



# Verfahren zur verbesserten Charakterisierung von porösen Materialien in der Fahrzeugakustik

Diplomarbeit im Rahmen der Studienrichtung Kunststofftechnik an der  
Montanuniversität Leoben



Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe  
o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Reinhold W. Lang

von

cand. ing.

**Simon Ickinger**

Begutachter:

o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Reinhold W. Lang

Betreuer:

Dr. Franz Brandl; Leiter der Akustikabteilung der Firma AVL List GmbH, Graz

Februar 2007

# Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenblatt</b>	<b>5</b>
<b>Danksagung</b>	<b>6</b>
<b>Zusammenfassung - Abstract</b>	<b>7</b>
<b>Teil I: Einleitung und Grundlagen</b>	<b>8</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>9</b>
1.1 Allgemeines . . . . .	9
1.2 Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	10
1.3 Entstehung und Durchführung . . . . .	10
<b>2 Akustische Grundlagen</b>	<b>12</b>
2.1 Akustik und Schall . . . . .	12
2.1.1 Luftschall . . . . .	13
2.1.2 Körperschall . . . . .	13
2.1.3 Flüssigkeitsschall . . . . .	14
2.2 Akustische Größen . . . . .	14
2.2.1 Feldgrößen . . . . .	14
2.2.2 Leistungsgrößen . . . . .	16
2.2.3 Sonstige Größen . . . . .	17
2.3 Verhältnisgrößen, relative und bewertete Pegel . . . . .	17
2.3.1 Verhältnisgrößen . . . . .	17
2.3.2 Relative Pegel . . . . .	17
2.3.3 Bewertete Pegel . . . . .	18
2.4 Akustische Messtechnik . . . . .	19
2.4.1 Luftschallmessung . . . . .	19
2.4.2 Körperschallmessung . . . . .	20
<b>3 Maßnahmen zur Schallbekämpfung</b>	<b>22</b>
3.1 Allgemeines . . . . .	22
3.1.1 Primärmaßnahmen . . . . .	22

3.1.2	Sekundärmaßnahmen . . . . .	23
3.1.3	Tertiärmaßnahmen . . . . .	23
3.2	Schallabsorption . . . . .	24
3.2.1	Wirkungsweise . . . . .	24
3.2.2	Charakterisierung . . . . .	27
3.2.3	Messung . . . . .	27
3.3	Schalldämpfung . . . . .	28
3.3.1	Wirkungsweise . . . . .	29
3.3.2	Charakterisierung . . . . .	30
3.3.3	Messung . . . . .	32
3.4	Schalldämmung . . . . .	33
3.4.1	Wirkungsweise . . . . .	33
3.4.2	Charakterisierung . . . . .	34
3.4.3	Messung . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Fahrzeugakustik</b>	<b>36</b>
4.1	Schallentstehung im Fahrzeug . . . . .	36
4.2	Schallbekämpfung im Fahrzeug . . . . .	37
4.2.1	Primärmaßnahmen . . . . .	37
4.2.2	Sekundärmaßnahmen . . . . .	37
<b>Teil II: Stand der Technik</b>		<b>40</b>
<b>5</b>	<b>Fallstudien</b>	<b>41</b>
5.1	Materialverständnis als Basis für die Simulation . . . . .	41
5.2	Verständnis und Beherrschung von Materialparameter zur Werkstoffentwicklung . . . . .	43
5.3	Bewertung von Schlüsseffekten für das Verständnis akustischer Aktivität	43
<b>6</b>	<b>Charakterisierung von zellulären porösen Absorbern</b>	<b>45</b>
6.1	Allgemeines . . . . .	45
6.2	Geometrische Charakterisierung . . . . .	45
6.2.1	Einheitsgeometrien . . . . .	45
6.2.2	Messung bzw. Analyse . . . . .	46
6.3	Mechanische Charakterisierung . . . . .	46
6.4	Materialmodelle . . . . .	47
6.4.1	Grundsätzliche Aspekte . . . . .	47
6.4.2	Makroskopische Eigenschaften als Absorberparameter . . . . .	48

6.5	Einflüsse auf akustische Eigenschaften poröser Absorber . . . . .	49
<b>Teil III: Charakterisierung und Optimierung poröser Materialien für Akustikanwendungen</b>		<b>51</b>
<b>7</b>	<b>Neuer methodischer Ansatz zur Optimierung von porösen Materialien für Akustikanwendungen</b>	<b>52</b>
7.1	Rapid Prototyping . . . . .	52
7.1.1	Verfahrensablauf . . . . .	53
7.1.2	Grundlegende Verfahrensgruppen . . . . .	54
7.2	Erarbeitung einer Patentanmeldung . . . . .	57
7.2.1	Zusammenfassung der Patentanmeldung . . . . .	57
7.2.2	Methodik . . . . .	58
7.2.3	Stand der Anmeldung . . . . .	59
7.3	Verfahren . . . . .	59
7.3.1	Verfahrensablauf . . . . .	59
7.3.2	Systematische Bewertung von Einflussfaktoren auf akustische Eigenschaften. . . . .	63
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>64</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>66</b>
<b>Anhang: Patentanmeldung</b>		<b>70</b>

# Aufgabenblatt

## Danksagung

Herrn o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Reinhold W. Lang möchte ich für das Ermöglichen dieser Arbeit danken, besonders für die sehr wichtigen Ratschläge, die ich während dieser Zeit erhalten habe.

Herrn Dr. Franz Brandl und Herrn Dr. Martin Pflüger möchte ich für die nette Aufnahme in der Akustikabteilung der Firma AVL und für die Unterstützung beim Verfassen der Diplomarbeit danken, vor allem, dass mir die Anmeldung meiner Idee zum Patent freigestellt worden ist.

Ein Dank geht auch an Frau Mag. Petra Staberhofer vom Außeninstitut Leoben für die Hilfestellung bei Fragen zur Patentanmeldung.

Meinen Eltern danke ich für die Ermöglichung meines Studiums. Besonders bin ich meinem Vater verpflichtet, der mir in vielen produktiven Diskussionen Hilfe bei der Patentanmeldung war.

Meiner Freundin Emma danke ich für den starken Rückhalt, den sie mir vor allem im letzten Abschnitt der Diplomarbeit gegeben hat.

## Zusammenfassung - Abstract

Die Anforderungen an den Akustiker in der Fahrzeugentwicklung werden heutzutage immer größer. Gesetzte akustische Ziele müssen bei geringerem Gewicht, möglichst geringen Kosten und mit immer weniger Prototypen verwirklicht werden. Lösungswege stellen einerseits die Verbesserung der Simulation der verwendeten Materialien bei der Auslegung eines Geräuschdämpfungspaketes, andererseits die Entwicklung akustisch effektiverer Materialien dar.

Die vorliegende Diplomarbeit gibt dem Kunststofftechniker einen Überblick über die Akustik und im Speziellen die Fahrzeugakustik und zeigt anschließend mit Hilfe von Fallstudien auf, dass ein gutes Materialverständnis Basis für eine Verbesserung der Simulation und der Materialentwicklung ist. Nach einem Überblick über den derzeitigen Stand der Technik zur Charakterisierung von schallabsorbierender Materialien wird ein Verfahren vorgestellt, das mit Hilfe der Rapid Prototyping Technologie Zusammenhänge zwischen der mikroskopischen Struktur und den akustischen Eigenschaften zellulärer poröser Materialien systematisch bewerten soll. Mögliche Anwendungsgebiete des im Rahmen der Diplomarbeit zum Patent angemeldeten Verfahrens werden zum Abschluss diskutiert.

Requirements on acousticians are getting stronger and stronger in the field of automotive engineering. Acoustic targets together with lower weight, lower costs and fewer prototypes have to be reached. Solutions achieve on the one hand an improvement regarding the simulation of material concerning the noise insulation and on the other hand a development regarding acoustically effective materials.

The diploma thesis provides a survey of acoustics as well as an overview of noise control in automotive engineering. On the basis of case studies it is shown that a good knowledge of material is required for an improvement concerning the simulation and the material-development. After an overview of the state-of-the-art concerning the characterisation of sound-absorbent materials, a procedure is introduced that systematically evaluates the interrelation between microscopic structures and the acoustic properties of cellular porous material via the Rapid Prototyping Technology. Finally possible fields of applications based on the patent that has been applied for while working on this thesis will be discussed.

**Teil I:**  
**Einleitung und Grundlagen**



# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Das Beherrschen von Geräusch- und Vibrationsverhalten gewinnt heutzutage in vielen Anwendungsbereichen an Bedeutung und ist Kriterium für die Konkurrenzfähigkeit eines Produktes. Am Beispiel des Automobils wird ein Trend zum *akustischen Design* immer deutlicher. Nicht nur die Reduktion, sondern auch die gezielte Modellierung des Innengeräusches ist wichtig für die erfolgreiche Vermarktung von Fahrzeugen, was dazu führt, dass die akustische Optimierung eine Kernanforderung neuer Entwicklungen ist [1].

Computergestützte Methoden erleichtern die Auslegung und Abstimmung von Antriebsstrang, Ansaugsystem, Abgasanlage und der Vibrationsübertragungspfade, um zum einen die Schallweiterleitung und zum anderen die Schallentstehung direkt an der Quelle mit Hilfe von sogenannten Primärmaßnahmen zu kontrollieren [2].

Ein gutes akustisches Ergebnis wird jedoch erst erreicht, wenn der Fahrzeugakustiker neben diesen Maßnahmen auch ein *Geräuschdämpfungspaket* mit den akustischen Grundfunktionen Geräuschdämpfung, Geräuschdämmung und Schallabsorption auslegt. Die Konzipierung und Entwicklung dieser so genannten *Sekundärmaßnahmen* wird erst langsam Teil der Simulationskette und stellt eine große Herausforderung dar [3]. Einerseits soll sich die Anzahl der noch immer notwendigen Prototypen verringern und die Auslegung schon Teil der Designphase des Automobils sein, andererseits sollen die akustischen Materialien immer effektiver werden, das heißt, dass genau vorgegebene akustische Ergebnisse bei weniger Gewicht, Volumen und Kosten erzielt werden sollen [1].

Basis für eine Verbesserung der Situation bildet die Charakterisierung von akustischen Materialien. Dadurch können erstens Datenbanken mit vorhandenen Materialien erstellt werden, aus denen der Akustiker für die jeweiligen Anforderungen die richtige Auswahl treffen kann. Zweitens können Materialmodelle entwickelt werden, die für die noch nicht ausgereiften Simulationen von Sekundärpaketen benötigt werden [3]. Drittens stellt die Charakterisierung ein wichtiges Werkzeug dar, um dem Materialhersteller Informationen zur Entwicklung neuer Materialien bereitzustellen [4, 5].

Ein gutes Verständnis der Wertschöpfungskette beginnend beim Aufbau der eingesetzten Werkstoffe, über die mikro- und makroskopischen Einflüsse bis hin zu den

akustischen Eigenschaften des Bauteils ist eine wichtige Komponente für Neuentwicklungen.

## 1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Absorptionsmaterialien bestehen aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Strukturen in unterschiedlichen Formen, die heterogen angeordnet sind. Aus dieser Morphologie (Zellenform, -größe, -oberfläche und -verteilung, usw.) und aus ihren intrinsischen Materialeigenschaften (E-Modul, Dämpfungsfaktor, Wärmeleitfähigkeit, Querkontraktionszahl, usw.) ergeben sich deren akustische Eigenschaften. Die genaue und systematische Bewertung der einzelnen Einflussfaktoren ist mit bisherigen Charakterisierungsmethoden nur schwer möglich.

Der erste Teil dieser Arbeit soll eine verständliche Einführung in die Akustik und Fahrzeugakustik für den Kunststofftechniker sein.

Der zweite Teil soll eine Literaturrecherche zum Stand der Technik sein, der sich mit folgenden Fragen auseinandersetzt:

- Welche Industrien haben ein Interesse an einer verbesserten Charakterisierung poröser Materialien im Hinblick auf akustische Anwendungen?
- Welche Möglichkeiten der Charakterisierung von porösen Absorptionsmaterialien sind bekannt?

Im dritten und letzten Teil der Arbeit soll die Rapid Prototyping Technologie beschrieben und ein darauf basierendes Verfahren zur verbesserten Charakterisierung von porösen Materialien vorgestellt und diskutiert werden.

## 1.3 Entstehung und Durchführung

Die vorliegende Diplomarbeit entstand aus einer Bewerbung des Autors bei der Akustikabteilung der Firma AVL List GmbH, Graz, Österreich. Grund für die Bewerbung aus eigener Initiative war das Interesse an der Akustik und die Überzeugung, dass die Verbindung der Kunststofftechnik und der Akustik Quelle für neue Entwicklungen sein kann.

Nach ersten Gesprächen stellte sich heraus, dass generell in der Fahrzeugakustik ein Interesse an der Charakterisierung von akustischen Materialien für Sekundärmaßnahmen besteht. Zusammen mit dem Institut für Werkstoffkunde und -prüfung wurde vorgesehen, eine Datenbank mit den von der Fa. AVL verwendeten akustischen Materialien zu erstellen.

In einem ersten Schritt wurden akustische und fahrzeugakustische Grundlagen zusammengestellt, um mit der Thematik vertraut zu werden. Besonders hilfreich bei der Zusammenstellung war die Teilnahme an einem Projekt der Firma AVL, es handelte sich dabei um die Erstellung eines Fahrzeugakustikbuches [2] mit Autoren der Firma AVL, der MAN Aktiengesellschaft, München, Deutschland und der Adam Opel GmbH, Rüsselsheim, Deutschland.

Anschließend wurden Materialdaten der Firma Eurofoam Deutschland GmbH, Wiesbaden, Deutschland, der Firma Cellofoam GmbH & Co. KG, Biberach/Riss, Deutschland und der Firma Getzner Werkstoffe GmbH, Buers, Österreich akquiriert. Nach der Vorlage von [6] und [7] wurde versucht, die Daten in einer Datenbank zusammenzufassen. Dabei wurde jedoch deutlich, dass die Daten teilweise inkonsistent, wichtige Kennwerte nur als Einpunktwerte angegeben und dass teilweise keine oder uneinheitliche Prüfnormen angegeben waren. Das Ziel, eine Datenbank für direkte Werkstoffvergleiche mit einheitlichen Bewertungskriterien aufzubauen, konnte nicht erreicht werden, da dies nur mit dem Durchführen genormter Prüfmethode der Materialien möglich gewesen wäre. Dies hätte den Rahmen gesprengt, so musste eine alternative Thematik für die Diplomarbeit gesucht werden.

Es folgten Gespräche mit Materialherstellern (Eurofoam und Getzner Werkstoffe auf der Kunststoffmesse K'04) und mit Zulieferfirmen akustischer Bauteile (Firmenbesuche bei Rieter Management AG, Winterthur, Schweiz und Carcoustics Austria GmbH, Klaus, Österreich). Die Kernaussagen waren, dass der Trend von der einfachen Verwendung von akustischen Materialien weggeht und dass die Charakterisierung und das Materialverständnis die Basis bilden, um die Simulation und die akustische Effektivität der Materialien zu verbessern. Bei einer anschließenden Recherche über die Charakterisierung poröser Materialien wurde festgestellt, dass es wenig Information über den Zusammenhang zwischen mikroskopischen und akustischen Eigenschaften gibt.

Aufbauend auf die Gespräche und die Auseinandersetzung mit der Thematik entstand die Idee, die Technologie des Rapid Prototypings zur Charakterisierung von schallabsorbierenden Materialien zu nützen. Eine Recherche zur technische Machbarkeit und eine Patentrecherche zur Prüfung der Neuheit folgten. Nachdem diese positiv ausfielen, wurde die Idee am Österreichischen Patentamt angemeldet.

Abschliessend wurden die Literaturrecherche zum Stand der Technik der Charakterisierung poröser Absorber, die grundlegende Idee für einen neuen methodischen Ansatz zur Optimierung von porösen Materialien für Akustikanwendungen, eine technische Betrachtung der Rapid Prototyping Technologie, die Erarbeitung der Patentanmeldung und das Verfahrensprinzip zur verbesserten Charakterisierung poröser Materialien in dieser Arbeit zusammengestellt.

## 2 Akustische Grundlagen

Die im folgenden Kapitel behandelten akustischen Grundlagen wurden, soweit nicht anders angegeben, aus [8, 9, 10, 11] entnommen.

### 2.1 Akustik und Schall

Akustik ist die Lehre vom Schall. Als Schall bezeichnet man mechanische Schwingungen im hörbaren Bereich, also zwischen  $16\text{ Hz}$  und  $20\text{ kHz}$ . Eine äußere Kraft bringt die Moleküle eines elastischen Stoffes aus ihrer Gleichgewichtslage, diese werden sich selbst überlassen und pendeln abhängig von den Elastizitäts- und Trägheitskräften der Materialteilchen periodisch hin und her. Schall unter dem menschlichen Hörbereich wird Infra- der darüber wird Ultraschall genannt.

Abbildung 2.1 stellt eine in der Akustik übliche Zuordnung des Schalls nach menschlichem Empfinden *Noise*, *Vibration* und *Harshness* (NVH) dar.

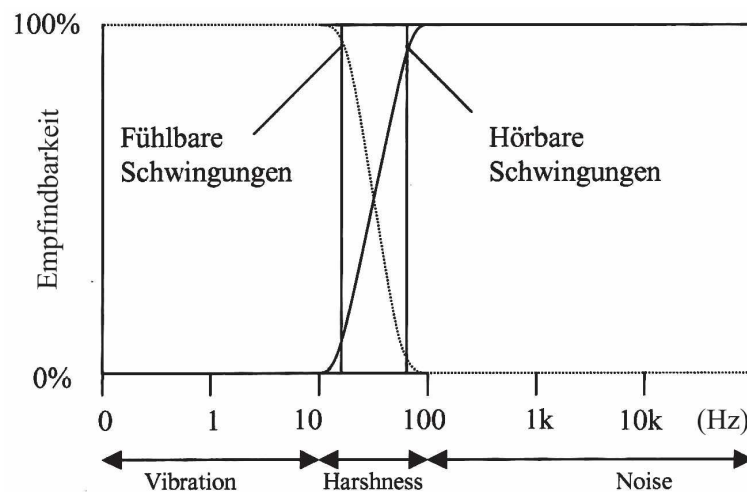


Abb. 2.1: Noise, Vibration and Harshness (NVH) nach [11].

Schall breitet sich je nach Medium mit der so genannten Schallgeschwindigkeit  $c$  aus. Es gilt der Zusammenhang

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

mit der Frequenz  $f$  und der Wellenlänge  $\lambda$ .

Da Schall nur in Materie auftritt, spricht man von drei Schallarten, eingeteilt nach den schallübertragenden Medien Luft, Körper und Flüssigkeiten.

### 2.1.1 Luftschall

Die bekannteste Form des Schalls ist der Luftschall. Hierbei wird durch eine Anregung die Luftdichte verändert, wobei ein Über- und Unterdruck entsteht, der sich örtlich und zeitlich auszugleichen versucht. Die Teilchen schwingen somit um ihre Gleichgewichtslage in Ausbreitungsrichtung, man spricht von Longitudinalwellen (s. Abb. 2.2).

Die Luftschallanregung kann durch einen schwingenden festen Körper (z.B. Glocke) oder durch eine schwingende Membran (z.B. Lautsprecher) hervorgerufen werden.

Die Schallgeschwindigkeit  $c$  in einem idealen Gas ergibt sich durch

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \frac{R T}{M}}, \quad (2.2)$$

mit  $\kappa$  als Adiabatenexponent,  $\rho$  als Dichte,  $p$  als Druck, oder alternativ nach der thermischen Zustandsgleichung mit  $R = 8,3145 \text{ J/molK}$  als universelle Gaskonstante, mit  $T$  als absolute Temperatur in Kelvin und mit  $M$  als molare Masse des Mediums.

### 2.1.2 Körperschall

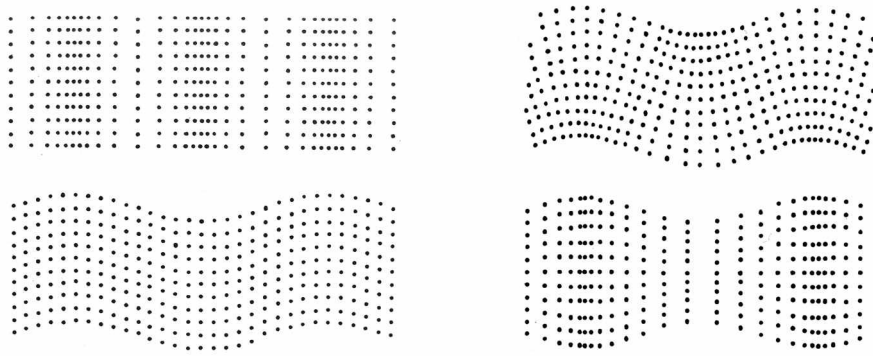
Wenn sich Schall in festen Körpern ausbreitet, spricht man von Körperschall. Trifft Schall auf einen Körper, wird ein Teil der Schallenergie reflektiert, während der andere Teil schallgedämmt durch den Körper geht, und am anderen Ende als Luftschall wieder abgestrahlt wird. So bleibt ein Teil der Schallenergie im Körper und wird in Wärme umgesetzt. Dieser Vorgang wird als *Schalldämpfung* bezeichnet (s. Abschnitt 3.3). Ein weiterer Teil der Energie kann im Körper als Körperschall seitlich abwandern.

Im Gegensatz zum Luft- und Flüssigkeitsschall treten beim Körperschall *Schubspannungen* und *Schubdeformationen* auf. So ergibt sich, dass sowohl Kompressionswellen - wie in Gasen und Flüssigkeiten - als auch Schubwellen und die Kombination beider zu finden sind. Die mathematische Beschreibung des Körperschalls ist sehr komplex und verbirgt große Schwierigkeiten in der Berechnung. So werden in der Praxis zum einen vorkommende Wellentypen zum anderen auch Übergänge zwischen den einzelnen Typen, welche an jeder Diskontinuität, wie z.B. an freien Oberflächen, Ecken oder Querschnittssprüngen vorkommen, unabhängig betrachtet. Einen Überblick über die Wellentypen verschafft Abb. 2.2.

Die Schallgeschwindigkeit  $c$  in Festkörpern ergibt sich durch

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.3)$$

mit den Materialkennwerten des Festkörpers Elastizitätsmodul  $E$  und Dichte  $\rho$ .



**Abb. 2.2:** Die wichtigsten Wellentypen. Links: Longitudinal- bzw. Dichtewellen und Transversal- bzw. Schubwellen. Rechts: Biege- und Dehnwellen [9].

### 2.1.3 Flüssigkeitsschall

Bei Schallausbreitung in Flüssigkeit spricht man von Flüssigkeitsschall. Eine genauere Betrachtung findet sich in [8].

Die Schallgeschwindigkeit  $c$  in Flüssigkeiten ergibt sich durch

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (2.4)$$

mit den Materialkennwerten der Flüssigkeit Kompressionsmodul  $K$  und Dichte  $\rho$ .

## 2.2 Akustische Größen

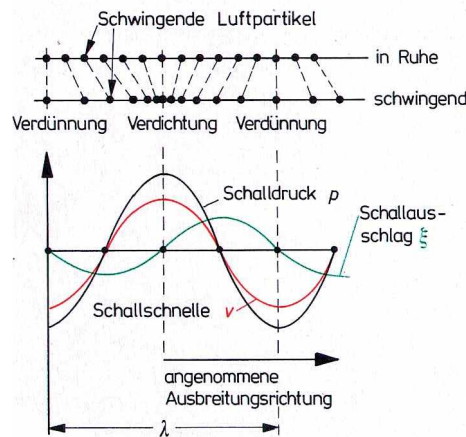
Die üblichen physikalischen Messgrößen in der Akustik kann man in 2 Hauptgruppen - Feldgrößen und Leistungsgrößen - einteilen.

### 2.2.1 Feldgrößen

Ein Schallfeld, also einen mit Materie (z.B. Luft) erfüllten Raum, in dem sich Schall ausbreitet, kann man mit den so genannten Schallfeldgrößen (Schalldruck, Schallschnelle) quantitativ eindeutig beschreiben. Bei diesen Größen treten, wie in Abb. 2.3 gezeigt, veränderliche Wechselanteile auf, sodass bei stationären Vorgängen meist die Effektivwerte (RMS bzw. Root Mean Square) angegeben werden.

#### Schalldruck $p$

Bei Luftschall tritt eine örtliche und zeitliche Änderung des Luftdrucks auf. Diese Änderung zum normalen atmosphärischen Luftdruck nennt man Schalldruck. Normaler



**Abb. 2.3:** Momentendarstellung der Schallfeldgrößen [10].

Sprachschall verursacht bei 1 m Entfernung einen Schalldruck von etwa  $10^{-1} \text{ N/mm}^2$ . Ein Schalldruck von  $20 \text{ N/mm}^2$  wird vom menschlichen Gehör als schmerzhaft empfunden, obwohl dieser im Vergleich zum atmosphärischen Luftdruck mit circa  $10^5 \text{ N/mm}^2$  sehr gering ist.

Der Schalldruck  $p_{\text{eff}}$  ist eine Wechselgröße, wird aber üblicherweise nur als  $p$  geschrieben. Oftmals wird der Schalldruck aber auch als Scheitelwert  $\hat{p}$ , als Effektivwert  $\tilde{p}$  oder als arithmetischer Mittelwert  $\bar{p}$  angegeben oder gemessen.

In der akustischen Messtechnik wird der Schalldruck am häufigsten gemessen, da die Messung z.B. mit einem Mikrophon sehr leicht durchführbar ist. Angegeben wird jedoch meist der Schalldruckpegel, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben.

### Schallschnelle $\nu$

Die Schallschnelle ist die Wechselgeschwindigkeit, mit der schwingende Moleküle des Schallmediums oszillieren. Die Definition ist Schallausschlag pro Zeit

$$\nu = \frac{d\xi}{dt} \quad (2.5)$$

mit  $\xi$  als Auslenkung bzw. Ausschlag. Die Schallschnelle darf aber nicht mit der Schallgeschwindigkeit verwechselt werden.

Bei einer sinusförmigen Bewegung des Mediumteilchens mit der Frequenz  $f = \omega/(2\pi)$  gilt

$$\nu = \omega \xi. \quad (2.6)$$

Die Schallschnelle wird wie der Schalldruck als Effektivwert angegeben. An der Hörschwelle des Menschen beträgt die Schallschnelle ungefähr  $\tilde{\nu}_0 = \omega \tilde{\xi} \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$  und ist im Vergleich mit der Schallgeschwindigkeit  $v \approx 343 \text{ m/s}$  sehr viel kleiner.

### 2.2.2 Leistungsgrößen

Aus den bisher erwähnten linearen Schallfeldgrößen lassen sich quadratische, also Energie- bzw. Leistungsgrößen ableiten. Meist sind sie als Wirkanteile, also als zeitlicher Mittelwert des Energietransports angegeben.

