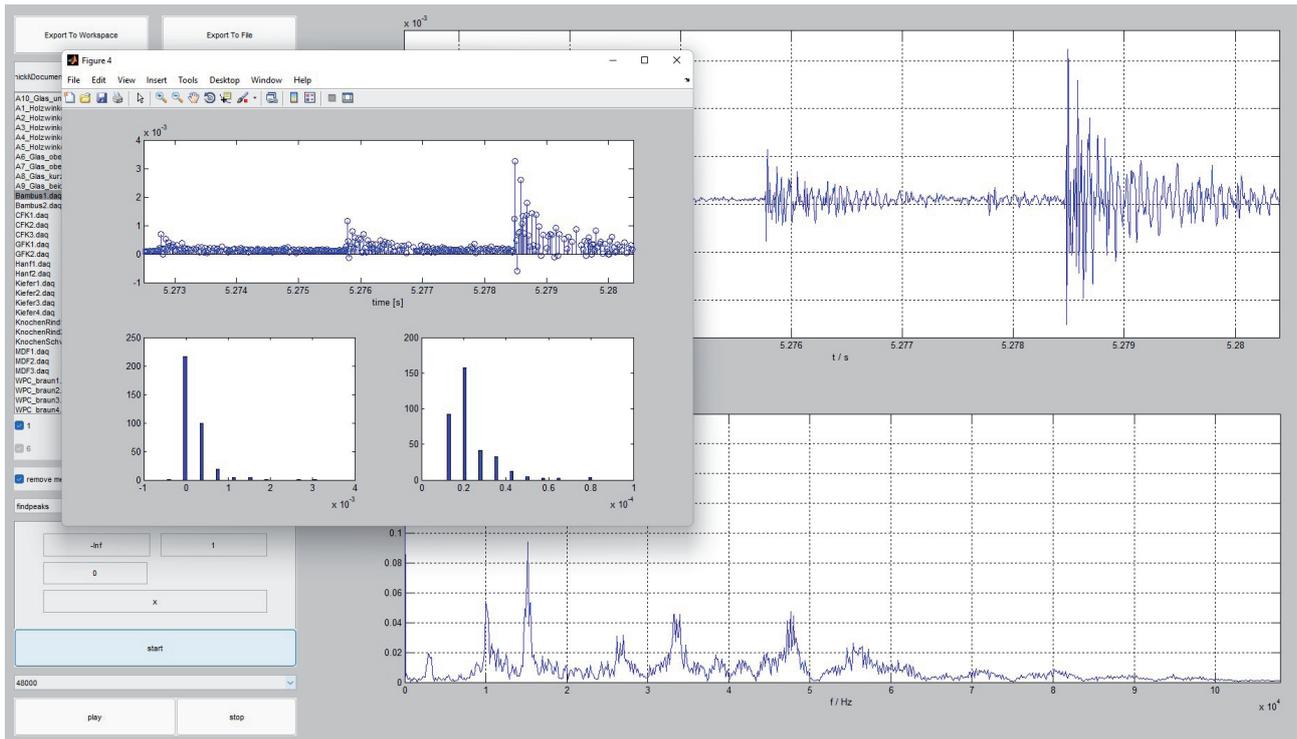


Abb. 3.2.2.d: exemplarisches Beispiel für die Verwendung der Peakfinder-Funktionalität

Anhand dieser kann das spezifische Verhalten der verschiedenen Werkstoffe und Materialien bei Deformation quasi grafisch und auf Gestaltungsebene unkompliziert visualisiert werden und im nächsten Schritt für den empirischen Modellierungsprozess angewendet werden.

3.2.3 Feature-Synthesierung zur Modellierung von Einzel- und Gesamtbruchereignissen

Der Modellierungsprozess wurde unter Verwendung des sog. Synthese-Moduls bearbeitet. Die Daten der Experimente dienen dabei dem Entwurf eines empirischen Gerüsts für die Modellierung der unter Belastung auftretenden akustischen Signale. Für die Ableitung der entsprechenden Modellierungsparameter für die Einzelereignisse und deren zeitlicher und energetischer Verteilung wurde eine Einteilung vorgenommen, die nutzerorientierte Erfahrungen widerspiegelt oder diesen nahekommt (zeitlich, qualitativ, quantitativ):

- | | |
|--|------------------------------|
| - Dämpfung der Einzelereignisse | hoch / mittel / gering |
| - Energie der Einzelereignisse | hoch / mittel / gering |
| - rel. Anzahl der auflösbaren Einzelereignisse: | viele / mittel / wenig |
| - zeitliche Verteilung der Einzelereignisse: | gleichmäßig / verdichtend |
| - relative Energieverteilung auf Einzelereignisse: | gleichmäßig / unregelmäßig |
| - energetischer Vektor der Einzelereignisse: | gleichbleibend / ansteigend |
| - durchschnittliche Intensität im Verhältnis zum Hauptbruch: | viel / wenig |
| - Frequenzcharakteristik des Bruchereignisses: | undifferenziert / spezifisch |
| - Rauschanteil | niedrig / hoch |

Im ersten Schritt war es notwendig, die Intensitäten, das zeitliche Verhalten und die spektrale Zusammensetzung der jeweiligen Einzelereignisse in der Vorschädigungsphase in geeigneter Form zu modellieren. Dies geschieht unter der Grundannahme, dass sich der gesamte Bruchvorgang, einschließlich der Vorschädigungen, als Superposition charakteristischer Einzelereignisse interpretieren und synthetisieren lässt. Dazu wurde das in Abb. 3.2.3.a dargestellte Abstraktionsmodell aufgestellt, welches sich hinsichtlich der Granulierung im Zeit- und Intensitätsbereich nach Auswertung der Messungen als hinreichend genau erwies, um die verschiedenen Charakteristika der Einzelereignisse der untersuchten Materialien und Werkstoffe zu spezifizieren und zu unterscheiden.

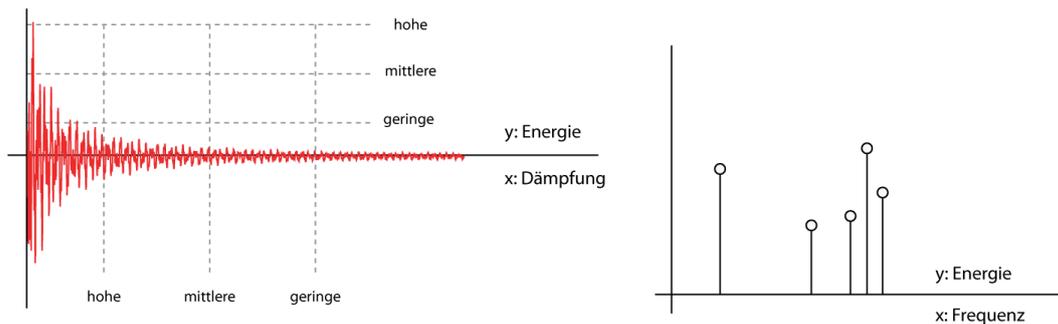


Abb. 3.2.3.a: auf Basis der empirischen Messungen abstrahierte, generelle Einteilungskriterien für verschiedene Signalformen von Vorschädigungsereignissen (links: zeitlich-energetische Varianz-Matrix 3×3 ; rechts: Frequenzcharakteristik)

Das in Abb. 3.2.3.a rechts dargestellte Energiedichtespektrum wurde dafür soweit abstrahiert, dass lediglich die charakteristischen Peaks mit der zugehörigen Intensität übernommen werden mussten. Konkret wurden für die Modellierung bzw. Berechnung, sowie für die Darstellung im Zeitbereich, zusammen mit dem Spektrum die folgenden, in MATLAB [MAT12] umgesetzten Funktionen verwendet:

- Signalsynthese
- Zeitliches Signalmuster
- Ausgabe

Die von den nutzerorientiert formulierten Synthese-Kriterien abgeleiteten Modellierungsparameter zur Erzeugung der synthetischen Einzelereignisse sind in ihrer reduzierten Form aus jeweils 5 Komponenten zusammengesetzt:

- mittlere Gesamtfrequenz
- spezifische Resonanzfrequenzen
- Amplitude
- Funktionsparameter für Verstärkung bei Anstieg
- Funktionsparameter für Dämpfung bei Abfall

Konkret wurden die Einzelereignisse aus einer linearen Überlagerung von Schwingungskomponenten (k) zusammengesetzt, wobei die Phasen dabei für alle Komponenten auf 0 gesetzt wurden ($t=0$).

$$f_k(t)_{osc} = A_k e^{i(\omega_k t + \phi_k)} \quad (22)$$

Diese einzelnen Komponenten wurden nach Generierung mit jeweils individuellen Parametern für die material- und werkstoffspezifische Dämpfung belegt. Im Modellierungsprozess konnte dabei variiert werden, ob die Einzelereignisse mit einer exponentiellen Dämpfungsfunktion belegt werden sollen oder ob das zeitliche Verhalten mit einem ansteigenden und einem abfallenden Anteil modelliert werden. Im Falle der Dämpfung mit Exponentialfunktion erfolgte diese mit dem Dämpfungsparameter δ .

$$f_k(t)_{exp} = e^{-\delta_k t} \quad (23)$$

Die alternative Modellierung mit der logarithmischen Gauss-Funktion erfolgte über die Ansteuerung der Parameter μ und σ .

$$f_k(t)_{logN} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k t} e^{\left(\frac{-\ln(t) - \mu_k^2}{2\sigma_k^2}\right)} \quad (24)$$

[t] steht dabei für die Maßeinheit der Zeit, damit t im Logarithmus einheitenlos ist. Mit der logarithmischen Gauss-Verteilung kann sowohl der ansteigende Anteil bei Energieeinleitung und (Mikro-)Bruch durch Deformation, als auch der angeregte Klang hinreichend beschrieben werden. Bei der Modellierung wurden so die besten Ergebnisse erreicht. Im Synthese-Modul können alle Komponenten k beliebig miteinander kombiniert werden. Noch komplexere Funktionen brachten jedoch keine wahrnehmbaren Verbesserungen und hatten zudem den Nachteil, dass diese dann über deutlich mehr Parameter anzupassen waren und so das eigentliche Problem „überdeckten“.

Der das gesamte Signal überlagernde Rauschanteil wurde mit der MATLAB-Funktion „randn“ berechnet. Der nicht weiter spezifizierbare Rauschanteil widerspiegelt bei der Modellierung sowohl experimentelle Einflüsse als auch den stochastischen Anteil der Bruchakustik selbst. Somit ergibt sich für die Modellierung der Gesamtfunktion folgende Funktion:

$$f(t)_{Einzel} = f(t)_{exp,logN} \cdot \sum_{k=1}^N A_k e^{i(\omega_k t + \phi_k)} + noise \quad (25)$$

Mittels der sog. Sound-Viewer-Funktion, einer weiteren Komponente des Synthese-Moduls, konnte sowohl das spektrale Ergebnis angezeigt werden, als auch mittels einer Play-Funktion das akustische Signal ausgegeben werden.

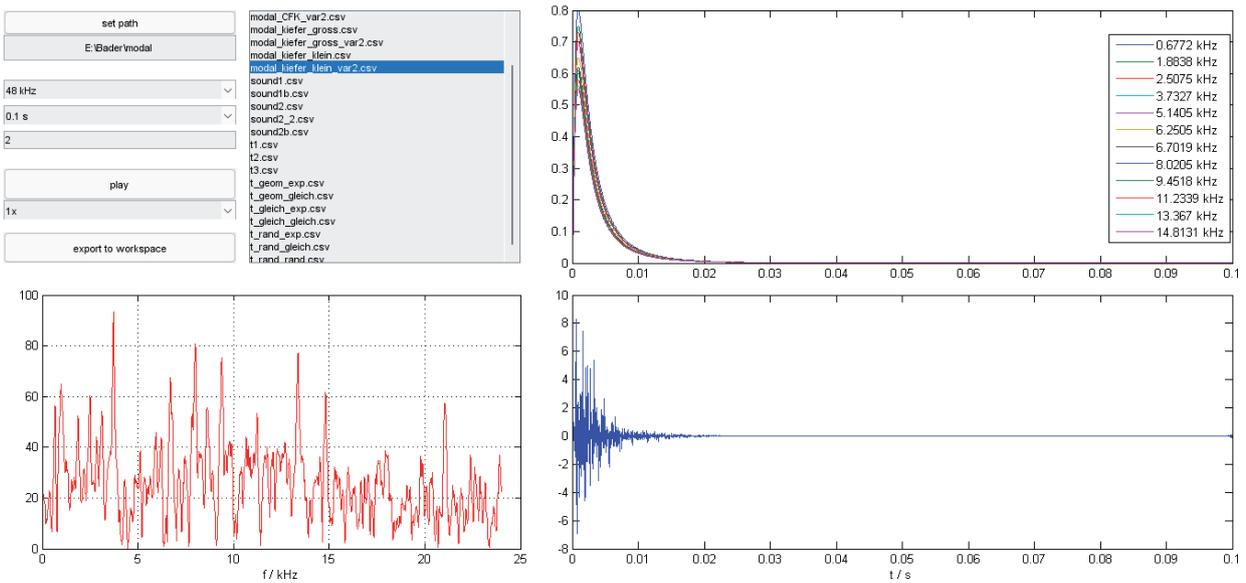


Abb. 3.2.3.b: Sound-Viewer-Funktion zur Modellierung synthetischer Einzelereignisse als Basis für die weiterführende Modellierung material- und werkstoffspezifischer, designakustischer Archetypen

Für jedes Material bzw. jeden Archetyp wurde mit den oben beschriebenen Funktionen und nach dieser Vorgehensweise jeweils ein einzelnes, material- oder werkstoffspezifisches Ereignis modelliert. Für jedes dieser Materialien wird so eine optimal klingende Basisfunktion erstellt, die in etwa dem „mittleren“ Hörempfinden der experimentellen gemessenen Klänge entspricht und welche sich in der darauf aufbauenden Modellierung der Zeitreihe auch nicht ändert, bzw. nicht variiert wird. Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Materialien und Werkstoffe stellen sich wie folgt dar:

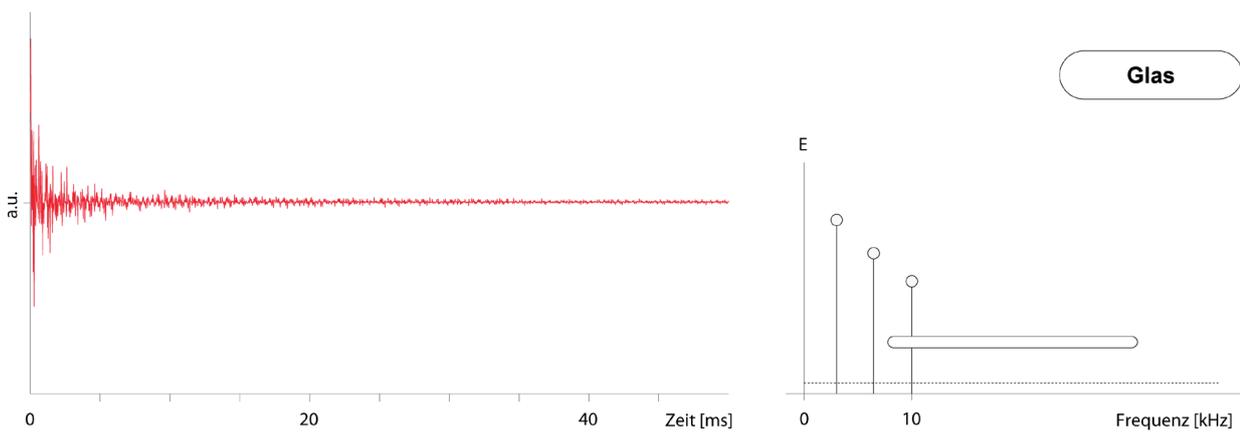


Abb. 3.2.3.c: spezifisch modelliertes Einzelereignis (Sound) von Glas für die material- und werkstoffspezifische Archetypenmodellierung (Pins = auflösbare Frequenzen, Balken = breite spektrale Bereiche, Strichlinie=Rauschanteil)

Im Zuge der Arbeiten zur Modellierung wurde ergänzend zu den in Kap. 1.4 aufgeführten Materialien Glas als Vertreter der besonders spröden Werkstoffe untersucht und modelliert, da es sich durch seine Spezifik als ein einziges, transientes Einzelbruchereignis, ohne den sonst typischen Vorschädigungsbereich differenziert und somit quasi ein Grenzfall der Bruch-Physik darstellt. Das Verhalten der anderen Materialien und Werkstoffe kann hinsichtlich dieses als idealisiert zu betrachtenden Bruchereignisses besser relativiert bzw. eingeordnet werden.

In den Bruchexperimenten mit Glas (aufgrund hoher Frequenzen mit hoher Abtastung mittels Körperschall-Sensoren gemessen) zeigten sich typischerweise vier Frequenzgruppen, welche für den spektralen Teil der Modellierung des Einzelereignisses, wie in Abb. 3.2.3.a rechts dargestellt, abstrahiert wurden. Dabei wurden die drei auflösbaren Frequenzbänder bis 10 kHz mit dem für Glas typischen, systematischen Amplitudenabfall und das sich daran anschließende breite Spektrum mit hoher Frequenzdichte berücksichtigt. Der Rauschanteil bei Glas ist dabei sehr niedrig. Die Kombination der Überlagerung der verschiedenen spektralen Komponenten mit den zugehörigen Dämpfungen ergab so das links abgebildete Zeitsignal. Anstiegs- und Abklingzeit wurden durch die entsprechenden Dämpfungsparameter geregelt. Bei Glas sind diese relativ kurz.

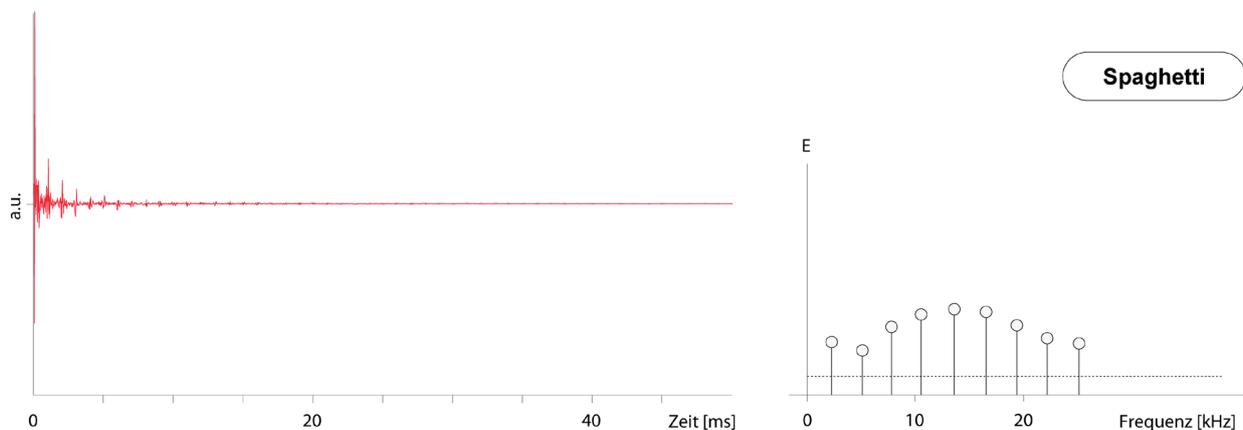


Abb. 3.2.3.d: spezifisch modelliertes Einzelereignis (Sound) von Spaghetti im Sinne von nicht in eine Matrix integrierten Einzelfasern als referenzielles Experiment zur Untersuchung der akustischen Wechselwirkungen zwischen den Faser- und Matrixanteilen in Faserverbundwerkstoffen und deren Einfluss auf die material- und werkstoffspezifische Archetypenmodellierung (Legende siehe Abb. 3.2.3.c)

Als gesondert zu betrachtendes Einzelereignis wurden neben den eben beschriebenen Materialproben von Glas auch spröde brechende Faserbündel untersucht, um experimentelle Situationen für eine zeitliche Struktur von dicht aufeinanderfolgenden, aber dennoch isolierten Bruchvorgängen zu modellieren. Dazu wurden Bündel von Stäben mit möglichst isotropen Materialeigenschaften belastet. Die Stäbe waren dabei nicht über eine Matrix verbunden und konnten lediglich aneinander abgleiten. Mit Hilfe solcher „Spaghetti-Stab-Experimente“ wurden wichtige theoretische Erkenntnisse zur Kontrolle von Bruchvorgängen gewonnen, wie sie bei Materialbrüchen mit Langfasern auftreten [HEI18]. Hauptziel der eigenen Experimente war es den Bruchvorgang ohne Matrixkopplung auf eine Vielzahl von schwach gekoppelten Einzelereignissen zurückzuführen. Die zeitlichen Aspekte werden am Ende dieses Kapitels ausführlicher behandelt.

Grund für die Untersuchung und Modellierung des Einzelereignisses waren an dieser Stelle, die Erkenntnisse aus den in Kap. 2.2.1 gemachten Zugversuchen hinsichtlich des akustischen Verhaltens beim Bruch von nicht integrierten Einzelfasern (Mode II, vgl. Abb. 1.5.a) beim typischen Biegebelastungsfall, aber ohne Matrixbeeinflussungen zu untersuchen (Mode I).

Wie bereits bei den Zugversuchen mittels AE-Analyse aus Kap. 2.2.1 auf energetischer Ebene nachgewiesen, ließen sich auch bei diesem Experiment die Bruchereignisse aufgrund der Energieverteilung gut von den Faser-Ableitvorgängen differenzieren. Die Frequenzen beim Zerbrechen von auf Biegung belasteten Einzelfasern ließen sich sehr gut auflösen und sind über einen weiten Frequenzbereich verteilt. Maßgeblich verursacht wird diese Charakteristik durch die ohne Wechselwirkung nahezu delta-impulsartig brechenden, spröden Fasern mit einer verhältnismäßig geringen Bruchfläche, bezogen auf die Fasergesamtlänge.

Neben dem Zug-/Biegevergleich ermöglicht das modellierte Einzelfaserbruch-Ereignis auch die Relativierung der anderen Material- und Werkstoff-Modellierungen hinsichtlich der unterschiedlichen Faserintegrationen in die entsprechenden Matrixsysteme. So lässt sich feststellen, dass diese beispielsweise bei Bambus oder CFK außerordentlich stabil sind, wohingegen die Materialien mit weniger oder kaum differenzierbaren Frequenzen auch mit einer weniger belastbaren Faserintegration aufwarten können.

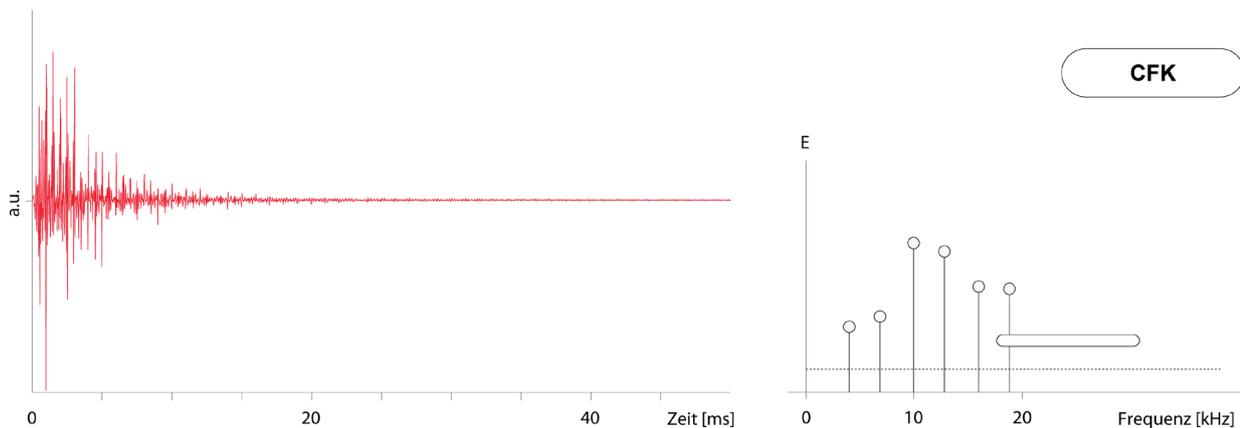


Abb. 3.2.3.e: spezifisch modelliertes Einzelereignis (Sound) von CFK für die material- und werkstoffspezifische Archetypenmodellierung (Legende siehe Abb. 3.2.3.c)

Bei den CFK-Experimenten zeigten sich neben diskreten Bändern im Hörschall auch auflösbare Ultraschall-Frequenzen über 20 kHz. Entgegen des degressiven Verlaufes bei Glas beinhalten die höherfrequenten Bänder bei CFK mehr Energie, unter 10 kHz vergleichsweise wenig. Die Dämpfung bei diesem Werkstoff ist im Vergleich zu den weiteren untersuchten Proben der Arbeit vergleichsweise am geringsten.

Wie CFK verhielt sich das glasfaserverstärkte Pendant hinsichtlich seiner wesentlichen akustischen Belastungsreaktionen ähnlich bei der Energiefreisetzung und Dämpfung. Erstere ist aufgrund der Werkstoffspezifik geringfügig niedriger. Darüber hinaus unterscheidet sich der Werkstoff auch dadurch, dass die spektralen Linien deutlich breiter, also nicht so schmal, wie bei CFK aufgelöst sind. Grund dafür sind die mikrostrukturellen Unterschiede im Aufbau der Probe, welcher verglichen mit CFK geometrisch weniger regulär, bzw. technologisch bedingt unspezifischer ist (lose gerichtete Einzelfasern bei GFK nicht so definiert, wie die sog. Rovings bei CFK).

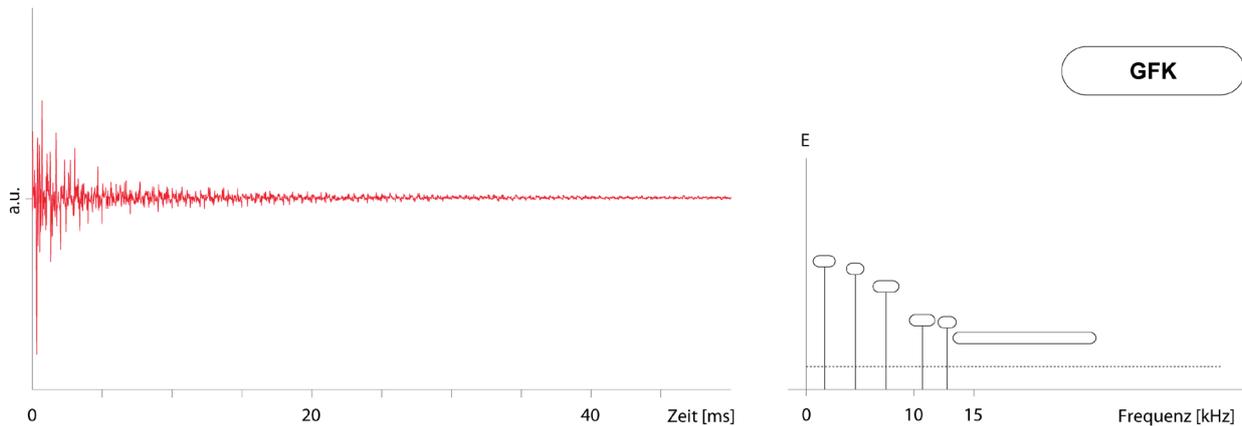


Abb. 3.2.3.f: spezifisch modelliertes Einzelereignis (Sound) von GFK für die material- und werkstoffspezifische Archetypenmodellierung (Legende siehe Abb. 3.2.3.c)

Die Bambusbrüche zeigten vor allem charakteristische, auflösbare Frequenzen im Bereich zwischen 10 bis 20 kHz, wobei auch bereits in niederfrequenten Bändern bis zu 5 kHz materialspezifisch Energie freigesetzt wurde. Der Rauschanteil und die breiteren, nicht näher auflösbaren Frequenzbereiche ab 20 kHz sind bei Bambus mit denen von Kiefer vergleichbar. Bei Bambus finden sich, verglichen mit Kiefernholz, aufgrund seiner gleichmäßigeren Wuchsform weniger Streuungen in den Proben selbst, auch zwischen den einzelnen Proben der Messreihe.

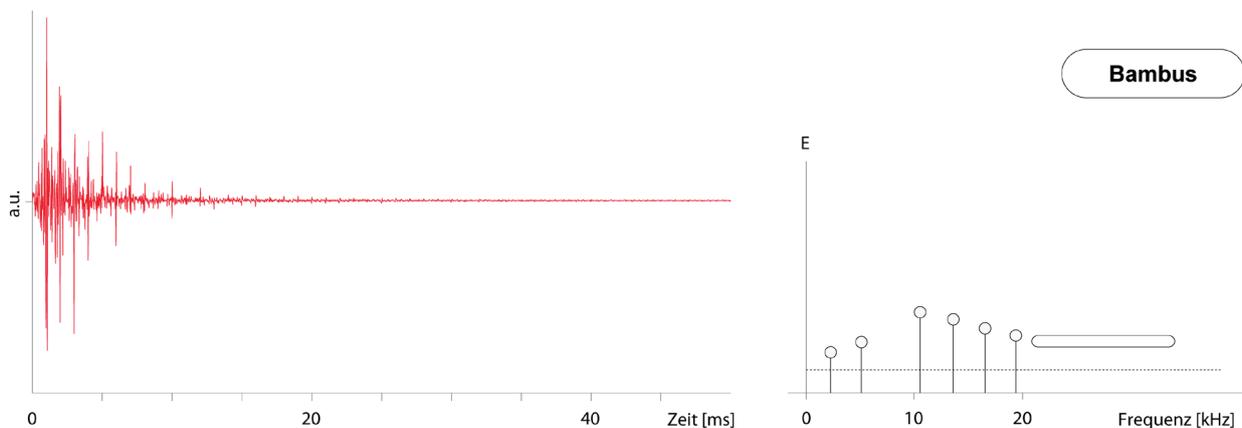


Abb. 3.2.3.g: spezifisch modelliertes Einzelereignis (Sound) von Bambus für die material- und werkstoffspezifische Archetypenmodellierung (Legende siehe Abb. 3.2.3.c)

Experimentell zeigten die verschiedenen Proben ein sehr vergleichbares Verhalten, welches dem von GFK ähnelt. An dieser Stelle sei auf die vorab in Kap. 2.2.2 beschriebenen Untersuchungen zur Klassifizierung mittels Schallemissionsanalyse-Verfahren verwiesen, welche dieses Ergebnis über die Zeit-Amplituden-Verteilung der Bursts bestätigen (vgl. Abb. 2.2.2.a und 2.2.2.d). Es wird erwartet, dass die Modellierung des Gesamt ereignisses die bereits formulierte These bestätigen, dass die rein akustische Klassifizierung von Werkstoffen von der konventionellen, herkunfts- oder verfahrensorientierten Werkstoffklassifikation abweichen kann und Bambus und GFK zur selben designakustischen Materialgruppe gehören.

