

Diplomarbeit

Nr. KTK/27/2008

Entwicklung und Bau von Motorbauteilen in Metallschaum- Bauweise mit dem Ziel verbesserter akustischer Eigenschaften

eingereicht im
Fachbereich Maschinenbau und Kraftfahrzeugtechnik der Westsächsischen
Hochschule Zwickau
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: cand. ing.

**L o h s e ,
C h r i s t i a n**

Geb. am: 30.03.1984

Studiengang Kraftfahrzeugtechnik
Studienrichtung Kraftfahrzeuge

Auftraggeber:	Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU Chemnitz
Ausgegeben von:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Foken Prof. Dr.-Ing. Helmut Eichert
Betreuer des Auftraggebers:	Dr.-Ing. Thomas Hipke Dipl.-Ing. Rocco Thümmler

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur angefertigt habe. Weiterhin versichere ich, dass diese Diplomarbeit noch keiner anderen Prüfungskommission vorgelegen hat.

Zwickau im November 2008

Christian Lohse

Autorenreferat

Die Arbeit befasst sich mit dem Einsatz von Metallschaum in Kraftfahrzeugmotoren. Durch Experimente konnten in der Vergangenheit gute Dämpfungseigenschaften hochporöser Metalle nachgewiesen werden. Daraus resultiert die Annahme, dass der Einsatz dieser Werkstoffe an Kraftfahrzeugmotoren, durch Fertigung und Austausch bestehender Bauteile, akustisch verbesserte Eigenschaften des Antriebsaggregates erwarten lässt. Um diese Annahme experimentell zu prüfen, wurde ein Bauteil eines Motors mit großer Hüllfläche favorisiert, das gleichzeitig im Betrieb geringen Belastungen ausgesetzt ist. Die Wahl fiel dabei auf eine Ölwanne eines PKW-Ottomotors. Da keine konstruktiven Änderungen am bestehenden Versuchsfahrzeug vorgenommen werden konnten, wurden drei Varianten entworfen, die der Geometrie des Originalbauteils bestmöglich nachempfunden wurden. Nach anschließender simulativer Modalanalyse mit einem FEM-Programm und Variantenvergleich nach VDI 2225 wurde die beste Variante vollständig konstruktiv umgesetzt und aus AFS-Platten gefertigt. Im Anschluss wurden mittels Schalldruckpegelmessung im Nahfeld und Intensitätssondenmessung über einem genormten Terzspektrum die jeweiligen Schallpegel der Prototypen- und Originalwanne erfasst, ausgewertet und verglichen. Dabei konnte gezeigt werden, dass im niederfrequenten Bereich Vorteile für den Schaum zu erkennen sind, die sich jedoch nicht für den hochfrequenten Bereich bestätigt haben. Die guten Dämpfungseigenschaften konnten vor allem durch die Verringerung des Schalldruckpegels, vorwiegend hervorgerufen durch die Ölpumpe, bei niedrigen Drehzahlen nachgewiesen werden.

Inhalt

I	Verzeichnis der Bilder.....	I
II	Verzeichnis der Tabellen	III
III	Verzeichnis der Anlagen der CD	IV
IV	Kurzzeichenverzeichnis.....	V
Vorwort		
1	Einleitung.....	2
2	Methode der Lösung.....	3
3	Theoretische Untersuchungen	4
3.1	Geräuschquellen am Fahrzeug und übliche Schallpegel	4
3.2	Ursachen der Geräuschentwicklung	6
3.3	Stand der Technik der Geräuschminderung.....	8
3.3.1	Konstruktive Möglichkeiten an Bauteilen	8
3.3.2	Dämpfung und Dämmung durch gezielte Werkstoffwahl	9
3.3.3	Kapselung des Motorraums.....	12
3.3.4	Aktive Dämpfung	12
3.4	Messverfahren zur Ermittlung der Fahrzeuggeräuschemission und Bauteileigenschaften.....	13
3.4.1	Beschleunigte Vorbeifahrt nach ISO 362.....	13
3.4.2	Arraytechniken.....	14
3.4.3	Modalanalyse	17
3.4.4	Schallintensitätsmessung über genormtem Terzspektrum ..	18
3.5	Stand der Technik von Metallschaum	20
3.5.1	Allgemeines zu Metallschaum	20
3.5.2	Eigenschaften von Metallschäumen	21
3.5.3	Herstellung von Metallschaum.....	25
3.5.3.1	Metallschaumzusammensetzung	25
3.5.3.2	Halbzeugherstellung.....	26
3.5.3.3	Schäumverfahren	28
3.5.3.4	Einflussfaktoren auf das Schäumverfahren	29
3.6	Wahl des Teils und des Fahrzeugs/Motors	30
3.7	Definition der Anforderungen an die Metallschaumstruktur.....	33

3.8	Lösungskonzepte und deren Bewertung.....	40
3.8.1	Aluminium-Aluminiumschaum-Verbundbauweise.....	40
3.8.2	Schäumen in eine gefräste Graphit-Form.....	41
3.8.3	Schäumen in eine geschweißte Stahl-Form	43
3.8.4	Simulation der Varianten	44
3.8.4.1	Allgemeines zur Simulation	44
3.8.4.2	Originalwanne.....	45
3.8.4.3	Variante 1	47
3.8.4.4	Variante 2	48
3.8.4.5	Variante 3	50
3.8.4.6	Auswertungen der Simulationsergebnisse	51
3.8.5	Bewertung der Varianten	54
4	Experimentelle Untersuchungen und Maßnahmen	57
4.1.	Bau des Prototyps	57
4.2	Prüfaufbau und Versuchsdurchführung.....	65
4.2.1	Messung auf Scheitelrollenprüfstand	65
4.2.1.1	Schleppläufe über Drehzahlrampe	68
4.2.1.2	Schleppläufe über konstante Drehzahlen.....	68
4.2.2	Messung mittels Schallintensitätssonde.....	69
5	Diskussion der Ergebnisse	71
5.1	Konstruktionsbeschreibung.....	71
5.2	Auswertung der Messergebnisse	72
5.2.1	Schleppläufe auf Scheitelrollenprüfstand.....	72
5.2.2	Schallintensitätssondenmessung	76
5.3	Schlussfolgerungen.....	78
6	Zusammenfassung.....	80
	Literaturverzeichnis	83

I Verzeichnis der Bilder

Bild	Titel	Seite
1	Ablauf des Entwicklungsprozesses	3
2	Teilschallquellen im Motorraum und deren Entstehungsmechanismen	4
3	Entwicklung der Geräuschemission für ausgewählte Fahrzeugtypen	5
4	Geräuschquellen am und im Motor und dazugehörige Frequenzbereiche	7
5	Aufbau eines Aluminiumschaum-Prototyps einer Ölwanne	10
6	Schematischer Prüfaufbau einer Vorbeifahrt nach ISO 362	13
7	Soundmap der ermittelten Schallfeldverteilung an den Windangriffsflächen eines PKW im Windkanal	14
8	Hauptschallquellen-Lokalisierung mittels Beamforming	16
9	Versuchsaufbau einer Modalanalyse am Beispiel eines Audi A2 Space-Frame-Karosserie	17
10	Prinzipielle Darstellung eines Spannung-Dehnung-Diagramms von Metallschäumen	21
11	Schallabsorptionsgrad in Abhängigkeit der Frequenz und Wanddicke	22
12	Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Dichte	24
13	Entwicklung der Aluminiumschaumkosten	24
14	Schematischer Verfahrensablauf des pulver-schmelzmetallurgischen Schäumverfahrens	28
15	Original Ölwanne	31
16	BMW Mini Cooper	31
17	Vergleich gemittelter Verlustfaktoren verschiedener Werkstoffe	33
18	AFS-Platte	39
19	Skizze einer Graphit-Schäumform	41
20	Nachmodellierter Originalölwanne nach Materialvergabe im CATIA V5	45
21	Nachmodellierter Originalölwanne vernetzt im ANSYS 11	45
22	Schalenelemente Variante 1 im ANSYS 11	46
23	Variante 1 vernetzt im ANSYS 11	47
24	Variante 2 vernetzt im ANSYS 11	48
25	Eingesetzte Stahlhülsen im ANSYS 11	48

26	Variante 3 vernetzt im ANSYS 11	49
27	Schweißprobe, Kehlnaht	56
28	Schweißprobe, I-Naht	56
29	Gelaserter Aluminiumflansch aus AlMg3	57
30	Werkzeug für Biege- und Schweißvorgang der U-Hülsen	57
31	Anwendung des Werkzeugs vor dem Schweißvorgang	58
32	T-Hülse aus Stahl für Ölablassöffnung	60
33	Einspannung des Biegehalbzeugs	61
34	Fertiggestellte AFS-Platten	61
35	Fertiggestellte U-Hülsen	61
36	Anordnung aller Einzelteile vor dem Schweißvorgang	61
37	Aufgespannte Baugruppe vor dem Schweißvorgang	62
38	Gerade Wandelemente mit Flansch verschweißt	62
39	Schräge Wandelemente mit Bodenplatte verschweißt	62
40	Zusammengesetzte Einzelbaugruppen	63
41	Fertiger Prototyp	65
42	Fertiger Prototyp	65
43	Fahrzeugbefestigungspunkte	66
44	Kunstkopf Eugen HMS III	66
45	Mikrofon Wanne	67
46	Mikrofon Radkasten	67
47	Mikrofon Innenraum	67
48	Frontend SQLab II mit Software ArtemiS 9	67
49	Unter dem Fahrzeug installiertes Gitter	69
50	Messpunkte am Abstandsgitter	70
51	Schalldruckpegel über Motordrehzahl für 8. Motorenordnung	73
52	Schalldruckpegel über Motordrehzahl für 16. Motorenordnung	72
53	Schalldruckpegel über Terzspektrum am Radkasten des PKW	74
54	Schalldruckpegel über Terzspektrum unter der Ölwanne des PKW	74
55	Campbell-Diagramm der Motorordnungen unter der Ölwanne des PKW	75
56	Pegel für Messpunkte über gesamtem Terzspektrum	76
57	Schallleistungspegel über Terzspektrum für alle Messpunkte	76
58	Pegel über Terzspektrum für Messpunkt R2C1	77

II Verzeichnis der Tabellen

Tafel	Titel	Seite
1	Werkstoffkenngrößen von Aluminiumschaum	21
2	Anforderungsliste des Ölwanneprototyps	32
3	Eigenschwingformen und dazugehörige Eigenfrequenzen	47
4	Variantenbewertung der Prototypenfertigung	50
5	Variantenbewertung einer Serienfertigung	51
6	Messungen Verfahren 1 (definierte Rampe)	70
7	Messungen Verfahren 2 (feste Drehzahlen)	71

III Verzeichnis der Anlagen der CD

Anlage Titel

- 1 Konstruktionszeichnungen und Stückliste der Prototypenteile
- 2 Konstruktionszeichnungen und Stückliste des Biegewerkzeugs
- 3 Berechnungen
- 4 Abbildungen aller Eigenschwingformen aus der Simulation
- 5 Messwerttabellen und Diagramme der Scheitelrollenprüfstandsmessung
- 6 Messwerttabellen und Diagramme der Intensitätssondenmessung

IV Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
D	-	Dämpfung
$E_{Flansch}$	$\frac{N}{mm^2}$	Elastizitätsmodul des Flanschs
E_{Foam}	$\frac{N}{mm^2}$	Elastizitätsmodul des Schaums
E_{Huelse}	$\frac{N}{mm^2}$	Elastizitätsmodul der U-Hülsen
E_{Deck}	$\frac{N}{mm^2}$	Elastizitätsmodul der Deckbleche
I	$\frac{W}{m^2}$	Schallintensität
I_o	$\frac{W}{m^2}$	Genormter Bezugs-Schallintensitätswert
$L_p(A)$	dB	A-bewerteter Schalldruckpegel
L_w	dB	Schallleistungspegel
$L_w(A)$	dB	A-bewerteter Schallleistungspegel
N_{Orig}	-	Knotenanzahl des Modells der Originalwanne
N_{Var1}	-	Knotenanzahl des Modells Variante 1
N_{Var2}	-	Knotenanzahl des Modells Variante 2
N_{Var3}	-	Knotenanzahl des Modells Variante 3
$Q^{-1}(p)$	-	Dämpfung in Abhängigkeit der Porosität
$b_{Flansch}$	mm	Gesamtbreite des Flanschs
$b_{Flansch_Wand}$	mm	Wandbreite des Flanschs
d	mm	Fräskopfdurchmesser
$d_{Aluhuelse}$	mm	Durchmesser der U-Hülsen
$d_{Flansch_Bohr}$	mm	Durchmesser der Befestigungsbohrungen

f_z	mm	Vorschub je Fräserzahn
n	-	Exponent Kennwert
$n_{Fräs}$	-	Drehzahl des Fräskopfs
m_{Orig_Mod}	g	Masse des Modells der Originalwanne
m_{Orig_real}	g	Masse der Originalwanne
m_{Var1}	g	Masse des Modells der Variante 1
m_{Var2}	g	Masse des Modells der Variante 2
m_{Var3}	g	Masse des Modells der Variante 3
$m_{Prototyp}$	g	Masse der Prototypenwanne
$t_{Flansch}$	mm	Wanddicke/Höhe des Flanschs
t_{Orig_Mod}	mm	Wanddicke des Modell der Originalwanne
$t_{Sandwich}$	mm	Wanddicke der Sandwiches
$t_{Stahlhülse}$	mm	Wanddicke der Stahlhülsen
v_c	$\frac{mm}{s}$	Werkstoffgebundene Schnittgeschwindigkeit beim Stirnfräsen
v_f	$\frac{mm}{min}$	Vorschub des Fräasers
z	-	Schwingungszahl
$z_{Fräs}$	-	Schneidenanzahl des Fräskopfs
Θ	$\frac{N}{mm^2}$	Druckfestigkeit
ε_1	-	Betrag der 1. Schwingungsamplitude
ε_2	-	Betrag der 2. Schwingungsamplitude
λ	$\frac{W}{mK}$	Wärmeleitfähigkeit
μ	-	Querkontraktionszahl
$\rho_{Flansch}$	$\frac{g}{cm^3}$	Dichte des Flanschs
ρ_{Foam}	$\frac{g}{cm^3}$	Dichte des Schaums

ρ_{Stahl} $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

Dichte des Stahls

Vorwort

Bei den Herrn Prof. Dr-Ing. Wolfgang Foken und Herrn Prof. Dr-Ing. Helmut Eichert möchte ich mich für die gute hochschulseitige Betreuung, die Bereitstellung des Themas meiner Diplomarbeit und die Ermöglichung der Experimente am Campus der Hochschule Zwickau bedanken.

Mein Dank gilt der gesamten Abteilung Leichtbau und Komponenten am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik am Standort Chemnitz für die Hilfe bei der Bearbeitung des Themas und das sehr gute Arbeitsklima. Besonderer Dank geht dabei an die Herrn Dr.-Ing. Thomas Hipke, Herrn Dipl.-Ing. Rocco Thümmler und Dipl.-Ing. Frank Schneider, die mir in jeder Situation hilfreiche Tipps und Unterstützung haben zukommen lassen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei den Mitarbeitern der Firma IAV GmbH in Chemnitz für die gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung des Versuchsfahrzeugs. Zusätzlich danke ich Herrn Dipl.-Ing. (FH) Marco Gnauck und Herrn M. Sc. Jörg Trautvetter für die Hilfe und die gemeinsame Durchführung der Experimente am Hochschulstandort.

Ebenfalls gilt mein Dank den Kollegen im Bereich Umformtechnik am Fraunhofer IWU für die Einweisung an den Maschinen und den nützlichen Tipps bei der Fertigung des Prototyps und den kompetenten Mitarbeitern der Firma STF Schweißtechnische-Fertigung in Chemnitz, die maßgeblich zur qualitativ hochwertigen Fertigstellung des Bauteils beigetragen haben.

1 Einleitung

Die Optimierung der Geräuschcharakteristik von Verbrennungsmotoren ist in den Entwicklungsabteilungen der Fahrzeughersteller und deren Zulieferern eine Herausforderung an die Akustikingenieure. Großflächige Strukturen wie Motorblock, Kettenschachtabdeckung, Steuerdeckel oder Ölwanne spielen bei der indirekten Geräuschenstehung eine dominante Rolle.

Der Einsatz neuer Werkstoffe, wie zum Beispiel Metallschäume, bietet interessante Möglichkeiten zur akustisch günstigen Beeinflussung der Körperschallweiterleitung und der Geräuschabstrahlung. Ziel der Diplomarbeit war es, an einem ausgewählten Beispiel die akustischen und mechanischen Eigenschaften von Metallschaumstrukturen im Vergleich mit Serienbauteilen zu untersuchen. In der Vergangenheit konnten die guten Dämpfungseigenschaften von Metallschäumen experimentell nachgewiesen werden. Auf Grund ihrer niedrigen spezifischen Dichte infolge ihrer porösen Struktur bieten sie Möglichkeiten für hochdämpfende Bauteile mit niedrigen Massen bei gleichzeitig komplexer Geometrie.

Als Bauteil wurde hier eine PKW-Ölwanne gewählt, welche zusammen mit drei verschiedenen Metallschaum-Varianten im CAD-Programm modelliert wurde. Zur Vorauslegung kam dabei eine simulative Modalanalyse mittels FEM zum Einsatz. Nach einem anschließenden Variantenvergleich wurde die favorisierte Variante vollständig konstruktiv umgesetzt und gefertigt. Es folgten zwei experimentelle Untersuchungen. Zum einen wurden mittels Scheitelrollenprüfstand die Schalldruckpegel im Nahfeld an fünf definierten Positionen erfasst und zum anderen mittels Schallintensitätssonde die Schallleistungspegel punktweise direkt unter der Wanne am Versuchsfahrzeug jeweils über einem genormten Terzspektrum über einer definierten Fläche gemessen.

2 Methode der Lösung

Der Ablauf des hier angewandten Entwicklungsprozesses wird in Bild 1 gezeigt. Darin sind die einzelnen Schritte, von der Idee über die Situationsanalyse hinweg, bei der diese Arbeit einsetzt, über die Ausarbeitung von Varianten hin zur vergleichenden Messung der Bauteile und die darauffolgende Zusammenfassung aufgezeigt.

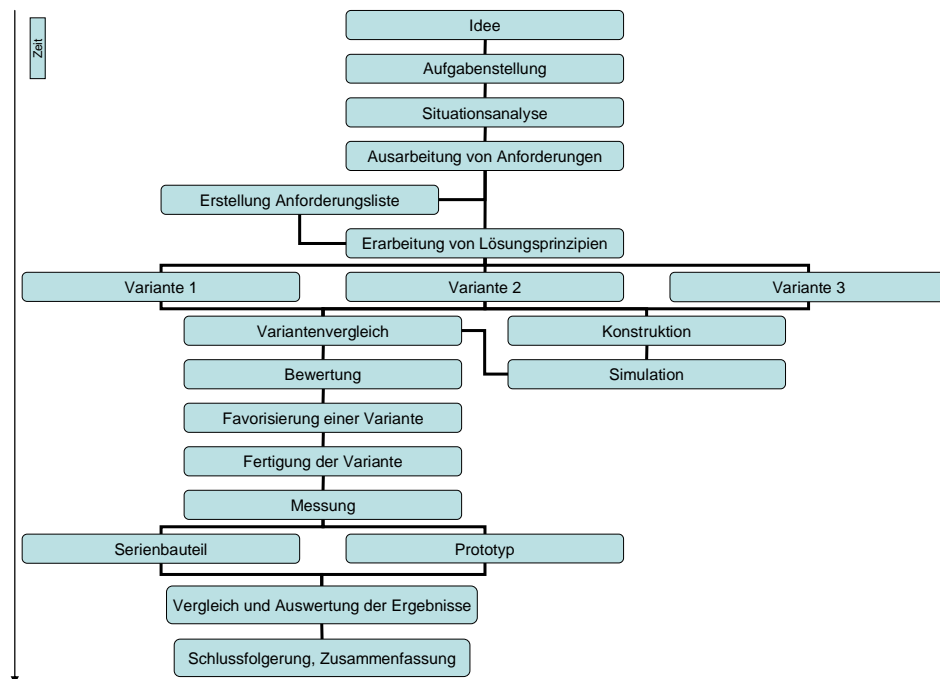


Bild 1: Ablauf des Entwicklungsprozesses

Zu erkennen ist nach der Situationsanalyse, welche die Kapitel 3.1 bis 3.5 darstellt, die Ausarbeitung der Anforderungen. Daraus resultierte die Erarbeitung der Lösungsprinzipien, zu der eng verknüpft die Erstellung der Anforderungsliste für das Metallschaum-Bauteil durchgeführt wurde. Im Anschluss erfolgte eine Grobkonstruktion, der drei hier entworfenen Varianten, mit anschließender Simulation, deren Ergebnisse in den Variantenvergleich eingeflossen sind. Es folgte die Favorisierung und Fertigung der besten Variante. Im Anschluss fanden die Messungen mit Auswertung und Vergleich beider Bauteile statt. Daraus ergaben sich Schlussfolgerungen und die Zusammenfassung.

3 Theoretische Untersuchungen

3.1 Geräuschquellen am Fahrzeug und übliche Schallpegel

Grundsätzlich wird zwischen zwei Typen der Schallwellenemission unterschieden. Zum einen tritt Körperschallemission in Erscheinung, die durch den Motor und das im Regelfall angekoppelte Getriebe, im Ganzen als Antriebsaggregat eines Fahrzeugs angesehen, charakterisiert wird. Gleichzeitig bildet dies nach /1/ die akustische/schwingungstechnische Hauptanregungsquelle. Die Schallwellen sind das Ergebnis aus den bewegten Massen und den daraus resultierenden Kräften. Einen starken Einfluss hat dabei der Ventiltrieb durch seine zunehmende Komplexität. Hier werden Schwingungen mit einer der 0.5-ten Motorordnung zugeordneten Frequenz und Vielfachen davon erzeugt. Zudem kommen Schwingungen, welche vom Kurbeltrieb und den Verbrennungsvorgängen hervorgerufen werden, die Frequenzinhalte im ganzzahligen Bereich der Motorordnungen aufweisen.

Zum Zweiten tritt so genannte Luftschallemission auf, die nach /1, 2/ ein Resultat der Körperschallemissionen darstellt. Diese entsteht im Wesentlichen durch die Schallabstrahlung der schwingenden Oberflächen eines Aggregats und steigt mit zunehmendem internem Körperschall. Die Geräuschemission eines modernen Verbrennungsmotors bei Nennlast, gemittelt über die Hüllfläche, liegt bei 95 bis 100 dB(A) bei einem Meter Abstand.

Des Weiteren wird in /2, 3/ auch nach direkter und indirekter Schallentstehung unterschieden, wobei der Motor als Ganzes der Indirekten zugeordnet wird. Dort treten Strukturschwingungen auf, welche an den Oberflächen abgestrahlt werden. Diese entstehen durch Anschläge der bewegten Teile. Diese Schallquellen erzeugen Frequenzen im Bereich von 0,5 bis 10 kHz mit starken stochastischen Anteilen. Die Anregung beruht bei vielen Teilquellen auf impulsförmiger periodischer oder nichtperiodischer Krafteinleitung in die Motorstruktur. Bild 2 zeigt eine Übersicht der Teilschallquellen im Motor mit Zuordnung zu den Entstehungsmechanismen.

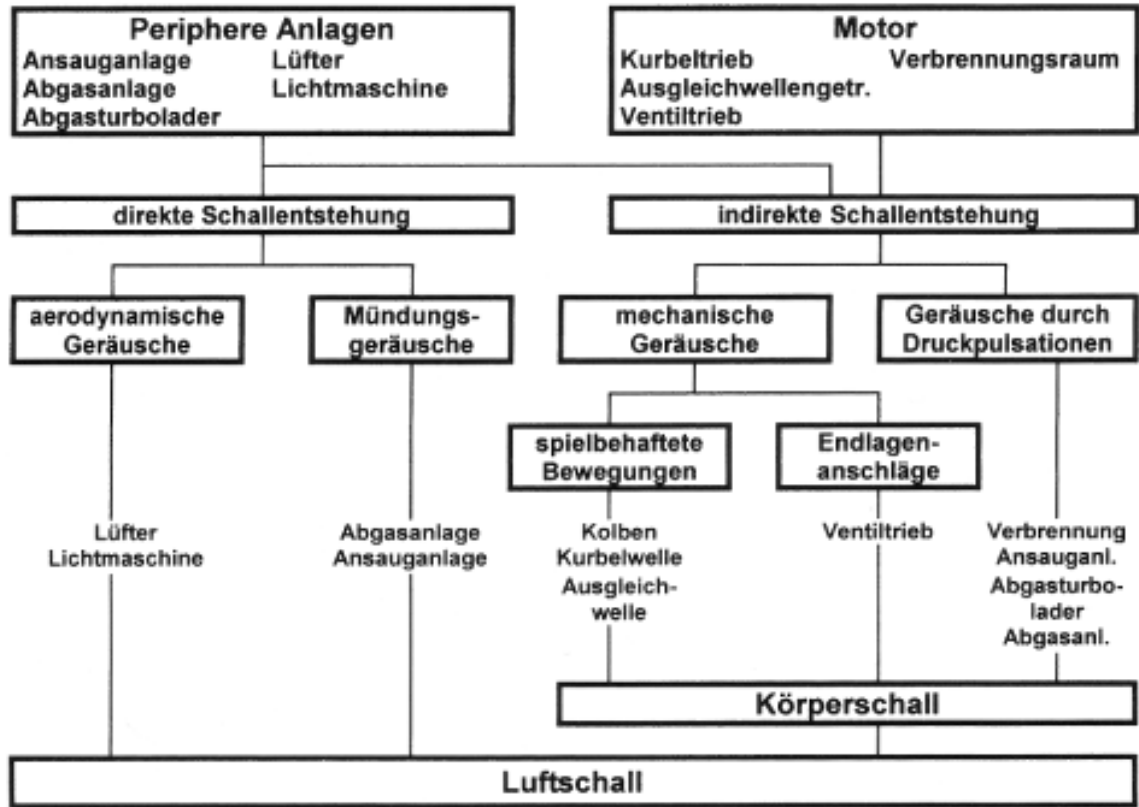


Bild 2: Teilschallquellen im Motorraum und deren Entstehungsmechanismen /2/

Die Emission für Außengeräusche von Kraftfahrzeugen ist vom Gesetzgeber limitiert. In Bild 3 sind nach /2, 4/ derzeit folgende Grenzwerte gültig, die nach dem Messverfahren der beschleunigten Vorbeifahrt nach ISO 362 (Kapitel 3.4.1) ermittelt werden.

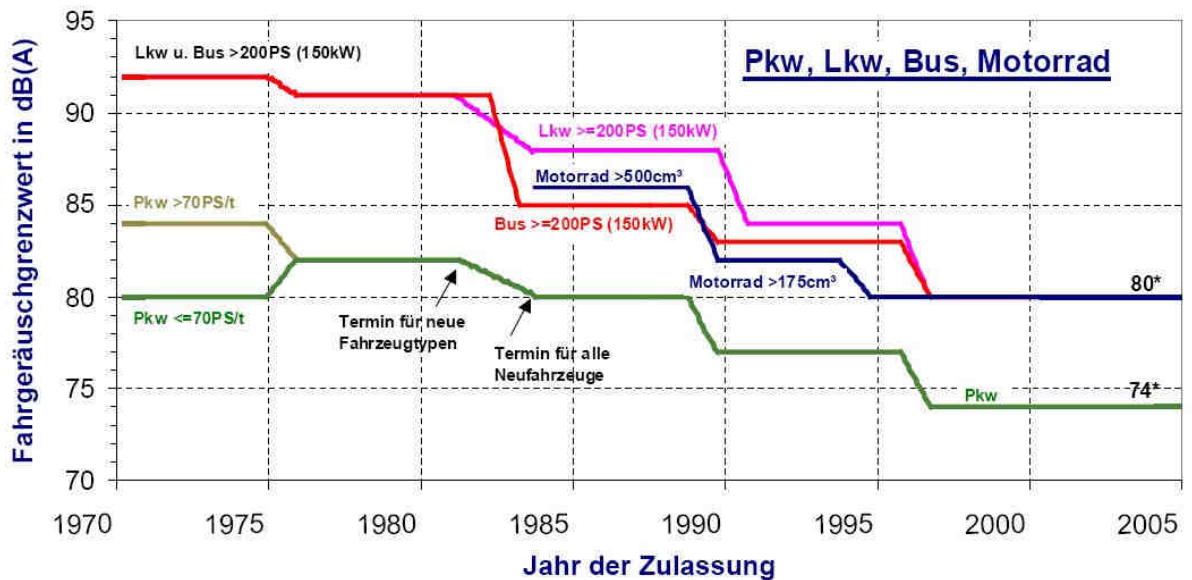


Bild 3: Entwicklung der Geräuschemission für ausgewählte Fahrzeugtypen /3/

Der PKW liegt mit 74 dB(A) unter der gesetzlichen Limitierung für alle andern Fahrzeugtypen, die mit maximal 80 dB(A) angegeben werden. Für das Innenge-

räusch hingegen gelten keine gesetzlichen Vorschriften. Stattdessen werden für LKW- und Nutzfahrzeugführern üblicherweise die relevanten Grenzwerte des Arbeitsschutzes herangezogen. Als weitere Schallquellen am Kraftfahrzeug sind laut /14/ neben dem Antriebsaggregat, welches mit 40% an der Gesamtemission beteiligt ist, auch die Abgasanlage mit 6 %, die Abgasmündung mit 14 % und der Reifen-Fahrbahn-Kontakt mit 36 % Anteil zu nennen. Auf diese Schallemissionsquellen soll hier aber nicht näher eingegangen werden.

3.2 Ursachen der Geräuscentwicklung

Für die Geräuscentstehung am Antriebsaggregat sind laut /25/ vielerlei Bauteile und Baugruppen verantwortlich. Zuerst sind die Massenkräfte des Kurbeltriebes zu nennen. Wird von den Rotationsbeschleunigungen von Pleuel oder Kurbelwelle abgesehen, wirken sie alle in Zylinderrichtung und verursachen dabei den lastunabhängigen Teil der Vibrationen des Motorblocks.

Eine weitere Ursache stellen die Verbrennungskräfte dar. Sie bewirken niederfrequent die Drehunförmigkeit des Kurbeltriebes und als Reaktion darauf eine entsprechende Drehschwingung des Motorgehäuses. Diese sind jedoch beide stark lastabhängig. Ihre Auswirkungen sind daher subjektiv am deutlichsten durch einen Wechsel von lastlosem zu Volllast-Betrieb wahrzunehmen. Das höherfrequente Verbrennungsgeräusch ist eher ein Resultat der Steilheit des Druckerstiegs nach dem Entzündungsvorgang des Gemischs. Dies macht sich als Nageln beim Dieselmotor bemerkbar.

Die Massenkräfte des Ventiltriebs entstehen als Reaktion auf die Beschleunigung der Ventilmassen und bewirken prinzipiell dasselbe, wie die Massenkräfte aus der Kolbenbewegung. Obwohl sie eine Größenordnung niedriger liegen, können sie bei Motoren mit gutem Massenausgleich (z.B. 6- oder 8-Zylindermotoren) den Brummpegel mitbestimmen.

Beim Ventilsteuerungsantrieb sind das Geräusch des Steuertriebs, das Steuerkettenheulen und das Zahnriemenheulen signifikant. Die Frequenzen liegen im mittleren Bereich entsprechend der Zahneingriffsfrequenz der Ketten- oder Zahnriemenräder. Ähnlich wie bei Zahnrädern entsteht das Geräusch durch die periodische Be- und Entlastung der Zähne bzw. Kettenglieder am Beginn des Eingriffs. Hörbar werden diese Heulgeräusche vor allem bei niedrigen Motordrehzahlen, wo sie noch nicht von den ansteigenden mechanischen und Verbrennungsgeräuschen überdeckt werden.