#### Schallintensität $I$

Die Schallintensität, auch Schallstärke, ist als die durch ein Flächenelement einer Hüllfläche hindurchtretende Schallenergie pro Zeit definiert. Sie wird wie folgt berechnet:

$$I = \tilde{p} \tilde{v} \quad (2.7)$$

*Schallintensität = Schalldruck \* Schallschnelle*

$$= \frac{\tilde{p}^2}{Z_0} = \tilde{v}^2 Z_0, \quad (2.8)$$

mit  $Z_0$  als Schallkennimpedanz (s. Abschnitt 2.2.3).

#### Schalleistung $P$

Unter der Schalleistung versteht man die Schallenergie, die pro Zeiteinheit durch eine zur Schallausbreitungsrichtung senkrechte Fläche  $S$  hindurchströmt. Um die gesamte Schalleistung einer Schallquelle zu ermitteln, muss wie in Gl. (2.10) angegeben, die Schallintensität über ein Kugeloberfläche mit der Schallquelle als Mittelpunkt integriert werden. Beispiele für einige Schalleistungen gibt Tab. 2.1.

$$P_a = I S \quad (2.9)$$

*Schalleistung = Schallintensität \* durchschallte Fläche*

$$\vec{P} = \int_A \vec{I} d\vec{A} \quad (2.10)$$

**Tab. 2.1:** Schalleistungen bzw. Schalleistungspegel einiger Schallquellen [10].

Schallquelle	Schalleistung $P_a$ in [W]	Schalleistungspegel $L_W$ in dB
Unterhaltungssprache	$7 * 10^{-6}$	68,5
Orgel	10	130
Alarmsirene	1.000	150



### 2.2.3 Sonstige Größen

#### Impedanz

Die Impedanz ist eine wichtige Größe, um Vorgänge wie Reflexion, Transmission und Absorption zu beschreiben. Wie auch in der Elektrotechnik setzt sich die akustische Impedanz aus dem Quotienten einer komplexen dynamischen und einer komplexen kinematischen Größe zusammen.

#### *Schallkennimpedanz*

Bei einer ebenen Schallwelle ist der Quotient aus Schalldruck  $p$  und Schallschnelle  $v$  immer konstant, so kann man jedes Schallausbreitungsmedium mit der Schallkennimpedanz  $Z_0$  charakterisieren. Diese Impedanzdefinition beschreibt den Widerstand im (freien) Schallfeld, der der Schallausbreitung entgegengesetzt wird. Sie ist bestimmt durch die Dichte  $\rho$  und die Schallgeschwindigkeit  $c$

$$Z_0 = \frac{\tilde{p}}{\tilde{v}} = \rho c. \quad (2.11)$$

Die Impedanz, also der Schallausbreitungswiderstand eines Materials kann wie der Absorptionsgrad mit Hilfe des Kundtschen Rohrs bestimmt werden (Abb. 3.6).

Die Schallschnelle in Festkörpern ist deutlich geringer als in Fluiden oder Gasen, somit ergibt sich mit der (Gl. 2.11), dass der Schallwellenwiderstand für feste Körper deutlich größer ist als in der Luft. Es ergibt sich für Stahl mit  $Z_0 \approx 4,6 * 10^7 \text{ Ns/m}^3$  gegenüber Luft mit  $Z_0 \approx 4,1 * 10^2 \text{ Ns/m}^3$ , ein Faktor von größer  $10^5$ . Dieser Faktor bestimmt das Reflexions- bzw. Transmissionsverhalten zweier Medien, wie in Abschnitt 3.4 näher beschrieben wird.

## 2.3 Verhältnisgrößen, relative und bewertete Pegel

### 2.3.1 Verhältnisgrößen

In der Akustik werden Verhältnisgrößen verwendet. Verhältnisse von linearen Größen (z.B. Schalldruck) bezeichnet man als *-faktoren* (z.B. Reflexionsfaktor), Verhältnisse von quadratischen Größen (z.B. Leistung) nennt man *-grade* (z.B. Wirkungsgrad).

### 2.3.2 Relative Pegel

Die bisher genannten Größen zur Beschreibung des Schallfeldes erstrecken sich jeweils über einen sehr breiten Bereich. Um diesen besser erfassen zu können und um einen besseren Zusammenhang zur menschlichen Wahrnehmung herzustellen, werden in der

Akustik Verhältnisse von Größen gleicher Einheit logarithmisch miteinander ausdrückt. Man spricht von *-pegel* bzw. *-maß* (z.B. Schalldruckpegel, Übertragungsmaß). Pegel werden meist mit Dezibel (dB) angegeben.

Pegelmaße sind in ihrer Definition zu unterscheiden, ob sie sich auf lineare Größen ( $p$  Schalldruck,  $v$  Schnelle) oder deren Produkte -also quadratische Größen- ( $I$  Schallintensität,  $P$  Schalleistung) beziehen.

So wird das Dezibel mit  $y_0, y_1$  für lineare Größen:

$$20 \log \left( \frac{y_1}{y_0} \right) \quad \text{bzw.} \quad 10 \log \left( \frac{y_1}{y_0} \right)^2 \quad (2.12)$$

und mit  $Y_0, Y_1$  für quadratische Größen

$$10 \log \left( \frac{Y_1}{Y_0} \right), \quad (2.13)$$

definiert.

In den Gl. (2.12) und (2.13) wird deutlich, dass für die Angabe eines Pegels Bezugsgrößen für  $y_0$  bzw.  $Y_0$  definiert werden müssen. Diese sind so gewählt, dass ein Pegelwert von 0 dB etwa der Hörschwelle bei 1 kHz entspricht.

### Schalldruckpegel $L_p$

Das wichtigste Beispiel für einen linearen Pegel ist der Schalldruckpegel bzw. Schallpegel. Hierfür ist die Bezugsgröße mit  $p_0 = 5 * 10^{-5} Pa$  gewählt und ist nach Gl. (2.12) definiert mit

$$L_p = 20 \log \left( \frac{p_1(t)}{p_0} \right) \quad \text{bzw.} \quad 10 \log \left( \frac{p_1(t)}{p_0} \right)^2. \quad (2.14)$$

### Schalleistungspegel $L_W$

Der Schalleistungspegel hat den Bezugswert  $P_0 = 10^{-12} W$  und ist nach Gl. (2.13) definiert mit

$$L_W = 10 \log \left( \frac{P_1(t)}{P_0} \right). \quad (2.15)$$

#### 2.3.3 Bewertete Pegel

Wie bereits erwähnt, ist der relative Pegel eine gute Annäherung für die menschliche Lautstärkenempfindung. Da das Gehör die Lautstärke aber auch in Abhängigkeit der Frequenz unterschiedlich wahrnimmt, wurden sogenannte *bewertete Pegel* eingeführt. Ein Beispiel hierfür ist der so genannte Lautstärkepegel  $LN$ , der in *phon* angegeben

**Tab. 2.2:** Wichtige Größen für die Beschreibung von Schall [8].

Größe	Einheit	Bereich	Zusammenhang
Frequenz $f$	$Hz$	16 – 20000	
Schallgeschw. $c$	$\frac{m}{s}$	200 – 2000	$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ ; bei Gasen: $c = \sqrt{\frac{\chi RT}{\mu}}$
Wellenlänge $\lambda$	$m$	0,02 – 200	$\lambda = \frac{c}{f}$
Schalldruck $p$	$\frac{N}{m^2}$	$10^{-4} - 10^2$	
Schallschnelle $v$	$\frac{m}{s}$	$5 * 10^{-8} - 1$	$L = 10 \log \left( \frac{\tilde{v}^2}{v_0^2} \right)$ ; $v_0 = 5 * 10^{-8} \left[ \frac{m}{s} \right]$
Intensität $I$	$\frac{W}{m^2}$	$10^{-11} - 10^3$	$I = \bar{p}\bar{v}$
Schallleistung $P$	$W$	$10^{-12} - 10^5$	$P = \int I dS$
Impedanz $Z''$	$\frac{kg}{s m^2}$		$Z'' = \frac{p}{v}$
Schalldruckpegel $L$	$dB$	0 – 140	$L = 10 \log \left( \frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right)$ ; $p_0 = 2 * 10^{-5} \left[ \frac{N}{m^2} \right]$

wird. Dieses Lautstärkemaß entstammt aus vielen experimentalpsychologischen Laborversuchen bei verschiedenen Frequenzen und Lautstärken und ermöglicht die Visualisierung der menschlichen Lautstärkenempfindung in Abhängigkeit von der Frequenz und vom Schalldruckpegel in einem Diagramm.

Eine sehr gängige Methode einen gemessenen Schalldruckpegel darzustellen, ist der A-bewertete Schalldruckpegel dBA oder dB(A) (s. Abb. 2.4). Durch eine Filterfunktion -in Anlehnung an dem Lautstärkenpegel- wird dem Schallsignal eine Frequenzgewichtung unterzogen. Somit kann die menschliche Lautheitsempfindung einer Schallquelle in Abhängigkeit von der Frequenz weitgehend dargestellt werden.

Tabelle 2.2 gibt noch einmal zusammenfassend einen Überblick über die wichtigsten Größen zur Beschreibung von Schall.

## 2.4 Akustische Messtechnik

### 2.4.1 Luftschallmessung

Die Luftschallmessung erfolgt mit Hilfe von Kondensatormikrophonen mit möglichst linearem Frequenzgang. Der Schalldruck wird in eine elektrische Größe umgewandelt, verstärkt, meist durch einen Filter frequenzabhängig bewertet und angezeigt.

Um eine aussagekräftige Luftschallmessung zu erhalten, müssen viele Randbedingungen, wie Messart, Messraum, Luftfeuchtigkeit oder Temperatur beachtet werden. Das notwendige Equipment, das notwendige Know-How des Akustikers und der zeitliche

Aufwand machen Messungen sehr teuer.

### **Messung des Schalldruckpegels im Hallraum**

Um die Leistung einer Schallquelle als Emissionsgröße zu messen, gibt es so genannte Hallräume. Durch schallharte und gut reflektierende Oberflächen die nicht parallel zueinander angeordnet sind, entsteht ein diffuses Schallfeld. Kurz nach Inbetriebnahme einer Schallquelle stellt sich im gesamten Hallraum ein konstanter Schalldruckpegel ein.

Somit kann die Schalleistung, wie in Abschnitt 2.3.2 erwähnt, bestimmt werden. Weiters kann in einem Hallraum auch der Absorptionsgrad eines Schallschluckstoffes durch den zeitlichen Abklingverlauf der Schalleistung nach dem Abschalten der Schallquelle bestimmt werden.

### **Schallquellenortung**

*Messung in reflexionsarmen Räumen*

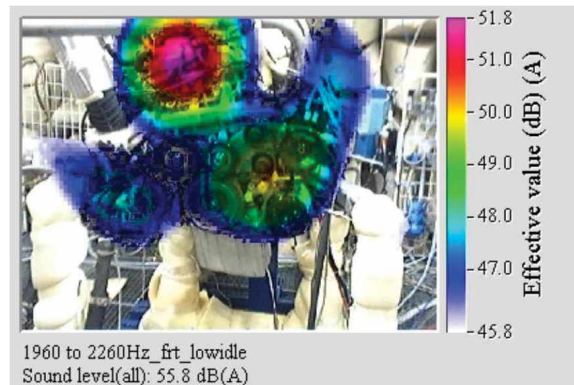
Für aussagekräftige Messungen des emittierten Luftschalls eines Objektes wird ein reflexionsarmer bzw. schalltoter Raum benötigt. Dieser ist mit schallabsorbierenden Materialien ausgekleidet, sodass überhalb der Grenzfrequenz nur der vom Messobjekt abgestrahlte Direktschall gemessen werden kann. Dadurch wird eine genaue Schallquellenortung der jeweiligen Schallquelle ermöglicht. Oftmals werden in schalltoten Räumen auch akustisch-physiologische Versuche durchgeführt.

*Akustische Kamera*

Die *akustische Kamera* ist ein Messsystem, das Geräusche und deren Quellen ähnlich wie ein Wärmebild grafisch darstellt. Durch die softwaretechnische Verknüpfung eines optischen (Digitalkamera) und akustischen Abbildes (eine große Anzahl speziell angeordneter Mikrophone) können neben den akustischen Parametern des Zeit- und Frequenzverlaufes auch örtliche Emissionen der Oberfläche einer Schallquelle dargestellt werden (s. Abb. 2.4).

#### **2.4.2 Körperschallmessung**

Die Akustik versucht mit Hilfe der Messung von verschiedenen Größen wie Schnelle oder Beschleunigungspegel die Körperschallsituation von Schwingungen in festen Körpern zu bestimmen. Mit Hilfe der Körperschallmessung können einerseits die Übertragungswege einer Konstruktion, als auch deren Abstrahlgrad (Sekundärluftschall) ermittelt werden. Im Gegensatz zur Luftschallmessung muss die Körperschallmessung nicht in speziellen akustischen Räumen durchgeführt werden, um genaue Messergebnisse zu erreichen.



**Abb. 2.4:** Beispiel eines A-bewerteten Schalldruckpegels von Motorbauteilen anhand der Messung einer akustischen Kamera. Die blauen Zonen stellen Bereiche mit geringer Schallabstrahlung dar [2].

### Beschleunigungsaufnehmer

In der Motoren- und Fahrzeugakustik wird die Körperschallmessung am häufigsten mittels Beschleunigungsaufnehmern durchgeführt. Diese sind meist piezoelektrische Schwingungssensoren mit einer Masse, die eine Kraft auf einen piezoelektrischen Kristall ausübt, sobald die Aufnehmer einer Schwingung ausgesetzt sind. Es ergibt sich, dass die elektrische Spannung am Ausgang eines Beschleunigungsaufnehmers direkt proportional der Oberflächenbeschleunigung ist. Die Befestigung erfolgt auf ebenen und glatten Flächen mittels Permanentmagneten oder durch eine Verschraubung. Um die Beeinflussung des Schwingungsverhaltens einer Struktur möglichst gering zu halten, sind die Sensoren mit einem Eigengewicht von 0,5 bis 2 g sehr leicht.

Diese Art der Messung bildet in der Fahrzeugakustik die Grundlage der Modal-, Transferpfad- und Schwingungsanalysen.

### Lasertechnik

Die Lasertechnik ermöglicht das berührungslose Messen von Schwingungen über eine große Oberfläche. So kann das Schwingungsmuster einer Struktur ohne Beeinflussung durch die Messung dargestellt werden. Nachteilig ist, dass die Messung immer im rechten Winkel erfolgen muss, und eine reflektierende Oberfläche voraussetzt. Auch ist die Messung in engen Raumverhältnissen nicht möglich.

### 3 Maßnahmen zur Schallbekämpfung

Sofern nicht anders angegeben, wurden die im folgenden Kapitel behandelten Maßnahmen zur Schallbekämpfung aus [8, 12, 13] entnommen.

#### 3.1 Allgemeines

Abbildung 3.1 gibt einen modellhaften Überblick über die Möglichkeiten der Schallreduzierung zwischen einer Schallquelle und einem Empfänger. Eine Lärmbekämpfung kann einerseits mittels Primärmaßnahmen, andererseits mit Hilfe von Sekundärmaßnahmen erreicht werden, die folgend beschrieben werden.

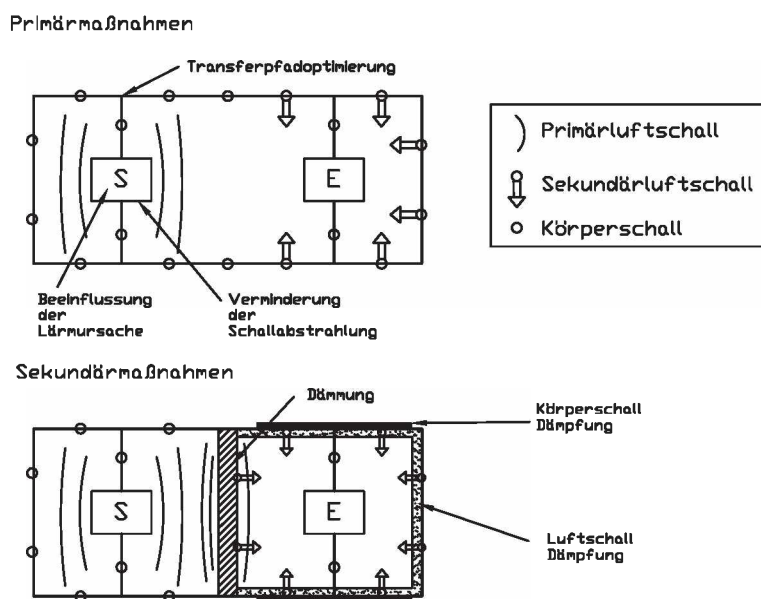


Abb. 3.1: Maßnahmen zur Schallbekämpfung.

##### 3.1.1 Primärmaßnahmen

So genannte *Primärmaßnahmen* bringen den größten Erfolg bei der Geräuschverminderung. Damit sind Maßnahmen zur Verringerung der Geräuschenstehung gemeint. Dies kann zum einen durch die Beeinflussung der Lärmursache, also eine konstruktive bzw.

technologische Verbesserung des akustischen Wirkungsgrades der Schallquelle (Verhältnis der Schalleistung zur Nutzleistung), erreicht werden. Dies hat zur Folge, dass einerseits weniger Primärluftschall abgestrahlt wird, andererseits wird die Schwingungseinleitung in die Struktur verringert, d.h. es führt zur Reduzierung des Körperschalls, und damit auch zur Verminderung der Luftschallabstrahlung der Gesamtkonstruktion des so genannten Sekundärluftschalls. Ein weiterer Schritt der Primärmaßnahmen ist die Verminderung der Schallabstrahlung der Schallquelle. Dies kann zum Beispiel die Optimierung der Schwingungsvorgänge der Oberfläche bzw. der Wandteile der Schallquelle, also die Reduktion des Primärluftschalls, sein. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Transferpfadoptimierung. Damit ist die Verbesserung von einerseits der Schwingungseinleitung über sogenannte Koppelpunkte in die Konstruktion, andererseits der Körperschallweiterleitung in der Gesamtkonstruktion gemeint. Dies hat die Minderung des Körperschalls und der Abstrahlung des Sekundärluftschalls zur Folge.

Zusammenfassend sind Primärmaßnahmen eine Methode der Lärmbekämpfung, die auf die Analyse der Konstruktions-, Werkstoff- und Betriebsparameter basiert und die versucht die Schallentstehung zu minimieren. Mittels CAE (Computer Aided Engineering) ist es möglich, die Primärmaßnahmen für eine Gesamtkonstruktion weitgehend zu optimieren, ohne einen Prototypen herstellen zu müssen [2].

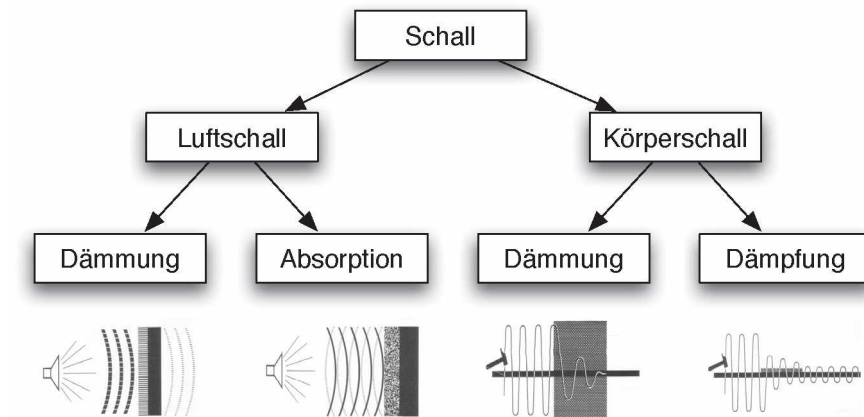
### 3.1.2 Sekundärmaßnahmen

Nachdem eine Konstruktion mittels Primärmaßnahmen akustisch optimiert wurde, kann die Schallsituation durch ein Lärmschutzpaket noch einmal verbessert werden. Man spricht von *Sekundärmaßnahmen*, die sich als drei akustische Grundfunktionen und deren Kombinationen beschreiben lassen (s. Abb. 3.1 und 3.2). Diese sind Schallabsorption, Schalldämmung und Schalldämpfung und werden ab Abschnitt 3.2 detailliert beschrieben.

Die Auslegung und Optimierung eines Lärmpaketes mittels CAE ist im Vergleich zu den Primärmaßnahmen noch sehr schlecht entwickelt. Oftmals wird ein angemessenes Lärmpaket nur durch mehrmalige manuelle Optimierungszyklen an Prototypen mit Hilfe aufwendiger Messungen verwirklicht [1, 3].

### 3.1.3 Tertiärmaßnahmen

Tertiärmaßnahmen sind zum Beispiel persönliche Gehörschutzmittel oder die Lärmreduzierung durch Entfernungszunahme.



**Abb. 3.2:** Überblick der Möglichkeiten akustische Energien umzuwandeln. Bilder aus [12].

## 3.2 Schallabsorption

Unter Schallabsorption wird die Umwandlung der Schallenergie in Wärmeenergie, die so genannte Schallschluckung, beim Auftreffen des Schalls auf Raumbegrenzungen verstanden. Dadurch können die Nachhallzeit und der Schallpegel in einem Raum beträchtlich abgesenkt werden.

Übliche Absorber sind poröse Materialien, wie fasrige oder vliesartige Stoffe, sehr oft werden offenzellige Schaumstoffe (s. Abb. 3.3) verwendet. Es ist anzumerken, dass die Absorption von niedrigen Frequenzen nur mehr mit voluminösen Strukturen und Materialien möglich ist.

Die Schallabsorption ist mit dem Schluck- bzw. Absorptionsgrad definiert als:

$$\alpha = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{auftreffende Energie}}, \quad (3.1)$$

und kann zwischen totaler Absorption ( $\alpha = 1$ ) und totaler Reflexion ( $\alpha = 0$ ) liegen.

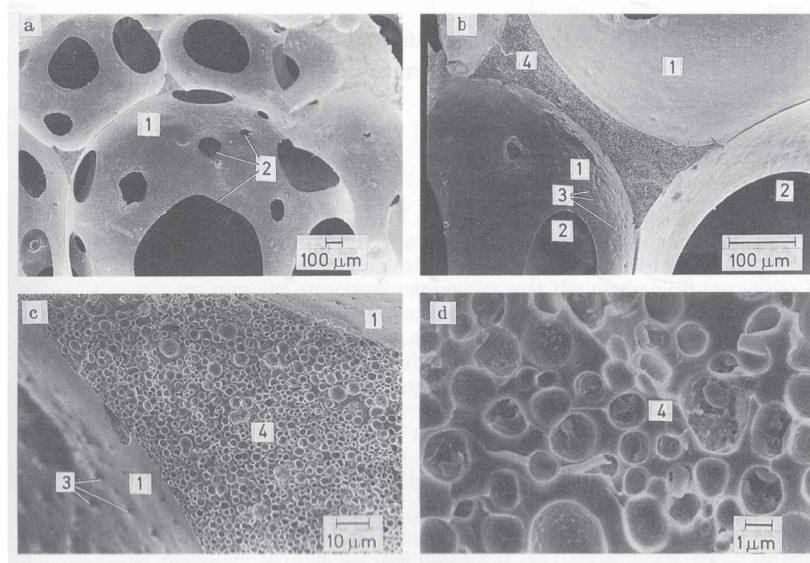
Der Absorptionsgrad eines Bauteils ist frequenzabhängig und ergibt sich erstens aus der Konstruktion, zweitens aus den Strömungseigenschaften der makroskopischen Struktur und drittens aus den mikroskopischen Materialeigenschaften bzw. dem Werkstoffaufbau. Bislang wird der letzte Punkt in der Akustik nicht besonders beachtet [3].

### 3.2.1 Wirkungsweise

Schallschluckanordnungen bestehen aus:

1. porösen Schallabsorbern (z.B. offenzelligen Schäumen oder Fasern)





**Abb. 3.3:** Offenzellige Zellstrukturen eines festen Phenolschaumes unter einem Rasterelektronenmikroskop. 1 Makrozellen, 2 Makrolöcher in der Wand der Makrozelle, 3 Mikrolöcher in der Wand der Makrozelle, 4 Mikrozele in einer Lamelle der Makrozelle [14].

2. Plattenabsorbern (bedämpfte, meist in Resonanz schwingende Platten oder Folien)
3. Resonanzabsorbern(z.B. Helmholtzresonator),

wobei deren Wirkungsweisen sehr unterschiedlich sind.

### **Wirkungsweise von porösen Absorbern**

Poröse Materialien absorbieren den Schall hauptsächlich im Bereich höherer Frequenzen. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass die Luft, angeregt durch den Wechseldruck der Schallwelle, in den engen Umlenkungen der Poren des Absorbers oszilliert. Die Verlustursache ergibt sich aus den viskosen Reibungskräften der bewegten Luft. Ein zweiter Effekt, der bei einer hohen Wärmeleitfähigkeit des porösen Materials auftritt, kommt durch die abwechselnde Kompression und Dilatation der Luft zustande. Bei einem intensiven Wärmeaustausch (tiefe Frequenz, große Fläche) tritt eine isotherme anstatt der sonst üblichen adiabatischen Kompression auf, sodass die Schallenergie in thermische Energie umgewandelt wird. Ein dritter Mechanismus, der bei Frequenzen unter 300 Hz auftritt, ist die innere Dämpfung des porösen Materials bei Skelettschwingungen, dieser wird jedoch meist vernachlässigt [13].

### Wirkungsweise von Plattenabsorbern

Plattenabsorber absorbieren in einem selektiven Frequenzbereich und setzen sich aus einem Feder-Masse-System zusammen, wobei die Masse eine Folie oder eine Platte und die Feder das Medium zwischen Wand und Masse darstellt. Für eine Konstruktion wie in Abb. 3.4 auf der rechten Seite gilt folgende Näherung:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1,4 * 10^5}{d m}}. \quad (3.2)$$

Meistens werden poröse Absorber und Plattenabsorber in Kombination verwendet. Der Plattenabsorber bildet somit einerseits eine Schutzschicht, andererseits erzeugt er ein Absorptionsband, dessen Maximum sich bei gleicher Materialdicke zu niedrigeren Frequenzen verschiebt. Diese Resonanzfrequenz liegt je nach Anwendung zwischen 70 und 300 Hz.

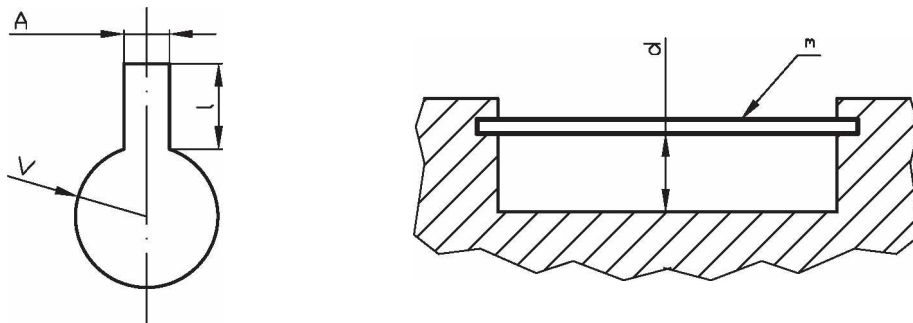


Abb. 3.4: Helmholzresonator (links). Plattenabsorber (rechts).