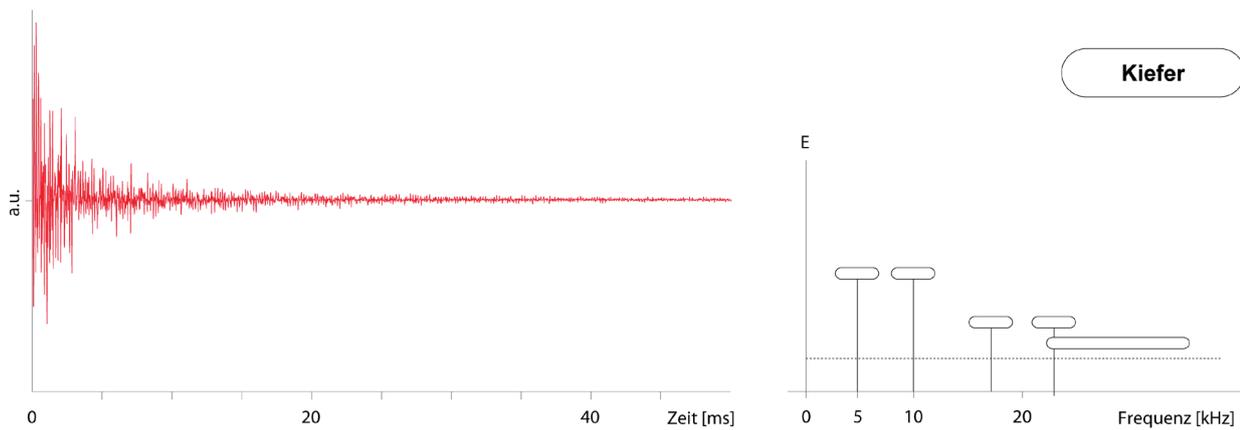


Abb. 3.2.3.h: spezifisch modelliertes Einzelereignis (Sound) von Kiefer für die material- und werkstoffspezifische Archetypenmodellierung (Legende siehe Abb. 3.2.3.c)

Die spektrale Charakteristik bei den verschiedenen Kiefernholzproben ist durch sehr breite Frequenzbänder in den Bereichen um die 5, 10 und 20 kHz geprägt, wobei der Cluster im niederfrequenten Bereich mehr Energie freisetzt, als die Bänder um die 20 KHz. Typisch sind auch die jeweils relativ gleichartigen Amplituden der Bänder eines Clusters. Der global vorhandene Rauschanteil ist bei Kiefer etwas höher als z. B. bei GFK. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass sowohl die spektrale als auch die im weiteren Verlauf der Modellierung noch relevanten Zeit- und Amplitudenverteilung bei den Kiefernproben aufgrund der natürlichen Wachstumsunterschiede sehr unterschiedlich waren. Dies betraf sowohl die Variation innerhalb einer Probe, als auch die Unterschiede zwischen den verschiedenen Proben der Messreihe. Das in Abb. 3.2.3.h vorgeschlagene synthetische Einzelereignis stellt somit ein gemitteltes repräsentatives Signal für Kiefernholz im Allgemeinen dar und könnte perspektivisch noch diversifiziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit und zur Formulierung des generellen Ansatzes für die material- und werkstoffspezifische Designakustik ist die erarbeitete Granulierung jedoch ausreichend. Eine Betrachtung hinsichtlich der bereits erwähnten Untersuchungen zur Klassifizierung mittels Schallemissionsanalyse-Verfahren aus Kap. 2.2.2 und die Ableitung des dort erwähnten designakustischen Material- und Werkstoffpaares „Kiefer-CFK“ ist auch hier naheliegend, wenn auch nicht so deutlich (vgl. Abb. 2.2.2.b und Abb. 2.2.2.d). Eine Anpassung der Einzelsignalcharakteristik hinsichtlich einer besseren Zuordnung wurde bewusst vermieden, da die Ausrichtung der Modellierung an den akustischen Bruchexperimenten aufgrund der umfangreicheren und detaillierteren Datenlage als wesentlich zielführender und objektiver betrachtet wird.

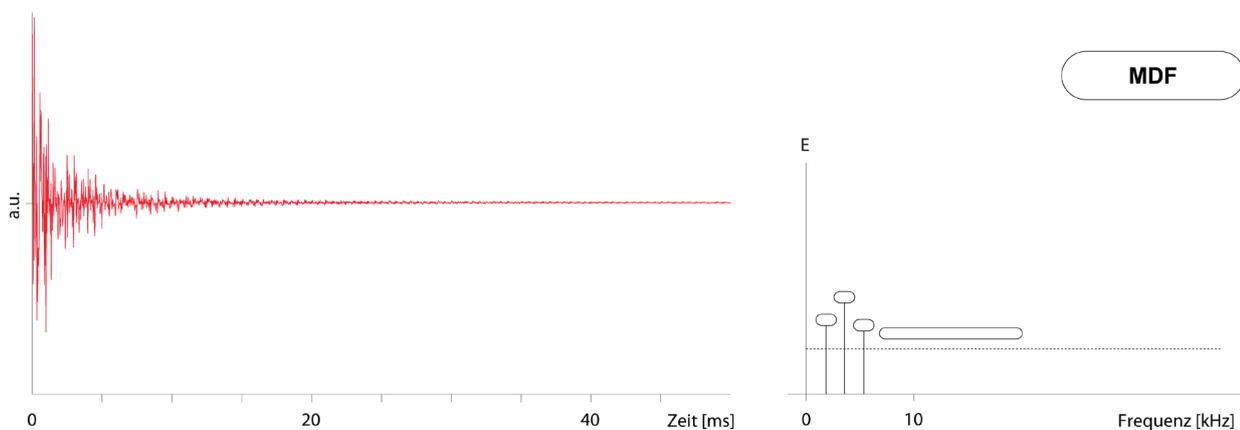


Abb. 3.2.3.i: spezifisch modelliertes Einzelereignis (Sound) von MDF für die material- und werkstoffspezifische Archetypenmodellierung (Legende siehe Abb. 3.2.3.c)

Durch seinen nicht sehr fest integrierten Kurzfaserverbund stellte sich der Bruch bei mitteldichten Faserwerkstoffen relativ dumpf dar, was vor allem durch den erhöhten Rauschanteil begründet ist. Dies ist nachvollziehbar, da die Bruchflächen der mitteldichten Faserplatte eher ausgedehnte Rissgebiete, als scharf abgrenzbare Bruchzonen darstellen, da es bei MDF zu zahlreichen, parallel stattfindenden Rissereignissen kommt. Hinzu kommen eine starke Dämpfung und auch die Frequenzauflösung, welche lediglich im niederfrequenten Bereich möglich und äußerst gering ist.

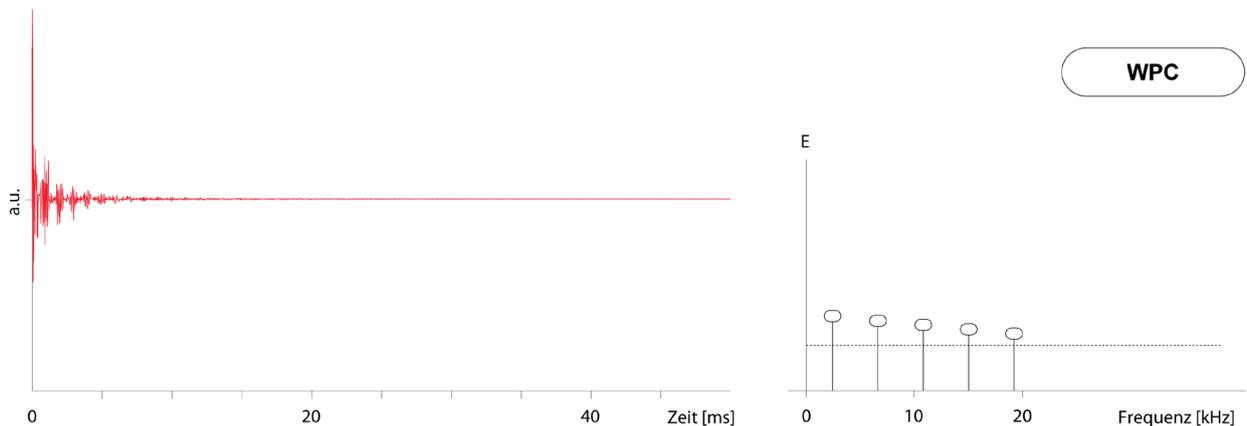


Abb. 3.2.3.j: spezifisch modelliertes Einzelereignis (Sound) von WPC für die material- und werkstoffspezifische Archetypenmodellierung (Legende siehe Abb. 3.2.3.c)

Vom Aufbau ähnlich, stellte sich der holzfaserverstärkte Kunststoff (sog. Wood Plastic Composite) auch akustisch annähernd vergleichbar dar. Spektral sind die Frequenzen etwas besser auflösbar, als bei MDF. Auch sind die Bänder nur geringfügig schmaler und weisen dementsprechend eine fast genauso hohe Dämpfung zum reinen Holzfaserverbund auf. Differenzierbar wird WPC vor allem durch den gleichmäßigen energetischen Abfall der Bänder.

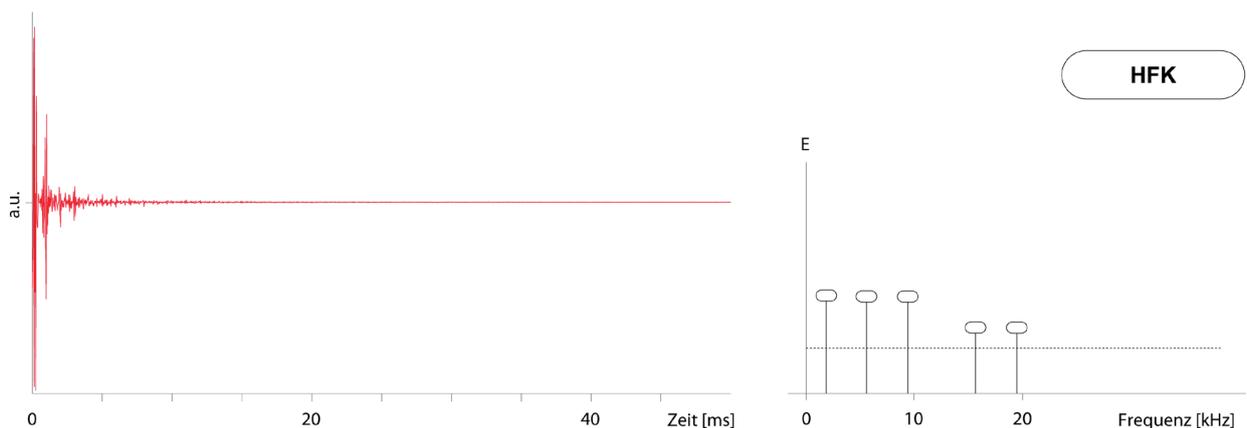


Abb. 3.2.3.k: spezifisch modelliertes Einzelereignis (Sound) von HFK für die material- und werkstoffspezifische Archetypenmodellierung (Legende siehe Abb. 3.2.3.c)

Die Messungen der hanffaserverstärkten Bioharzproben verhielten sich erwartungsgemäß auch ähnlich den MDF Prüflingen. Rauschanteil, bzw. Dumpfheit, sowie die starke Dämpfung finden sich in ähnlicher Form wieder. Letztere ist eher mit der von WPC vergleichbar, was wohl mit der akustisch ähnlich wirkenden Kunststoffmatrix begründbar ist.

Die Frequenzauflösung bewegt sich jedoch tendenziell wieder eher in Richtung der MDF-Charakteristik. Die Unterschiede sind mit Sicht auf die Streuung der Messungen der drei Kurz- bzw. Wirrfaserwerkstoffe als marginal zu betrachten, sodass sich auch hier die Ergebnisse aus Kap. 2.2.2 bestätigen lassen. Sowohl MDF und Hanffaserverbund, als auch WPC lassen sich derselben designakustischen Gruppe zuordnen. In diesem Fall ist die werkstoffliche Klassifikation mit dieser Gruppierung deckungsgleich, was nicht als Abschwächung der in Kap. 2.2.2 formulierten These gewertet wird und auch das hier formulierte Modell nicht in Frage stellt.

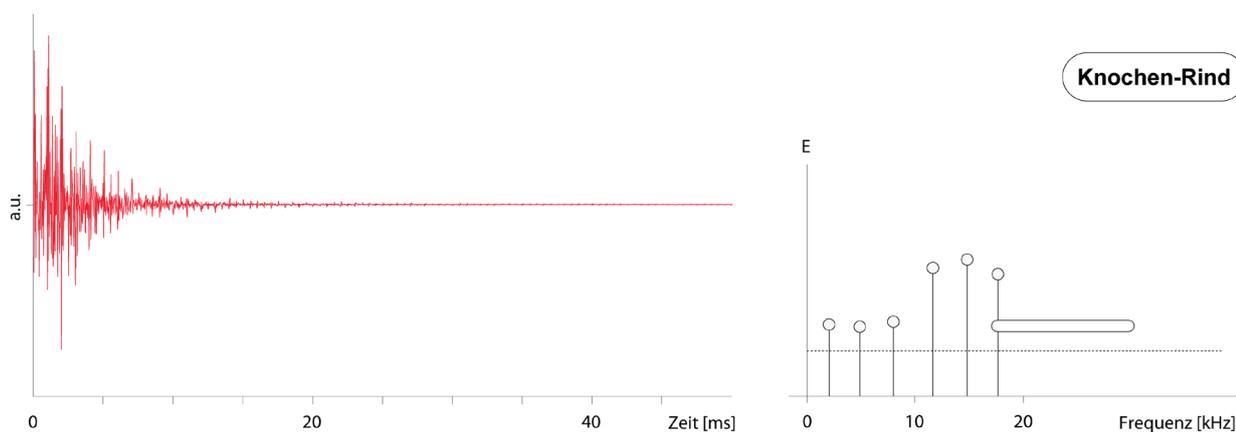


Abb. 3.2.3.k: spezifisch modelliertes Einzelereignis (Sound) von Rinderknochen für die material- und werkstoffspezifische Archetypenmodellierung (Legende siehe Abb. 3.2.3.c)

Neben den eigentlichen Material- und Werkstoffproben wurden neben Glas auch noch die in Kap. 1.2.4 und 1.4.4. beschriebenen Knochenproben untersucht. Es sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass diese als Vertreter der organischen Komposit-Materialien zur Untersuchung des kontextuellen Bezugs ihrer spezifischen Akustik zu den davon ausgelösten psychoakustischen Wahrnehmungsphänomenen in die Arbeit einbezogen wurden. Grund dieser Betrachtung ist die in Kap. 1.2.4 formulierte These, dass die Ähnlichkeit akustischer Signale mit sog. „humanakustischen Signalen“ deren Akzeptanz stärker vom eigentlichen Wahrnehmungskontext entkoppeln und die Aversionen dieser Signale individuell intensivieren. Neben der generellen Formulierung des designakustischen Modells in dieser Arbeit wäre dieses perspektivisch durch „kontextuelle Filter“ erweiterbar, welche die rein akustische Wahrnehmung relativieren. Die Ähnlichkeit von material- und Werkstoffakustik zu sog. humanakustischen Signalen könnte dann als Faktor einbezogen werden und so die Wirkung der Kontextfilter objektiv abschwächen oder intensivieren.

Bei den akustischen Untersuchungen der knochenbasierten Materialien ließen sich überraschenderweise deutliche Unterschiede ausmachen. So zeigten die Rinderknochen-Proben sehr gut auflösbare Frequenzen, ähnlich wie bei CFK. Ähnliche Übereinstimmungen zwischen CFK und Rinderknochen zeigten sich neben den generell ähnlichen Dichten (vgl. Kap. 1.2.4) auch schon bei den in Kap. 2.6 beschriebenen Untersuchungen zur psychoakustischen Fluktuationsstärke, welche bei beiden äußerst schwach anspricht. Die Datenlagen wäre mit Sicht auf die o. g. These bzgl. der Entkopplung humanakustischer Signale vom Wahrnehmungskontext ein potenziell zielführender Ansatz, diese zu bestätigen. Im Rahmen der Arbeit wurden diesbezüglich keine tiefergehenden Untersuchungen durchgeführt.

Abschließend sei zu den hier durchgeführten Untersuchungen zur Modellierung von Rinderknochen noch erwähnt, dass die Matrix während des gesamten Bruchvorgangs ein höheres Rauschen verursachte, welches eher mit dem von MDF vergleichbar war. Ab 20 kHz clusterten sich die Frequenzanteile breitbandig und leicht abgehoben vom Rauschteppich.

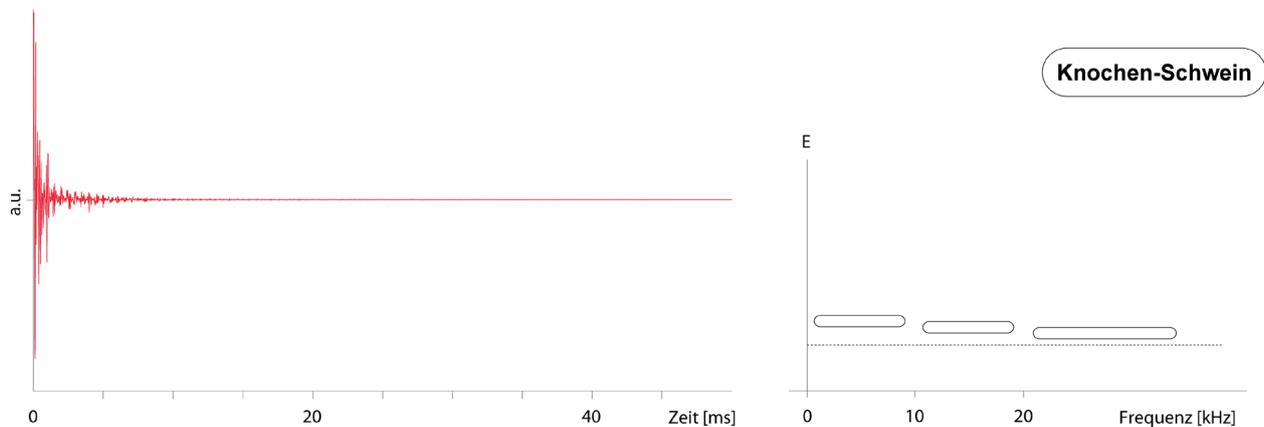


Abb. 3.2.3.1: spezifisch modelliertes Einzelereignis (Sound) von Schweineknochen für die material- und werkstoffspezifische Archetypmodellierung (Legende siehe Abb. 3.2.3.c)

Die Proben der Schweineknochen zeigten entgegen denen vom Rind keinerlei spezifische Frequenzbänder. So ließen sich lediglich breit verteilte Anhebungen des Spektrums beobachten, welche prinzipiell zu den höheren Frequenzen hin vom Energieniveau abnehmen. Der Rauschanteil war mit dem der Signale der Rinderknochen-Proben, bzw. MDF vergleichbar.

Abschließend sei bezüglich der menschlichen Bewertung von Frequenzempfindungen erwähnt, dass natürlich berücksichtigt werden muss, dass die Signale transienten Charakter haben. Im Mittel hat ein in der Arbeit untersuchtes Einzelbruchereignis eine Dauer von etwa 2 ms. Diese Zeitspanne liegt damit unterhalb der typischen Auflösungsgrenze für die Differenzierung von sich ändernden Informationen in Signalen und betrifft nicht nur die physiologischen und psycho-akustischen Aspekte der Wahrnehmung. Eine „exakte“ Bewertung von Frequenzempfindungen ist demzufolge dem Problem der zeitlichen Differenzierung überlagert. Die möglicherweise zu differenzierenden Frequenzen liegen weit auseinander, so dass eventuelle daher rührende Maskierungen nicht berücksichtigt wurden. Das gleiche betrifft die Intensitätsrelationen von spektralen Anteilen. Wie komplex die dabei auftretenden Zusammenhänge von ineinandergreifenden Mechanismen sind, zeigen beispielsweise die Untersuchungen von Kunchur [KUN08].

Wie bereits erwähnt wurden die modellierten Einzelereignisse auch deswegen im nächsten Schritt des vorgeschlagenen designakustischen Analyse- und Diagnoseverfahrens in ein Schema zur zeitlichen Abfolge und für die entsprechenden Variationen des Amplitudenverlaufs integriert, da diese Parameter neben den frequenzbezogenen einen wesentlichen Einfluss auf die Wahrnehmung haben.

So kann ein synthetisierter, aber für das Material charakteristischer akustischer Gesamteindruck – der für das Material oder den Werkstoff allgemeingültige designakustische Archetyp modelliert werden. Die dazu angewandte Schematik zur Generierung und Kategorisierung der entsprechenden Zeit- und Amplitudenverläufe sei vorab ausführlicher beschrieben.

Für die weitere gesamtheitliche Modellierung der verschiedenen Bruchereignisse über alle Deformations- und Schädigungsphasen hinweg sollten die synthetisierten Einzelereignisse im Zeit- und Intensitätsbereich entsprechend der empirisch akquirierten Daten in abstrahierter Form, parametergesteuert aufgetragen werden. In der Frequenz-Domain wurde das entsprechende Energiedichtespektrum ebenso, wie bereits bei den Einzelereignissen beschrieben, abstrahiert.

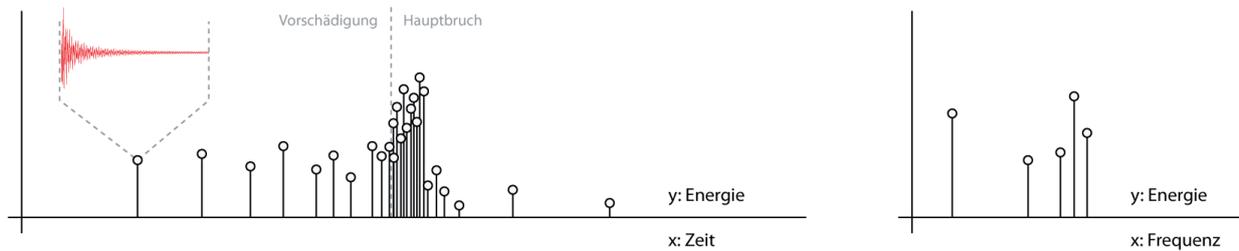


Abb. 3.2.3.m: beispielhafte parameterbasierte Modellierung eines Bruchereignisses auf Basis der vorab synthetisierten Eigenschaften einer Probe (zeitlich-energetische Varianzen + Frequenzcharakteristik)

Dabei wurden die zeitlichen Variationsmöglichkeiten bezüglich der Abstände und der Verteilung der Intensitäten der Einzelereignisse für das gesamte Bruchereignis über die folgenden, ebenfalls von den nutzerorientiert formulierten Synthese-Kriterien abgeleiteten Modellierungsparameter gesteuert:

- Lineare Zeitabstände
- Sich geometrisch reduzierende Zeitabstände
- Zufällige Zeitabstände
- Linearer Amplitudenanstieg
- Exponentieller Amplitudenanstieg
- Konstante Amplituden

Die Einstellung dieser Parameter erlaubt es theoretisch auch, die Varianz des Klangbildes einzubeziehen, die der Variation der akustischen Signale aufgrund der Eigenschaftsvariation der realen Proben entspricht. Möglicherweise kann auf diese Weise auch eine große Zahl von Testdaten für die Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens generiert werden, was allein aufgrund der aufwendigen Probenerstellung bisher nicht möglich war und vielleicht auch nicht realistisch ist. Für die im nächsten Kapitel beschriebene Archetypenbildung wurden deswegen basierend auf diesen Kriterien die folgenden Zeit-/ Amplituden-Klassen synthetisiert:

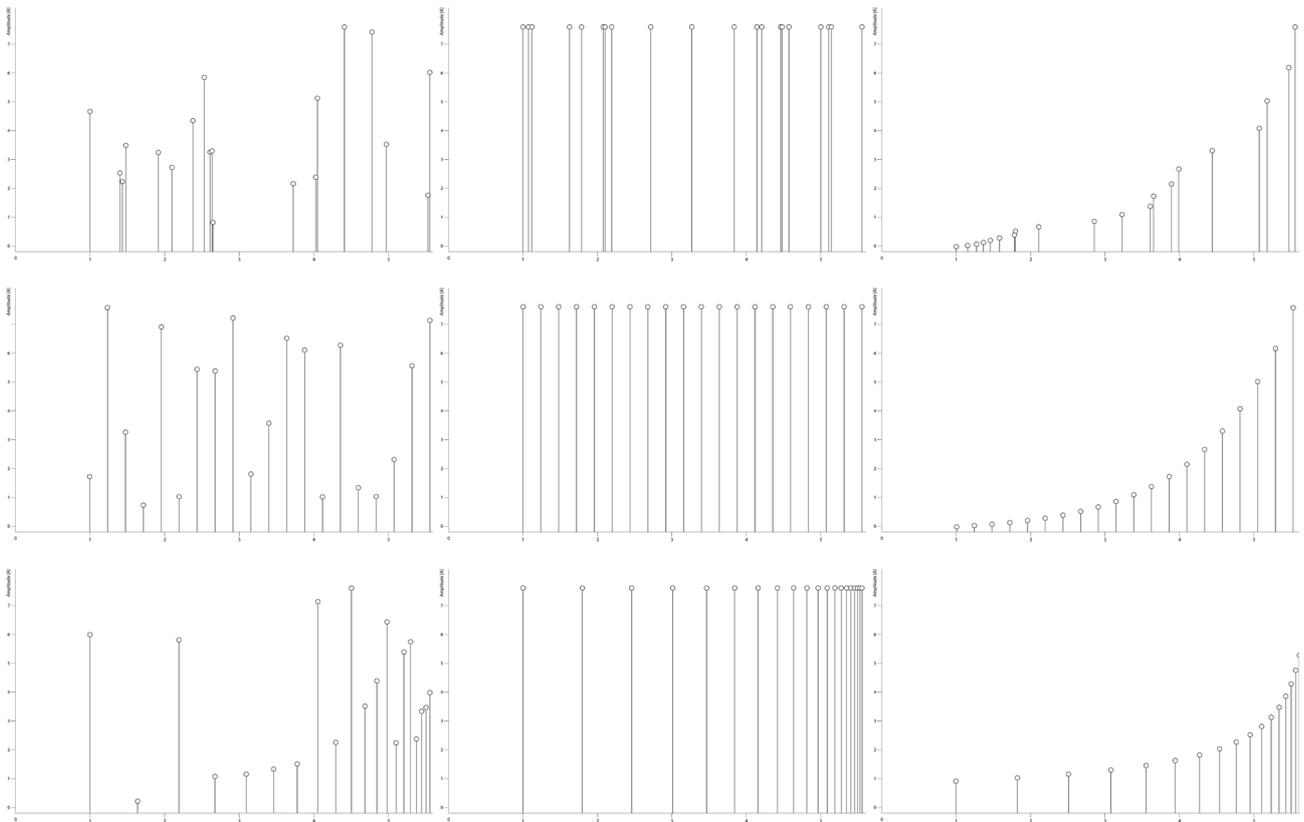


Abb. 3.2.3.n: aus den verschiedenen Synthese-Kriterien abgeleitete Kombinationsmöglichkeiten, welche als Pattern für die beschriebenen Einzelereignis-Sounds dienen, um daraus die material- und werkstoffspezifischen Archetypen zu modellieren (Matrix x-Achse Amplitudenverteilung (v.l.n.r.): zufällig, linear, geometrisch; Matrix y-Achse Zeitverteilung (v.o.n.u.): zufällig, gleich, verdichtend)

Die in Abb. 3.2.3.n dargestellten Folgen bilden das Gerüst für die Variationsmöglichkeiten von Zeitpunkten der diskreten Bruchindikationen. Die Varianz kann dabei durch die jeweils zugrunde liegenden Parameter gesteuert werden. Die verschiedenen Typen können miteinander kombiniert oder empirisch modifiziert werden. Die markierten Punkte der Abbildung symbolisieren die Wertepaare, für die in Kap. 3.2.4 erzeugten Zeit- und Amplitudenfolgen zur Synthetisierung der designakustischen Archetypen mittels des sog. Sound Composers. Im einfachsten Fall können die Zeitpunkte und Amplituden empirisch festgelegt werden. Die Folge mit den Eingabedaten hätte in diesem Falle folgende Form:

$$T(t_k, A_k) = [t_0, A_0], [t_1, A_1], [t_2, A_2], \dots [t_k, A_k]$$

Um die Abfolge systematisch, mit Parametern modellieren zu können, wurden sowohl die zeitlichen Abstände als auch die jeweils zugehörigen Amplituden berechnet. Diese Amplituden entsprechen den Wichtungsfunktionen, mit denen die im vorigen Abschnitt entworfenen Zeitfunktionen der Einzelereignisse in den zeitlichen Gesamttafel eingebracht werden. Dafür wurden die folgenden, konkreter beschriebenen abstandserzeugenden Funktionen verwendet:

- Für lineare / gleichverteilte Abstände:
 - o Startzeitpunkt t_0
 - o Abstand zwischen benachbarten Ereignissen $\Delta t_1 \dots 2 \dots k$
 - o Anzahl der Ereignisse N

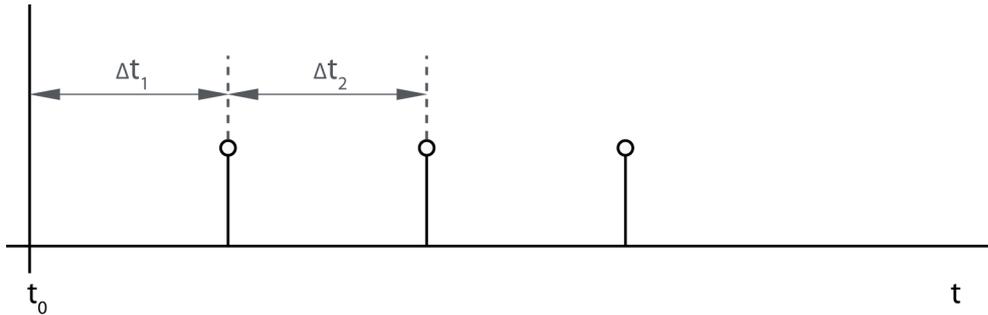


Abb. 3.2.3.o: gleichverteilte Zeitabstände zwischen den Einzelereignissen

- Für lineare Verdichtung der Abstände (arithmetische Verdichtung):
 - o Startzeitpunkt t_0
 - o Δt Abstand zwischen Ereignis 1 und 2
 - o Linearer Verringerungsparameter δt ; Start mit $2(\Delta t - \delta t) \dots k(\Delta t - \delta t)$

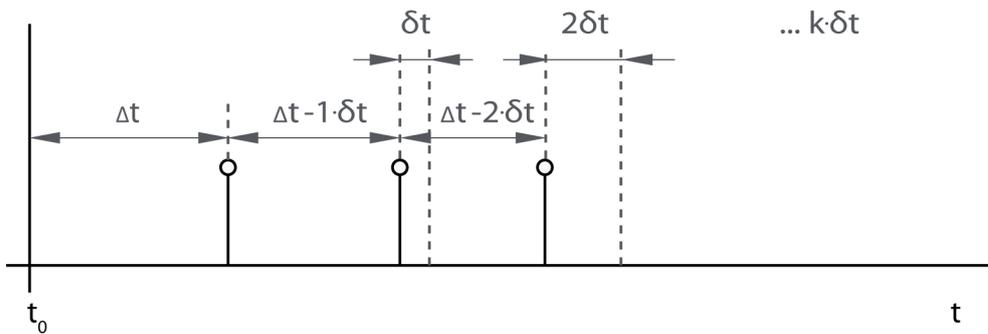


Abb. 3.2.3.p: gleichmäßige, lineare Abnahme der Abstände um $k \cdot \delta t$

- Für exponentielle Verdichtung der Abstände (geometrische Verdichtung):
 - o Startzeitpunkt
 - o Abstand zwischen Ereignis 1, 2
 - o Exponentieller Verringerungsparameter $q = \Delta t_k / \Delta t_{k-1}$; $q < 1$

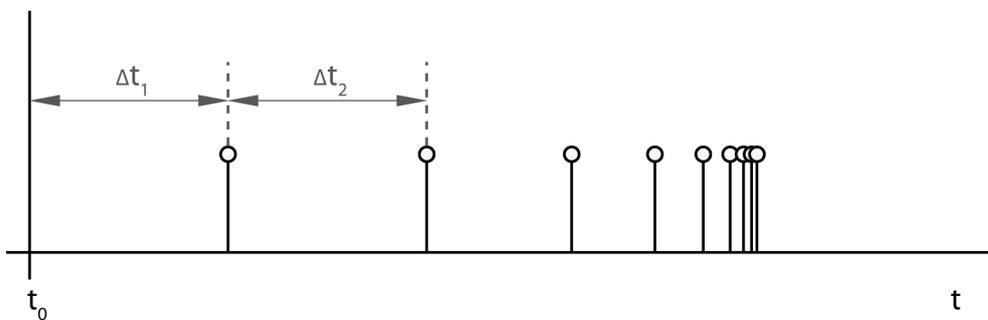


Abb. 3.2.3.q: exponentielle Abnahme der Abstände um q

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die lineare und exponentielle Inkrementierung der Abstände bei der gewählten Anzahl der Ereignisse (ca. 20) kaum Einfluss auf die Wahrnehmung hat, weswegen auf die grafische Darstellung in Abb. 3.2.3.n verzichtet wurde.