Niedere Frequenzen können ebenfalls noch durch Seilschwingungen von Steuerkette oder Zahnriemen entstehen.

Ein hohes Maß der hochfrequenten mechanischen Motorgeräuschemission wird durch das Aufschlagen der Ventile erzeugt. Es ist dabei häufig am härteren Klang der Mehrventilmotoren beteiligt.

Ebenfalls führt das Kolbenkippen zu einem Anschlagen des Kolbens an die Zylinderwand.

Hydraulische Druckpulsationen der Motorölpumpe treten vermehrt akustisch auf, wenn zusätzliche Ölkühler Verwendung finden, die dadurch in Schwingungen versetzt werden und die dann diese Schwingungen in ihre Befestigungselemente einleiten. Ebenso treten Druckpulsationen im Ansaugtrakt in Erscheinung, die das Ansaugeräusch darstellen. Das Auspuffmündungsgeräusch oder auch das Abgasanlagen-Geräusch sind ebenfalls ein Resultat druckschwankungsbedingter Pulsationen.

Strömungsgeräusche in Krümmer und Abgasanlage erzeugen zusätzlich noch das so genannte Auspuffrieseln oder das Vorrohrtrillern.

Bild 4 zeigt diese Schallerzeuger und die dazugehörigen Frequenzbereiche.

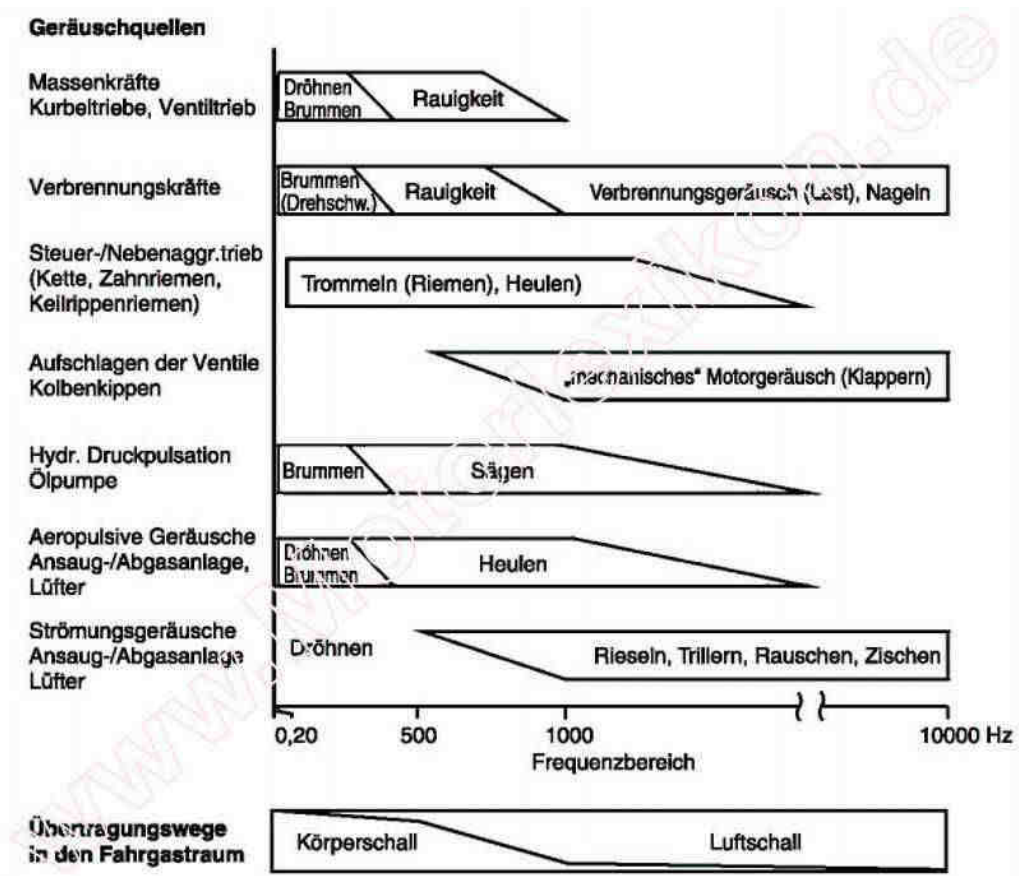


Bild 4: Geräuschquellen am und im Motor und dazugehörige Frequenzbereiche /25/

3.3 Stand der Technik der Geräuschminderung von Motoren

3.3.1 Konstruktive Möglichkeiten an Bauteilen

Um unerwünschten Luftschall zu mindern kommen vielerlei Methoden zum Einsatz, die meist im Konflikt mit den motorischen Anforderungen wie Leistung, Schadstoff- und Verbrauchsminimierung sowie Massereduktion und Leichtbauanwendung stehen. Von Bedeutung sind die Anordnung der Zylinder (Reihen- oder V-Motor), die Zündfolge, das Lagerungskonzept der Kurbelwelle, die Anzahl der Ausgleichsgewichte, die fundamentalen Biege- und Torsionseigenfrequenzen der Kurbelwelle sowie das Schubstangenverhältnis, welche allesamt starke Auswirkung auf die Dynamik des Systems haben. Eine seit neuestem verwendete Möglichkeit zur Kompensation unerwünschter Frequenzen stellen die Ausgleichswellen dar. Als sinnvoll hat sich außerdem die akustisch günstige Anordnung der Tragarme für Motor und Getriebe erwiesen. Diese müssen zusätzlich an sehr steifen Orten des Antriebsaggregates angebracht werden, die außerdem noch möglichst kleine Schwingungsamplituden in den fundamentalen Eigenschwingungsformen der Antriebseinheit aufweisen. Die Tragarme selbst werden ebenfalls als dynamisch steif ausgelegt. Da mit zunehmendem internem Körperschall der emittierte Luftschall steigt, sind die abstrahlenden Flächen von besonderer Bedeutung. Zum Ersten müssen nach /1/ die Begrenzungsflächen des Motors durch gezielte Versteifungsmaßnahmen beeinflusst werden. Dies können Verrippungen oder auch Bombierungen der Oberflächen sein. Zusätzlich kann der dämpfende Effekt noch durch Verbundblechstrukturen oder durch Auftragen von bituminösen Materialien verstärkt werden.

Nach /2/ wird hier noch nach einzelnen Baugruppen (indirekte Schallquellen) unterschieden. Für den Ventiltrieb und Zylinderkopf wird empfohlen, die bewegten Massen zu reduzieren oder auch eine Optimierung der Nockenwellengeometrie oder Ventildfeder-Kennlinie vorzunehmen. Eine Minimierung der Schwingungsneigung durch Beruhigungsrollen oder die Anpassung der Eigenfrequenz des Umlenkrollensystems sowie die Verbesserung des akustischen Verhaltens von Steuerketten beispielsweise durch maximale Führung, kann vorgenommen werden. Auch kann der Einsatz von Ausgleichsgewichten erfolgen. Der Kurbeltrieb kann durch Verringerung der Lagerspiele, durch den Einsatz von Torsionsschwingungsdämpfern und asymmetrischen Schwungrädern oder durch Leiterraahmenstrukturen mit Hauptlager-

anbindung optimiert werden. Der Motorblock kann akustisch durch körperschallisolierte bzw. kraftflussfreie Anbringung von Anbauteilen beeinflusst werden. Versteifungen und Verrippungen für verschiedene Bauteile wie beispielsweise Ventildeckel oder Ölwanne oder auch die Minimierung der abstrahlenden Flächen sind ebenfalls konstruktive Möglichkeiten. Die Verringerung des Axialspiels von Zahnrädern und der Stoßanregung im Zahnflankenbereich durch Hochverzahnung bzw. Verzahnung mit großer Überdeckung sowie der Einsatz von Stirnrädern können die akustischen Eigenschaften des Antriebsaggregates positiv beeinflussen. Das Verbrennungsgeräusch kann beispielsweise durch eine Abgasrückführung optimiert werden. Die akustischen Eigenschaften der Kolben-Zylinder-Paarung können mittels Verringerung der Strukturschwingungen durch das Zusammengießen der Zylinderrohre oder durch Beeinflussung der Kolbensekundärbewegung (Kolbenquerbewegung in Folge Pleuelschrägstellung und Laufspiel) verändert werden.

Zur Minderung der Geräuschemission von direkten Schallquellen können nach /2/ Schalldämpfer eingesetzt werden. Darunter zählen auch Resonatoren, die saugseitig installiert werden und eine Aufhebung bestimmter Frequenzen erreichen. Zu wirkungsvollen Maßnahmen gehört auch die Active Noise Control (ANC), die in Kapitel 2.2.4 näher beschrieben wird.

Die Nebenaggregate bedürfen einer separaten Anpassung und müssen an die akustischen Eigenschaften des Antriebsaggregates angepasst werden, da sie sonst in einem bestimmten Betriebsbereich als primäre Geräuschquellen in den Vordergrund treten können.

3.3.2 Dämpfung und Dämmung durch gezielte Werkstoffwahl

In einem Versuch von /5/ an einem Motorblock wurden durch die Verwendung eines hochfesten ADI-Gussskeletts (Austempered ductile iron), mit einer Ummantelung aus Aluminiumschaum, verbesserte akustische Eigenschaften und eine geringere Masse erzielt. Es wurde die Übertragungsfunktion verbessert sowie die Masse von 180 auf 120 kg reduziert. Außerdem wurde von /5/ in Zusammenarbeit mit der Firma Alulight International GmbH eine Ölwanne auf Aluminiumschaumbasis entwickelt, welche auf einem Aluminium-Druckguss mit eingegossenen Verschraubungen zur Befestigung der Ölleitungen sowie einem eingeschraubten Schwallblech versehen war. Um die Werkstoffeigenschaften optimal zu nutzen muss laut /5/ die Wandstärke der Wanne zwischen 15 und 20 mm betragen. Daher konnte die Befestigung nur über

Stehbolzen erfolgen. Als Dichtfläche wurde ein Aluminiumflansch eingegossen. Zur Befestigung der Ölwanne am Motorrumpf wurden Alu-Rohre eingeklebt. Da der verwendete geschlossenzellige Aluminiumschaum nicht flüssigkeitsdicht ist, wurde eine Epoxydharz-Deckschichtlackierung als High-Solid-Lack mit der Bezeichnung Osnapox LF 2K von den Osnatol-Farbwerken Belm-Vehrte in Deutschland verwendet. Die Masse der Ölwanne konnte trotz der deutlich höheren Wandstärke um zirka 100 g im Vergleich zur Original-Ölwanne verringert werden. In Bild 5 ist der Aufbau dieses Ölwanne-Prototyps dargestellt. Die Messungen am Prüfstand ergaben eine Reduktion der Amplitude, im Mittel um 7 dB(A), im Bereich des Körperschalls. Der Schalldruckpegel in 1 m Abstand wurde schmalbandig im Bereich von zirka 1 bis 2 dB(A) verringert. Eine um den Faktor zehn erhöhte Dämpfung der Aluminiumschaumölwanne im Vergleich zur originalen Alu-Druckgussölwanne wurde festgestellt.



Bild 5: Aufbau eines Aluminiumschaum-Prototyps einer Ölwanne /4/

Am Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU am Standort Chemnitz wurde ein ähnlicher Versuch mit einer PKW-Ölwanne durchgeführt, jedoch wurde hier auf ein bestehendes Serienbauteil eine Aluminiumschaumstruktur aufgeklebt (Ummantelung), um so die Vorteile der Verbundbauweise zu nutzen. Bei diesem Versuch konnten zum Teil deutlich höhere Dämpfungen erreicht werden. Die Dämpfung nahm mit zunehmender Frequenz zu. Die Dämpfungsfaktoren lagen laut /9/ im Vergleich zum Original bei 1,1 bis 10.

Eine weitere Anwendung fand Aluminiumschaum als Gleitschiene für eine Steuerkette in einem PKW-Motor. Diese übernahm die Funktion der Führung und gleichzeitig eines Schwingungsdämpfers. Eine Masseersparnis gegenüber dem stark verrippten Polyamid-Bauteil konnte ebenfalls erreicht werden.

Als hochdämpfender Gusswerkstoff wird nach /6/ teilweise eine Legierung aus den Bestandteilen Kupfer, Aluminium und Mangan verwendet. Durch seine martensitische Phasenumwandlung enthält er nach der Fertigung eine hohe Anzahl an hochbeweglichen Grenzflächen, die unter dem Einfluss von Wechselwirkungen eine Energiedissipation und letztendlich eine Dämpfung verursachen. Ebenfalls finden Legierungen aus Nickel und Titan (Ni-Ti) Anwendung, jedoch sind diese Materialien mit einem hohen Kostenaufwand für den Fertigungsprozess verbunden. Eine geringe Korrosionsneigung, hohe Festigkeit und ein gutes Dämpfungsvermögen ist bei Mangan-Kupfer-Legierungen (Mg-Cu) zu finden. Diese sind daher im Kfz-Bau gängig.

Für Dämmmatten, welche meist an der Unterseite der Motorhaube oder an der Stirnwand zum Innenraum angebracht sind, werden häufig Stoffe wie Polyurethanschaum (PUR-Schaum) oder Melaminharz verwendet. Teilweise verfügen diese Platten über Noppenstrukturen. Auch Dämmplatten, in einem Vierschichtaufbau, in denen eine Deckschicht außen und eine Bitumschicht innen zwischen zwei Schaumschichten angebracht sind, finden Einsatz. Bekannt ist ebenfalls aus /10, 11/ die Verwendung von Kammern für Dämmplatten, die dünne Seitenwände aufweisen und akustische Resonatoren, sogenannte Kammer- oder Helmholtz- Resonatoren bilden. Sie werden in Tiefziehverfahren aus Folien mit einem Gitter hergestellt und sind gegebenenfalls zusätzlich mit polypropylenbeschichteten Aluminiumbändern oder Dämpfungsvliesen beschichtet. Diese Bauteile dienen in erster Linie als Motorhaubenabsorber und haben den entscheidenden Nachteil, dass sie kompliziert und dementsprechend teuer in der Herstellung sind und zugleich einen hohen Platzbedarf benötigen.

In einem Versuch von /8/ wurde ein Dieselmotor namens GENIOS LE aufgebaut, in dem das Kurbelgehäuse, Ölwanne, Ventildeckel, der Leiterraum und das Wasserpumpengehäuse aus Magnesium gefertigt wurden. Das Ergebnis der Untersuchung war hier eine minimale Verbesserung der akustischen Eigenschaften in Teilbereichen sowie eine erhebliche Gewichtsersparnis.

3.3.3 Kapselung des Motorraums

Die Kapselung des Motorraums mit schalldämpfenden Materialien findet häufig Verwendung, nur werden dabei nach /2/ Minderungen der Geräuschemissionen im mittleren bis oberen Frequenzbereich des Motorenspektrums erreicht. Probleme treten bei der Kapselung selbst auf, da diese von Größe und Anzahl der vorhandenen Öffnungen begrenzt wird. Diese Öffnungen sind jedoch zur Kühlung des Antriebsaggregats notwendig. Eine Kapselung wird meist unter Verwendung mehrerer Bauteile erreicht. Dazu zählen die Abdeckung unter der Motorhaube, die Radhausschalen und die Abdeckungsplatte des Motors zur Straße hin. In einem Experiment von /7/ wurde ermittelt, dass durch dieses Verfahren eine Senkung der Geräuschemissionen von 3 dB(A) erreicht werden konnte. Die Messungen wurden jeweils unter Vorbeifahrt im 2. (Tempo 45,5 km/h) und 3. Gang (Tempo 50,0 km/h) vorgenommen. Nach einer Aussage von /14/ liegt das Geräuschminderungspotential eines Fahrzeugs bei 3,5 dB(A), das allein durch Vollkapselung des Motors, der Abgasanlage und durch Bedämpfung der Ansauganlage ausgeschöpft werden kann. Eine andere Möglichkeit der Kapselung stellt die in /12/ gezeigte Erfindung dar. Hier wird ein Tunnel verwendet, der alle Komponenten wie Motor und Kraftübertragungsbauteile beherbergt und gleichzeitig als tragendes Teil fungiert. Der Kanal ist dementsprechend selbsttragend (daher dickwandig), längsdurchlüftet und auf mindestens einer Seite mit einer schalldämpfenden Schicht versehen. Dies ist jedoch für Nutzfahrzeuge (NKW) eher geeignet als für Personenkraftwagen (PKW).

3.3.4 Aktive Dämpfung

Eine aktive Möglichkeit der Schallabsorption bietet die Active Noise Control (ANC). Hierbei werden die vom Motor emittierten Schallwellen durch Überlagerung eines gegenphasigen Signals ganz oder teilweise ausgelöscht. Es kommt so genannter „Antischall“ zum Einsatz, der dem zu löschenden Signal mit gleicher Amplitude, jedoch um 180° versetzt, entspricht. Dazu werden Aktuatoren (in diesem Fall Lautsprecher) zielgerichtet angebracht. Es kann zum einen die direkte Auslöschung der Schallwellen im Motorraum erfolgen oder nach /13/ auch die Ausschaltung der erzeugten Motorgeräusche erst im Innenraum.

Weiterhin finden Aktive Motorlager Verwendung. Diese sind mit einem elektrodynamischen Schwingerreger und einem rechnergesteuertem Regelkreis ausgestattet.

Sie werden dazu verwendet dynamische Gegenkräfte zu erzeugen, die den sonst auf die Karosserie einwirkenden Körperschall auslöschen. Dies stellt auch den wesentlichen Unterschied zu ANC-Systemen dar, da dort Luftschall von der Auslöschungen betroffen ist.

3.4 Messverfahren zur Ermittlung der Fahrzeuggeräuschemission und Bauteileigenschaften

3.4.1 Beschleunigte Vorbeifahrt nach ISO 362

Ein übliches Messverfahren zur Ermittlung der Fahrzeuggeräuschemission stellt die beschleunigte Vorbeifahrt nach ISO 362 nach /15/ dar. Sie bildet die Grundlage für die Geräuschvorschriften der EU und ECE und ist damit international standardisiert. Für jede Fahrzeugklasse gelten dabei verschiedene Grenzwerte, welche in den letzten Jahren fortlaufend reduziert wurden. Während des Messverfahrens passiert das Fahrzeug mit definierter Geschwindigkeit (50,0 km/h) zwei, in 7,5 m zur Straßenmitte angeordnete Mess-Mikrofone in 1,2 m Höhe und gibt dann an einer ebenfalls vorgegebenen Stelle Vollgas. Die Nenndrehzahl darf dabei nur dreiviertel der Maximaldrehzahl betragen. Für Fahrzeuge mit Handschaltgetriebe findet die Gangwahl zwischen dem 2. und 3. Gang statt, wobei der Pegel linear gemittelt wird. Für Kfz mit automatischem Getriebe wird i. a. die höchste Stellung (D) mit resultierender Rückschaltung verwendet. Das Messsystem erfasst meist gleichzeitig Position, Geschwindigkeit, Drehzahl und Gaspedal-Stellung des Fahrzeugs sowie den Schalldruckpegel der beiden Mikrofone, während das Kfz die Messstrecke passiert. Die Einfahrtrichtung wird von den Messgeräten erkannt und die Mikrofonkanäle dementsprechend zugeordnet. Messungen mit falscher Einfahrtgeschwindigkeit, falschem Beschleunigungspunkt, zu hohem Umgebungspegel etc. müssen verworfen werden. Die beschleunigte Vorbeifahrt selbst wird zweimal je von links und rechts durchgeführt. Der dabei maximal erreichte Pegel ergibt den Außengeräusch-Typprüfwert. Bild 6 zeigt den schematischen Prüfaufbau.

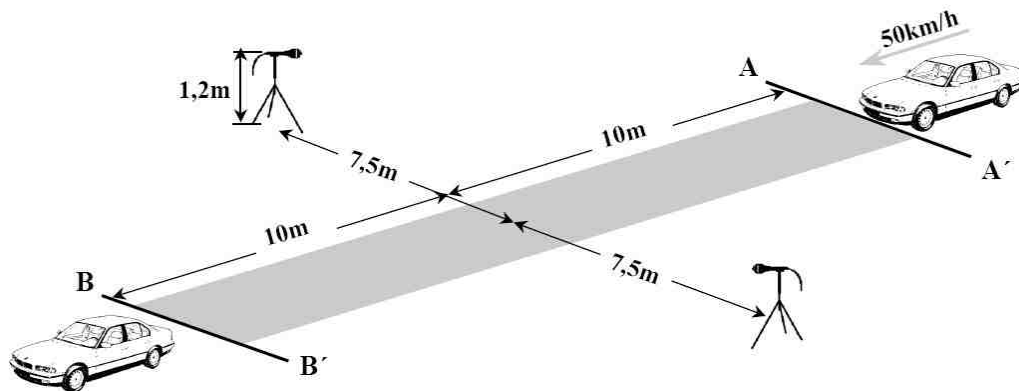


Bild 6: Schematischer Prüfaufbau einer Vorbeifahrt nach ISO 362 /4/

Dieses Verfahren ist das gängigste derzeit und muss vor der Zulassung eines Typs erfolgreich bestanden werden. Jedoch ist dieses Messverfahren hinsichtlich der Emission im realen Straßenverkehr nicht mehr effektiv. Eine Alternative stellt laut /19/ ein Vorschlag des ACEA (Verband der europäischen Automobilhersteller) dar, bei dem das Messergebnis eine Teillastvorbeifahrt darstellt, die sich aus Volllastbeschleunigung und einer Leerlastvorbeifahrt zusammensetzt, um so den Anteil der Reifen am Fahrzeuggesamtgeräusch besser darstellen zu können.

3.4.2 Arraytechniken

Bei diesen Verfahren, zur Ermittlung der Fahrzeuggeräuschemission, werden nach /2/ sogenannte Mikrofonarrays eingesetzt. Dazu zählt beispielsweise die akustische Nahfeldholografie. Sie findet ihre Anwendung bei der Analyse komplexer Schallstrahlungsquellen. Zunächst wird nach /16/ mit Hilfe einer zweidimensionalen Mikrofon-Matrix das akustische Strahlungsfeld, sprich der Schalldruckpegel, einer ebenen Abstrahlungsfläche parallel zur tatsächlichen Schallfeldebene aufgenommen. Zusätzlich wird ein gut positioniertes Referenz-Messmikrofon benötigt. Mit Hilfe von bestimmten Algorithmen kann dann ein dreidimensionales Bild über die Verteilung der akustischen Signale parallel zur Aufnahmeebene zurückprojiziert werden. Um eine gute Auflösung der Messung zu gewährleisten, sollten die Mikrofone in einem möglichst geringen Abstand zueinander angeordnet werden. Mit zunehmender Größe der Messfläche empfehlen sich daher Arrays mit möglichst vielen Kanälen. Üblicherweise werden nach /16/ Arrays mit 12 bis 64 Mikrofonen herangezogen. Neben der dreidimensionalen Ansicht des Schalldruckfeldes können die räumliche

Verteilung der Luftteilchengeschwindigkeit, das akustische Vektorfeld der Schallintensität oder die örtliche Verteilung der Oberflächengeschwindigkeit auf der schwingenden Schallquelle bestimmt werden. Messabweichungen, welche aus Schallreflexionen bestehen, können weitestgehend eliminiert werden. Bild 7 zeigt eine so genannte Soundmap, die mit diesem Verfahren erstellt werden kann und die Auskunft über die Schallintensität gibt. Analog zum Fahrzeuginnenraum kann auch der Motorraum analysiert werden.

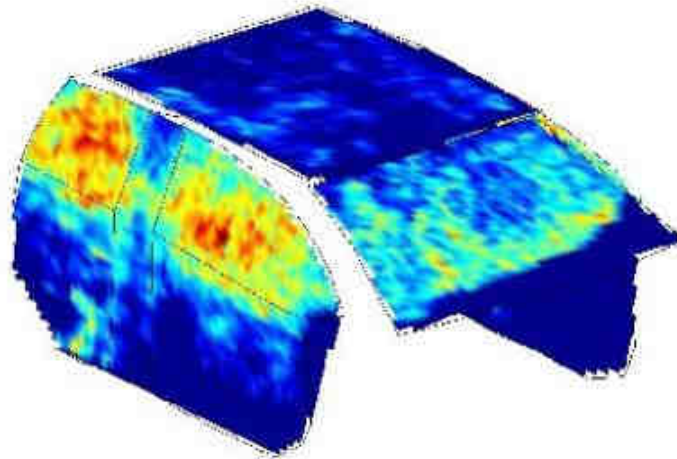


Bild 7: Soundmap der ermittelten Schallfeldverteilung an den Windangriffsflächen eines PKW im Windkanal /16/

Von Vorteil sind die geringe Rüstzeit sowie die fehlenden speziellen Anforderungen an Messort und -raum. Jedoch erwies sich die, individuell für den Anwendungsfall, erforderliche Positionierungstechnik als aufwendig.

Ein weiteres auf Array-Technik basierendes Verfahren stellt die räumliche Schallfeldtransformation (Spatial Transformation of Sound Fields, STSF) dar. Hierbei können laut /17/ dreidimensionale induzierte Schallfelder schwingfähiger Strukturen aufgrund diskreter Schalldruckmessungen ermittelt werden. Ihre Hauptaufgabe besteht in der Ortung von lokalen Teilschallquellen an abstrahlenden Strukturoberflächen. Da STSF auf dem bekannten Kreuzspektrum-Verfahren beruht, können akustische Energie- und Feldgrößen bestimmt werden. Die herkömmliche STSF stellt ein Frequenzbereichsverfahren dar und kann daher nur auf stationäre Schallquellen angewendet werden. Eine Messung erfolgt durch ein parallel zur Strukturoberfläche installiertes, nach /18/ regelmäßiges, Mikrofonarray. Zusätzlich wird auch hier ein Referenzsignal benötigt. Dieses dient dazu, den durch das Array aufgenommenen Schalldruck einem Messobjekt über eine Kohärenzanalyse zuzuweisen und so

nichtkohärenten Schall herauszufiltern. Das Verfahren ist somit unabhängig von akustischen Störquellen. Als Referenzsignal können entweder strukturdynamische Größen wie Beschleunigungen oder Geschwindigkeiten oder auch akustische Größen wie der Schalldruck verwendet werden. Um weitere Schallquellen, wie sie bei komplexen Maschinen z.B. bei Motoren auftreten, eliminieren zu können, können an diesen ebenfalls Mikrofone angebracht werden. Diese dienen dann ebenfalls als Referenzsignal und können dann in der STSF-Software herausgefiltert werden. In einer Weiterentwicklung des Verfahrens ist es möglich geworden, dynamische Schallereignisse zu analysieren. Dies stellt die instationäre räumliche Schallfeldtransformation (NS-STSF) dar, die nach /18/ auch transiente Holographie genannt wird.

Ebenfalls für die Analyse dynamischer Vorgänge geeignet, ist ein Verfahren namens Beamforming oder auch akustische Kamera genannt. Zum Einsatz kommt, wie bei den beiden vorangegangenen Messverfahren, ein Mikrofonarray. Hier liegt das Hauptaugenmerk aber auf der Anwendung bei Objekten, bei dem das Messen in der Nähe nicht oder nur schwer realisierbar ist. Es werden die am Array befindlichen Mikros auf verschiedene Messpunkte am Objekt fokussiert. Der Frequenzbereich wird von der Größe der Arrays nach unten hin begrenzt. Je größer ein Array, desto niedriger seine Grenzfrequenz. Die obere Begrenzung erfolgt durch zunehmend auftretende Schein-Schallquellen (Aliassen). Dies tritt verstärkt bei regelmäßig angeordneten Mikrofonarrays auf. Die Schallintensität wird meist in einem Farbcode dargestellt, mit dem die Hauptschallquellen besser erkannt werden können. Bild 8 zeigt ein Anwendungsbeispiel.



Bild 8: Hauptschallwellen-Lokalisierung mittels Beamforming /18/

Zu letzt sei erwähnt, dass die Aufnahme von Schalldruckpegeln im Nahfeld auch durch Positionierung einzelner Mikrofone am zu untersuchenden Bauteil möglich ist. Dabei wird die Anzahl der Mikrofone durch die maximal möglichen Kanäle am Aufnahmegerät (Frontend) begrenzt. Es können dynamische und stationäre Messungen vorgenommen werden, die anschließend rechnergestützt ausgewertet werden. Diese Methode eignet sich gut für vergleichende Messungen zweier Bauteile, vorausgesetzt die Einhaltung der gleichen Betriebsparameter wird gewährleistet.

3.4.3 Modalanalyse

Die Modalanalyse umfasst die experimentelle oder numerische Charakterisierung des dynamischen Verhaltens schwingungsfähiger Systeme mit Hilfe ihrer Eigenschwingungsgrößen. Dazu zählen die Eigenfrequenzen, Dämpfungen und Eigenschwingformen. Eigenschwingungsform und -frequenz stellen globale Systemeigenschaften dar, welche durch die modalen Parameter Eigenfrequenz, Dämpfung und Eigenform beschreibbar sind. Die Kenntnis der modalen Parameter ermöglicht eine einfache Beschreibung und Berechnung des dynamischen Systemverhaltens. Zur Bestimmung der modalen Parameter wird die zu untersuchende Struktur mit einer geeigneten Erregerquelle (Impulshammer, elektrodynamischem bzw. hydraulischem Shaker) angeregt und die Strukturantwort anhand von Beschleunigungsaufnehmern oder anderer geeigneter Sensoren bzw. Geräten z.B. Laser-Doppler-Vibrometer an verschiedenen Punkten gemessen. Mittels der Fast-Fourier-Transformation (FFT) wird daraus der bezogene Frequenzgang (auch Übertragungsfunktion genannt) berechnet. Bild 9 zeigt einen schematischen Versuchsaufbau.

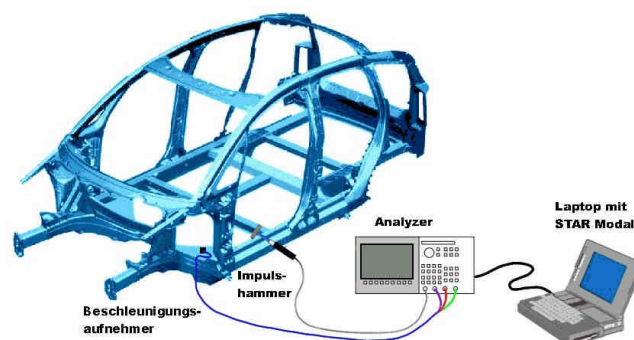


Bild 9: Versuchsaufbau einer Modalanalyse am Beispiel eines Audi A2 Spaceframe-Karosserie /20/

Im Messverfahren wird eine sinusförmige Kraft (periodisch) an einer Ecke des zu analysierenden Bauteils eingebracht. Die Frequenz der Schwingung wird über die Zeit verändert, der Betrag der Kraft jedoch bleibt konstant. Die Amplitude der Schwingantwort verändert sich mit zunehmender Frequenz der Anregungskraft. Es können dabei nach /21/ sowohl Abnahmen als auch Zunahmen der Amplitude beobachtet werden. Jedoch verstärkt sich die Antwort bei Anwendung einer Frequenz nahe einer natürlichen Frequenz (Resonanzfrequenz) des Systems und sie wird maximal, wenn die Erregerfrequenz gleich einer Resonanzfrequenz ist. Die Umwandlung der Zeitdaten in die Frequenzdomäne mit Hilfe der FFT ergibt die so genannte Frequenzantwort. Darin lassen sich Peaks bei den Resonanzfrequenzen erkennen. Eine einfachere Alternative stellt eine einmalige nichtperiodische Anregung durch eine definierte Kraft dar, welche auch freie Schwingung genannt wird. Überlagert man nach der Messung das Zeitsignal mit der Frequenzantwort, korrelieren die Maxima der Schwingungsanregung auf der Zeitachse mit den Maxima der Frequenzantwort, sofern die Frequenz linear mit der Zeit verändert wurde. Jede einzelne natürliche Frequenz der Struktur korrespondiert nach /21/ mit einer individuellen Schwingform, welche durch die Geometrie bestimmt wird. Diese Schwingformen werden Eigenformen oder Modalformen (Moden) genannt. Mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) ist es mittlerweile möglich geworden, derartige Analysen schon im frühen Entwicklungsstadium durchzuführen. Dadurch können schon im Konstruktionsstadium Bauteile akustisch günstig für den jeweiligen Anwendungsfall ausgelegt werden. Verwendung finden dabei üblicherweise reine FEM-Programme wie z.B. ANSYS, Abaqus oder Nastran oder Konstruktionsprogramme wie CATIA V5 als PLM-Programm in denen ein FEM-Modul integriert ist.