### Wirkungsweise von Helmholzabsorbern

Beim Helmholzresonator bildet eine Luftsäule in einem Loch mit der Fläche  $A$  und der Dicke  $l$  einer Platte bzw. Folie eine Masse. Ein dahinter liegendes Volumen  $V$  bildet eine Feder. Daraus ergibt sich ein Masse-Feder-Resonanzsystem, dass durch auftreffende Schallwellen zum Schwingen angeregt wird. Durch die inneren Verluste dieses Schwingers tritt eine selektive und schmalbandige Absorption mit der Resonanzfrequenz

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V l}} \quad (3.3)$$

auf.

Sehr gut lässt sich die Wirkung eines Helmholzresonators, wie in Abb. 3.4, an einer mit Flüssigkeit gefüllten Flasche demonstrieren. Der Flaschenhals bildet die Luftsäule mit der Länge  $l$  und das Volumen  $V$  wird durch den Flaschenbauch festgelegt. Wenn

man nun über die Flaschenöffnung bläst, entsteht ein lauter Ton in der Höhe der Resonanzfrequenz. Durch Hinzufügen der Flüssigkeit, wird das Volumen verkleinert und somit die Resonanzfrequenz erhöht.

### 3.2.2 Charakterisierung

Üblicherweise werden luftschalldämpfende Materialien mit dem Absorptionsgrad  $\alpha$  im senkrechten Fall charakterisiert. Da die Messung relativ einfach in einem Impedanzrohr (Abschnitt 3.2.3) zu verwirklichen ist, stellt diese Art der Charakterisierung die häufigste dar. Obwohl in der Praxis der Schalleinfall aus allen Richtungen zu erwarten ist, können so verschiedene Werkstoffe qualitativ miteinander verglichen werden, wie beispielsweise in Abb. 3.5 dargestellt.

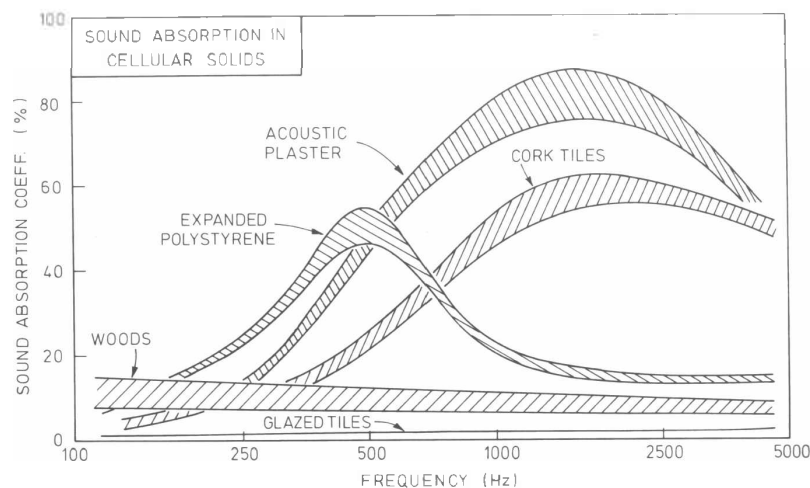


Abb. 3.5: Soundabsorptionskoeffizient verschiedener Materialien in Abhängigkeit der Frequenz [15].

Eine detailliertere Beschreibung über die Charakterisierung von Absorptionsmaterialien ist in der Literaturrecherche in Kapitel 6 zu finden.

### 3.2.3 Messung

#### Kundtsches Rohr

Die einfachste Prüfanordnung, um  $\alpha$  für den *senkrechten Schalleinfall* zu bestimmen, ist die Messung mit dem Kundtschen Rohr nach DIN 52 215 (s. Abb. 3.6).

Dabei werden die Materialproben in ein Rohr eingebracht und mit reinen Tönen beschallt. Dadurch bildet sich eine stehende Schallwelle im Rohr aus und die Betragsminima und Betragsmaxima der örtlichen Schalldruckverteilung werden entlang des

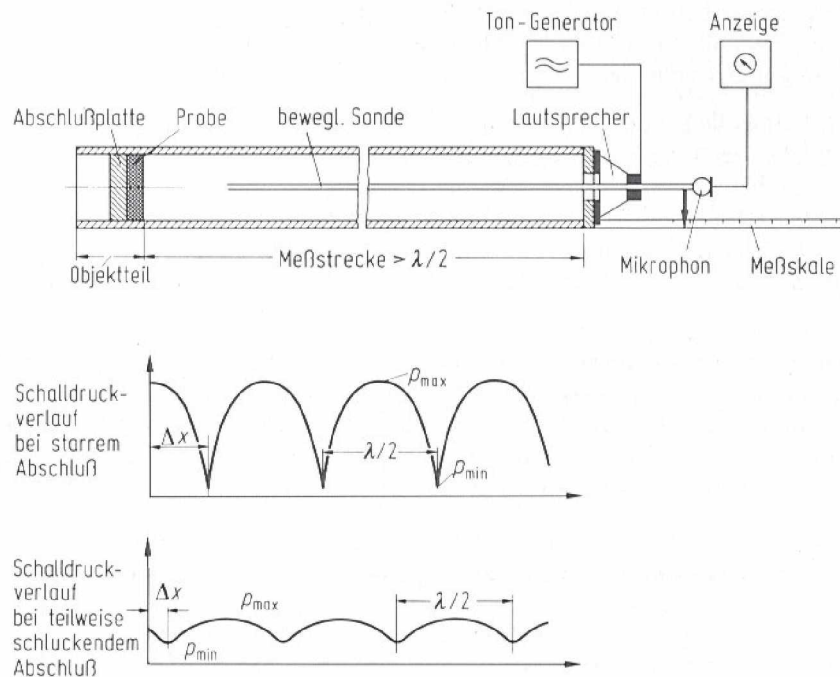


Abb. 3.6: Messung von Absorptionsgrad und Impedanz im Kundtschen Rohr [8].

Rohres mit einer Messsonde abgetastet. Aus dem Verhältnis zwischen den Druckminima und Druckmaxima sowie dem Abstand des ersten Druckminimums von der Probe lassen sich die Kenndaten für die Schallabsorption der Materialprobe bei senkrechtem Schalleinfall bestimmen [2].

### Hallraumverfahren

Mit der Schallschluckmessung in einem Hallraum (s. Abschnitt 2.4.1) kann man eine Aussage über den Frequenzgang und des Schluckgrades eines gesamten Bauteils treffen. In der Fahrzeugakustik werden auch oft Messungen in Alpha-Kabinen durchgeführt, dies sind kleine Hallräume. Größen wie die komplexe Ausbreitungskonstante  $\Gamma$ , die Schallfeldimpedanz  $Z_a$  und die Wandimpedanz  $Z_1$  werden zur Beschreibung von Schluckanordnungen herangezogen und bilden die Grundlage für akustische Modelle [8], um Aussagen über den Frequenzgang einer gesamten Anordnung zu treffen.

## 3.3 Schalldämpfung

Unter Dämpfung versteht man die Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme. Der Körperschall einer Konstruktion kann gedämpft werden, was eine Reduktion von Vibrationen und der Abstrahlung von Sekundärschall bewirkt.

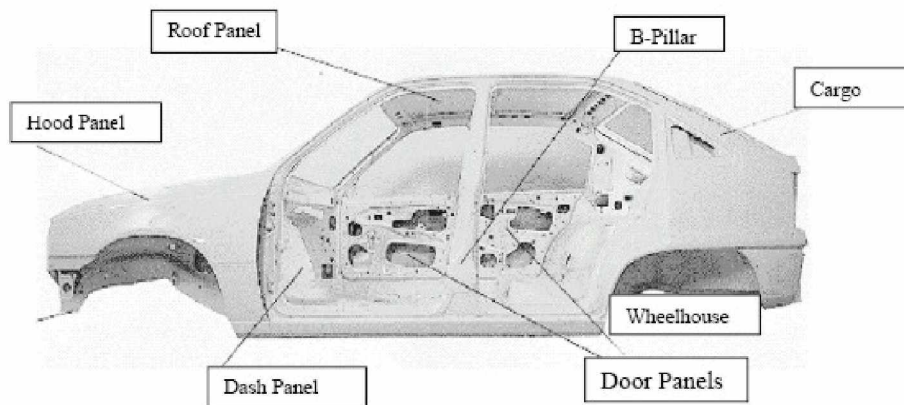


Abb. 3.7: Dämpfungsanwendungen im Automobilbereich [16].

Materialien mit dämpfenden Eigenschaften, vor allem Kunststoffe, sind in der Akustik sehr weit verbreitet. Obwohl sich etliche Anwendungsbereiche von Kunststoffen (s. Abb. 3.7) in der Automobilbranche finden, zeigt sich, dass in der einschlägigen Literatur sehr wenig Information aus materialspezifischer und Werkstoffkundlicher Sicht zur Verfügung steht [16].

Es ist zu beachten, dass vor allem bei Kunststoffen sehr unterschiedliche Dämpfungseigenschaften in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz auftreten.

### 3.3.1 Wirkungsweise

Materialien mit guter Dämpfung bzw. Dissipation, also mit der Fähigkeit mechanische Energie in niedrigere Energieformen umzuwandeln (Wärme), zeichnen sich durch ihre Viskoelastizität aus.

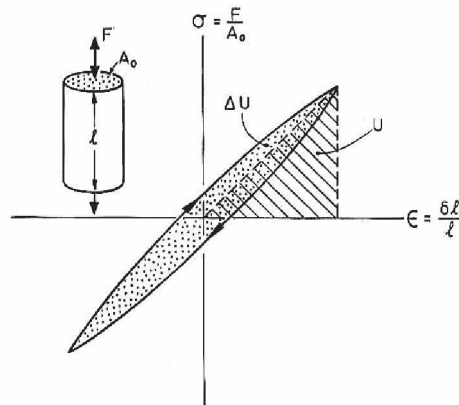
#### Viskoelastizität

In der einfachen Mechanik geht man üblicherweise bei einer dynamischen Belastung von linear elastischen Materialien aus, d.h. dass auf eine Belastung unmittelbar eine Verformung auftritt.

Nach Hooke gilt dann im linear elastischen Bereich eines Werkstoffs

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (3.4)$$

Viele Werkstoffe haben aber einen viskoelastischen Charakter. Wie der Name sagt, setzen sich die Eigenschaften zum einen aus einem elastischen Anteil (Feder) und einem viskosen Anteil (zähe Flüssigkeit) zusammen. Dies führt dazu, dass es bei der Belastung eines viskoelastischen Materials zu einer zeitlichen Verschiebung zwischen Spannung und Verformung kommt, im Spannungs-Dehnungs-Diagramm ergibt sich somit eine



**Abb. 3.8:** Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines viskoelastischen Materials zeigt eine Hysterese anstelle der Hooke'sche Gerade. Die Fläche der Hysterese ist die Energie, die in Wärme umgewandelt wird [6].

Hystereseschleife (Abb. 3.8). Die Fläche der Hysterese ist der Energieanteil, der in Form von Wärme im Werkstoff verloren geht, die Dissipationsenergie.

### 3.3.2 Charakterisierung

Die Dämpfung wird in der einschlägigen Literatur der Akustik, der Kunststofftechnik und der Mechanik in einer sehr uneinheitliche Nomenklatur angegeben. So findet man etliche mathematische Modelle und Prüfnormen, die die Dämpfung beschreiben. Einen kleinen Überblick zeigt Tabelle 3.1 auf. Die gängigsten Arten die Dämpfungseigenschaften eines Werkstoffes zu charakterisieren sind der komplexe Elastizitätsmodul, der Verlustwinkel und das logarithmische Dekrement, die folgend beschrieben werden.

**Tab. 3.1:** Umrechnung zwischen den gängigen Dämpfungsmaßen. ( $f_0$  = Eigenfrequenz) [17].

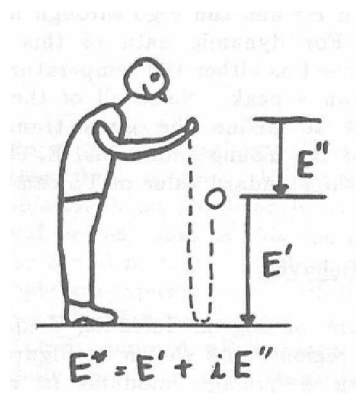
	$d$	$\Lambda$	$\Delta f$	$\psi = \phi$	$\tan \delta$
Dämpfungsfaktor $d$	–	$\frac{\Lambda}{\pi}$	$\frac{\Delta f}{f_0}$	$\psi$	$\tan \delta$
Logarithmisches Dekrement $\Lambda$	$\pi d$	–	$\pi \left( \frac{\Delta f}{f_0} \right)$	$\pi \psi$	$\pi \tan \delta$
Halbwertsbreite $\Delta f$	$d f_0$	$\left( \frac{\Lambda}{\pi} \right) f_0$	–	$\psi f_0$	$f_0 \tan \delta$
Spez. Dämpfungskapazität $\psi$	$d$	$\frac{\Lambda}{\pi}$	$\frac{\Delta f}{f_0}$	–	$\tan \delta$
Phasenverschiebung $\tan \delta$	$d$	$\frac{\Lambda}{\pi}$	$\frac{\Delta f}{f_0}$	$\psi$	–
Verlustfaktor $\eta$	$d$	$\frac{\Lambda}{\pi}$	$\frac{\Delta f}{f_0}$	$\psi$	$\tan \delta$

### Komplexer Elastizitätsmodul $E^*$

Um die Gl. (3.4) für den linear viskoelastischen Bereich eines Kunststoffes zu erweitern wird der komplexe Elastizitätsmodul  $E^*$  eingeführt.

$$E^* = E' + iE'' \quad (3.5)$$

Der reele Speichermodul  $E'$  charakterisiert die Federeigenschaft, der komplexe Verlustmodul  $E''$  die Dämpfungseigenschaft. Abb. 3.9 zeigt symbolisch die Zusammensetzung des komplexen E-Moduls.



**Abb. 3.9:** Schematische Illustration des Speichermoduls  $E'$  und Verlustmoduls  $E''$  [18].

### Verlustwinkel $\tan \delta$

Eine weitere Schreibweise die Dämpfung quantitativ zu beschreiben, ist der Verlustwinkel  $\tan \delta$ . Sowohl in der Kunststofftechnik, als auch in neueren Veröffentlichungen der Akustik ist diese Schreibweise am gängigsten.

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (3.6)$$

### Logarithmische Dekrement $\Lambda$

Ebenso läßt sich als Notation sehr oft das logarithmische Dekrement  $\Lambda$  finden.

$$\Lambda = \ln \left( \frac{A_n}{A_{n+1}} \right) \quad (3.7)$$

Diese Funktion ist definiert mit dem natürlichen Logarithmus des Amplitudenverhältnisses zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausschlägen ( $A_n, A_{n+1}$ ) bei einer frei gedämpften Schwingung.

### 3.3.3 Messung

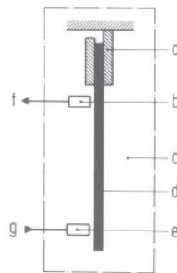
Zur Bestimmung der Dämpfungseigenschaften in der Werkstoffprüfung der Kunststoffe gibt es mehrere mechanisch-dynamischen Untersuchungen.

In [19] werden drei verschiedene Apparaturen zur Messung der Dämpfungseigenschaften für akustische Anwendungen verglichen. Torsionsionsschwingversuch, Biegeschwingversuch und ein spezieller DMTA-Apparat (dynamisch mechanische thermische Analyse) liefern gleiche Ergebnisse in überschneidenden Frequenzbereichen. In der Fahrzeugakustik spricht man von einer Dämpfungsbestimmung nach Oberst, die einer DMTA im Biegeschwingversuch nach DIN 53 440 entspricht.

#### DMTA im Biegeschwingversuch

Mit der in Abb. 3.10 schematisch dargestellten Methode können folgende, für die Bestimmung der Dämpfungseigenschaften notwendigen Werkstoffkennwerte in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz bestimmt werden.

- Komplexer E-Modul  $E^*(f, T)$
- Speichermodul  $E'(f, T)$
- Verlustmodul  $E''(f, T)$
- Verlustfaktor  $\tan \delta(f, T)$



**Abb. 3.10:** Biegeschwingversuch nach DIN 53 440. a: Halterung, b: Empfängersystem, c: Thermostat, d: Probekörper, e: Erregersystem, f: Verstärkeranschluß, g: Anschluss des Frequenzgenerators [20].

Die Durchführung dieser Messung erfolgt durch die Einspannung des oberen Endes eines Probekörpers (20 bis 30 cm langer Stab mit rechteckigem Querschnitt von 8 mm Breite und einer Dicke in Schwingungsrichtung von 2 bis 4 cm), wobei das untere Ende frei bleibt und durch einen elektromagnetischen Wandler zu erzwungenen



Biegeschwingungen erregt wird. Etwas unterhalb der Einspannstelle misst ein weiterer elektromagnetischer Wandler die Schwingungen. Daraus ergibt sich eine Resonanzkurve wie in Abb. 3.11, aus deren Breite und Resonanzfrequenz die oben aufgelisteten Werte errechnet werden können. Die Messung erstreckt sich üblicherweise über einen Frequenzbereich von 20 bis 10.000 Hz und je nach Kunststoff über einen Temperaturbereich von -80 bis über 200 °C.

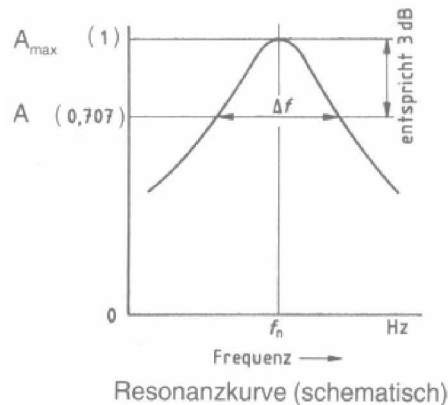


Abb. 3.11: Resonanzkurve nach DIN 53 440 [21].

## 3.4 Schalldämmung

Unter Schalldämmung versteht man die Behinderung der Schallausbreitung durch ein schallreflektierendes Hindernis. So führt eine Unstetigkeit des Ausbreitungsweges, wie z.B. eine Material- oder Bauartänderung, zur Reflexion der Schallenergie.

Die Wirkung einer Dämmung ist abhängig vom spezifischen Gewicht und der zu dämmenden Frequenz.

### 3.4.1 Wirkungsweise

Ein quantitatives Maß für die Reflexion ist der Reflexionsfaktor  $r$ , definiert als das Verhältnis des Schalldruckes  $p_r$  der reflektierten Schallwelle zum Schalldruck  $p_e$  der einfallenden Schallwelle. Der Reflexionsgrad ergibt sich durch die unterschiedlichen Schallkennimpedanzen  $Z_{01}$  und  $Z_{02}$  der Medien.

$$r = \frac{p_r}{p_e} = \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}} \quad (3.8)$$

### Körperschalldämmung

In Anbetracht der Tatsache, dass Festkörper sehr hohe Schallkennimpedanzen haben (vgl. Abschnitt 2.2.3), lässt sich aus Gl. 3.8 schließen, dass eine gute Körperschalldämmung durch weiche Materialien mit geringem spezifischen Gewicht (mit kleinem  $Z_0$ ) erreicht wird. Ein typisches Beispiel stellt die Motorlagerung durch ein Elastomer dar. Die Körperschalldämmung ist Teil der Primärmaßnahmen der Lärmbekämpfung und wird in dieser Arbeit nicht weiter beleuchtet. Es sei trotzdem angemerkt, dass die Isolierung des Körperschalls eine sehr wichtige Rolle in der Akustik und in der Fahrzeugakustik spielt.

### Luftschalldämmung

Im Gegensatz dazu wird eine hohe Luftschalldämmung durch harte und spezifisch schwere Materialien erzielt. Die Problematik einer guten Dämmwirkung ist somit der Gewichtsanstieg. Ein weitere Schwierigkeit bei der Auslegung eines Trennelements sind Öffnungen oder Bohrungen, die sich durch die konstruktiven Randbedingungen ergeben.

#### 3.4.2 Charakterisierung

Die Güte der Dämmwirkung eines Trennelements wird durch den Transmissionskoeffizienten

$$t = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.9)$$

definiert.  $P_1$  ist dabei die auf das Bauteil einfallende,  $P_2$  die von der Rückseite abstrahlende Schalleistung. Üblicherweise wird ein Schalldämm-Maß  $R$  bzw.  $TL$  (aus dem Englischen *transmission loss*) eingeführt.

$$R = TL = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right) = 10 \log \left( \frac{1}{t} \right) \text{ dB} \quad (3.10)$$

Das Schalldämm-Maß ist wie folgt von Frequenz und dem spezifischen Gewicht des Trennmaterials abhängig:

$$TL = 20 \log(f \rho) - 47,5 \text{ dB}, \quad (3.11)$$

woraus sich ergibt, dass sich das Schalldämm-Maß bei einer Verdoppelung entweder der Frequenz oder der Masse um 6 dB verringert.

#### 3.4.3 Messung

Die Messung der Schalldämmung, also das Bestimmen des Schalldämm-Maß  $R$  (siehe Gl. 3.10), kann sowohl im Labor, als auch direkt in der schon ausgeführten Version

des Materials gemessen werden. In zwei Räumen, die vom Dämmmaterial getrennt sind, werden die Schallpegel  $P_1$  und  $P_2$  gemessen, während in einem Raum ein Sender breitbandiges Rauschen aussendet. Damit können sowohl Nachhallzeiten bei gewissen Frequenzen, als auch das Schalldämm-Maß festgestellt werden.

Abbildung 3.12 zeigt links das Messprinzip der Schalldämmung, wobei zwischen Sender und Empfänger das zu vermessene Trennelement ist. Das rechte Foto zeigt einen sogenannten *Soundbrick*, der aus zwei mit Beton ausgekleideten Kammern besteht. Die kleiner Kammer simuliert den Motorraum und die größere die Kabine eines Automobils. Somit kann die Dämmwirkung einer Spritzwand gemessen werden.



Abb. 3.12: Prinzip zur Messung der Schalldämmung [22], rechtes Bild aus [23].

## 4 Fahrzeugakustik

Das folgende Kapitel wurde aus [1, 2, 24] zusammengestellt.

Die Fahrzeugakustik ist ein Gebiet, bei dem die Akustik einer ständigen Verbesserung unterliegt, da sie heutzutage immer mehr zu einer Kernkompetenz wird. Einerseits muss die Lärmbelastung auf die Umgebung stetig verringert werden, da rechtlichen Vorgaben strenger werden. Andererseits ist der akustische Eindruck des Innengeräusches längst wichtiger Teil des Produktportfolios. Ein Fahrzeug soll nicht nur einfach leise sein, sondern muss attraktiv klingen, um konkurrenzfähig zu sein.

Der große Marktdruck auf die OEMs (Original Equipment Manufacturer) führt dazu, dass Entwicklungszeiten und Kosten bei verbesserter Qualität reduziert werden müssen. Die Anzahl der Prototypen wird verringert. Langfristiges Ziel ist es, die gesamte Wertschöpfungskette von der ersten Skizze der Konzeptphase bis hin zur Endmontage der Serienproduktion mit dem sogenannten *virtuellen Fahrzeug* zu simulieren bzw. abzubilden.

Auf den Zulieferer von Sekundärmaßnahmen kommt die neue Aufgabe zu, die akustische Endaufwertung durch das Soundpaket in die Wertschöpfungskette zu integrieren. Zielsetzung sollte ein akustisch optimiertes, leichtes und billiges Sekundärpaket sein, das schon ab der Konzeptphase bei Designentscheidungen mitspielt.

### 4.1 Schallentstehung im Fahrzeug

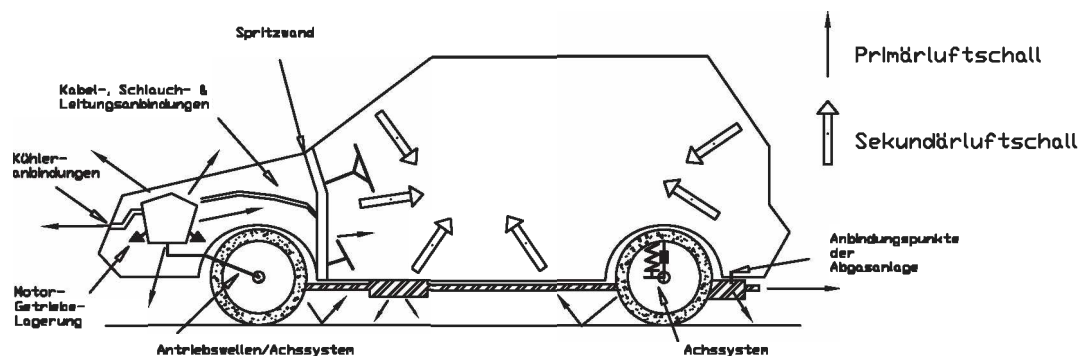


Abb. 4.1: Luftschall- und Körperschallanteile im Fahrzeug [2].

Das Innengeräusch eines Fahrzeuges lässt sich auf drei Hauptquellen zurückführen, den Antriebsstrang, das Fahrwerk und die Karosserie.

**Antriebsstrang** Der Antriebsstrang stellt mit Motor, Ansaug- und Abgasanlage, Getriebe und Antriebswelle eine große Quelle sowohl für die Primärluftabstrahlung, als auch für die Körperschallentwicklung dar. Der Körperschall wird über Lagerungen, Anbindungen und Aufhängungen in die gesamte Struktur weitergeleitet, der Luftschall dringt trotz Dämmvorrichtungen wie die Spritzwand in den Fahrgastraum.

**Fahrwerk** Das Fahrwerk leitet einerseits über das Achssystem Vibrationen in die Karosserie, andererseits trägt es durch das sogenannte Reifensingen zur Luftschallsituation bei.

**Karosserie** Die Karosserie wird von den anderen Komponenten angeregt und strahlt in großem Maße Sekundärluftschall ab, zusätzlich kommen noch Umströmungsgeräusche bei hohen Geschwindigkeiten dazu. Die Karosserie wirkt wie ein Lautsprecher und trägt sehr viel zum Qualitätseindruck bei.

## 4.2 Schallbekämpfung im Fahrzeug

### 4.2.1 Primärmaßnahmen

Mit den Primärmaßnahmen in der Fahrzeugakustik, wie beispielsweise die Optimierung von Motor-Getriebe-Verband, der Nebenaggregate, des Antriebsstranges und der Ansaug- und Abgasanlage, befasst sich diese Arbeit nicht. Diese können jedoch sehr detailliert in [2] nachgelesen werden. Es soll jedoch gesagt werden, dass diese akustische Entwicklungsarbeit hauptsächlich auf Simulationsmethoden basiert. Während diese Optimierung in der Vergangenheit zu einem sehr späten Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses zum Einsatz kam, können heutzutage mit Hilfe der Simulation Primärmaßnahmen im frühen Entwicklungsprozess optimiert werden.