- Für zufällige Verdichtung der Abstände:
 - o Startzeitpunkt
 - o Art der Zufallsverteilung

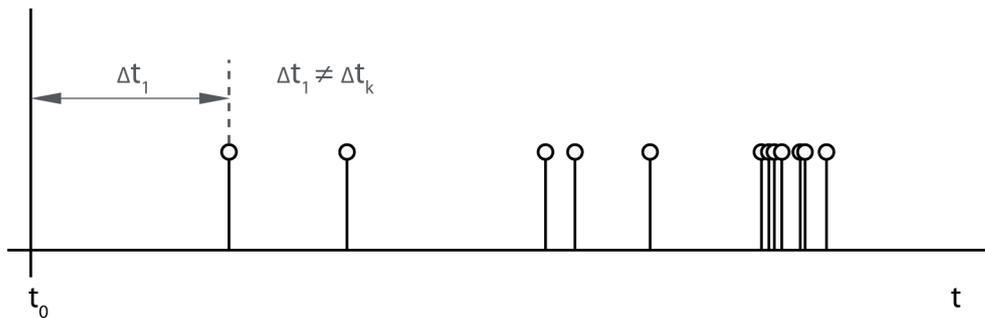


Abb. 3.2.3.r: zufällige Verteilung der Abstände

Für die zufällig verteilten Ereignisse wurden sowohl gleichverteilte (z. B. Abb. 3.2.3.n), als auch normalverteilte Zufallszahlen verwendet:

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_3} = \dots = \frac{\Delta t_{k-1}}{\Delta t_k} = q$$

Der lineare Amplitudenanstieg kann wie folgt beschrieben werden:

$$A(t_k) = b t_k + A_0$$

A_0 steht für die Amplitude des ersten Ereignisses und b repräsentiert den Parameter für den linearen Anstieg. Analog kann ein exponentieller Anstieg wie folgt formuliert werden:

$$A(t_k) = c e^{(t_k - t_s) \ln a} + A_0$$

A_0 dient auch hier zur Beschreibung des Startoffsets. Der Parameter a bestimmt den Grad des exponentiellen Wachstums, mit c kann die Intensität angepasst werden. Mit dem Delay t_s kann das Einsetzen der Ereignisse auf der Zeitachse manipuliert werden.

Für die Modellierung der entsprechenden Amplitudenverteilungen nach Abb. 3.2.3.n auf die eben beschriebenen Zeitvariationen wurden folgende Varianten in das Synthese-Modul (vgl. Abb. 3.2.2.b) implementiert und verwendet:

- Lineare Änderung der Amplituden ab dem Startzeitpunkt und Bezugsamplitude (a: Koeffizient für lineare Intensitätszunahme):

$A(t_k) = a \cdot t_k + b$; dies schließt auch gleiche Amplituden ein ($a = 0$).

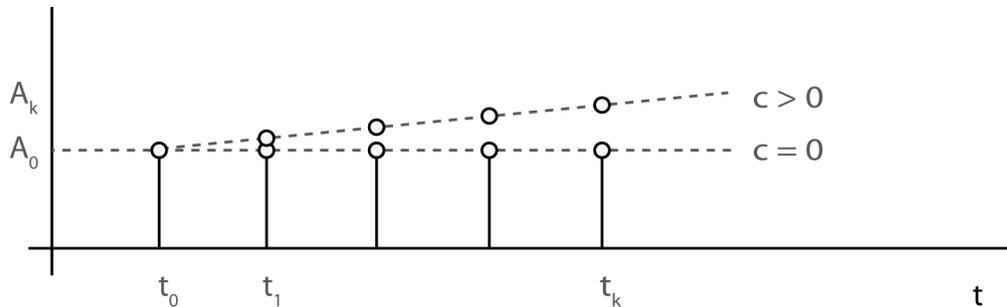


Abb. 3.2.3.s: lineare Amplitudenänderung

- Exponentieller Anstieg der Amplituden ab dem Startzeitpunkt und Bezugsamplitude (c: Koeffizient für Anstiegsgeschwindigkeit):

$A(t_k) = a \exp (c t_k / t') + c_0$

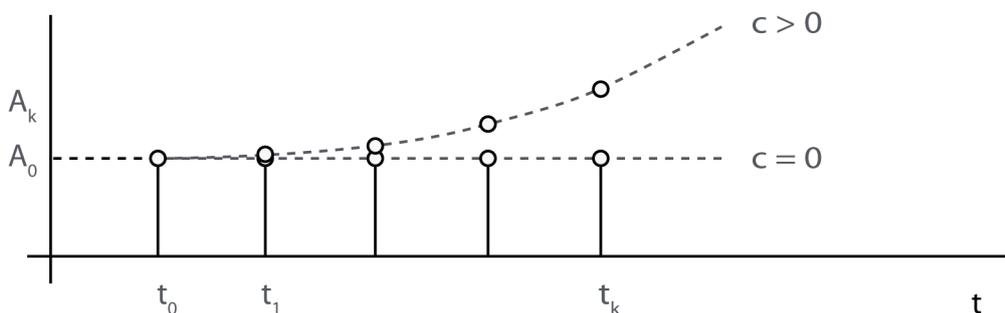


Abb. 3.2.3.t: exponentielle Amplitudenänderung

- Zufällige Variation der Amplituden:
 - o Wichtungsfaktor
 - o Art der Zufallsverteilung

Diese drei Verteilungsfunktionen komplettieren die in Abb. 3.2.3.n beschriebene Matrix. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass auch Mischformen der Verteilungsfunktionen möglich sind, insofern diese essentiell für die repräsentative Darstellung eines Archetyps sind. Allerdings sollte prinzipiell auf die Modellierung mit zu vielen Anpassungsparametern verzichtet werden.

Die Ergebnisse der kombinierten Anwendung der hier beschriebenen Parameter zur Amplituden- und Zeitsteuerung für die Modellierung der material- und werkstoffspezifischen Archetypen wird im folgenden Kapitel eingehender beschrieben.

3.2.4 Parameterbasierte Synthese material- und werkstoffspezifischer Archetypen

Durch die Kombination der in Kap. 3.2.3 abgeleiteten synthetischen Einzelereignisse mit den beschriebenen Zeit-/ Amplituden-Klassen lassen sich diese im nächsten Schritt wieder zu einem quasi exemplarischen Belastungsexperiment zusammensetzen. Die so synthetisierten designakustischen Archetypen werden dann im darauf folgenden Kapitel designakustisch beschrieben und geclustert, bzw. den verschiedenen designakustischen Material- und Werkstoffgruppen zugeordnet. Zur näheren Beschreibung des Vorgehens und der verwendeten Werkzeuge sei eingehend erwähnt, dass die im Folgenden visualisierten Archetypen mit einer weiteren, für die Arbeit entwickelten GUI, dem sog. Sound Composer erstellt wurden.

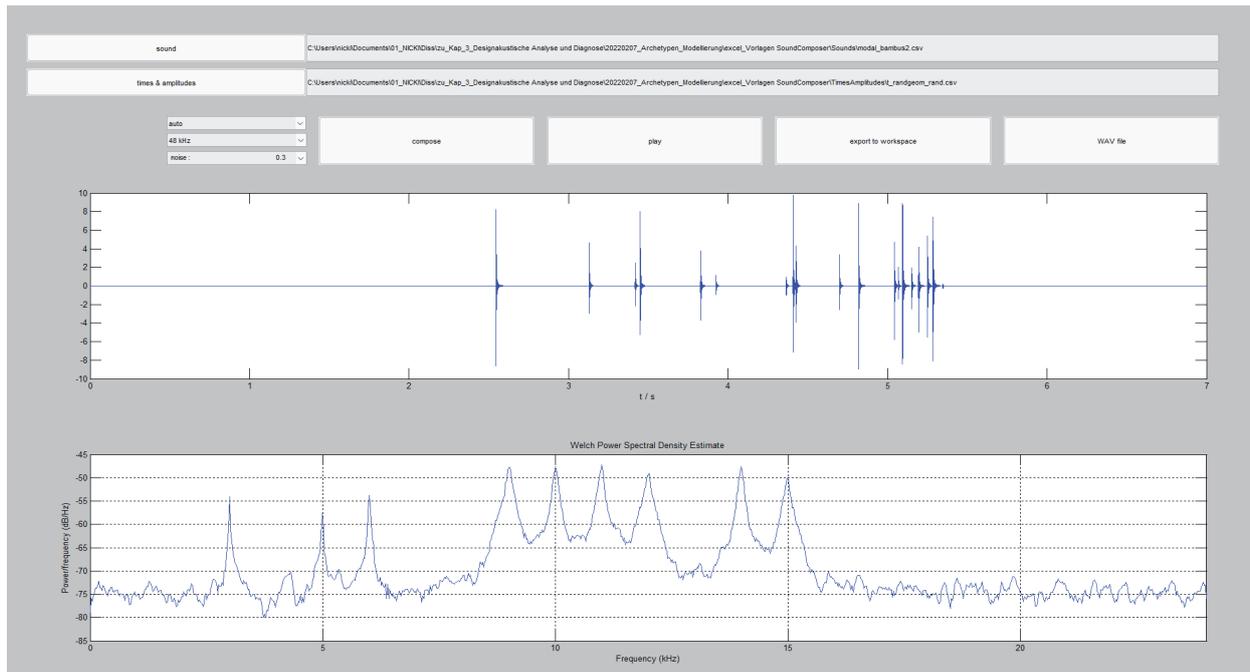


Abb. 3.2.4.a: GUI des Sound Composer-Moduls für die Modellierung der designakustischen Archetypen auf Basis der in Kap. 3.2.3 vorgestellten Einzelereignissounds in Kombination mit den verschiedenen Parametern der ebenso dort formulierten Zeit- und Amplituden-Matrix

Dieser bildet die zweite Stufe des Synthese-Moduls aus Abb. 3.2.2.b und dient der Generierung bewertbarer Soundfiles und zugehöriger Plots aus den in Kap. 3.2.3 beschriebenen Modellierungsparametern. Im Sound Composer werden die material- und werkstoffspezifischen Einzelereignisse und deren zeitlicher Abfolgen zusammengeführt.

Während dieses iterativen Komponier-Prozesses können die erzeugten Klangmuster direkt über eine im User Interface (UI) integrierte Ausgabefunktion akustisch wiedergegeben werden. Auf diese Weise konnten die modellierten Bruchereignisse auch wahrnehmungsakustisch mit den experimentell gewonnenen Daten verglichen werden. Wie bereits in Kap. 3.2.3 erwähnt wurde in diesem Prozessschritt auch der für die Wahrnehmung relevante Rauschanteil modelliert, um eine möglichst realitätsnahe Wiedergabe zu gewährleisten. Dieser wird über einen Programm-Parameter frei definiert. Im Folgenden werden nun die Modellierungsergebnisse bzw. die synthetisierten Archetypen einzeln vorgestellt.

Da sich Glas, durch sein außerordentlich sprödes Bruchverhalten, wie bereits beschrieben, lediglich als Einzelereignis ohne akustisch registrierbaren Vorschädigungsbereich darstellt, wurde auf die Synthetisierung eines zeitlich ausgedehnteren Archetypen, welcher das akustische Verhalten über Vor- und Hauptschädigungsbereich charakterisiert, verzichtet. Das Modell würde sich gleich dem in Abb. 3.2.3.c dargestellten Einzelereignis verhalten und lediglich den charakteristischen, vereinzelt und plötzlich auftretenden, exponentiellen Amplituden-Anstieg zeigen.

Dahingegen wurde das Modell für das Einzelereignis quasi vollständig desintegrierter Faserbündel, ohne Matrixeinfluss aus Abb. 3.2.3.d als Archetyp modelliert.

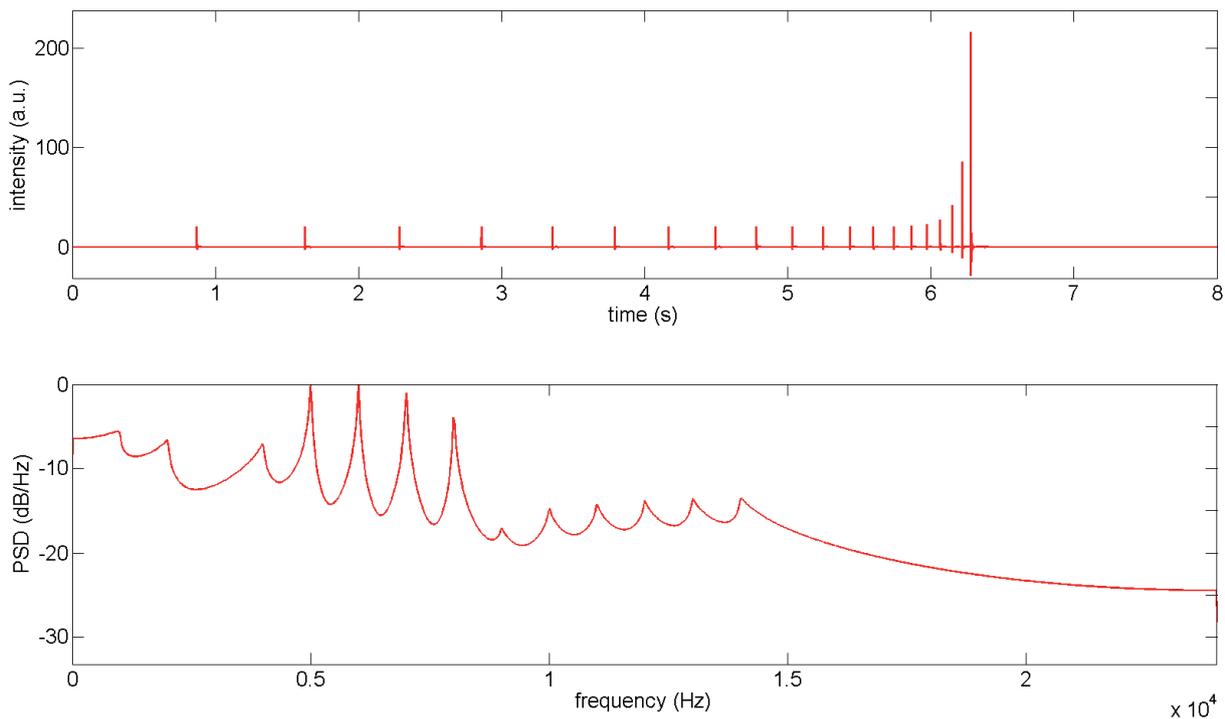


Abb. 3.2.4.b: designakustischer Archetyp von nahezu vollständig desintegrierten Langfasern (Spaghetti); synthetisiertes Zeitsignal (oben) und Spektrum (unten)

Dazu wurde zur Typisierung der zeitlichen Charakteristik der in Abb. 3.2.3.p formulierte Parameter zur geometrischen Verdichtung verwendet. Dieser wurde hinsichtlich des Amplitudenverhaltens mit exponentiell wachsenden Amplituden synthetisiert. So konnte die zeitliche Struktur von dicht aufeinanderfolgenden, aber dennoch isolierten Bruchvorgängen sehr gut abgebildet werden. Dies bildet das Bruchverhalten der Einzelfasern unter wachsender Zugspannung im Gesamtverbund des Biegeträgers sehr gut ab. Auf Zugabe eines Rauschanteils wurde bei Modellierung dieses physikalischen Grenzergebnisses, welches nahezu wechselwirkungsfreie, deltaimpulsartige Sprödfaserbrüche modelliert, verzichtet. Wie bereits erwähnt kann dieser Archetyp referenziell verwendet werden, um eine entsprechende Relativierung der anderen Material- und Werkstoff-Modellierungen hinsichtlich Faserintegrationen in die entsprechenden Matrixsysteme vorzunehmen. Diese kann bei der entsprechenden Klassifizierung unterstützen.

Als nächster Archetyp wurde kohlefaserverstärkter Kompositwerkstoff modelliert (siehe Abb. 3.2.4.c). Bei diesem verteilen sich die wenigen Vorschädigungsereignisse aufgrund der präzisen Halbzeuge und der hohen Verarbeitungsqualität sehr gleichmäßig, sodass diese quasi gleichverteilt modelliert wurden. Prinzipiell könnten auftretende Varianzen der Verteilungs- bzw. Herstellungsqualität aber auch in der Modellierung berücksichtigt werden.

Beim Übergang in den Hauptschädigungsbereich ist der bei den CFK-Bruchexperimenten typische, exponentielle Amplitudenanstieg, welcher den Energiegehalt der Vorschädigungsereignisse um Größenordnungen übersteigt durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt worden. Aufgrund der sehr guten Faserintegration in die Epoxidmatrix treten quasi keine Faserabgleitvorgänge auf, die Rauschen verursachen würden, sodass auch beim Archetyp CFK der Rauschanteil bei null liegt. Die sehr gute Differenzierbarkeit der für CFK typischen Frequenzbänder bestätigt dies. Insofern ist dieser vom Verhalten vergleichbar mit dem der vorab beschriebenen, spröde brechenden Faserbündeln, auch wenn sich die Dämpfung der Einzelereignisse geringer darstellt.

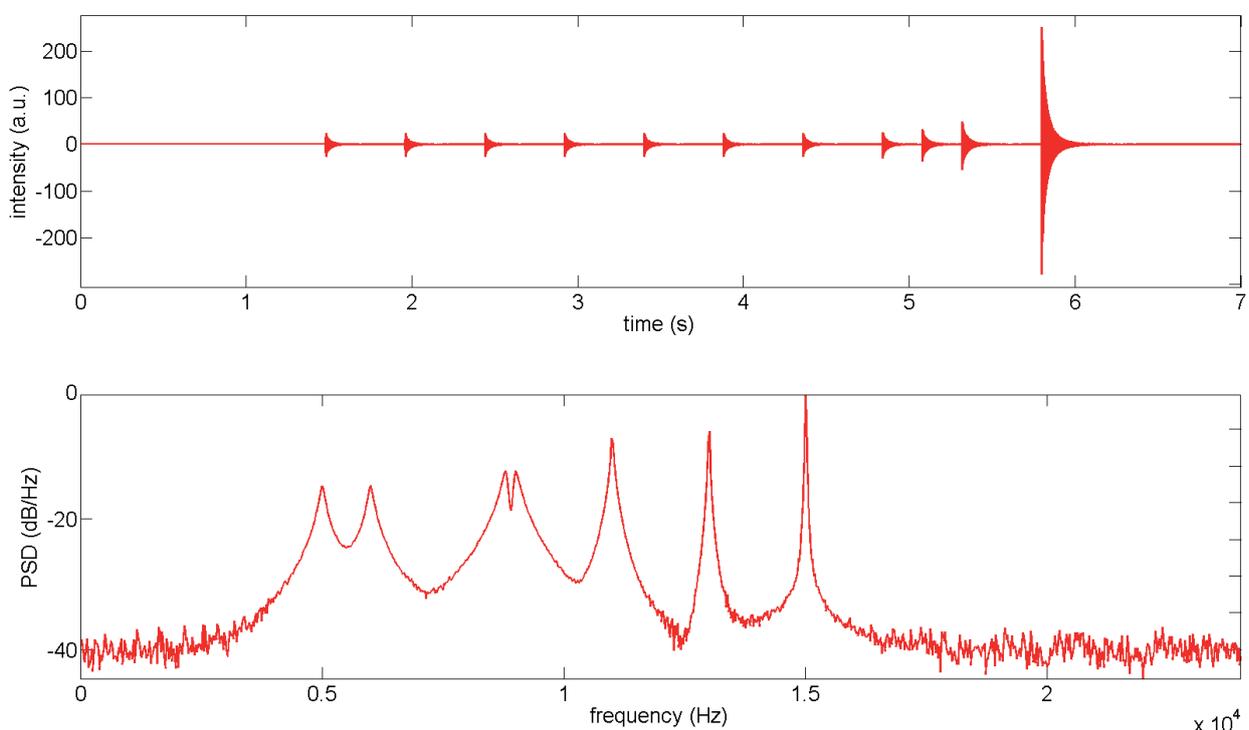


Abb. 3.2.4.c: designakustischer Archetyp von CFK; synthetisiertes Zeitsignal (oben) und Spektrum (unten)

Ähnlich CFK wurde auch der Archetyp für das glasfaserverstärkte Pendant GFK modelliert. Auch hier wurde aufgrund der sehr reproduzierbaren Herstellungsbedingungen eine zeitliche Gleichverteilung gewählt. Der energetische Gehalt der zahlreicheren Einzelereignisse steigt in diesem Modell exponentiell an. Die spektralen Linien werden beim Archetyp breiter als bei CFK aufgelöst. Für den Archetyp wurde ein geringer Rauschanteil von 0,2 (Programm-Parameter) gewählt, der die Bruchspezifik der zwar direktional, aber nicht hochpräzise orientierten Glasfilamente berücksichtigt.

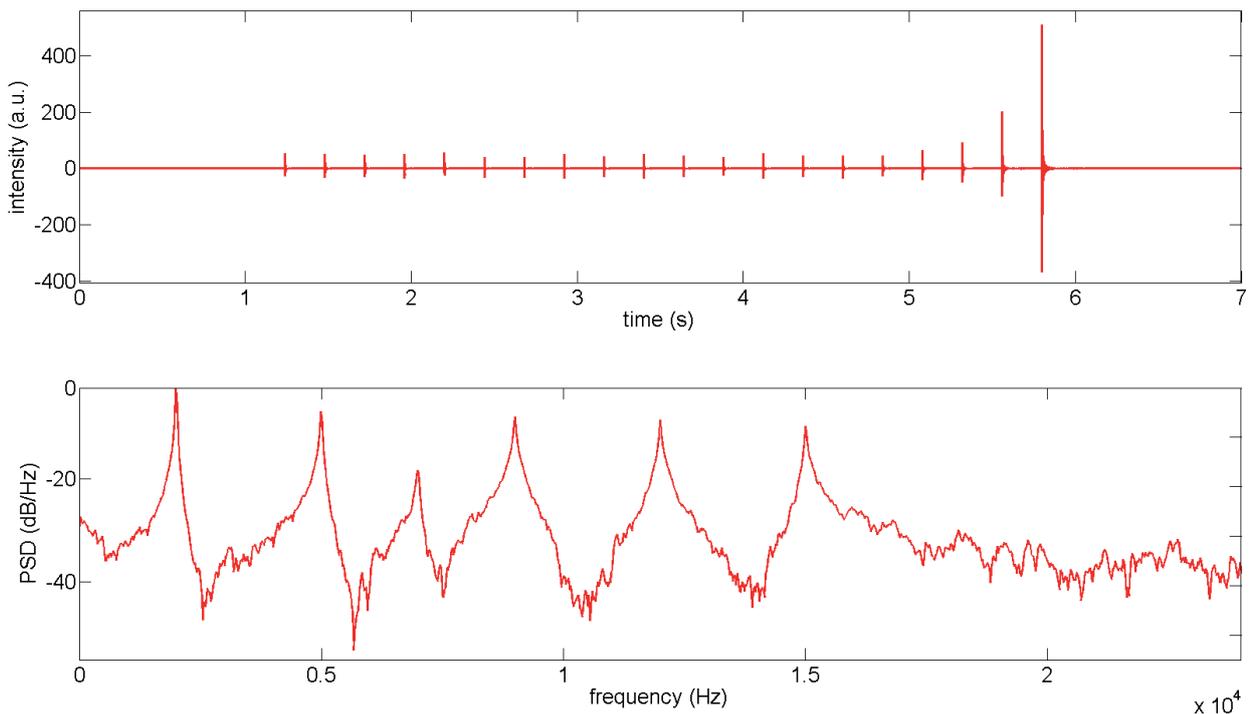


Abb. 3.2.4.d: designakustischer Archetyp von GFK; synthetisiertes Zeitsignal (oben) und Spektrum (unten)

Bei Bambus wurde zur Modellierung des repräsentativen Archetyps entsprechend der experimentellen Erkenntnisse ebenso auf die Gleichverteilung der Einzelereignisse zurückgegriffen. Das Verhalten, welches aus der gleichmäßigen Wuchsform resultiert, macht diesen Archetyp vom Zeitverhalten vergleichbar zu den oben beschriebenen Kompositwerkstoffen.

Das Modell zeigt den für Bambus typischen exponentiellen Anstieg der Amplituden, wie er bei allen Bruchexperimenten zu finden war. Dieser findet sich in vergleichbarer Form bei GFK. Der Rauschanteil wurde empirisch auf Basis der Audiovergleiche mit 0,3 gemittelt modelliert und ist damit auch vergleichbar mit GFK. Mit Blick auf diese beiden Archetypen lässt sich so auch über das erarbeitete Modell bestätigen, dass Bambus und GFK zur selben designakustischen Material- und Werkstoffgruppe gehören und die rein akustische Klassifizierung von Werkstoffen von der konventionellen, herkunfts- oder verfahrensorientierten Werkstoffklassifikation abweichen kann. Über die vorgeschlagenen Parameter lassen sich somit in ausreichender Granulierung designakustische Archetypen modellieren und entsprechend sicher klassifizieren.

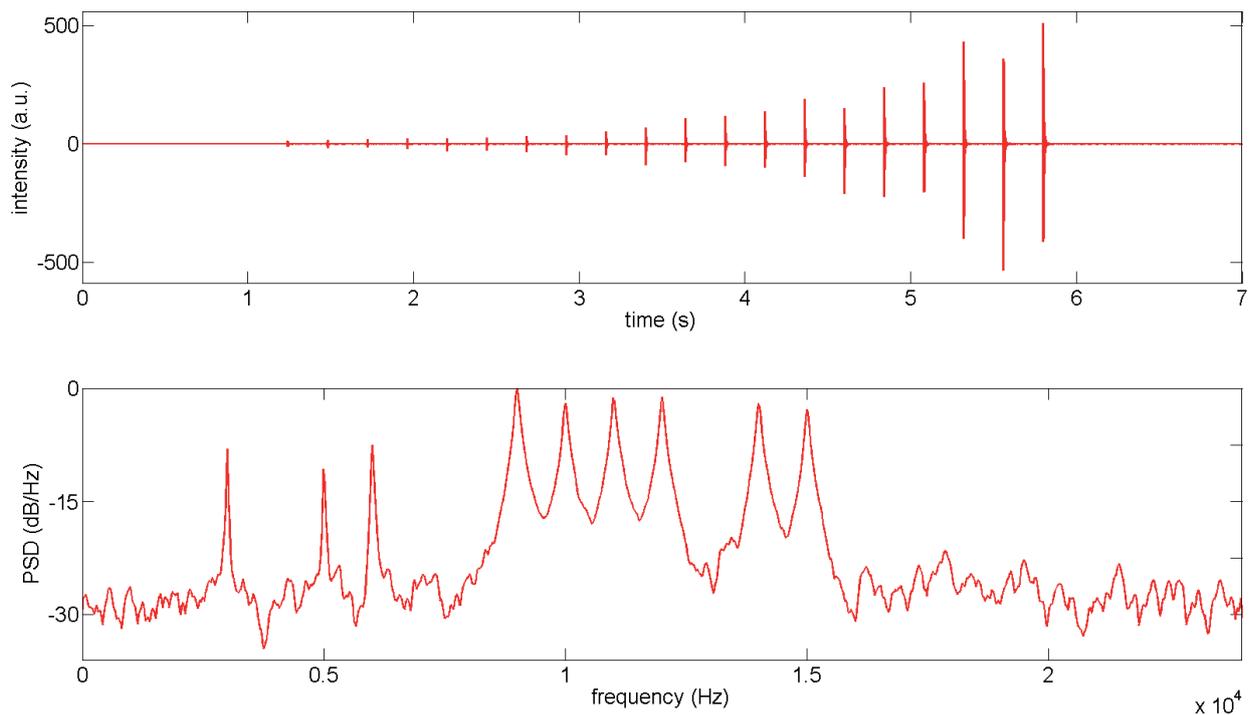


Abb. 3.2.4.e: designakustischer Archetyp von Bambus; synthetisiertes Zeitsignal (oben) und Spektrum (unten)

Dem entsprechend wäre bei der Modellierung von Kiefernholz, bezogen auf den Archetyp von CFK ein ähnliches Ergebnis zu erwarten. Aufgrund der natürlichen Wuchsform wurde bei der Modellierung des Gesamt ereignisses von Kiefer jedoch auf zufällig verteilte Zeitabstände zurückgegriffen, die auch dem akustischen Verhalten im tatsächlichen Bruchexperiment entsprechen. Auch die Amplitudenverteilung wurde aus demselben Grund über ein zufälliges Muster abgebildet. Überlagert wird dieses noch durch eine geometrische Verdichtung, welche das tatsächliche Bruchverhalten bei wachsender Deformation, bzw. Spannung und der daraus resultierenden steigenden Bruchdichte widerspiegelt. Durch die experimentell deutlich wahrnehmbaren internen Abgleit- und Reibungsvorgänge wurde bei Kiefer ein Rauschanteil von 1 modelliert. Beim direkten visuellen Vergleich der archetypischen Zeitsignale von Kiefer und CFK lässt sich die bisher geschilderte Zugehörigkeit zu einer designakustischen Klasse deswegen nicht an ähnlichen Zeit- und Amplitudenverläufen erkennen, wie es bei GFK und Bambus der Fall ist. Hier führen eher die in Kap. 3.2.3 beschriebenen spektralen Ähnlichkeiten der Einzelereignisse zu einem familiären Hörempfinden, was jedoch nur beim Abspielen der entsprechenden Soundfiles wahrnehmbar ist. An dieser Stelle sei auf die Ansätze zur Visualisierung verwiesen, bei welchen neben der Berücksichtigung der Zeit- und Amplitudencharakteristik auch eine entsprechende Transkription der Hörempfindungen ins Visuelle berücksichtigt wird.

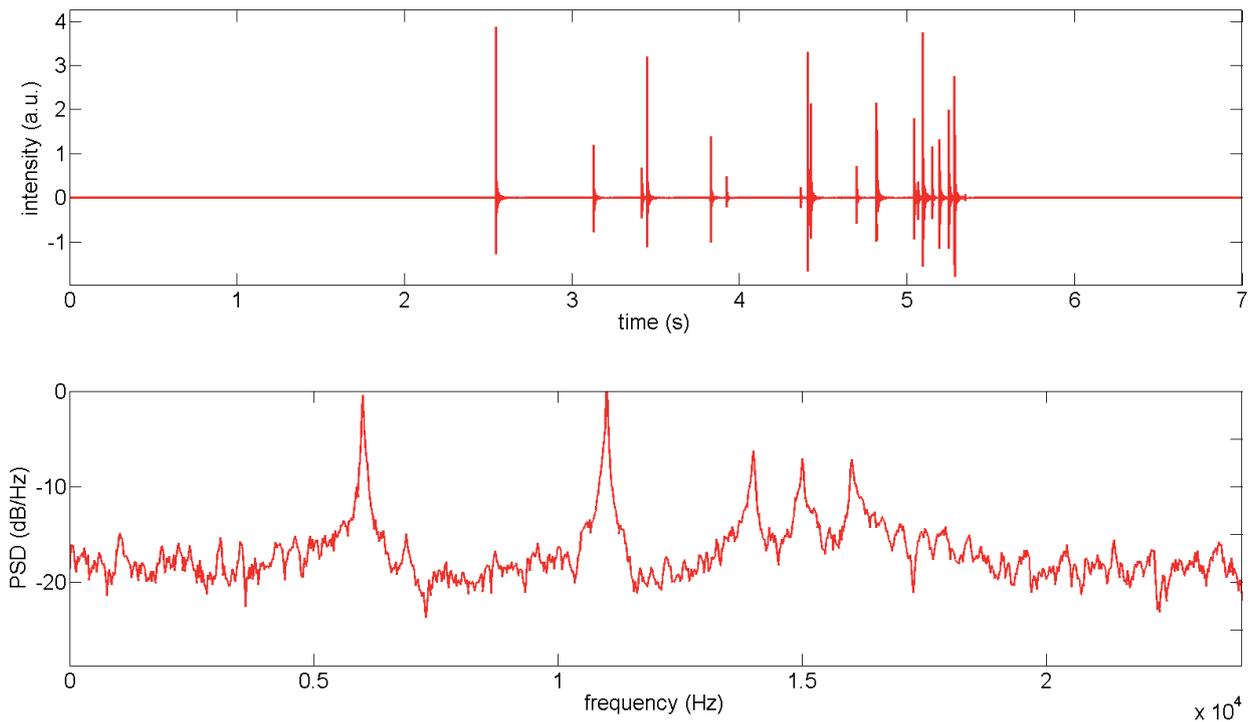


Abb. 3.2.4.f: designakustischer Archetyp von Kiefer (repräsentativ); synthetisiertes Zeitsignal (oben) und Spektrum (unten)

In der Gruppe der Wirrfaser-Komposite wurden sowohl MDF, als auch WPC und Hanffaser durch zufällig verteilte Zeitabstände mit gleichartigen, nur leicht fluktuierenden Amplituden im Modell abgebildet.

