



## Schlussbericht

Innovativer regionaler Wachstumskern „InnoZellMet“

Teilvorhaben:

### **Hohlkugelstrukturen zur Schallreduzierung an Maschinen (MASCHA)**

Fraunhofer Institut Fertigungstechnik Materialforschung  
Institutsteil Dresden  
Winterbergstr. 28  
01277 Dresden

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung  
Förderkennzeichen: **03WKO02B**

Erarbeitet:  
Dresden, den 28.04.2008

Dr.-Ing. Hartmut Göhler

---

## Inhalt

	Seite
<b>I Planung des Vorhabens</b>	
I.1 Aufgabenstellung	3
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	4
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	8
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	14
<b>II Verwendung der Zuwendung</b>	
II.1 Erzielte Ergebnisse in Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen	15
II.2 Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	39
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	39
II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	39
II.5 Während der Bearbeitung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	40
II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	41

### Anlagen:

Ergebniskontrollbericht  
Berichtsblatt

# I. Planung des Vorhabens

## I.1 Aufgabenstellung

Das Ziel der in diesem Projekt durchgeführten Arbeiten war die Entwicklung eines neuen Schall absorbierenden Werkstoffs, dessen akustisches Verhalten durch gezielte Beeinflussung seiner Struktur an die entsprechende Einsatzsituation angepasst werden kann. Dieser Absorber sollte sich dabei insbesondere dadurch auszeichnen, dass er vorzügliche akustische Eigenschaften mit hervorragenden Gebrauchseigenschaften kombiniert. Er sollte vor allem herkömmlichen Absorbern im Umfang seines möglichen Einsatzgebietes durch Eigenschaften wie hohe Temperaturfestigkeit, enorme Verschmutzungsresistenz, geringes Eigengewicht sowie ausgezeichnete mechanische Stabilität und Bearbeitbarkeit deutlich überlegen sein.

Durch die einzigartige Kombination der mechanischen, thermischen und akustischen Eigenschaften soll der neu zu entwickelnde Absorberwerkstoff an vielen Stellen des Maschinenbaus herkömmliche Absorber ersetzen (z.B. Schalldämpfer in Kraftwerken, Absauganlagen, Kapselungen um Maschinen mit stark verschmutzten Medien). Darüber hinaus ist die Eroberung neuer Einsatzgebiete für poröse Absorber klar abzusehen, z.B. in Flugzeugtriebwerken.

Im Einzelnen wurde der notwendige Entwicklungsaufwand auf vier Schwerpunkte festgelegt:

- a) Anpassung der Eigenschaften des Absorberwerkstoffs an Umgebungsbedingungen, wie Staub, Öl und Feuchtigkeit. Dazu: gezielte Züchtung der Verschmutzungsresistenz des Absorberwerkstoffs.
- b) Kombination der sehr guten akustischen Eigenschaften mit anwendungsgünstigen mechanisch-thermischen Eigenschaften wie geringem Eigengewicht, enormer mechanischer Stabilität und Abriebfestigkeit, hoher thermischer Belastbarkeit sowie guter mechanischer Bearbeitbarkeit und Formbarkeit.
- c) Einsatz dieses schalldämpfenden Werkstoffes in Verbindung mit herkömmlichen Werkstoffen zur Schalldämmung für die Herstellung von Kapselungen, Schallschirmen und Schalldämpfern (Sandwichaufbau Hohlkugelstruktur/Metallplatte)
- d) Optimierung der Oberfläche der Absorbermaterialien für den Einsatz in durchströmten Kanälen

## **I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Bisher übliche Schall absorbierende Materialien wie Glas- und Mineralwolle und offenzellige Polymerschäume besitzen vergleichsweise gute akustische Fähigkeiten. Sie sind jedoch bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften und die Kunststoff-Materialien auch bezüglich ihrer thermischen Eigenschaften für viele technische Anwendungsfälle nicht geeignet. Sie lassen sich nicht beliebig formen, besitzen geringe mechanische und teilweise auch geringe thermische Stabilität oder sind brennbar.