3.4.4 Schallintensitätsmessung über genormtem Terzspektrum

Eine weitere Möglichkeit der Geräuschemissionsermittlung stellt die Messung der Schallintensität mittels Schallintensitätsmesssonde dar. Durch diese Methode kann der Schallleistungspegel L_w in dB ermittelt werden. Dieser ist im Gegensatz zum Schalldruckpegel L_p entfernungsunabhängig und kann daher gut als Vergleichsgröße zwischen zwei Bauteilen oder Maschinen herangezogen werden. Gemessen wird dabei laut /29/ der Pegel anhand einer, das Messobjekt völlig umschließenden, Hüllfläche. Dabei werden in der Praxis diskrete Teilflächen an definierten Punkten (lt.

EN ISO 9614-1) gemessen und anschließend die Teilergebnisse aufaddiert. Die Hüllfläche kann nach /31/ auch gleichmäßig überstrichen werden (lt. EN ISO 9614-2, ISO DIN 9614-3).

Bei der Messung mittels Schallintensitätsmesssonde wird nun die Schallintensität I , angegeben in W/m^2 , ermittelt. Da es sich dabei um eine vektorielle Größe handelt, muss in Normalenrichtung zur Messfläche gemessen werden. Die Sonde besteht dabei aus einem Mikrofonpaar, welches höchste Anforderungen an die Übereinstimmung der Phase stellt. Es werden daher so genannte phased-matched-Mikrofone genutzt. Der Abstand der Mikrofone untereinander spielt dabei eine große Rolle. Durch ihn wird der messbare Frequenzbereich der Sonde bestimmt. Vergrößert man den Abstand der Mikrofone, so verschiebt sich der erfassbare Bereich in Richtung niedere Frequenzen. Die Mikrofone können laut /30/ nebeneinander oder auch gegenüber angeordnet sein. Emissionen benachbarter Geräuschquellen addieren sich vektoriell mit denen des zu messenden Bauteils. Da sie auf einer Seite negativ gemessen werden und auf die Hüllfläche gesehen auf der Gegenüberliegenden Seite wieder austreten und daher positiv gemessen werden, mitteln sich diese heraus. Um unerwünschte Reflexionen durch gegenüberliegende Flächen zu vermeiden, sollten bei Messungen eines Bauteils diese Flächen entsprechend mit schallabsorbierenden Matten versehen werden. Nach Ermittlung der Schallintensität kann der Schalleistungspegel mit Gleichung 1 errechnet werden.

$$L_w = 10 \lg \frac{|\vec{I}|}{I_0} \text{ dB} \quad (1)$$

mit: $I_0 = 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$

I_0 stellt dabei eine zur Berechnung von akustischen Werten genormte Bezugsgröße dar. Eine Normung der Schallintensitätsmessung wurde in ISO 9614 vorgenommen. Bezugsgrößen sind in DIN 1320 einzusehen.

Einhergehend mit der Messung des Schalleistungspegels ist die Festlegung des zu messenden Bereichs. Dies kann durch die Unterteilung des für den Menschen hörbaren Spektrums (16 Hz – 16000 Hz) erfolgen. Es wird eine Unterteilung in Oktaven vorgenommen. Dabei bedeutet ein Sprung einer Oktave zur Nächsten eine Frequenzverdopplung. Daraus ergeben sich Frequenzen, welche in DIN EN ISO 266 (DIN 45651, DIN 45652 und DIN 45401) festgelegt sind. Zur besseren Charakterisierung des Geräuschs kann zusätzlich jede Oktave in drei gleich große

Bereiche unterteilt werden. Dabei handelt es sich um Terzen. Im Messvorgang werden daher die Schalleistungspegel über den jeweiligen Terzmittenfrequenzen erfasst.

3.5 Stand der Technik von Metallschäumen

3.5.1 Allgemeines zu Metallschäumen

Metallschaum hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Er zeichnet sich durch eine hohe spezifische Steifigkeit, geringe spezifische Dichte von $0,5 - 0,9 \text{ g/cm}^3$ (laut /23/), ein hohes Stoßenergieabsorptionsvermögen, sehr gute Schallreduktion (Bild 11), Schwingungsreduktion, Druckfestigkeit (Bild 12), EMV-Abschirmung, geringe elektrische und Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu massivem Aluminium und eine Nicht-Brennbarkeit nach DIN 4102 und ÖNORM B3800 aus. Durch gezielte Legierungsbeeinflussung lassen sich des Weiteren Beständigkeiten gegen sauren Regen, Salzwasser, Laugen, Gase und andere Schadstoffe erreichen. In der Formgebung (3D-Geometrien) sind kaum noch Grenzen gesetzt, da diese durch spezielle Gussformen realisierbar geworden sind. Seine Anwendungsmöglichkeiten erstrecken sich über viele Gebiete wie z.B. Energieabsorber (Crashabsorber im Kfz, Prallkörper in Hebe- und Fördersystemen, Sicherheitsabdeckungen, Blast Mitigation), Leichtbau (Gusskerne, Schwimmkörper, Konstruktionen mit hoher Steifigkeit und niedriger Masse), Design und Architektur (Einrichtungsgegenstände, Verkleidungen, individuelle Oberflächen, Wand- und Deckenplatten, Brandschutzkonstruktionen) und Schall-/Resonanzminderung (Gehäusebauteile, Deckbleche, Absorption unter schwierigen Bedingungen wie hoher Temperatur, Feuchtigkeit und Staub).

Metallschaum selbst kann in offenporig und geschlossenporig unterschieden werden. Offenporige Schäume weisen laut /24/ untereinander verbundene Poren auf, die daher von fließfähigen Medien durchströmt werden können. Die Porendichte wird durch die Angabe Pores per Inch (ppi) oder Poren pro Zoll charakterisiert, die von 10 bis 45 ppi reicht. Geschlossenporige Schäume weisen hingegen eine zufällig verteilte Struktur auf, in der die Zellen unterschiedlich groß und unregelmäßig angeordnet sind. Die relative Dichte liegt bei 10 bis 25% des Massivwerkstoffs.

3.5.2 Eigenschaften von Metallschäumen

Die Eigenschaften der endgültigen Schaumstruktur hängen jedoch von einer Vielzahl von Faktoren ab. Dazu zählt zum einen das Herstellungsverfahren. Aluminiumschaum kann über schmelzmetallurgische Verfahren aber auch durch Verfahren mit Abscheidung auf Substratoberflächen sowie pulvermetallurgisch hergestellt werden. Am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik kommt das pulver-schmelzmetallurgische Verfahren (PM-Verfahren) zum Einsatz, welches am Fraunhofer Institut für angewandte Materialforschung (IFAM) entwickelt wurde. Dies wird im Kapitel 3.5.3 näher erläutert. Im Herstellungsverfahren selbst haben ebenfalls eine Vielzahl von Faktoren Einfluss auf das Endprodukt. Dazu zählen unter anderem auch das Mischen der Pulverkomponenten sowie die enthaltenen Legierungselemente und Treibmittel. Das Pulver muss nach dem Mischvorgang verdichtet werden um so ein Halbzeug (Vormaterial) zu erhalten, was ebenfalls auf verschiedene Weisen realisiert werden kann. Der eigentliche Schäumvorgang wird durch Parameter wie Schäumtemperatur, Schäumatmosphäre, Umgebungsdruck beim Schäumen und der Temperaturführung beeinflusst. Als technologisch gut beherrschbar gilt eine Schaumdichte von $0,7 \text{ g/cm}^3$. In Tabelle 1 sind Werkstoffkenngrößen in Abhängigkeit der Dichte ρ dargestellt.

Tabelle 1: Werkstoffkenngrößen von Aluminiumschaum /23/

Kenngröße	Wert
Dichte ρ	$0,5 - 0,9 \text{ g/cm}^3$
Querkontraktion μ	$0,31 - 0,34$
E – Modul E ($\rho = 0,7 \text{ g/cm}^3$)	ca. 6300 N/mm^2
Druckfestigkeit Φ ($\rho = 0,7 \text{ g/cm}^3$)	ca. 15 N/mm^2
Wärmeleitfähigkeit λ ($\rho = 0,7 \text{ g/cm}^3$)	ca. $20 \text{ W/m}^*\text{K}$
Werkstoffdämpfung D ($\rho = 0,7 \text{ g/cm}^3$)	ca. $0,0045$

Bild 10 zeigt das Spannung- Dehnung- Diagramm für Metallschäume. Charakteristisch für Schäume ist dabei das Plateau im mittleren Bereich, welches aus der Porenstruktur des Werkstoffes resultiert. Erst nach dem

Kompaktierungsvorgang der Poren stellt sich ein Verlauf ein, der einem herkömmlichen massivem Metall ähnlich ist.

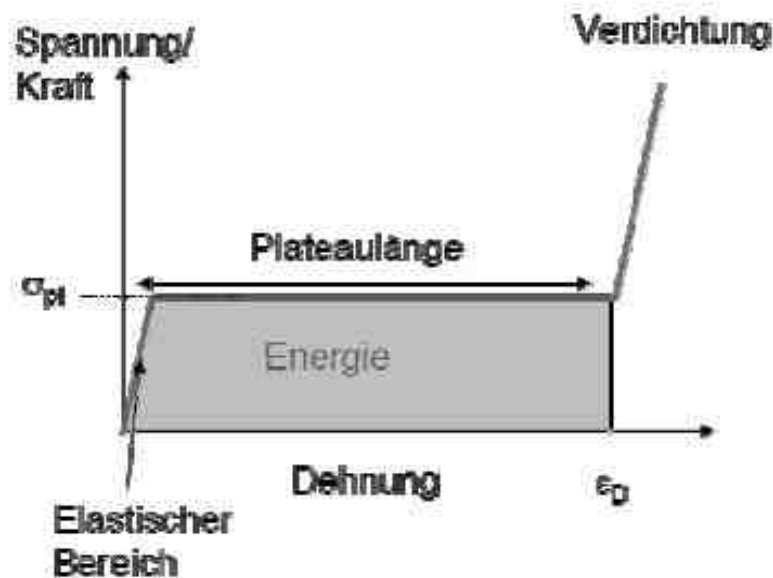


Bild 10: Prinzipielle Darstellung eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms von Metallschäumen /23/

Die Dämpfungseigenschaften von Aluminiumschaum im Vergleich zu herkömmlichem Aluminium werden in Bild 11 dargestellt. Hier ist deutlich das Potential des Werkstoffes zu erkennen. Die Kurvenverläufe im Diagramm zeigen für jede Wanddicke einen ähnlichen Verlauf, jedoch besitzen Sie einen Einfluss auf den Peak der Kurve, der sich mit zunehmender Wanddicke in den niederfrequenten Bereich verschiebt.

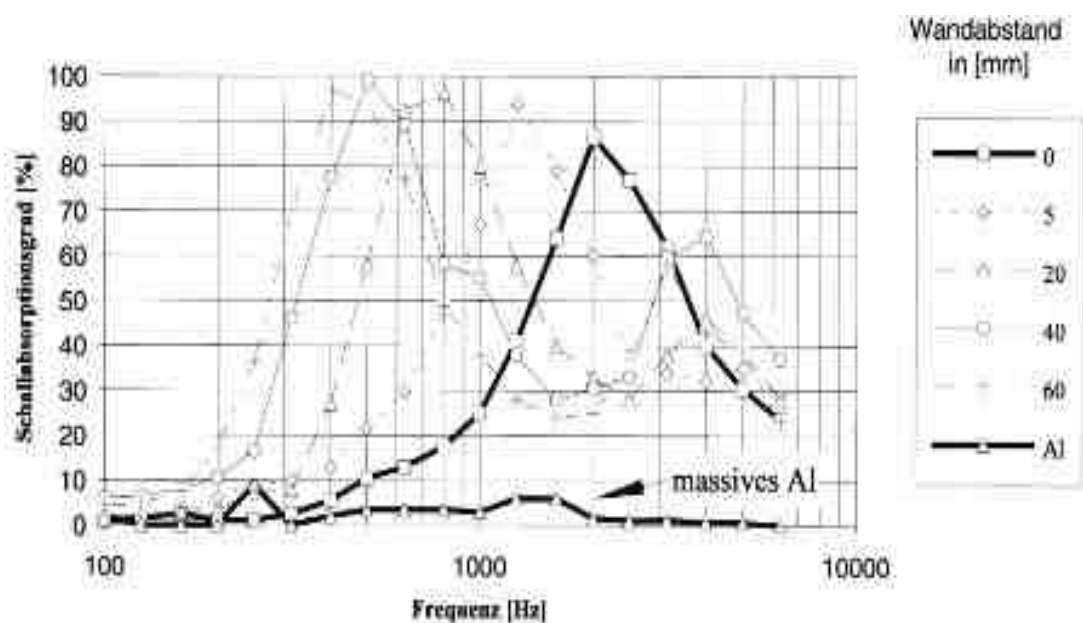


Bild 11: Schallabsorptionsgrad in Abhängigkeit der Frequenz und Wanddicke /23/

Generell bietet Aluminiumschaum ein deutlich höheres Dämpfungsvermögen (Faktor 5 bis 10) als Aluminium bzw. massives Metall. In einem Experiment von /23/ an verschiedenen Rohren mit Alu-Schaumfüllung wurde gezeigt, dass keine Abhängigkeit von der Frequenzlage und -form oder der Rohrform zu erkennen ist. In allen Proben lag die Dämpfungserhöhung bei mindestens 130 % bis hin zu maximal 500 %. In einem anderen Experiment wurde ein Vergleich zwischen einer geschweißten Stahlkonstruktion und einer Stahlkonstruktion mit Aluminiumschaumkern angestellt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Masse um 28 % verringert und die Dämpfung sogar um 980 % erhöht werden konnte. Der Verlustfaktor ist jedoch geringer als z.B. bei Polymerschäumen. Die Beschreibung der Dämpfung D kann durch das logarithmische Dämpfungsdekrement $\ln(\varepsilon_1 / \varepsilon_2)$ und der Schwingungszahl z vorgenommen werden (Gleichung 2).

$$D = \frac{\ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}{2\pi(z-1)} \quad (2)$$

mit: ε_1 – Betrag der 1. Schwingungsamplitude

ε_z – Betrag der z. Schwingungsamplitude

Die Dämpfungseigenschaften hängen primär von der Höhe der Dehnungsamplitude, der Schwingungszahl und der relativen Dichte ab. Generell nimmt nach /24/ die Dämpfung mit steigender Porosität und insbesondere bei Erhöhung der Amplituden zu. Dabei wird in drei Bereiche unterschieden.

- Bei sehr geringen Amplitudenhöhen weist die Dämpfung auf Grund einer thermoelastischen Grunddämpfung einen konstanten Wert auf.
- Nach Überschreiten einer kritischen Dämpfungsamplitude steigt die Dämpfung mit zunehmender Dehnung konstant an.
- Bei Überschreiten einer zweiten Dehnungsamplitude erhöht sich letztlich die Dämpfung durch die irreversible mikroplastische Verformung sehr stark. Gleichzeitig nimmt aber auch die ertragbare Schwingungszahl deutlich ab.

Die Hauptursache für die guten Dämpfungseigenschaften von Aluminiumschaum bei höheren Dämpfungsamplituden ist laut /24/ die Energiedissipation, die auf die Reibung zwischen den benachbarten Grenzflächen in den vielzähligen Rissen des Schaums, teilweise jedoch auch auf die Vibration der dünnen Zellwände zurückzuführen ist. Besonders Schäume aus Gusslegierungen, mit den dort in einer Vielzahl

vorhandenen Rissen und der geringen Porosität mit den dünnen Zellwänden erwies sich als effektiv. Weiterhin kann eine Steigerung durch den Zusatz keramischer Partikel (unlöslich) wie Siliziumkarbit erreicht werden, da dadurch zusätzliche energiedissipierende Grenzflächen geschaffen werden.

Die Dämpfung steigt linear mit der Porosität (Gleichung 3):

$$Q^{-1}(p) = Q_0^{-1} + c \cdot p \quad (3)$$

mit: $Q_0^{-1} = Q^{-1}(p = 0)$

p – Porosität

c – Konstante

Bild 12 zeigt den Anstieg der Druckfestigkeit mit zunehmender Aluminiumschaumdichte. Zu erkennen ist, dass der E-Modul deutlich unter dem des Vollaluminium (70 kN/mm²) liegt, was direkt mit der Dichte des Materials zusammenhängt.

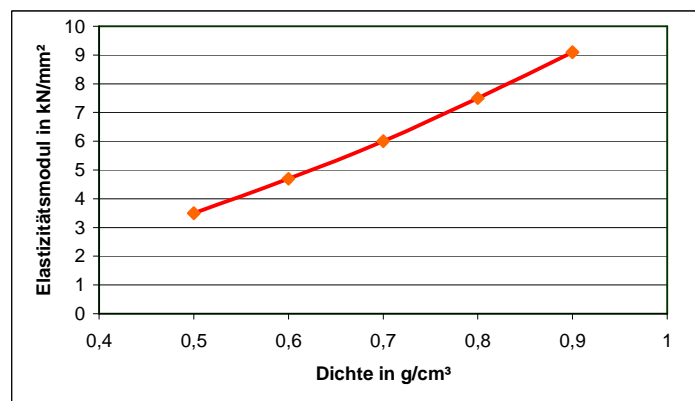


Bild 12: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Dichte /23/

Der Verlauf der Funktion begründet sich durch die abnehmende Porosität bei zunehmender Dichte. Bei einer spezifischen Dichte ρ_{Foam} von 0,6 g/cm³ wird eine Druckfestigkeit Φ von 7 bis 20 MPa in Abhängigkeit der Werkstoffparameter und der Wärmebehandlung erreicht.

Aus den Kennwerten Elastizitätsmodul E , Druckfestigkeit Φ und Wärmeleitfähigkeit λ des Massivwerkstoffes (Solid) lassen sich analog die Kennwerte des dazugehörigen Schaumwerkstoffes (Foam) in Gleichung 4 errechnen.

$$Kennwert_{Foam} = Kennwert_{solid} (\rho_{Foam} / \rho_{Solid})^n \quad (4)$$

mit: $n = 1,7 \dots 2$

Für $n = 1,8$ wurden nach Erfahrung der Mitarbeiter gute Ergebnisse erreicht.

Bild 13 zeigt ein Diagramm, das die Kosten für Aluminiumschaum pro Kilo über der Zeit in Jahren darstellt. Es ist zu erkennen, dass die Produktionskosten innerhalb von 7 Jahren auf ein Viertel des Ursprungspreises reduziert wurden und mittlerweile unter 10 €/Kilogramm in der Serienproduktion liegen.

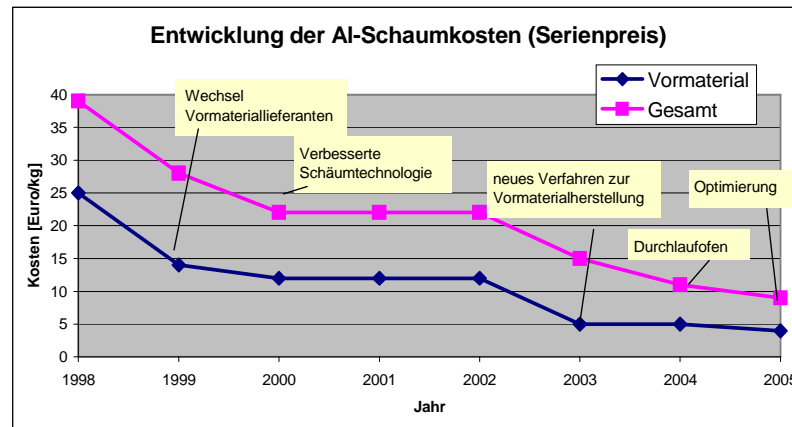


Bild 13: Entwicklung der Aluminiumschaumkosten /23/

3.5.3 Herstellung von Metallschaum

3.5.3.1 Metallschaumzusammensetzungen

Die Grundlage für poröse Metalle bilden gebräuchliche Metallpulver. Speziell im Fall von Aluminiumschaum werden dabei Reinheiten bis 99,7 % erreicht. Jedoch finden diese Reinaluminiumschäume kaum noch Verwendung. Meist werden Legierungen mit Silizium, Kupfer oder Magnesium verwendet. Die Herstellung der Pulver kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Beispielsweise mit einem Querstromzerspaner in dem das zu zerkleinernde Material durch einen konischen Raum der Zerspanungseinheit zugeführt wird und dieses dann zu homogenen Teilchen mittels Prallwirkung gegeneinander verarbeitet wird.

Die zweite Grundkomponente bildet das Treibmittel. Als gängigstes Treibmittel kommt Titanhydrid (TiH_2) zum Einsatz, jedoch sind nach /24/ auch andere Stoffe denkbar, die während einer Erwärmung chemisch reagieren und dadurch Gase freisetzen (z. B. Calciumkarbonat). TiH_2 ist ebenfalls pulverförmig und wird mit einem Anteil von ca. 0,4 bis 1,0 Gew.% dem Metallpulver beigemischt. Gerade bei niedrigschmelzenden Materialien wie Aluminium, Zink oder Blei ist nach /23/ wichtig, dass beim Erreichen des Schmelzpunktes eine hinreichende Menge des, für das Porenwachstum verantwortliche, Treibgases zur Verfügung steht. Wie bekannt, setzt eine Expansion bei Treibmittelverfahren erst oberhalb der Schmelztemperatur ein.

Um eine entsprechende Menge an Treibmittel in der Schmelze vorfinden zu können, muss gewährleistet werden, dass die Zersetzungstemperatur des Treibmittels im Bereich der Schmelztemperatur des Matrixwerkstoffes liegt. Bereits bei der Zersetzung einer geringen Menge wird ein relativ großes Volumen an gasförmigem Wasserstoff frei. Bei 600 bis 700 °C werden ca. 60 bis 75 % des Wasserstoffs frei. Der größte Teil jedoch entweicht an die Umgebung. Ein weiterer Vorteil der Hydride liegt in ihrer pulverförmigen Erscheinung. Diese ermöglicht eine gleichmäßige Verteilung im Matrixwerkstoff mittels rühren bzw. mischen. Eine homogene Verteilung des Treibmittels ist elementar für gleichmäßige Porenentstehung während des Schäumprozesses.

Die Schaumstruktur kann jedoch noch durch Zusatzstoffe in ihren Eigenschaften beeinflusst werden. Als Zusätze sind Legierungselemente anzusehen, die der Schaumstruktur besondere Eigenschaften verleihen sollen. Es kann beispielsweise Silizium beigegeben werden. Eine untereutektische Legierung bewirkt beispielsweise eine gute Schaumstabilität sowie eine Expansion auf hohem Niveau. Eine besonders stabile Schaumlegierung kann durch die Beigabe von ca. 4 % Kupfer (*Cu*) erreicht werden. Sie weist die besten Schaumstabilitäten sowie ein gleichzeitig niedriges Dichteniveau beim Einsatz von Kupfer als Legierungskomponente auf. Weitere Experimente mit keramischen Partikeln wie z.B. Siliziumkarbit (*SiC*) zeigten eine deutliche Zunahme der Schaumstabilität. Bei einer Beimengung von 16 % *SiC* wurde beobachtet, dass sich die Stabilität um den Faktor 16 erhöht hatte. Gleichzeitig kann dadurch auch die Anzahl der im Schaum enthaltenen Risse erhöht werden. Unter Verwendung von Siliziumnitrid (*Si₃N₄*) bis zu einem Anteil von 8 % konnte ebenfalls eine Stabilitätserhöhung um den Faktor 4 erreicht werden. Beim Einsatz einer Legierung von Aluminium, Magnesium und Silizium (z.B. *AlMg1Si0,5*) kann sogar eine Medienbeständigkeit gegen Seewasser erreicht werden.

3.5.3.2 Halbzeugherstellung

Dieser Verfahrensschritt ist notwendig um nach /22/ für das anschließende Schäumen ein Optimum an Schäumrate zu erzielen und findet nach dem Mischen statt. Ziel ist das möglichst gute Verschweißen der Pulverpartikel untereinander sowie die Minimierung der Restporosität bzw. das Erreichen einer hohen relativen Dichte ρ .

Das kann durch zwei verschiedene Technologien erreicht werden. Zum einen kommt das Drucksintern zum Einsatz, was auch als Heißpressen bezeichnet wird. Hierbei müssen verschiedene Faktoren wie die Kompaktierungstemperatur, Kompaktierungsdruck und -zeit beachtet werden. Durch Untersuchungen von /22/ wurde herausgefunden, dass die Erhöhung der Temperatur während des Pressvorgangs einen positiven Einfluss auf die Verdichtung der Pulverkomponenten hat. Als Optimum für Reinaluminium wurde beispielsweise eine Temperatur von 550 °C ermittelt, obwohl die Zersetzungsreaktion von TiH_2 schon bei 400 °C beginnt. Die Zeit sowie der Druck innerhalb gesetzter Grenzen von 20 bis 60 min. sowie 75 bis 118 MPa hatten keinen Einfluss auf das Expansionsvermögen. Jedoch besitzt die Steigerung der Vorwärmzeit einen positiven Einfluss auf die Halbzeugqualität. Niedrigere Schaumdichten können auch durch eine Erhöhung der Aufheizgeschwindigkeit erreicht werden. Die gestiegene Geschwindigkeit sorgt dafür, dass die Oberfläche des Halbzeugs geschwärzt wird, was zu einer besseren Adsorption der Wärmestrahlung führt und somit die Schaumexpansion beschleunigt. Des Weiteren wurden von /22/ eine Verringerung der minimalen Dichte und eine Steigerung des mittleren Porendurchmessers beobachtet. Die schnellere Expansion hat zur Folge, dass weniger Wasserstoff entweichen kann und somit mehr Treibgas zur Verfügung steht. Dies wirkt sich positiv auf das maximale Expansionsvermögen aus.

Eine weitere Technologie, um die Pulverkomponenten zu Verdichten, stellt das Strangpressen dar. Bei diesem Verfahren kommt es zu hohen Scherkräften und Verformungsverhältnissen. Durch den Pressvorgang werden Oxidfragmente von den Partikelflächen gelöst, was in einer besseren Verschweißung der Teilchen resultiert. Auf Grund dessen werden Mikrorisse und Restporosität vermindert. Als Nachteil kann die starke Anisotropie des Gefüges längs zur Strangpressrichtung angesehen werden. Beobachtet wurde, dass das Expansionsmaximum am vorderen Teil des gepressten Strangs höher ist als am Ende des Strangs. Für diese Abweichungen wurden Inhomogenitäten verantwortlich gemacht, die durch die Al-Phase verursacht werden. Es konnte laut /22/ jedoch nicht endgültig geklärt werden, warum diese entstehen.

Das endgültige Produkt des Kompaktierungsvorgangs wird Vormaterial genannt.

Anschließend kann das Vormaterial je nach Matrizenform der Strangpresse bearbeitet werden, um dem Bauteil vor dem Schäumprozess schon seine nahezu endgültige Form zu geben. Jedoch können die Strangpressprofile auch in ihrer Form

verbleiben und zielgerichtet in Teilen in die Schäumform eingelegt werden. Im Fall von AFS-Platten wird das Vormaterial zwischen die Deckbleche eingebracht und anschließend aufgeschäumt.

3.5.3.3 Schäumverfahren

Wie schon in Kapitel 3.5.2 erwähnt, kann Aluminiumschaum auf verschiedene Weise hergestellt werden. Am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU am Standort Chemnitz kommt das pulver-schmelzmetallurgische Verfahren zum Einsatz. Bild 14 zeigt schematisch den Verfahrensablauf.

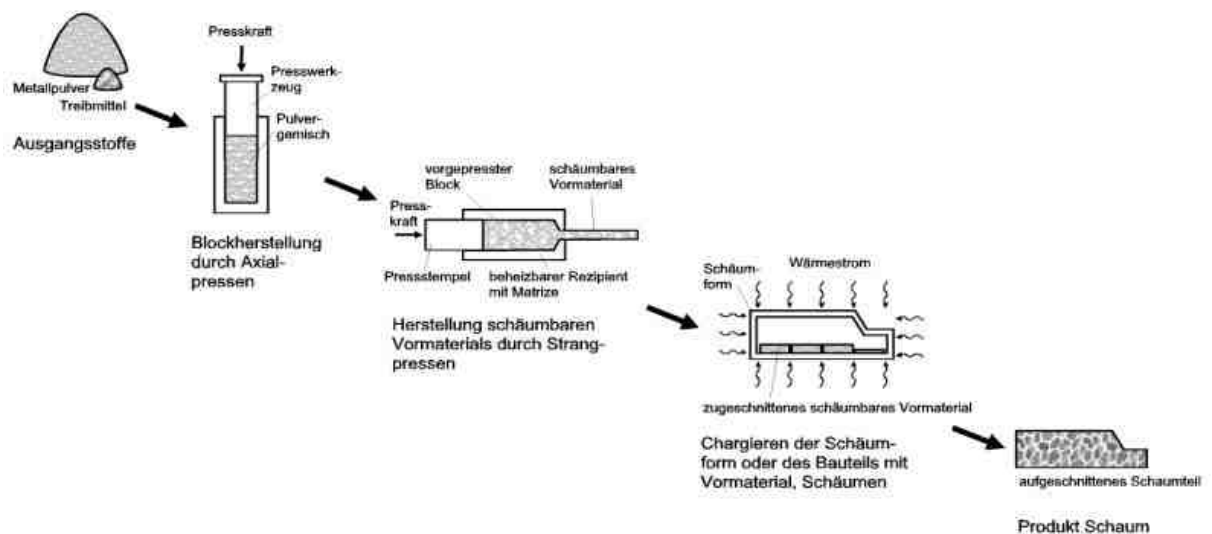


Bild 14: Schematischer Verfahrensablauf des pulver-schmelzmetallurgischen Schäumverfahrens /23/

Zu Beginn werden die Legierungselemente gemischt um eine homogene Verteilung der Komponenten insbesondere dem Treibmittel zu gewährleisten. Nachfolgend wird ein Block durch Axialpressen, unter Einhaltung diverser Parameter wie Kompaktierungstemperatur oder auch -zeit erzeugt. Hierbei werden schon Verdichtungen erreicht, die wenige Prozent unter der Dichte des jeweiligen Vollmaterials liegen. Ebenfalls diesem Zweck dient auch der nächste Schritt. Der vorgepresste Block wird durch eine Strangpresse mit beheiztem Rezipienten nochmals verdichtet. Dies gewährleistet minimale Restporosität. Anschließend kann je nach Bedarf das Vormaterial durch konventionelle Umformverfahren zu Blech, Profilen, o. ä. weiterverarbeitet werden. Darauf folgend findet eine Erwärmung des Materials wiederum unter bestimmten Parametern statt. Dabei handelt es sich um den eigentlichen Schäumvorgang. Das Vormaterial expandiert oberhalb seiner

Schmelztemperatur und entfaltet seine poröse, geschlossenzellige Porenstruktur durch die Reaktion des Treibmittels und der damit verbundenen Gasemission. Ist die Schäumzeit verstrichen bzw. das Schäummaximum erreicht, wird die Probe schnellstmöglich aus dem Ofen genommen und unter Verwendung einer Luftdruckkühlung unter den Schmelzpunkt gebracht. Dies führt zu einer Stabilisierung der Schaumstruktur und setzt gleichzeitig eine gewisse Thermoschockstabilität voraus. Durch dieses Verfahren ist es möglich, komplexe und endgeometrienaher Bauteile zu fertigen. Dies kann beispielsweise durch die Verwendung einer Schäumform erreicht werden, in der das Vormaterial zielgerichtet eingebracht wird. Diese wird dann zusammen mit dem Vormaterial erwärmt und gibt durch ihre Geometrie den Expansionsraum vor. Diese Formen können aus dünnwandigem Stahl, keramischen Werkstoffen oder aus Graphit bestehen. Üblicherweise werden die Graphitformen aus einem Block gefräst. Bei Verwendung von anderen Stoffen werden sie vor dem Schäumvorgang mit einer Schlichte bestrichen, was das Anhaften des Schaums verhindern und somit das anschließende Endformen erleichtern soll. Eine andere Möglichkeit stellt die Sandwichstruktur dar, die aus einem hochporösen Aluminiumkern, sowie zwei massivmetallischen Deckblechen besteht. Diese Deckbleche werden durch Kleben auf den Schaumkern oder direkt durch den Schäumvorgang aufgebracht und können aus Stahl aber auch Aluminium bestehen. Um eine höhere Temperaturbeständigkeit und Schälffestigkeit zu realisieren, wurde laut /22/ ein weiteres Verfahren entwickelt. Dazu werden die Deckschichten mittels Walzplattieren schon vor dem Schäumen zu einem Sandwich verpresst. Danach kann es durch geeignete Umformverfahren in der Art geformt werden, dass das Sandwich der endgültigen aufgeschäumten Struktur äquivalent ist. Beim anschließenden Schäumprozess gehen die Komponenten eine metallische Bindung ein.