Bei allen drei Werkstoffen bildet das Zeitsignal (in den Abbildungen 3.2.4.g-i) quasi den Zeitraum der Hauptschädigungsphase ab, da sich das Bruchverhalten hier über homogen ausbreitende Rissfronten charakterisiert wird, die während der Deformation, bzw. Schädigung bezüglich der Amplituden nur leicht fluktuieren und relativ konstant bleiben.

Das dumpfe Klangverhalten fand sich bei allen archetypischen Kompositionen in der für die Bruchexperimente typischen Form wieder, da auch der Rauschfaktor in allen drei Modellierungen mit 2 definiert wurde.

Bei den Archetypen von MDF und Wood Plastic Composite sind die Frequenzen etwas besser auflösbar, als bei HFK, jedoch sind diese Unterschiede als marginal zu betrachten.

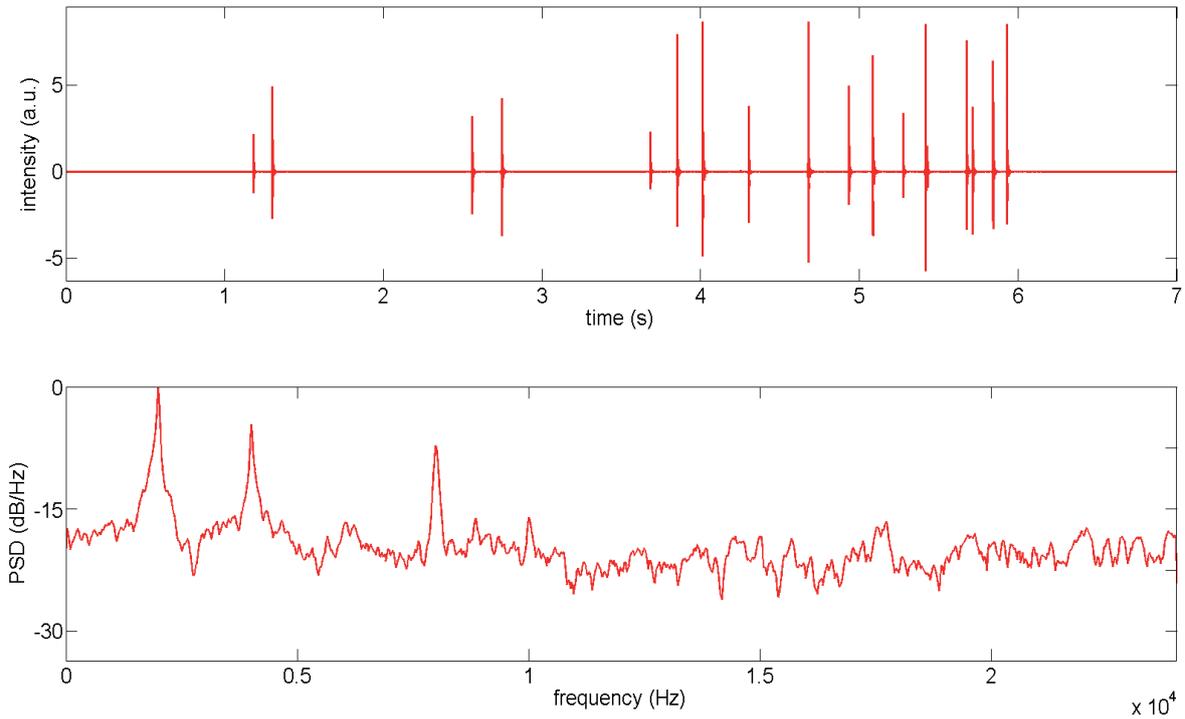


Abb. 3.2.4.g: designakustischer Archetyp von MDF; synthetisiertes Zeitsignal (oben) und Spektrum (unten)

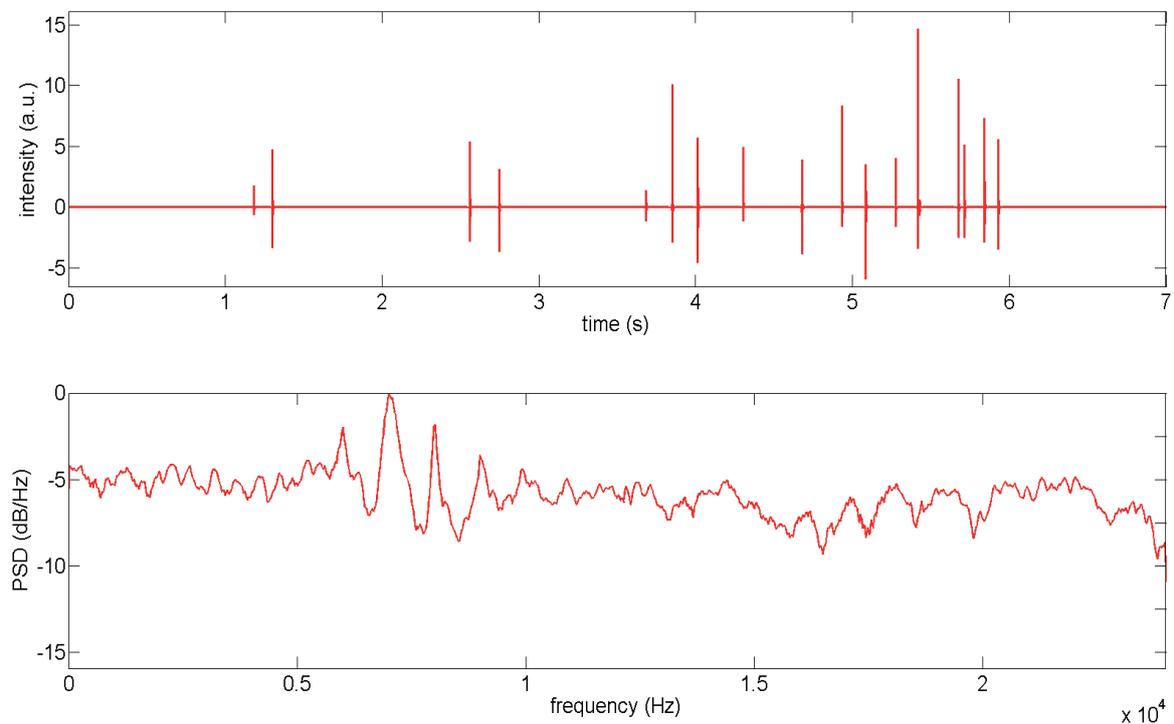


Abb. 3.2.4.h: designakustischer Archetyp von Wood Plastic Composite; synthetisiertes Zeitsignal (oben) und Spektrum (unten)

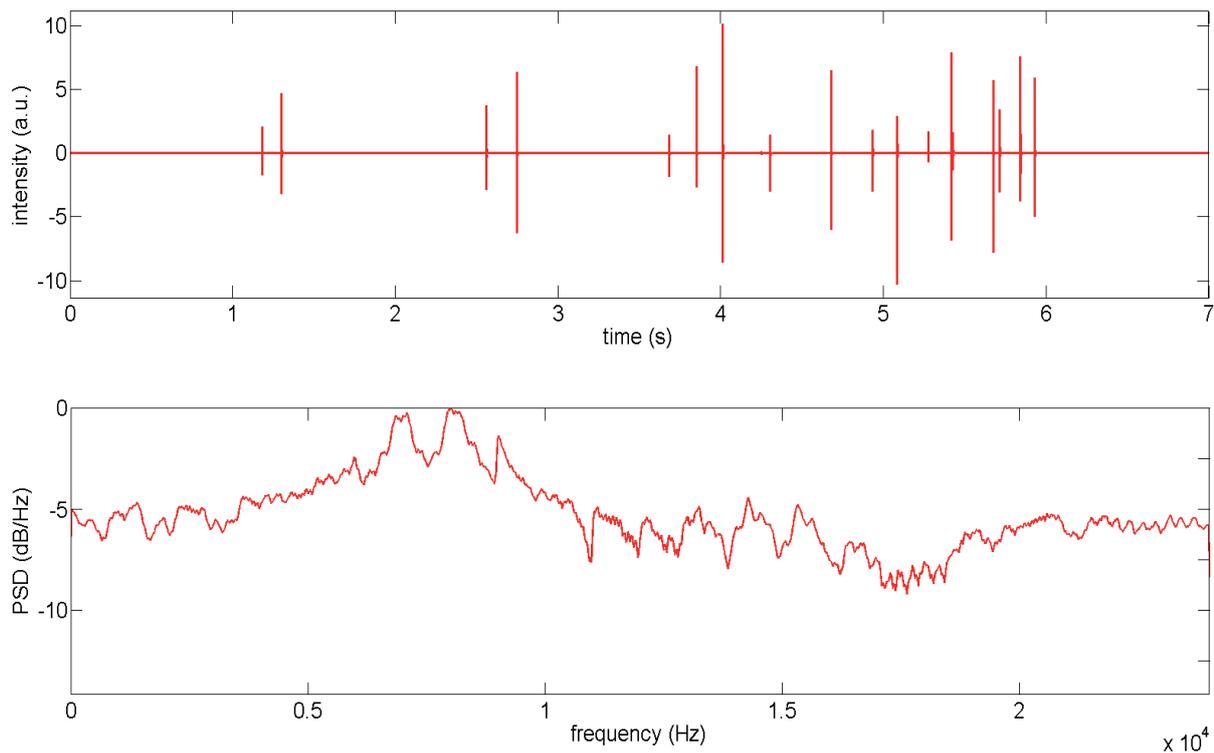


Abb. 3.2.4.i: designakustischer Archetyp von Hanf-Faser-Komposit; synthetisiertes Zeitsignal (oben) und Spektrum (unten)

Auch die Auswertung der modellierten Archetypen und die entsprechende Clusterung von MDF, Hanfaserverbund, und WPC zu einer designakustischen Gruppe bestätigen so die Ergebnisse aus Kap. 2.2.2. In diesem Fall ist die werkstoffliche Klassifikation, wie bereits erwähnt, mit dieser Gruppierung deckungsgleich, was nicht als Abschwächung der in Kap. 2.2.2 formulierten These gewertet wird und auch das hier formulierte Modell nicht in Frage stellt.

Die Archetypen der organischen Komposit-Materialien Rinder- und Schweineknochen, welche zur Untersuchung des kontextuellen Bezugs ihrer Akustik zu den davon ausgelösten psychoakustischen Wahrnehmungsphänomenen modelliert wurden, konnten ebenso wie CFK und GFK zur Modellierung ihrer Amplitudencharakteristik durch einen exponentiellen Verlauf abgebildet werden. Auch hier wurden beide Archetypen mit einem entsprechenden Korrekturfaktor beaufschlagt, um den auch für die Knochenmaterialien typischen, sprunghaften Anstieg des Energiegehalts in den auftretenden Bruchereignissen archetypisch abzubilden.

Zeitlich wurde bei der Modellierung auf die im Bruchexperiment typischerweise vorherrschende Gleichverteilung der Einzelbruchereignisse zurückgegriffen. Auch diese Charakteristik stimmt mit der von CFK und GFK überein. Berücksichtigt man dieser Stelle die bereits bei der Beschreibung der Einzelereignisse für CFK gewonnenen Erkenntnisse bzgl. der Ähnlichkeit der Einzelereignisse von CFK und Rinderknochen (siehe Kap. 3.2.3 bzgl. spektral, Dichte, psychoakustische Fluktuationsstärke), lässt sich die Clusterung der Archetypen von Rinderknochen und CFK entsprechend konsolidieren.

Leichte Differenzierungen zeigen sich im empirisch zugewiesenen Rauschanteil, welche entgegen der relativ rauschfreien Kompositwerkstoffe für die Knochenmaterialien mit 2 (ähnlich MDF) zugewiesen wurde. Aber auch dies stellt keine Einschränkungen für Tauglichkeit bzw. Anwendbarkeit des Modells dar.

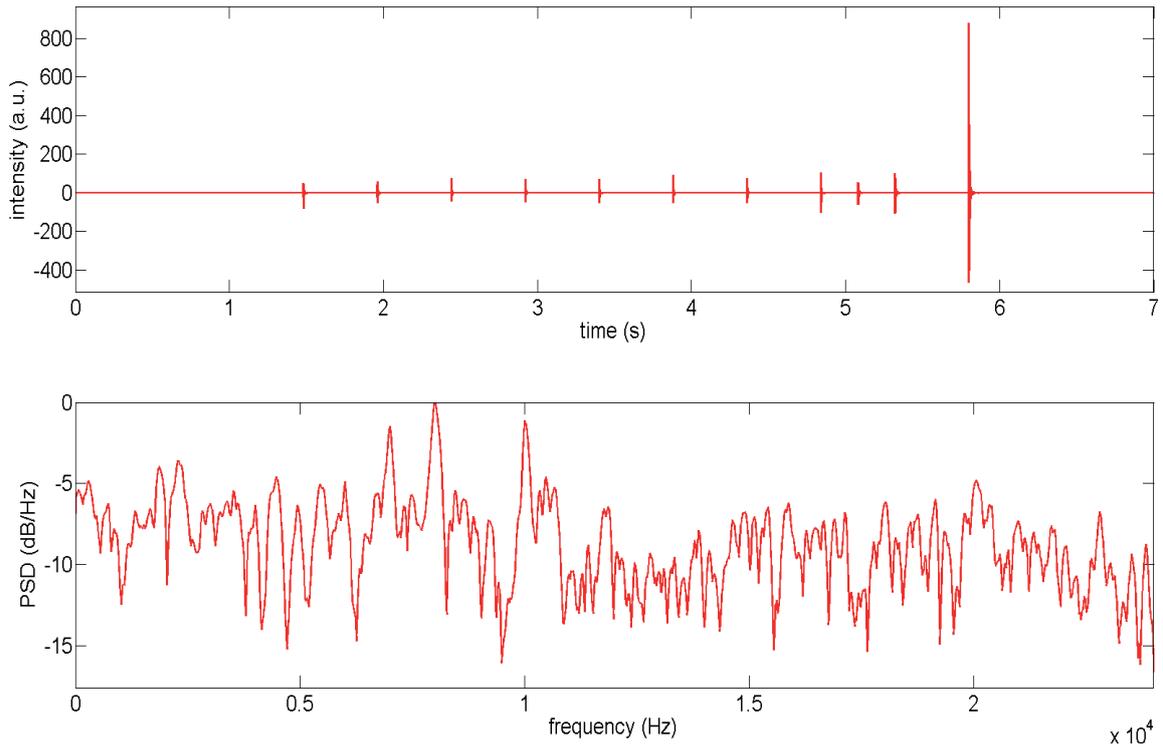


Abb. 3.2.4.j: designakustischer Archetyp von Rinderknochen; synthetisiertes Zeitsignal (oben), Spektrum (unten)

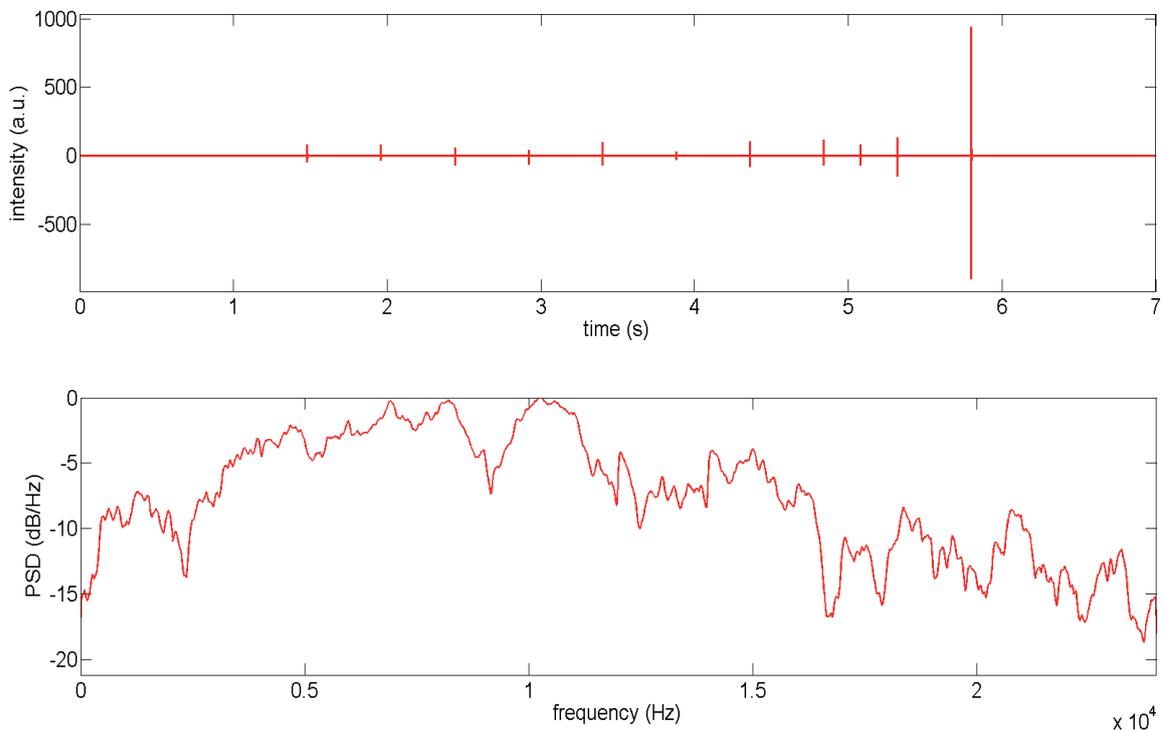


Abb. 3.2.4.k: designakustischer Archetyp von Schweineknochen; synthetisiertes Zeitsignal (oben), Spektrum (unten)

Zusammenfassend lässt sich an dieser Stelle konstatieren, dass die Ergebnisse der Modellierung zu einer für die Ziele der Arbeit ausreichenden Ähnlichkeit zu den experimentellen Daten führen. Wie bereits bei der spezifischen Auswertung der einzelnen designakustischen Archetypen erwähnt, lassen sich somit die während der experimentellen Analysen formulierten Thesen bestätigen, welche an dieser Stelle noch einmal abschließend behandelt werden:

These 1:

Die akustische bzw. designakustische Klassifizierung von Werkstoffen kann von der konventionellen, herkunfts- oder verfahrensorientierten Werkstoffklassifikation abweichen.

Die über die archetypische Modellierung abbildbaren designakustischen Material- und Werkstoffgruppen, bei welchen sich beispielsweise Bambus und CFK, oder auch GFK und Kiefernholz clustern, bestätigen die aus den Experimenten abgeleitete These genauso, wie die Gruppe der Wirr- bzw. Kurzfaserverwerkstoffe. Wobei letztere auch belegt, dass es durchaus zu einer Übereinstimmung der Klassifikationsmodelle kommen kann. Dies wird jedoch als nicht kritisch angesehen, da die designakustische Klassifizierung als Prognose- und Auswahlwerkzeug und nicht als Gegenentwurf konzipiert wurde.

These 2:

Die designakustische Ähnlichkeit ist trotz werkstofflicher und geometrischer Gleichheit jedoch nicht gegeben, wenn die durch Deformation hervorgerufenen Schädigungsmechanismen zu stark voneinander abweichen.

Hier sei noch einmal auf die experimentellen Ergebnisse bei den verschiedenen CFK-Gelege mit unidirektionaler oder isotroper Faserausrichtungen verwiesen (vgl. Abb. 2.3.1 und ff. Text), welche in gewisser Weise auch die oft erhebliche Streuung der Akustik von natürlich gewachsenen Hölzern erklärt. Hier kann das Modell an Grenzen stoßen, welche lediglich durch eine feinere Granulierung der Werkstoff- oder Materialspezifikation entgegengewirkt werden kann, um auf Wahrnehmungsebene sichere Prognosen zu gewährleisten.

These 3:

Unterschiedliche Schädigungsmechanismen können im Einzelfall zu einer phänomenologisch ähnlichen bzw. gleichartigen akustischen Verhaltensweise im Sinne der designakustischen Betrachtungsweise führen.

Diese These besagt, dass es wahrnehmungsbezogen durchaus zur übereinstimmenden Perzeption kommen kann. Sie formuliert quasi die Ausnahme zur zweiten These, was die ermittelten Paare Bambus und CFK, sowie GFK und Kiefernholz bestätigen. Eine Definition der genauen Grenze zwischen den Thesen 2 und 3 ist mit Sicht auf die phänomenologische Herangehensweise obsolet, da die Modellierungsparameter und Wahrnehmung der Archetypen übereinstimmen.

Abschließend soll nun auf den grundlegenden Ansatz der Arbeit zurückgekommen werden, die erarbeiteten Erkenntnisse und Methoden im gestalterischen Bereich für Designer anwendbar zu machen. Dazu ist es notwendig eine geeignete Transkription, die auf visuelle Beschreibungskriterien aus Kunst und Design referenziert zu erarbeiten, um die Zugänglichkeit des bis hierhin signalverarbeitungstechnisch beschriebenen Werkzeugs auf die gestalterische Ebene zu transformieren.

Im nächsten Kapitel werden die beschriebenen Archetypen deswegen anhand der beschriebenen Modellierungsparameter mit dafür eingeführten designakustischen Eigenschaftspaaren vernetzt, welche im Folgenden beschrieben werden.

Diese Paare bilden die Basis für eine geeignete designakustische Visualisierung zur gestalterisch orientierten Material- und Werkstoffauswahl.

3.2.5 Formulierung und Verkopplung designakustischer Komplementärpaare und Archetypen

Das im Folgenden vorgeschlagene designakustische Beschreibungs- und Klassifizierungsmodell knüpft Bezüge zu den klassischen kunst- und designtheoretischen Modellen der bildenden Künste, speziell zu den visuell-gestalterischen Aspekten des Industrial Designs, die ihrerseits vielfältige Anwendung im Produktdesign gefunden haben.

Zur Einordnung der vorliegenden Arbeit sei an dieser Stelle nochmals beispielhaft auf die integrativen Gestaltungsarbeiten Luckners verwiesen, der Akustik in das Modellvorhaben „Multisensuelles Design“ an der „Burg Giebichenstein“ Hochschule für Kunst und Design Halle (heute Kunsthochschule Halle) einbezog. Die Tatsache, dass „...eine naturwissenschaftliche Tiefensicht, für die sich Designer nicht berufen fühlen“ erforderlich ist, stellt für Luckner dabei eher ein zu überbrückendes Hindernis dar, als dass dies ein Grund wäre „... die Wesensmerkmale eines Produkts per Geräusch...“ nicht herauszuarbeiten, zu schärfen oder zu verbessern. (vgl. Kap. I.1.2 [LUCK04]). So schlugen Luckner und Blutner exemplarisch ein psychoakustisches Testsystem vor, welches verwandte Ansätze zur Simulation, bzw. Modellierung von Klängen, wie in der vorliegenden Arbeit, dort aber objektbezogen für beliebige Gebrauchsgegenstände skizziert (vgl. Abb. I-b, ff. Kap. I.1.4). Hier könnten beispielsweise die beschriebenen Material- und Werkstoffarchetypen der vorliegenden Arbeit anknüpfen, welche die Datenbasis für derartige Test- oder Gestaltungssysteme darstellen könnten. Zur Auswahl eines für die Gestaltung grundlegend geeigneten Archetypen muss aber schon hier die prinzipiell notwendige Verkopplung der signalverarbeitungstechnischen Erkenntnisse zum Kontext der gestalterischen Arbeit erfolgen, um die Auswahl durch den Designer zu ermöglichen.

Der diesbezüglich im Folgenden beschriebene Ansatz beruht auf der These, dass visuelle und akustische Prinzipien in gleicher bzw. ähnlicher Form wirksam sind und eine Akzeptanz beim Nutzer prognostizierbar ist. Bezüglich der Rückführbarkeit, bzw. allgemeinen Gültigkeit visueller Gestaltungsprinzipien sei an dieser Stelle exemplarisch Zitzmann als prägender Vertreter, der „Künstlerischen und wissenschaftlichen Grundlagen der Gestaltung“ an der damaligen Hochschule für industrielle Formgestaltung Halle, Burg Giebichenstein zitiert: „Grundprobleme visueller Gestaltung können nicht veralten, sofern sie naturgesetzlich bedingte Ausgangspunkte haben. Sie sind unabhängig vom steten Wandel der Geschmacksrichtungen, ... Stilbildungen, ... Gefallen oder Missfallen einzelner Menschen. Es geht hier um objektive Tatbestände“ [ZIT1990].

Im Kern lassen sich die im Werk Zitzmanns beschriebenen Aufgaben, Beispiellösungen, Beschreibungen und Hinweise in der folgenden generell gültigen Ordnung übersichtsweise zusammenfassen:

Formkategorien:	Figur/ Grund-Beziehungen:	Übergeordnete Prinzipien:
- richtungslos/ gerichtet	- begrenzt (abgehoben)	- Kontrast
- gegensätzlich	- kontrastarm	- Reihung
- richtungsdifferenziert	- grenzenlos	- Unter- / Überordnung
- richtungsbewegt		- Ausgewogenheit
- formunbestimmt		- Ausgespanntheit
- kombiniert		

Abb. 3.2.5.a: zusammenfassender Strukturierungsansatz von Gestaltungsprinzipien, bzw. gestalterisch/ visuellen Beschreibungen nach Zitzmann [ZIT1990]

Aus der Übersicht geht hervor, dass es sog. übergeordnete Prinzipien gibt, die über sog. Formenkategorien oder Figur/ Grund-Beziehungen je nach Gestaltungsabsicht angesteuert werden können, bzw. vom Betrachter wahrgenommen werden. Für tiefergehende Erklärungen sei auf [ZIT1990]: „Grundlagen visueller Gestaltung: Dokumente zur visuell-gestalterischen Grundlagenausbildung“ verwiesen.

Die folgende Herleitung beruht entsprechend der allgemein anerkannten Gestaltungstheorie auf der folgenden These:

These 4:

Visuelle und akustische Prinzipien wirken in gleicher bzw. ähnlicher Form und ermöglichen bei Kenntnis bzw. Anwendung die Prognostizierbarkeit der Wirkung bzw. Akzeptanz beim Nutzer.

Um die für Gestalter allgemeingültigen und übergeordneten Prinzipien wie Kontrast, Über- Unterordnung, Ausgespanntheit und Gegensätzlichkeit auf das im folgenden Kapitel vorgeschlagene designakustische Visualisierungsmodell anzuwenden, wurden im ersten Schritt den ermittelten Merkmalen/Features der Bruchereignisse aus Kap. 3.2.3 sog. designakustische Komplementärpaare zugeordnet, über welche sich die entsprechende Ausprägung eines Merkmals möglichst konform zum Vokabular von Gestaltern beschreiben lässt.

Merkmale des Bruchereignisses	Ausprägung / Beschreibung	vorgeschlagenes designakustisches Komplementärpaar
rel. Anzahl der auflösbaren Einzelereignisse:	wenige durchschnittlich viele	licht dicht
Verteilung / Abstände der Einzelereignisse:	lineare Zeitabstände geometrisch /exponentiell verdichtend zufällige Zeitabstände	regelmäßig unregelmäßig
Anstieg / Verlauf der Einzelereignis-Amplituden:	konstante / lineare Amplituden zufällige Amplituden exponentieller Amplitudenanstieg	ausgeglichen impulsiv
rel. Dämpfung der Einzelereignisse / insgesamt:	ohne / niedrig mittel hoch	hart weich
rel. Rauschanteil:	ohne / niedrig mittel hoch	klar diffus
rel. spektrale Auflösbarkeit:	undifferenziert tendenzielle Bandausprägung differenzierbare Spitzen	geräuschig klanghaft
rel. spektrale Wichtung insgesamt:	höherfrequent ausgewogen niederfrequent	hell dunkel
rel. Energiegehalt insgesamt:	niedrig durchschnittlich hoch	leise laut

Abb. 3.2.5.b: Vorschlag der Zuordnung der ermittelten Merkmale zu den designakustischen Komplementärpaaren

Diese Paare stehen metaphorisch für entsprechende Kategorien, Prinzipien oder Beziehungen, welche eine bestimmte Wahrnehmung beschreiben bzw. hervorrufen. Sie bilden somit im übertragenen Sinne die physikalisch rückführbaren Steuerungs- bzw. Bewertungselemente des vorgeschlagenen designakustischen Modells. Die Begrifflichkeiten sind dabei bewusst so gewählt, dass sie im Wortsinn gegensätzlich zu einander stehen. Die Bezeichnung "komplementär" ist hier der auch im gestalterisch visuellen Kontext bekannten Farblehre entlehnt. Analog der dort geltenden Definition, dass zwei Farbreize dann komplementär sind, wenn ihre Summe das volle Spektrum der weißen Lichtquelle ergibt, definiert das designakustische Begriffspaar das gesamte akustisch wahrnehmbare Spektrum des entsprechenden Bruchmerkmals.

Kategorie, Beziehung oder Prinzip im Visuellen	entsprechende designakustische Komplementärpaare	übergeordnet, allgemein wirkende VISUELL sowie AKUSTISCH wirkende Beziehungen / Prinzipien
richtungslos / gerichtet	hell - dunkel	} <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1145 976 1390 1003">Kontrast / Kontrastarmut <li data-bbox="1145 1025 1321 1052">Gegensätzlichkeit <li data-bbox="1145 1075 1358 1102">Unter- / Überordnung <li data-bbox="1145 1124 1315 1151">Ausgespanntheit
kombiniert	licht - dicht	
begrenzt / grenzenlos	leise - laut	
formbestimmt / -unbestimmt	weich - hart	
unausgewogen / ausgewogen	ausgeglichen - impulsiv	
Reihung	regelmäßig - unregelmäßig	
begrenzt (abgehoben)	geräuschig - klanghaft	
formunbestimmt/ -bestimmt	klar - diffus	

Abb. 3.2.5.c: Vorschlag der Verkopplung visuell gestalterischer Merkmale zu den designakustischen Komplementärpaaren

Mit Hilfe dieser Eigenschaftspaare lassen sich so die physikalisch rückführbaren Wahrnehmungsphänomene konsistent im Kontext der für Gestalter vertrauten Begriffswelt und mit Bezug zu den allgemein und übergeordnet wirkenden Gestaltungsbeziehungen und -prinzipien beschreiben.