Metallische Hohlkugelstrukturen besitzen bei zu erwartenden ähnlichen akustischen Eigenschaften bessere mechanische Eigenschaften. Durch Sinterprozesse kann man sie in nahezu beliebige Form bringen. Zudem sind sie gut mechanisch bearbeitbar, mechanisch stabil und – je nach verwendetem Kugelwerkstoff – hochtemperaturfest und oxydationsbeständig. Damit scheinen sie sich vor allem für den Einsatz in jenen Gebieten zu eignen, in denen beispielsweise leichte, selbst tragende Strukturen von Vorteil sind oder in denen Medien mit hohen Temperaturen strömen.

Voraussetzung für die Durchführung des Projektes war ein industrieller Bedarf für einen solchen neuartigen Absorberwerkstoff. Nicht zuletzt die inzwischen gültige EU-Schallschutz-Richtlinie 2005/88/EG für Outdoor-Anwendungen lässt darauf schließen, dass der Bedarf an leichten und formstabilen, temperaturbeständigen Absorbermaterialien in Zukunft deutlich steigen wird.

## **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Planung und der Ablauf des Vorhabens können dem auf den folgenden drei Seiten beigefügten Balkenplan entnommen werden.

Tab. 1 bis 3 - Balkenplan des Projektes MASCHA – siehe Seiten 5 bis 7





III	Bewertungsphase	1,0	3,0	1,0	4,6	5,0	4,0	18,6
III.	Auswertung, Schlussfolgerungen	1,0	3,0	1,0	4,6	5,0	4,0	18,6
III 3.1.	Aufarbeitung der Ergebnisse der einzelnen Partner für projektübergreifende Nutzung der Daten.							2,3
	IFAM							
	AFD							
					1,3			
								1,0
III 3.2.	Abschließen wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Bewertung, Publication, patentrechtliche Sicherungsmaßnahmen							16,3
	ULT							
	Portatec							
	Pactec							
	IFAM							
	Glatt							
	AFD							
		1,0	3,0	1,0	3,3	5,0	3,0	

M1 Material- und Konstruktionsvorgaben  
 Verbesserte schalltechnische Auslegung

#### **I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Poröse metallische Werkstoffe sind in der Schalldämpfung schon seit längerem bekannt. Sie werden aus Metallpulvern durch Schütten, Pressen und Sintern hergestellt [24]. Als Werkstoffe hierzu sind insbesondere Bronze und Edelstahl im Einsatz. Das Haupteinsatzgebiet derartiger Sintermetallschalldämpfer ist die Dämpfung von Ansaug- und Abluftgeräuschen, die bei pneumatisch betriebenen Maschinen und Steuergeräten auftreten. Der Einsatz muss auf relativ kleine Bauteile beschränkt bleiben. Außerdem handelt es sich hierbei um keine echten Leichtbauwerkstoffe, da geometriebedingt aus Pulvern hergestellte poröse Werkstoffe nur mit einer maximalen Porosität von ca. 50 – 60 % hergestellt werden können.

Höhere Porositäten um 90–95 %, lassen sich z. B. mit Metallfasern als Ausgangswerkstoffe herstellen [25]. Eine weitere Steigerung ist nur mit Metallschäumen bzw. mit anderen zellularen metallischen Werkstoffen realisierbar [26]. Insbesondere zu den metallischen Schäumen gab es in der Vergangenheit umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowohl auf nationaler (DFG-Forschungsschwerpunkt) als auch auf internationaler Ebene (besonders USA, Japan, Österreich). Zielstellung war, eine neue Generation von Leichtbauwerkstoffen zu entwickeln, um das Gewicht speziell im Fahrzeugbau deutlich zu reduzieren [27, 28].

Zur Schalldämpfung waren bislang insbesondere offenzellige Schaumwerkstoffe relevant. Hierzu wurden in der Vergangenheit durch mehrere Firmen und Institute verschiedene Verfahren entwickelt (z.B. [29], [31]) Die meisten dieser Verfahren befinden sich noch im Entwicklungsstadium, wobei festgestellt werden muss, dass diese Verfahren z. T. erhebliche Nachteile, wie eine sehr begrenzte Legierungsauswahl, Dimensionsbegrenzung sowie hohe Verfahrenskosten aufweisen.