3.5.3.4 Einflussfaktoren auf das Schäumverfahren

Der Schäumprozess als Ganzes ist durch vielerlei Parameter beeinflussbar. Die Schäumtemperatur spielt dabei eine wesentliche Rolle. Zum einen beeinflusst sie den Zeitpunkt zum Erreichen des Expansionsmaximums. Mit steigender Temperatur verringert sich die Zeit. In einem Experiment von /22/ bei einer Prozesstemperatur von 650 °C beispielweise, benötigt die Probe ca. 17 min. bei 850 °C nur noch 5 min. Weiterhin zeigte sich, dass die Stabilität mit fallender Temperatur nach Überschreiten

des Maximums zunahm und der Kollaps verzögert und weniger stark ausgeprägt eintrat. Zuletzt hängt maßgeblich die Dichte des zu schäumenden Bauteils von der Temperatur im Ofen ab. Bei einer Erhöhung der Temperatur von 650 °C auf 850 °C konnte in einem Experiment von /22/ die Dichte von 0,71 g/cm³ auf 0,38 g/cm³ reduziert werden. Dies kann unter anderem damit zusammenhängen, dass die erhöhte Temperatur im Ofen zu einer schnelleren Erwärmung des gepressten Pulvers führt, sodass im Aufheizprozess weniger Treibgas entweichen kann und somit mehr für die Expansion zur Verfügung steht.

Eine weitere Einflussgröße stellt die Schäumatmosphäre dar. In einem Versuch von /22/ wurden unter dem Einfluss verschiedener Gase Schäumprozesse durchgeführt. Dabei wurde herausgefunden, dass die Prozessatmosphäre für die minimal erreichbaren Dichten mit verantwortlich ist und beispielsweise unter Argon-Atmosphäre geringere spezifische Dichten als unter Luft-Atmosphäre erreichbar sind. Ebenfalls kann auch die Schäumzeit dadurch beeinflusst werden. Jedoch wird am Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik am Standort Chemnitz ausschließlich unter Luft-Atmosphäre geschäumt, da dies die technologisch beherrschbarste Variante darstellt.

Ebenfalls Einfluss besitzt der Umgebungsdruck beim Schäumen. Es wurde herausgefunden, dass der Druck die Expansionszeit verändert. Mit abnehmendem Druck sinkt auch die Expansionszeit. Beispielsweise verkürzt sie sich bei einer Reduzierung des Drucks von 1042 mbar auf 200 mbar um knapp 50 s.

Als letzte sinnvolle Möglichkeit der Beeinflussung von Schäumprozessen ist eine gezielte Temperaturführung anzusehen. Sie dient dazu den unerwünschten Effekt des Schaumkollapses zu minimieren. Zunächst wird die Ofentemperatur so hoch gewählt, dass sich das Vormaterial so schnell wie möglich erwärmt. Nachdem die Solidustemperatur überschritten ist und eine Expansion eintritt, muss die Temperatur rasch so eingestellt werden, dass sie so im Bereich des Zweiphasengemisches liegt, dass die Liquidustemperatur nicht überschritten wird.

3.6 Wahl des Teils und Fahrzeugs/Motors

Um die Ergebnisse der akustischen Messung des Metallschaumbauteils mit anderen vergleichbar zu machen, musste ein Bauteil gefunden werden, dass sich derzeit möglichst in einer Großserienfertigung befindet, sprich nicht an einem Prototypenmotor zum Einsatz kommt. So kann das eventuelle Potential des

Werkstoffs zum jetzigen Zeitpunkt gut aufgezeigt werden bzw. gewinnen die Ergebnisse eine gewisse Wertigkeit. Für die Wahl des Serienbauteils mussten vorab jedoch einige Kriterien erfüllt sein. Zum einen sollte das Bauteil eine möglichst große Oberfläche aufweisen. Wie bekannt ist, strahlen derartige Bauteile im besonderen Maße bzw. können leicht zu Schwingungen angeregt werden. Das Bauteil sollte jedoch eine gewisse akustische Optimierung aufweisen (z.B. wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben), somit werden die Ergebnisse der Messung konkurrenzfähiger. Zum andern sollte der derzeitige Bauraum ausreichende Kapazitäten bieten um eine Metallschaumkonstruktion aufnehmen zu können, da diese in ihren Abmessungen die bisherige Originalausführung übertreffen wird und im Rahmen dieser Arbeit keine konstruktiven Anpassungsmaßnahmen am Testfahrzeug/-motor realisierbar sind. Als Vorteilhaft erweist sich ebenfalls eine recht einfache Geometrie des Originalbauteils. Somit kann die schaumgerechte Neukonstruktion in einem geringeren Zeitrahmen vorgenommen werden.

Durch die Beteiligung der IAV GmbH (Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr GmbH) am Standort Chemnitz konnte in Zusammenarbeit die Verwendung einer Ölwanne (Bild 15) eines PKW festgelegt werden.



Bild 15: Original Ölwanne /Fraunhofer IWU, Chemnitz/

Als Fahrzeug wurde ein BMW Mini Cooper (Baureihe R56) Baujahr 2006 herangezogen (Bild 16). Dieses Fahrzeug verfügt über einen 1,6 Liter

Reihenvierzylinder-Motor mit 16 Ventilen. Dieser Ottomotor produziert eine Leistung von 88 kW (120PS) bei einer Nenndrehzahl von 6000 U/Min und ein maximales Drehmoment von 160 Nm bei einer Drehzahl von 4250 U/Min.



Bild 16: BMW Mini Cooper /www.automobilsport.com/upload/cars-tuning-2007/new/new-new/cars-tuning-ab-septem2007/mini-cooper-d.jpg/

Dieses Bauteil erfüllt alle vorab genannten Kriterien. Die Original-Ölwanne wird in diesem Fall durch das Tiefziehverfahren hergestellt und ist mit einem schwarzen Deck-/Schutzlack versehen. Als Werkstoff kommt ein Tiefzieh-Stahl zum Einsatz. Dadurch lassen sich eventuelle Masseinsparungen aufgrund der Dichteunterschiede zwischen Schaum und Massivwerkstoff erkennen. Die Masse beträgt $m_{Orig_real} = 1775$ g (ermittelt mit einer Waage der Firma Sartorius Modell BL12 mit einer Messgenauigkeit von 1 g). Sie weist 16 zur Längsachse angeordnete, zur Befestigung genutzte, Bohrungen mit einem Durchmesser von 7 mm auf. Der Abstand der Bohrungen zueinander ist dabei unterschiedlich groß ausgeführt. Die Seitenwände sind durch Sicken/Bombierungen gekennzeichnet, die wahrscheinlich der einfachen Montage, Volumenerhöhung sowie der Steifigkeitserhöhung des Bauteils dienen. Daraus folgt, dass die Wanne teilweise akustisch optimiert wurde. Die Bodenfläche ist von vorn gesehen nach links schräg ausgeführt, wobei die Stelle der Ölablassschraube die tiefste Stelle bildet. Somit ist ein fast vollständiges Herauslaufen des Öls nach Öffnung der Verschlusschraube gewährleistet. Gegenüber der Ölablassschraube ist die Teile- sowie die Chargennummer eingestanz. Die Original-Ölwanne weist eine Länge von 375 mm auf. Ihre Breite beträgt 196 mm. Die Höhe beträgt maximal 200 mm. Der Flansch ist ca. 1,5 bis 2,0 mm dick und durch Nuten zwischen den Befestigungsbohrungen gekennzeichnet.

Die Ölwanne umhüllt durch ihre Montage ein Schwallblech (Bild 15), welches auch durch den Metallschaumprototyp wieder gewährleistet werden muss. Dieses dient der Beruhigung der Schmierflüssigkeit bei Kurvenfahrt. Es verhindert ein Wandern des Öls bei Kurvenfahrt zur kurvenabgewandten Seite infolge der Massenträgheit des Fluids. Würde dies nicht geschehen, würde der Ölsaugstützen ggf. kurzzeitig Luft ansaugen, was zu einer Unterbrechung der Motorschmierung führen würde. Als andere Ausführungen von Ölwanne sind Aluminium-Druckguss sowie seit neuestem laut /26/ Kunststoff bekannt.

3.7 Definition der Anforderungen an die Metallschaumstruktur

An die Metallschaumstruktur werden eine Vielzahl an Anforderungen gestellt. Zum einen sollten die Eigenfrequenzen natürlich in günstigen Bereichen liegen. Es kann jedoch nicht vermieden werden, dass die Moden im Frequenzbereich des Motors liegen, welches sich durch die in Kapitel 3.2 genannten Bauteile ergibt. Jedoch kann die Struktur gezielt angepasst werden (siehe Kapitel 3.3.1), sodass möglichst wenige Moden in Bereichen der Anregungsfrequenz der Motorbauteile liegen, die für eine Körperschallanregung des jeweiligen Metallschaum-Bauteils verantwortlich sein können. Dadurch kann vermieden werden, dass die Ölwanne in einem bestimmten Bereich als Teil mit einer hohen Geräuschemission in Vordergrund tritt. Idealerweise sind die Eigenfrequenzen Primzahlen, welche somit keine Teiler außer eins und sich selbst haben. Dadurch sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass eine häufig auftretende Motorfrequenz eine Resonanzfrequenz der Wanne trifft und diese in Folge dessen zu starken Schwingungen angeregt wird. Auch können die Moden in einen gezielten Bereich der Motorgeräuschemission verschoben werden, sodass sich die daraus resultierende höchste Geräuschemission (im Resonanzfall) mit anderen Geräuschen des Antriebsaggregates überlagert. Ziel ist es, ein in sich hochdämpfendes Bauteil mit einem guten dynamischen Steifigkeits-Masse-Verhältnis zu entwickeln. Je höher das dynamische Steifigkeits-Masse-Verhältnis ausfällt, desto höher liegen die Eigenfrequenzen. Bekannt ist, dass mit zunehmender Frequenz bei gleichbleibender Erregerkraft die Amplitude sinkt. Daher eignet sich eine Schaumstruktur besonders. In einer Untersuchung von /5/, in der Platten aus Stahl, Aluminium und Aluminiumschaum hinsichtlich ihrer Strukturdämpfung η (Internal Lost Factor, ILF) analysiert wurden, wurde im Bereich um 1 kHz ein $\eta = 0,016$ der Schaumplatte gemessen. Dieser Verlustfaktor ist um das zehnfache höher als bei Stahl oder

Vollaluminium (Bild 17). Es wurde dazu eine Auswertung eines 60db-Abfalls vorgenommen, in dem die Nachhallzeit eine entscheidende Rolle spielt. Ergebnisse einer Hysteresemessung und der Bestimmung des Verlustfaktors ergaben in etwa dieselben Werte für den Verlustfaktor.

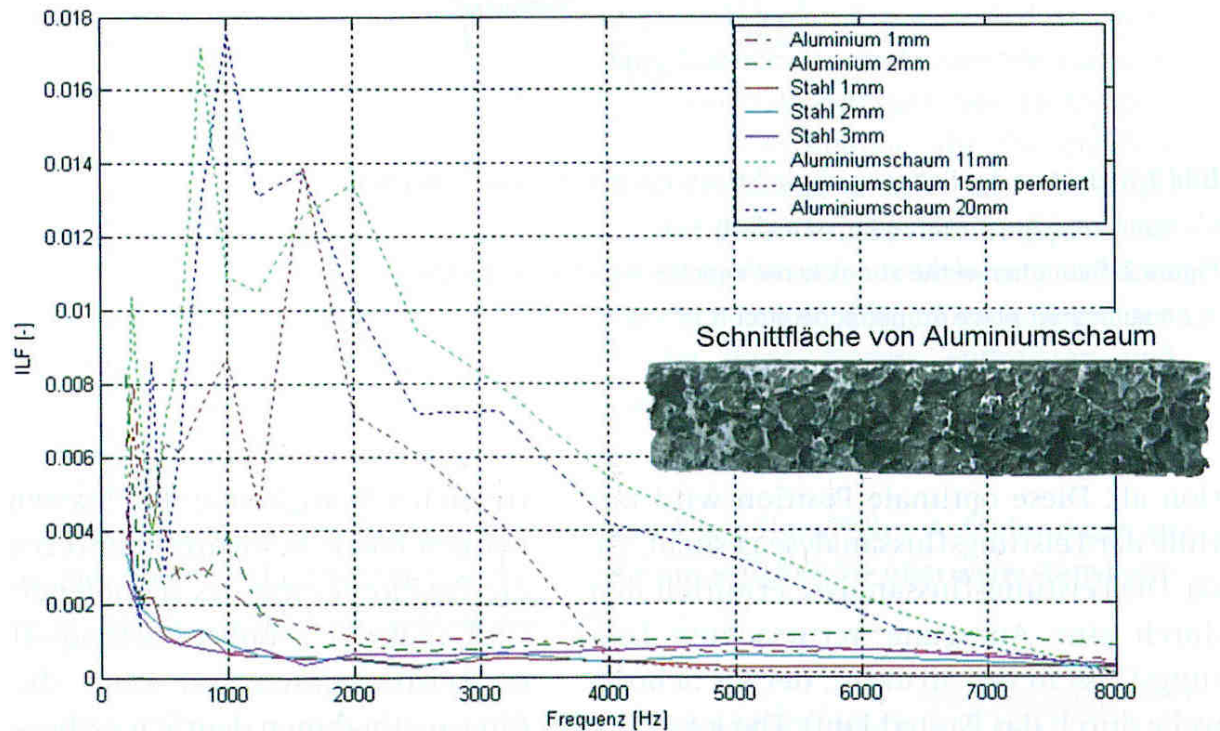


Bild 17: Vergleich gemittelter Verlustfaktoren verschiedener Werkstoffe /5/

Zieht man nun Bild 4 heran, lässt sich erkennen, dass genau in einem Bereich um 1000 Hz alle Teilschallquellen des Motors Schallemission aufweisen, in dem die Schaumplatten in Bild 17 den höchsten internen Verlustfaktor aufweisen. Den größten Effekt zeigte die Platte mit 11mm Schaum, die den höchsten Verlustfaktor über fast das gesamte Drehzahlband aufwies. Durch den höheren Verlustfaktor von Aluminiumschaum sollte eine geringere Schallemission in diesem Bereich speziell an der Ölwanne zu erwarten sein. Dies ist jedoch ebenfalls maßgeblich durch die Geometrie des Bauteils beeinflussbar. Diese muss neben den schwingungsarmen Eigenschaften auch so ausgelegt werden, dass die derzeitigen Platzverhältnisse weiterhin genutzt werden können. Es besteht nicht die Möglichkeit für konstruktive Änderungen am bestehenden Versuchsmotor. Daher muss ein Kompromiss aus den empfohlenen Wanddicken und den geometrischen Begrenzungen durch den vorhandenen Einbauraum gefunden werden. Somit sollte Aluminium als Basiswerkstoff für den Schaum dienen, da dieses schon im massiven Werkstoff eine um den Faktor 2,8 geringere Dichte aufweist als Stahl. Des Weiteren sollte eine

Wanddicke von ca. 11 mm angestrebt werden, wenn die Untersuchungen von /5/ berücksichtigt werden.

Ein weiteres wichtiges Kriterium stellt die Beherbergung des Ölreservoirs zur Versorgung des Antriebsaggregats dar. Dies muss in jedem Falle im gleichen Umfang wie beim Originalbauteil gewährleistet werden. Eine Recherche hat ergeben, dass die vorgegebene Ölmenge für diesen Motor bei 4,5 l liegt. Zusätzlich muss an der Ölwanne eine Ölablassschraube angebracht werden um eine fachgerechte Demontage sowie das Entleeren und Befüllen des Motors zu ermöglichen. Dazu zählt auch eine schräge Ausführung der Bodenplatte, die eine bessere Entleerung sicherstellen soll. Wie in Kapitel 3.5 erwähnt, muss ebenfalls die Beherbergung des Schwallblechs sichergestellt werden. Dieses wird analog zur Ölwanne am Kurbelgehäuse angeschraubt, daher muss ein geeigneter Flansch am Prototyp installiert werden. Dieser dient jedoch primär der Befestigung der Ölwanne am Kurbelgehäuse und muss demzufolge in gleicher Weise ausgeführt werden, wie der Originalflansch in Hinsicht auf die 16 Befestigungspunkte und deren Abstände. Ebenfalls beherbergt er die Dichtung, die auch hier Verwendung finden wird. Dafür wird eine original Servicedichtung, wie sie in Serie zum Einsatz kommt, vom Hersteller BMW herangezogen. Sie verhindert ein Eindringen von Fremdkörpern in das Schmiermittel und dient ebenfalls als Ausgleich für Verformungen infolge thermischer Ausdehnung im Betrieb. Da je nach Ausführung (favorisierte Variante) der Prototypölwanne auch ein Schaum hergestellt werden kann, welcher nicht 100% durchflusssicher ist, muss in diesem Fall eine Schutz- bzw. Deckschicht aufgebracht werden. Dafür kann Silikon oder auch die von /5/ genutzte Epoxid-Harz-Schicht in Frage kommen.

Des Weiteren sollte die Ölwanne möglichst leicht montierbar sein um den Einsatz spezieller Werkzeuge zu vermeiden um so den benötigten zeitlichen Aufwand für eine Installation bzw. einen Austausch gering zu halten. Auch ein geringer Fertigungsaufwand sollte angestrebt werden und kann durch den Konstruktionsprozess maßgeblich beeinflusst werden. Dies wirkt sich ebenfalls auf die Dauer des Herstellungsprozesses aus. Da je nach Favorisierung auch die Schweißbarkeit der Komponenten gewährleistet werden muss, muss eine gezielte Wahl der Legierung vorgenommen werden. Laut /28/ nimmt diese bei Verwendung von AlCuMg2 stark im Vergleich zu Al99,5 ab und verschwindet ganz bei der

Verwendung von beispielsweise AlZnMgCu0,5. Aluminiumlegierungen wie beispielsweise AlMg3 sind als unbedenklich anzusehen.

Ebenfalls von nicht zu vernachlässigender Bedeutung sind die Schutzfunktion der Ölwanne gegenüber der innen liegenden Kurbelwelle und deren Lagerung sowie der Schutz der Umwelt nach außen bei einem eventuellen Defekt im Antriebsaggregat.

Von besonderem Interesse, speziell bei diesem Bauteil, sind ebenfalls die Festigkeit und die Robustheit. Dabei empfiehlt sich die Verwendung einer Sandwichstruktur bei der die außen liegende Komponente/Deckschicht ein Massivwerkstoff ist, welcher auf Stöße und Steinschläge infolge von Fahrbahneinflüssen wenig reagiert bzw. diese abhält. Außerdem hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass speziell Verbundwerkstoffe (Sandwiches) ein meist besseres Dämpfungsverhalten aufweisen. Des Weiteren sollte der Werkstoff medienbeständig sein und über die maximale Betriebsdauer des Fahrzeugs hinweg konstante Eigenschaften aufweisen. Darunter zählen auch eine Korrosionsbeständigkeit sowie eine Beständigkeit gegenüber äußerer Wettereinflüsse. Ein weiteres, nicht mehr zu unterschätzendes Kriterium stellt die Recyclebarkeit dar. Bei bewusster Nutzung von ausschließlich Aluminium stellt dies ein geringes Problem dar. Eine minimale Ausdehnung infolge Erwärmung sowie die Einsparung von Masse sind wünschenswert, jedoch nicht zwingend zu realisieren.

Eine Auflistung der Forderungen und Wünsche wurde in der Anforderungsliste in Tabelle 2 vorgenommen. Diese Liste entspricht den Anforderungen der in Kapitel 3.8.5 favorisierten Variante.

Tabelle 2: Anforderungsliste des Ölwanenprototyps

Erstellungsdatum 03.07.2008		Anforderungsliste für Ölwanne aus Aluminiumschaum					Blatt- Anz. 3	Blatt-Nr. 1
Änderung	Forderung Wunsch	Anforderung					Verantwortlich	
	F	Verwendung der vorgegebenen 16 Befestigungspunkte am Kurbelgehäuse					Ch. Lohse	
	F	Einbringung eines Flanschs aus Vollaluminium aus AlMg3					Ch. Lohse	
	F	Herstellen des Flanschs durch das Laser-Schneidverfahren					Ch. Lohse	
	F	Verwendung von AFS-Platten mit einer Dicke von 11 mm					Ch. Lohse	
	F	Verwendung von 1 mm dicken Deckblechen aus AlMgSi1					Ch. Lohse	
	F	Verwendung von AlMg3Si6 für den Schaum					Ch. Lohse	
	F	Nutzung einer Schaumdichte von maximal 0,6 g/cm ³					Ch. Lohse	
	F	Fertigen der Sandwich-Einzelteile durch sägen					Ch. Lohse	
	F	Einhaltung der vorgegebenen Platzverhältnisse					Ch. Lohse	
	F	Verwendung einer im Serieneinsatz befindlichen Service-Dichtung vom OEM					Ch. Lohse	
	F	Aufnahme der Dichtung durch den Flansch					Ch. Lohse	
	F	Schwingungsarme Konstruktion durch zielgerichtete Beeinflussung der Geometrie und Masseverteilung am Bauteil					Ch. Lohse	
	F	Verschiebung der Moden in geeignete Bereiche durch konstruktive Maßnahmen					Ch. Lohse	
	W	Gewährleistung der Dichtheit nach Außen hin zur Sicherstellung einer ausreichenden Ölmenge					Ch. Lohse	
	F	Beherbergung der vom Verbrennungsmotor benötigten Ölmenge von 4,5 l					Ch. Lohse	
Änderung	1	2	3	4	5	6	7	
Datum								

Tabelle 2: Anforderungsliste des Ölwanneprototyps

Erstellungsdatum 03.07.2008		Anforderungsliste für Ölwanne aus Aluminiumschaum					Blatt- Anz. 3	Blatt- Nr. 2
Änderung	Forderung Wunsch	Anforderung					Verantwortlich	
	W	Gewährleistung einer geringen Verformung in Folge thermischer Beanspruchung					Ch. Lohse	
	F	Nutzung von Innensechskant-Befestigungsschrauben 16 mal M6x16 8.8					Ch. Lohse	
	F	Einbringung von Befestigungsbohrungen in 7 mm Durchmesser					Ch. Lohse	
	F	Einbringung von Befestigungskanälen in 14 mm Durchmesser					Ch. Lohse	
	F	Ausführung der Kanäle als U-Hülsen mit 1mm Wanddicke					Ch. Lohse	
	F	Fertigen der Hülsen durch Biegen mittels eines Werkzeugs					Ch. Lohse	
	F	Anziehen der Befestigungsschrauben mit 10,1 Nm					Ch. Lohse	
	W	Betriebsfestigkeit und Wetterbeständigkeit über die maximale Fahrzeugbetriebsdauer					Ch. Lohse	
	F	Nutzung des pulver-schmelzmetallurgischen Herstellungsverfahrens für den Aluminiumschaum					Ch. Lohse	
	F	Nachempfinden der Originalbauteilkonturen					Ch. Lohse	
	F	Einbringung einer Aussparung für den Abgasstrang					Ch. Lohse	
	F	Schräge Ausführung der Bodenplatte zur Gewährleistung eines guten Schmiermittelausflusses bei Entleerung					Ch. Lohse	
	F	Anbringung einer Ölablassschraube					Ch. Lohse	
	F	Verwendung eines Kupfer-Dichtrings					Ch. Lohse	
	F	Ermöglichung einer Ölstandsmessung durch den originalen Ölpeilstab					Ch. Lohse	
	F	Erreichung einer guten Bauteildämpfung					Ch. Lohse	
Änderung	1	2	3	4	5	6	7	
Datum								

Tabelle 2: Anforderungsliste des Ölwanneprototyps

Erstellungsdatum 03.07.2008		Anforderungsliste für Ölwanne aus Aluminiumschaum					Blatt- Anz 3	Blatt- Nr. 3
Änderung	Forderung Wunsch	Anforderung					Verantwortlich	
	F	Gewährleistung einer Schweißbarkeit durch gezielte Al-Legierungswahl					Ch. Lohse	
	F	Nutzung des WIG-Schweißverfahrens					Ch. Lohse	
	F	Verwendung von AlSi5 als Schweißzusatz					Ch. Lohse	
	F	Nutzung von V- und I-Nähten für die Schweißverbindung					Ch. Lohse	
	W	Gewährleistung einer guten Recyclebarkeit durch Verwendung von ausschließlich Al-Legierungen					Ch. Lohse	
	F	Erreichung einer guten Montierbarkeit und Demontierbarkeit					Ch. Lohse	
	W	Gewährleistung einer Stossicherheit zur Verhinderung eines Ölaustritts nach äußerer Krafteinwirkung					Ch. Lohse	
	W	Masseinsparung gegenüber dem Originalbauteil mit einer Masse von 1775 g					Ch. Lohse	
	W	Wartungsfreiheit für Serienbauteile					Ch. Lohse	
	F	Termin 30.11.2008					Ch. Lohse	
Änderung	1	2	3	4	5	6	7	
Datum								

3.8 Lösungskonzepte und deren Bewertung

3.8.1 Aluminium-Aluminiumschaum-Verbundbauweise

Eine Möglichkeit der Realisierung eines solchen Bauteils stellt die Verwendung von Aluminium-Foam-Sandwich-Platten (AFS-Platten) dar. Ein solches Erzeugnis wird in Bild 18 gezeigt und wird im weiteren Verlauf als Variante 1 bezeichnet.



Bild 18: AFS-Platte /Fraunhofer IWU, Chemnitz/

Die Sandwichdicke ist je nach Anwendung und Anforderung frei variierbar. Das Bauteil besteht dabei aus mehreren ebenen Teilen (Sandwiches) und U-Hülsen jeweils in unterschiedlicher Größe sowie einem Flansch aus Vollmaterial, welcher aus einem Blech heraus gelasert wird und die alle durch ein geeignetes Aluminiumschweißverfahren in eine unlösbare Verbindung gebracht werden. Die U-Hülsen bilden die Kanäle für die Befestigung der Wanne am Kurbelgehäuse. Diese ermöglichen eine gute Montierbarkeit und bieten gleichzeitig die Möglichkeit der geraden Ausführung der Wände. Somit können die Originalkonturen gut nachempfunden und gleichzeitig das innere Volumen der Wanne im Vergleich zum Original gewahrt werden. Die Bodenplatte wird mit 5° Neigungswinkel ausgeführt, sodass ein gutes Ölablassen ermöglicht wird.

Es kommt daher, wie von /28/ beschrieben, eine Mischung von Differentialbauweise und Verbundbauweise zum Einsatz. Diese Art der Bauweise weist gute fail-safe-Qualitäten (dynamisches Sicherheitsverhalten) auf. Die Übergänge der Platten bilden so genannte Rissfallen oder -bremsen.

Die Platten werden vor dem Schweißvorgang in ihre endgültige Form zugesägt oder wasserstrahlgeschnitten und anschließend auf Endmaß gefräst. Dabei können

Gärungen beliebigen Winkels und damit verschiedenste „Radien“ problemlos realisiert werden. In Hinsicht auf die Masse könnte diese Variante mit dem höchsten Wert einen Nachteil aufweisen. Dies begründet sich durch die Verbundbauweise und den damit genutzten Aluminiumdeckplatten aus Vollmaterial, die in ihrer Dichte um den Faktor 4 bis 5 höher liegen als der darin eingeschlossene Schaum. Der Kostenfaktor liegt hier im Vergleich zu anderen Varianten niedrig, da hier die Herstellung von komplexen Werkzeugen entfällt und die Platten einer Serienfertigung entnommen werden können. Lediglich eine Vorrichtung zur Halterung der Seitenelemente für den Schweißvorgang ist denkbar, kann jedoch bei Nutzung von entsprechenden Schweißtischen entfallen. Eventuell liegen die Kosten für die Arbeitskraft über denen für Variante 2 und 3, da hier einige Fräs- und Schweißarbeit notwendig ist. Insgesamt liegt der zeitliche Aufwand im Vergleich zu den anderen Varianten niedriger, da der Werkzeugbau sowie Schäumversuche für die komplexe 3D-Geometrie entfallen. Fertigungstechnisch können Probleme durch den Wärmeeintrag infolge des Schweißens und den damit verbundenen Spannungen im Bauteil auftreten. Dies kann zu Verzug im Bauteil führen, was im späteren Verlauf zu verminderter Dichtheit in der Schraubverbindung zum Kurbelgehäuse führen kann. Die Platten weisen außerdem gewisse Differenzen in der Höhe auf, die durch den Fertigungsprozess bedingt sind. Auf eine Serienproduktion hin gesehen könnte der Aufwand des Schweißens im Vergleich zum routinierten Schäumvorgang wie in Variante 2 und 3 ggf. höher ausfallen. Einen nicht zu unterschätzenden Vorteil bilden jedoch die Deckplatten in Hinsicht auf die Isolation des Öls in der Wanne sowie die Gewährleistung einer Schutzfunktion gegen Stöße und Steinschläge von außerhalb. Ein Auftragen einer zusätzlichen Deckschicht entfällt daher. Eine Wetter- und Medienbeständigkeit sollte gegeben sein. In Hinsicht auf Design stellt diese Variante sicher die schlechteste dar, da die geraden Wandelemente und die außen liegenden Schweißnähte nicht gerade typisch für Ölwanne sind. An einem Prototyp ist diese Betrachtung sicher weniger von Bedeutung, wohingegen sie an einem Serienbauteil sicherlich angebracht ist. Bei der Herstellung kommt das pulver-schmelzmetallurgische Verfahren zum Einsatz.