Die Spanne zwischen den entsprechenden Paar-Begriffen, welche die Merkmalsausprägung beschreibt, muss in sinnvoller Auflösung und einheitlich inkrementiert werden. Dafür wird folgende zweistufige Unterteilung in beide Ausprägungsrichtungen vorgeschlagen:

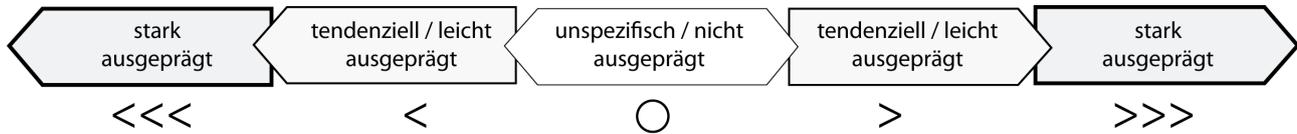


Abb. 3.2.5.d: Vorschlag zur vereinheitlichten Abstufung der Merkmalsausprägungen im designakustischen Beschreibungsmodell

Die Vergabe der Merkmalsausprägung erfolgt dabei lediglich für eine Unterteilungsstufe. Zwischen den einzelnen Paaren bzw. Bruchmerkmalen wird es bei der Bewertung oder Modellierung zu Wichtungen bzw. Dominanzen einzelner oder mehrerer Merkmalsausprägungen kommen, die in einer weiteren Ebene zueinander relativiert werden müssen. Für die Abstufung wird eine hinreichend genaue dreistufige Unterteilung vorgeschlagen:

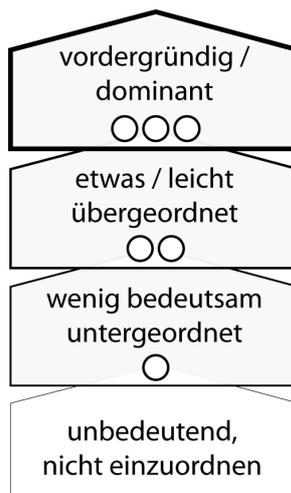


Abb. 3.2.5.e: Vorschlag zur vereinheitlichten Abstufung der Wichtungen und Dominanzen im designakustischen Beschreibungsmodell

Die Vergabe kann hier bei Bedarf bzw. subjektivem Empfinden ggf. mehrfach für die einzelnen Stufen erfolgen. Unter Verwendung dieser beiden abgestuften Beschreibungsdimensionen lassen sich die modellierten designakustischen Archetypen aus Kap. 3.2.4 als Ausgangspunkt für die weiteren Schritte anhand der Datenlage wie folgt beschreiben:

GFK		<<<	<	o	>	>>>
rel. Anzahl der auflösbaren Einzelereignisse	licht - dicht			x		
Verteilung / Abstände der Einzelereignisse	regelmäßig - unregelmäßig	x				
o Anstieg / Verlauf der Einzelereignis-Amplituden	ausgeglichen - impulsiv					x
o rel. Dämpfung der Einzelereignisse / insgesamt	hart - weich		x			
relativer Rauschanteil	klar - diffus	x				
ooo rel. spektrale Auflösbarkeit	geräuschig - klanghaft				x	
ooo rel. spektrale Wichtung insgesamt	hell - dunkel	x				
oo rel. Energiegehalt insgesamt	leise - laut					x

Bambus		<<<	<	o	>	>>>
rel. Anzahl der auflösbaren Einzelereignisse	licht - dicht					x
Verteilung / Abstände der Einzelereignisse	regelmäßig - unregelmäßig		x			
o Anstieg / Verlauf der Einzelereignis-Amplituden	ausgeglichen - impulsiv				x	
o rel. Dämpfung der Einzelereignisse / insgesamt	hart - weich	x				
relativer Rauschanteil	klar - diffus		x			
ooo rel. spektrale Auflösbarkeit	geräuschig - klanghaft				x	
ooo rel. spektrale Wichtung insgesamt	hell - dunkel	x				
oo rel. Energiegehalt insgesamt	leise - laut				x	

Abb. 3.2.5.f: spezifische Merkmalsausprägungen und relative Wichtungen des designakustischen Material- und Werkstoffpaares GFK und Bambus im direkten Vergleich

CFK		<<<	<	o	>	>>>
rel. Anzahl der auflösbaren Einzelereignisse	licht - dicht		x			
Verteilung / Abstände der Einzelereignisse	regelmäßig - unregelmäßig	x				
Anstieg / Verlauf der Einzelereignis-Amplituden	ausgeglichen - impulsiv					x
oo rel. Dämpfung der Einzelereignisse / insgesamt	hart - weich		x			
relativer Rauschanteil	klar - diffus	x				
ooo rel. spektrale Auflösbarkeit	geräuschig - klanghaft					x
oo rel. spektrale Wichtung insgesamt	hell - dunkel		x			
o rel. Energiegehalt insgesamt	leise - laut					x

Kiefer		<<<	<	o	>	>>>
rel. Anzahl der auflösbaren Einzelereignisse	licht - dicht				x	
Verteilung / Abstände der Einzelereignisse	regelmäßig - unregelmäßig					x
Anstieg / Verlauf der Einzelereignis-Amplituden	ausgeglichen - impulsiv			x		
oo rel. Dämpfung der Einzelereignisse / insgesamt	hart - weich		x			
relativer Rauschanteil	klar - diffus			x		
ooo rel. spektrale Auflösbarkeit	geräuschig - klanghaft					x
oo rel. spektrale Wichtung insgesamt	hell - dunkel		x			
o rel. Energiegehalt insgesamt	leise - laut				x	

Rinderknochen		<<<	<	o	>	>>>
rel. Anzahl der auflösbaren Einzelereignisse	licht - dicht	x				
Verteilung / Abstände der Einzelereignisse	regelmäßig - unregelmäßig		x			
Anstieg / Verlauf der Einzelereignis-Amplituden	ausgeglichen - impulsiv					x
o rel. Dämpfung der Einzelereignisse / insgesamt	hart - weich	x				
relativer Rauschanteil	klar - diffus				x	
ooo rel. spektrale Auflösbarkeit	geräuschig - klanghaft					x
oo rel. spektrale Wichtung insgesamt	hell - dunkel		x			
o rel. Energiegehalt insgesamt	leise - laut					x

Abb. 3.2.5.g: spezifische Merkmalsausprägungen und relative Wichtungen des designakustischen Material- und Werkstoffpaares CFK und Kiefer im Kontext zum Rinderknochen-Material

Die in Abb. 3.3.5.f auf Basis der akustischen Messungen gegenübergestellten Matrizes zur Ausprägung und Wichtung der Bruchereignismerkmale visualisieren auch auf der dargestellten Abstraktionsebene die mehrfach beschriebene Zugehörigkeit von GFK und Bambus zu einer designakustischen Gruppe. Die Wertepaare liegen insgesamt sehr dicht nebeneinander und bilden das Paar bzw. die Klasse sehr gut ab. Die Darstellung nutzt dafür die in Abb. 3.2.5.b beschriebene Zuordnung der Merkmale zu den Komplementärpaaren. Durch die in Abb. 3.2.5.c beschriebene Zuordnung zu den visuell gestalterischen Merkmalen kann das Material nun nicht nur mit dem Vokabular der Akustik, sondern darüber hinaus auch über dem Designer oder Gestalter vertraute Begriffswelten beschrieben werden. Eine Rückführung dieser auf akustische Parameter, wie sie z. B. für die Modellierung eines Zielsounds nötig wäre, ist in der gegebenen Inkrementierung aus Abb. 3.2.5.d und Abb. 3.2.5.e möglich.

Die Beschreibung von CFK und Kiefer in Abb. 3.2.5.g visualisiert die designakustische Zugehörigkeit zu einer Gruppe nicht so deutlich, wie es bei GFK-Bambus der Fall ist, jedoch ist auch hier eine designakustische Ähnlichkeit erkennbar. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die in der Arbeit vorgenommene Clusterung lediglich zur besseren Nutzbarkeit des Modells eingeführt wurde, um z. B. entsprechend einer gewünschten Wahrnehmung vergleichbare Zielsounds, bzw. Materialien oder Werkstoffe vorschlagen zu können oder eben wie in diesem Fall auf nicht offenkundige Ähnlichkeiten in der Perzeption hinzuweisen. Auf klar definierte Grenzen zwischen den einzelnen Gruppen wurde bewusst verzichtet, da die untersuchten Proben einen denkbar kleinen Ausschnitt der Materialwelt darstellen und weitaus mehr Klassen mit diversen Abgrenzungen und Überlappungen existieren, die perspektivisch untersuchbar wären.

Beispielhaft ist deswegen die Beschreibung der Rinderknochenproben in Abb. 3.2.5.g aufgenommen worden. Diese verdeutlicht die doch eher unerwartete akustische Zugehörigkeit zu den anderen werkstofflich und materiell sehr andersartigen Vertretern dieses Clusters deutlich.

Mit Sicht auf die in Kapitel II.2 einleitend erwähnte Theorie der evolutionär entwickelten, unconditionierten oder angeborenen Reflexe, wie es die Reaktion auf das Geräusch eines brechenden Knochens zweifellos darstellt, lässt sich so die akustische Wahrnehmung brechender CFK oder Kiefernholzstrukturen entsprechend einordnen und gestalterisch werten. Auch diese sollten ähnlich dem Knochenmaterial kontextuell unabhängig bzw. gleich unangenehm wahrgenommen werden. Auf die perspektivische Erweiterung des Modells durch kontextuelle Filter, welche die akustische Wahrnehmung in verschiedenen Räumen oder Umgebungen beeinflussen, wird in Kap. 4 abschließend eingegangen.

Schweineknochen		<<<	<	o	>	>>>
	rel. Anzahl der auflösbaren Einzelereignisse	licht - dicht	x			
	Verteilung / Abstände der Einzelereignisse	regelmäßig - unregelmäßig	x			
	Anstieg / Verlauf der Einzelereignis-Amplituden	ausgeglichen - impulsiv				x
o	rel. Dämpfung der Einzelereignisse / insgesamt	hart - weich			x	
	relativer Rauschanteil	klar - diffus			x	
	rel. spektrale Auflösbarkeit	geräuschig - klanghaft		x		
oo	rel. spektrale Wichtung insgesamt	hell - dunkel		x		
ooo	rel. Energiegehalt insgesamt	leise - laut			x	

Abb. 3.2.5.h: gegenüber Rinderknochen differierende spezifische Merkmalsausprägungen und relative Wichtungen bei Schweineknochen

Wie unterschiedlich die akustische Wahrnehmung wiederum trotz einer sehr ähnlichen materiellen Einteilung sein kann, wird beim Vergleich der Merkmalsausprägungen zwischen Rinder- und Schweineknochen deutlich. Aufgrund differenzierter mechanischer Eigenschaften zeigt dieses Beispiel sehr deutlich, welche akustischen bzw. wahrnehmbaren Streuungen z. B. bei verschiedenen Knochenproben auftreten können. Offen bleibt, in welche Richtung die Akustik und Wahrnehmung menschlicher Knochenbrüche tendiert. Die Vermutung, dass diese sich eher in die Gruppe aus Abb. 3.2.5.g einordnen und somit die kontextuelle Unabhängigkeit der Wahrnehmung untermauern wäre ebenfalls ein perspektivisches Untersuchungsthema.

MDF			<<<	<	o	>	>>>
oo	rel. Anzahl der auflösbaren Einzelereignisse	licht - dicht	x				
ooo	Verteilung / Abstände der Einzelereignisse	regelmäßig - unregelmäßig				x	
	Anstieg / Verlauf der Einzelereignis-Amplituden	ausgeglichen - impulsiv	x				
	rel. Dämpfung der Einzelereignisse / insgesamt	hart - weich				x	
ooo	relativer Rauschanteil	klar - diffus					x
oo	rel. spektrale Auflösbarkeit	geräuschig - klanghaft	x				
oo	rel. spektrale Wichtung insgesamt	hell - dunkel			x		
	rel. Energiegehalt insgesamt	leise - laut		x			

WPC			<<<	<	o	>	>>>
oo	rel. Anzahl der auflösbaren Einzelereignisse	licht - dicht	x				
ooo	Verteilung / Abstände der Einzelereignisse	regelmäßig - unregelmäßig				x	
	Anstieg / Verlauf der Einzelereignis-Amplituden	ausgeglichen - impulsiv		x			
	rel. Dämpfung der Einzelereignisse / insgesamt	hart - weich			x		
ooo	relativer Rauschanteil	klar - diffus					x
oo	rel. spektrale Auflösbarkeit	geräuschig - klanghaft		x			
o	rel. spektrale Wichtung insgesamt	hell - dunkel				x	
	rel. Energiegehalt insgesamt	leise - laut			x		

HFK			<<<	<	o	>	>>>
o	rel. Anzahl der auflösbaren Einzelereignisse	licht - dicht		x			
oo	Verteilung / Abstände der Einzelereignisse	regelmäßig - unregelmäßig			x		
	Anstieg / Verlauf der Einzelereignis-Amplituden	ausgeglichen - impulsiv	x				
	rel. Dämpfung der Einzelereignisse / insgesamt	hart - weich					x
ooo	relativer Rauschanteil	klar - diffus					x
oo	rel. spektrale Auflösbarkeit	geräuschig - klanghaft		x			
oo	rel. spektrale Wichtung insgesamt	hell - dunkel			x		
	rel. Energiegehalt insgesamt	leise - laut		x			

designakustisches Material- und Werkstoffpaar

Abb. 3.2.5.i: spezifische Merkmalsausprägungen und relative Wichtungen der Kurz- und Wirrfaserwerkstoffe, welche sich neben der werkstofflichen Clusterung auch designakustisch gruppieren lassen

In der letzten Abb 3.2.5.i sind die Proben der klassisch als Kurz- und Wirrfaserwerkstoffe bezeichneten Komposite aufgeführt. Diese clustern sich auch in der designakustischen Bewertung zu einer Gruppe mit sehr ähnlichen Wahrnehmungseigenschaften. Der Grad der Übereinstimmung ist dem der Gruppe aus Abb. 3.2.5.g ähnlich, wo ebenso meist identische oder dicht zueinander liegende Merkmalsausprägungen der Wertepaare vorliegen. Im Falle dieser designakustischen Gruppe aus Kurz- und Wirrfasergelegen stimmt die klassische Werkstoffeinteilung, wie bereits erwähnt mit der hier vorgeschlagenen designakustischen Zuordnung zu Proben mit sehr ähnlicher Wahrnehmung aus Gestaltungssicht überein. Aus Sicht der Einsatzpotenziale für das vorgeschlagene Modell sind für den Designer sowohl diese „vorhersehbaren“ als auch die nicht naheliegenden Übereinstimmungen wie in Abb. 3.2.5.g interessant um die Gestaltung gezielt akustisch zu beeinflussen und ein vertrautes oder auch unerwartetes Nutzererlebnis zu erzeugen.

Die Tauglichkeit bzw. Praktikabilität der designakustischen Beschreibung der Archetypen, über die in diesem Kapitel eingeführten Komplementärpaare mittels der vorgeschlagenen Abstufungen, soll in Kap. 3.2.7 noch durch eine neutrale Probandenbefragung validiert werden. Vorab wird jedoch eine für die Gegenüberstellung und einfachere Vergleichbarkeit der Archetypen geeignete Visualisierungsmethode vorgeschlagen, durch welche sich die eben beschriebenen Materialien und Werkstoffe in den ermittelten Abstufungsdimensionen grafisch darstellen lassen. Grund dafür ist, dass die durchgeführten Vergleiche und Zuordnungen aufgrund der fehlenden visuellen Prägnanz der bis hierhin verwendeten tabellarischen Visualisierungsmethode noch als sehr aufwändig empfunden wurden.

3.2.6 Designakustisches Visualisierungsmodell

Wie üblicherweise könnte auch diese Arbeit mit der abgeschlossenen Auswertung enden, jedoch sollen entsprechend der in der Motivation erwähnten Ziele auch Gestaltungsaspekte einfließen und eine geeignete Darstellungsform vorgeschlagen werden, die den Vergleich der designakustischen Archetypen auf „einen Blick“ ermöglicht.

Vor dem Hintergrund der einleitend in Kap. II aufgezeigten Ansätze, Vorschläge und Systeme zur Notation von Akustik wurden zur Erarbeitung des hier vorgeschlagenen Visualisierungsmodells vor allem die neuzeitlichen Beiträge herangezogen, auf deren Bezug zur Herleitung jeweils kurz verwiesen wird.

Anknüpfend an die in Kap. 3.2.5 formulierten Begrifflichkeiten und deren relativer Anordnung zueinander wurde für die Paare zuerst eine kausal erschließbare Visualisierung gesucht. Der bereits beschriebene Bezug zur Farblehre legte die Anordnung in einer Kreisform nahe. Die relative Anordnung der Paare zueinander korreliert in diesem sehr gut mit dem allgemein bekannten Farbkreis und ermöglicht so die Darstellung eines designakustischen Klangkreises:

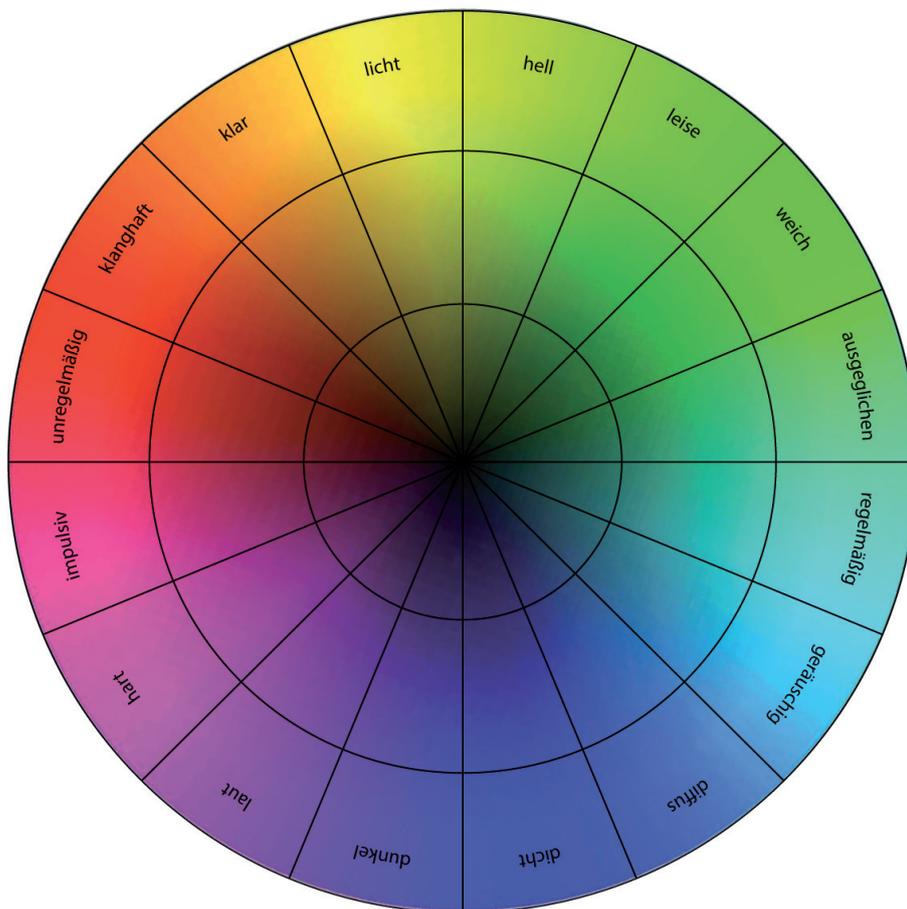


Abb. 3.2.6.a: relative Anordnung der Komplementärpaare im sog. designakustischen Klangkreis

Es sei erwähnt, dass sich die Verwendung von Farben zur Beschreibung von Akustik in zahlreichen Arbeiten in den unterschiedlichsten Varianten finden lässt. Für einen ersten vertiefenden Überblick sei hier neben den Beispielen aus Kap. II dieser Arbeit stellvertretend die Ausführungen von Haverkamp verwiesen, der sich mit den verschiedenen Visualisierungen auditiver Wahrnehmung, vertiefend mit der synästhetischen Zuordnung von Klängen zu Farben auseinandersetzt [HAV2003].

In diesem Kontext ergänzend beschreibt Cox an anderer Stelle die Verwendung von Farbbegriffen aus Sicht der Ingenieur-Akustik: „Bis heute führen Akustik-Ingenieure Messungen mit „Weißem“ und „Rosa Rauschen“ durch. Mischt man Farben miteinander, ergibt sich daraus eine bestimmte Gesamtfarbe, weil die verschiedenen Pigmente das Frequenzgleichgewicht des reflektierten Lichts verändern. Blaue Farbe reflektiert Licht höherer Frequenz als rote Farbe. Akustik-Ingenieure benutzen Farben, um die dominanten Frequenzen in Klängen zu beschreiben. In Weißem Rauschen sind alle Frequenzen in gleichem Maß vertreten. Es klingt eher nach einem schlecht eingestellten Radio. In Rosa Rauschen dominieren dagegen niedrige Frequenzen, darum grummelt es auch wie Donnerrollen“ [COX2015].

Die Beispiele verdeutlichen, dass sich beim Vergleich der verschiedenen vorgeschlagenen Audio-Farbsysteme keine Einheitlichkeit erkennen oder ableiten lässt, aber auch kein genereller Konflikt mit dem Klangkreis der Arbeit vorliegt, weswegen für die weiteren Schritte am vorgeschlagenen Modell in Abb. 3.2.6.a festgehalten wurde.

Neben der Anordnung der Paare findet sich in Abb. 3.2.6.a auch entsprechend der in Abb. 3.2.5.d festgelegten Unterteilung eine radiale Inkrementierung der Merkmalsausprägungen des designakustischen Beschreibungsmodells, welche durch konzentrische Kreise voneinander abgegrenzt werden.

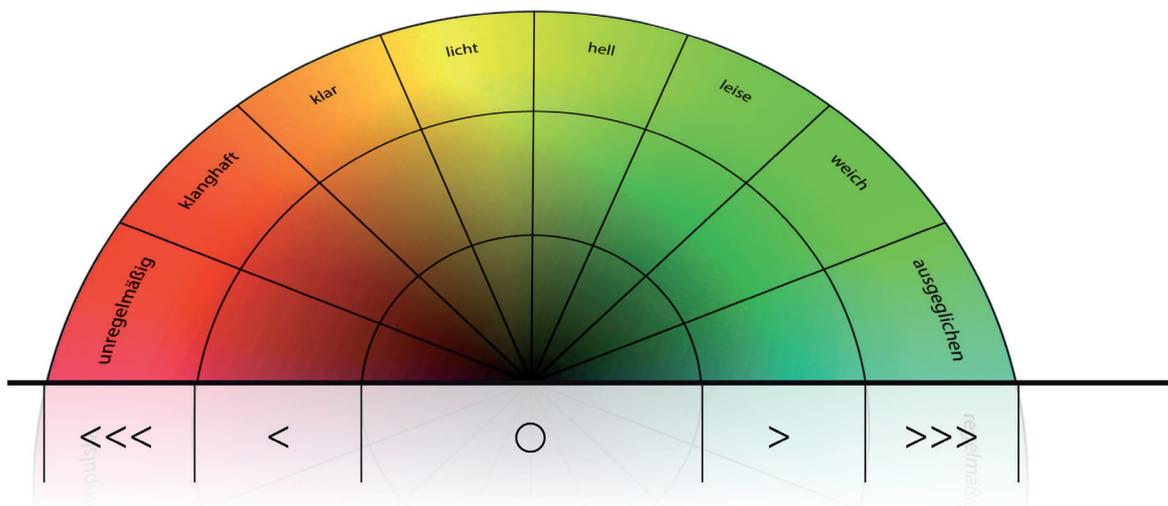


Abb. 3.2.6.b: Zuordnung der Merkmalsausprägungen zum Klangkreis (vgl. Abb. 3.2.5.d)

Im nächsten Schritt galt es die in Abb. 3.2.5.e eingeführten Abstufungen der Wichtungen und Dominanzen zu integrieren. Da mit der Belegung des Kreises durch die Paare und deren Ausprägungsstufen (+ der farblichen Zuordnung) bereits alle bis hierhin eingeführten Dimensionen ausgeschöpft waren, wurde das Modell um eine dritte Dimension erweitert, welche die Visualisierung von einer Kreis- zur Zylinderform weiterentwickelt.

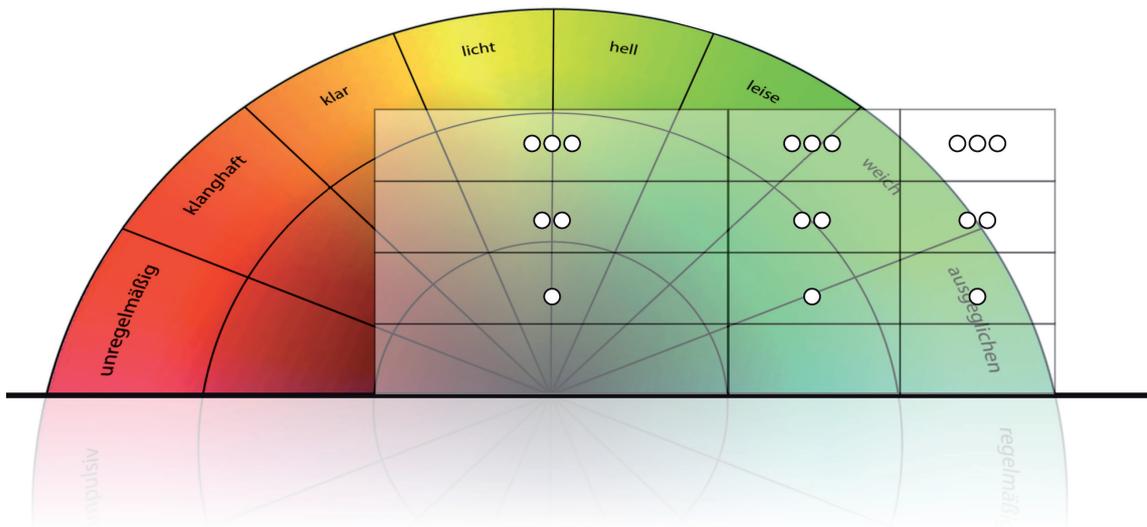


Abb. 3.2.6.c: Zuordnung der Wichtungen zum Klangkreis (vgl. Abb. 3.2.5.e)

Ähnliche Zugänge, um die Komplexität der Akustik adäquat zu erfassen finden sich in der neuzeitlichen Akustik in Form von Wasserfalldiagrammen. Zur wahrnehmungsbezogenen Akustik sei hier stellvertretend auf den Ansatz von Schafer verwiesen, der ein Modell erarbeitete, welches erweiternd zu den zweidimensionalen Auswertemethoden der klassischen Akustik eher räumlich orientiert ist, da „... akustische Standarddiagramme zum einen mehrdeutig sind und darüber hinaus den angeborenen Instinkten des Hörens nicht ohne Weiteres entsprechen“ (vgl. [SCHAF10]).

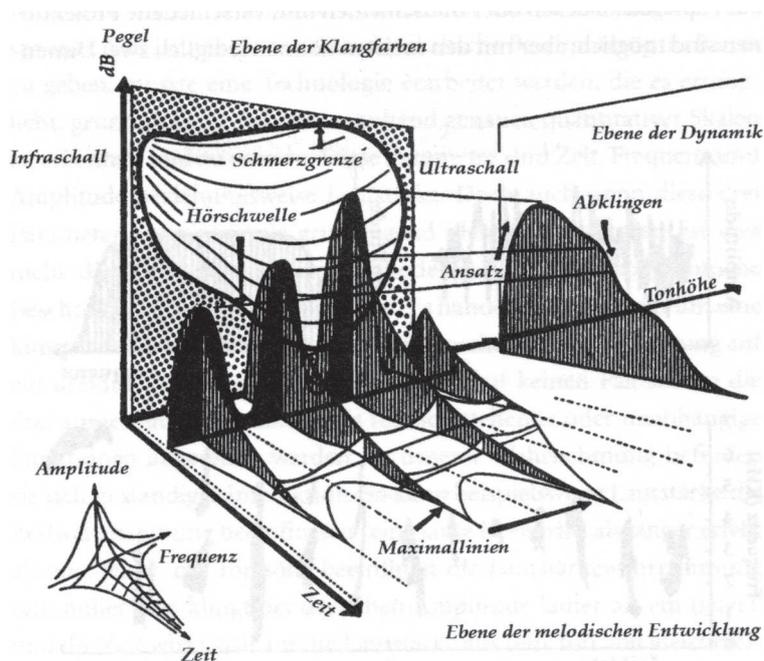


Abb. 3.2.6.d: „Die dreidimensionale Abbildung eines einfachen akustischen Objekts“ nach [SCHAF10]

Die dazugehörige Beschreibung, auf welche hier nicht weiter eingegangen werden soll beweist, dass jedes Modell einer gewissen Erklärung bzw. Einarbeitung bedarf. Dies trifft auch auf das in dieser Arbeit vorgeschlagene Modell zur designakustischen Visualisierung zu. Auch die in Kap. 3.2.7 durchgeführte Validierung bestätigt dies, zeigt aber auch, dass Nutzer eher beim Erfassen der spezifischen Informationen eines einzelnen Klangkreises Zeit benötigen, als beim für das Werkzeug vordergründig angestrebten relativen Vergleichs zweier oder mehrerer Materialien.

An dieser Stelle werden nun analog der ermittelten Gruppierungen aus Kap. 3.2.5 die Archetypen entsprechend dem vorgeschlagenen Modell vorgestellt. Die finale Visualisierung erfolgte dabei unter Verwendung der CAD-Software SolidWorks [SOL2022] in welcher die Parameter der einzelnen Archetypen durch sog. Konfigurationen an das 3D-Modell übergeben wurden, um die formgebenden Features automatisiert anzusteuern, bzw. merkmalspezifisch zu modellieren. Die Software unterstützt neben dem Export von Grafiken auch dreidimensional animierte Exportformate, wie AVI und 3D-PDF, die es dem Nutzer erlauben die Klangkreise räumlich zu erleben. Diese Technologie führt den Betrachter ähnlich wie beim Erleben einer Plastik um das „Hörobjekt“ herum, was zu einem völlig neuen Nutzererlebnis führt.

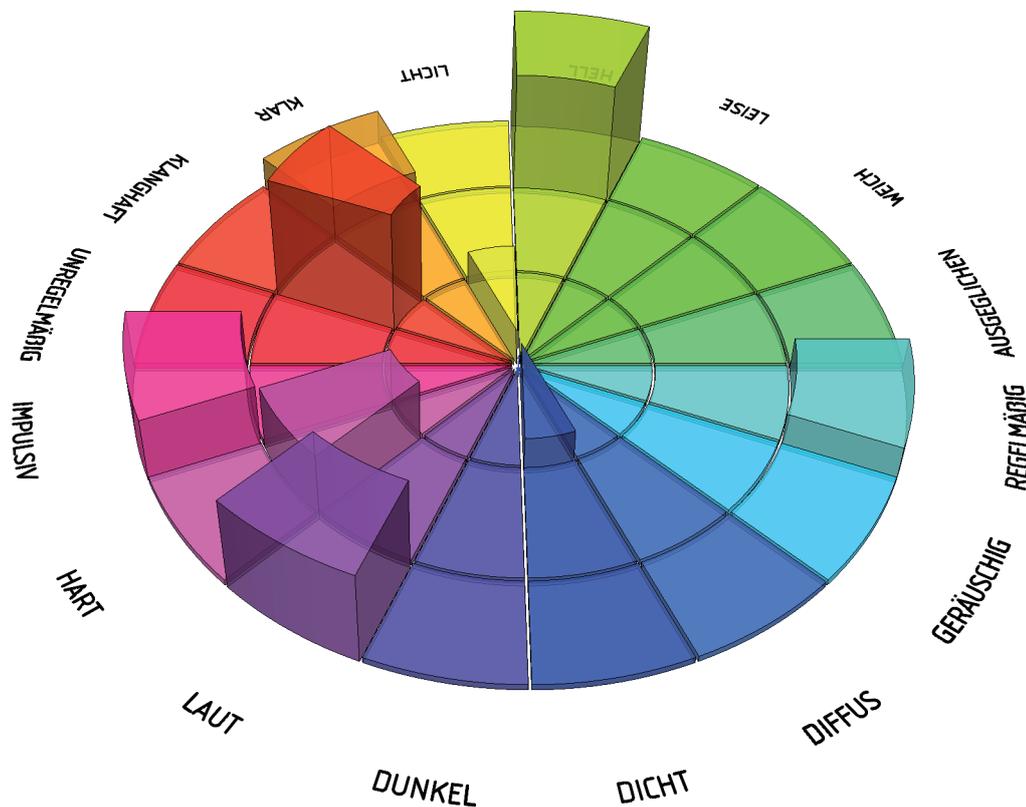


Abb. 3.2.6.e: spezifischer designakustischer Klangkreis von glasfaserverstärktem Kunststoff (GFR)

Bei erster Betrachtung fällt auf, dass die jeweilige Scheibe, wie erstere in Abb. 3.2.6.e quasi eine spezifische „Unwucht“ aufweisen, die individuell stark ausgeprägt sein kann. Im Falle von GFR wird sehr deutlich visualisiert, dass der Werkstoff durch harte, laut und impulsive Anteile bei relativ hellem Klang charakterisiert wird.