Seit Ende der 1990er Jahre wurden am IFAM Dresden in Zusammenarbeit mit Glatt Systemtechnik und IPC Dresden bereits Arbeiten zur Herstellung metallischer Hohlkugeln und Hohlkugelstrukturen für verschiedenste Einsatzgebiete geleistet. In einem abgelaufenen, vom BMBF geförderten Projekt "Metallische Hohlkugeln und Hohlkugelstrukturen" wurde als Schwerpunkt die Verfahrensentwicklung zur Herstellung von metallischen Hohlkugeln und Hohlkugelstrukturen bearbeitet sowie die Bewertung dieser neuen Werkstoffen in ausgewählten Einsatzfällen durchgeführt. Ein bearbeitetes Thema war die Untersuchung der Einsetzbarkeit von metallischen Hohlkugelstrukturen unter den spezifischen Einsatzbedingungen als Schalldämpfer in Automobil-Abgasanlagen [46, 47].

---

Gefördert von der Stiftung Industrieforschung wurde außerdem das Projekt "Entwicklung und Testung neuer lärmabsorbierender Werkstoffe auf der Basis metallischer Hohlkugelstrukturen - Absostruk" bearbeitet. Hier erfolgten Grundlagenuntersuchungen zu schallabsorbierenden Eigenschaften metallischer Hohlkugelstrukturen mit einer breiten Variation der Eigenschaften der Strukturen wie Kugeldurchmesser, Wandstärke und Schalenporosität. Ein weiteres Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung von Strategien zur aktiven Geräuschminderung.

Auf der Basis der in diesen Projekten gewonnenen Erkenntnisse musste festgestellt werden, dass der mögliche Untersuchungsumfang die Optimierung der Werkstoffe für den praxistauglichen Einsatz nicht erlaubte. Die als Alleinstellungsmerkmale gegenüber herkömmlichen Absorberwerkstoffen geltenden Eigenschaften, wie Verschmutzungsresistenz, hervorragende mechanisch-thermische Eigenschaften und die Kombination mit herkömmlichen schalldämmenden Werkstoffen konnten durch diese Untersuchungen und Modelle nicht berücksichtigt werden.

Das im IFAM Dresden gemeinsam mit der Glatt Systemtechnik GmbH entwickelte und genutzte Verfahren zur Herstellung von zellularen Werkstoffen ist in Abbildung 1 veranschaulicht.