3.8.2 Schäumen in eine gefräste Graphit-Form

Eine weitere Möglichkeit (Variante 2) stellt dieses Verfahren dar. Hierbei wird anfangs ein Werkzeug mit einer definierten Teilungsebene hergestellt (Bild 19),

welches beim Schäumvorgang verspannt werden muss, um den Kräften des expandierenden Schaums zu widerstehen. Dabei wird dieses üblicherweise aus einem Vollmaterialblock aus Graphit gefräst. In der Formgebung sind daher kaum Grenzen gesetzt. Die Form kann dem Original gut angepasst bzw. nachempfunden werden.

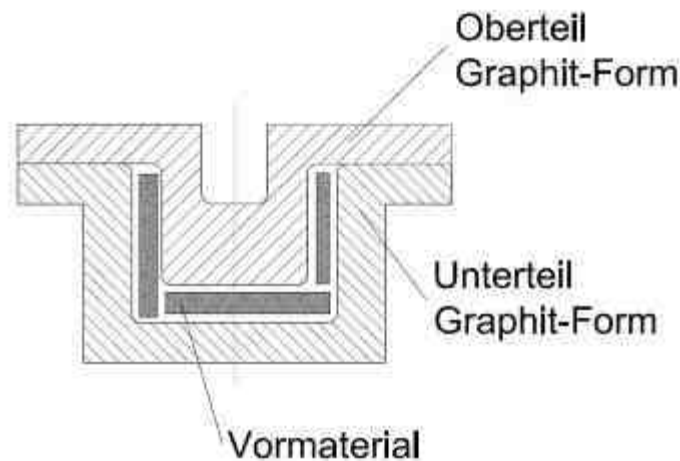


Bild 19: Skizze einer Graphit-Schäumform

Durch die glatte Oberfläche des Graphits wird eine hohe Oberflächengüte erreicht. Die Rauigkeit wird deutlich geringer als in Variante 3 ausfallen, somit wird die Entnahme des Bauteils nach dem Schäumvorgang durch die schmierende Eigenschaft von Graphit deutlich erleichtert. Es wird daher keine Schlichte zur Trennung von Schäumform und Prototyp benötigt. Der Flansch, welcher aus Vollmaterial besteht und vorab gelasert wird, wird in diesem Falle vor dem Schäumvorgang in die Graphitform eingebracht und geht während dem Schäumprozess eine metallische Bindung mit dem expandierenden Vormaterial ein. Die Legierung des Flanschs muss dabei auf die des Schaums bzw. Vormaterials angepasst werden um ein Schmelzen des Flanschs im Prozess zu verhindern. Jedoch wird hierfür eine vorher nicht bestimmbar Anzahl an Versuchen benötigt, um diesen Vorgang sowie die optimale Einbringung von Vormaterial zu ermitteln. Zur Befestigung können in das Schaumbauteil anschließend Durchgangsbohrungen eingebracht werden, die Stahlhülsen aufnehmen können. Diese sind in ihrer Länge entsprechend der Bohrungslänge und am Anfang ähnlich einer Unterlegscheibe ausgeführt und ermöglichen eine Befestigung der Wanne ohne große Krafteinleitung in den Schaum. Da auch hier Bohrungen mit Durchmesser 7 mm Verwendung finden, werden für die Montage handelsübliche M6-Schrauben mit Längen von

120mm an der höchsten Stelle benötigt. Graphit birgt neben der guten Lösbarkeit des Schaumteils einen weiteren Vorteil. Es dehnt sich bei Wärme nur sehr gering aus und leitet die vom Ofen ins Bauteil induzierte Wärmeenergie schnell weiter. Dies führt zu einer schnelleren Erwärmung des Vormaterials und somit zu höheren Schäumraten bzw. einer guten Porenverteilung. Bei dieser Variante handelt es sich hingegen zu Variante 1 um eine Ausführung aus reinem Schaum. Diese wird in /28/ als Integralbauweise bezeichnet. Hier werden keine Deckbleche eingebracht. Somit stellt diese Variante in Hinsicht auf Stoßsicherheit eine schlechtere Alternative als Variante 1 dar, da hier keine Übergänge zur Minderung von Rissfortpflanzung zur Verfügung stehen. Die Materialkosten beschränken sich auf das Vormaterial, welches in die Graphitform zielgerichtet einlegt wird. Im Werkzeug hingegen steckt das höchste Kostenpotential. Dabei ist jedoch nicht das Material Graphit ausschlaggebend, sondern die Maschinen- und Arbeitsstunden für den Fräsvorgang. Die Arbeitszeit des Schweißers wird hier hingegen nicht mehr benötigt, lediglich der Schäumvorgang muss wie in allen Varianten zur Anrechnung gebracht werden. Unter dem Gesichtspunkt einer Serienfertigung stellt dieses Verfahren die wohl schnellste Möglichkeit dar. Durch die hohe Anzahl an herstellbaren Bauteilen und die im Bestfall nur einmalige Anschaffung einer Graphitform für den Schäumvorgang in der jeweiligen Fertigungslinie können hier Teile mit geringen Oberflächenrauigkeiten und komplexen Geometrien in kurzen Zeiten erzeugt werden, die auch im Design durchaus überzeugen könnten. Die Masse des Bauteils kann im Vergleich zum Serienbauteil durch die alleinige Verwendung von Schaum und einer geeigneten Wanddicke sicher reduziert werden. Der Zeitaufwand dieser Variante dürfte der Höchste aller drei sein, da im Wesentlichen die Herstellung der Graphitform einige Wochen in Anspruch nehmen kann. Analog zu Variante 1 kommt hier das pulver-schmelzmetallurgische Schäumverfahren zum Einsatz.

3.8.3 Schäumen in eine geschweißte Stahl-Form

Die dritte Möglichkeit zur Realisierung dieses Vorhabens stellt eine Form aus Stahlblechen, die analog zu Variante 1 zusammengeschweißt werden, dar. Diese bilden jedoch nicht die Außen- und Innenkontur des endgültigen Bauteils, sondern die Schäumform wie in Variante 2. Diese Variante bedient sich sozusagen der Eigenschaften beider vorangegangener Variationen und wird im Weiteren als Variante 3 geführt. Jedoch sind hier die Konturen des Originalbauteils ebenfalls nicht

so gut nachbildbar, die Geometrie muss einfacher gehalten werden. Auch die Rauheit der Bauteiloberfläche wird durch die Oberflächenbeschaffenheit von Stahl höher ausfallen als bei der Graphitschäummethode. Als Nachteil erweist sich auch hier der zeitliche Aufwand für die Fertigung der Schäumform. Diese würde jedoch schneller hergestellt sein, als die Form der Variante 2 und gleichzeitig deutlich günstiger ausfallen. Auch hier handelt es sich um eine Nurschaum-Ausführung, die nicht die Vorteile der Verbundbauweise nutzen kann. Für die Fixierung bzw. Stabilisierung der Stahlbleche vor dem Schweißvorgang wird auch hier eine Halterung benötigt. Die Stahlbleche werden analog dem verwendeten Flansch gelasert. Der Flansch wird auch hier während des Schäumvorgangs angebracht. Da sich die Endprodukte von Variante 2 und 3 nicht in ihrem wesentlichen Aufbau unterscheiden empfiehlt sich die Entscheidung für diese hier beschriebene, da die Kosten für die Schäumform hier deutlich geringer ausfallen. Darin sind die Anschaffung von Stahlblechen, Lasern und das Schweißen zu berücksichtigen. Dies gilt analog für den Serieneinsatz, da die Form im Idealfall nur einmal gefertigt werden muss. Auch hier besteht die Möglichkeit zur Verbesserung der akustischen Eigenschaften im Zusammenhang mit einer Masseinsparung durch Wanddickenvariation. Der Schäumprototyp wird durch das in Variante 1 und 2 genannte Verfahren erstellt. Hier wird jedoch im Vergleich zur Graphitformvariante eine Schlichte benötigt. Diese muss vor dem zielgerichteten Einbringen des Vormaterials in die Schäumform auf den Innenflächen angebracht werden, um so eine spätere Entnahme der Schäumteile zu gewährleisten.

3.8.4 Simulation der Varianten

3.8.4.1 Allgemeines zur Simulation

Um die Bewertung der Varianten möglichst genau durchführen zu können, wurde im Kriterium Auslegung ein Unterkriterium Simulation (siehe Kapitel 3.8.5) eingefügt, das zudem hoch gewichtet wurde. Dies spiegelt die Ergebnisse der simulativen Modalanalyse wieder, die für den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von hoher Bedeutung ist. Dabei dient die Simulation der groben Vorauslegung der Bauteile und soll als Anhaltspunkt dienen. Nach der Grob-Konstruktion der einzelnen Varianten mit dem Programm CATIA V5 wurde eine Modalanalyse mit ANSYS 11 durchgeführt. Dies bietet bezüglich FEM-Anwendungen die bessere Arbeitsumgebung sowie einen

leistungsfähigeren Vernetzungsgenerator. Für den Datenaustausch der Programme untereinander kam dabei das allgemein angewandte Format STEP (.stp) zum Einsatz, da dieses hingegen zu IGES (.igs) keine Flächendaten sondern Volumendaten liefert.

Für jede Variante wurde eine Modalanalyse (freie Schwingung) mit dem Parameter Subspace durchgeführt. Dabei wurde jede Wanne einer festen Einspannung am Flansch unterzogen. Da am Flansch jeweils Solid93-Elemente zum Einsatz kamen, war dort nur eine Null-Setzung der Verschiebungsfreiheitsgrade notwendig, da dieser Elementtyp keine Rotationsfreiheitsgrade aufweist. In einem Frequenzbereich von 0 bis 4000 Hz sollten möglichst alle Moden und deren Vielfache aufgedeckt werden. Es wurde angenommen, dass in diesem Bereich einige der fundamentalen Eigenfrequenzen der Bauteile liegen und entsprechend der jeweiligen Knotenanzahl hinreichend genau abgebildet werden können. Als obere Grenze wurden jedoch 15 Eigenfrequenzen festgelegt. Dies bedeutet, dass bei Erreichen der 15 Moden die Rechnung beendet wird, obwohl die obere Grenzfrequenz von 4000 Hz noch nicht erreicht ist. Andersherum gilt das gleiche Prinzip. Sollte die Grenzfrequenz erreicht sein ehe 15 Moden aufgedeckt wurden, wird die Rechnung vom Programm beendet. Somit wird der Rechenaufwand auf ein erträgliches Maß reduziert. Die Schweißnähte wurden in der Simulation vernachlässigt. Auch das Öl, das im realen Einsatz der Wanne eine nicht zu vernachlässigende Größe darstellt, wurde für die erste Betrachtung außer Acht gelassen. Für diesen Fall müsste für das Fluid eine Masse, jedoch keine Steifigkeit angenommen werden. Da alle Modelle unter Vernachlässigung des Öleinflusses simuliert wurden, bleiben die Ergebnisse verwendbar.

3.8.4.2 Originalwanne

Um eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, wurde die Originalölwanne nachmodelliert (Bild 20, 21). Dies geschah, da zu diesem Zeitpunkt keine Freigabe der CAD-Daten seitens des Herstellers BMW vorlag. Dabei wurden die Konturen bestmöglich nachempfunden. Eine Wanddicke von $t_{Orig_mod} = 1,5 \text{ mm}$ (gemessen am Flansch des Serienbauteils) wurde dabei festgelegt. Diese nachmodellierte Wanne lag nach Vergabe des Materials Stahl (Dichte $\rho_{Stahl} = 7,85 \text{ kg/m}^3$) im Konstruktionsprogramm 151,26 g über der Masse der realen

Wanne ($m_{Orig_real} = 1775 \text{ g}$) und erreicht demzufolge eine Masse von $m_{Orig_mod} = 1926,26 \text{ g}$. Sie liefert somit hinreichend genaue Simulationsergebnisse. Die Abweichung beträgt ca. 8,5 %. Die Masseunterschiede sind dabei auf die nicht 100 % exakte Nachmodellierung und Masseverteilungsunterschiede in Folge des Herstellungsverfahrens der realen Wanne zurückzuführen. Es wurde ein E-Modul E_{Stahl} von 210000 N/mm^2 angenommen. Als Elementtyp kam ausschließlich der Solid92-Typ zum Einsatz. Das Modell besitzt eine Knotenanzahl N_{Orig} von 144473.

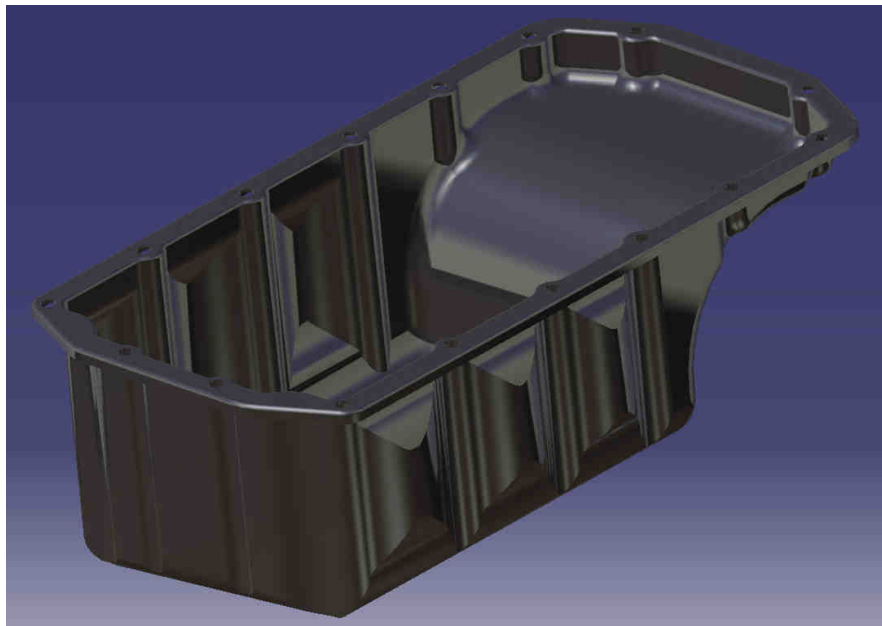


Bild 20: Nachmodellerte Originalölwanne nach Materialvergabe im CATIA V5

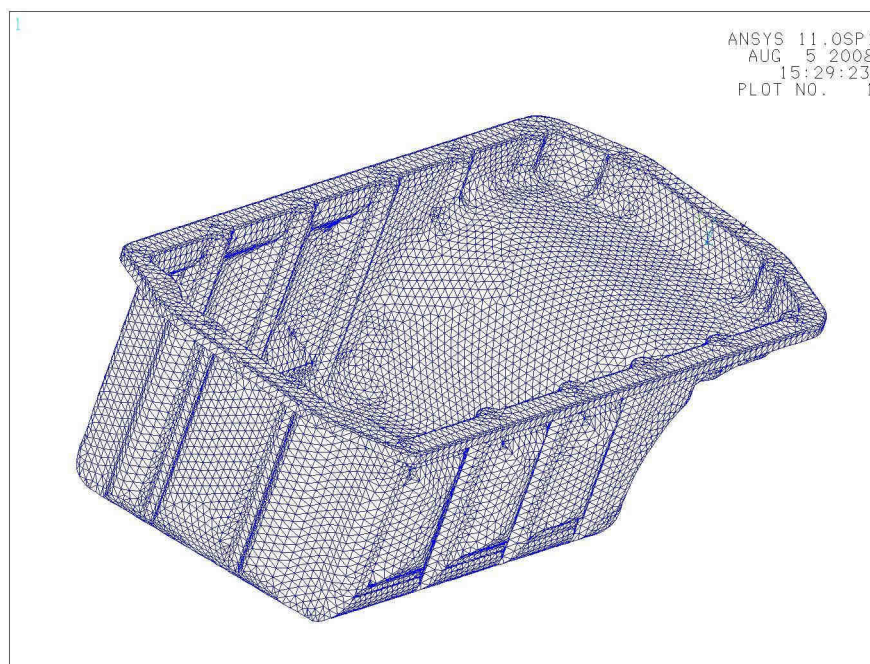


Bild 21: Nachmodellerte Originalölwanne vernetzt im ANSYS 11

3.8.4.3 Variante 1

Da der Netzgenerator geschlossene Profile und Körper voraussetzt, wurde die Variante 1, welche bauartbedingt aus vielen Einzelteilen besteht, zusätzlich neben der fertigungsgerechten Ausführung als Simulationsvariante ausgeführt, in der alle Bauteile eine geschlossen Kontur bilden. So wird die Dichtheit der Flächen zueinander gewährleistet. Als Elementtyp kam analog der Originalwanne der Solid92-Typ zum Einsatz. An den Deckblechen der Sandwiches und den U-Hülsen wurde ein zusätzliches Element (Shell 93) mit ebenfalls quadratischem Ansatz zugewiesen. Diesem wurde später eine definierte Dicke von je 1 mm für die Sandwiches und die Hülsen, also entsprechend der reellen AFS-Platten zugewiesen, da der Elementtyp von vorn herein von ANSYS 11 als unendlich dünn angenommen wird (Bild 22). Somit konnten einfach die Deckbleche nachempfunden werden (Bild 22), was einen zeitlichen Vorteil gegenüber dem Modellieren in CATIA erbrachte. Den Deckblechen, den U-Hülsen und dem Vollaluminiumflansch wurden gleiche Werkstoffparameter zugeordnet. Dies waren ein E-Modul von $E_{Deck} = E_{Huelse} = E_{Flansch} = E_1 = 70000 \text{ N/mm}^2$ und eine Dichte von $\rho_{Deck} = \rho_{Huelse} = \rho_{Flansch} = 2,7 \text{ g/cm}^3$. Dem Schaum wurden die aus Gleichung 3 (ersichtlich in Anlage 3) ermittelten Werte zugeordnet. Es wurde ein E-Modul von $E_{Foam} = E_2 = 5026 \text{ N/mm}^2$ und eine spezifische Dichte $\rho_{Foam} = 0,54 \text{ g/cm}^3$ errechnet und verwendet. Variante 1 besitzt eine Masse $m_{Var1} = 2164,7 \text{ g}$ sowie eine Knotenanzahl von 148186. Variante 1 ist in Bild 23 zu sehen.

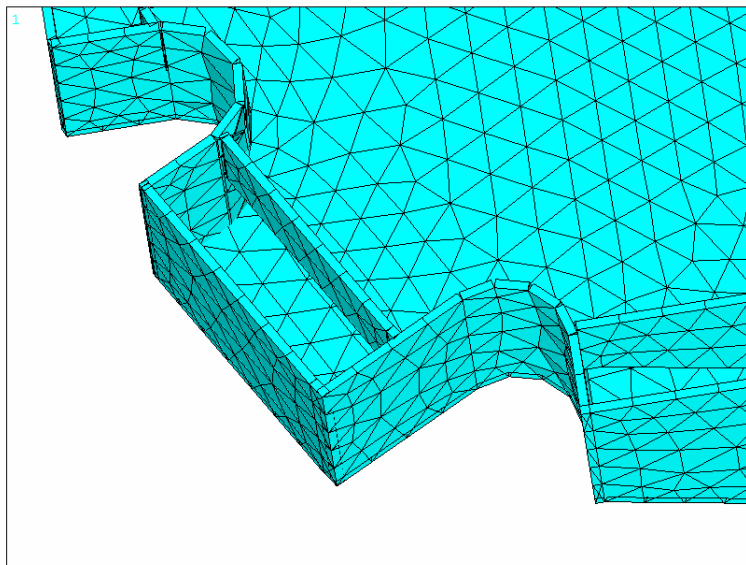


Bild 22: Schalenelemente Variante 1 im ANSYS 11

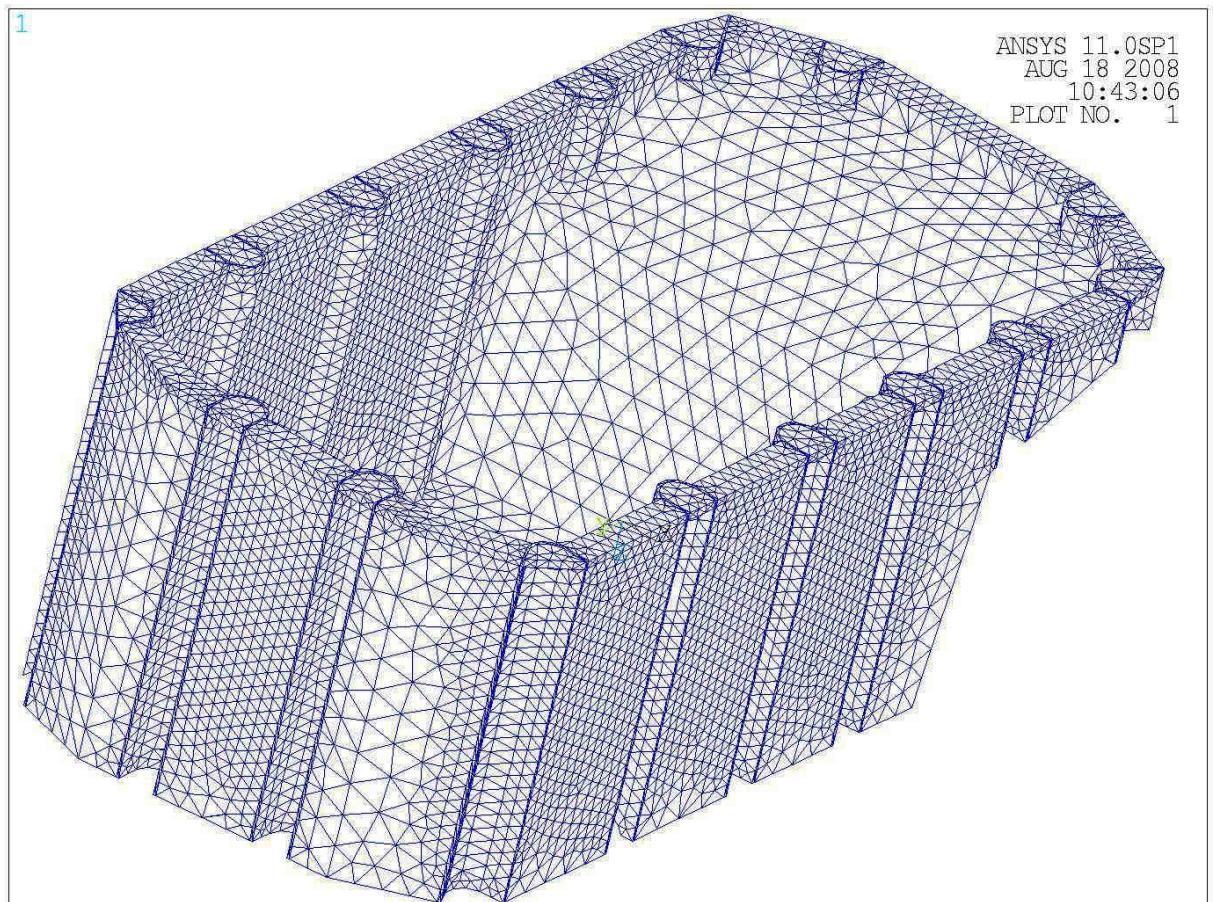


Bild 23: Variante 1 vernetzt im ANSYS 11

3.8.4.4 Variante 2

Variante 2 wurde konstruktiv so ausgelegt, dass Bohrungen durch den Schaum durchgeführt werden müssen. Um bei der Befestigung keinen zu hohen Druck der Schrauben auf die Schaumstruktur auszuüben, wurden in die vorhandenen Befestigungsbohrungen Stahlhülsen mit einer Wanddicke $t_{\text{Stahlhülse}}$ von 0,5 mm eingesetzt, die am Ende ähnlich einer Unterlegscheibe ausgeführt waren. Das Innenvolumen dieses Modells fällt, aufgrund der massiven Stege, offensichtlich kleiner aus. Jedoch konnte hier die äußere Form der Originalwanne durch den konstruktiven Freiraum besser nachempfunden werden. Um die Vergabe unterschiedlicher Materialien zu ermöglichen, mussten Flansch und Wannenkörper getrennt vernetzt werden. Bild 24 zeigt die Wanne vor der Berechnung, Bild 25 die eingesetzten Stahlhülsen. Die Schweißnähte von Flansch und Wannenkörper wurden auch hier vernachlässigt. Hier liegt eine Knotenanzahl von 86149 vor.

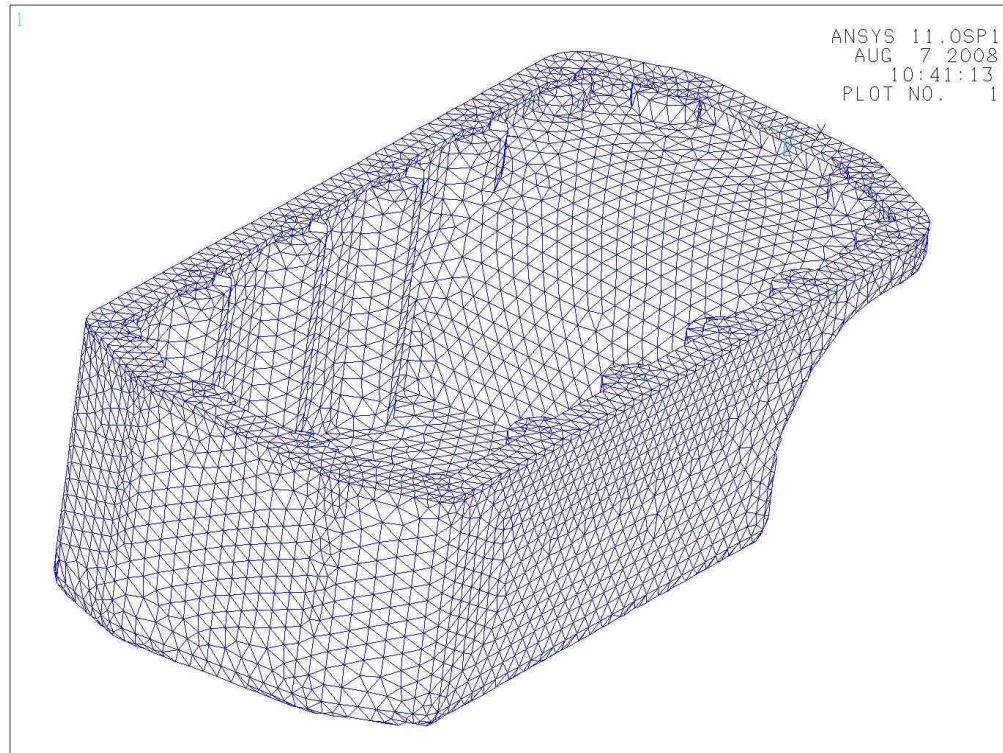


Bild 24: Variante 2 vernetzt im ANSYS 11

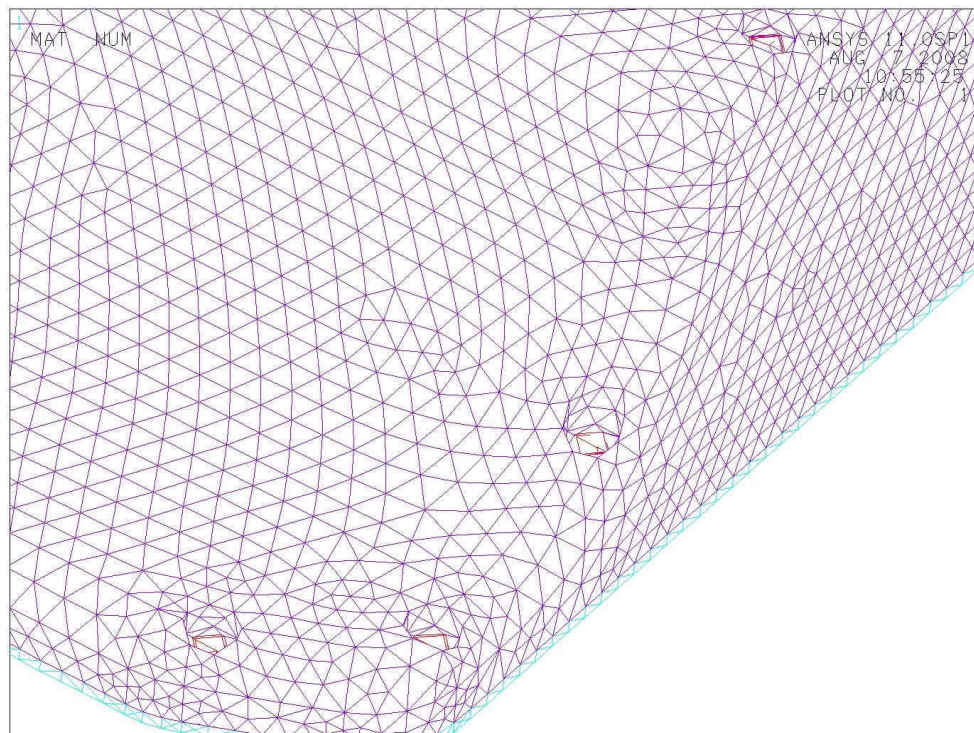


Bild 25: Eingesetzte Stahlhülsen im ANSYS 11

Dem Flansch wurde ein Elastizitätsmodul $E_{Flansch} = E_1 = 70000 \text{ N/mm}^2$ für Aluminium zugewiesen. Die Dichte $\rho_{Flansch}$ wurde mit $2,7 \text{ g/cm}^3$ festgesetzt. Dem Wannenkörper wurden die gleichen Werkstoffparameter wie in Variante 1 zugeordnet. Dies waren

ein E-Modul $E_{Foam} = E_2 = 5026 \text{ N/mm}^2$ und eine Dichte $\rho_{Foam} = 0,54 \text{ g/cm}^3$ (ersichtlich in Anlage 3). Den eingesetzten Stahlhülsen wurden analog die Werte der Originalwanne zugeordnet. Unter Berücksichtigung dieser Kennwerte errechnet ANSYS eine Masse von 1470 g für den Wannenkörper und 128,8 g für die Stahlhülsen. Daraus resultiert eine Gesamtmasse der Variante 2 von $m_{Var2} = 1589,8 \text{ g}$.

3.8.4.5 Variante 3

Variante 3 (Bild 26), welche in eine geschlossene Stahlform hineingeschäumt wird, wurde geometrisch in gleicher Weise wie Variante 1 ausgeführt. Jedoch unterscheidet sich Variante 3 in Hinsicht auf die Sandwichstrukturen. Da es sich bei Variante 3 um eine Nurschaum-Variante handelt, wurde für diese ein einheitliches Element (Solid92) mit quadratischem Ansatz für die komplette Vernetzung festgelegt. Auch hier musste analog zur zweiten Variante der Flansch vom Wannenkörper getrennt werden. Die Vergabe der Werkstoffkennwerte erfolge nach demselben Prinzip wie bei Variante 2. Vom FEM-Programm wurde eine Masse von $m_{Var3} = 1257 \text{ g}$ ermittelt. Bild 26 zeigt diese Ausführung der Nurschaum-Wanne. Die Knotenanzahl beträgt 138767.