### 4.2.2 Sekundärmaßnahmen

In Abb. 4.2 ist ein Beispiel für ein Sekundärmaßnahmen-Paket zu sehen. Dieses besteht aus Absorptions-, Dämpfungs- und Dämmungsmaterialien. Sehr oft treten diese Materialien als Verbund aus Absorptions- und Dämpfungseigenschaften bzw. Absorptions- und Dämmungseigenschaften auf.

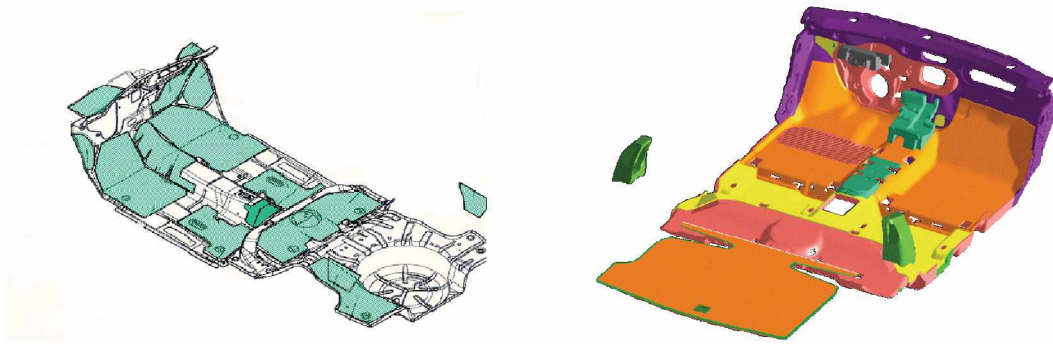


Abb. 4.2: Dämmungs- und Isolationspaket eines Mittelklassewagens [2].

### Problematik bei der Charakterisierung von Materialien von Sekundärmaßnahmen

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde versucht, eine Datenbank akustischer Materialien aufzubauen. Nach der Aquirierung der Daten wurde jedoch deutlich, dass eine genaue Charakterisierung nicht möglich ist, da Messwerte der Materialien inkonsistent und sogar teilweise offensichtlich falsch waren. Nach Rückfrage bei einigen Herstellern stellte sich heraus, dass derzeit die Charakterisierung von akustischen Materialien sehr schlecht ist. Allerdings gibt es durchaus einen Trend, der hin zum genauen Verständnis der Eigenschaften geht. Eine genaue Charakterisierung und die Speicherung der Daten in einer Datenbank bleibt den Herstellern wahrscheinlich nicht erspart.

### Anforderungen an ein Sekundärpaket

Folgende Anforderungen sind für ein Sekundärpaket gegeben:

- Innengeräuschabsenkung
- Mitwirkung bei der Realisierung des Zielsounds
- Erfüllung der Ausstattungsanforderungen (z.B. Abriebfestigkeit)
- niedriges Gewicht
- wenig Platzverbrauch
- gutes Preis-Leistungsverhältnis
- einfache Montierbarkeit
- Erfüllung physikalischer Eigenschaften wie Schwerentflammbarkeit, Recyclingfähigkeit, usw.

Problematisch am Auslegen der Sekundärmaßnahmen in der Fahrzeugakustik ist, dass die Optimierung nur in geringem Maße über eine Simulation erfolgt. Derzeit ist es noch nicht möglich, ohne Prototypen ein gutes Lärmpaket auszulegen [1]. Langfristiges Ziel ist es, neben der Simulation der Primärmaßnahmen auch Berechnungs-Module für die Auslegung von Sekundärmaßnahmen zu entwickeln. So soll die gesamte Wertschöpfungskette von der Schallentstehung, über die Transferpfade bis hin zur Schallsituation in der Fahrgastkabine und schließlich den Schallbekämpfungsmaterialien virtuell abgebildet werden (s. Abb. 4.3).

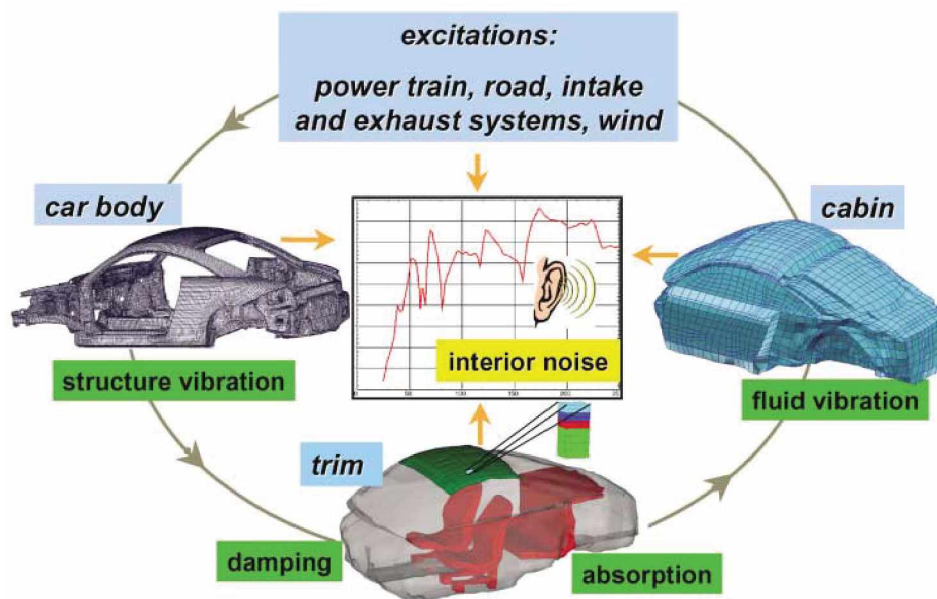


Abb. 4.3: Virtuelle Wertschöpfungskette von der Lärmentstehung über die gesamte Schallsituation im Fahrzeug bis hin zu den akustischen Materialien [25].

**Teil II:**  
**Stand der Technik**



## 5 Fallstudien

Die im folgenden Kapitel ausgesuchten Fallstudien sollen die Notwendigkeit einer verbesserten akustischen Charakterisierung von porösen Materialien aufzeigen. Abbildung 5.1 gibt einen Überblick über Industrien, die an einer besseren Charakterisierung interessiert sind.

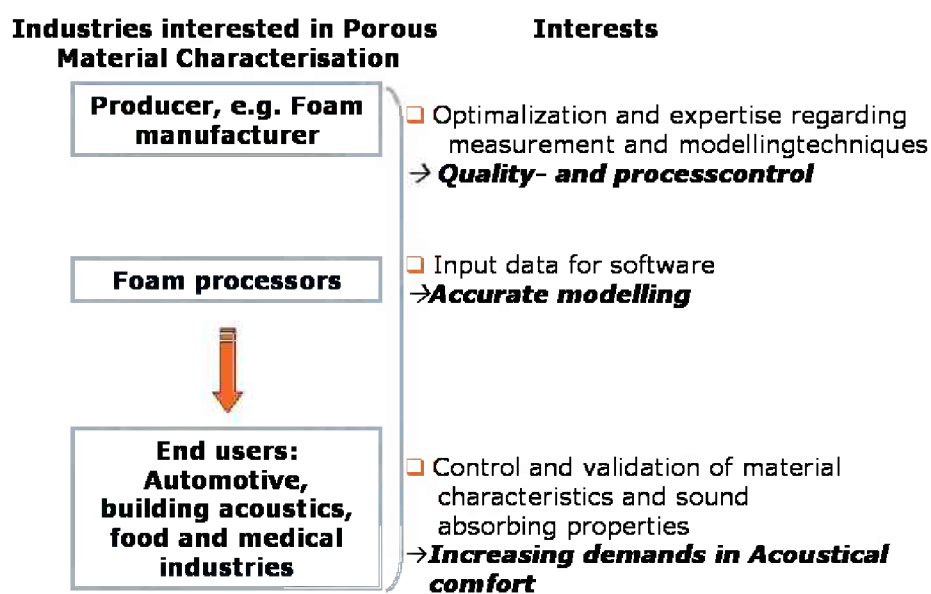
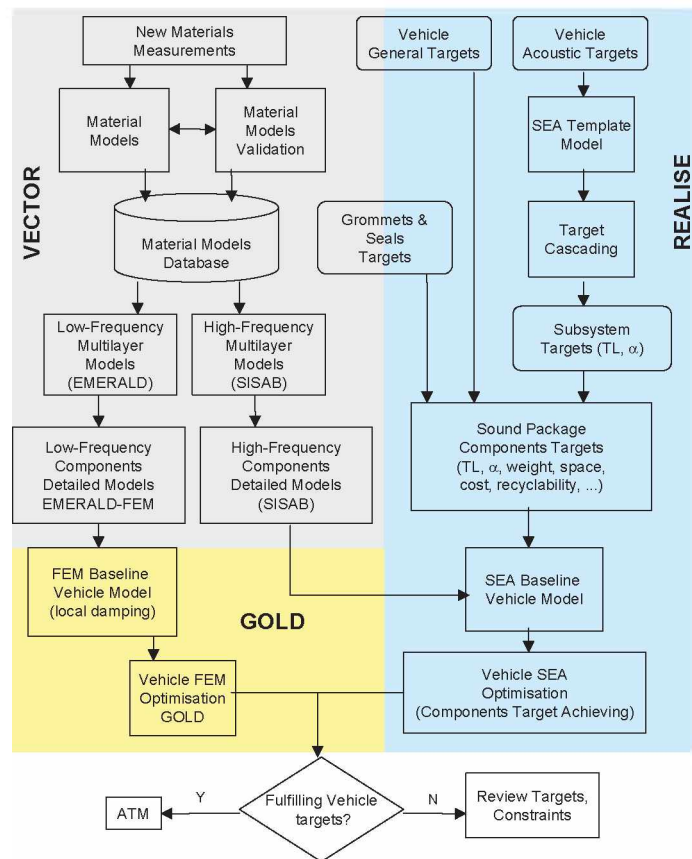


Abb. 5.1: Industrien, die an einer exakten Charakterisierung von porösen Materialien interessiert sind [26].

### 5.1 Materialverständnis als Basis für die Simulation

In der Veröffentlichung *Use of Complementary Simulation Tools for Optimal Design of Vehicle Sound Packages* [3] der Firma Rieter werden einige Simulationstools zur Auslegung von Sekundärmaßnahmen in der Fahrzeugakustik vorgestellt. Es wird aufgezeigt, dass die bisher vorhandenen, aber noch nicht perfekten numerischen und analytischen Methoden zu einer Simulationskette miteinander verbunden werden müssen, um den Vorgaben für ein gutes Sekundärpaket möglichst gerecht zu werden. Die Materialien mit den in Abschnitt 4.2.2 erwähnten Anforderungen sollen früh in der Entwicklungszeit ausgelegt sein und die Anzahl der Prototypen sollte verringert werden.



**Abb. 5.2:** Konzept zur Auslegung eines Sekundärpaketes mittels Simulation. Links, oben: Die Simulationskette basiert auf die Charakterisierung, Modellbildung und Speicherung der Daten akustischer Materialien [3].

Deutlich wird, dass der Ausgangspunkt für eine Nutzung vieler verschiedener Simulationswerkzeuge ein gutes Materialverständnis ist. So basiert die Simulationskette auf eine Charakterisierung von makroskopischen Eigenschaften und der Erstellung von Materialmodellen. Ein wichtiges Werkzeug hierbei ist die Erstellung einer Materialdatenbank.

Im Bereich der Absorptionswerkstoffe wird erwähnt, dass zwischen den direkt messbaren physikalischen makroskopischen Eigenschaften und der mikroskopischen Struktur ein direkter Zusammenhang besteht. Über diesen gibt es jedoch heutzutage noch nicht viele Informationen.

Folgende Punkte fassen die für diese Arbeit wichtigen Kernaussagen zusammen:

- Ziel ist die Auslegung von Sekundärmaßnahmen mittels Simulation bei immer weniger Prototypen.
- Ein gutes Materialverständnis ist Grundlage für die Optimierung eines Sekundär-

pakets mittels Simulation.

- Über den Zusammenhang zwischen makroskopischen Eigenschaften und der mikroskopischen Struktur poröser Materialien gibt es sehr wenig Information.

## 5.2 Verständnis und Beherrschung von Materialparameter zur Werkstoffentwicklung

Die Veröffentlichung *The Effect of Processing Parameters on the Acoustical Efficiency of Open-Cell PMMA Materials* [4] befasst sich mit der Untersuchung der Morphologie und der Schallabsorption von offenzelligen, festen PMMA-Schäumen unter verschiedenen Prozessparametern.

Durch Veränderung von Prozessparametern wie Schäumtemperatur, Größe und Prozentanteil des Schäumungsmittels werden Zusammenhänge zwischen der Zellenmorphologie, den makroskopischen Eigenschaften und der akustischen Effizienz des Materials untersucht.

Folgende Punkte fassen die für diese Arbeit wichtigen Kernaussagen zusammen:

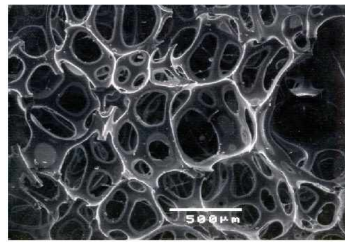
- Eine viel versprechende Möglichkeit ein poröses Material akustisch zu verbessern, ist die Optimierung der makroskopischen Eigenschaften durch die Beherrschung der inneren Mikrostrukturparameter.
- Es besteht ein Interesse die innere Mikrostruktur eines Materials, also die Zellenmorphologie (Zellengröße, Anzahl der Zellen, Zellenverteilung, etc.) zu verstehen und mit den makroskopischen Eigenschaften wie Porosität, Fließwiderstand, etc. zu verbinden, damit die numerische Modellierung der Schallausbreitung verbessert werden kann.
- Verstehen und Kontrollieren der inneren Struktur sind entscheidend für die Entwicklung von porösen Materialien mit optimierten akustischen Eigenschaften.

## 5.3 Bewertung von Schlüsseffekten für das Verständnis akustischer Aktivität

Die Publikation *Acoustic Absorbers: A third way for the management of sound in automobiles* [5] zeigt neben Trends im Automobilmarkt auch die Notwendigkeit des Verständnisses und der Bewertung von akustischen Zusammenhängen für die Entwicklung neuer Technologien auf.

Am Beispiel einer neuen Technologie mit dem Namen Acoustiflex<sup>TM</sup> wird ein akustisches Material vorgestellt, das bei hoher Schallabsorption eine deutlich niedrigere

Dichte aufweist (s. Abb. 5.3). Die Entwicklung dieser Technologie basiert auf der Ermittlung und Bewertung von Schlüsseffekten auf die akustischen Eigenschaften.



**Conventional Flexible Foam @ Density 40 kg/m<sup>3</sup>**



**Fibre Technology @ Density 35 kg/m<sup>3</sup>**



**ACOUSTIFLEX® S @ Density 15 kg/m<sup>3</sup>**

**Abb. 5.3:** Vergleich der morphologischen Struktur verschiedener akustischer Materialien [5].

Folgende Punkte fassen die für diese Arbeit wichtigen Kernaussagen zusammen:

- Die Anforderung einer guten akustischen Performance bei immer niedrigerem Gewicht und niedrigeren Kosten führt zu einem großen Wettbewerb zwischen den Zulieferfirmen der Autoindustrie (OEMs).
- Um den schwierigen Aufgaben des Automobilmarktes gerecht zu werden, ist es notwendig, die Beziehung zwischen Chemie, Struktur und Morphologie und den physikalischen Eigenschaften einer Technologie zu verstehen.
- Bei der Entwicklung einer Technologie zur Verbesserung akustischer Ziele ist es wichtig, einerseits die Schlüsseffekte der akustischen Aktivität zu verstehen, und andererseits zu wissen, wie man solche Effekte messen und charakterisieren kann.

## 6 Charakterisierung von zellulären porösen Absorbentien

### 6.1 Allgemeines

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die derzeitigen Möglichkeiten der Charakterisierung von zellulären porösen Absorbentien geben. Bei der Literaturrecherche stellte sich heraus, dass sich eine genaue Charakterisierung durch die Anisotropie der Werkstoffe als sehr schwierig gestaltet. Es ist zwar möglich, allgemeine Aussagen über die Gesamtheit eines porösen Werkstückes zu treffen, jedoch ist die systematische Bewertung einzelner Einflüsse auf gewünschte Eigenschaften sehr diffizil.

Nach [15] stellen folgende Eigenschaften die grundlegende Information zu einer Analyse eines zellulären Materials dar:

- die Eigenschaften des Materials selbst (z.B.: E-Modul, Streckspannung, Glasübergangstemperatur, Wärmeleitfähigkeit, etc.),
- die relative Dichte bzw. die Porosität,
- offene oder geschlossene Zellen (auch Permeabilität),
- der durchschnittliche Zellendurchmesser.

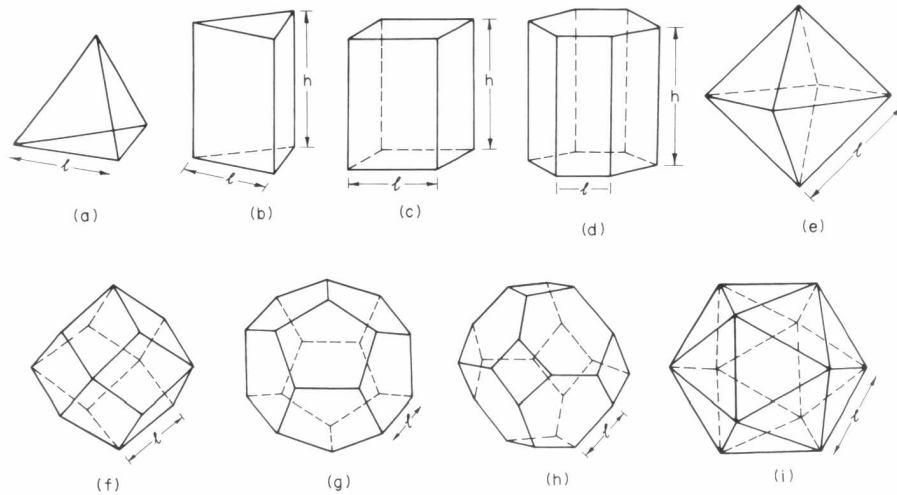
### 6.2 Geometrische Charakterisierung

Weitere Charakterisierungsmöglichkeiten bilden zum Beispiel die durchschnittliche Anzahl der Kanten pro Knoten, die durchschnittliche Anzahl der Kanten pro Zelle (mögliche Geometrien s. Abschnitt 6.2.1), die Symmetrie der Struktur, die durchschnittlich größten und kleinsten Zellenabmessungen, der Form Anisotropie-Faktor und die Verteilung der Zellen [15].

#### 6.2.1 Einheitsgeometrien

Die meisten zellulären Materialien haben keinen komplett regelmäßigen Aufbau und beinhalten Zellen mit unterschiedlichen Größen und Formen mit unterschiedlichen Flächen und Kanten. Aber sogar die zufälligsten Schäume gehorchen topologischen Regeln, sodass man mit Idealisierungen brauchbare Beschreibungen aufstellen kann [15].

Abbildung 6.1 zeigt mögliche dreidimensionale Einheitszellen in porösen zellulären Materialien, mit denen die meisten Formen beschrieben werden können, die in Schäumen auftreten.



**Abb. 6.1:** Mögliche dreidimensionale Einheitszellen in porösen zellulären Materialien. Tetraeder (a), dreiseitiges Prisma (b), Würfel (c), mehrseitiges Prisma (d), Oktaeder (e), Rhombischer Dodektaeder (f), pentagonaler Dodektaeder (g), Tetrakaidektaeder (h), Ikosaeder (i) [15].

### 6.2.2 Messung bzw. Analyse

Üblicherweise werden die Informationen zu geometrischen Charakterisierung mittels optischen Mikroskopen oder Rasterelektronenmikroskopen (REM, oder engl. *scanning-electron micrographs*: SEM) gewonnen. In [27] wird beschrieben, wie mit Hilfe von digitaler Bildverarbeitung aus Mikrophotographien von Schnitten poröser Materialien eine automatische Charakterisierung erfolgen kann.

Eine neuartige Möglichkeit der geometrischen Charakterisierung von Schäumen stellt die *synchrotron radiation x-ray microtomography* dar. Damit können 3-dimensionale Bilder von Schäumen gemacht werden, aus denen wiederum mittels Bildverarbeitung strukturelle Parameter zur Beschreibung der inneren Struktur abgeleitet werden. Dies soll nach [28] beispielsweise bei der Optimierung von akustischen Materialien hilfreich sein.

## 6.3 Mechanische Charakterisierung

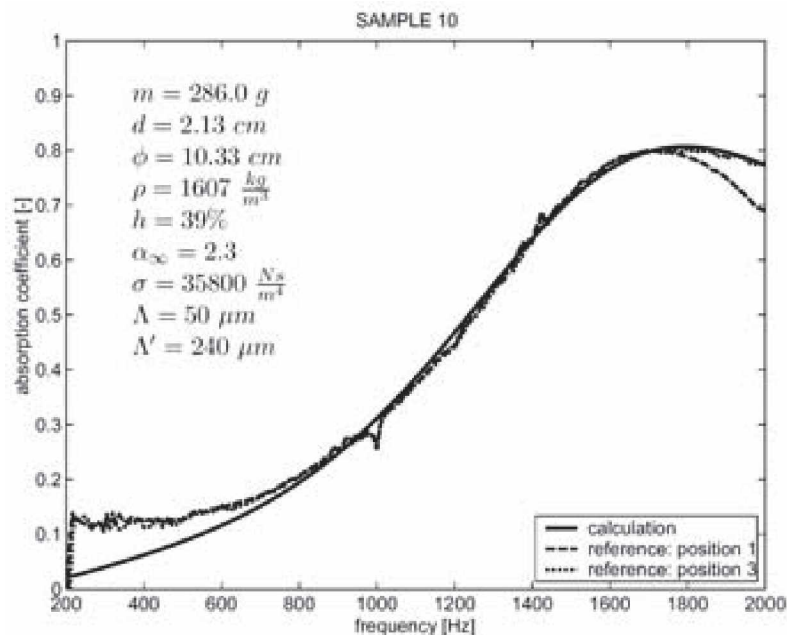
Die mechanische Charakterisierung von zellulären Materialien wird in diese Arbeit nicht weiter beschrieben, jedoch gibt [29] einen Überblick über die Möglichkeiten der

mechanischen Charakterisierung, beispielsweise die Messwerte aus der Zug- und Druckprüfung oder der DMTA Messung (s. Abschnitt 3.3.3).

## 6.4 Materialmodelle

### 6.4.1 Grundsätzliche Aspekte

Grundlage zur Vorhersage von akustischen Eigenschaften und zur Simulation von akustischer Materialien bilden Materialmodelle. Im Falle von porösen Materialien setzen sich diese aus Absorberparametern zusammen, die den makroskopischen Eigenschaften entsprechen. Mit der Messung von akustischen Eigenschaften, wie beispielsweise dem Absorptionsgrad  $\alpha$  (s. Abschnitt 3.2.3), können Materialmodelle validiert werden (s. Abb. 6.2).



**Abb. 6.2:** Vergleich des gemessenen und des mittels eines Materialmodells vorhergesagten Schallabsorptionskoeffizienten eines porösen Zementmörtels. Im Diagramm sind links oben die Absorberparameter dargestellt [30].

Es sei hier erwähnt, dass es eine große Anzahl von Publikationen über eine Vielzahl von Materialmodellen gibt. Bei der Recherche für diese Arbeit wurde deutlich, dass sich sowohl einige Institute, als auch einige Firmen aus der Industrie mit dieser Thematik beschäftigen.

So gibt es je nach Anwendungen (z.B. Simulation, Materialentwicklung) und verwendeten Materialien (z.B. Faserstoffe, poröse Kunststoffe mit steifen oder elastischen

Zellen, Metallschäume, Asphaltmischungen, etc...) viele Modelle, die sich in ihrem Ansatz und den Randbedingungen unterscheiden. Einen leicht verständlichen Überblick über Materialmodelle findet sich in [31] und [4]. Materialmodelle für die Simulation in der Fahrzeugakustik sind in [3] beschrieben.

#### 6.4.2 Makroskopische Eigenschaften als Absorberparameter

Materialmodelle unterscheiden sich u.a. in Art und Anzahl der Absorberparameter. Die Bestimmung der Parameter kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen. Beispielsweise wird der Strömungswiderstand direkt gemessen. Andere makroskopische Eigenschaften können jedoch nur indirekt gemessen bzw. abgeschätzt werden [30].

Die folgenden makroskopischen Eigenschaften stellen wichtige Parameter dar:

##### Porosität

Die Porosität  $h$  ist das Verhältnis des Porenvolumens  $V_P$  zum gesamten Volumen  $V_G$

$$h = \frac{V_P}{V_G}. \quad (6.1)$$

Da die meisten porösen Materialien jedoch neben den miteinander verbundenen Zellen auch abgeschlossene Zellen aufweisen, unterscheidet man zwischen absoluter und effektiver Porosität. Erstere beinhaltet das gesamte Porenvolumen, zweitere zieht nur die akustisch aktiven, also die miteinander verbundenen Poren in Betracht.

##### Strömungswiderstand

Der Strömungswiderstand  $\sigma$  oder  $\Xi$  ist definiert mit

$$\sigma = \frac{\Delta p A}{Q d}, \quad (6.2)$$

mit  $\Delta p$  als Druckdifferenz, die über eine mit bekanntem Luftfluss  $Q$  durchblasenen Probe, mit den Abmessungen  $A$  als Fläche und  $d$  als Dicke, auftritt.

Der Strömungswiderstand hängt einerseits von der Zellengeometrie und andererseits von dem in den Zellen befindlichen Fluids, also in der Akustik die Luft, ab.

Die Permeabilität  $k$  (Durchlässigkeit) stellt eine von dem Fluid unabhängige Eigenschaft dar:

$$k = \frac{\eta}{\sigma}, \quad (6.3)$$

mit  $\eta$  als dynamische Viskosität des Porenfluids und  $\sigma$  als Strömungswiderstand.



**Tortuosität**

Die Tortuosität  $\alpha$  oder  $\tau$  beschreibt den Einfluss der inneren Struktur auf das akustische Verhalten eines Materials. Es wird in Betracht gezogen, dass Poren Kanäle bilden, die gewunden sind und einen veränderlichen Querschnitt haben. Für die Tortuosität oder auch Gewundenheit gibt es keine einheitliche Definition, da sie für unterschiedliche Materialmodelle unterschiedlich bestimmt wird. Die einfachste Definition ist jedoch das Quadrat des Verhältnisses der tatsächlichen Weglänge  $l_1$  zwischen der kürzesten Weglänge  $l_{min}$

$$\alpha = \left( \frac{l_1}{l_{min}} \right)^2. \quad (6.4)$$

Je größer der Wert der Tortuosität ist, desto komplexer ist der Weg der akustischen Welle und desto besser ist die Schallabsorption eines Materials.