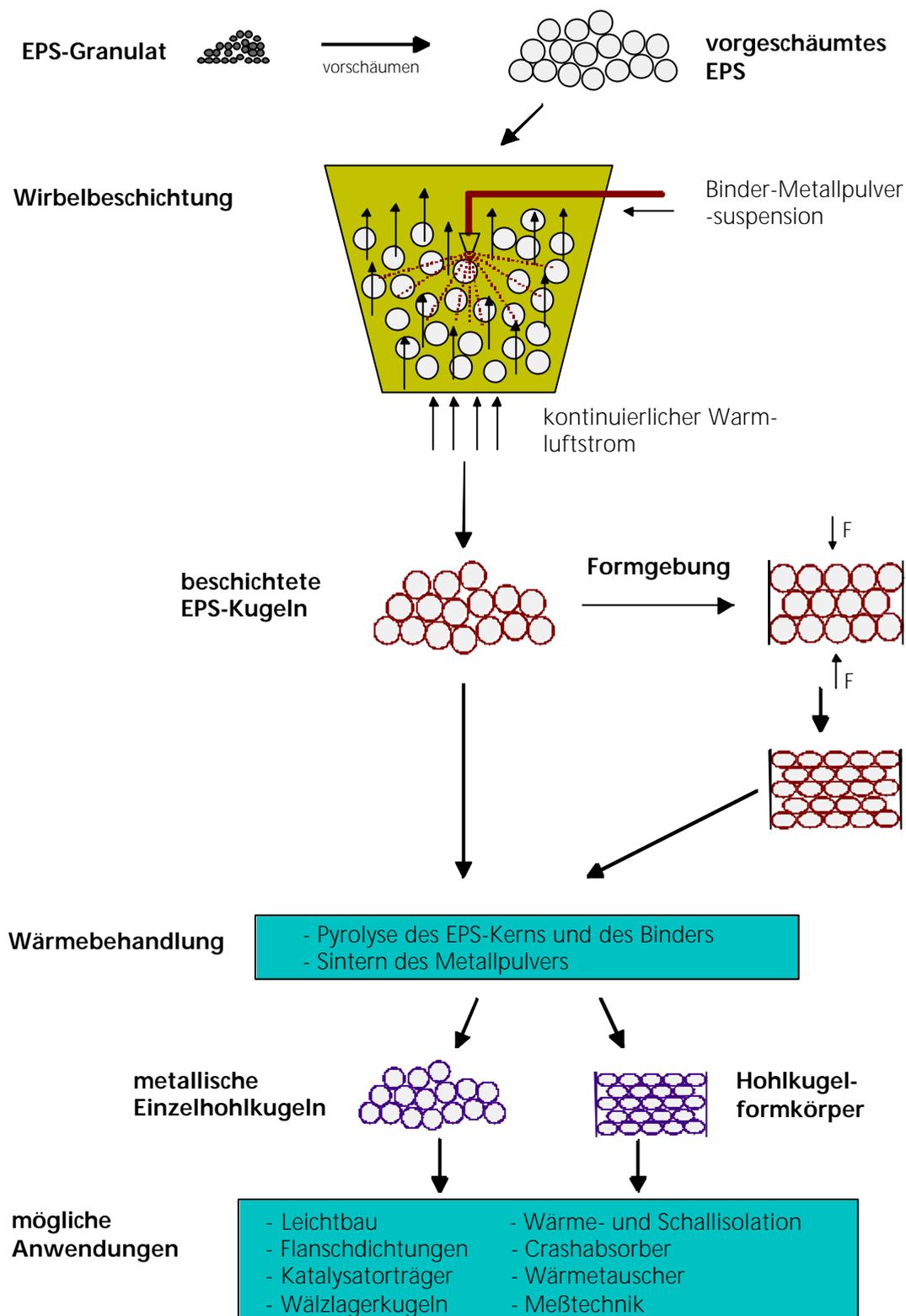


Abb. 1: Verfahrensschaubild der Hohlkugelherstellung (IFAM / Glatt)

---

## Literatur

- [1] Allard, J.: Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing media. Elsevier Applied Science, 1993
- [2] Allard, J. F. ; Henry, M. ; Tizianel, J. ; Kelders, L. ; Lauriks, W.: Sound propagation in air-saturated random packings of beads. In: JASA 104 (1998), Nr. 4, S. 2004–2007
- [3] Attenborough, K.: Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials. In: Journal of the Acoustical Society of America 73 (1983), Nr. 3, S. 785–799
- [4] Attenborough, K.: Models for the acoustic characteristics of air-filled granular materials. In: Acta Acoustica 1 (1993), S. 213–226
- [5] Berengier, M. ; Stinson, M. ; Daigle, G. ; Hamet, J.: Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects. In: Journal of the Acoustical Society of America 101 (1997), Nr. 1, S. 155– 162
- [6] Champoux, Y. ; Stinson, M.: On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors. In: Journal of the Acoustical Society of America 92 (1992), Nr. 2, S. 1120–1131
- [7] Delany, M. E. ; Bazley, E. N.: Acoustical properties of fibrous absorbent materials. In: Applied Acoustics 69 (1970), S. 105–116
- [8] Hamet, J.: Modelisation acoustique d'un enrobe drainant / INRETS. 1992. - Forschungsbericht
- [9] Hovem, J. ; Ingram, G.: Viscous attenuation of sound in saturated sand. In: Journal of the Acoustical Society of America 66 (1979), Nr. 6, S. 1807–1812
- [10] Iannace, G. ; Ianniello, C. ; Maffei, L. ; Romano, R.: Prediction of the intrinsic acoustical properties of loose granular materials by fitting measurements with a theoretical model. In: Proc. International Congress on Acoustics, 2001
- [11] Iannace, G. ; Ianniello, C. ; Maffei, L. ; Romano, R.: Steady-state air-flow and acoustic measurement of the resistivity of loose granular media. In: Journal of the Acoustical society of America 106 (1999), Nr. 3, S. 1416–1419
- [12] Kap. 1.7 Poröse Absorber In: Kraak, W.: Taschenbuch der Technischen Akustik. Berlin : Verlag Technik, 1984, S. 109