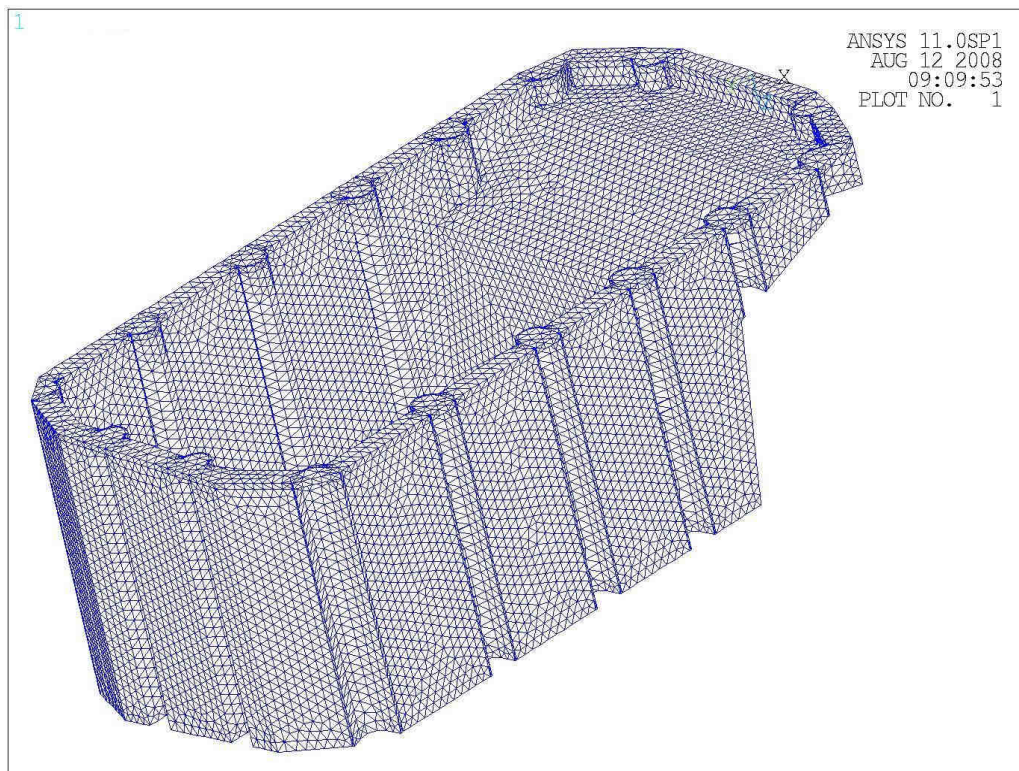


Bild 26: Variante 3 vernetzt im ANSYS 11

3.8.4.6 Auswertungen der Simulationsergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte in tabellarischer Ausführung und ist in Tabelle 3 aufgezeigt. Darin werden fundamentale Eigenschwingformen und deren zugehörige Eigenfrequenzen abgebildet, die für alle Varianten ermittelt werden konnten. Die Eigenschwingformen aller ermittelten Frequenzen und Formen sind in Anlage 4 abgebildet. Dabei wurden einzig die deformierten Modelle in einem jeweils günstigen Winkel dargestellt.

Zu erkennen ist, dass die Geometrie und die Steifigkeit wesentliche Auswirkungen auf die Resonanzfrequenzen haben. Dabei liegen alle 3 Varianten deutlich über dem Modell der Originalwanne. Dies lässt auf eine erhöhte dynamische Steifigkeit infolge eines deutlich höheren Masse-Steifigkeitsverhältnisses schließen. Deutlich wird dies beispielsweise durch Begutachtung der Ergebnisse für die Frequenz der 1. Ordnung für die Durchbiegung der Bodenplatte. Variante 3 liegt hier ca. mit Faktor 3 über der Originalwanne, Variante 1 sogar mit Faktor 4. Dies begründet sich durch die noch höhere Steifigkeit sowie der zusätzlichen Masse von Variante 1 im Vergleich zu 3 aufgrund der vorhandenen Deckbleche. Das es sich bei den Frequenzen der 2. Ordnung für die Durchbiegung der Bodenplatte nicht exakt um Vielfache der Frequenzen der 1. Ordnung handelt, liegt vermutlich an der komplexen Geometrie des Bauteils und dem daraus resultierenden Einfluss der Seitenwände.

Des Weiteren handelt es sich bei der Biegung der Bodenplatte 1. Ordnung bei allen Modellen um die jeweils erste Eigenschwingform/-frequenz.

Torsionsschwingungen konnten im vorgegeben Frequenzbereich der Simulation nur an Variante 2 bei 2679 Hz festgestellt werden und fließen somit nicht in den tabellarischen Vergleich ein. Dass Variante 3 trotz gleicher Werkstoffparameter in den Frequenzen niedriger liegt, begründet sich durch die Geometrie. Dabei sind die nachgebildeten Verschraubungskanäle aufgrund ihrer materialistischen Beschaffenheit weniger Steif als die Nurschaum-Kanäle von Variante 2 bzw. die Kanäle aus massivem Aluminium bei Variante 1.

Eine Aussage über das Dämpfungsverhalten kann nicht getroffen werden, da dieses simulativ nicht ermittelbar ist.

Tabelle 3: Eigenschwingformen und dazugehörige Eigenfrequenzen


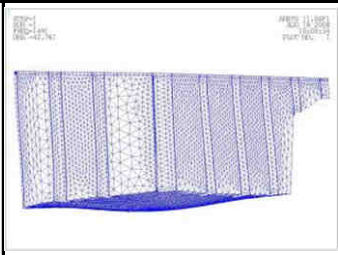
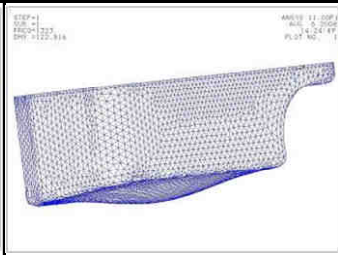
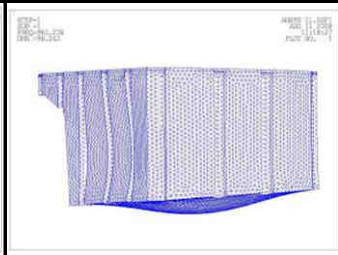
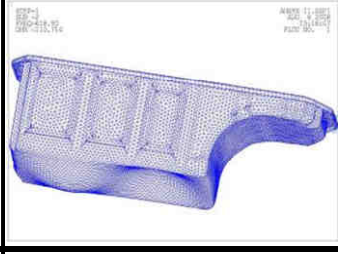
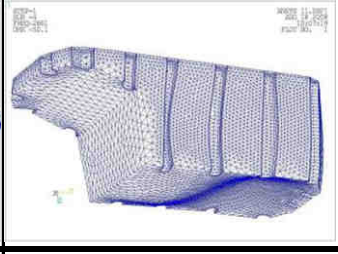
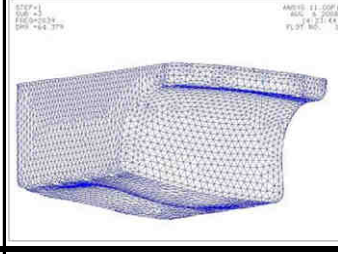
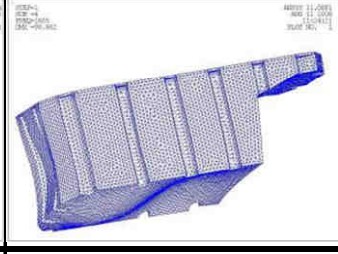
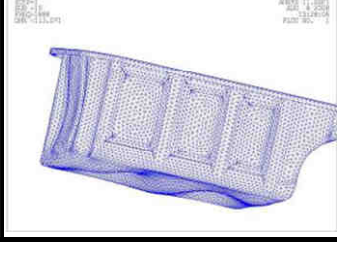
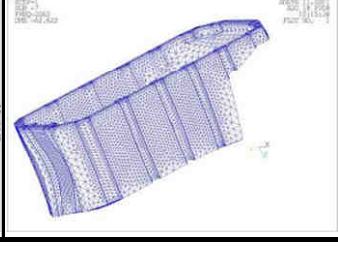
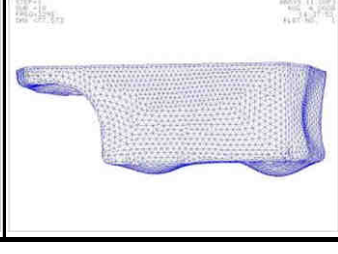

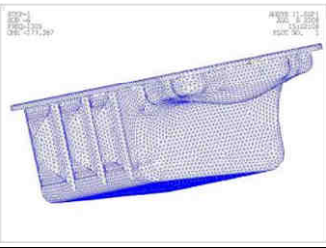
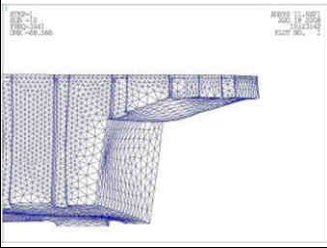
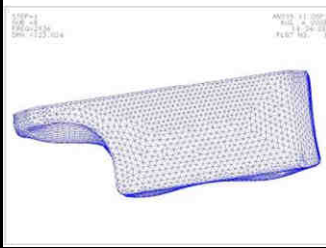
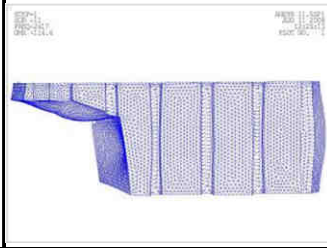
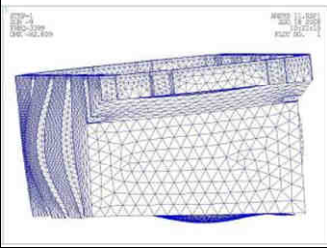
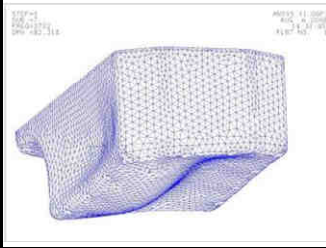
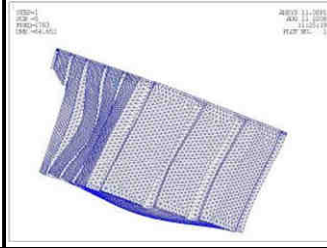
Eigenschwingform	Frequenz in Hz und Darstellung			
	Original	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Biegung der Bodenplatte, z-Richtung 1. Ordnung	369	1481	1323	965
				
Biegung der Bodenplatte, z-Richtung 2. Ordnung	619	2661	2039	1665
				
Biegung der Front, x-Richtung 1. Ordnung	1688	3063	3298	2217
				

Tabelle 3: Eigenschwingformen und dazugehörige Eigenfrequenzen

Eigenschwingform	Frequenz in Hz und Darstellung			
	Original	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Biegung der Heckplatte, z-Richtung 1. Ordnung	1305 	3441 	2936 	2417 
Biegung der Seitenwand, y-Richtung 1. Ordnung	- nicht verfügbar	3399 	2722 	1783 

3.8.5 Bewertung der Varianten

In den nachfolgenden Tabellen 4 und 5 sind die Varianten hinsichtlich ihrer Unterschiede nach einem von /27/ entworfenem Punktesystem bewertet. Als Hauptkriterien kamen Funktion, Gestalt, Fertigung, Kosten, Auslegung und Termin/Zeit zur Auswahl. Tabelle 4 zeigt dabei die Bewertung des Prototyps. In Tabelle 5 hingegen wurden den Kriterien andere Wichtungsfaktoren zugeordnet, um so einen Einblick in eine eventuelle Serienfertigung zu geben. Dabei wurde verstärkt auf den Kostenfaktor und den Zeitfaktor eingegangen.

Es lässt sich jedoch erkennen, dass Variante 1 jeweils am besten abschneidet. Somit wurde diese favorisiert und als reeller Prototyp umgesetzt.

Tabelle 4: Variantenbewertung der Prototypenfertigung

Kriterien	Wichtungsfaktoren			Variante					
				Variante 1		Variante 2		Variante 3	
	f_i	f_j	$f = f_i * f_j$	p	$p * f$	p	$p * f$	p	$p * f$
a Funktion	0,3	/	/	/	/	/	/	/	/
-Dichtheit		0,2	0,06	3	0,18	2	0,12	2	0,12
-Schwingungsdämpfung		0,7	0,21	4	0,84	3	0,63	3	0,63
-Schutzfunktion		0,1	0,03	3	0,09	2	0,06	2	0,06
b. Gestalt	0,25	/	/	/	/	/	/	/	/
-Platzausnutzung		0,6	0,15	2	0,3	4	0,6	3	0,45
-Oberflächengüte		0,1	0,025	2	0,05	4	0,1	3	0,075
-Masse		0,2	0,05	1	0,05	4	0,2	2	0,1
-Design		0,1	0,025	1	0,025	4	0,1	2	0,05
c. Fertigung	0,1	/	/	/	/	/	/	/	/
-Aufwand Werkzeugbau		0,7	0,07	3	0,21	1	0,07	3	0,21
-Zusatzarbeiten		0,2	0,02	2	0,04	3	0,06	3	0,06
-Toleranzeinhaltung		0,1	0,01	1	0,01	4	0,04	4	0,04
d. Kosten	0,05	/	/	/	/	/	/	/	/
-Werkzeuge		0,5	0,025	3	0,075	1	0,025	3	0,075
-Materialkosten		0,3	0,015	4	0,06	1	0,015	3	0,045
-Arbeitszeit		0,2	0,01	3	0,03	2	0,02	2	0,02
e Auslegung	0,25	/	/	/	/	/	/	/	/
-Simulation		0,8	0,2	4	0,8	2	0,4	3	0,6
-Stabilität		0,2	0,05	3	0,15	2	0,1	2	0,1
f. Termin/Zeit	0,05	/	/	/	/	/	/	/	/
-Werkzeugbau		0,9	0,045	4	0,18	2	0,09	3	0,135
-Schäumaufwand		0,1	0,005	3	0,015	2	0,01	2	0,01
Σ	1	/	1	/	3,105	/	2,64	/	2,78

Bewertung nach VDI 2225 p

sehr gut 4

gut 3

ausreichend 2

gerade noch tragbar 1

unbefriedigend 0

 f_i - Wichtungsfaktor, Hauptkriterium f_j - Wichtungsfaktor, Teilkriterium

f - Wichtungsfaktor, gesamt

Tabelle 5: Variantenbewertung einer Serienfertigung

Kriterien	Wichtungsfaktoren			Variante					
				Variante 1		Variante 2		Variante 3	
	f_i	f_j	$f = f_i * f_j$	p	$p * f$	p	$p * f$	p	$p * f$
a. Funktion	0,3	/	/	/	/	/	/	/	/
-Dichtheit		0,2	0,06	3	0,18	2	0,12	2	0,12
-Schwingungsdämpfung		0,7	0,21	4	0,84	3	0,63	3	0,63
-Schutzfunktion		0,1	0,03	3	0,09	2	0,06	2	0,06
b. Gestalt	0,15	/	/	/	/	/	/	/	/
-Platzausnutzung		0,1	0,015	2	0,03	4	0,06	3	0,045
-Oberflächengüte		0,2	0,03	2	0,06	4	0,12	3	0,09
-Masse		0,3	0,045	1	0,045	4	0,18	2	0,09
-Design		0,4	0,06	1	0,06	4	0,24	2	0,12
c. Fertigung	0,1	/	/	/	/	/	/	/	/
-Aufwand Werkzeugbau		0,3	0,03	3	0,09	1	0,03	3	0,09
-Zusatarbeiten		0,4	0,04	2	0,08	3	0,12	3	0,12
-Toleranzeinhaltung		0,3	0,03	1	0,03	4	0,12	4	0,12
d. Kosten	0,25	/	/	/	/	/	/	/	/
-Werkzeuge		0,2	0,05	3	0,15	1	0,05	3	0,15
-Materialkosten		0,3	0,075	4	0,3	1	0,075	3	0,225
-Arbeitszeit		0,5	0,125	3	0,375	2	0,25	2	0,25
e. Auslegung	0,15	/	/	/	/	/	/	/	/
-Simulation		0,8	0,12	4	0,48	2	0,24	3	0,36
-Stabilität		0,2	0,03	3	0,09	2	0,06	2	0,06
f. Termin/Zeit	0,05	/	/	/	/	/	/	/	/
-Werkzeugbau		0,1	0,005	4	0,02	2	0,01	3	0,015
-Schäumaufwand		0,9	0,045	3	0,135	2	0,09	2	0,09
Σ	1	/	Σ 1	/	3,055	/	2,455	/	2,635

Bewertung nach VDI 2225 p

sehr gut	4
gut	3
ausreichend	2
gerade noch tragbar	1
unbefriedigend	0

 f_i - Wichtungsfaktor, Hauptkriterium f_j - Wichtungsfaktor, Teilkriterium f - Wichtungsfaktor, gesamt

4 Experimentelle Untersuchungen und Maßnahmen

4.1 Bau des Prototyps

Um die Schweißbarkeit der AFS-Platten und des Aluminiumflanschs vor dem Bau nachzuweisen, wurden bei der, in Frage kommenden Firma STF (Schweißtechnische Fertigung) in Chemnitz, Schweißproben in Auftrag gegeben. Weiterhin waren die Ausbildung der Schweißnähte und der entstehende Verzug in Folge des Wärmeeintrags interessant.

Um die Ergebnisse der Probe bestmöglich bewerten zu können, wurden gleiche Wanddicken wie beim endgültigen Prototyp verwendet (Bild 27, 28). Es kamen 11 mm starke AFS-Platten sowie ein 3 mm starkes Alu-Blech der Zusammensetzung AlSi5 zum Einsatz. Die Sandwich-Stücken wurden vorher mit einer 45°-Gärung versehen.



Bild 27: Schweißprobe, Kehlnaht



Bild 28: Schweißprobe, I-naht

Diese wurden anschließend mit Hilfe des WIG-Schweißverfahrens in eine unlösbare Verbindung gebracht. Eine Kehlnaht (Bild 27) sollte die Nähte im Inneren der Wanne demonstrieren. Eine I-Naht (Bild 28) hingegen den Stoß der AFS-Platte mit dem Alu-

Flansch außen. Das Ergebnis ist allgemein als gut zu werten. Der Wärmeeintrag und der flüssige Schweißzusatzstoff greifen den innen liegenden Schaum nur gering an. Die Verbindung ist fest und der Verzug ist als gering einzuschätzen. Somit konnten diese Wandstärken und das Schweißverfahren beim Bau Anwendung finden.

Zur Realisierung des Prototyps kamen Sandwiches mit Deckblechen aus AlMgSi1 (Al 6082) und Schaum aus AlMg3Si6 zum Einsatz (Hergestellt analog Kapitel 3.5.3). Diese wurden aus Zeitgründen von der Firma Alulight GmbH bezogen. Der gelaserte Flansch aus 3 mm starkem AlMg3 wurde von der Firma BTR Lasertechnik, ebenfalls ansässig in Chemnitz, durch die Vorgabe einer dxf-Datei des CATIA-Modells gefertigt (Bild 29).

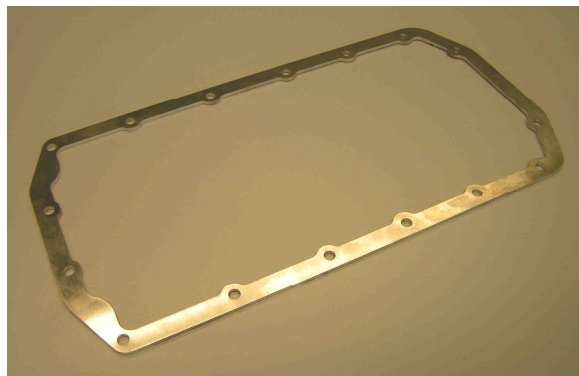


Bild 29: Gelasertes Aluminiumflansch aus AlMg3

Das Material der U-Hülsen wurde ebenfalls auf AlMg3 festgelegt. Zur Fertigung der Hülsen wurde ein geschweißtes Werkzeug (Bild 30) entworfen, das den Biegevorgang erleichtern soll. Zudem kann diese durch ihre Ausführung (Wellenabsatz und Stufe im unteren Block) beim späteren Schweißvorgang behilflich sein, indem sie davor in die Bohrung eingebracht wird (Bild 31) und so eine genaue Positionierung der Hülse ermöglicht.



Bild 30: Werkzeug für Biege- und Schweißvorgang der U-Hülsen

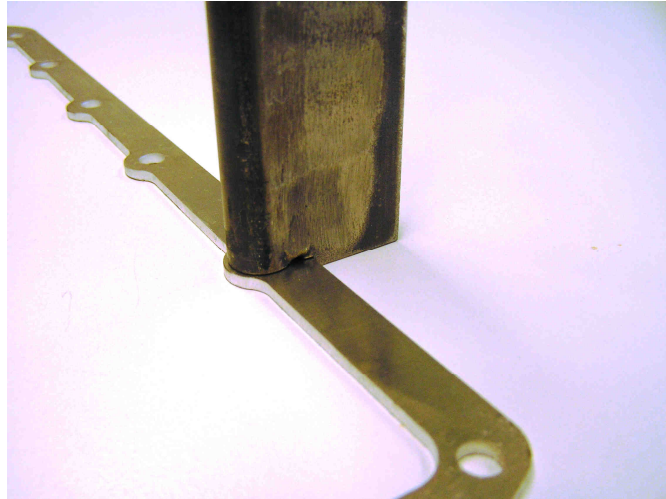


Bild 31: Anwendung des Werkzeugs vor dem Schweißen

Das Werkzeug setzt sich aus zwei Einzelteilen zusammen (siehe dazu siehe Anlage 2). Ein Rundstahl (Bauteil 1,) aus S235JR mit dem Außendurchmesser von 14 mm wurde an einem Ende auf einen Durchmesser von 7 mm durch Drehen reduziert. Dieser stimmt mit dem der Bohrungen im Flansch überein. Die Höhe des reduzierten Stückes wurde auf 3 mm festgelegt, was der Flanschhöhe entspricht. Der untere Block (Bauteil 2), ebenfalls aus S235JR, wurde mit einer Breite von 12 mm ausgelegt. Dies geschah, da die Rückfederung des Aluminiumblechs beim Kaltumformen berücksichtigt werden musste. Wie auf Bild 30 und 31 zu erkennen ist, wurde auch hier ein Absatz eingebracht. Dieser war analog zum Rundstahlprofil 3 mm hoch und 2,5 mm tief. Addiert man die 2,5 mm mit der Hälfte des Rundstahlprofils (7 mm), so ergibt sich ein Abstand von 9,5 mm. Dieser entspricht genau dem Abstand, wie in Bild 31 zu erkennen ist, der beim Flansch von Bohrungsmitte bis zum äußeren Rand vorliegt. Somit gewährleistet das Werkzeug einen U-Hülsen-Innendurchmesser $d_{\text{Aluhülse}}$ von 14 mm und zugleich eine absolut parallele Ausrichtung der Hülse zum Rand des Flanschs vor und nach dem Schweißvorgang. Die Bauteile wurden durch das MAG-Schweißverfahren verbunden. Links wurde zusätzlich ein 1 mm starkes Blech aufgeschweißt, dessen Abstand der Blechoberkante zur Wellenoberkante 16 mm beträgt. Dieses dient als Anschlag für das zu biegende Blech. Die Dicke wurde auf 1 mm festgelegt, sodass das Werkzeug und das Blech (Halbzeug) gleichzeitig vom Schraubstock gehalten werden können. Die 16 mm Abstand waren für jede zu fertigende Hülse gültig, da beim Konstruktionsvorgang jede Hülse mit mindestens einem 9 mm Schenkel versehen wurde. Die Nähte wurden anschließend mit einem Winkelschleifer mit

Schruppscheibe nachbearbeitet, um beim Biegevorgang ein gutes Anliegen des Halbzeugs zu erzielen.

Die 22 Sandwich-Einzelteile wurden anfangs mit einer Kreissäge aus den AFS-Platten herausgetrennt. Da die Seitenteile teils Breiten und Längen ausweisen, die in den Zehntel-Bereich gehen, wurden sie mit einem Übermaß von 2 bis 3 mm versehen. Dieses Übermaß wurde im Anschluss mit einer Fräsmaschine spanend abgearbeitet. An diesem Gerät sind Genauigkeiten bis in den Hundertstel-Bereich realisierbar. Gleichzeitig können hier auch die Gärungen durch Drehung des Fräfers angebracht werden. Um im Vorfeld den 5°-Neigungswinkel der Frontpartie über die gesamte Breite der Wanne konstant zu halten, wurden alle Einzelteile der Stirn als ein einziges Stück aus einer AFS-Platte geschnitten und darauf folgend mit dem 5°-Winkel versehen. Dieser konnte durch Drehung des Kreissägentischs an das Bauteil angebracht werden. Anschließend wurden die Einzelteile aus dieser Platte herausgetrennt. Zu beachten war hier der Verschnitt, der durch die Breite des Kreissägeblatts von ca. 4 mm entsteht. Analog wurde hier bei den Seitenteilen und den Bodenplatten vorgegangen. An der 3-Achsen-Fräsmaschine FNGJ-30 der Firma Hestego wurden vor dem Fräsvorgang die Parameter Drehzahl und Vorschub ermittelt. Diese ergeben sich aus Gleichung 5 und 6. Hier wird die in Gleichung 5 ermittelte Drehzahl $n_{Fräs}$ in die Gleichung 6 eingesetzt.

$$n_{Fräs} = \frac{v_c}{\pi \cdot d} \quad (5)$$

mit: -Schnittgeschwindigkeit v_c als tabellarischen Wert für den jeweiligen Werkstoff
-Fräskopfdurchmesser d

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n_{Fräs} \quad (6)$$

mit: - f_z als tabellarischen Wert für den jeweiligen Werkstoff
-Fräskopfzähnezahl z

Um die Deckbleche beim Fräsvorgang zu stabilisieren, wurde jeweils am Deckblech, welches dem Schneideneingriff des Fräfers gegenüber steht, ein Vollaluminiumblock vorgespannt, der die Schläge beim Schneideneingriff mildern soll. Zum Einsatz kam ein HSS-Stirnfräser mit 8 Schneiden und einem Durchmesser von 50 mm. Beim Anbringen der Fasen wurden maximal 0,75 mm zugestellt, um Wärmeeintrag und Werkzeugverschleiß gering zu halten. Die Bohrungen in den Bodenplatten wurden

mit einem 16 mm Schaftfräser realisiert. Hier kam das Umfangsfräsen zum Einsatz. Die Seitenteile wurden in einem Spannbock eingespannt und anschließend spanend bearbeitet. Die Bodenplatten hingegen wurden vom Bock nicht mehr ausreichend fest aufgenommen und wurden somit direkt, auf dem von der Fräse zur Verfügung gestellten Tisch, aufgespannt. Die 20 mm Bohrung für die Ölablassschraube wurde mit einer Tischbohrmaschine realisiert. Zunächst wurde in 4 Schritten vorgebohrt. Dabei kamen ein 5, 10, 16 und ein 19,5 mm Bohrer zum Einsatz. Anschließend wurde die gedrehte Stahlhülse (Bild 32) vermessen. Dabei wurde ein Schaft-Außendurchmesser von 19,93 mm ermittelt. Somit wurde dann ein Bohrungsdurchmesser von 19,95 mm mit einer Reibahle in die Bodenplatte eingebracht. Die Hülse wurde anschließend mit einem Spezialkleber an der Bodenplatte befestigt. Dieser Kleber muss eine hohe Festigkeit besitzen, da dieser beim Einschrauben der Verschlusschraube die Kräfte in das AFS überträgt. Gleichzeitig ist hier eine hohe Dichtheit und Temperaturbeständigkeit gefordert, um ein Auslaufen des Öls zu verhindern. Zum Einsatz kam ein pastöser Zweikomponentenklebstoff auf Epoxidharzbasis der Firma Huntsman mit der Bezeichnung Araldite 2014-1. Dieser zeichnet sich nach Angaben des Herstellers durch eine hohe Wärmefestigkeit und Beständigkeit gegen Chemikalien aus. Er weist eine geringe Schrumpfung auf, ist fugenfüllend und zum Kleben von metallischen Verbindungen geeignet. Somit eignet er sich hervorragend zum Befestigen der Hülse und bietet selbst unter Einfluss von heißem Öl Dichtwirkung.



Bild 32: T-Hülse aus Stahl für Ölablassöffnung

Für den Biegevorgang der U-Hülsen kam das vorab genannte Biegewerkzeug zum Einsatz. Dazu wurde das zu biegende Halbzeug vorab mit einer motorischen Tafelschere auf entsprechende Länge und Breite gebracht und anschließend wie in Bild 33 dargestellt eingespannt.

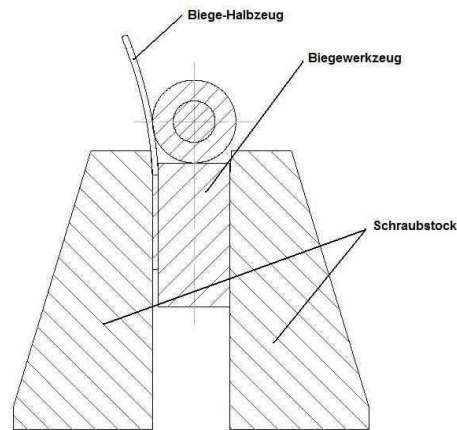


Bild 33: Einspannung des Biegehalbzeugs

Die Bauteile wurden gemäß den Konstruktionszeichnungen gefertigt und sind in Bild 34 und 35 dargestellt.

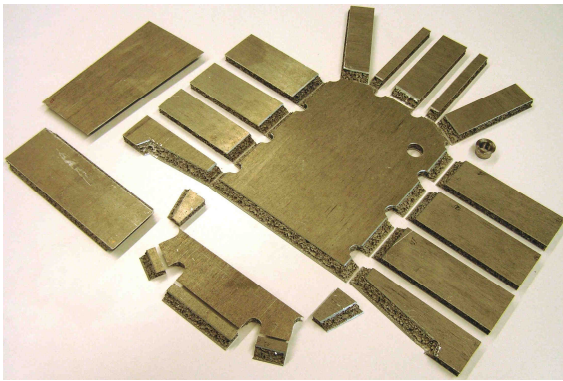


Bild 34: Fertiggestellte AFS-Sandwichplatten



Bild 35: Fertig gestellte U-Hülsen

Im Anschluss an die Fertigung wurden alle Bauteile nummeriert, um Verwechslungen beim Schweißvorgang auszuschließen. Eine Reinigung wurde mit Brenn-Spiritus vorgenommen. Dieser bietet eine hinreichende Reinigungskraft und verdunstet rückstandsfrei. Dadurch wird die Schweißbarkeit weiterhin gewährleistet. Bild 36 zeigt alle Bauteile aufgelegt, entsprechend ihrer endgültigen Position.

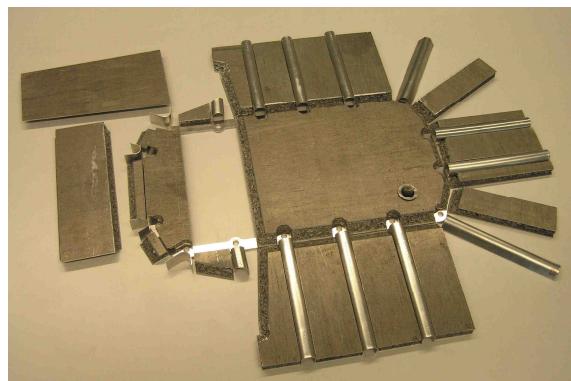


Bild 36: Anordnung aller Einzelteile vor dem Schweißvorgang

Vor dem jeweiligen Schweißvorgang werden die Teile auf einem Schweißtisch aufgespannt (Bild 37). Wichtig hierbei ist die absolut senkrechte Ausrichtung der Wandelemente zum Flansch.