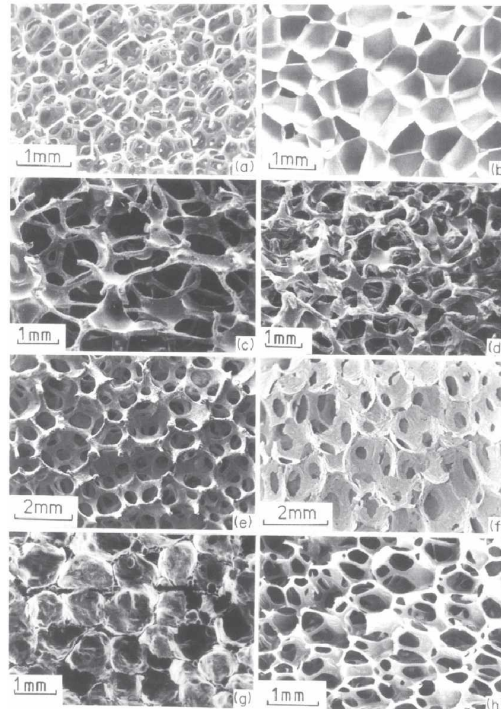
**Charakteristische Längen**

Es gibt zwei charakteristische Längen  $\Lambda$  und  $\Lambda'$ , wobei sich erstere auf den viskosen Anteil, zweitere auf den thermischen Anteil der Absorptionswirkung beziehen.  $\Lambda$  kann als durchschnittlicher Radius von den kleinsten Poren,  $\Lambda'$  als durchschnittlicher Radius der größten Poren gesehen werden. Erklärt wird dies dadurch, dass die kleinen Poren für die höchste Luftbewegung und die großen Zellen für den Wärmeübergang verantwortlich sind.

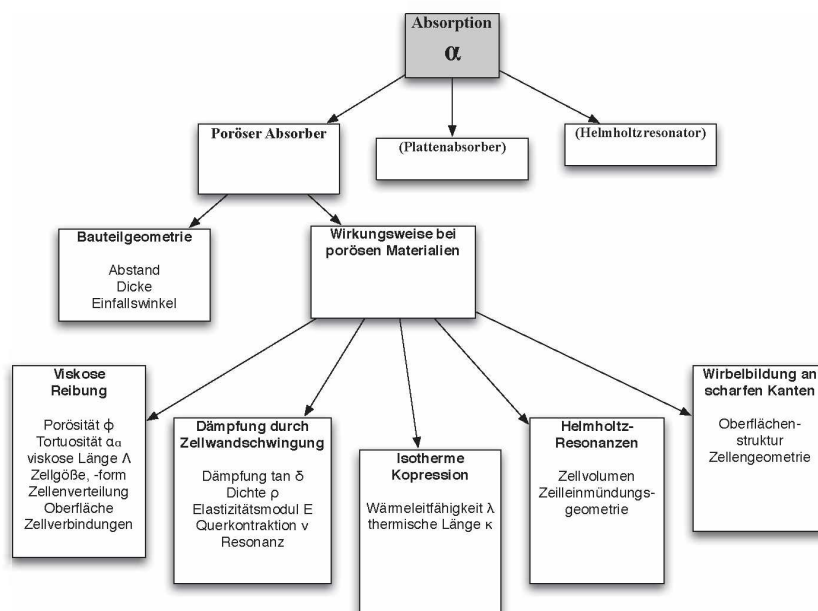
**6.5 Einflüsse auf akustische Eigenschaften poröser Absorber**

In Abschnitt 3.2.1 werden die Wirkungsweisen von porösen Absorbern, Plattenabsorbern und Resonanzabsorbern allgemein beschrieben. Dieser Abschnitt widmet sich einer Literaturanalyse von den Einflüssen auf die akustischen Eigenschaften poröser Absorber. Deutlich wurde bei der Literaturanalyse, dass eine genaue Bewertung der Einflüsse auf das akustische Endergebnis nicht möglich ist. Einerseits spielen sehr viele Faktoren mit, andererseits ist die Bewertung durch die Inhomogenität der Materialien, wie anhand von Beispielen in Abb. 6.3 dargestellt ist, sehr komplex. Auch eine systematische Bewertung durch gezielte Veränderung von Herstellparametern ist schwierig, da dadurch immer mehrere Einflüsse verändert werden.

Abb. 6.4 gibt einen Überblick über die Einflüsse auf die Absorption. Grundlagen für die Zusammenstellung bilden [4, 13, 32, 33, 34, 35].



**Abb. 6.3:** Beispiele für Materialien mit 3-dimensionale Zellstrukturen. (a) offenzelliges Polyurethan, (b) Polyurethan mit geschlossenen Zellen, (c) Nickel, (d) Kupfer, (e) Zirkon, (f) Mullit, (g) Glas, (h) Polyetherschaum mit offenen und geschlossenen Zellen [15].



**Abb. 6.4:** Schematische Darstellung der verschiedenen Einflüsse auf die Absorption.

## **Teil III:**

# **Charakterisierung und Optimierung poröser Materialien für Akustikanwendungen**

## **7 Neuer methodischer Ansatz zur Optimierung von porösen Materialien für Akustikanwendungen**

In den vorangegangenen Kapiteln wurde aufgezeigt, dass die Charakterisierung Basis für die Entwicklung für die Erstellung neuer Materialmodelle für die Simulation und die Neuentwicklung von schallabsorbierenden Materialien darstellt. Es wurde gezeigt, dass bisherige Methoden zur Charakterisierung auf empirische Messmethoden der bestehenden Materialien aufbauen. Durch die Anisotropie der Materialien ist eine systematische Vorgehensweise bei der Bewertung der Einflüsse auf die akustische Eigenschaften nicht möglich.

Grundlegende Idee für einen neuen methodischen Ansatz zur Optimierung von porösen Materialien für Akustikanwendungen ist, die vorgestellten Methoden mit einem generativen Herstellungsverfahren, dem Rapid Prototyping Verfahren, zu kombinieren. Dieses Verfahren ermöglicht eine gezielte und reproduzierbare Herstellung von akustischen Strukturen gepaart mit der Möglichkeit Materialeigenschaften gezielt zu verändern. Dadurch soll die methodische Bewertung von Einflussfaktoren auf akustische Eigenschaften ermöglicht werden.

Nachdem eine Literaturrecherche und eine Patentrecherche ergaben, dass die Idee einerseits technisch durchführbar ist (s. Kapitel 7.1), andererseits einen neuen Stand der Technik darstellt, wurde die Idee im Rahmen der Diplomarbeit zum Patent angemeldet (s. Kapitel 7.2).

Das Prinzip des Verfahrens zur methodischen Optimierung von porösen Materialien wird in Kapitel 7.3 vorgestellt.

### **7.1 Rapid Prototyping**

Rapid Prototyping bezeichnet im Sinne der Produktionstechnik eine schnelle Herstellung von Prototypen im schichtweisen Aufbau. Die Bandbreite der Anwendungen von Rapid-Technologien umfasst jedoch heutzutage viel mehr als nur Muster- bzw. Prototypenbauteile, hier sind beispielsweise Knochenersatzstoffe, Hörgeräte, Mikroreaktoren, sehr kleine Wärmeaustauscher oder Pumpen zu nennen [36].

Das Grundprinzip besteht in einem schichtweisen Aufbau von Bauteilen, wobei die einzelnen Schichten des Ausgangsmaterials durch Einbringung von Energie verfestigt werden. Die einzelnen Schichten sind dabei miteinander verbunden. Als Ausgangsma-

terial kann je nach Verfahren ein Pulver, ein Fluid oder festes Material herangezogen werden. Die Energieeinbringung erfolgt meist mit Hilfe eines Lasers.

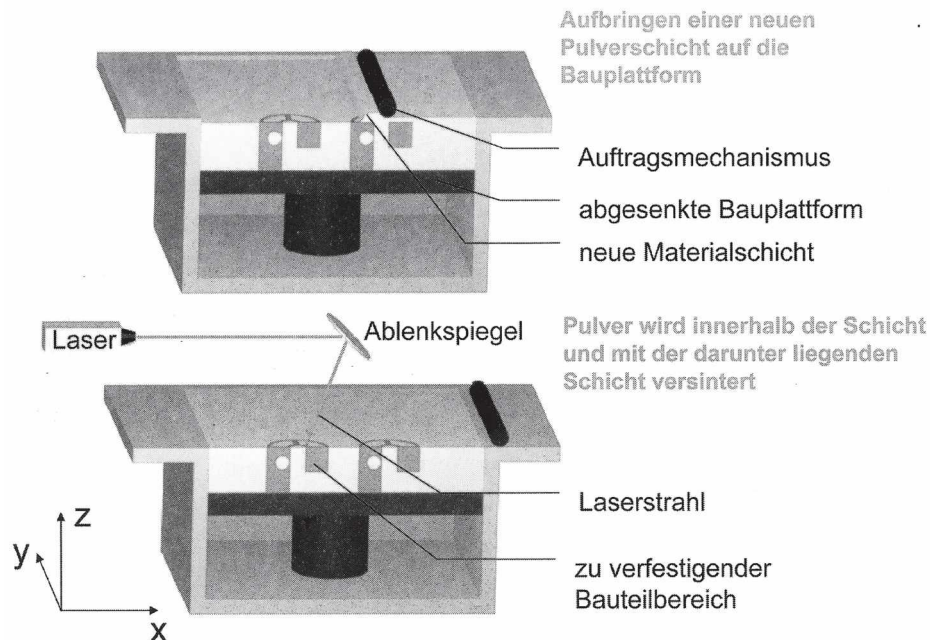


Abb. 7.1: Bauprozess beim schichtweisen Aufbau [36].

### 7.1.1 Verfahrensablauf

In Abb. 7.2 ist der Verfahrensverlauf so genannten *generativen* Fertigungsprozess dargestellt. Ein *3D-CAD-Modell* wird in ein maschinentaugliches digitales Format gebracht. Dieses wird durch wiederholende Schichterzeugung (Schichtauftrag, Belichtung, Absenken der Bauteilplattform) hergestellt.

#### Bauprozessvorbereitung

Am Anfang eines generativen Fertigungsprozess steht ein *3D-CAD-Modell*, sehr oft wird dabei ein *STL-Format* verwendet. Dieses wird vorerst mit einer möglichst genauen Annäherung an die Geometrieaußenfläche durch Dreiecke angenähert. Dieser Prozessschritt wird *Triangulation* genannt. Die Größe der Dreiecke wird so gewählt, dass es bei Rundungen und gekrümmten Freiformflächen zu möglichst kleinen Fehlern kommt. Im so genannten *Slice-Prozess* wird das bisherige digitale Bauteil in einzelne Schichten zerlegt, wobei sich die Schichtdicken nach der technischen Möglichkeit des Fertigungsverfahrens richten. Ein weiterer Teil der Bauvorbereitung ist das virtuelle Implementieren von anlagen- bzw. verfahrensspezifischen Parametern. Dies sind beispielsweise

die Verfahrensgeschwindigkeit, materialspezifische Verarbeitungseigenschaften wie das Schrumpfverhalten, die richtige Orientierung des Bauteils, usw.

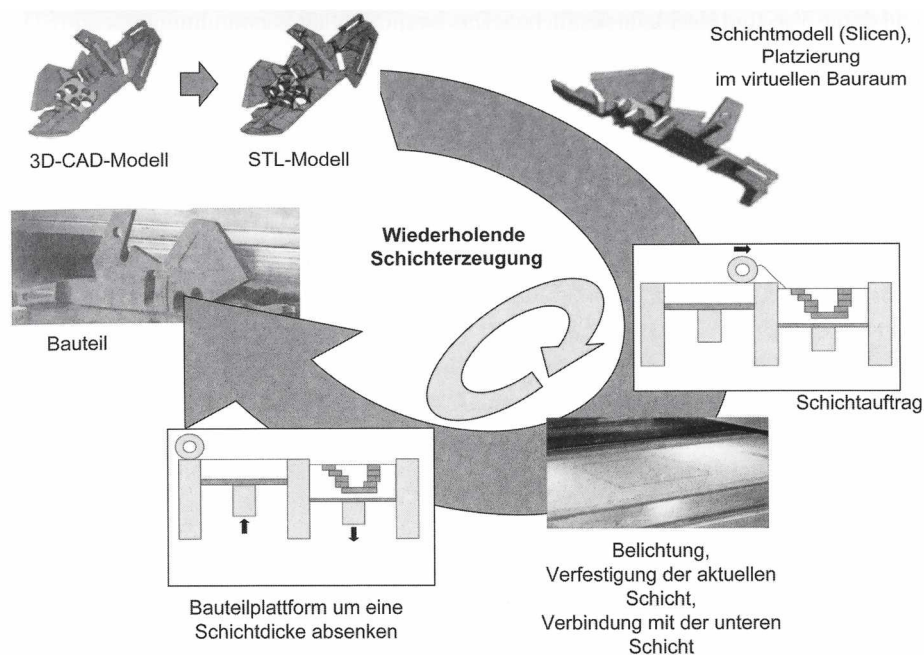


Abb. 7.2: Datenbezogener Prozess bei generativen Fertigungsverfahren [36].

## Bauprozess

Nachdem das 3D Modell in ein maschinenverständliches virtuelles Format gebracht ist, beginnt der eigentliche Bauprozess. Das generative Verfahren arbeitet in zwei Prozessschritten. Das Aufbringen des Ausgangsmaterials und das anschließende Verfestigen. Diese zwei Arbeitsschritte sind in Abb. 7.1 ersichtlich. Danach wird die Bauplattform um eine Schichtdicke abgesenkt, und der Prozess wird wiederholt, bis das Bauteil vollständig ist. Oftmals ist nun noch eine Nachbehandlung wie beispielsweise das Reinigen oder eine Oberflächenbehandlung notwendig.

### 7.1.2 Grundlegende Verfahrensgruppen

In Tab. 7.1 sind unterschiedliche Verfahren der Rapid Prototyping Technologie und einige Eigenschaften aufgelistet. Für diese Arbeit wird jedoch nur die Stereolithographie näher beschrieben.

#### Stereolithographie (SLA)

Die Stereolithographie oder SLA ist das älteste und bekannteste der schichtweise arbeitenden Verfahren.

**Tab. 7.1:** Beispiele unterschiedlicher Rapid-Technologien nach [37].

Characteristics of fabrication techniques					
Fabrication techniques	Critical dimension	Throughput	Solvent	Feature flexibility	Tool cost
$\mu$ -Imprinting lithography	$\sim 50$ nm	high	none	2D structures	master is expensive
Soft lithography	$\sim 50$ nm	high	organic solvent	3D is possible by laminating	soft master is inexpensive
Direct deposition	$\sim 5$ $\mu$ m	low	organic solvent	simple geometry	tools are simple and inexpensive
Three dimensional printing	$\sim 50$ $\mu$ m	low	organic solvent	any 3D structures	high-resolution ink-jet system required
Laser stereolithography	$\sim 10$ $\mu$ m	low	water as solvent	any 3D structures	high-resolution positioning system required
Laser micromachining	$\sim 1$ $\mu$ m	intermediate	none	2D structures	high-resolution positioning system required
Nanosphere lithography	$\sim 100$ nm	high	none	restricted by self-assembled sphere patterns	cheap

Die Vorteile der SLA liegen in ihrer leichten Herstellung von dünnwandigen und komplexen Strukturen. Außerdem ist dieses Verfahren das am längsten kommerziell eingesetzte, somit besteht ein sehr großes Erfahrungswissen bei Herstellern und Anlagenbetreibern [36].

Als Ausgangsmaterial werden eine Vielzahl unterschiedlicher Harze verwendet, die je nach gesuchten Bauteileigenschaften und angepasst an Laser bzw. Verfahren ausgewählt werden.

#### *Anforderungen an das Harz*

Grundlegend muss ein Harz, das in der SLA verwendet wird, ungiftig, geruchsneutral und lagerstabil sein.

Neben diesen Eigenschaften muss es an den Stereolithographieprozess angepasst sein. Beispielsweise variieren Photoinitiatoren je nach Eigenschaften des Lasers und der Schichtdicke. Weiters darf das Harz nicht bei Tageslicht vernetzen, deshalb muss es chemisch stabilisiert sein. Ebenso wenig dürfen Schwankungen der Luftfeuchtigkeit, Temperatur oder Sedimentation zu störenden Veränderungen führen.

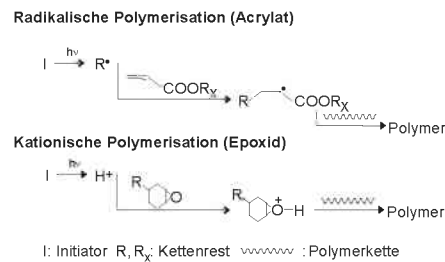
Schließlich muss das Harz auch an die spezielle Anwendung abgestimmt sein. So können mechanische und physikalische Eigenschaften sehr breit variieren [38].

#### *Aushärteraktionen*

Bei der SLA erfolgt die Aushärtung durch die so genannte Photopolymerisation des verwendeten Harzes. Die entstehenden Polymere können als lineare Ketten oder Netzwerkstrukturen vorliegen. Die Reaktion wird durch aktivierte lichtempfindliche Aktivatoren

gestartet. Prinzipiell gibt es, wie in Abb. 7.3 dargestellt, zwei Arten von Photopolymerisationsreaktionen:

- Radikalische Photopolymerisation
- Kationische Photopolymerisation

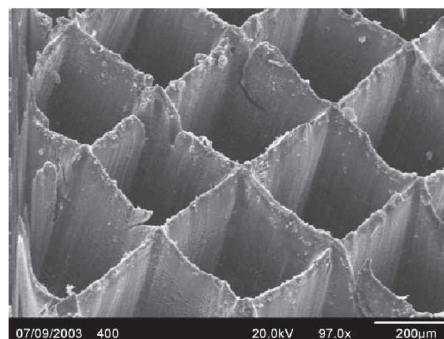


**Abb. 7.3:** Aushärtemechanismen von Photopolymeren [38].

Erstere kommt bei der Härtung von Acryl-, zweitere bei der Härtung von Epoxidharzen zum Tragen. Die zwei Arten der Polymerisation unterscheiden sich in der Wahl der Photoinitiatoren, der Reaktionsgeschwindigkeit und der Abbruchreaktion.

### Mikrostereolithographie

Eine Weiterentwicklung der SLA ist die Mikrostereolithographie. Hierbei können sehr komplexe Geometrien und mit sehr feinen Details realisiert werden. In den Abb. 7.4 und 7.5 sind einige Beispiel dafür angeführt. Diese präzisen Strukturen können durch die Verbesserung der Laserhärtung und der Entwicklung spezieller Harze ermöglicht werden.



**Abb. 7.4:** Beispiel eines zellulären Materials, hergestellt mit Laser-Stereolithographie (Porengröße 400 x 400  $\mu\text{m}$ ) [37].



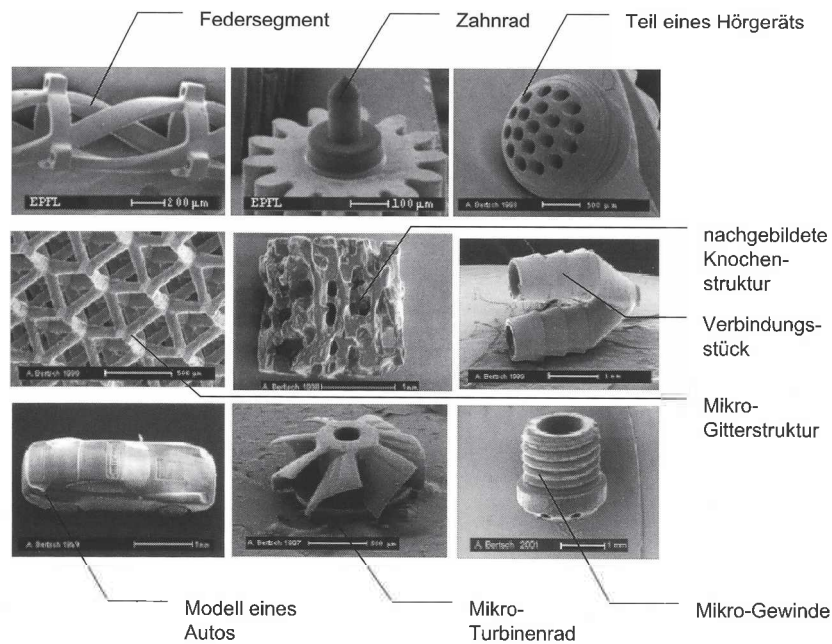


Abb. 7.5: Mit Mikrostereolithographie hergestellte Prototypen [36].

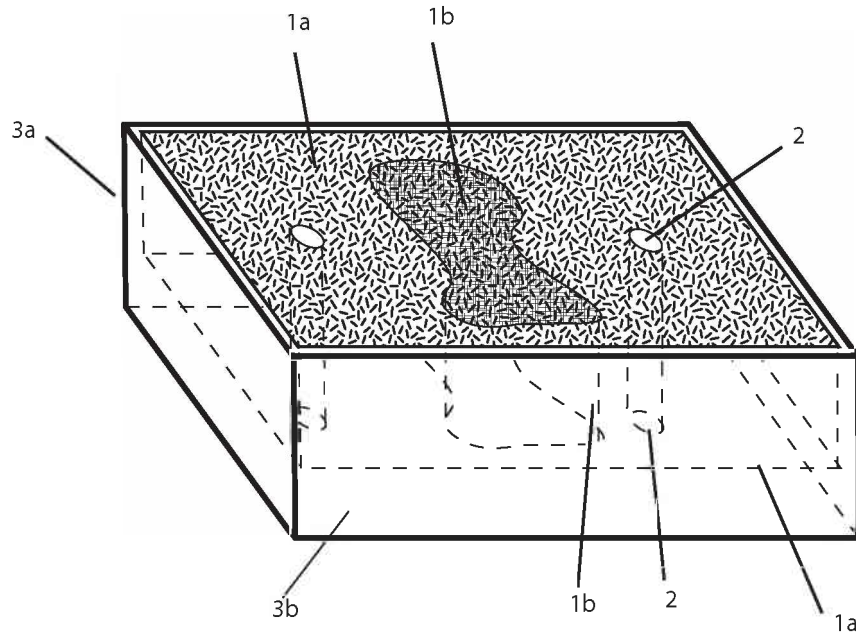
## 7.2 Erarbeitung einer Patentanmeldung

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde eine Patentanmeldung am Österreichischen Patentamt unter dem Titel *Selektiv schallabsorbierendes Werkstück und das Verfahren zu dessen Herstellung* [39] durchgeführt. Die Idee und das Grundwissen basieren auf die in dieser Arbeit vorgestellten Grundlagen und der Literaturrecherche. Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die Methodik und den Stand der Anmeldung. Die gesamte Anmeldung ist im Anhang dieser Diplomarbeit zu finden.

### 7.2.1 Zusammenfassung der Patentanmeldung

Die vorgestellte Erfindung betrifft ein selektiv schallabsorbierendes Werkstück und dessen Verfahren zur Herstellung, bestehend aus einer mit abgezählten und geometrisch definierten mikro- und makroskopischen Einheitsgeometrien komponierten, reproduzierbaren und selektiv schallabsorbierenden Struktur, und wahlweise bestehend aus einem formgebenden, mindestens einseitig offenen, soliden Gehäuse mit Befestigungsmechanismen. Das Werkstück wird kompakt, gemeinsam mit allen Bestandteilen mit einem additiven Aufbauverfahren, beispielsweise Rapid Prototyping, hergestellt.

Durch die gezielte Auswahl der Einheitsgeometrien im Werkstück und an dessen Oberfläche, können einige für akustische Anwendungen nutzbringende Funktionen realisiert werden: Erstens ist es möglich, einen für die Anwendung benötigten Absorpti-



**Abb. 7.6:** Schematische Darstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstücks, mit selektiv schallabsorbierende Struktur (1a, 1b), Befestigungsmechanismus (2) und formgebendem Gehäuse (3a, 3b) [39].

onskoeffizient in Abhängigkeit der Frequenz zu erwirken. Zweitens sind über die Oberfläche veränderliche Absorptionseigenschaften realisierbar. Drittens kann der Absorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Schalleinfallwinkels methodisch gestaltet werden. Viertens kann das Werkstück mit soliden Schichten unterschiedlicher Dicke ausgeführt werden, um spezielle Dämmungseigenschaften zu erwirken.

Ferner ermöglicht das vorliegenden Verfahren eine systematische Entwicklung von Materialmodellen poröser Stoffe und von selektiv schallabsorbierenden Einheitsgeometrien.

## 7.2.2 Methodik

### Recherche

Die Recherche für die Patentanmeldung wurde mit im Internet frei zugänglichen Diensten durchgeführt:

**Deutsches Patentamt** <http://depatisnet.dpma.de/>

**Europäisches Patentamt** <http://ep.espacenet.com/>

**US Amerikanisches Patentamt** <http://www.uspto.gov/>

**Free Patents Online** <http://freepatentsonline.com/>

Nachteilig an dieser Art der Recherche ist, dass jeder Anbieter nur einen gewissen Bereich der weltweiten Patente bzw. Patentanmeldungen abdeckt. Außerdem bietet nicht jede Suchmaschine eine Volltextsuche an. Da zwischen den Anbietern die Suchoperatoren variieren, muss bei jeder Recherche ein eigener Suchstring zusammengestellt werden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass man auf diese Art kostenlos einen sehr guten Überblick über den Stand der Technik erhält. Leider besteht das Risiko, dass durch die oben genannten Punkte etwaige verletzende Anmeldungen oder Patente nicht gefunden werden können.

## **Anmeldung**

Die Anmeldung wurde am 03-Jan-06 am Österreichischen Patentamt eingereicht. Informationen über die formellen Punkte einer Patentanmeldung wurde von der Internetseite des Amtes bezogen (<http://www.patentamt.at/>), Anleitungen mit Tipps und Tricks zum Verfassen von Patentanmeldungen wurden von diversen Seiten im Internet entnommen.

### **7.2.3 Stand der Anmeldung**

Das laufende Verfahren steht derzeit nach der Beantwortung des ersten Vorbescheides und liegt beim Patentamt.

Dem ersten Teil der Anmeldung, also dem selektiv schallabsorbierende Werkstück, wurden zwei bereits bestehende Patente entgegengehalten. Aus diesem Grund wurden die Ansprüche auf eine schallabsorbierende Struktur, die in Bezug auf die Werkstückoberfläche flächenweise unterschiedlich ausgeführt ist, um lokal unterschiedliche akustische Eigenschaften des Werkstückes zu erzielen, reduziert.