Abb. 3.2.6.f: spezifischer designakustischer Klangkreis von Bambusmaterial

Die Verbildlichung des nach Abb. 3.2.5.f designakustisch ähnlichen Bambusmaterials in Abb. 3.2.6.f zeigt eine auf den ersten Blick erfassbare Ähnlichkeit zu GFK und liefert so ein erstes positives Indiz für die Tauglichkeit des Visualisierungsmodells. Das Werkstoffpaar GFK und Bambus ist im direkten Vergleich klar erkennbar.

Im nächsten Schritt wurden die spezifischen Merkmalsausprägungen und relative Wichtungen des designakustischen Material- und Werkstoffpaares CFK und Kiefer im Kontext zum Rinderknochen-Material, wie in Abb. 3.2.5.g beschrieben visualisiert. Es sei an dieser Stelle nochmals angemerkt, dass die Zugehörigkeit mittels des tabellarischen Werkzeuges erst durch intensivere Auswertung möglich war. Es wird erwartet, dass die Visualisierung der Materialien und Werkstoffe über den designakustischen Klangkreis einfacher und schneller erfolgen kann.

Abb. 3.2.6.g bestätigt die These, da die Übereinstimmungen der dominanten Anteile auch bei den vorhandenen Fluktuationen der Merkmalsausprägungen noch sehr gut optisch erfassbar sind. Beim direkten Vergleich des Clusters mit dem vorab beschriebenen Werkstoffpaar GFK-Bambus differenziert sich dieser auch deutlich durch seine ausgeprägteren klanghaften Anteile, wohingegen bei GFK und Bambus eher die höheren Frequenzen dominieren. Gut erkennbar ist auch die relativ gleichartige Ausprägung von harten bzw. lauten und impulsiven Anteilen.

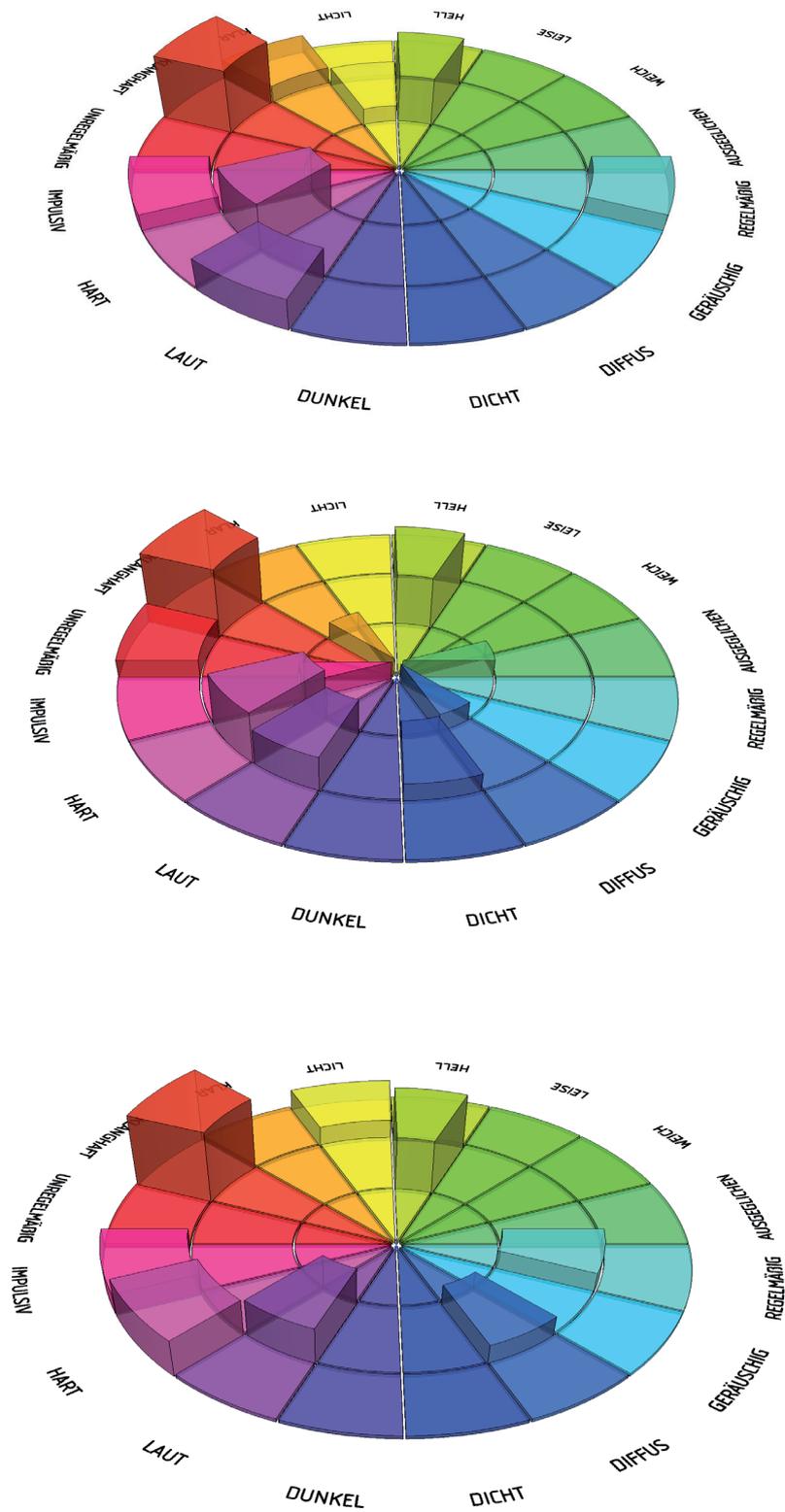


Abb. 3.2.6.g: spezifische designakustische Klangkreise von kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK), Kiefernholz und Rinderknochen (v.o.n.u.) im direkten Vergleich

Auf die akustische Differenzierung der Proben von Schweineknöcheln gegenüber dem vermeintlichen Pendant Rinderknöcheln wurde bereits eingegangen. Bei Betrachtung der designakustischen Klangkreise wird deutlich, dass die Differenzierung vor allem auf das Fehlen der klanghaften Anteile bei Schweineknöcheln zurückzuführen ist. Die Fluktuationen der anderen Merkmalsausprägungen sind zwar stärker, als bei den vorab beschriebenen Clustern bzw. Paaren, jedoch ist eine Ähnlichkeit beider Klangkreise, was gerade die Merkmale der unteren Hälfte anbelangt durchaus optisch wahrnehmbar.

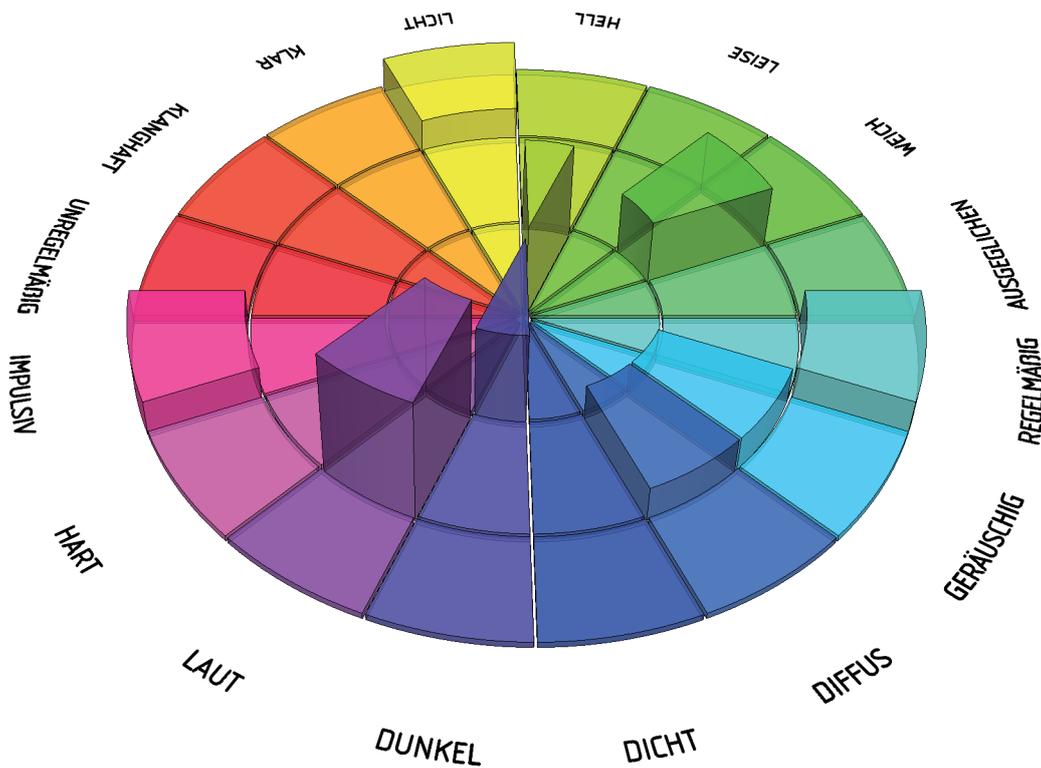


Abb. 3.2.6.b: spezifischer designakustischer Klangkreis von Schweineknöcheln

Auch beim Vergleich der Schweineknöchelprobe mit dem vorab in Abb. 3.2.5.i ausgewerteten Cluster der Kurz- und Wirrfaserwerkstoffe ist die optische und damit akustische Ähnlichkeit, was die diffusen und geräuschigen Anteile anbelangt erkennbar. Hier grenzen sich die Klangkreise in Abb. 3.2.6.i vor allem dadurch ab, dass keine impulsiven Anteile vorhanden sind und dass der Sektor auch im Bereich der harten und lauten Anteile prinzipiell keine Ausschläge aufweist.

Generell lässt sich konstatieren, dass sowohl die eigentliche Verbildlichung als auch die relativen Vergleiche mit dem vorgeschlagenen Werkzeug zur designakustischen Visualisierung mittels der akustischen Daten sehr gut umsetzbar sind. Die Klangkreise weisen den identischen Informationsgehalt der in Kap. 3.2.5 erarbeiteten Übersichten auf und stellen diesen gut erfassbar dar. Die Tauglichkeit der Darstellung und des zugrundeliegenden Modells konnte über die im Folgenden kurz zusammengefasste Validierung über eine Probandenbefragung bestätigt werden.

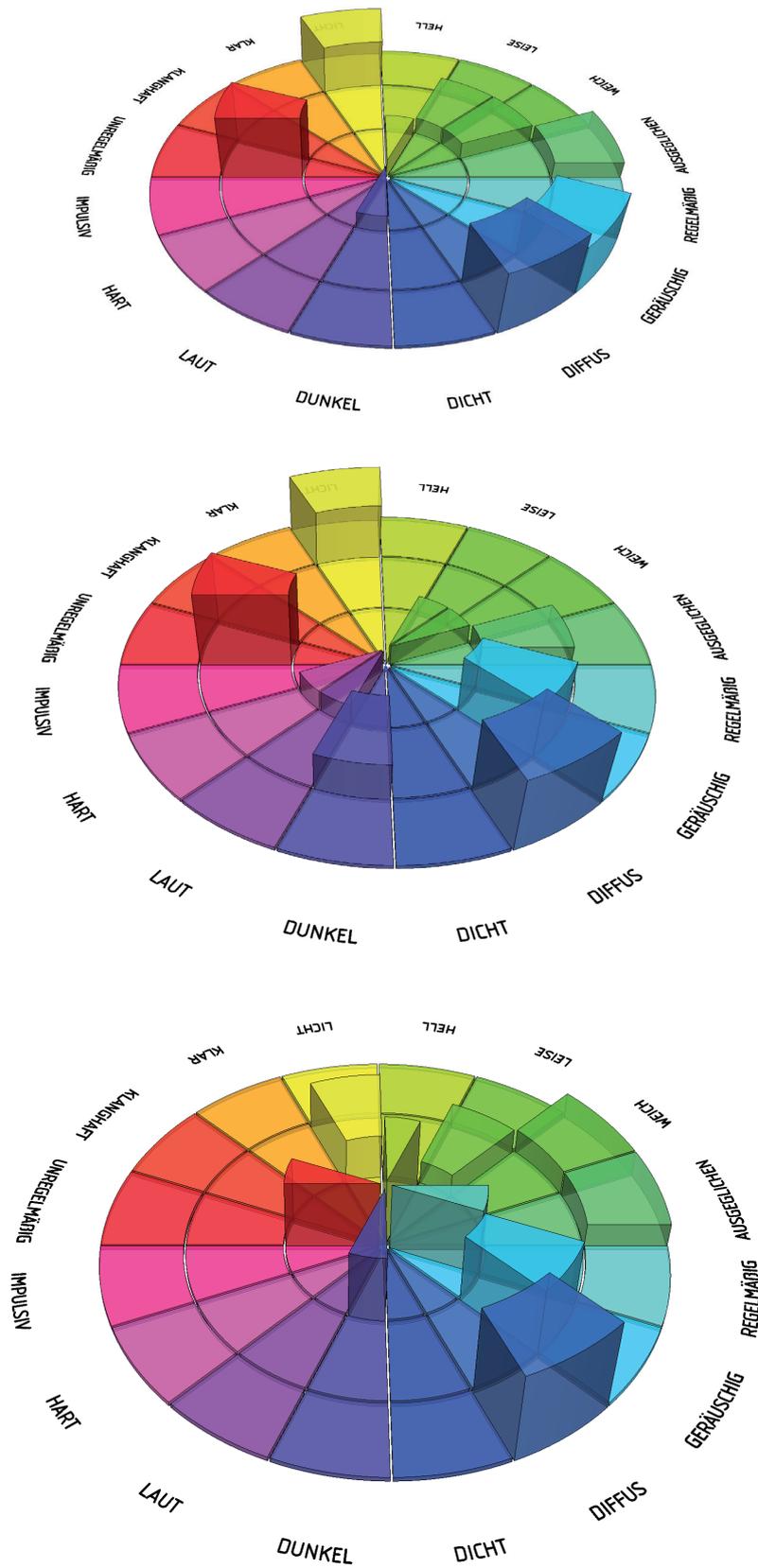


Abb. 3.2.6.i: spezifische designakustische Klangkreise von mitteldichte Faserplatte (MDF), Wood Plastic Composite (WPC), Hanffaser-Komposit (HFK) (v.o.n.u.) im direkten Vergleich

3.2.7 Validierung der Archetypen und des Visualisierungsmodells

Im letzten Schritt der Arbeit war es wichtig die abgeleiteten Erkenntnisse hinsichtlich der gestalterischen Wahrnehmung auf deren Plausibilität zu überprüfen. Darüber hinaus sollten in diesem Zuge auch die in Kap. 3.2.7 vorgeschlagenen Visualisierungen auf Akzeptanz und Anwendbarkeit getestet werden. Zu diesem Zweck wurden Hörtest durchgeführt bei denen ein Kreis von zehn Probanden mit unterschiedlich ausgeprägten Hörerfahrungen und -kompetenzen jeweils einzeln befragt wurde.

Vorab ist im allgemeinen Zusammenhang mit Hörtests und der Arbeit mit den verwendeten Modellen zu erwähnen, dass die sog. individuelle phono- oder auch sonologische Kompetenz berücksichtigt werden muss. Schafer merkt zu diesen Fähigkeiten beispielsweise folgendes an: „Ein Psychologe untersucht die Prozesse der Wahrnehmung. Er versucht nicht, sie zu verbessern. Um seine Tests durchzuführen, muss er bei seinen Versuchspersonen eine gewisse Kompetenz voraussetzen. ... Damit jemand berichten kann, wie bestimmte Laute auf ihn wirken, muss er dies akustisch ausdrücken können. ... Wir haben Akustiker kritisiert, mit Lauten falsch umzugehen, weil sie diese in Bilder verwandeln; wir können Psychologen dasselbe vorwerfen, weil sie Laute in Worte verwandeln. Wir stoßen hier an die Grenzen der Lautassoziationstests... der einzige Weg, Wahrnehmungen zu untersuchen, besteht darin, normierte Verfahren zu entwickeln, mit denen Hörer exakt wiedergeben können, was sie hören“ [SCHAF10].

Der hier zugrunde gelegte Ansatz, die gestalterische Wahrnehmung über normierte Biegeversuche und deren akustischer Beschreibung über ein reglementiertes Repertoire an Komplementärpaaren beschreibbar zu machen, kommen dieser Sichtweise entgegen. Folgende, bereits vorab in Kap. 3.2.5 eingeführte akustische Eigenschaftspaare sollten in diesem Sinne bewertet werden:

hell – dunkel
licht – dicht
leise – laut
weich – hart
ausgeglichen – impulsiv
regelmäßig – unregelmäßig
geräuschig – klanghaft
klar – diffus

Die Bewertung der Paare erfolgte dabei auf Basis der in Abb. 3.2.5.d eingeführten, zwischen die Wertepaare geschobenen Skala zur Abstufung der Merkmalsausprägungen. Die nachgelagerte Einstufung der individuell erlebten Wichtung einzelner Merkmale basiert auf der in Abb. 3.2.5.e beschriebenen vereinheitlichten Abstufung.

Den Probanden wurden die akquirierten Signale der Deformations- und Bruchexperimente über geeignete Kopfhörer in Stereo zur Verfügung gestellt, wodurch Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit gewährleistet werden konnte und auch der Aufwand für die realitätstreue Wiederholung im vertretbaren Rahmen blieb. Die Lautstärken wurden dabei aus Gründen der Vergleichbarkeit auf die höchste jeweils vorkommende Amplitude normiert. Die Länge aller abgespielten Soundfiles war annähernd gleich. Um den Einfluss des jeweils vorangegangenen Hörbeispiels zu minimieren, wurde eine ausreichend große und einheitlich lange Pause von mindestens 10 s eingehalten, in denen auch die sorgfältige Bewertung durch den Probanden erfolgen konnte. Die Weiterführung wurde dann auf Zeichen der Versuchsperson fortgeführt. Die Gruppe der Tester setzte sich dabei, wie oben beschrieben aus sog. Experten und Laien unterschiedlichen Erfahrungsgrades zusammen. Obwohl das Geschlechterverhältnis kein Untersuchungsziel war, wurde es trotzdem berücksichtigt (60m/40w). Es wurde davon ausgegangen, dass alle Befragten gewisse Alltagserfahrungen im Umgang mit den ausgewählten Materialien und Werkstoffen haben.

Allerdings konnte nicht erwartet werden, dass für Werkstoffe, wie GFK oder CFK hinreichende Erfahrungswerte bzgl. des spezifischen Bruchverhaltens vorliegen – ein eher positiver Umstand.

Das den Probanden gegenüber mitgeteilte Ziel der Befragung bzw. Hörprobenbewertung war es, verschiedene Materialien und Werkstoffe hinsichtlich ihrer Gebrauchsakustik zu bewerten und diese über die Zuordnung zu verschiedenen akustischen Parametern zu beschreiben. Die Aufgabe die Proben voneinander abzugrenzen und in akustisch ähnliche Gruppen einzuteilen wurde den Versuchspersonen dabei nicht gestellt. Diese weiterführende Zielstellung der Arbeit, ein Werkzeug für die Bewertung und materielle Gestaltung der Akustik von Gebrauchsgegenständen zu entwickeln wurde auf Nachfrage interessierter Probanden vorab näher erläutert. Es wurde darauf geachtet keinerlei Beispiele oder Wertungen in die Erklärung einfließen zu lassen, um die Unabhängigkeit der Probanden nicht zu beeinträchtigen. Bei Interesse und Nachfrage wurde nach den Tests auch detaillierter auf die zugrundeliegenden Aspekte der bei Belastung und Deformation auftretenden akustischen Signale und die differenzierte Einordnung von frequenzbezogenen oder zeitlichen Eigenschaften bzgl. der Wahrnehmung eingegangen.

Zur besseren Einordnung und zum Verständnis wurden vor Beginn der Versuche alle Hörproben einmalig abgespielt und die zugehörigen Materialien und Werkstoffe wie in Kap. 1.4 beschrieben, gezeigt und benannt. Begründet wird diese Maßnahme damit, dass ein genereller kontextueller Zusammenhang hergestellt werden muss, damit die Versuchsperson sich der Aufgabe stellen kann, auch wenn sich die Experimente auf die rein gebrauchsakustische Bewertung fokussieren und multisensuelle Aspekte und Verkopplungen möglichst isoliert werden sollen. Die anschließenden Hörversuche wurden in mehreren Durchgängen bzw. Testrunden durchgeführt.

Jede Hörprobe wurde für die Bewertung eines akustischen Eigenschaftspaares genau einmal abgespielt und musste anschließend direkt bewertet werden. In der sich ergebenden Matrix von 9 (Hörproben) x 8 (Komplementärpaaren) wechselten dabei die Hörproben in festgelegter Reihenfolge und das Eigenschaftspaar blieb gleich. Anschließend wurden dieselben Hörproben in gleicher Reihenfolge zur Bewertung des nächsten akustischen Eigenschaftspaares abgespielt, usw.. Wichtig ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Reihenfolge der Hörproben alphabetisch erfolgte und dies den Probanden mitgeteilt wurde. Vorweggenommene Bezüge unter den Hörproben sollten so zerstreut werden.

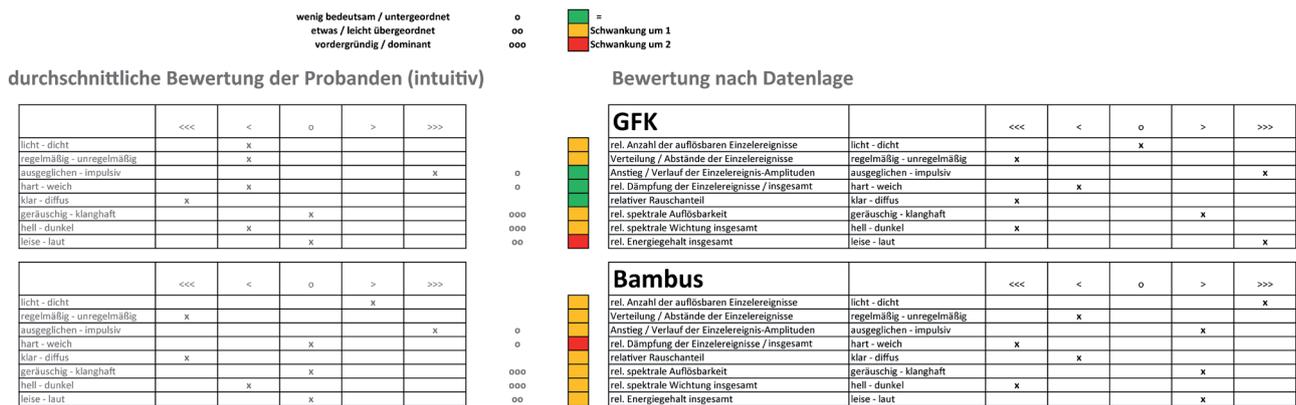


Abb. 3.2.7.a: Auswertung der Probandenbefragung (linke Tabelle) und Abgleich dieser (Mitte, farbig) mit den auf Datenbasis erarbeiteten designakustischen Bewertungen (rechte Tabelle) für GFK und Bambus

Die so durchgeführten Tests und die entstandenen Ergebnismatrizen wurden anschließend den Bewertungen nach Datenlage gegenübergestellt. Der Übersichtlichkeit halber sind die Abbildungen wieder in den bekannten Gruppierungen aufgeführt. Die durchschnittlichen individuellen Bewertungen sind auf der linken Seite zusammengefasst und zeigen die jeweiligen mehrheitlich genannten Wichtungen.



Abb. 3.2.7.b: Auswertung der Probandenbefragung (linke Tabelle) und Abgleich dieser (Mitte, farbig) mit den auf Datenbasis erarbeiteten designakustischen Bewertungen (rechte Tabelle) für CFK, Kiefer und Rinderknochen

Bereits nach Auswertung der beiden designakustischen Cluster zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen intuitiver Probandenmeinung und Datenlage. Und auch die Schweineknöchelprobe fiel aufgrund ihrer schwereren Zuordnung im Grad der Übereinstimmung nur leicht ab:



Abb. 3.2.7.c: Auswertung der Probandenbefragung (linke Tabelle) und Abgleich dieser (Mitte, farbig) mit den auf Datenbasis erarbeiteten designakustischen Bewertungen (rechte Tabelle) für Schweineknöchel

Relativ unstetig war die Probandenmeinung bei den eher unspezifischen und geräuschartig ausgerichteten Kurz- und Wirrfaserwerkstoffen, was wohl auf die fehlenden klanglichen Anteile und deren zeitlicher Differenzierung zurückzuführen ist. Aber auch hier kann der Grad der Übereinstimmung noch durchaus als positiv bewertet werden.

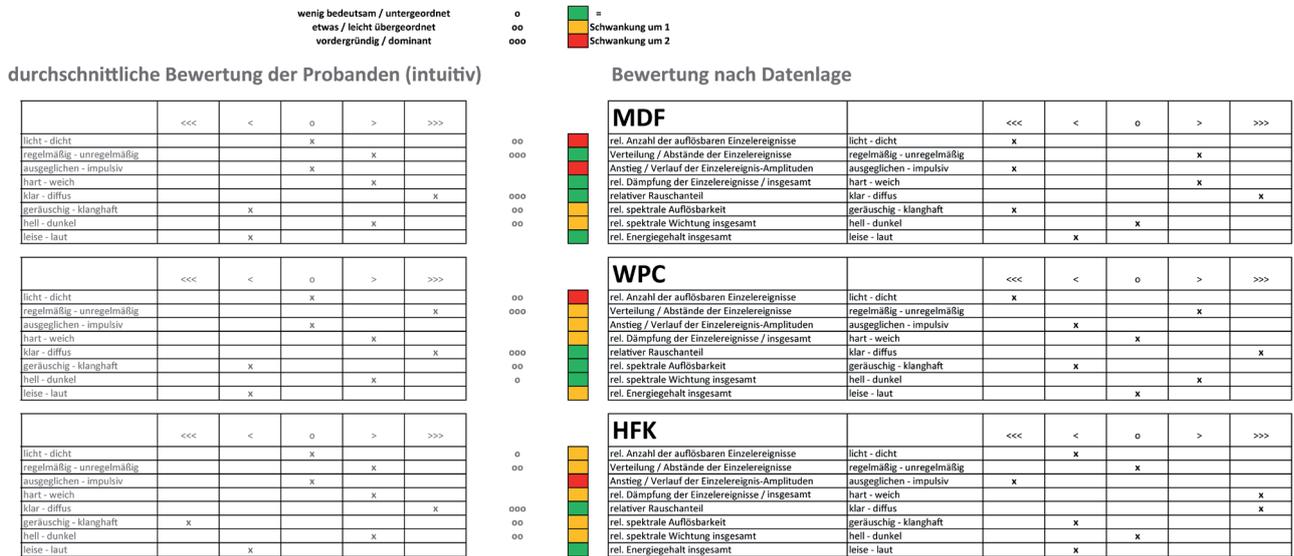


Abb. 3.2.7.d: Auswertung der Probandenbefragung (linke Tabelle) und Abgleich dieser (Mitte, farbig) mit den auf Datenbasis erarbeiteten designakustischen Bewertungen (rechte Tabelle) für MDF, WPC und HFK

Die in allen Abbildungen farblich gekennzeichneten Schwankungen zwischen der Bewertung nach ermittelter Datenlage und der gemittelten Bewertung, fluktuieren demnach bei allen Proben lediglich zwischen 0 und 2 Stufen der Skala. Dieser gute Grad an Übereinstimmung wird aufgrund der geringen Anzahl an Probanden jedoch nicht überbewertet. Er liefert aber ein für die Validierung ausreichend sicheres Ergebnis und kann so die generelle Tauglichkeit des Modells nachweisen.

Nach Abschluss der Versuche wurde auch das Prinzip der Wichtung aus Abb. 3.2.5.e vorgestellt und die Vergaberegeln, wie in Kap. 3.2.5 beschrieben, erklärt. Auf die Vergabe entsprechender Wichtungspunkte durch die Probanden wurde jedoch verzichtet, da der Fokus dieser Untersuchung auf der Validierung der Komplementärpaare lag. Die vorgestellten Wichtungen wurden der Vollständigkeit halber und zur vollständigen Dokumentation in die Abbildungen aufgenommen.

Abschließend wurde den Teilnehmern auch das abgeleitete Visualisierungsmodell unverbindlich vorgestellt, um erste Eindrücke zur potenziellen Akzeptanz und Verständlichkeit zu gewinnen. Die Reaktionen waren dabei überwiegend positiv. Lediglich zwei Probanden hatten Verständnisschwierigkeiten. Einmal wurde angeregt die visuelle Materialität mit aufzunehmen, was perspektivisch durchaus denk- und umsetzbar wäre.

Es sein noch angemerkt, dass die Teilnehmer nach abgeschlossener Auswertung, wenn möglich und gewünscht über die Ergebnisse zur Übereinstimmung der Tests mit den Erkenntnissen der Arbeit informiert wurden.

4 FAZIT UND ABLEITUNG DER PERSPEKTIVEN

Zum Ende der vorliegenden Arbeit wird an dieser Stelle noch einmal der Extrakt zusammengefasst, welcher den generellen Kern der Ergebnisse bezüglich der gestellten Ziele bildet, bevor einige, perspektivisch denkbare Forschungsansätze mit Sicht auf diesen abgeleitet werden.

4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Generell lässt sich konstatieren, dass der in dieser Arbeit beschriebene Beitrag zur Designakustik der anfänglich formulierten Zielstellung Materialien und Werkstoffe unter Berücksichtigung der Zusammenhänge mechanischer und akustischer Eigenschaften zu charakterisieren gerecht wird.

Die beschriebene Methode erfüllt dabei das wesentliche Kriterium der generellen Übersetzbarkeit von mechanisch verursachten, akustischen Merkmalen zu gestaltungsrelevanten Eigenschaften und somit die Anwendbarkeit des Modells sowohl durch Ingenieure als auch Designer.

Das dafür vorgeschlagene Modell der designakustischen Archetypen und deren Verkopplung mit gestalterisch untersetzten Komplementärpaaren auf der Basis experimenteller Daten, welche mittels standardisierter Biegeversuche akquiriert wurden, wird als handhabbar und in Bezug auf das Ziel, Gebrauchsobjekte akustisch zu bewerten und zu gestalten, als anwendungsnah bewertet. Ersteres legt auch die durchgeführte Validierung durch eine Probandenbefragung nahe.

Dass die Methode dabei für Gebrauchsobjekte anwendbar ist, welche monolithisch gefertigt sind, mag einschränkend erscheinen, jedoch ergeben sich mit Sicht auf die Vielzahl von Objekten und die Tatsache, dass mittlerweile auch Baugruppen komplexerer Systeme bewertet werden können, um deren Interaktion besser zu verstehen, zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten.