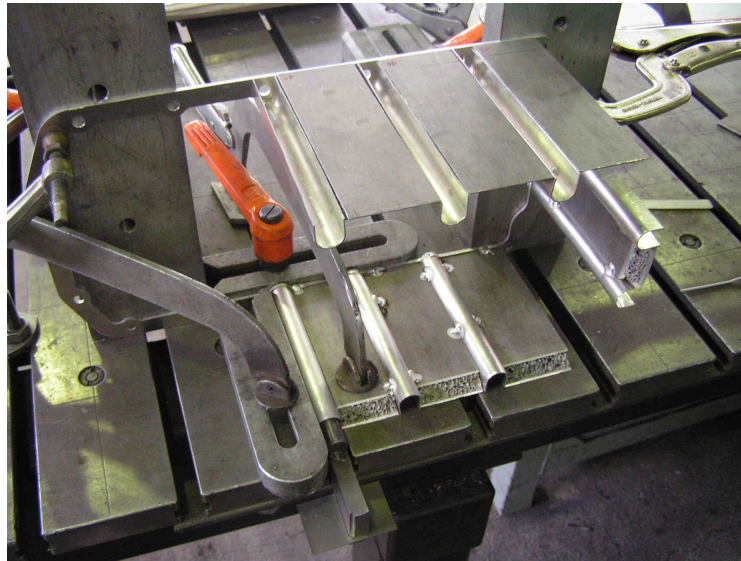


Bild 37: Aufgespannte Baugruppe vor dem Schweißvorgang

Die Biege- und Montagehilfe (unterer Bildrand) dient der Positionierung der U-Hülsen und zugleich als Kühlelement. Des Weiteren wird durch die Einbringung des Werkzeugs sicher gestellt, dass der Verschraubungskanal vollständig erhalten bleibt und keine Schmelze nach Innen gelangt.

Um an allen Schweißstellen der Wanne bestmöglichen Zugriff sowie Maßhaltigkeit der Winkel zu gewährleisten, wurden die geraden Wandelemente mit dem Flansch verschweißt (Bild 38) und die Elemente mit seitlichen Gärungen erst auf die Bodenplatte angebracht (Bild 39). Im Anschluss wurden beide Baugruppen zu einer Gemeinsamen zusammengesetzt und ebenfalls miteinander verschweißt (Bild 40).

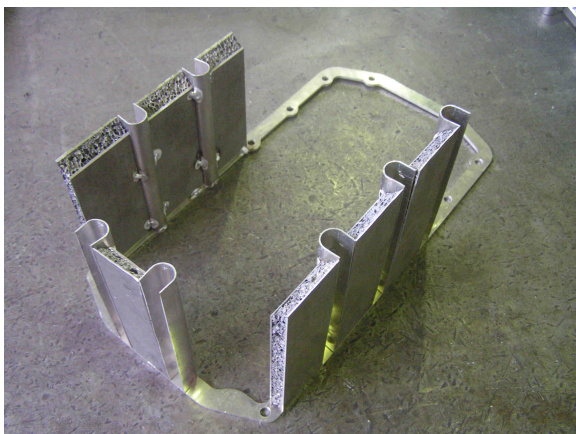


Bild 38: Gerade Wandelemente mit Flansch verschweißt

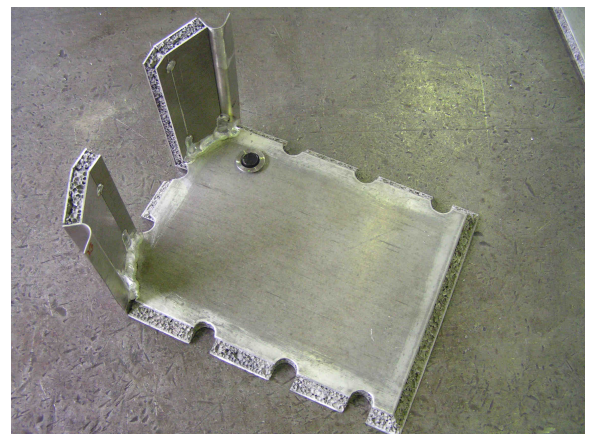


Bild 39: Schräge Wandelemente mit Bodenplatte verschweißt

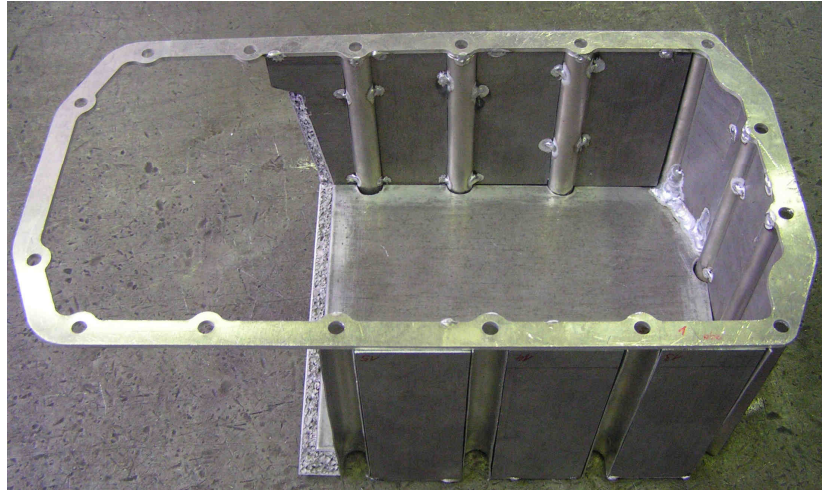


Bild 40: Zusammengesetzte Einzelbaugruppen

Zunächst wurden alle auf Bild 40 zu sehenden Einzelbauteile zu einer Baugruppe zusammen gepunktet. Anschließend wurde der innere Bereich der Wanne komplett verschweißt. Durch die Öffnung im Heckbereich waren alle Schweißstellen im Vorderbereich gut erreichbar. Im Anschluss wurde der hintere Teil am Flansch durch Schweißpunkte angebracht und darauffolgend fixiert. Danach wurden alle endgültigen Schweißnähte am Bauteil angebracht. Auf Grund der flächenmäßig großen Ausdehnung der Seitenwände wurde hier wechselseitig geschweißt. Da die Kehlnähte im Innenbereich der Wanne eine größere Zugkraft beim Abkühlungsvorgang entwickeln als die Nähte außen, konnte so zumindest in einem gewissen Maße dem Verzug entgegen gewirkt werden. Das Endresultat weist eine geringe Bombierung der Seitenwände nach Innen zur Längsrichtung der Wanne auf. Die Befestigungsbohrungen sowie die Kanäle und die Dichtfläche wurden daher gering nachgearbeitet um ein späteres Installieren am Versuchsfahrzeug zu gewährleisten. Dabei diente ein nicht verschweißter Flansch als Schablone.

Zur Abdichtung der Ölablassöffnung kommt ein Kupferring zum Einsatz. Dieser ist im Vergleich zu herkömmlichen O-Ringen aus Gummi problemlos für den Einsatz an heißen Teilen geeignet. Der Kupferring muss jedoch vor dem Anziehen der Ablassschraube weichgeglüht werden. Dies erfolgt unter Nutzung eines Propangasbrenners und anschließender Abschreckung unter kaltem Wasser. Dieser Vorgang muss vor jedem Einschrauben wiederholt werden, da der Ring sich nach dem Anziehen wieder verfestigt.

Bild 41 und 42 zeigen den fertigen Prototyp nach dem Reinigen.

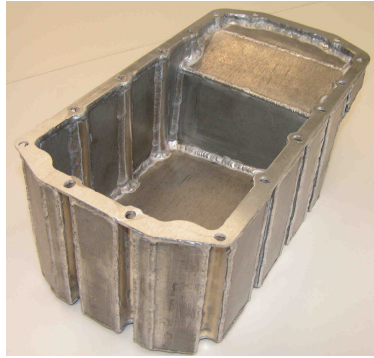


Bild 41: Fertiger Prototyp



Bild 42: Fertiger Prototyp

Die Wanne weist eine Masse $m_{\text{Prototyp}} = 1950 \text{ g}$ auf und liegt somit 175 g über der Masse der Originalwanne. Das entspricht einer Differenz von 9,8 %. Die Anbringung erfolgte unter Verwendung, des in Anlage 3 nachgerechneten, Anzugsmomentes $M_A = 10,1 \text{ Nm}$.

4.2 Prüfaufbau und Versuchsdurchführung

4.2.1 Messung auf Scheitelrollenprüfstand

Zum Einsatz kam ein Scheitelrollenprüfstand, welcher in einem reflexionsarmen Halbraum an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (WHZ) am Campus-Standort Scheffelberg untergebracht ist. Als Fahrzeug diente ein BMW Mini Cooper 1,6l 88 KW, Baureihe R56 an dem jeweils die zu untersuchende Wanne vorher installiert wurde.

Anfangs wurde eine Ausrichtung des PKW auf der Scheitelrolle vorgenommen. Der Vorderwagen wurde, unter Verwendung zweier durch die Abschleppöse gezogener Spanngurte, gehalten (Position1-Bild 43). Zur Stabilisierung des Versuchsfahrzeugs wurden anschließend beide Räder der Hinterachse durch Spannvorrichtungen fixiert (Position2-Bild 43). Zur späteren Konditionierung des Fahrzeugmotors wurde eine Temperaturmesssonde durch das Ölpeilstabführungsrohr in die Ölwanne eingeführt und anschließend abgedichtet. Als Betriebskriterium wurde vorab eine konstante Öltemperatur von 90°C festgelegt, die nach jedem Prüflauf unter Verwendung vorhandener Gebläse auf selbige Temperatur heruntergekühlt wurde.



Bild 43: Fahrzeugbefestigungspunkte

Zur Aufnahme der Fahrzeuggeräuschemission wurden drei Nahfeldmikrofone sowie ein 2-Kanal-Kunstkopf (linkes und rechtes Ohr) verwendet. Entsprechend der vorher festgelegten Abstände wurden diese positioniert. Der Kunstkopf Eugen HMS III digital (Bild 44) wurde in einem Abstand von 1,00 m zur Fahrzeugvorderkante aufgestellt. Der Abstand der Ohren (Mikrofone) betrug 1,60 m von Ohrmitte zum Boden.



Bild 44: Kunstkopf Eugen HMS III

Die Positionierung des Mikrofons, für die Messung des Schalldruckpegels im Nahfeld der Wanne, wurde direkt unterhalb des Fahrzeugs am Hallenboden mittels Klebeband vorgenommen (Bild 45). Das Mikrophon für die Messung am Radkasten des Fahrzeugs wurde in einem Abstand von 0,50 m zum Rad aufgestellt und in einem Stativ eingespannt (Bild 46). Es wurde dabei auf Höhe des Spaltes zwischen Radkasten und Rad fixiert. Zur Erfassung des Schalldruckpegels an der

Beifahrerposition wurde an der Innenseite der Beifahrertürscheibe, in 0,70 m Höhe über der Sitzfläche, ein weiteres Mikrofon angebracht (Bild 47).



Bild 45: Mikrofon Wanne

Bild 46: Mikrofon
RadkastenBild 47: Mikrofon
Innenraum

Zur Abnahme des Drehzahlsignals wurde, die im Innenraum befindliche, OBDII-Schnittstelle des Fahrzeugs herangezogen. Alle Messdaten wurden durch das Frontend SQLab II der Firma Head-Acoustics (mobiles Multikanal-Analysegerät) aufgenommen und mittels der Software ArtemiS 9 auf einem geeigneten Notebook visualisiert und ausgewertet (Bild 48).



Bild 48: Frontend SQLab II mit Software ArtemiS 9

Da am vorhandenen Prüfstand als Führungsgröße die Fahrzeuggeschwindigkeit und nicht die Motordrehzahl eingestellt werden konnten, musste das Übersetzungsverhältnis eines Gangs bestimmt werden. Dazu wurde die Geschwindigkeit am Prüfstand bei 1000 U/min (14,5km/h) im eingelegten 2. Gang ermittelt. Mit Hilfe der Übersetzung des gewählten Gangs konnten für alle festgelegten Drehzahlen äquivalente Geschwindigkeiten errechnet werden, die später am Prüfstand eingestellt wurden. Als Messverfahren kamen der Schlepplauf des Motors über eine definierte Drehzahlrampe und die Messung der

Geräuschemission bei stationären Drehzahlpunkten zum Einsatz. Um einen Vergleich zu vorhandenen Störgeräuschen (bspw. Reifen-Fahrbahnkontakt) aufzuzeigen, wurden alle Messungen mit abgeschaltetem Motor bei nicht eingelegtem Gang wiederholt. Die Zeitrohdaten, der anschließenden Messungen (Tabelle 6), wurden auf Festplatte gespeichert und anschließend mit Excel und ArtemiS 9 ausgewertet (Kapitel 5.2.1)

4.2.1.1 Schleppläufe über Drehzahlrampe

Das Fahrzeug wird hierbei über den festgelegten Bereich von 1000-6500 U/min (konstante Rampe) bei eingelegtem 2. Gang durch die Rolle geschleppt. Dabei werden mit dem Messsystem, bei einem Pre-Trigger von 2,4 s und einer Messdauer von 145 s beim Hochlauf der Drehzahl, die Pegel über den Terzmittenfrequenzen gemessen.

Die durchgeführten Messungen sind in Tabelle 6 ersichtlich. Vor jeder Messung wurde das Fahrzeug ausreichend konditioniert. Es erfolgte außerdem eine Echtzeitanalyse der fünf Eingangssignale über dem Terzspektrum zur Anpassung der Signaleingangsempfindlichkeiten sowie zur Kontrolle der Messdaten vor den eigentlichen Messungen.

Tabelle 6: Messungen nach Verfahren 1 (Rampe)

Messung	Typ	Öltemperatur in °C	Zündung PKW
1	Rampe, normal	80-103	ein
2	Rampe, normal	80-102	aus
3	Rampe, Störgeräusch	90-100	aus

4.2.1.2 Schleppläufe über konstante Drehzahlen

Bei diesem Verfahren wurden anhand der vorab ermittelten Geschwindigkeiten Drehzahlen am Motor eingestellt und anschließend bei abgeschalteter Kühlluft die Geräuschemission über einen definierten Zeitraum von 20 s gemessen. Die Messwertaufnahme erfolgte analog zu Verfahren 1. Die gewählten Drehzahlen sind in Tabelle 7 ersichtlich.

Tabelle 7: Messpunkte Verfahren 2 (konstante Drehzahlen)

Messung	Drehzahl in U/min, Art	Öltemperatur in °C	Zündung PKW
5	1000, normal	90	aus
6	1350, normal	90	aus
7	1500, normal	90	aus
8	3000, normal	90	aus
9	4500, normal	91	aus
10	6000, normal	92	aus
11	1000, Störgeräusch	90	aus
12	1350, Störgeräusch	90	aus
13	1500, Störgeräusch	91	aus
14	3000, Störgeräusch	90	aus
15	4500, Störgeräusch	92	aus
16	6000, Störgeräusch	90	aus

4.2.2 Messung mittels Schallintensitätssonde

Das Versuchsfahrzeug wurde auf einer Hebebühne an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (WHZ) am Campus-Standort Scheffelberg hoch genommen. Anschließend wurde der Boden mit schalldämpfenden Matten versehen. Somit sollten unerwünschte Reflexionen am Hallenboden reduziert werden. Zur Gewährleistung eines konstanten Abstandes der Intensitätsmesssonde zu der zu messenden Fläche des PKW wurde ein, in Bild 49 ersichtliches Gitter, installiert.



Bild 49: Unter dem Fahrzeug installiertes Gitter

Es wurde ein Abstand des Gitters zum Wannenboden von 200 mm festgelegt (spielt bei Intensitätsmessungen jedoch eine untergeordnete Rolle). Der Abstand der Gitterfelder untereinander beträgt 125 mm. Daraus folgt eine analysierbare Fläche von 0,125 m². Die Bodenplatte wurde von der, vorher am Abstandsgitter definierten, Fläche vollständig eingeschlossen. Die festgelegten Messpunkte der Fläche sind in Bild 50 sichtbar und gelten für beide Wannentypen.

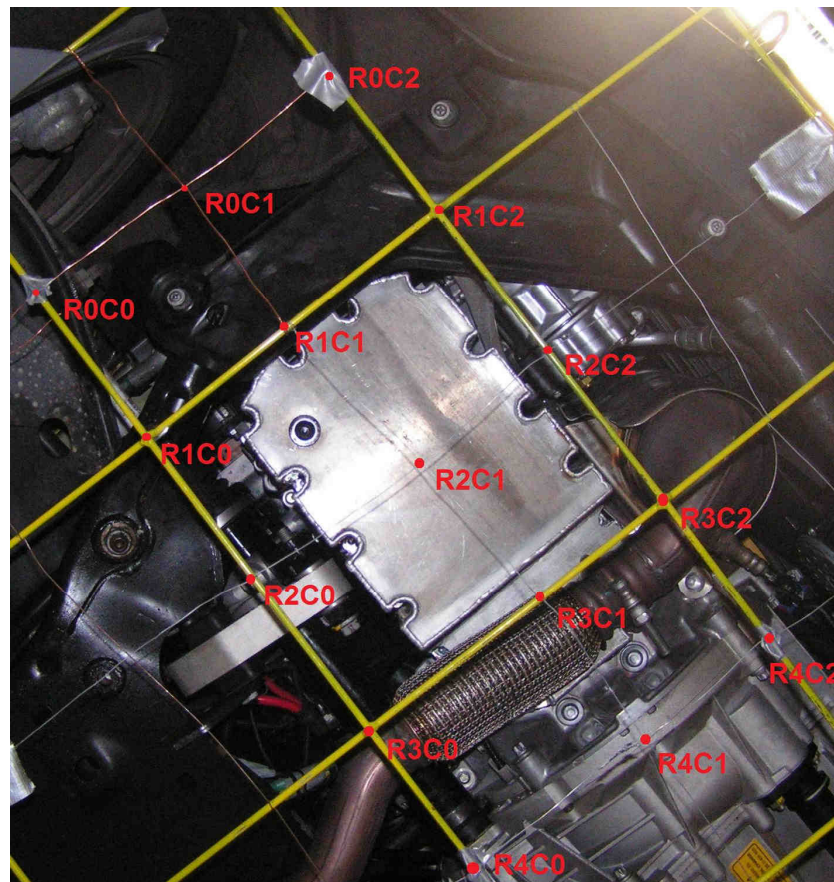


Bild 50: Messpunkte am Abstandsgitter

Im Versuch werden alle Messpunkte schrittweise abgearbeitet. Dabei wird in einem Frequenzspektrum von 50-10000 Hz auf jeder Terzmittenfrequenz die Intensität des jeweiligen Punktes aufgenommen. Dazu wird die Sonde für einen Zeitraum von 20 s an jedem Messpunkt in Richtung der Normalen (notwendig bei Messung vektorieller Größen) unter die Wanne gehalten. Die Dauer von 20 s je Messung sorgt für eine Reduktion der Einflüsse unerwünschter Drehzahlschwankungen. Als Motorbetriebspunkt wurde die Standdrehzahl des Antriebsaggregates von ca. 850 U/min gewählt. Die Messdaten wurden anschließend auf einem Datenträger abgespeichert und mittels Microsoft Excel ausgewertet (Kapitel 5.2.2).

Weitere Drehzahlen konnten messtechnisch nicht erfasst werden, da keine eindeutige Fixierung anderer Drehzahlen möglich war.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Konstruktionsbeschreibung

Als wichtigstes Bauteil der Ölwanne ist der Flansch anzusehen. Dieser wurde in seinen Konturen exakt den Vorgaben der originalen Dichtung nachempfunden, um diese später gut aufnehmen zu können und um gleichzeitig ein exaktes Befestigen des Prototyps analog der Originalwanne zu ermöglichen. Als Wandbreite $b_{\text{Flansch_Wand}}$ wurde an den Seiten ein Wert von 13 mm festgelegt, wobei die Gesamtbreite b_{Flansch} exakt 194 mm analog des Originalflanschs entspricht. Die Bohrungen für die Befestigung wurden mit einem Durchmesser $d_{\text{Flansch_Bohr}} = 7$ mm ausgeführt. Dies ermöglicht die Verwendung von M6-Sechskant-Schrauben und zugleich einen geringen Längen- und Breitenausgleich bei der Montage. Die Höhe t_{Flansch} wurde mit 3 mm festgelegt, um dem Bauteil eine gewisse Eigenstabilität zu geben sowie die Schweißbarkeit und Montage zu ermöglichen. Als Material wurde eine Aluminiumlegierung (AlMg3) gewählt. Daraus ergab sich eine geringe Masse sowie wiederum die Sicherstellung der Schweißbarkeit mit den Sandwiches und U-Hülsen. Da die Originalbauteilkonturen bestmöglich nachempfunden werden mussten, wurde eine gerade Ausführung der Wandelemente festgelegt. Von der Oberkante des Flanschs bis zum niedrigsten Punkt der Wanne im Innenraum wurde eine Höhe von 115 mm festgelegt. Aus der ebenfalls festgelegten Neigung der Bodenplatte von 5° resultierte eine Höhe von 119 mm am höchsten Punkt des Innenvolumens. Alle Sandwiches, welche an den Seiten sowie der Vorderseite der Prototypwanne angebracht sind und die gleichzeitig eine Schweißverbindung mit einem anderen Sandwich eingehen, wurden mit einer 45° -Gärung versehen. Bei der Wandstärke t_{Sandwich} der AFS-Platten handelt es sich ausschließlich um 11 mm (siehe Kapitel 3.7). Diese werden am Flansch durch I-Nähte mit dem äußeren Rand verschweißt. Zur Realisierung der 5° -Neigung der Bodenplatte wurde auf der einen Seite $2,5^\circ$ bei der Gärung der Seitenelemente zugeben und auf der anderen Seite abgezogen. Diese konnten nur durch Fräsarbeiten und Einpassen am Bauteil realisiert werden. Um die Montierbarkeit der Ölwanne am Kurbelgehäuse sicherstellen zu können, mussten zwischen den Sandwichplatten U-Hülsen eingesetzt werden, die mit einer

Wandstärke $t_{Aluhülse} = 1$ mm und einem Innendurchmesser $d_{Aluhülse}$ von 14mm ausgeführt wurden. Diese befinden sich jeweils konzentrisch zu den Innenwölbungen des Flanschs, die einen Durchmesser von 16 mm aufweisen. Der Innendurchmesser resultiert aus der Vorgabe des Nuss-Durchmessers bei Verwendung von Sechskantschrauben. Die U-Hülsen werden mit dem Sandwich sowie dem Flansch verschweißt und jeweils analog zur Länge des nebenstehenden Sandwiches ausgeführt. An den Stirnseiten wurden die Hülsen so angepasst, dass eine minimale Anzahl an Sandwiches notwendig wurde. Dies wurde durch eine Aufweitung realisiert, sodass die Stirnkanten der AFS-Platten parallel zur Wand des Flanschs standen. Die Konstruktionszeichnungen der Wannenbauteile sind in Anlage 1 ersichtlich. Die Zeichnungen des Werkzeugs in Anlage 2.

5.2 Auswertung der Messergebnisse

5.2.1 Schlepläufe auf Scheitelrollenprüfstand

Zur Auswertung der aufgenommenen Messergebnisse wurden drei Typen an Diagrammen gewählt, die die Unterschiede beider Bauteile aufzeigen sollten. Vorerst mussten die Daten jedoch aufbereitet werden. Die Software ArtemiS 9 erlaubt einen Datenexport der Messdaten in Excel-Dateien (*.xls). Darauffolgend mussten alle enthaltenen Werte auf ein geeignetes Zahlenformat konvertiert werden und konnten somit als Messwerte in die Diagramme einfließen. Zum Aufzeigen der wesentlichen Unterschiede wurde hier nur eine kleine Anzahl an vorhandenen Diagrammen herangezogen. Alle Diagramme sowie Messwerte sind in Anlage 5 ersichtlich.

Folgende Diagramme (Bild 51 und 52) sind Bestandteile einer Ordnungsanalyse. Dabei wird der Schalldruckpegel über der Drehzahl des Motors dargestellt. Es wurden Analysen bewusst für die 8. Motorordnung und deren Vielfache gemacht, da die Ölpumpe mit ihren Druckpulsationen die Hauptanregungsquelle der Ölwanne darstellt. Die Pumpe ist dabei, nach Aussage des Herstellers, mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:1 an die Kurbelwelle angebunden. Da es sich dabei um eine Zahnradpumpe handelt, in der die Zähne beider Förderzahnäder pro Kurbelwellenumdrehung acht Mal zueinander im Eingriff stehen, erfolgt daraus eine Anregung der Wanne in der 8. Motorengrundordnung, wenn als Ausgangspunkt, wie üblich, die Kurbelwelle herangezogen wird.

Erkennbar ist, dass bei Verwendung der Metallschaumwanne im unteren Drehzahlbereich eine deutliche Reduzierung des Schalldruckpegels die Folge ist. Dies ist im Diagramm für die 8. und 16. Motorenordnung deutlich sichtbar. Bei 1850 U/min wird eine Schalldruckpegeldifferenz von 13 dB(A) der 16. Motorenordnung erreicht. Ab einer Drehzahl von ca. 4000 U/min werden die Einflüsse des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes jedoch so stark, dass in diesem Bereich keine Auswertung erfolgen konnte. Die Reduzierung der achten Motorordnung erfolgt ebenfalls im unteren Drehzahlbereich und zusätzlich in einem geringen Drehzahlabschnitt zwischen 2700 und 3600 U/min. Die Analysen wurden bis zur 32. Ordnung durchgeführt. Auffällig ist, dass ab der 24. Ordnung nur noch geringfügige Reduzierungen bis hin zu leichten Erhöhungen der Schalldruckpegel bis hin zu 4000 U/min erkennbar sind.

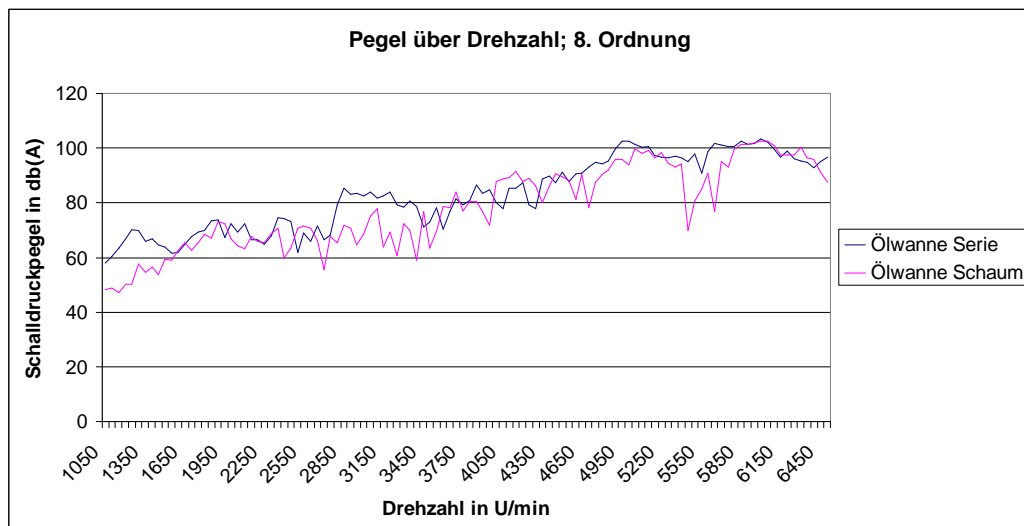


Bild 51: Schalldruckpegel über Motordrehzahl für 8. Motorordnung

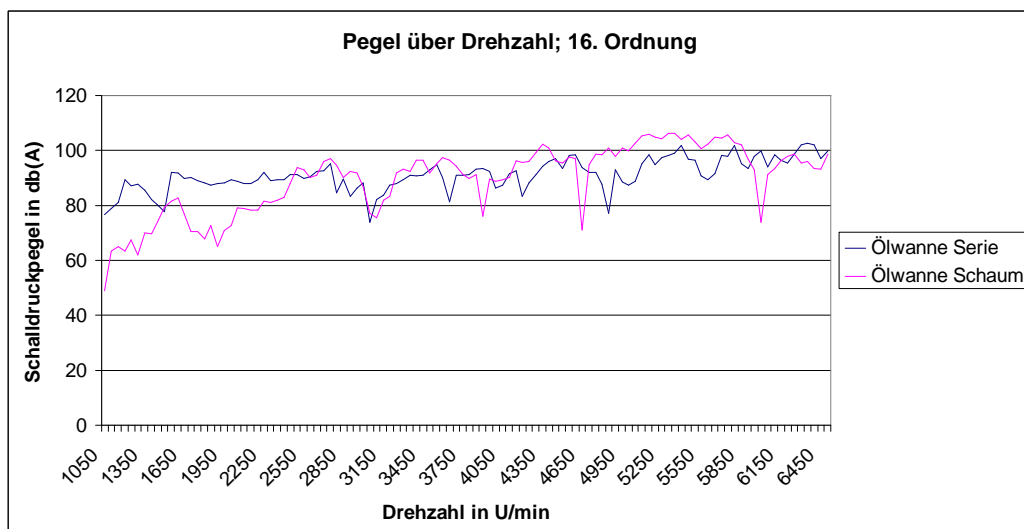


Bild 52: Schalldruckpegel über Motordrehzahl für 16. Motorordnung

Des Weiteren kann die Auswertung der Schalldruckpegel über das definierte Terzspektrum der stationären Drehzahlen herangezogen werden (Bild 53). Dieses Diagramm zeigt die Auswertung des Nahfeldmikrofons neben dem Radkasten des Versuchsfahrzeugs.

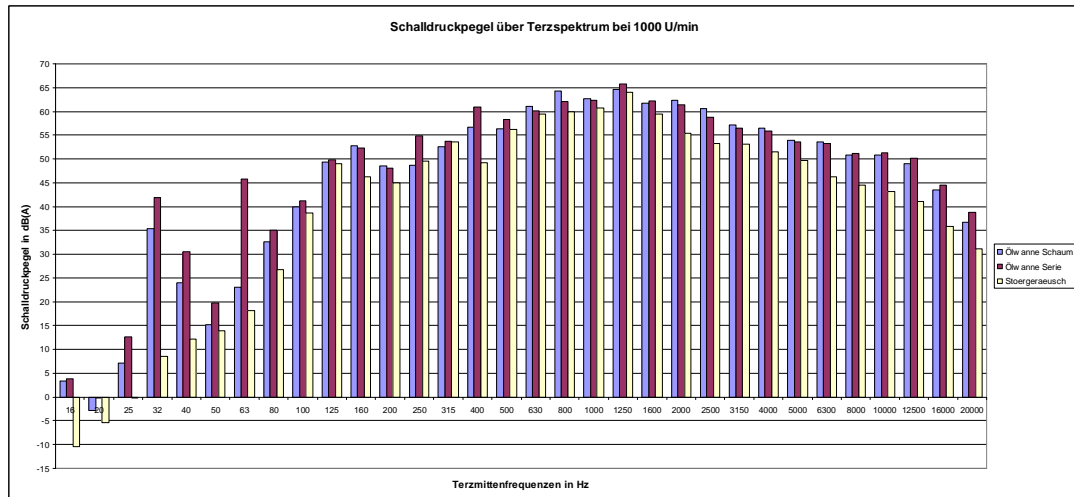


Bild 53: Schalldruckpegel über Terzspektrum am Radkasten des PKW

Erkennbar ist, dass bei Nutzung der Metallschaumwanne im niederfrequenten Bereich ein geringerer Schalldruckpegel erreicht wird. Über das komplette Spektrum gesehen, sind jedoch kaum starke Verringerungen des Schalldruckpegels zu verzeichnen. Zieht man zur Auswertung das direkt unter der Wanne positionierte Mikrofon heran (Bild 54), lässt sich erkennen, dass über das gesamte Spektrum häufiger sogar Erhöhungen als Verringerungen des Pegels der Fall sind. Die starke Differenz bei ca. 400 Hz ist ggf. auf eine Resonanzfrequenz oder auf die Nähe einer solchen Frequenz der Serienwanne zurückzuführen. Dies würde die Ergebnisse der simulativen Modalanalyse widerspiegeln.