Der zweite Teil der Anmeldung, also das Verfahren zum Herstellen eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes und damit das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren, wurde vom Österreichischen Patentamt als *im Hinblick auf den Stand der Technik jedoch als neu und erfinderisch angesehen* (laut Vorbescheid des Österreichischen Patentamtes).

## **7.3 Verfahren**

### **7.3.1 Verfahrensablauf**

Abbildung 7.7 stellt den Verfahrensablauf zur methodischen Optimierung von porösen Materialien für Akustikanwendungen dar. Im Rahmen eines Optimierungszyklus sol-

len Aussagen zur Optimierung von Materialmodellen oder zur Entwicklung von neuen Strukturen für schallabsorbierende Materialien getroffen werden.

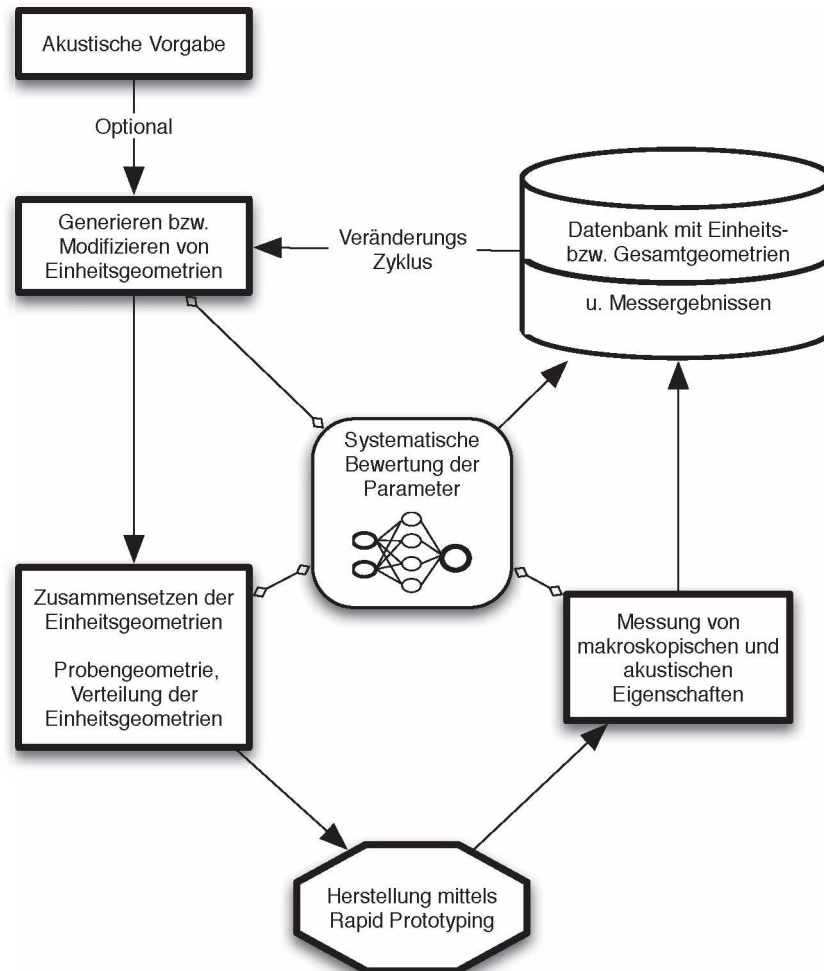


Abb. 7.7: Verfahrenszyklus.

### Generieren von Einheitsgeometrien

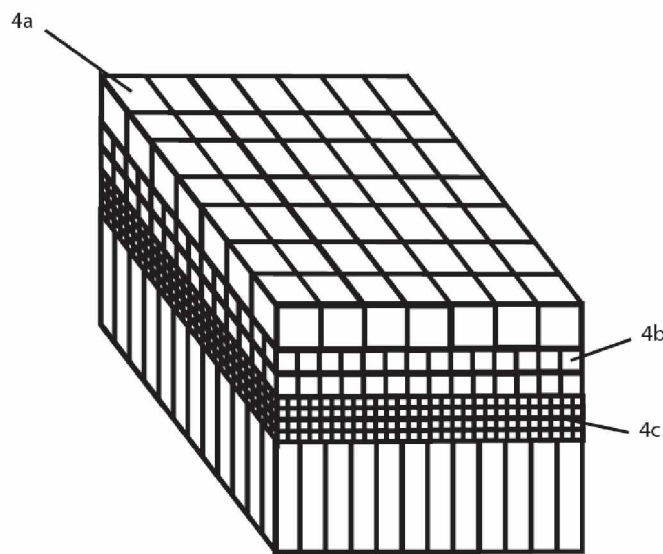
Im ersten Schritt des Verfahrens werden so genannte Einheitsgeometrien, also dreidimensionale Formen von Einheitszellen (s. Abschnitt 6.2.1), virtuell generiert. Diese können in ihrer Form, Größe und Oberflächenbeschaffenheit variieren.

Als Vorbild können geometrische Formen aus bekannten schallabsorbierenden Materialien dienen, wie zum Beispiel Kork, Balsa, Korallen, Substantia spongiosa, Tintenfischknochen, Schwertlilienblättern, Schwämmen, Polyurethanschäume, Filz und Wolle (beispielsweise Abb. 6.3).

### Zusammensetzen von Einheitsgeometrien

Im nächsten Schritt werden die Einheitsgeometrien zu einer virtuellen Überstruktur zusammengesetzt, die so gewählt werden kann, dass sie in ihren Abmessungen für spätere Messmethoden ideal ist.

Die gesamte Zusammenstellung kann in der Art, Anzahl und Verteilung der Einheitsgeometrien variieren. Für anfängliche Versuche ist es natürlich interessant, nur eine Art der Einheitsgeometrien zu wählen.



**Abb. 7.8:** Schematische Darstellung der Zusammensetzung verschiedener Einheitsgeometrien (4a, 4b, 4c) [39].

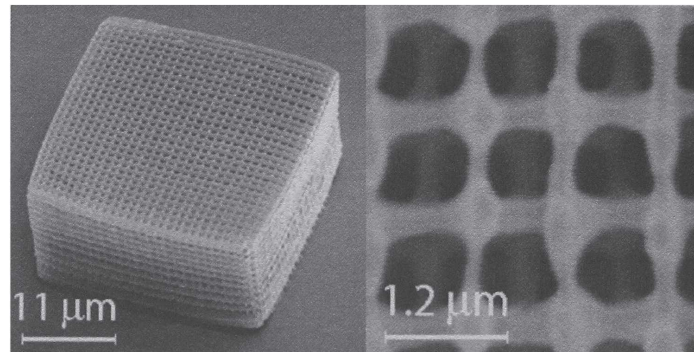
### Herstellung mittels Prototyping

Nachdem die Einheitsgeometrien in der virtuellen Überstruktur eingebettet sind, wird diese mit Hilfe eines geeigneten Rapid Prototyping Verfahrens, wie in Kapitel 7.1 beschrieben, reproduzierbar hergestellt (s. Abb. 7.9).

Es ist natürlich möglich die virtuellen Strukturen mehrfach mit verschiedenen Materialien herzustellen, sodass die Materialeigenschaften wie E-Modul, Dämpfung, Wärmeleitfähigkeit, etc. modifiziert werden können.

### Vermessung von akustischen und makroskopischen Eigenschaften

Die hergestellten Proben werden nun mit verschiedenen Methoden gemessen. Einerseits können dies akustische Messungen sein, wie beispielsweise der Schallabsorptionskoeffizienten.



**Abb. 7.9:** Beispiel eines zellulären Materials, hergestellt mittels Zweiphotonenlithographie [40].

ent (s. Abschnitt 3.2), andererseits können auch diverse makroskopische Eigenschaften wie zum Beispiel der Strömungswiderstand (s. Abschnitt. 6.4.2) gemessen werden.

#### **Verarbeiten der Information und Veränderung der Parameter**

Die Herstellparameter und die gemessenen Daten werden dann im Hinblick auf Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge verwertet und in einer Datenbank gespeichert. Um auch den Zusammenhang mehrerer veränderter Parameter auf das akustische Ergebnis verarbeiten zu können, ist die Auswertung mittels eines neuronalen Netzwerkes, wie es in [41] vorgestellt wird, denkbar.

Aus den gewonnenen Erfahrungen kann dann mit methodischer Variation der Parameter ein neuer Verfahrenszyklus durchgeführt werden.

### 7.3.2 Systematische Bewertung von Einflussfaktoren auf akustische Eigenschaften.

Mit dem vorgestellten Verfahren ergibt sich die Möglichkeit einerseits der reproduzierbaren Herstellung und andererseits der methodischen Variation verschiedener Parameter einer schallabsorbierenden Struktur. Folgende Eigenschaften können unabhängig von einander verändert werden:

- Zellenform
- Zellengröße
- Zellenoberfläche
- Verteilung der Zellen
- E-Modul
- Dämpfung
- Wärmeleitfähigkeit
- Querkontraktion

Eine systematische Bewertung von Einflussfaktoren auf die akustische Eigenschaften (s. Abb. 7.10) kann somit verwirklicht werden.

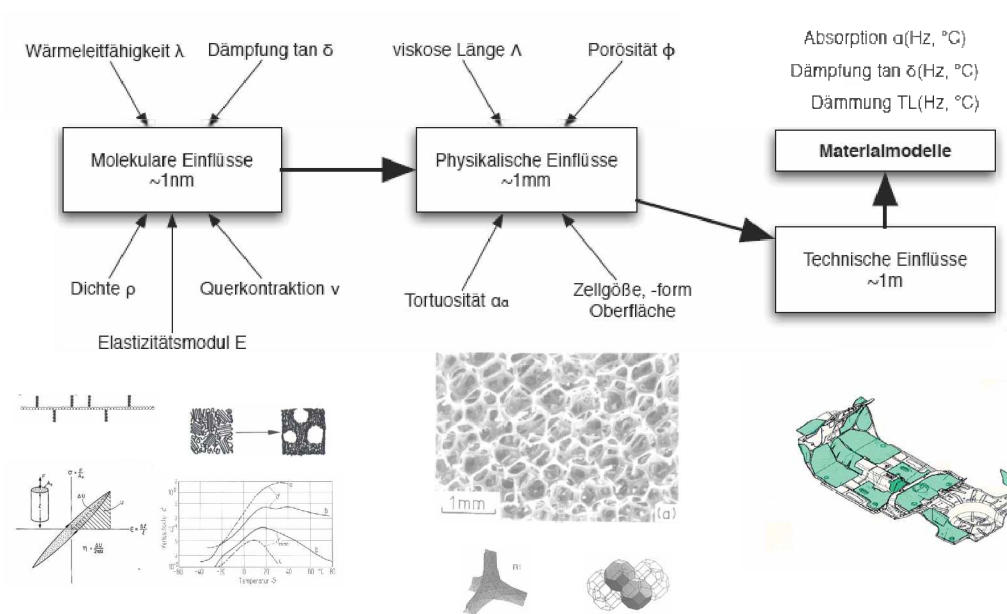


Abb. 7.10: Bewertung der Einflüsse. Grafiken aus [2], [15], [42] und [43].

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### Teil I. Grundlagen

Den Anfang bildet ein Kapitel mit einem Überblick über die grundlegende Akustik, Schallarten, akustische Größen, Pegel und die akustische Messtechnik. Das nächste Kapitel widmet sich den Maßnahmen der Schallbekämpfung, mit Definition und Beschreibung über Primär- und Sekundärmaßnahmen. Letztere Maßnahmen gehen in der Arbeit mit Absorption, Dämmung und Dämpfung ins Detail, es werden jeweils die Funktion der Schallbekämpfung und deren Messmethoden beschrieben. Im letzten Kapitel der Grundlagen wird die Fahrzeugakustik mit der Schallsituation im Auto, die Anforderungen eines Sekundärpakets und ein kurzes Anschneiden des virtuellen Autos skizziert.

### Teil II. Literaturrecherche über den Stand der Technik

Im ersten Abschnitt dieses Teils wird mit Hilfe von drei Fallstudien die derzeitige Situation der Auslegung und Entwicklung von Sekundärmaßnahmen dargestellt. Sowohl Firmen, die Sekundärmaßnahmen auslegen, als auch Materialhersteller sind an einer Charakterisierung der Materialien interessiert. Es wird aufgezeigt, dass ein verbessertes Verständnis der Zusammenhänge zwischen innerer Mikrostruktur und akustischen Eigenschaften Grundlage für neue Entwicklungen ist. Der zweite Abschnitt stellt bekannte Möglichkeiten der Charakterisierung von porösen Materialien vor. Neben der grundlegenden Charakterisierung wie die Eigenschaften des verwendeten Materials, die Porosität und der Permeabilität wird auf die geometrische Charakterisierung eingegangen. Anschließend wird auf mögliche optische Messmethoden und die Auswertung mittels Bildverarbeitung eingegangen. Makroskopische Eigenschaften, die als Absorbermodelle in Materialmodelle eingehen, werden als weitere Charakterisierungsmethode vorgestellt. Diese zum Teil sehr schwer definierbaren bzw. messbaren Eigenschaften werden für die Simulation von porösen akustischen Materialien benötigt. Abschließend gibt eine Literaturanalyse einen Überblick über verschiedenen Einflüsse auf akustische Eigenschaften von Absorptionsmaterialien, und zeigt auf, dass eine systematische Bewertung dieser sehr schwierig ist.



### **Teil III. Verfahren zur verbesserten Charakterisierung poröser Materialien**

Dieser Teil der Arbeit stellt einen neuen methodischen Ansatz zur Optimierung von porösen Materialien für Akustikanwendungen vor. Die Grundidee basiert auf der Kombination der bekannten Möglichkeiten der Charakterisierung und dem Rapid Prototyping Verfahren. Letzteres wird im Rahmen einer Literaturrecherche beschrieben. Der Verfahrensablauf und die grundlegenden Verfahrensgruppen werden diskutiert. Anhand von in der Industrie hergestellten Prototypen wird aufgezeigt, dass Strukturen von Absorptionsmaterialien mit dieser Technologie hergestellt werden können. Anschließend wird das beim Österreichischen Patentamt angemeldete Patent *Selektiv schallabsorbierendes Werkstück und das Verfahren zu dessen Herstellung* vorgestellt. Die Methodik der Recherche und der Anmeldung, sowie der derzeitige Stand der Anmeldung werden beschrieben. Das aus der Anmeldung entnommene Verfahren zur systematischen Bewertung von Einflussfaktoren auf akustische Eigenschaften poröser Materialien mit Hilfe der Rapid Prototyping Technologie bildet den Kernpunkt dieses Abschnittes. Das Verfahren basiert auf der systematischen Variation einzelner geometrischer und materialspezifischer Parameter mit anschließender Messung makroskopischer und akustischer Eigenschaften in einem Optimierungszyklus. Gewonnene Zusammenhänge aus der Veränderung von Zellenmorphologie (Zellenform, Zellengröße, Zellenoberfläche), Zellenverteilung und intrinsischen Materialeigenschaften (E-Modul, Dämpfung, Wärmeleitfähigkeit) und den gewonnenen Messwerten stellen die Grundlage für die Bewertung der einzelnen Parameter und deren Wechselwirkung auf das akustische Ergebnis dar.

#### **Ausblick**

In dieser Arbeit wurde aufgezeigt, dass sowohl Entwickler der Simulation, als auch Materialentwickler an einer besseren Determination der Einflussfaktoren auf akustische Eigenschaften interessiert sind. Das vorgestellte Verfahren könnte so Grundlage für die Entwicklung neuer Materialmodelle und Materialien sein.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit stellt die Erweiterung der Charakterisierung von porösen Materialien mittels synchrotron radiation x-ray microtomography dar. Gewonnene Erfahrungen aus dem Verfahren zwischen geometrischen Parametern und akustischen Eigenschaften könnten in die Bildverarbeitung einfließen. Dadurch wäre eine rasche Charakterisierung von porösen Materialien möglich.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Patentanmeldung soll die Herstellung eines porösen Materials mit vorgegebenen akustischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Frequenz ermöglichen. Nachdem das verwendete Verfahren des Rapid Prototyping derzeit noch relativ teuer ist, ist vorerst nicht an eine Serienherstellung für die Automobilindustrie zu denken.

## Literaturverzeichnis

- [1] OCHS, Jürgen: *Entwicklung und Funktion der Sound-Leichtbaugeräuschkämpfung im Porsche Cayenne*. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, 2004
- [2] BRANDL, F. ; PFLÜGER, M. ; FEITZELMAYER, J. ; BERNHARD, U.: *Fahrzeugakustik*. – Springer Verlag, noch nicht erschienen
- [3] MANTOVANI, M.: *Use of Complementary Simulation Tools for the Optimal Design of Vehicle Sound Packages*. Rieter Automotive, 2003
- [4] ATALLA, Y. ; ATALLA, N. ; FU, J. ; NAGUIB, H. E.: The Effect of Processing Parameters on the Acoustical Efficiency of Open-Cell PMMA Materials. In: *SAE Technical paper series 2006-01-0711* (2006)
- [5] SKINNER, C. ; PETERS, J. ; VENDENBROECK, J.: Acoustic Absorbers: A third way for the management of sound in automobiles. In: *Paper for UTECH Europe* (2006)
- [6] ASBHY, M. F.: *Materials Selection in Mechanical Design (2nd Edition)*. Butterworth-Heinemann, 1999
- [7] KUTZ, Myer (Hrsg.): *Handbook of Materials Selection*. John Wiley and Sons, 2002
- [8] HECKL, M. ; MÜLLER, H. A.: *Taschenbuch der technischen Akustik*. Springer Verlag, 1990
- [9] DICKREITER, M.: *Handbuch der Tonstudioteknik*. K. G. Saur, 1987
- [10] VEIT, I.: *Technische Akustik*. Vogel Verlag, 1996
- [11] BÖHLER, E.: *Simulation der akustischen Wirkung von Kraftfahrzeuginnenraumausstattung auf das Innengeräusch mittels Finite Elemente Methode*. Acoustic Competence Center, Graz, 2001
- [12] *Lärmfibel – Information über Lärmbekämpfungsmaßnahmen*. Teroson GmbH Heidelberg, 1974
- [13] PROSSEGGER, A.: *Analyse der akustischen Eigenschaften von Ausstattungsmaterialien für den Kraftfahrzeug-Innenraum*. Diplomarbeit am Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung, 2000

- 
- [14] SHUTOV, F. A.: Cellular Structure and Properties of Foamed Polymers. In: *Handbook of Polymeric Foams and Foam Technologies* (1991)
- [15] GIBSON, L. J. ; ASHBY, M. F.: *Cellular Solids. Structure and properties*. Cambridge University Press, 1997
- [16] RAO, M. D.: Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes. In: *Journal of Sound and Vibration* 262 (2003), S. 457–474
- [17] HANSELKA, H.: *Ein Beitrag zur Charakterisierung des Dämpfungsverhaltens polymerer Faserverbundstoffe*, Technische Universität Clausthal, Diss., 1992
- [18] SPERLING, L. H.: Viscoelastic Definitions and Concepts. In: *Sound and Vibration Damping with Polymers* (1990)
- [19] DLUBAC, J. ; LEE, G. ; DUFFY, J. ; DEIGAN, R. ; LEE, J.: Comparison of the Complex Dynamic Modulus as Measured by Three Apparatus. In: *Sound and Vibration Damping with Polymers* (1990)
- [20] BOYSEN, M. ; BRAUN, D. ; CARLOWITZ, B. ; DISSELHOFF, R. ; CARLOWITZ, B. (Hrsg.): *Kunststoff Handbuch. Die Kunststoffe - Chemie, Physik, Technologie*. Hanser Verlag, 1990
- [21] CARLOWITZ, B.: *Tabellarische Übersicht über die Prüfung von Kunststoffen*. Giesel Verlag, 1992
- [22] BARBER, A.: *Handbook of noise and vibration control*. 6<sup>th</sup> edition. Elsevier Science Publishers, Oxford, 1992
- [23] *Homepage ACC Graz*. [http://www.accgraz.com/images/material\\_01.jpg](http://www.accgraz.com/images/material_01.jpg). Version: 21-Jan-07, Abruf: 30-Jan-07
- [24] HEINEMANN, G.: *Fahrzeugakustik*. Verlag Moderne Industrie, 1998
- [25] PRIEBSCHE, H. H. ; HAUER, I. ; FELLNER, H.: Numerical Simulation of Vehicle Interior Noise up to 250 Hz. In: *Styrian Noise, Vibration and Harshness Congress* Acoustic Competence Centre Graz, 2001, S. 149–162
- [26] LAURIKS, W.: *Physical acoustics*. [http://fys.kuleuven.be/atf/rt\\_physical.htm](http://fys.kuleuven.be/atf/rt_physical.htm). Version: 23-Mrz-06, Abruf: 30-Jan-07
- [27] MENZEL, O.: *Charakterisierung makroporöser Materialien mit den Methoden der digitalen Bildverarbeitung und Bestimmung von effektiven Diffusionskoeffizienten durch Computersimulationen*. Dissertation Universität Hannover, 2000

- 
- [28] ELMOUTAOUAKKIL, A. ; FUCHS, G. ; BERGOUNHON, P. ; PERES, R. ; PEYRIN, F.: Three-dimensional quantitative analysis of polymer foams from synchrotron radiation x-ray microtomography. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 36 (2003), S. 37–43
- [29] LIN, H. R.: The Structure and Property Relationships of Commercial Foamed Plastics. In: *Polymer Testing* 16 (1997), Nr. 5, S. 429–443
- [30] SALISSOU, Yacoubou ; PANNETON, Raymond: *Comparison of Methods for Characterizing Sound Absorbing Materials*. <http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:physics/0611259>.  
Version: 2006, Abruf: 30-Jan-07
- [31] KNAPEN, E. ; LANOYE, R. ; VERMEIR, G. ; LAURIKS, W. ; GEMERT, D. V.: Acoustic properties of sound absorbing, polymer-modified porous cement mortars. In: *6th International Conference on Materials Science and Restoration, MSR-VI* (2003)
- [32] LU, T. J. ; HESS, A. ; ASHBY, M. F.: Sound absorption in metallic foams. In: *Journal of applied physics* 85 (1999), Nr. 11
- [33] WANG, X. ; LU, T. J.: Optimized acoustic properties of cellular solids. In: *Acoustical Society of America* (1999)
- [34] ADACHI, H. ; HASEGAWA, T. ; ASANO, T.: Cell Distributions in and Sound Absorption Characteristics of Flexible Polyurethane Foams. In: *Journal of applied polymer science* 65 (1997), Nr. 7, S. 1395–1402
- [35] HONG, Z. ; BO, L. ; GUANGSU, H.: Sound absorption behavior of multiporous hollow polymer micro-spheres. In: *Materials Letters* 60 (2006), Nr. 3451–3456
- [36] ZÄH, Michael F.: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien*. Hanser Verlag, 2006
- [37] LU, Y. ; CHEN, S. C.: Micro and nano-fabrication of biodegradable polymers for drug delivery. In: *Advanced drug delivery reviews* (2004)
- [38] ESCHL, Johannes: *Die mechanischen Eigenschaften von Stereolithographiematerialien während der Aushärtung*. Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde der Universität Stuttgart, 2002
- [39] ICKINGER, Simon: Selektiv schallabsorbierendes Werkstück und das Verfahren zu dessen Herstellung. In: *Patentanmeldung A5/2006* (2006)

- [40] WOESZ, A.: *Rapid Prototyping zellulärer Materialien*. Dissertation MUL, 2004
- [41] GARDNER, G. C. ; O'LEARY, M. E. ; HANSEN, S. ; SUN, J.Q.: Neural networks for prediction of acoustical properties of polyurethane foams. In: *Applied Acoustics* 64 (2003), S. 229–242
- [42] MENGES, G. ; HABERSTROH, E. ; MICHAELI, W. ; SCHMACHTENBERG, E.: *Werkstoffkunde Kunststoffe*. 5., völlig überarbeitete Auflage. Hanser Verlag, 2002
- [43] WEAIRE, D. ; HUTZLER, S.: *The physics of foam*. Clarendon Press, 1999

## **Anhang: Patentanmeldung**

**Selektiv schallabsorbierendes Werkstück und das Verfahren zu dessen  
Herstellung**

Patentanmeldung  
von Simon Ickinger

**Technischs Gebiet**

Die vorliegende Erfindung betrifft ein selektiv schallabsorbierendes Werkstück und dessen Verfahren zur Herstellung, bestehend aus einer mit abgezählten und geometrisch definierten mikro- und makroskopischen Einheitsgeometrien komponierten, reproduzierbaren und selektiv schallabsorbierenden Struktur, das -wahlweise mit einem formgebenden, soliden, und mindestens einseitig offenen Gehäuse mit Befestigungsmechanismen kompakt ausgeführt- in einem Arbeitsschritt mit einem additiven Aufbauverfahren, wie beispielsweise das Rapid Prototyping Verfahren, hergestellt wird.

**Stand der Technik**

Es gibt sehr viele Anwendung, wo Materialien mit schallabsorbierenden und schalldämmenden Eigenschaften verwendet werden. Ob beispielsweise im Auto, im Flugzeug, in Innenräumen oder in vielen anderen Anwendungen, bei denen eine Schallreduktion erwünscht ist, sind Materialien mit guten akustischen Eigenschaften sehr wichtig.

Oftmals ist es interessant ein Material mit guter Schallabsorption in bestimmten, für die Anwendung notwendigen Frequenzbereichen, zur Verfügung zu haben. Von Vorteil ist es ebenso, wenn dies mit möglichst kleinen Abmessungen und mit wenig Gewicht erreicht werden kann. Viele schallabsorbierenden Anwendungen werden als Mehrkomponenten ausgeführt, wobei jede Komponente unterschiedliche frequenzabhängige Absorptionskoeffizienten hat, um eine gewünschten Gesamteigenschaften zu erzielen. Ein Verfahren zum Voraussagen von akustischen Eigenschaften und dem Zusammensetzen von mehreren porösen Komponenten, um eine spezielle akustische Eigenschaft zu erhalten wird in (US 6,256,600) detailliert beschrieben.

In (US 20030011091) wird ein geformtes Material mit guten schallabsorbierenden Eigenschaften beschrieben, dass durch hinzufügen von Harzpartikeln zur Hohlraumbildung eine bestimmte statistische Porösität erfährt, und somit ein sehr breites Frequenzspektrum absorbieren kann.

(US 5989473) beschreibt ein Verfahren zur Herstellung eines Compounds aus einem porösen Körper und einer soliden Oberfläche. Es wird erwähnt, dass der poröse Körper mittels Rapid Prototyping hergestellt werden kann.

### **Technische Aufgabe und Vorteile der Erfindung**

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Werkstück für akustische Anwendungen mit Hilfe eines additiven Aufbauverfahren, wie beispielsweise das Rapid Prototyping Verfahren herzustellen. Die geometrische Form, die Absorptionseigenschaften, die Dämmungseigenschaften und zusätzliche Funktionen wie Befestigungsmechanismen werden individuell an die jeweilige Anwendung angepasst und optimiert, und in einem Herstellungsschritt gemeinsam produziert.