Das bei der Bearbeitung entstandene Signalverarbeitungskonzept erscheint für die untersuchte Matrix kurz- und langfaserverstärkter Kompositwerkstoffe ausreichend aufgelöst, um entsprechende Differenzierungen und Clusterungen vornehmen zu können. Dieses muss bei Erweiterung der Matrix konsolidiert und bei Bedarf angepasst werden, da die Untersuchungen und der Vorschlag des generellen Konzepts noch am Anfang der Entwicklung stehen. Dementsprechend existieren auch zahlreiche, in dieser Arbeit peripher erwähnte und bisher ungenannte Ideen und Ansätze, welche im abschließenden Teil der perspektivischen Ausführungen kurz geschildert werden sollen.

4.2 Perspektivische Betrachtungen zu den Ergebnissen

Die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der werkstoffspezifischen Akustik der hier untersuchten Materialien und Werkstoffe bilden nach Meinung des Autors den Grundstein für ein von Ingenieuren und Designern anwendbares Werkzeug zur Diagnose und Gestaltung der wahrnehmbaren Nutzungsakustik vom Gebrauchsgegenständen. Fokussieren sich die Untersuchungen dieser Arbeit aus den in Kap. 1.2 genannten Gründen vor allem auf die faserverstärkten Materialien, wäre aus erster Sicht die Ausweitung der Untersuchungen auf weitere Werkstoffe oder Materialgruppen denkbar. Dadurch wäre es möglich das vorgeschlagene Modell zur Synthetisierung der Archetypen weiter zu verifizieren oder bei Bedarf anzupassen, um die Vorhersagegenauigkeit bzgl. der relativen Zugehörigkeit zu einem designakustischen Cluster durch die Einführung geeigneter Ähnlichkeitsanalysen zu erhöhen.

Es wurde bereits angemerkt, dass die in der Arbeit vorgenommene Clusterung lediglich zur besseren Nutzbarkeit des Modells eingeführt wurde, um z. B. entsprechend einer gewünschten Wahrnehmung vergleichbare Zielounds, bzw. Materialien oder Werkstoffe vorschlagen zu können oder eben wie in diesem Fall auf nicht offenkundige Ähnlichkeiten in der Perzeption hinzuweisen. Aus dieser Sicht würde die Erweiterung der Untersuchungsmatrix auch die Erkenntnisse bzgl. weiterer, hinzukommender Klassen mit diversen Abgrenzungen und Überlappungen vorantreiben und so das Portfolio an gezielt einsetzbaren Sounds erweitern.

Denkt man an die metallischen Werkstoffe, welche aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften eher wenig oder keine Deformationsgeräusche emittieren, wäre eine Erweiterung des Modells hinsichtlich potenziell allgemeingültiger Klangeigenschaften aus gestalterischer Sicht reizvoll. Das Feld, welches sich hier beispielsweise zwischen technisch geeigneten Verfahren, wie z. B. der Modalanalyse und den vorgestellten Ansätzen, wie dem beispielhaft erwähnten Testsystem aus Kap. I.1.4 zur Bewertung von Gebrauchsakustik aufspannt, wäre ein reizvolles perspektivisches Untersuchungsthema zur Bereicherung und Erweiterung des vorgeschlagenen Werkzeugs. Hier wäre zuerst zu untersuchen, ob man ebenso, wie im vorgeschlagenen Werkzeug, mit Probekörpern arbeiten kann um generelle Ableitungen hinsichtlich der aus diesen Werkstoffen gestalteten Gebrauchsobjekte treffen zu können. An dieser Stelle sei nochmals auf die in Kap. 2.3 getroffene Erkenntnis verwiesen, dass die werkstoffliche, bzw. mechanische Güte mit akustischer Qualität korreliert und die klangliche Güte quasi so etwas, wie die Ästhetik der Unversehrtheit repräsentiert.

Auch die Erweiterung des Modells hinsichtlich der additiven Werkstoffe, die in den verschiedenen 3D-Druck-Verfahren Anwendung finden, wäre denkbar. Aktuell ist bereits eine dynamisch wachsende Anzahl von Werkstoffen - auch faserverstärkt - druckbar. Gerade die verfahrensbedingten Möglichkeiten die Strukturen makroskopisch zu variieren bieten hier ein reizvolles Forschungsfeld, zudem im 3D Druck noch kaum akustische Untersuchungen existieren.

Neben der Erweiterung und Verfeinerung des vorgestellten Modells, bzw. Werkzeugs durch die Ausweitung der Probenarten wäre es auch durchaus sinnvoll die kontextuell wirksamen Mechanismen bei der Perzeption von Gebrauchsakustik zu untersuchen und das Modell dahingehend zu erweitern. Perspektivisch wäre so die Einführung von designakustischen Kontextfiltern denkbar, welche die grundlegende akustische Beschreibung eines Materials entsprechend der prognostizierten Nutzungsumgebung anpassen. Beispielsweise könnte Bambus bei der Verwendung in gedämpfter Umgebung auf den Nutzer eines daraus gefertigten Stabes völlig anders wirken als in einer schallharten Umgebung, usw..

Wären gesicherte Erkenntnisse hinsichtlich solcher Kontextfilter vorhanden, könnte man der in Kap. 1.2.4 formulierten These tiefergehend untersuchen. Diese besagte, dass die Ähnlichkeit akustischer Signale mit sog. „humanakustischen Signalen“ deren Akzeptanz stärker vom eigentlichen Wahrnehmungskontext entkoppeln und die Aversionen dieser Signale individuell intensivieren. Im Ergebnis könnte die kontextuelle Filterung dann um einen entsprechenden Korrekturfaktor erweitert werden, welcher die gebrauchsakustische Wahrnehmung entsprechend relativiert und die Wirkung der Kontextfilters abschwächt oder intensiviert.

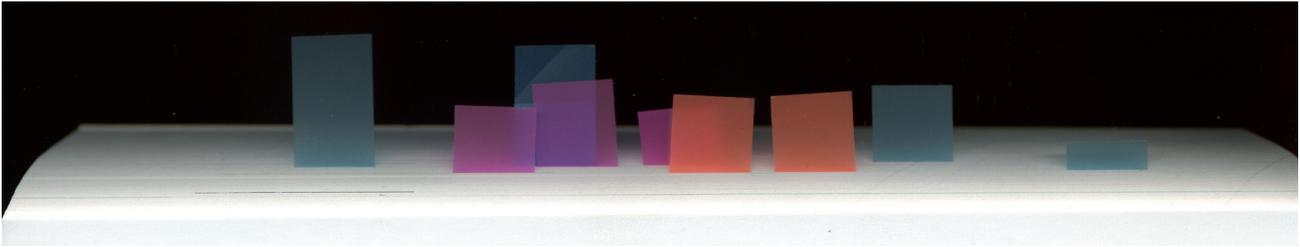
Auf der anderen Seite wäre aber auch die positive Wertung von Deformations- und Schädigungsgeräuschen perspektivisch zu untersuchen, indem man das Wahrnehmungsphänomen der Gebrauchspatina tiefergehend betrachtet. Die Frage, ob und wann gewisse Materialien trotz offenkundiger Schädigung akustisch wertiger, als die unversehrten Objekte, welche ursprünglich daraus gefertigt wurden bewertet werden, wäre ebenso ein reizvolles Untersuchungsthema zur Erweiterung des designakustischen Modells.

Sicherlich wären noch weitere, hier ungenannte Aspekte zur Vertiefung der Untersuchungen denkbar. Diese stehen, wie auch die genannten, für das künftig auszuschöpfende Potenzial der Methode, um neben dem werkstofftechnologischen Fortschritt auch den Nutzer der daraus geschaffenen Strukturen in den Fokus zu rücken.

5 ZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

AE	Acoustic Emission / Akustische Emission
AK	Akustische Kamera
CAD	Computer Aided Design
CFK	Carbonfaserverstärkter / Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	Fast-Fourier-Transform
FRP	Fibre Reinforced Plastics
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GUI	Graphical User Interface
HFK	Hanffaserverstärkter Kunststoff
MAC-Matrix	Modal Assurance Criterion
MDF	Mitteldichte Faserplatte
MLS	Maximum Length Sequence
NFC	Natural Fibre Composite
NFK	Naturfaserverstärkter Kunststoff
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
PATS	Psychoakustisches Analyse und Testsystem
RMS	Root Mean Square, Quadratisches Mittel oder Effektivwert
STFT	Short-Time-Fourier-Transform / Kurzzeit-Fourier-Transformation
UD	Unidirektional (bzgl. technischer Gelege)
WPC	Wood Plastic Composite
zFP	Zerstörungsfreie Prüfung (im Sinne der Werkstoffprüfung)
$f(t), x(t)$	Zeitsignal
c	Schallgeschwindigkeit
E	Energie

$F(f(t))$	Fourier-Transformierte
G	Schub-Modul
h	Plancksches Wirkungsquantum
N	Anzahl der Ereignisse
Q	Gütefaktor
U	elektrische Spannung
$X(f)$	Spektrum
Z	Impedanz
Δf	Bandbegrenzter Frequenz-Bereich
ε	mechanische Dehnung
η	Verlustfaktor
ν	Poisson-Verhältnis
ρ	Dichte
σ	mechanische Spannung
σ_f^2	Varianz der Signale im Frequenzbereich
σ_t^2	Varianz der Signale im Zeitbereich
ψ	Verlustwinkel



6 QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS

- [AGR2016] Webpräsenz: 3N Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e.V., Kompaniestraße 1, 49757 Werlte, <http://agrobiopolymere.eu/biopolymere/> (Abruf: 17.02.2016)
- [ALT13] Ercan Altinsoy, Professur für Akustik und Haptik an der TU Dresden, <https://tu-dresden.de/ing/elektrotechnik/ias/aha> (Abruf: 03.06.2022)
- [ART2021] HEAD acoustics GmbH, Ebertstraße 30a, 52134 Herzogenrath, Software Artemis Suite / ASM 12: „Psychoacoustics Module“, <https://cdn.head-acoustics.com/fileadmin/data/de/Datenblaetter/AS/ASM/ArtemiS-SUITE-Psychoacoustics-Module-ASM12-5012-Datenblatt.pdf> (Abruf: 28.09.2021)
- [BAD2006] Daniel Bader: „Eine flexible akustische Messmethode zur Detektierung von verzahnungstechnischen Problemen“, Dissertation an der TU Ilmenau 2006, ISBN: 978-3-939473-09-1
- [BAD2013] Nicki Bader, Peter Holstein, Andreas Tharandt, Jürgen Häberle, Julia Schulz, Christian Probst: „The Effect of Physical Material Properties of the Attractiveness of Objects“, AIA-DAGA 2013 - Conference on Acoustics in Merano
- [BÄN2005] Werner Bäni: Wavelets – eine Einführung für Ingenieure; Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005, ISBN-10: 3486577069
- [BEL1763] Urban Nathanael Beltz: „Abhandlung vom Schalle, wie er entsteht, fortgehet, ins Ohr wirkt, und wie der Empfang des Schalles, kraft der innerlichen Structur des Ohrs hervorgebracht wird, und wie das Hören geschiehet, welche den von der Kön. Academie der Wissenschaften in Berlin auf das Jahr 1763 ausgesetzten Preis erhalten hat“, Berlin Haude et Spener, 1764, https://books.google.de/books?id=s6Q_AAAAcAAJ&printsec=frontcover&hl=de#v=onepage&q&f=false (Abruf: 03.06.2022)
- [BIB12] Musurgia Universalis, <http://bibliodyssey.blogspot.de/2007/07/musurgia-universalis.html> (Abruf: 10.07.12)
- [BRE2006] Daniel Brenner: „Script Medizinphysik“, Seminarunterlagen der Technische Universität Dortmund, FB Medizinphysik, 20.12.2006
- [BLAU1974] Jens Blauert: „Räumliches Hören“, S. Hirzel Verlag, 1974, ASIN: B01M1UVR50

-
- [BLU2009] Friedrich E. Blutner: „Chancen durch Innovation - Mit neuen Stärken in die Zukunft“, Vortrag im Rahmen des 1. Sounddesignforums, 14.-15.10.2009, Potsdam, <https://www.sounddesignforum.de/archiv/archiv2009/> (Abruf: 02.09.2013)
- [BLU2015] Friedrich E. Blutner: <http://www.newstrad.eu/de/ueber-uns.html>, (Abruf: 23.11.2013)
- [BLU2013] Friedrich E. Blutner: SYNOTEC Psychoinformatik GmbH, Informationsmaterial / Firmenbroschüre) ohne Impressum, persönlich ausgehändigt am 11.10.2013
- [BUE2006] Anders Buen: „A brief Introduction into the Violin Acoustics History“, Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2006, 8-10 November 2006, Gothenburg, Sweden
- [BUT1998] Tilman Butz: „Fourier-Transformation für Fußgänger“, Vieweg+Teubner Verlag, 4. Edition, 2005, ISBN-10: 3519302020
- [COX2015] Trevor Cox: „Das Buch der Klänge - Eine Reise zu den akustischen Wundern der Welt“, Springer Berlin Heidelberg, 2015, ISBN: 9783662450543
- [GÜN1948] Otfried Günther: „Über das spezifische Gewicht des Menschen“, Virchows Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medizin, 316.1-2 (1948)
- [GYÖ] György Wersényi: „Psychoakustische Messungen auf dem Gebiet der menschlichen Lokalisationsschärfe“, <https://docplayer.org/30223474-Psychoakustische-messungen-auf-dem-gebiet-der-menschlichen-lokalisations-schaerfe.html> (Abruf: 03.06.2022)
- [CHL1787] Ernst Florens Friedrich Chladni: „Entdeckungen über die Theorie des Klangs“ Weidmanns Erben & Reich, Leipzig, 1787
- [CHL1802] Ernst Florens Friedrich Chladni: „Die Akustik: Mit 12 Kupfertafeln“, Georg Olms Verlag, 1802
- [DATR] Data Translation, Im Weilerlen 10, 74321 Bietigheim-Bissingen, <https://www.mccdaq.de/USB/Schall-Schwingung/DT9847-Serie> (Abruf: 04.06.2022)
- [DIN2009] DIN EN 1330-9: „Zerstörungsfreie Prüfung–Terminologie–Teil 9: Begriffe der Schallemissionsprüfung“, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabedatum: 2017-10
- [DIN 45692] DIN 45692: „Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe“, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabedatum: 2009-08
- [DIS2018] Distran AG, Heinrichstrasse 200, 8005 Zürich, Switzerland, <https://www.distran.ch/ultra-m> (Abruf: 18.02.2018)
- [DRO1996] Thomas F. Drouillard: „A history of acoustic emission.“, Journal of acoustic emission, 14.1, 1996, 1-34
- [DUN1969] H. Dunegan, D. Harris. „Acoustic emission-a new nondestructive testing tool.“ Ultrasonics 7.3, 1969
- [DÜN1990] Heinrich Dünnwald: „Ein erweitertes Verfahren zur objektiven Bestimmung der Klangqualität von Violinen“, Acoustica Vol. 71, 1990, pp 269-276
-

-
- [DÜN1991] Heinrich Dünnwald: „Deduction of objective quality parameters on old and new violins“, *Catgut Acoust. Soc. J. Vol. 1. No. 7 (Series II) May 1991*, pp. 1-5
- [DÜR87] Ingemar Düring: „Ptolemaios und Porphyrios über die Musik“, Olms Verlag, Hildesheim, 1987, ISBN: 3487079321
- [EGGST-D1] FRITZ EGGER GmbH & Co. OG, Weiberndorf 20, A-6380 St. Johann in Tirol: Datenblatt der verwendeten mitteldichten Faserplatte f. d. Probenzuschnitt unter:
http://www.egger.com/downloads/bildarchiv/18000/1_18315_TD_EGGER_MDF-ST_E1_DE.pdf (Abruf: 03.11.2014)
- [EIC2010] Sven Eichhorn, Ronny Eckardt, Christoph Müller: „Schwingungs- und geräuschkämpfende Leichtbauelemente im Maschinenbau auf Basis von Konstruktionswerkstoffen aus Holz“, Forschungsprojekt gefördert durch die FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe) 22021705 (05NR217), ISBN: 9783981255447
- [ENS2016] Ensinger GmbH, Rudolf-Diesel-Straße 8, 71154 Nufringen, <http://www.ensinger-online.com/de/hochleistungskunststoffe-werks/kunststoffgrundlagen/einteilung-thermoplaste/> (Abruf: 04.11.2016)
- [EHR03] Klaus Ehrenfried: „Skripte zur Vorlesung Strömungsakustik“, TU Berlin, 2003, <http://vento.pi.tu-berlin.de/formB/kapitel01.pdf> (Abruf: 04.11.2015)
- [FAS05] Hugo Fastl: „Psycho-Acoustics and Sound-Quality“, S. 139-162 in Jens Blauert: „Communication Acoustics“, Springer Verlag 2005
- [FAZW2007] Hugo Fastl, Eberhard Zwicker: „Psychoacoustics – Facts and Models“, Springer-Verlag, Berlin, 2007
- [FEI2014] Joachim Feierabend: „Stand der technischen Möglichkeiten zur Schallquellenlokalisierung mittels des Beamforming- Verfahrens im Zeitbereich - insbesondere im Maschinenbau“, 11. Tagung Technische Diagnostik 23. - 24. Oktober 2014, Merseburg
- [FIN2006] Seneca in Gerhard Fink, Hrsg.: „Meisterdialoge“, Artemis & Winkler, 2006, ISBN: 3760841198
- [FOW2014] Timothy J. Fowler: „The Origin of CARP and the Term “Felicity Effect”, 31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE) – Commemorative Speech
- [FRA2000] Ingomar Jäger, Peter Fratzl: „Mineralized collagen fibrils: a mechanical model with a staggered arrangement of mineral particles“, *Biophysical Journal* 79.4 (2000): 1737-1746.
- [FVH78] Frederick V. Hunt: „Origins in Acoustics: The Science of Sound from Antiquity to the Age of Newton: Science of Sound from Antiquity to the Age of Reason“, Yale University Press, 1978
- [GEB1928] al-Tarasūsī JĀBIR IBN HAIYĀN, Eric John Holmyard, and Richard RUSSELL: „The Works of Geber“, Englished by Richard Russell, 1678. A New Edition, with Introduction by EJ Holmyard. London & Toronto, 1928
-

-
- [GES94] Joachim Gessinger: „Auge & Ohr: Studien Zur Erforschung Der Sprache“, Walter de Gruyter Berlin New York, 1994
- [GFAI] gfai tech GmbH, Volmerstraße 3, 12489 Berlin-Adlershof, <http://www.gfai.tech/de/produkte/akustische-kamera> (Abruf: 07.10.2016)
- [GLI2020] Vasile Ghiorghe Gliga, Mariana Domnica Stanciu, Silviu Marian Nastac, Mihaela Campean: „Modal analysis of violin bodies with back plates made of different wood species“, *BioResources* 15 (4), 2020, 7684-7713
- [GRA2015] Sebastian Gramstat: „Methoden der in-situ Visualisierung der Reibzonedynamik trockenlaufender Reibpaarungen unter Ergänzung physikalischer und chemischer Charakterisierungen der Reibpartner“, Dissertation Fakultät für Maschinenbau; 2015; ISBN: 978-3-86360-107-2
- [GRÜ1968] W. Grützmaker: „Ein volltransistorisiertes Tonfrequenzspektrometer nach dem Suchtonverfahren.“, *Archiv für klinische und experimentelle Ohren-, Nasen- und Kehlkopfhilfkunde*, 1968, <https://doi.org/10.1007/BF00368453> (Abruf: 03.06.2022)
- [HALL2011] Peer Haller: „Formholzrohre – Stand der Forschung und Anwendungen.“, *Bautechnik* 90.1 (2013), pp. 34-41
- [HAR05] Uwe Hardtmann: „Nachhaltigkeit im Fahrzeugbau“, Diplomarbeit an der Burg Giebichenstein Hochschule für Kunst und Design Halle, Studiengang Industriedesign, 2005
- [HAR1978] Fredric J. Harris: „On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform.“, *Proceedings of the IEEE* 66.1 (1978): 51-83.
- [HÄU60] Alexander Häusler: „Acta Musicologica“, Vol. 32, Fasc. 2/3 (Apr. - Sep., 1960), pp. 151-155, <http://www.jstor.org/pss/931665> (Abruf: 03.06.2022)
- [HAV2003] Michael Haverkamp: „Visualisierung auditiver Wahrnehmung – historische und neue Konzepte - Ein phänomenologischer Überblick“, DAGA 2003, Deutsche Jahrestagung für Akustik, 18.-20. März 2003, Aachen
- [HAV2009] Michael Haverkamp: „Synästhetisches Design – kreative Produktentwicklung für alle Sinne“, Carl Hanser Verlag München Wien, 2009, ISBN: 9783446412729
- [HEAD2016] HEAD acoustics GmbH, Ebertstraße 30a, 52134 Herzogenrath: „Application Note 06/16 - Psychoakustik II, Berechnung psychoakustischer Parameter in der ArtemiS SUITE“
- [HEEL04] Jürgen Hellbrück, Wolfgang Ellermeier: „Hören: Physiologie, Psychologie und Pathologie“, Hogrefe Verlag 2004, ISBN-10: 3801714756
- [HEI2001] Gerd Heinz: „Geigenaufnahmen mit der akustischen Kamera“, Vortrag zur Abendveranstaltung der Konferenz Elektronische Bildverarbeitung (EVA 2001), 15.11.2001, BerlinSchöneberg
- [HEI2003] Gerd Heinz: „Eine Einführung in die akustische Photo- und Kinematographie“, Freigegeben für Springer VDI-Verlag, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Ausgabe Juli 2003
-

-
- [HEI2004] Gerd Heinz, Dirk Döbler, Swen Tilgner: „Verfahren und Vorrichtung zur bildgebenden Darstellung von akustischen Objekten“, Patent WO 2004/068085 A2; Gerd Heinz, Dirk Döbler, Swen Tilgner: „Verfahren und Vorrichtung zur bildgebenden Darstellung von akustischen Objekten“, Patent EP 1599708; Gerd Heinz, Dirk Döbler, Swen Tilgner: „Verfahren und Vorrichtung zur bildgebenden Darstellung von akustischen Objekten“, Patent OS DE 10304215
- [HEI2007] Gerd Heinz, Friedrich Blutner: „Schallbilder und Schallfilme von Musikdarbietungen-von aufsteigenden und abhebenden Klängen“, FORTSCHRITTE DER AKUSTIK 33.2 (2007): 553
- [HEI18] Ronald H. Heissera, Vishal P. Patil, Norbert Stoop, Emmanuel Villermaux, Jörn Dunkel: „Controlling fracture cascades through twisting and quenching“, PNAS, August 28, 2018, vol. 115, no. 35, 8665–8670
- [HEL1896] Herrmann von Helmholtz: „Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik“, Verlag Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1896
- [HER2021] Daniel Herfert: „Strukturdynamische Analyse mittels elektromechanischer Schwingungssensoren“, Dissertation an der Fernuniversität Hagen, 2021, ISBN: 9783183353118
- [HEX913] Hexcel Corporation, 281 Tresser Blvd., 16th Floor, Stamford, CT 06901, USA 203-969-0666, Datenblatt unter: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg-Data-Sheets/913_eu.pdf (Abruf: 07.11.2014)
- [HOF05] Rüdiger Hoffmann: „Grundlagen der Frequenzanalyse. Eine Einführung für Ingenieure und Informatiker“, Expert Verlag, Renningen 2005, ISBN: 3816924476
- [HOL2004] Peter Holstein, Armin Raabe, Roland Müller, Manuela Barth, David Mackenzie, Eric Starke: „Acoustic tomography on the basis of travel-time measurement“, Measurement Science and Technology, 15(7), 2004
- [HOL09] Peter Holstein, Andreas Tharandt, Hans-Joachim Münch: „Große Datenmengen und Algorithmenentwicklung“ und Peter Holstein, Hans-Joachim Münch, Andreas Tharandt: „Handling großer Datenmengen – ein Beitrag zur Algorithmenentwicklung“, DGZfP-Jahrestagung 2009, Proceedings, Münster, 2009
- [HOL2013] Peter Holstein, Christian Probst, Dominik Surek, Andreas Tharandt: „AE Sensors based on Piezo Composites for Machinery Engineering Applications“, AIA-DAGA 2013 - Conference on Acoustics, Merano
- [HOLZI2015] Peter Holstein, Gunter Ziegenhals, Andreas Tharandt, Nicki Bader, Hans-Joachim Münch: „Ultraschallverfahren zur Bestimmung von Kennwerten für Musikinstrumentenhölzer“, Posterbeitrag auf der DACH-Jahrestagung 2015 vom 11. - 13. Mai in Salzburg
- [HOO1705] Robert Hooke: „The Posthumous Works of Dr. Robert Hooke“, Routledge, 2021, ISBN: 9780367183080
-

-
- [HU78] Frederick V. Hunt: „Origins in Acoustics: The Science of Sound from Antiquity to the Age of Newton“, Yale University Press, 1978 (lt. [KÖL11] nicht veröffentlichter Buchabschnitt)
- [ISO226:2003] ISO226:2003: Akustik - Normalkurven gleicher Lautstärkepegel (ISO 226:2003), <https://www.beuth.de/de/norm/iso-226/67915143> (Abruf: 03.06.2022)
- [IWMH2016] Andreas Krombholz: Hanffaserkomposit- und WPC-Proben, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM Halle, <http://www.iwm.fraunhofer.de/geschaeftsfelder-halle/biologische-und-makromolekulare-materialien/naturstoffkomposite/#c8311> (Abruf: 01.02.2016)
- [JAN1981] Julius Joseph Antonius Janssen: „Bamboo in building structures“, Dissertation an der Technische Hogeschool Eindhoven, 1981.
- [KAI1950] Joseph Kaiser: „Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch“, Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik der Technischen Universität München (TUM), 1950
- [KI2013] Deutsches Kupferinstitut (Hrsg.): „Bronze – unverzichtbarer Werkstoff der Moderne“, https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/Shop/Verlag/Downloads/Werkstoffe/brosch20.pdf (Abruf: 22.8.2016)
- [KOE2015] Andreas König, Friedrich. E. Blutner, Michael Eberhardt, Robert Wenzel: „An Acoustic Data Base Navigator for the Interactive Analysis of Psycho-Acoustic Sound Archives“, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=E15DFDB6373A44EEAD97EB3A2D8AF1B0?doi=10.1.1.44.5643&rep=rep1&type=pdf> (Abruf: 28.4.2015)
- [KOL1982] Franz Kollmann: „Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe“, Band 1, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1982
- [KOLL2009] Kai Kollenberg: „Ein Motor voller Geigen“, Journal Leipziger Volkszeitung, 14./15. November 2009
- [KÖL10] Peter Költzsch: „Schriftenreihe zur Geschichte der Akustik, Heft 1; Von der Antike bis in das 20. Jahrhundert – ein Streifzug durch die Geschichte der Akustik“, Herausgeber Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Dresden, 2010, ISBN: 9783980865975
- [KÖL10/2] Peter Költzsch: „Schriftenreihe zur Geschichte der Akustik, Heft 2; Akustisches Wissen aus der Antike auf den Transferwegen in das „abendländische“ Europa“, Herausgeber Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Dresden, 2010, ISBN: 9783980865975
- [KÖL11] Peter Költzsch: „Schriftenreihe zur Geschichte der Akustik, Heft 3; Preisträger europäischer Wissenschaftsakademien im 18. bis 20. Jahrhundert - auf dem Gebiet der Akustik“, Herausgeber Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Dresden, 2011, ISBN: 9783980865975
- [KUN08] Milind N. Kunchur: „Temporal resolution of hearing probed by bandwidth restriction“, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 94, Pgs. 594–603 (2008)
- [KOU2017] Georges Kouroussis, Lassaad Ben Fekih, Thierry Descamps: „Using experimental modal analysis to assess the behaviour of timber elements“, Mechanics & Industry 18, 804 (2017), <https://doi.org/10.1051/meca/2017042> (Abruf 02.06.2022)
-

-
- [LAB12] National Instruments, NI, 11500 N. Mopac Expwy, Austin, TX 78759-3504, USA, www.ni.com
- [LAN1992] Hirschel/Wilsdorf in Langenmaier: „Der Klang der Dinge. Akustik – eine Aufgabe des Design“, pp. 36 ff., Verlag Silke Schreiber, München 1992
- [LOV09] Oscar Lovell Triggs: „Arts & Crafts“, Parkstone International / Kroemer, 2009, ISBN-10: 1844846326
- [LUC2018] Lucchi Cremona: „Luccimeter“, via Stazione 25, Cavatigozzi; Cremona, <http://www.lucchimeter.com/> (Abruf: 01.09.2018)
- [LUCK02] Peter Luckner (Hrsg.): „Multisensuelles Design. Eine Anthologie“, Halle (Saale), 2002, ISBN: 3861090318
- [LUCK04] Peter Luckner: „Design und die fünf Sinne - Anlässlich der Ausstellung: Im Designerpark, Leben in künstlichen Welten“, 14. November 2004 bis 20. Februar 2005 im Institut Mathildenhöhe Darmstadt
- [LUD35] Hellmut Ludwig: „Marin Mersenne und seine Musiklehre“, Halle, Berlin, Waisenhaus, 1935
- [MAT12] Mathworks, 1 Apple Hill Drive, Natick, MA 01760-2098, www.themathworks.com
- [MAY2010] Stefan Mayr: „Durstige Pflanzen senden Signale. Trockenstress produziert Ultraschall“, *Biologie in unserer Zeit* 40.6 (2010): 396-402.
- [MEI2006] Günter Meier: „Holz im Altbergbau.-Tagungsband 6. Altbergbau-Kolloquium“, 9. bis 11. Nov. 2006, RWTH Aachen, pp. 217–229, 2006
- [MEI37] Hermann Meinel: „Über die Beziehungen zwischen Holzdicke, Schwingungsform, Körperamplitude und Klang eines Geigenkörpers“, Mittler, 1937
- [MER 1627] Marin Mersenne: „Harmonie universelle, contenant la théorie et la pratique de la musique“, 1627
- [MG2018] Microtech Gefell GmbH: „Kondensator-Messmikrofonkapsel MK 301“, Mühlberg 18, D-07926 Gefell, http://www.microtechgefell.de/dmdocuments/MK301_S1+2.pdf (Abruf: 23.05. 2018)
- [MOE04] Walter Moers: „Die Stadt der Träumenden Bücher“, Piper Verlag GmbH, München, 2004, ISBN-10: 3492045499
- [MÜL] Christian Müller: „Entwicklung des Holzleimbaues unter besonderer Berücksichtigung der Erfindungen von Otto Hetzer - ein Beitrag zur Geschichte der Bautechnik“, Dissertation, Weimar (Deutschland), Selbstverlag
- [MUR13] Boris Muravin: „Acoustic Emission Basics“, <https://cupdf.com/document/acoustic-emission-basics-by-boris-muravin.html> (Abruf: 17.2.2013)
- [MUZ06] Daniel Muzzolini: „Genealogie Der Klangfarbe - Band 5 von Varia Musicologica“, Dissertation, Peter Lang Verlag, 2006, ISBN-10: 3039104586
-