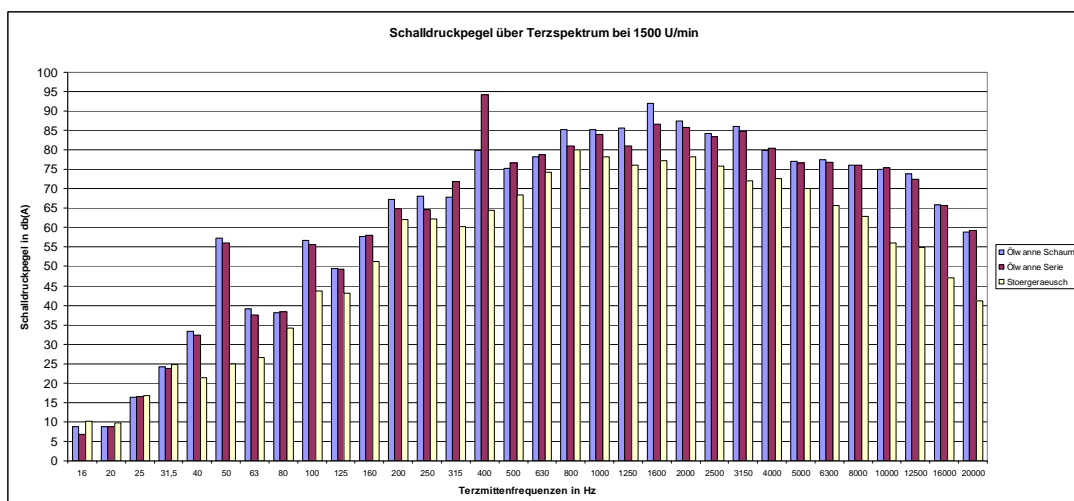


Bild 54: Schalldruckpegel über Terzspektrum unter der Ölwanne des PKW

Als dritte Variante der Auswertung diente ein Campbell-Diagramm (Bild 55). Hier werden die Motorordnungen gut sichtbar. Es wird der Schalldruckpegel über Frequenz und Drehzahl dargestellt. Die Auswertung und Ausgabe erfolgte direkt im Messdatenverarbeitungsprogramm ArtemiS 9.

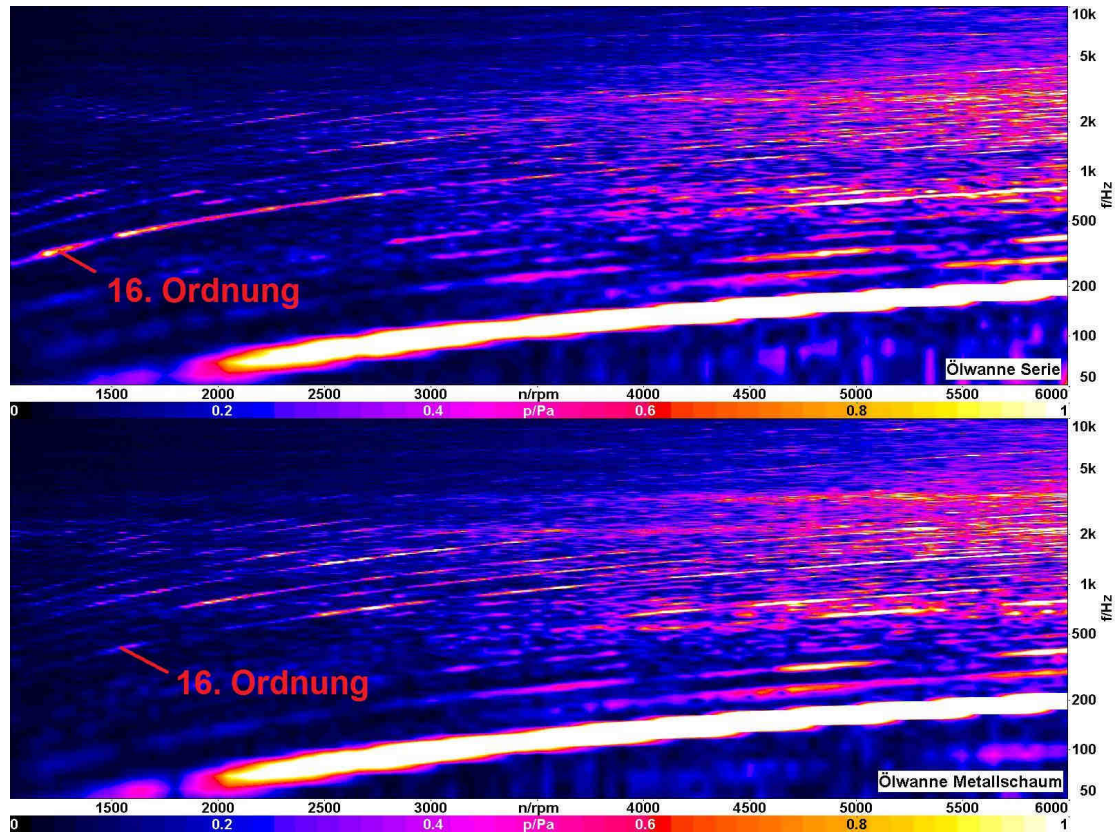


Bild 55: Campbell-Diagramm der Motorordnungen unter der Ölwanne des PKW

Zu sehen ist im unteren Bereich die 1. Motorordnung als breite Kurve. Zur Aufzeichnung der Unterschiede wurde die 16. Ordnung im Diagramm eingezeichnet. Erkennbar ist hier ebenfalls die starke Reduzierung der Schalldruckpegel im unteren Drehzahlbereich (Bereich des Körperschalls) für alle Vielfachen der Grundmotorenordnung, insbesondere der 8. und 16. Ordnungen, bei denen es sich um die Ordnungen und deren Vielfache der Ölpumpe handelt. Es fällt auf, dass die Schalldruckpegel der 24., 32. sowie 40. Ordnung in einem höheren Drehzahlbereich stärker zur Geltung kommen.

Somit konnten die guten Dämpfungseigenschaften von Aluminiumschaum im Körperschallbereich gut aufgezeigt werden. Eine Auswertung der Ergebnisse für Motordrehzahlen größer 4000 U/min wird als nicht sinnvoll angesehen, da der Einfluss des Reifen-Fahrbahnkontaktes zu groß wird.

5.2.2 Schallintensitätssondenmessung

Zur Auswertung wurden alle vom Messgerät gespeicherten Datenfiles ins Excel importiert und anschließend aufbereitet. Anfangs wurden alle Messdaten, welche in dB vorlagen, A-bewertet. Dies empfiehlt sich zur Aufzeichnung des hörbaren Spektrums. Die A-Bewertung eignet sich für Schallpegel bis 60 dB, hat sich aber auch für höhere Pegel für Vergleiche als nützlich erwiesen. Für Pegel über 60 dB können ebenfalls B-, C- oder D-Bewertungen vorgenommen werden. Mit zunehmender Lautstärke ändert sich die Kennlinie des menschlichen Ohrs. Zur Durchführung der Bewertung werden bei jeder Terzfrequenz, entsprechend der festgelegten A-Bewertungskurve, genormte Werte beim gemessenen Schalleistungspegel addiert bzw. subtrahiert (Anlage 6). Da es sich bei dB-Angaben um logarithmierte Werte handelt, müssen für Pegeladditionen die Werte erst entlogarithmiert werden. Im Anschluss können für den jeweiligen Messpunkt der Summenpegel über das gesamte Terzspektrum sowie für jede Terzmittenfrequenz der Mittelwert über alle Messpunkte errechnet werden. Dies wird in den folgenden Diagrammen (Bild 56 und 57) dargestellt.

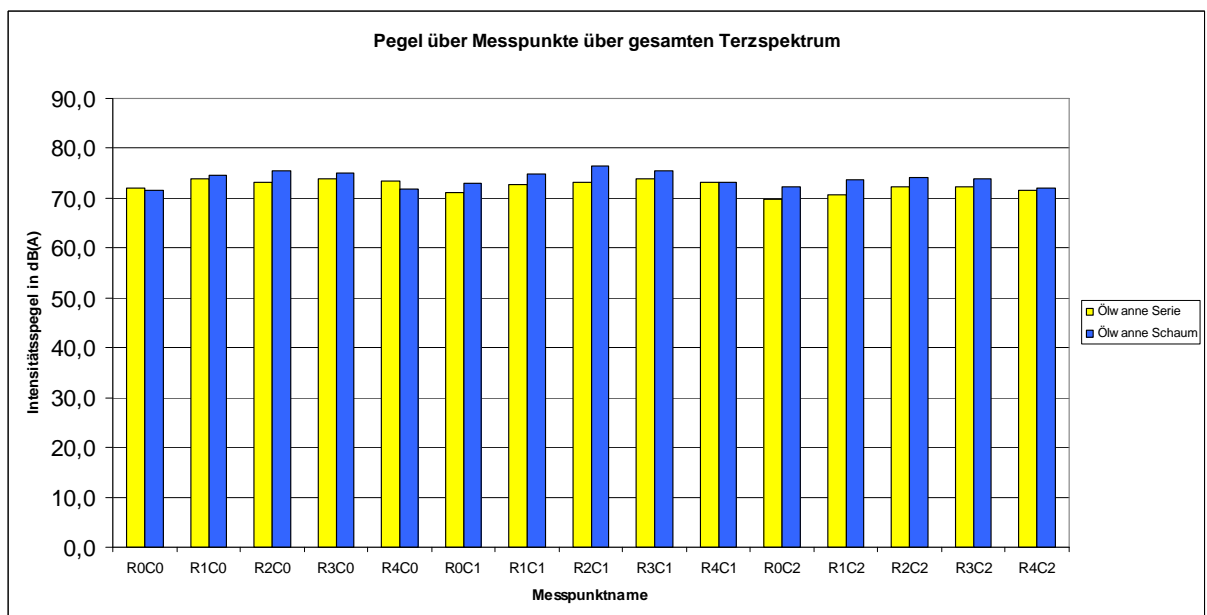


Bild 56: Pegel für Messpunkte über gesamtem Terzspektrum

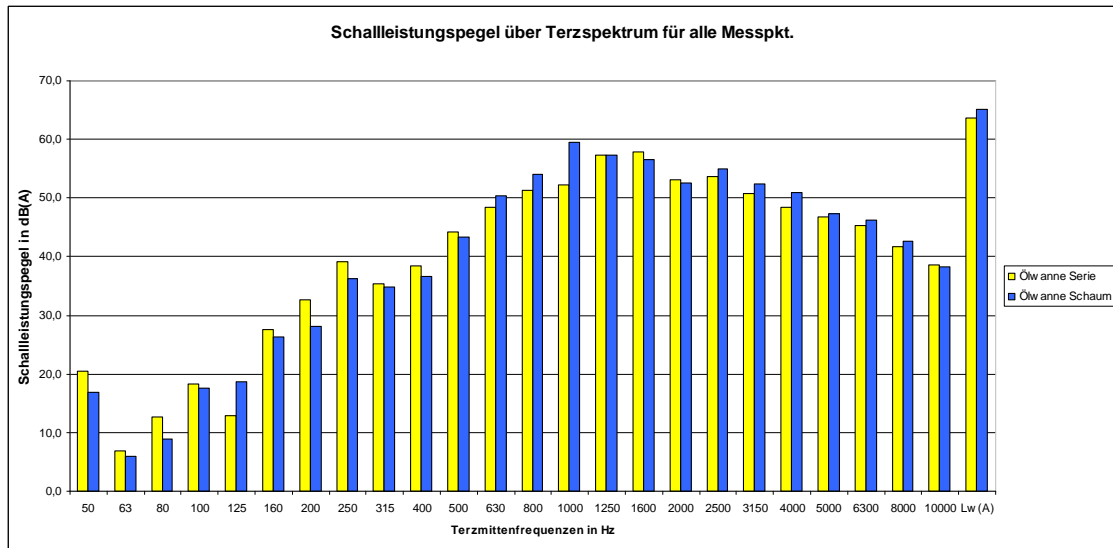


Bild 57: Schalleistungspegel über Terzspektrum für alle Messpunkte

Zu erkennen ist, dass kaum Verringerungen des Schalleistungspegels durch Verwendung der Metallschaumwanne realisiert wurden. Über die gesamte analysierte Fläche gesehen beträgt der Summenpegel 63,6 dB(A) für die Serienwanne und 65,0 dB(A) für die Schaumwanne (ersichtlich aus Anlage 6). Es ergibt sich eine Differenz von 1,4 dB(A). Betrachtet man das analysierte Terzspektrum von Messpunkt R2C1, welcher direkt unter der Wanne liegt, fällt auf, dass bei einer Frequenz 1250 Hz ein ungewöhnlich höherer Pegel für den Prototyp zu messen ist (Bild 58). Dies könnte auf eine Resonanzfrequenz in einem Bereich um diese Terzmittenfrequenz schließen lassen und würde mit den Ergebnissen der simulativen Modalanalyse näherungsweise korrelieren.

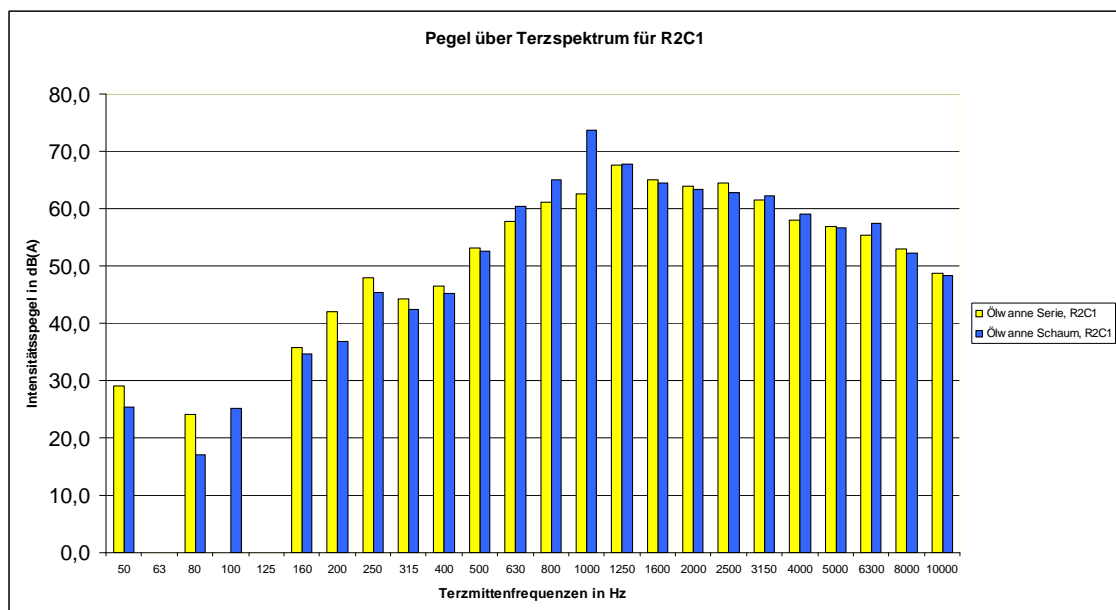


Bild 58: Pegel über Terzspektrum für Messpunkt R2C1

Ebenfalls ist ersichtlich, dass im niederfrequenten Bereich von 200 bis ca. 650 Hz die Metallschaumwanne besser abschneidet. Dies konnten die Messergebnisse des ersten Versuchs bestätigen. Des Weiteren ist klar ersichtlich, dass im Frequenzbereich ab 1250 Hz beide Wannentypen nahezu identische Schallleistungspegel abgeben und sich somit kein Vorteil für die Schaumwanne im oberen Abschnitt des Terzspektrums ergibt.

Die Vorteile des angewandten Messverfahrens, bezogen auf die Isolierung des Bauteils von der Umgebung durch Abtasten der vollständigen Hüllfläche, konnten nicht angewandt werden. Wie im Kapitel 4.4.2 ersichtlich, wurde lediglich die untere Fläche der Wannen messtechnisch aufgenommen. Somit kann vermutet werden, dass Einflüsse anderer Bauteile und -gruppen mit in die Erfassung der Schallleistungspegel, speziell in den Randgebieten der analysierten Fläche eingegangen sind. Weitere Diagramme sowie Messwerte sind in Anlage 6 ersichtlich.

5.3 Schlussfolgerungen

Abschließend kann gesagt werden, dass Aluminiumschaum prinzipiell für den Einsatz an Kraftfahrzeugmotoren geeignet ist, an denen Reduzierungen der Schalldruckpegel im niederfrequenten Bereich wünschenswert sind. Die Messergebnisse zeigen, dass Aluminiumschaum stets im unteren Frequenzbereich Vorteile bringt. Diese Vorteile können jedoch nicht für den höheren Bereich des Terzspektrums bestätigt werden. Damit konnten vorangegangene Experimente mit ähnlichen Ergebnissen bestätigt werden. Besonders die guten Dämpfungseigenschaften des Werkstoffs im Körperschallbereich konnten aufgezeigt werden. Doch zur endgültigen Beurteilung der Dämpfungseigenschaften empfiehlt sich die Durchführung einer experimentellen Modalanalyse. Die Schalldruckpegel, hervorgerufen durch Hauptanregungsquelle für Schallemission an Ölwanne, die Ölpumpe mit ihren, an die Hauptmotorenordnung gebundenen Zahneingriffsfrequenzen, konnte speziell in diesem Fall erfolgreich reduziert werden. Beachtet werden sollte, dass bauraumbedingt nur eine Konstruktion mit Einschränkungen vorgenommen werden konnte. Zur schnellen Realisierung des Prototyps wurde auf komplexe Geometrien, wie sie in Hinblick auf Akustik durchaus notwendig gewesen wären, verzichtet. Setzt man eine auf den Metallschaum angepasste Konstruktion der umliegenden Bauteile voraus, sodass die Ölwanne in

ihren Abmessungen wachsen kann bzw. akustisch besser ausgelegt werden kann, können so deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden.

Gerade für den Anwendungsfall einer Ölwanne empfiehlt sich stets die Sandwichbauweise. Da die Ölwanne in den meisten Fällen das Bauteil mit dem geringsten Abstand zur Fahrbahn darstellt, sollte hier der Aspekt der Stoss- und Ausflusssicherheit nicht vernachlässigt werden. Daraus ergab sich im konkreten Fall jedoch eine erhöhte Masse für die Metallschaumwanne im Vergleich zur Serienwanne. Dies kann den Werkstoff im Zuge konsequenter CO₂-Reduktion der Fahrzeughersteller durch Masseersparnis für diesen Anwendungsfall unattraktiv machen bzw. nur für Fahrzeuge mit erhöhten Ansprüchen an Geräuschreduktion und Comfort, dafür aber untergeordneten Ansprüchen an Gesamtmasse wie beispielsweise in der Oberklasse, empfehlen. Dem kann durch die Verwendung eines anderen Basiswerkstoffs für den Schaum entgegen gewirkt werden. Wendet man den Werkstoff jedoch in einem anderen Bereich des Antriebsaggregates an, beispielsweise als Steuerkettenabdeckung oder Ventildeckelhaube, in der durchaus sogenannte Nurschaum-Varianten Verwendung finden können (wie sie in dieser Arbeit als alternative Varianten vorgestellt wurden) sind Geräuschreduktion mit gleichzeitiger Massenreduktion denkbar und somit für den gesamten Fahrzeugmarkt interessant.

Eine Serienproduktion in der Bauweise des hier vorliegenden Prototyps ist auszuschließen. Der Fertigungsaufwand und die Stückkosten lagen so hoch, dass selbst auf eine Serienfertigung hin gesehen kein konkurrenzfähiges Produkt zur tiefgezogenen Stahlölwanne realisiert werden kann. Stattdessen sollte von einer Schweißkonstruktion abgesehen werden. Denkbar wären hier, auf die Endgeometrie umgeformte Deckbleche, (Tiefziehverfahren) für Innen und Außen, in die im Anschluss hineingeschäumt wird.

Die thermische Stabilität des Werkstoffs der Ölwanne sowie des Klebers gegenüber dem Wärmeeinfluss der Abgasanlage und des Schmiermittels ist gegeben.

6 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war die Entwicklung eines Motorbauteils mit verbesserten akustischen Eigenschaften. Zusammen mit der IAV GmbH am Standort Chemnitz konnte eine Ölwanne eines BMW Mini Cooper 1,6 l als zu untersuchendes Bauteil festgelegt werden. Nach Festlegung der Kriterien an die Aluminiumschaumstruktur, wie beispielsweise eine geringe Belastung während des Betriebs und Erarbeitung einer Anforderungsliste, wurden drei Varianten sowie die Serienwanne, entsprechend dem Original, im CATIA V5 konstruiert. Im ersten Schritt der Konstruktion wurde der Originalflansch exakt nachmodelliert. Dieser diente bei allen Metallschaumvarianten als Ausgangsbasis und Ursprung für den Wannenkörper. Die drei Varianten wurden jeweils bestmöglich den Konturen der originalen Stahlwanne nachempfunden und gleichzeitig aluminiumschaumgerecht ausgeführt.

Anschließend wurde eine simulative Modalanalyse im ANSYS 11 durchgeführt. Als Berechnungsparameter dienten eine feste Einspannung am Flansch der Wanne sowie die Begrenzung von 15 zu ermittelnden Moden in einem definierten Frequenzbereich von 0 bis 4000 Hz. Dabei konnten alle Eigenschwingformen in einen höheren Frequenzbereich verschoben werden, was auf ein erhöhtes Masse-Steifigkeits-Verhältnis der Wanne schließen lässt.

Nach einem Variantenvergleich nach VDI 2225, in dem verschiedenen Kriterien Wichtungsfaktoren zugeordnet wurden, konnte eine Variante für den konkreten Fall als geeignet festgelegt werden. Nach der anschließenden Detailkonstruktion der favorisierten Variante, wurde diese als Prototyp umgesetzt. Dies geschah durch Lasern des Flanschs sowie dem Fräsen und Biegen der Wannenteile. Für den Biegevorgang und dem anschließenden Schweißvorgang wurde zusätzlich ein Werkzeug entworfen. Durch das WIG-Schweißverfahren für Aluminium wurden alle Bauteile in eine unlösbare Verbindung gebracht. Für die Aufnahme der Ölablassschraube wurde eine speziell gefertigte Stahlhülse mit metrischem Feingewinde herangezogen, welche mit einem hochfesten, temperaturbeständigen Kleber der Firma Huntsman in der Bodenplatte befestigt wurde. Als Dichtung kam ein vorher weich geglühter Kupferring zum Einsatz.

Nach Fertigstellung des Prototyps folgte der experimentelle Eigenschaftsnachweis. Die Wahl fiel auf zwei verschiedene Messverfahren, welche in Zusammenarbeit mit

der Westsächsischen Hochschule in Zwickau und der IAV GmbH realisiert wurden. Zum einen wurde eine Schalldruckpegelmessung auf einem Scheitelrollenprüfstand vorgenommen, der am Hochschulstandort in einem reflexionsarmen Halbraum untergebracht ist. Dazu wurden an fünf definierten Positionen Nahfeldmikrofone installiert. Ein Mikrofon wurde direkt an der jeweiligen Wanne, eins neben dem Radkasten, eins an der Innenseite der Scheibe der Beifahrertür und ein Kunstkopf mit zwei Mikrofonen (linkes und rechtes Ohr) vor dem Fahrzeug jeweils in definierten Abständen zum Fahrzeug angebracht. Zum einen wurden Drehzahlrampen von 1000 - 6500 U/min und zum anderen stationäre Drehzahlpunkte im 2. Gang eingekuppelt, mit laufendem Motor gefahren und dabei jeweils der Schalldruckpegel über dem genormten Terzspektrum aufgenommen. Als Vergleich wurden ebenfalls alle Messungen ohne Motorbetrieb aufgenommen, um den Einfluss des Reifen-Fahrbahnkontaktes zu berücksichtigen. Als zweites Messverfahren diente die Schalleistungspegelaufnahme mittels Intensitätssonde. Dazu wurde ein Gitter mit festgelegtem Abstand zur Wanne unter dem Fahrzeug angebracht, an dem die Gitterabstände untereinander ebenfalls konstant gehalten wurden. Über einen Zeitraum von je 20 s wurde an den 15 Messpunkten der Pegel schrittweise aufgenommen.

Zur Auswertung der Messergebnisse am Scheitelrollenprüfstand wurden die Werte der einzelnen Mikrofonpositionen herangezogen und einer Ordnungsanalyse unterzogen. Dabei wurden die Schallpegel über der Drehzahl für die interessanten Motorordnungen dargestellt. Zum anderen wurden die Schalldruckpegel über dem Terzspektrum an den Drehzahlpunkten aufgezeigt sowie ein Campbell-Diagramm erstellt. Zur Auswertung der Ergebnisse der Intensitätssondenmessung wurden die vorhandenen Pegel zunächst einer A-Bewertung unterzogen und anschließend Summenpegel über den einzelnen Messpunkten gebildet sowie Mittelwerte für die jeweiligen Terzmittenfrequenzen über der gesamten analysierten Fläche errechnet und darauffolgend in Diagrammen dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen einen Vorteil der Metallschaumwanne im niederen Frequenzbereich des Spektrums. Dieser Vorteil konnte jedoch nicht für den hohen Frequenzbereich bestätigt werden. Der Gesamtsummenpegel der Schaumwanne lag bei der Intensitätssondenmessung sogar leicht über dem Original. Dies kann durch die Geometrie des Prototyps bedingt sein. Die Ordnungen der Ölpumpe, welche als Hauptanregungsquelle für Körperschall innerhalb der Ölwanne gelten, konnten

jedoch reduziert werden. Allgemein ist zu sagen, dass sich Metallschaum prinzipiell als Werkstoff für den Einsatz in Kraftfahrzeugmotoren eignet. Dabei sollten jedoch bewusst Bauteile gewählt werden, die den Einsatz von geschlossenenporigen Nestschaum-Ausführungen ermöglichen um gleichzeitig die Möglichkeiten für Massenersparnis zu bieten. Empfohlen wird außerdem, die Bauteile akustisch günstig in Hinblick auf die Konstruktion auszulegen. Es lässt sich vermuten, dass die dünnen U-Hülsen-Elemente im Prototyp sich negativ auf die Gesamtsteifigkeit der Wanne ausgewirkt haben. Des Weiteren sollte im Allgemeinen von einer Schweißkonstruktion abgesehen werden.

Literaturverzeichnis

- /1/ Braess, H.-H. ; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch der Kraftfahrzeugtechnik, Grünwald/Braunschweig, 2001
- /2/ Küntscher, V; Hoffmann, W.: Kraftfahrzeug-Motoren. Auslegung und Konstruktion, Hohen-Neudorf, 2006
- /3/ Ruschmeyer, S.: Fahrzeuggeräuschmessung, RWTH Aachen, 2007
- /4/ Stenschke, R.: Geräuschemission von Kraftfahrzeugen und Möglichkeiten zur Geräuschminderung, Jena, 2005
- /5/ Höfler, D.; Priebisch, H. H.; Rust, A. Brandl, F. K.: Geräuschreduktion von Motorbauteilen durch hochdämpfende Werkstoffe, Graz, 2006
- /6/ Tonn, B.; Hennadiy Z.; Vogelgesang, S.: Gusslegierungen bieten Potential zur Schwingungsdämpfung.
<http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/konstruktion/werkstoffe/metalle/articles/109052/>, Stand: 27.05.2008
- /7/ Bonardo, E.; Vicari, C.: Passenger car with adapted acoustic lining in the engine bay, Preliminary experimental campaign, 2006
- /8/ Brandl, F.; Knaus, K.; Atzwanger, M.; Schöffmann, W.: The acoustic performance of a low weight magnesium diesel engine concept, Graz, 2003
- /9/ Weiser, M.: Auswertung zur Modalanalyse an Ölwanne VW, Chemnitz, 2001
- /10/ Schutzrecht DE 19634615-A1 (1996-08-27). Köck, G.; Lahner S.; Pfaffelhuber K.
- /11/ Schutzrecht DE 19729804-A1 (1999-01-14). Köck, G.
- /12/ Schutzrecht EP 19900810612 (1993-10-11). Mahler, W.
- /13/ Diego de., M.; Gonzáles, A. ; Pinero, G. : Subjective evaluation of actively controlled interior car noise, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2001
- /14/ Meier, H.-E.: Geräuschminderungspotentiale am Kraftfahrzeug, ADAC-Fachgespräch, Berlin, 2006
- /15/ Norm DIN ISO 362, 2003-08. Akustik - Messung des von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlten Geräusches - Verfahren der Genauigkeitsklasse 2

-
- /16/ Kammans, A.: Akustische Nahfeld-Holografie zur Analyse komplexer Schall-Strahlungsquellen, 01dB GmbH, Bielefeld
- /17/ Räumliche Schallfeldtransformation, Institut für Mechanik am Lehrstuhl Adaptronik, Universität Magdeburg, <http://www.uni-magdeburg.de/ifme/l-adaptronik/stsf.html>, Stand: 02.06.2008
- /18/ Kreidl, H.: Agenda ÖAL, Methoden der Schallquellenortung, Wien, 2006
- /19/ Basshuysen R.; Schäfer F.: Vieweg Handbuch Verbrennungsmotoren, 4. Aufl., Hamm, 2007
- /20/ ***: Modalanalyse einer Audi A2 Karosserie, Hochschule Aalen, <http://www.fbm.fh-aalen.de/Diplomarbeiten/Beck/Modalanalyse.htm>, Stand: 04.06.2008
- /21/ Polytec-GmbH: Grundlagen der experimentellen Modalanalyse, Firmenschrift, Waldbronn
- /22/ Weigand P.: Untersuchung der Einflussfaktoren auf die pulvermetallurgische Herstellung von Aluminiumschäumen, RWTH Aachen, Dissertation, 1999
- /23/ Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik: Präsentation Metallschaumzentrum Chemnitz, Chemnitz, 2007
- /24/ Hipke, T.; Lange, G.; Poss R.: Taschenbuch für Aluminiumschäume, Düsseldorf, 2007
- /25/ Basshuysen, R.; Schäfer, F.: Geräuscentstehung im Motor, <http://www.motorlexikon.com/?I=8425&R=G>, Stand: 17.06.2008
- /26/ Kraus, M.-J.: Mann + Hummel plant im Jahr 2009 Serienstart von Kunststoff-ölwanne für Pkw
<http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/kunststoff-fundgummiverarbeitung/spritzgiessen/articles/92559/>, Stand: 03.07.2008
- /27/ VDI-Richtlinie: VDI 2225 Bl. 3, Konstruktionsmethodik - Technisch wirtschaftliches Konstruieren - Technisch - wirtschaftliche Bewertung, 1998
- /28/ Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, 5. Auflage, Kassel, 2005
- /29/ Balger, A.: Schalldruck oder Schallintensität - Zwei Wege zum Schalleistungspegel, OROS GmbH, Koblenz, 2003
- /30/ Müller, G; Möser, M.: Taschenbuch der technischen Akustik, 2003
- /31/ ***: Schallintensität, Firmenschrift Bruel & Kjaer, Bruel & Kjaer GmbH, 2006