Die Vorteile der vorliegenden Erfindung:

- Selektive Schallabsorption des Werkstückes in Abhängigkeit der Frequenz und des Schalleinfallwinkels.
- In Bezug auf die Werkstückoberfläche können die Absorptionseigenschaften lokal gezielt variiert werden.
- Anpassung jedes einzelnen Werkstückes an akustische, baumassnahmliche und anwendungsabhängige Randbedingungen
- Das Werkstück ist mikro- und makroskopisch reproduzierbar.
- Schallabsorbierende Struktur, Gehäuse, Montageteile, etc. sind in einem Stück ausgeführt.



- Dichtungen oder ähnliches zwischen Absorptionsmaterial und Gehäuse sind nicht notwendig.
- Gewichtsreduktion des Werkstückes durch das Reduzieren der schallabsorbierenden Strukturen auf notwendige Frequenzbereiche, die für die Anwendung relevant sind.
- Bewegliche Teile, Klebungen, Verschraubungen oder ähnliche verbindende Mechanismen entfallen.
- Die reproduzierbare Herstellung der mikro- und makroskopischen Einheitsgeometrie kann zur Entwicklung von Materialmodellen von porösen und/oder dämmenden Materialien genützt werden.
- Das Verfahren kann sehr gut zur Erstellung von Prototypen bei der Entwicklung und Auslegung von akustischen Materialien für die Serienproduktion verwendet werden.

### **Erfindung, wie in den Patentansprüchen gekennzeichnet**

Anspruch 1 und 2 erklären das Prinzip der vorliegenden Erfindung. Die Ansprüche 3 bis 5 gehen auf die Variation des Gehäuses und der schallabsorbierenden Struktur ein. Anspruch 6 nennt die Möglichkeit der Steuerung der akustischen Eigenschaft in Abhängigkeit des Schalleinfallwinkels. Anspruch 7 beschreiben die Möglichkeit der flächenmässigen Auslegung des Werkstückes bezüglich der akustischen Eigenschaften. Die Ansprüche 8 bis 13 beschreiben die geometrische Formen, die in der schallabsorbierenden Struktur vorkommen können, um die erwünschte Absorptionseigenschaften zu erzielen. Anspruch 14 geht auf die Oberflächenbeschaffenheiten der Strukturen ein. Die Ansprüche 15 bis 17 gehen auf die Designfindung der Einheitsgeometrien ein. Die Ansprüche 18 und 19 zeigen die Möglichkeit der Materialvariation in Abhängigkeit der Tiefe und Fläche auf. Die Anspruche 20 und 21 nennen die Möglichkeit,

vorliegende Erfindung bei der Entwicklung von Materialmodellen und von Prototypen zu nützen.

Anspruch 22 beschreibt das Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes mit 6 Schritten (a bis f). Die Ansprüche 23 bis 26 gehen auf die akustischen Randbedingungen des Verfahrensschrittes (a) von Anspruch 22 ein. Die Ansprüche 27 bis 29 beschreiben die Möglichkeit einer Implementierung der schallabsorbierenden Struktur in eine übergeordnete Bauteilgeometrie mit verschiedenen Funktionen. Anspruch 30 zählt die Messmethoden des Verfahrensschrittes (e) von Anspruch 22 auf. Die Ansprüche 31 bis 33 gehen auf die Designfindung der Einheitsgeometrien ein. Anspruch 34 geht auf die Verwertung (f) der Daten aus dem vorliegenden Verfahren ein. Die Ansprüche 35 und 36 nennen die Möglichkeit, das vorliegende Verfahren bei der Entwicklung von Materialmodellen und von Prototypen zu nützen.

### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

**Fig. 1** Selektiv schallabsorbierendes Werkstück mit einem soliden nach oben offenen Gehäuse (3a), mit einer soliden Dämmschicht (3b) an der Unterseite, zwei unterschiedlich schallabsorbierenden Strukturen (1a, 1b), bestehend aus mehreren Einheitsgeometrien und mit zwei eingearbeiteten lochförmigen Ausnehmungen (2) zur Befestigung; **Fig. 2** Selektiv schallabsorbierendes Werkstück mit schematischer Anordnung verschiedener Einheitsgeometrien mit unterschiedlichen Größen (4a, 4b, 4c), ohne Gehäuse und ohne Befestigungsmechanismus; **Fig. 3** Seitenansicht eines selektiv schallabsorbierendes Werkstückes, wobei die Einheitsgeometrien an der Oberfläche so ausgelegt sind, dass sich für unterschiedliche Schallwelleneinfallswinkel gezielt unterschiedliche Absorptionseigenschaften ergeben; **Fig. 4** Dreidimensionale Zellen; **Fig. 5** Kanalstruktur; **Fig. 6** Grundflächen der Mantelfläche der Kanäle. **Fig. 4** Dreidimensionale Zellen; **Fig. 5** Kanalstruktur; **Fig. 6** Grundflächen der Mantelfläche der Kanäle; **Fig. 7** Filamente  $0^\circ/90^\circ$  Winkel; **Fig. 8** Filamente  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  Winkel;

**Fig. 9** Flussdiagramm zum Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes.

### Bezugszeichenaufstellung

**1a** Selektiv schallabsorbierenden Struktur; **1b** Selektiv schallabsorbierenden Struktur mit einer anderen Absorptionseigenschaften als **1a**; **2** Eingearbeitete lochförmige Ausnehmungen zur Befestigung; **3a** Solides Gehäuse; **3b** Solide Dämmschicht an der Unterseite; **4a** Einheitsgeometrie an der schallseitigen Oberfläche; **4b** Einheitsgeometrien die mit **4a** und **4c** verbunden sind; **4c** Einheitsgeometrien mit kleinen Abmessungen; **5a** Schallwelleneinfallswinkel von  $45^\circ$  auf das selektiv schallabsorbierende Werkstück mit Absorptionseigenschaften  $\alpha_1$  in Abhängigkeit der Frequenz; **5b** Schallwelleneinfallswinkel normal auf das selektiv schallabsorbierende Werkstück mit Absorptionseigenschaften  $\alpha_2$  in Abhängigkeit der Frequenz; **6** Tetraeder; **7** Kante; **8** 3 seitiges Prisma; **9** Würfel; **10** Mehrseitiges Prisma; **11** Oktaeder; **12** Rhombischer Dodektaeder; **13** pentagonaler Dodektaeder; **14** Tetrakaidektaeder; **15** Ikosaeder; **16** Schichtweise aufgebautes Material; **17** Kanal; **18** Achsenlinie des Kanals mit Richtungsänderungen; **19** Erzeugende der Mantelfläche; **20** Hohlraum; **21** Einmündung von der gesamten Struktur in den Hohlraum; **22** Kreis; **23** Ellipse; **24** Viereck; **25** Vieleck; **26** Sternform; **27** Spiralform; **28** Filament mit bestimmten Durchmesser, Länge und Abstand zu anderen Filamenten; **29** Unterschiedliche Winkel zwischen den Filamentschichten.

### Bezugszeichenaufstellung des Flussdiagrammes (Fig. 9)

**a** Akustische Vorgabe; **b** Auswahl der Art, Anzahl, Kombination der Einheitsgeometrien für die Erfüllung akustischer Parameter; **c** Zusammensetzen der Einheitsgeometrien und Einbettung in übergeordnete Werkstückgeometrie; **d** Herstellung mittels Rapid Prototyping; **e** Messung von physikalischen Eigenschaften; **f** Neuronales Netzwerk bzw. Modellbildung; **g** Datenbank mit Einheits- bzw. Gesamtgeometrien

und Messergebnissen; **I** Schallsituation aus CAD Simulation; **II** Bauteil Dämmung;  
**III** Bauteil Geometrie; **IV** Bauteil Befestigungen.

## **Ausführliche Beschreibung**

Im folgenden wird die vorliegende Erfindung anhand der Figuren detailliert beschrieben.

### **Ausführungen**

In Fig. 1 ist ein Beispiel für ein Werkstück im Sinne der vorliegenden Erfindung dargestellt. Es besteht aus einem formgebenden Gehäuse (3a, 3b), das zumindest auf einer Seite offen ausgeführt ist, vorzugsweise auf der schallseitigen Seite. Das Gehäuse kann in seiner Form und Wanddicke je nach Art der Anwendung ausgeführt sein. So ist es beispielsweise möglich, durch die gezielte örtliche Variation der Dicke (3b) an akustisch sinnvollen Stellen, eine schalldämmende Wirkung zu erzielen. Dadurch kann, im Vergleich zu Baugruppen mit Schalldämmmaterial konstanter Dicke und gleichen Dämmeigenschaften, eine Gewichtsreduzierung erreicht werden.

In dem Gehäuse ist eine selektiv schallabsorbierende Struktur (1a, 1b) eingearbeitet. Ebenfalls können funktionelle Mechanismen in das Werkstück eingearbeitet sein. In Fig. 1 sind diese als Befestigungsmechanismus (2) in Form von lochförmigen Ausnehmungen ausgeführt. Es sind natürlich auf andere Arten denkbar, wie beispielsweise Schnapper, Nuten, Ausnehmungen, etc.

Das Werkstück wird kompakt und gemeinsam mit besagten Komponenten schichtweise (16) hergestellt. Dies kann beispielsweise mit einem additiven Aufbauverfahren, wie das Rapid Prototyping Verfahren erfolgen. Somit ist das Werkstück reproduzierbar, und besteht aus gezielt konstruierten und abgezählten Strukturen bzw. Geometrien.

Die besondere Funktion des Werkstückes liegt an dessen schallabsorbierenden Eigenschaften, die je nach Art der Anwendung gezielt ausgelegt werden. Ermöglicht wird diese flexible akustische Anpassung durch die genannte schallabsorbierende Struktur (1a, 1b). Sie besteht aus abgezählten und geometrisch definierten mikro- und makroskopischen Einheitsgeometrien, die gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche in geometrischer Form, Anzahl,

Oberflächenbeschaffenheit und Lage (4a, 4b,4c) in der Struktur ausgeführt sind.

Das Werkstück kann natürlich auch ohne Gehäuse, nur mit der schallabsorbierenden Struktur ausgeführt sein. Dies ist in Fig. 2 schematisch dargestellt.

### **Akustische Eigenschaften**

Die schallabsorbierende Struktur kann so ausgeführt sein, dass sie eine vorher bestimmte luftschallsdämpfende Eigenschaft (Absorptionskoeffizient) in Abhängigkeit der Frequenz aufweist. Die Auswahl und Zusammensetzung der Einheitsgeometrien soll so gewählt werden, dass nur die Frequenzbänder absorbiert werden, die für die Anwendung sinnvoll ist. Somit kann zum einen Gewicht der schallabsorbierenden Bauteile gespart werden, zum anderen ist es möglich ein charakteristisches Klangbild des Werkstückes zu erhalten. In der Psychoakustik ist bekannt, dass manche Frequenzbänder für den Menschen für spezielle Anwendungen gut klingen, andere jedoch sehr unangenehm oder untypisch klingen. Durch das selektive Schallabsorptionsvermögen der Struktur ist es somit möglich ein bestimmtes Klangbild zu erzeugen.

Eine weiterer Vorteil, der mit der vorliegenden Erfindung erreicht werden kann, ist die selektive Schallabsorption in Abhängigkeit des Schalleinfallwinkels (5a, 5b). Es ist bekannt, dass das Schallabsorptionsvermögen von akustischen Materialien oft unterschiedlich in Abhängigkeit des Einfallwinkels ist. Durch die gezielte und exakte Auslegung der Einheitsgeometrien mit speziellen Einmündungswinkel in der Nähe der Oberfläche (4a), ist es somit möglich dieses Verhalten für die jeweilige Anwendung zu optimieren.

Durch die Möglichkeit der gezielten Anordnung der Einheitsgeometrien an der Oberfläche und im Werkstück, ist es möglich in Bezug auf die Werkstückoberfläche variierende akustische Eigenschaften zu erzielen. In Fig. 1 ist dies mit zwei unterschiedlichen Bereichen (1a) und (1b) schematisch dargestellt. Die schallabsorbierenden Eigenschaften können beispielsweise lokal in Abhängigkeit der Frequenz oder in Abhängigkeit des Winkels (5a, 5b) variieren.

## Einheitsgeometrien

Aus folgenden Einheitsgeometrien kann sich die schalldämpfende Struktur zusammensetzen, wobei diese gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche ausgeführt werden:

Fig. 4 zeigt dreidimensionale Zellen wie einen Tetraeder (6), 3 seitiges Prisma (8), Würfel (9), ein mehrseitiges Prisma (10), Oktaeder (11), Rhombischer Dodektaeder (12), pentagonaler Dodektaeder (13), Tetrakaidektaeder (14), Ikosaeder (15). Die genannten Zellen können in ihrer Kantenlänge (7), bzw. Kantendurchmesser variieren. Ausserdem können die Zellen so konstruiert sein, dass eine oder mehrere Seitenflächen zu oder offen ausgeführt sind, um so eine gezielte Umlenkung des Luftstromes zu erreichen.

Fig. 5 zeigt eine mögliche Kanalstruktur (17), die in das schichtweise Aufgebrachte Material (16) eingearbeitet sind. Diese sind so ausgelegt, dass eine gewisse Schallabsorption auftritt. Die Kanäle können in ihren Achsenlinien (18) wahlweise Richtungsänderungen aufweisen, ausserdem können die Grundflächen der Erzeugenden der Mantelfläche (19) in Größe und Form variieren. Diese Formen können beispielsweise ineinander übergehen. In Fig. 6 sind die Grundflächen der Erzeugenden der Mantelfläche (19) wie ein Kreis (22), eine Ellipse (23), ein Viereck (24), ein Vieleck (25), ein Weihnachtsstern (26) und eine Spirale (27) dargestellt. Diese Grundflächen können sich in Abhängigkeit der Achsenlinie auch drehen, sodass sich eine Spiralförmigkeit ergibt. Weiters können die Achsenlinien so eingearbeitet werden, dass sich Formen die einer Helix, einer Doppelhelix, einer Schraubenform, einer Schneckenform, oder einer Wendelfläche ergeben. Um enge Frequenzbänder dämpfen zu können, können auch sogenannte Helmholtz-Resonatoren in die schallabsorbierende Struktur eingearbeitet werden. Fig. 5 zeigt mit (20) einen Hohlraum, und mit (21) dessen Einmündung in die schalldämpfende Struktur. Durch Variation dieser beiden Formen, können spezielle Frequenzbänder gezielt gedämpft werden.

Fig. 7 stellt eine mögliche Filamentstruktur dar. Die Filamente (28) können sich

in ihren Durchmessern, Abständen, und Längen unterscheiden. Ausserdem können ihre Winkel zueinander variieren, wie in Fig. 8 als  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  Lage (29) dargestellt ist.

### **Herstellverfahren**

Das Rapid Prototyping Verfahren wird in vielen Bereichen genützt. Beispielsweise in der Herstellung von Mikrofiltern, Mikrokatalysatoren werden Miniaturgerüste im Mikrometerbereich verwirklicht.

Somit kann diese Technologie genützt werden, um vorher genannte Einheitsgeometrien (4a, 4b, 4c) im Milli- und Mikrometerbereich herzustellen. Ebenso können gezielte Variationen der Oberflächenbeschaffenheit und eine vorbestimmte Mikroporosität der erwähnten Einheitsgeometrien (4a, 4b, 4c) erreicht werden.

Durch den raschen Vorschrift in der Rapid Prototyping Industrie, wird es voraussichtlich bald möglich sein, dass schichtweise und / oder flächenweise unterschiedliche Materialien verwendet werden können. Diese Möglichkeit würde eine weiter Verbesserung der vorliegenden Erfindung bedeuten, da so Wärmeleitfähigkeiten, Elastizitätsmoduli, Querkontraktionszahlen und Verlustmoduli gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche und /oder Oberflächeneigenschaften ausgeführt werden können.

Eine schon bekannte Technologie ist das schichtweise und / oder flächenweise Hinzufügen von Micro- bzw. Nanopulver. Hiermit können unterschiedliche Festigkeiten und Oberflächenbeschaffenheiten erreicht werden, die gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche ausgewählt sein können.

### **Designfindung der Einheitsgeometrie**

Es gibt sehr viele verschiedene Materialien, die schalldämpfende, also absorbierende Eigenschaften haben. Dies sind beispielsweise Kork, Balsa, Korallen, Substantia spongiosa, Tintenfischknochen, Schwertlilienblättern, Schwämmen, Polyurethanschäume, Filz und Wolle. Diese bestehen aus ungezählten Strukturen wie Zellen,



Hohlräume, Kanäle, Filamente und Blasen. Dadurch ergeben sich ihre akustischen Eigenschaften. Viele dieser Materialien haben je nach ihrer Struktur charakteristische Absorptionseigenschaften in Abhängigkeit der Frequenz. Aus physikalischer bzw. werkstofftechnischer Sicht haben folgende Eigenschaften Einfluß auf die akustischen Eigenschaften: Strömungswiderstand, Tortuosität, Porosität, geometrischer Steifigkeit, viskoser Länge, Wärmeleitfähigkeiten, Elastizitätsmoduli, Querkontraktionszahlen, Verlustmoduli, Oberflächenbeschaffenheiten, Mikroporositäten, Scharfkantigkeiten der Materials.

Ziel der vorliegenden Erfindung ist es, mit Hilfe des Rapid Prototyping Verfahrens reproduzierbare, gezählte Einheitsgeometrien aus vielen Anwendungen mit speziellen akustischen Eigenschaften zu imitieren. Durch das ausgewählte kombinieren dieser Einheitsgeometrien in einer Struktur, kann dann eine selektive Schallabsorption in Abhängigkeit der Frequenz erzielt werden.

Ferner ist es durch die reproduzierbare Herstellung der schallabsorbierenden Struktur möglich, mit der gezielten methodischen Variation von bestimmten Parametern (beispielsweise Form, Größe Oberflächenbeschaffenheit, etc.. der Einheitsgeometrie), und der anschließenden Messung von akustisch sinnvollen Eigenschaften (beispielsweise Absorptionskoeffizient, Strömungswiderstand, viskose Länge, etc...) der Struktur, die Einflüsse der Parameter auf das akustische Verhalten festzustellen. Beispielsweise können mehrere schallabsorbierende Strukturen aus immer der selben Einheitsgeometrie hergestellt werden, und danach vermessen werden. Durch die methodische Variation der Einheitsgeometrie und der neuerlichen Herstellung mit anschließender Messung können so Einheitsgeometrien mit bestimmten akustischen Eigenschaften entwickelt werden. Durch die systematische Kombination unterschiedlicher Einheitsgeometrien und der anschließenden Vermessung könne Wechselwirkungen zwischen den Einheitsgeometrie festgestellt werden.

Denkbar ist auch, dass durch die geometrische Überlagerung mehrerer Einheitsgeometrien, die für ein akustisches Problem ausgewählt wurden, eine neue Einheits-

geometrie erstellt wird, die den gleichen akustischen Anforderungen entspricht, wie die Summe der ursprünglichen Einheitsgeometrien.

Im Zuge der systematischen Entwicklung der Einheitsgeometrien ist es möglich Daten über die Einflussgrößen auf akustische Eigenschaften zu ermitteln. Dies kann für die Entwicklung von Materialmodellen genützt werden. Nachdem gängige akustische Materialien wie Polyurethanschäume, Metallschäume und andere eine statistische Verteilung aus ungezählten Geometrien aufweisen, war eine genaue Entwicklung von Materialmodellen, basierend auf die genauen Einflussgrößen, bisher noch nicht möglich. Durch die reproduzierbare Herstellung und Möglichkeit der exakten Variation der Einflussgrößen der Einheitsgeometrien wird somit eine Entwicklung von genaueren Materialmodellen möglich. Nachdem die Simulation von akustischen Anwendungen immer wichtiger wird, können die entwickelten Materialmodelle für die Auslegung von schallabsorbierenden Materialien genützt werden.

Im Zuge dieser Simulationen kann die vorliegende Erfindung auch verwendet werden, um im frühen Entwicklungsstadien als Prototyp für in Serie gehende akustischer Materialien zu dienen. Durch die relativ rasche Herstellung, und der schnellen Auslegung können somit rascher Messungen an Prototypen durchgeführt werden, und damit Erkenntnisse für die weitere Auslegung gefunden werden.

### **Verfahren zu Herstellung**

Fig. 9 stellt als Flussdiagramm das Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierendes Werkstückes, das eine schallabsorbierende Struktur (1a, 1b) mit vorgebarerer Geometrie beinhaltet, wobei besagte Struktur aus abgezählten und geometrisch definierten mikro- und makroskopischen Einheitsgeometrien komponiert ist, die jeweils gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche ausgeführt werden, schematisch dar.

Im Schritt (a) wird die akustische Randbedingung vorgegeben. Dies kann zum Beispiel der Schallabsorptionskoeffizient in Abhängigkeit der Frequenz und  $\theta$  oder in Abhängigkeit des Einfallwinkels sein. Ebenfalls ist denkbar, dass sich die akustischen

Randbedingungen lokal, also in Bezug auf die Oberfläche des Werkstückes flächenweise, ändern. Mit (I) wird die Möglichkeit aufgezeigt, die akustischen Randbedingungen aus einer CAD Simulation zu entnehmen.

Im Schritt (b) werden die Einheitsgeometrien für die Erfüllung der akustischen Randbedingungen aus einer Datenbank (g) ausgewählt. Diese werden in Anzahl, ihrer Position in der Struktur und deren Kombination ausgewählt. Näheres zur Datenbank (g) wird weiter unten detailliert beschrieben.

Im Schritt (c) werden die ausgewählten Einheitsgeometrien in eine übergeordnete Struktur zusammengesetzt und in die Werkstückgeometrie eingebettet um als dreidimensionales Datenformat dargestellt zu werden. Wahlweise können in die Werkstückgeometrie Bauteil Dämmung (II), Bauteil Geometrie (III) und Bauteil Befestigungen (IV) inkludiert werden, wobei die Daten wahlweise aus einer CAD Simulation herangezogen werden. Es ist anzumerken, dass eine Bauteildämmung durch eine dickere Ausführung des Gehäuses erreicht werden kann.

Im Schritt (d) wird das vorher erstellte dreidimensionale Datenformat beispielsweise durch ein additives Aufbauverfahren, wie das Rapid Prototyping Verfahren schichtweise (16) hergestellt.

Optional können die folgenden Schritte (e) und (f) ausgeführt werden.

Im Schritt (e) wird das erstellte Werkstück gemessen. Dies können beispielsweise die Absorptionsfähigkeit, das Dämmungsverhalten, den Strömungswiderstand, die Tortuosität, die Porosität, die geometrische Form oder die viskose Länge sein.

Im Schritt (f) werden die Daten, Parameter und Messergebnisse aus den Schritten (a), (b), (c) und (e) in einem lernenden Ursachen-Wirkungs-Algorithmus, wie beispielsweise eines neuronalen Netzwerkes verwertet und in der Datenbank (g) gespeichert. Dieser Algorithmus kann auch bei der systematischen Entwicklung von Einheitsgeometrien und Materialmodellen herangezogen werden, wie weiter oben erwähnt.

In der Datenbank (g) können die Daten, Parameter und Messergebnisse des ge-

samten Verfahrens gespeichert werden. Somit können Informationen über notwendige Einheitsgeometrien, deren Kombination in Gesamtgeometrien mit jedem neuen Herstellungszyklus erweitert und verbessert werden. Die Datenbank kann natürlich mit schon bestehenden Datenbanken über akustische Materialien und mit bestehenden Simulationstools verknüpft werden.

### **Sonstiges**

Die Erfindung beschränkt sich nicht nur auf die obige Beschreibung, sondern bezieht sich auch auf nicht beschriebene Analogien, die in den Ansprüchen erwähnt sind.

## Patentansprüche

1. Selektiv schallabsorbierendes Werkstück, bestehend aus einem formgebenden Gehäuse (3a, 3b) und eine darin befindliche schallabsorbierende Struktur (1a, 1b), dadurch gekennzeichnet, dass dieses durch die gemeinsame schichtweise (16) Herstellung besagter Komponenten mit einem additiven Aufbauverfahren, wie beispielsweise das Rapid Prototyping Verfahren hergestellt ist.

2. Selektiv schallabsorbierendes Werkstück nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die schallabsorbierende Struktur (1a, 1b) aus abgezählten, geometrisch definierten und reproduzierbaren mikro- und makroskopischen Einheitsgeometrien (4a, 4b, 4c) komponiert ist, um bestimmte Frequenzbereiche zu absorbieren.

3. Selektiv schallabsorbierendes Werkstück nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, dass besagte Struktur (1a, 1b) wahlweise ohne formgebendes Gehäuse (3a, 3b) ausgeführt ist.

4. Selektiv schallabsorbierendes Werkstück nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, dass besagtes Gehäuse wahlweise, um eine nach einem akustischen Problem ausgelegte Dämmung zu erzielen, in dessen Dicke (3b) variierend ausgeführt ist.

5. Selektiv schallabsorbierendes Werkstück nach Anspruch 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass es wahlweise Befestigungsmechanismen (2) aufweist.

6. Selektiv schallabsorbierendes Werkstück nach Anspruch 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass es wahlweise durch die exakte Anfertigung von Einheitsgeometrien mit speziellen Einmündungswinkeln in der Nähe der schallseitigen Oberfläche (4a) eine bestimmte Absorptionseigenschaften in Abhängigkeit des Schallwelleneinfallswinkels (5a, 5b) aufweist.

7. Selektiv schallabsorbierendes Werkstück nach Anspruch 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die schallabsorbierende Struktur in Bezug auf die Werkstückoberfläche wahlweise flächenweise unterschiedlich ausgeführt ist, um lokal unterschiedliche akustische Eigenschaften des Werkstückes (1a, 1b), beispielsweise in Abhängigkeit der Frequenz und / oder in Abhängigkeit des Schalleinfallswinkels (5a, 5b), zu erhalten.

8. Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die besagte Einheitsgeometrien (4a, 4b, 4c) dreidimensionale Zellen in geometrischen Formen wie Tetraeder (6), drei-, vier-, bzw. mehrseitiges Prisma (8, 9, 10), Oktaeder (11), rhombischer Dodektaeder (12), pentagonaler Dodektaeder (13), Tetrakaidektaeder (14), Ikosaeder (15) sind, die in ihren Kantenlängen (7), ihren Kattendurchmessern und in Anzahl ihrer geschlossenen bzw. offenen Seitenflächen gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche ausgeführt sind.

9. Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die besagten Einheitsgeometrien (4a, 4b, 4c) Kanäle (17) sind, wobei deren Achsenlinien (18) wahlweise Richtungsänderungen aufweisen, und die Grundflächen (Fig. 6) der Erzeugenden der Mantelflächen (19) besagter Kanäle in ihrer Geometrie und Fläche variieren können, wobei die genannten Kanäle gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche und /oder nach Gesichtspunkten der Belüftung ausgeführt sind.

10. Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass besagte Kanäle in dreidimensionalen Formen wie einer Helix, einer Doppelhelix, in Schraubenform, in Schneckenform, in Spiralform (27) oder in Form einer Wendelfläche gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche und / oder nach Gesichtspunkten der Belüftung ausgeführt werden.

11. Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 9 und 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Grundflächen der Erzeugenden der Mantelflächen (19) besagter Kanäle in Abhängigkeit der Länge ihrer Achsenlinien (18) in Fläche und in Formen wie zum Beispiel eines Kreises (22), einer Ellipse (23), eines Dreiecks, eines Vierecks (24), eines Vielecks (25), einer Sternform (26) variieren und gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche und /oder nach Gesichtspunkten der Belüftung gestaltet sind.

12. Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 1 bis 7, dadurch ge-

kennzeichnet, dass die besagten Einheitsgeometrien (4a, 4b, 4c) Hohlräume (20) sind, die mit jeweils mindestens einer Einmündung (21) zur gesamten Struktur verbunden sind, wobei Volumina und Einmündungsgeometrien gezielt nach Gesichtspunkten der Resonanzabsorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche ausgeführt sind.

**13.** Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die besagten Einheitsgeometrien (4a, 4b, 4c) Filamenten (28) sind, die in ihren Abständen, Längen, Durchmessern und ihren Winkel (29) zueinander gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche ausgeführt sind.

**14.** Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die verwendeten Einheitsgeometrien (4a, 4b, 4c) in ihren Oberflächenbeschaffenheiten, Mikroporositäten und Scharfkantigkeiten gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche ausgelegt sind.

**15.** Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass durch die geometrische Überlagerung mehrerer Einheitsgeometrien, die für ein akustisches Problem ausgewählt wurden, eine neue Einheitsgeometrie erstellt wird, die den gleichen akustischen Anforderungen entspricht, wie die Summe der ursprünglichen Einheitsgeometrien.

**16.** Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 8 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass sich die verwendeten Einheitsgeometrien durch die gezielte Veränderung ihrer Geometrie in ein oder mehreren Eigenschaften wie spezifischer Strömungswiderstand, spezifischer Tortuosität, spezifischer Porosität, spezifischer geometrischer Steifigkeit oder spezifischer viskoser Länge unterscheiden.

**17.** Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 8 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass für die Auslegung der Einheitsgeometrien Zellen, Hohlräume, Kanäle, Filamente und Blasen von bekannten Strukturen wie von Kork, Balsa, Korallen, Substantia spongiosa, Tintenfischknochen, Schwertlilienblättern, Schwämmen, Poly-

urethanschäume, Filz, und Wolle als Referenz nachgebildet werden.

**18.** Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass wahlweise während der Herstellung mittels Rapid Prototyping die verwendeten Werkstoffe schichtweise (16) und / oder Flächenweise variieren, wobei deren Wärmeleitfähigkeiten, Elastizitätsmoduli, Querkontraktionszahlen und Verlustmoduli gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche und / oder Oberflächeneigenschaften ausgewählt sind.

**19.** Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 1 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass wahlweise während der schichtweisen (16) Herstellung mittels Rapid Prototyping in den verwendeten Werkstoff Micro- bzw. Nanopulver gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche eingebettet sind.

**20.** Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 1 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass es zur Entwicklung von Materialmodellen für poröse und / oder dämmende Materialien dient.

**21.** Selektiv schallabsorbierendes Material nach Anspruch 1 bis 20, dadurch gekennzeichnet, dass es als Prototyp bei der Entwicklung bzw. Auslegung akustischer Materialien für Serienprodukte dient.

**22.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes, das eine schallabsorbierende Struktur (1a, 1b) mit vorgebbarer Geometrie beinhaltet, dadurch gekennzeichnet, dass besagte Struktur aus abgezählten und geometrisch definierten mikro- und makroskopischen Einheitsgeometrien komponiert ist, die jeweils gezielt nach Gesichtspunkten der Absorption von Schallwellen bestimmter Frequenzbereiche ausgeführt werden, mit folgenden Schritten:

- (a) akustische Randbedingungen für das Bauteil werden vorgegeben;
- (b) aus einer Datenbank (g) werden für das akustische Problem eine oder mehrere Einheitsgeometrien in Anzahl, in ihrer Kombination und in ihrer Position in der Gesamtstruktur ausgewählt;



- (c) die vorher bestimmten Einheitsgeometrien werden in eine übergeordnete Werkstückgeometrie eingebettet und gemeinsam in ein dreidimensionales Datenformat gebracht;
- (d) das vorher erstellte Datenformat wird beispielsweise durch ein additives Aufbauverfahren, wie das Rapid Prototyping Verfahren schichtweise (16) hergestellt;
- (e) wahlweise werden messbare Eigenschaften des erhaltenen Werkstückes gemessen;
- (f) wahlweise werden Parameter und Ergebnisse aus den Verfahrensschritten (b), (c) und (e) verwertet und in der Datenbank (g) mit schon vorhandenen Daten implementiert.

**23.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass besagte akustische Randbedingungen im Verfahrensschritt (a) wahlweise aus einer akustischen CAD Simulation (I) entnommen werden.

**24.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 22 und 23, dadurch gekennzeichnet, dass besagte akustische Randbedingungen im Verfahrensschritt (a) das Absorptionsverhalten in Abhängigkeit der Frequenz aufweisen.

**25.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 22 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass besagte akustische Randbedingungen im Verfahrensschritt (a) das Absorptionsverhalten in Abhängigkeit des Einfallwinkels aufweisen.

**26.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 22 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass besagte akustische Randbedingungen im Verfahrensschritt (a) in Bezug auf die Werkstückoberfläche flächenweise variieren.

**27.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 22 bis 26, dadurch gekennzeichnet, dass besagte Werkstückgeometrie im Verfahrensschritt (c) eine übergeordneten Bauteilgeometrie (III) aufweist.

**28.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass besagte Bauteilgeometrie Funktionskomponenten, wie beispielsweise einen Befestigungsmechanismus (IV) aufweist.

**29.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 27 und 28, dadurch gekennzeichnet, dass besagte Bauteilgeometrie lokal solide Oberflächen mit signifikanter Dicke beinhaltet, die angepasst an die akustischen Randbedingungen unterschiedliche Wandstärken zur Geräuschkämpfung (II) aufweisen.

**30.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass besagte Messungen im Verfahrensschritt (e) die Absorptionsfähigkeit, das Dämpfungsverhalten, den Strömungswiderstand, die Tortuosität, die Porosität, die geometrische Form oder die viskose Länge beinhalten.

**31.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 22 bis 30, dadurch gekennzeichnet, dass sich die verwendeten Einheitsgeometrien durch die gezielte Veränderung ihrer Geometrie in ein oder mehreren Eigenschaften wie spezifischer Strömungswiderstand, spezifischer Tortuosität, spezifischer Porosität, spezifischer geometrischer Steifigkeit oder spezifischer viskoser Länge unterscheiden.

**32.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 22 bis 31, dadurch gekennzeichnet, dass für die Auslegung der Einheitsgeometrien Zellen, Hohlräume, Kanäle, Filamente und Blasen von bekannten Strukturen wie von Kork, Balsa, Korallen, Substantia spongiosa, Tintenfischknochen, Schwertlilienblättern, Schwämmen, Polyurethanschäume, Filz, und Wolle als Referenz herangezogen werde.

**33.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 22 bis 32, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Überlagerung mehrerer Einheitsgeometrien, die für ein akustisches Problem ausgewählt wurden, eine neue Einheitsgeometrie erstellt wird, die den gleichen akustischen Anforderungen entspricht, wie die Summe der ursprünglichen Einheitsgeometrien.

**34.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 22 bis 33, dadurch gekennzeichnet, dass besagte Daten im Verfahrensschritt (f) im Rahmen eines lernenden Ursachen-Wirkungs-Algorithmus, wie beispielsweise eines neuronalen Netzwerkes verwertet werden.

**35.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 22 bis 34, dadurch gekennzeichnet, dass zur systematischen Entwicklung von Materialmodellen für poröse und / oder dämmende Materialien dient.

**36.** Verfahren zur Herstellung eines selektiv schallabsorbierenden Werkstückes nach Anspruch 22 bis 35, dadurch gekennzeichnet, dass es als Prototypenherstellung bei der Entwicklung bzw. Auslegung akustischer Materialien für Serienprodukte dient.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein selektiv schallabsorbierendes Werkstück und dessen Verfahren zur Herstellung, bestehend aus einer mit abgezählten und geometrisch definierten mikro- und makroskopischen Einheitsgeometrien komponierten, reproduzierbaren und selektiv schallabsorbierenden Struktur, und wahlweise bestehend aus einem formgebenden, mindestens einseitig offenen, soliden Gehäuse mit Befestigungsmechanismen. Das Werkstück wird kompakt, gemeinsam mit allen Bestandteilen mit einem additiven Aufbauverfahren, beispielsweise Rapid Prototyping, hergestellt.

Durch die gezielte Auswahl der Einheitsgeometrien im Werkstück und an dessen Oberfläche, können einige für akustische Anwendungen nutzbringende Funktionen realisiert werden: Erstens ist es möglich einen für die Anwendung benötigten Absorptionskoeffizient in Abhängigkeit der Frequenz zu erwirken. Zweitens sind über die Oberfläche veränderliche Absorptionseigenschaften realisierbar. Drittens kann der Absorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Schalleinfallwinkels methodisch gestaltet werden. Viertens kann das Werkstück mit soliden Schichten unterschiedlicher Dicke ausgeführt werden, um spezielle Dämmungseigenschaften zu erwirken.

Ferner ermöglicht das vorliegenden Verfahren eine systematische Entwicklung von Materialmodellen poröser Stoffe, und von selektiv schallabsorbierenden Einheitsgeometrien.

Fig. 1

Fig. 1

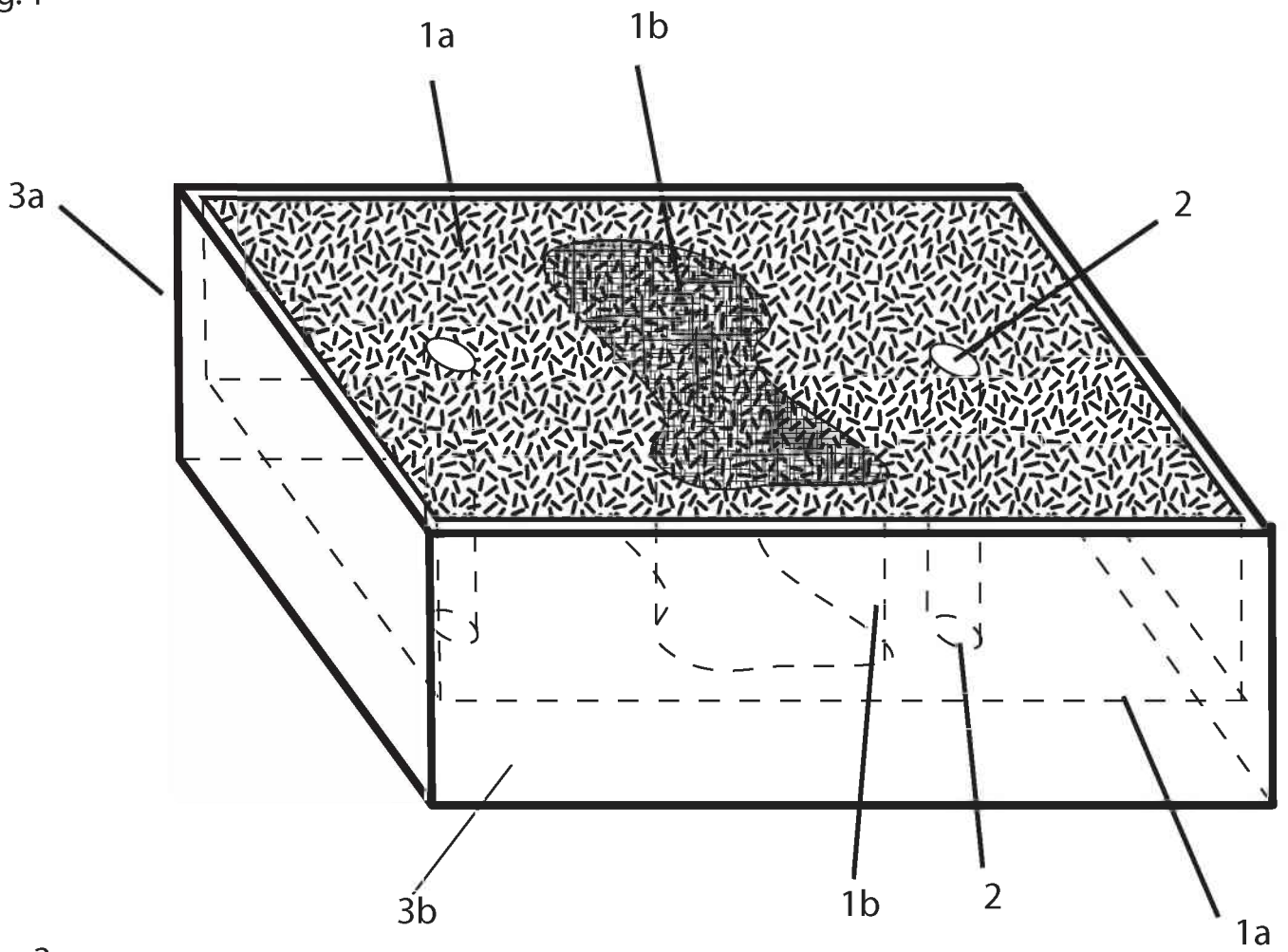


Fig. 2

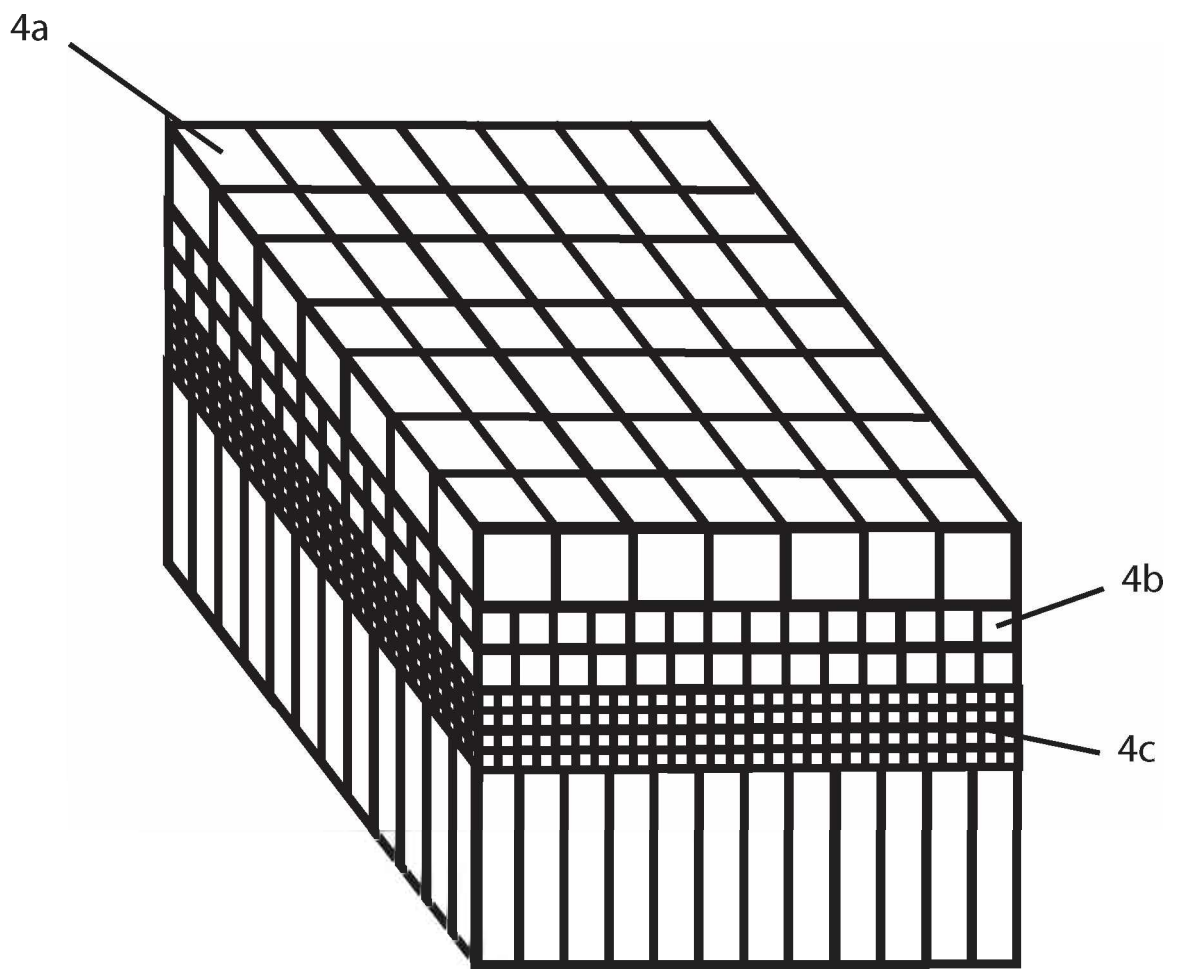


Fig.3

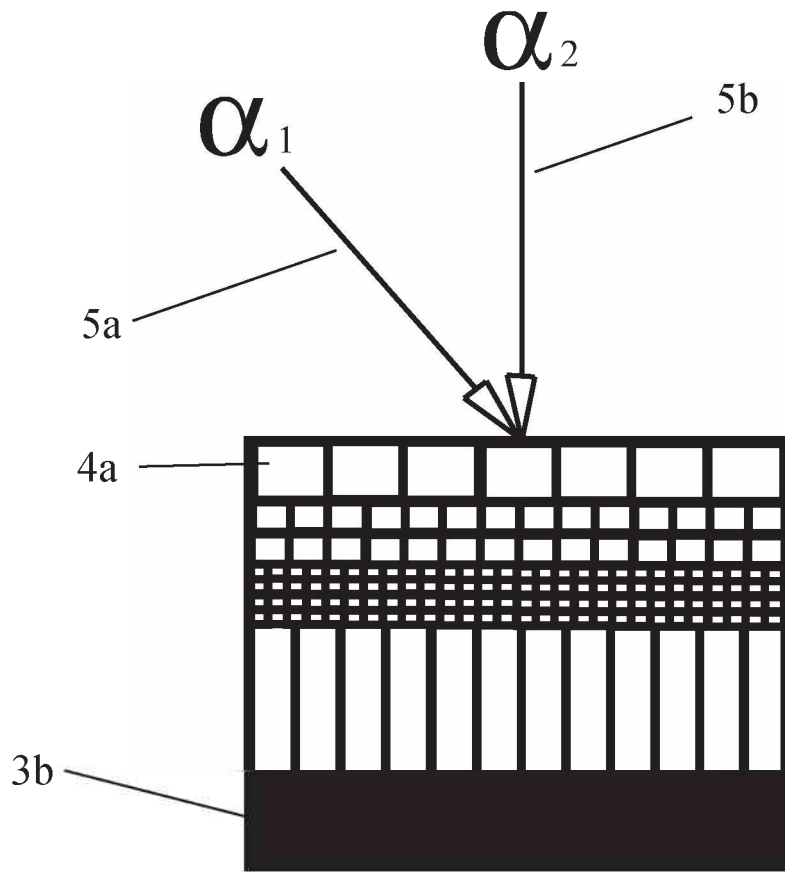


Fig.4

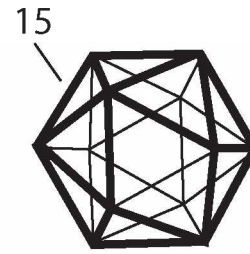
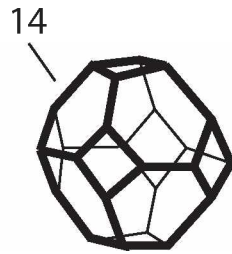
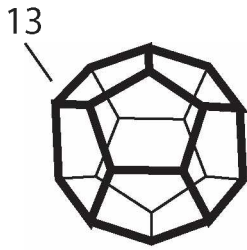
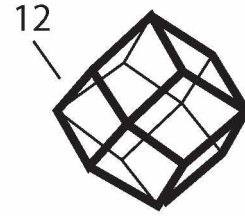
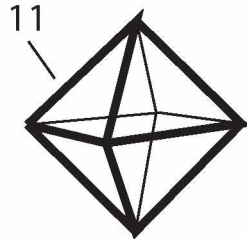
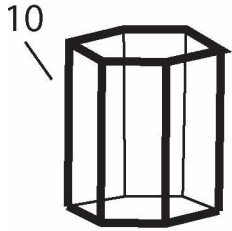
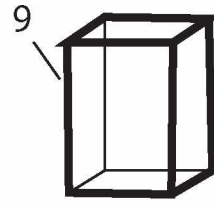
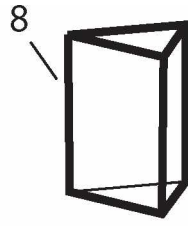
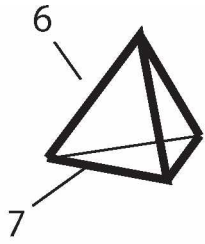


Fig.6

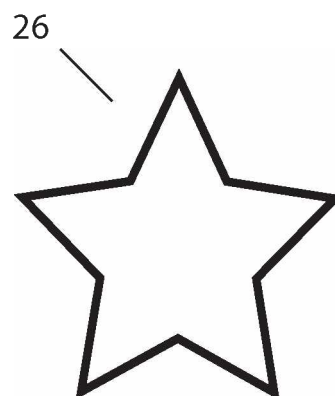
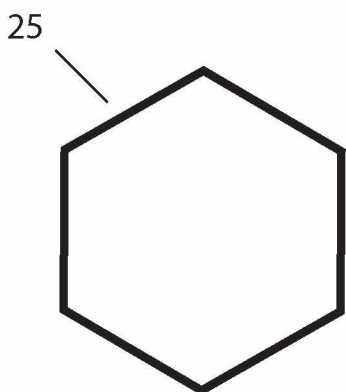
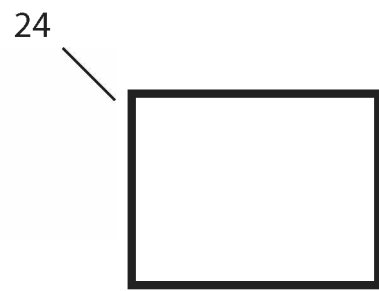
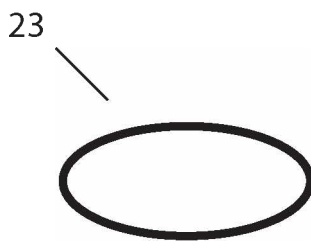
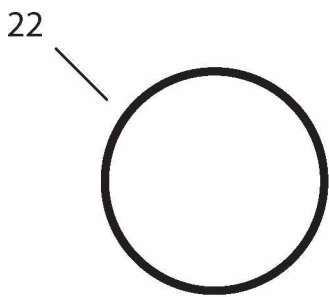


Fig. 5

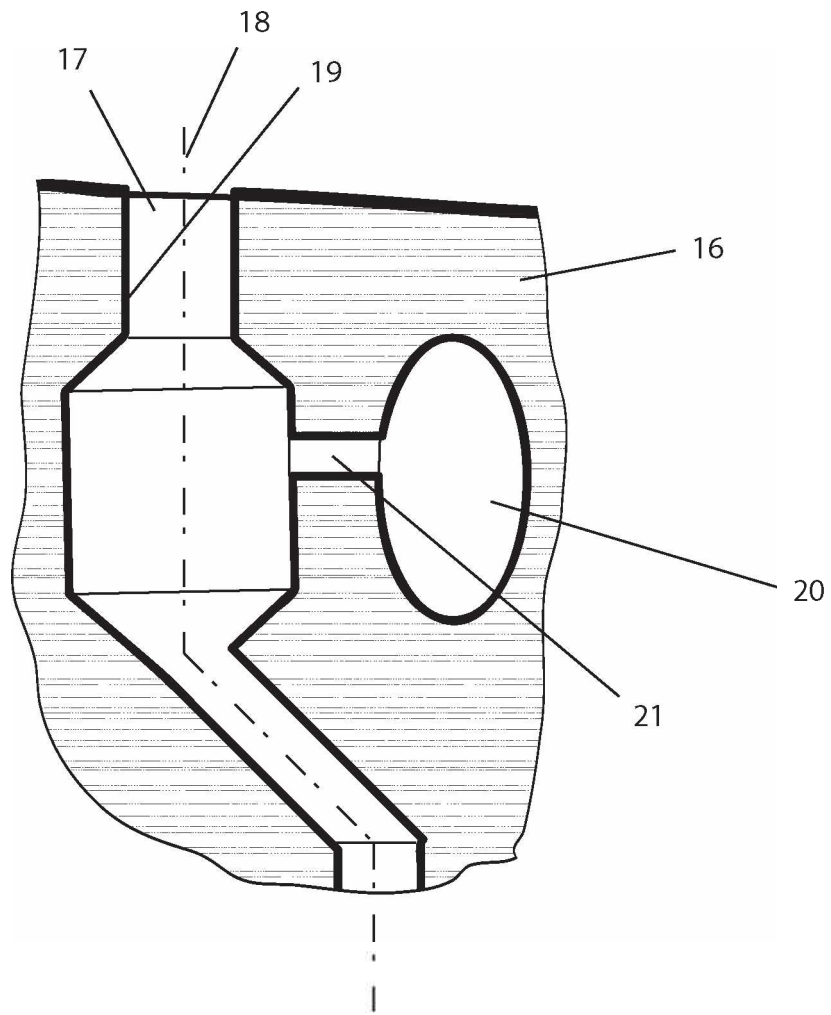


Fig. 7

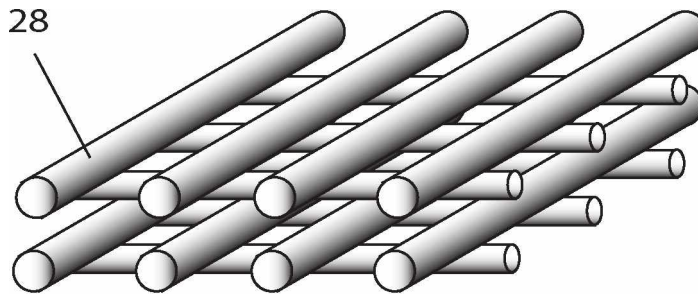


Fig. 8

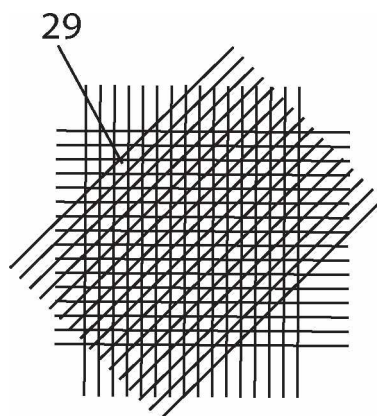




Fig. 9