-
- [MZ2009] Steffen Könauf: „Das Ohr isst mit“, Mitteldeutsche Verlags- und Druckhaus GmbH, Delitzscher Str. 65, 06112 Halle (Saale), 16. Februar 2008
- [NAG2006] Joseph Nagyvary, Joseph A. DiVerdi, Noel L. Owen, H. Dennis Tolley: „Wood used by Stradivari and Guarneri“ Nature 444, 565, 2006, <https://doi.org/10.1038/444565a> (Abruf: 04.06.2022)
- [NEU2015] Jörg Neugaertner, Peter Holstein, Christian Probst, Andreas Tharandt: „Reibung in KFZ-Antrieben“, 56. GfT - Tagung Göttingen, 21.-23 September 2015, Gesellschaft für Tribologie
- [NEU2017] Stefan Neugebauer, Benjamin Riebold, Dirk Döbler: „Psychoacoustics in Imaging Localization of Sound Sources“, GfAI - Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V., 12489 Berlin, Germany, <https://vimeo.com/72642516> (Abruf: 04.06.2022)
- [NEW1989] D. E. Newland: „Mechanical vibration analysis and computation“, Longman Scientific & Technical, 1989, ISBN-10: 0486445178
- [NIE1992] Peter Niemz, A. Lühmann: „Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen.“, Holz als Roh- und Werkstoff 50, 191–194, 1992, <https://doi.org/10.1007/BF02663285> (Abruf: 04.06.2022)
- [NIE2017] Peter Niemz, Walter Sonderegger: „Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe“, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017, ISBN: 9783446445468
- [OTAM2001] Otto Norm, Scott Amman, Chris Eaton, Scott Lake: „Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds“, Article in „Sound & Vibration“, April 2001
- [PAR2006] Marc-Antoine Parseval: „Mémoire sur les séries et sur l'intégration complète d'une équation aux différences partielles linéaires du second ordre, à coefficients constants“, 1799 aus „Mémoires présentés à l'Institut des Sciences, Lettres et Arts, par divers savants, et lus dans ses assemblées. Sciences mathématiques et physiques. (Savants étrangers.)“ von 1806
- [PAV26] Ivan Petrowitsch Pavlov: „Die höchste Nerventätigkeit (das Verhalten) von Tieren“, Saarbrücken : VDM, Müller, 2006, 3. Aufl. München, Bergmann von 1926
- [PHO2016] Photron Deutschland GmbH, Ziegelweg 3, 72764 Reutlingen, http://photron.com/wp-content/uploads/2014/04/ultima_APX-RS.pdf (Abruf: 06.11.2016)
- [PIER99] John R. Pierce: „Klang - Musik mit den Ohren der Physik“, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg, 1999, ISBN: 9783827405449
- [PRA2008] Gregor Prass: „Türme aus Holz für Windkraftanlagen.“, 14. Internationales Holzbau-Forum 2008, Timber Tower GmbH Hannover
- [RAH2015] Markus Rahammer, Igor Solodov, Daria Derusova, Marc Kreutzbruck: „Thermische Chladni Klangfiguren in der zerstörungsfreien Prüfung“, Universität Stuttgart, National Research Tomsk Polytechnic University, DGZfP - Thermographie-Kolloquium 2015, Stuttgart
- [RAN2007] Thomas Ranz: „Beiträge zur Materialtheorie – Ein feuchte- und temperaturabhängiger anisotroper Werkstoff: Holz“, Heft 2/07 der Reihe Beiträge zur Materialtheorie, Hrsg. Alexander Lion, ISSN 18625703
-

-
- [RAP08] Katharine Rapoport: „Violine für Dummies“, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 2008, ISBN-10: 352770468X
- [REE05] Jens Reese (Hrsg.): „Der Ingenieur und seine Designer - Entwurf technischer Produkte im Spannungsfeld zwischen Konstruktion und Design“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, ISBN: 9783540271123
- [REL1862] Franz Reuleaux: „Die Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Construction der Maschinentheile“, Atlas, Bände 1-2, Vieweg, 1862
- [RG2016] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, Postfach 1145, 71107 Waldenbuch, <https://www.r-g.de/>
- [RIC1989] Hans Albert Richard, Manuela Sander: „Grundlagen und Anwendungen der Bruchmechanik“, aus Technische Mechanik 11 - Heft 2, 1989
- [RIE2000] Ulrich Riedel: „Konstruktionswerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“, 3. AVK-TV Tagung Baden Baden, 12.-13.09.2000, S. C12_1-C12_9, https://www.dlr.de/fa/Portaldata/17/Resources/dokumente/institut/2000/2000_05.pdf (Abruf: 04.06.2022)
- [RUS1916] Luigi Russolo: „L'Arte dei Rumori (Die Geräuschkunst)“ von 1916, in der Übersetzung von Justin Winkler und Albert Mayr Akroama: „The Soundscape Newsletter“, Europe Editions, Basel auf www.klanglandschaft.org 1999, ISBN: 3952033537, http://www.iacsa.eu/jw/russolo_1916_geraeuschkunst_06-12-20.pdf (Abruf: 10.11.2021)
- [RWTH2002] Evelin Rottke, Christoph Tönges: „Bambus und seine mechanischen Eigenschaften“, RWTH Aachen, Fakultät für Architektur, 2002, <https://bambus.rwth-aachen.de/de/referate2/eigenschaften/referat1.html> (Abruf: 04.06.2022)
- [SAN2012] Anne Navarrete-Santos, Medizinische Fakultät, Institut für Anatomie und Zellbiologie, Große Steinstraße 52, 06108 Halle (Saale), Telefonat vom 13.8.2012
- [SAN2017] Rosana Sanz, Eduardo Manchado-Pérez: „Potential of Application of Psychoacoustics to User/Product Interaction Design“ 1-4. 10.1145/3123514.3123554, 2017, https://www.researchgate.net/publication/320992575_Potential_of_Application_of_Psychoacoustics_to_UserProduct_Interaction_Design (Abruf: 20.09.21)
- [SAUSE10] Markus Günter Ronny Sause: „Identification of Failure Mechanisms in Hybrid Materials utilizing Pattern Recognition Techniques applied to Acoustic Emission Signals“, Dissertation an der Universität Augsburg, 2010
- [SAV1701] Joseph Sauveur: „Principes d'acoustique et de musique: ou, Système général des intervalles des sons“, Minkoff Reprint, 1701
- [SCFR2008] Frieder Scholz: „Taschenbuch der Holztechnik“, Carl Hanser Verlag, Leipzig, 2008, ISBN: 9783446228528
- [SED2003] Gert Sedlacik: „Beitrag zum Einsatz von unidirektional naturfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen als Werkstoff für großflächige Strukturbauteile“, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, 2003
-

-
- [SCHAE70] Pierre Schaeffer: „Music and Computers“, Music and Technology, Paris 1970, https://issuu.com/leninacrown/docs/schaeffer__196__music_and_computer (Abruf: 04.06.2022)
- [SCHAF10] Raymond Murray Schafer: „Die Ordnung der Klänge – Eine Kulturgeschichte des Hörens“, (Erstausgabe 1977, The Tuning in the World), 2010 Schott Music GmbH & Co. KG, ISBN: 9783795707163
- [SCHA09] Eberhardt B. Scharnowski: „Gestalt und Deformation“, Schenk Verlag 2009, ISBN: 3936228140
- [SCHO10] Marcus Schoßig: „Bewertung der Schädigungsmechanismen von kurzglasfaserverstärkten Polyolefinen durch simultane Aufzeichnung der Schallemissionen unter quasistatischer und dynamischer Beanspruchung“, Dissertation an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2010
- [SEE2005] Hartmut Seeger: „Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme“, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2005, ISBN: 10 3540236538
- [SIL2008] Emilio Silva, Carlos Nelli, Matthew C. Walters, Glaucio H. Paulino: „Modeling bamboo as a functionally graded material.“ 9th International Conference on Multiscale and Functionally Graded Materials, FGM IX, Oahu Island, HI, 2008, <https://doi.org/10.1063/1.2896876> (Abruf: 04.06.2022)
- [SOL2022] Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, Frankreich, <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/solidworks/> (Abruf: 11.05.2022)
- [SON2003] Walter Sonderegger, Peter Niemz: „Schallemissionsuntersuchungen an Biegeproben aus sturmgeschädigten Fichten (Picea abies Karst.)“, DGZfP-Berichtsband 82-CD, 14. Kolloquium Schallemission, 2003, Berlin, http://www.dgzfp.de/portals/24/pdfs/bbonline/bb_82-cd/pdfs/V11Sonderegger.pdf (Abruf: 04.06.2022)
- [STE2005] Molly M. Stevens, Julian H. George: „Exploring and engineering the cell surface interface.“, Science 310.5751 (2005): 1135-1138.
- [SW12] Helmut Oellers, Am Rosenberg 20, 99092 Erfurt- Bindersleben, <http://www.syntheticwave.de/Wellenfeldsynthese.htm> (Abruf: 18.7.2012)
- [T10] Sonotec GmbH, Nauendorfer Str. 2, 06112 Halle, <https://www.sonotec.de/produkte/vorbeugende-instandhaltung/produkte/sensoren/t10/> (Abruf: 25.01.2022)
- [TSCH2011] Constanze Tschöpe: „Akustische zerstörungsfreie Prüfung mit Hidden-MARKOV-Modellen“, TUDpress, 2012, ISBN-10: 3942710765
- [TEN2004] Hans M. Tensi: „The Kaiser-effect and its scientific background.“, 26th European conference on acoustic emission testing, Berlin. 2004.
- [TOE2015] Christoph Tönges: „Mechanische Eigenschaften von Bambus“, Referat an der RWTH Aachen, 2001, <http://bambus.rwth-aachen.de/de/Referate/mecheigBambus/referat.html> (Abruf: 16.9.2015)
-

-
- [TSC2012] Constanze Tschöpe: „Automatisierte Weichheitsprüfung von Papier, DACH-Jahrestagung, Graz, 2012
- [VALL03] Hartmut Vallen: „Die Schallemissionsprüfung - Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung ZfP kompakt und verständlich Band 6“, Castell-Verlag GmbH Wuppertal 2003, ISBN: 393425086
- [VAN1957] Vance Packard: „Die geheimen Verführer – Der Griff nach dem Unbewußten in jedermann“, ECON Verlag Düsseldorf Wien New York Moskau, 1976, ISBN-10: 3548024025
- [VI-IF] Leonardo da Vinci: „Handschriften des Institut de France“, Paris
- [VIT09] Marcus Vitruvius Pollio: „Zehn Bücher Architektur: De Architectura Libri Decem“, marix Verlag ein Imprint von Verlagshaus Römerweg, 2015, ISBN-10: 3865392121
- [VI-TR] Leonardo da Vinci: „Codice Trivulziano“, Castello Sforzesco, Mailand
- [WAH12] Uli Wahl: „Töne für’s Auge...? oder die Klangfiguren des E.F.F. Chladni“, <http://www.windmusik.com/html/chladni.htm> (Abruf:04.06.2022)
- [WAV21] GFaI - Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V., 12489 Berlin, Germany, Software WaveImage, https://www.gfai.de/fileadmin/user_upload/GFaI-Produktblatt_WaveImage_de.pdf (Abruf: 04.06.2022)
- [WEB2012] Ewald Weber: „Das kleine Buch der botanischen Wunder“, Vol. 6033, CH Beck, 2012, ISBN: 9783406638312
- [WEI1998] Steve Weiner, Daniel Wagner: „The material bone: structure-mechanical function relations.“, Annual Review of Materials Science 28.1, 1998, 271-298.
- [WEI2010] Denis Metz, Steffen Gumpert (Hrsg.): „Vorletzte Geräusche - Kann man ein Geräusch zeichnen?“, Weildarum-Verlag Berlin 2010, ISBN-10: 3000308679
- [WID1993] Uli Widmann: „Untersuchungen zur Schärfe und zur Lästigkeit von Rauschen unterschiedlicher Spektralverteilung“, DAGA '93, Bad Honnef, 1993
- [Z+F67] Eberhard Zwicker und Richard Feldtkeller: „Das Ohr als Nachrichtenempfänger“, Hirzel Verlag Stuttgart, 1967, ISBN: 9783777601045
- [WILL2015] Rahel Willhardt: „Voll-sinnig“, Absatzwirtschaft Ausgabe Marken vom 10.03.2010 Seite 010, https://printarchiv.absatzwirtschaft.de/Content/_p=1004040,an=031010057,031010057;printpage (Abruf: 04.06.2022)
- [WOL2014] Rüdiger Hoffmann, Matthias Wolff: „Intelligente Signalverarbeitung 1“, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2014, ISBN: 9783662453223
- [XAR2021] XARION Laser Acoustics GmbH, Ghegastrasse 3, 1030 Wien, <https://xarion.com/de/produkte/eta450-ultra> (Abruf:11.07.2021)
-

-
- [ZfL] Jürgen Häberle; Julia Schulz, Zentrum für Faserverbunde und Leichtbau Haldensleben UG (haftungsbeschränkt); Neuhaldensleber Straße 22 a, D-39240 Haldensleben, <http://www.zfl-haldensleben.de>
- [ZIE2015] Gunter Ziegenhals: „Zum Einfluss der Holzfeuchte auf E-Modul und Schallgeschwindigkeit in Holz“, Bericht, IfM - Institut für Musikinstrumentenbau e.V., 2015
- [ZIT1990] Lothar Zitzmann (Herausgeber), Benno Schulz (Herausgeber): „Grundlagen visueller Gestaltung: Dokumente zur visuell-gestalterischen Grundlagenausbildung“, Verlag: Burg Giebichenstein, 1989, ISBN-10: 386019027X
-

7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abb. I-a: Lichthof im Levantehaus, Hamburg, entnommen aus Eberhardt B. Scharnowski: „Gestalt und Deformation“, Schenk Verlag 2009, ISBN 3-936228-14-0
- Abb. I-b: Auszug aus den Forschungsergebnissen von Peter Luckner (Hochschule für Kunst und Design „Burg Giebichenstein“ Halle) und Friedrich Blutner (SYNOTEC Psychoinformatik GmbH); mit freundlicher Genehmigung
- Abb. I-c: durch den Autor Signalauswertung der Audioanteile der Simulation / Forschungsergebnisse von Peter Luckner (Hochschule für Kunst und Design „Burg Giebichenstein“ Halle) und Friedrich Blutner (SYNOTEC Psychoinformatik GmbH)
- Abb. I-d: Stahlinstitut VDEh, Stahlanwendungen für nachhaltige technische Lösungen, 2003, entnommen aus: Uwe Hardtmann, Diplomarbeit „Nachhaltigkeit im Fahrzeugbau“ an der Burg Giebichenstein Hochschule für Kunst und Design Halle, Studiengang Industriedesign, 2005
- Abb. I-e: Links: Grafik des Autors; Rechts: [ZIE2015] Gunter Ziegenhals, Institut für Musikinstrumentenbau e. V. Zwota, Firmenpräsentation 2015
- Abb. I-f: entnommen aus Buch-Projekt: Denis Metz, Steffen Gumpert (Hrsg.): „Vorletzte Geräusche - Kann man ein Geräusch zeichnen?“, Weildarum-Verlag Berlin 2010, ISBN-10: 3000308679
- Abb. II-a: entnommen aus Nicholas Conard: „New flutes document the earliest musical tradition in southwestern Germany“, In: Nature 10.1038/nature08169, 2009
- Abb. II-b, c: entnommen aus Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Seikilos-Stele> (Abruf: 31.05.2022)
- Abb. II-d: entnommen aus Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Monochord> (Abruf: 31.05.2022)
- Abb. II-e: entnommen aus Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Tonsymbol> (Abruf: 18.6.2012)
- Abb. II-f: entnommen aus: Victor Desarnaulds: „DE L'ACOUSTIQUE DES EGLISES EN SUISSE“, Dissertation, Lausanne 2002 (abrufbar am 31.05.2022 unter: <https://www.yumpu.com/fr/document/view/17186274/de-lacoustique-des-eglises-en-suisse-une-epfl>)
- Abb. II-g: entnommen aus [KÖL10/2], sinngemäß aus „Historical Facts for the Arabian Musical Influence“ von H. G. Farmer, London 1930
- Abb. II-h: entnommen aus [KÖL10], Marin Mersenne, „Harmonie universelle“
- Abb. II-i: Bilder links entnommen aus entnommen aus [KÖL10], Bild rechts: „Manuscript from Mantua, last quarter of 15th century“ (Oxford University MS Canon. Liturg. 216. f.168 brecto) (Bodleian Library), auf Website: https://medieval.bodleian.ox.ac.uk/catalog/place_7005879 (Abruf am 14.06.2012)
- Abb. II-j: entnommen aus: Daniel Muzzolini: „Genealogie der Klangfarbe“, Dissertation (Varia Musicologica, Band 5), Verlag Peter Lang, Bern 2006, ISBN: 3039104586
-

-
- Abb. II-k: entnommen aus Website: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Refraction_-_Huygens-Fresnel_principle.svg&filetimestamp=20090702152634 (Abruf 18.7.2012)
- Abb. II-s: entnommen aus Markus G. R. Sause, Siegfried Horn: „Distinguishability of failure mechanisms in carbon fiber reinforced plastics: Influence of acoustic emission sensor type“, Chair for Experimental Physics II, Institute of Physics, Augsburg University, 2012
- Abb. II-u: Bild links entnommen aus Website des Auktionshauses Christie's: http://greg.org/archive/2008/05/28/chladni_figures.html (Abruf 27.07.2012); rechts: [RAH2015] Markus Rahammer; Igor Solodov; Daria Derusova; Marc Kreutzbruck; „Thermische Chladni Klangfiguren in der zerstörungsfreien Prüfung“; Universität Stuttgart; National Research Tomsk Polytechnic University; DGZfP - Thermographie-Kolloquium 2015; Stuttgart
- Abb. II-v: entnommen aus [SCHAE70] Pierre Schaeffer: „Music and Computers“, in: Music and Technology, Paris 1970
- Abb. II-w: entnommen aus [SCHAF10] Raymond Murray Schafer: „Die Ordnung der Klänge – Eine Kulturgeschichte des Hörens“, 2010 Schott Music GmbH & Co. KG, ISBN 978-3-7957-0716-3 (Erstausgabe 1977, The Tuning in the World)
- Abb. II-x: entnommen aus [TEN2004] Hans M. Tensi: „The Kaiser-effect and its scientific background“, 26th European conference on acoustic emission testing, Berlin. 2004
- Abb. II-y: entnommen aus [VALL03] Hartmut Vallen: „Die Schallemissionsprüfung; Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung ZfP kompakt und verständlich Band 6“, Castell-Verlag GmbH Wuppertal 2003, ISBN 3 – 934 25 – 08 6
- Abb. II-z: entnommen aus [FOW2014] Timothy J. FOWLER: „Spicewood, TX, USA, The Origin of CARP and the Term “Felicity Effect”“, 31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE) – Commemorative Speech
- Abb. II-aa: entnommen aus [KÖL11] Peter Költzsch: „Schriftenreihe zur Geschichte der Akustik, Heft 3 Preisträger europäischer Wissenschaftsakademien im 18. bis 20. Jahrhundert - auf dem Gebiet der Akustik“, Dresden 2011, Herausgeber Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Berlin; ISBN 978-3-9808659-7-5
- Abb. II-ab: entnommen aus [BLU2013] Friedrich Blutner, persönlich ausgehändigtes Infomaterial der SYNOTEC Psychoinformatik GmbH an den Autor
- Abb. II-ac: mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. Peter Luckner, Hochschule für Kunst und Design „Burg Giebichenstein“ Halle
- Abb. II-ad: Deutsches Patent DE 103 04 215.6 30.01 von 2003 (siehe [HEI2004])
- Abb. II-ae: entnommen aus [HEI2003] Gerd Heinz: „Eine Einführung in die akustische Photo- und Kinematographie“, Freigegeben für Springer VDI-Verlag, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Ausgabe Juli 2003
-

- Abb. II-af: entnommen aus [HEI2001] Gerd Heinz: „Geigenaufnahmen mit der akustischen Kamera“, Vortrag zur Abendveranstaltung der Konferenz Elektronische Bildverarbeitung (EVA 2001)“, Berlin Schöneberg, und [HEI2007] Gerd Heinz and Friedrich Blutner: „Schallbilder und Schallfilme von Musikdarbietungen-von aufsteigenden und abhebenden Klängen.“, FORTSCHRITTE DER AKUSTIK 33.2 (2007)
- Abb. 1.2.a: entnommen aus Website https://bbg-mbh.com/wp-content/uploads/2013/07/D-Prof_Cuntze_196112.pdf (Abruf: 17.06.2012), Ralf Cuntze: „3. BBG Innovationstag“ Mindelheim, Juni 21, 2013
- Abb. 1.2.1.a: mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. Jürgen Häberle, Hochschule Magdeburg-Stendal (FH)
- Abb. 1.2.1.b: Material der röntgentomografischen Untersuchung mit freundlicher Genehmigung von Dr.-Ing. Markus Schuck, HBW-Gubesch Thermoforming GmbH, Industriestraße 1, 91489 Wilhelmsdorf und Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Henning Janssen, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Abteilung Faserverbund- und Lasersystemtechnik, Steinbachstraße 17, 52074 Aachen
- Abb. 1.2.1.c: Abbildung zeigt ein lasergefügtes CFK-Rohr der AFPT GmbH mit eigens eingebrachten Fremdkörpern, Material der röntgentomografischen Untersuchung mit freundlicher Genehmigung von Dr.-Ing. Andreas Witte, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement, Steinbachstr. 19, D-52074 Aachen und Dr.-Ing. Patrick Kölzer, AFPT GmbH, Trinkbornstraße 15-17, 56281 Dörth
- Abb. 1.2.1.d: eigens gefertigtes Material für röntgentomografische Untersuchung für Forschungen zur Qualitätssicherung und Prozessoptimierung (HBW-Gubesch Thermoforming GmbH; Fraunhofer IPT Aachen) mit freundlicher Genehmigung von Dr.-Ing. Markus Schuck, HBW-Gubesch Thermoforming GmbH, Industriestraße 1, 91489 Wilhelmsdorf und Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Henning Janssen, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Abteilung Faserverbund- und Lasersystemtechnik, Steinbachstraße 17, 52074 Aachen
- Abb. 1.2.2.a: entnommen aus [KOL1982] Franz Kollmann: „Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe“, Band 1, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1982
- Abb. 1.2.2.b: entnommen aus [TOE2015] Christoph Tönges: „<http://bambus.rwth-aachen.de/de/Referate/mecheigBambus/referat.html>“ (erstellt am: 8.01.2001, zuletzt geändert am: 13.01.2002, Abruf: 16.9.2015)
- Abb. 1.2.2.c: Werte entnommen aus [TOE2015] Christoph Tönges: „<http://bambus.rwth-aachen.de/de/Referate/mecheigBambus/referat.html>“ (erstellt am: 8.01.2001, zuletzt geändert am: 13.01.2002, Abruf: 16.9.2015)
- Abb. 1.2.3.a: entnommen aus [SED2003] Gert Sedlacik: „Beitrag zum Einsatz von unidirektional naturfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen als Werkstoff für großflächige Strukturbauteile“, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, 06.11.2003
- Abb. 1.2.3.b: entnommen aus [AGR2016] Webpräsenz: 3N Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e.V.; Kompaniestraße 1; 49757 Werlte, <http://agrobiopolymere.eu/biopolymere/>, (Abruf am 17.02.2016)
-

-
- Abb. 1.2.3.c: entnommen aus [HOL2007] Peter Holstein: „Fraunhofer Challenge - High Risk - High Return (HR)^{2*} - Gezielte Erzeugung heterogener Werkstoffstrukturen für Funktion und Design“, Fraunhofer IWMH 2007
- Abb. 1.2.3.d: Für die Grafik verwendete Fotos (alle Abrufe am 05.03.2016) entnommen aus (v.l.n.r):
Hocker: (<http://www.fashionforhome.de/hocker-surya.html>),
Kaffeehausstuhl 241 von Michael Thonet: <http://de.shop.thonet.de/klassiker/programm-214>,
Rohre aus verdichtetem und unter Wärme und Feuchtigkeitseinfluss geformten Vollholz:
[HALL2011] Peer Haller: „Formholzrohre–Stand der Forschung und Anwendungen.“,
Bautechnik 90.1 (2013), pp. 34-4
Federstuhl aus formgepressten Birkenholzringen von Chris Ruhe:
<http://www.chrisruhe.nl/www/en/kruk/>,
Enrico Wilde: Lounge-Chair „AufjedenFalz“ (NFK-Sandwichverbund), mehrwerk
designlabor (<http://www.mehrwerkdesignlabor.de/>)
- Abb. 1.2.3.e: entnommen aus [STE2005] Molly M. Stevens, Julian H. George: „Exploring and engineering the cell surface interface.“, Science 310.5751 (2005): 1135-1138.
- Abb. 1.2.3.f: entnommen aus [WEI1998] Steve Weiner, Daniel Wagner. „The material bone: structure-mechanical function relations.“ Annual Review of Materials Science 28.1 (1998): 271-298.
- Abb. 1.3.a: entnommen aus [SCHA09] Eberhardt B. Scharnowski: „Gestalt und Deformation“, Schenk Verlag 2009, ISBN 3-936228-14-0
- Abb. 1.4.1.a: Bilder teilweise entnommen aus Andreas Kalweit: „Handbuch für technisches Produktdesign“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012 - grafische Umarbeitung des Autors
- Abb. 1.4.1.b: Bezug des Bambusmaterials: Uwe Meinicke, Bambus Internethandel Leipzig, Plautstraße 41, 04179 Leipzig
- Abb. 1.5.1.b: entnommen aus [NEU2015] Jörg Neugaertner, Peter Holstein, Christian Probst: „Reibung in KFZ-Antrieben“, 56. GfT - Tagung Göttingen, 21.-23 September 2015; Gesellschaft für Tribologie
- Abb. 2.2.b: entnommen aus [VALL03] Hartmut Vallen: „Die Schallemissionsprüfung; Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung ZfP kompakt und verständlich Band 6“, Castell-Verlag GmbH Wuppertal 2003, ISBN 3 – 934 25 – 08 6
- Abb. 2.2.d: rechte Abb. entnommen aus Website: Fuji <http://www.fujicera.co.jp/en/product/ae/> (Abruf: 08.12.2016)
- Abb. 2.3.a: entnommen aus [FEI2014] Joachim Feierabend: „Stand der technischen Möglichkeiten zur Schallquellenlokalisierung mittels des Beamforming- Verfahrens im Zeitbereich - insbesondere im Maschinenbau“, 11. Tagung Technische Diagnostik, 23. - 24. Oktober 2014, Merseburg
- Abb. 2.4.f: entnommen aus [BAD2006] Daniel Bader: „Eine flexible akustische Messmethode zur Detektierung von verzahnungstechnischen Problemen“, Dissertation 2006, ISBN 978-3-939473-09-1
-

Abb. 2.5.a,b,d: entnommen aus [HOLZI2015] Peter Holstein, Gunter Ziegenhals, Andreas Tharandt, Nicki Bader, Hans-Joachim Münch: „Ultraschallverfahren zur Bestimmung von Kennwerten für Musikinstrumentenhölzer“, Posterbeitrag auf der DACH-Jahrestagung 2015 vom 11. - 13. Mai in Salzburg

Abb. 2.6.a: entnommen aus Website Bedienungsanleitung Kühlschränke KÖLGRADER IKEA, www.ikea.com/de/de/manuals/koeldgrader-fridge-freezer-ikea-750-integrated__AA-2242433-1.pdf, (Abruf: 06.01.2021)

Abb. 3.1.b: entnommen aus Website www.uni-due.de/ibpm/BauPhy/Schall/Buch/22.00-22.10.htm, (Abruf: 22.12.2021)

Abb. 3.2.1.b: Einzelbilder des Schaubildes entnommen aus den zur vorliegenden Arbeit zur Verfügung gestellten Simulationsergebnissen von Dipl.-Inf. Maik Gollnick und Dr.-Ing. Daniel Herfert von der Gfai Tech, Zusammenstellung und Auswertung Nicki Bader

Abb. 3.2.1.c: entnommen aus den zur vorliegenden Arbeit zur Verfügung gestellten Simulationsergebnissen von Dipl.-Inf. Maik Gollnick und Dr.-Ing. Daniel Herfert von der Gfai Tech

Alle in der Arbeit verwendeten und in dieser Übersicht nicht aufgeführten Abbildungen, Grafiken, sowie Fotos sind Werke des Autors.

8 DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit nahm ihren Ursprung in meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Design der Kunsthochschule Halle und der damit verbundenen engen Zusammenarbeit mit meinem Mentor und Freund Prof. Eberhardt Scharnowski, welcher den Einfluss ingenieurtechnischer Aspekten auf die Gestaltung und Wahrnehmung von Objekten untersuchte. Die besondere Berücksichtigung von designerischen Aspekten bei der technischen Auslegung von Strukturen im Flugzeugbau führte über das Fraunhofer Institut zu Prof. Peter Holstein, welcher diese spezielle Betrachtungs-Konstellation durch sein Arbeitsfeld der technischen Akustik und Diagnose um den Kern dieser Arbeit erweitern sollte. Ihm ist es auch zu verdanken, dass ich diese Reise eigentlich begonnen habe und so oft ich mich zwischendurch auch gefragt habe warum, möchte ich hier einfach danke dafür sagen Peter.

Dank auch an den damaligen Dekan der Fakultät für Maschinenbau und Kraftfahrzeugtechnik an der TU Ilmenau, Prof. Klaus Augsburg, der mit seinem Fachbereich schließlich das wissenschaftliche Umfeld bot, um derartige Forschungen im Rahmen einer Promotion zu bearbeiten.

Nicht unerwähnt bleiben soll der Umstand, dass ich seit dem Start des Vorhabens als Designer und Konstrukteur bei der Sonotec GmbH tätig bin. An dieser Stelle danke ich den Geschäftsführern Dipl.-Phys. Hans Joachim Münch und Dr. rer. nat. Santer zur Horst-Meyer für die Möglichkeiten im industriellen Umfeld und enger Anbindung an die F&E Abteilung zu arbeiten und die dort vorhandenen Netzwerkbeziehungen für die hier beschriebenen Forschungen nutzen zu dürfen. In diesem Zusammenhang ist noch einmal die besondere Rolle von Prof. Peter Holstein hervorzuheben, dem es trotz dieser ungewöhnlichen Promotionskonstellation gelang eine funktionierende Arbeitsgruppe, bestehend aus Mitstreitern in Ilmenau und Halle und darüber hinaus zu etablieren.

Mein Dank richtet sich darüber hinaus an die vorab in der „amtlichen Erklärung“ genannten Personen und Institutionen. Ohne die kollegiale und konstruktive Unterstützung der Fachkollegen auf den unterschiedlichsten Gebieten wäre die Bearbeitung in diesem Umfang nicht möglich gewesen. Die anfänglich vorherrschenden Bedenken, im industriellen Umfeld zu promovieren kehrten sich gerade dadurch schnell ins Gegenteil. Ich vermute, dass die Bereicherung des Themas mit den unzähligen Fragen, Ideen und Vorschlägen in dieser Breite anders wohl kaum erlebbar gewesen wäre. Ich bin dankbar für die vielen neuen Verknüpfungen im Netzwerk, die neben der Promotion seither auch meine fachliche Arbeit in der Industrie bereichern.

Neben den fachlichen Unterstützern möchte ich darüber hinaus auch den Menschen danken, die mich in allen anderen, für ein solches Vorhaben wichtigen Belangen unterstützt, ermutigt, ge- und ertragen haben. Ohne meine Familie, die mich über die Jahre abgelenkt, ermutigt und meinen Kompass für die wichtigen Dinge im Leben eingenordet hat, wäre ich oft verloren gegangen. Ich danke vor allem meinen Eltern, dass sie mich durch das Leben getragen haben und zu dem gemacht haben, was ich bin und ich danke Dir Conny, dass Du an meiner Seite bist - ich liebe Dich.

Zu guter Letzt möchte ich auch allen Freunden danken, die meinen Weg begleitet haben und sich tapfer meinen Ausführungen ergeben haben. Danke vor allem Christian Probst und Thomas Spangenberg für die Unterstützung bei den Bergetappen und auf den letzten Metern, den Abschnitten, die ja bekanntlich am schwersten sind. Danke auch an Andreas Lenz für die Unterstützung beim finalen Layout und Satz für die Veröffentlichung.

... Danke an die Menschen, die vielleicht manchmal den Glauben an die Sache, aber niemals an mich verloren haben ... Frieda, Scharno, Buffy ... ihr seid in meinem Herzen ...