- 
- [13] Lafarge, D. ; Lemanier, P. ; Allard, J. ; Tarnow, V.: Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies. In: Journal of the Acoustical Society of America 102 (1997), Nr. 4, S. 1995– 2006
- [14] Mechel, F.: Schallabsorber. Innere Strukturen und Schallfelder. Bd. II. S. Hirzel Verlag, 1995
- [15] Umnova, O. ; Attenborough, K. ; Li, K. M.: A cell model for the acoustical properties of packings of spheres. In: Acustica 87 (2001), S. 226–235
- [16] Schirmer, W. (Hrsg.): Technischer Lärmschutz. 2. Auflage. VDI-Verlag, 1996
- [17] Heckl, M. (Hrsg.) ; Müller, H. (Hrsg.): Taschenbuch der Technischen Akustik. 2. Auflage. Springer, 1994
- [18] Sarradj, E.: Absorbertheorien für offenporigen Asphalt. DAGA 2001
- [19] Sarradj, E. u. Lerch, T.: Präzise Strömungswiderstandsmessungen mit der Vergleichsmethode. DAGA 2001
- [20] Lerch, T.; Sarradj, E. u. Hübel, J.: Tortuositätsmessungen an offenporigen Asphaltproben. DAGA 2001
- [21] Albracht, F.; Sarradj, E.; Lotze, G. u. Schneider, K.: Gesinterte, hochporöse Metallfaserstrukturen für schallabsorbierende Auskleidungen. Tagungsband Werkstoffwoche München 1998
- [22] Abschlussbericht: Grundlagenforschungen zur Entwicklung von Metallfaser-Elastomer-Verbunden mit hochwirksamer Schalldämmung und Schalldämpfung. IFAM Dresden 1999
- [23] Horoshenkov, K. u. Swift, M.: The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates. Applied Acoustics 62 (2001) S.665-690
- [24] Schatt, W.; Wieters, K.-P.: Pulvermetallurgie, VDI-Verlag, 1994
- [25] Andersen, O.; Stephani, G.: Melt extracted fibres boost pours parts. Metal Powder Report, Vol. 45, Nr. 7/8
- [26] Shapovalov, V.: Porous Metals. MRS Bulletin 4 (1994) 24 – 28
- [27] Banhart, J.: Metallschäume. Proc. Symp. Metal Foams, Bremen, 1997
- [28] Banhart, J.; Baumeister, J.: Production Methods for Metallic Foams. Mat. Res. Soc. Symp., Proceed. 521, 1998 Materials Research Society, USA

- 
- [29] Produktinformationen der Firma ERG, Materials & Aerospace, Oakland, USA, 2000
- [30] Produktinformationen der Firma RECEMAT, International, Krimpen, The Netherlands, 2000
- [31] Grote, F.; Busse, P.: Gusstechnische Herstellung offenporiger Metallschäume mittels mineralischer Platzhalter. In "Metallschäume", Wiley-VCH 2000, 415
- [32] Waag, U.; Schneider, L.; Andersen, O.: Metallische Hohlkugeln verbessern Werkstoffstruktur von Leichtbauteilen. Maschinenmarke 105 (1999) 45 – 65
- [33] Andersen, O.; Waag, U.; Schneider, L.; Stephani, G.; Kieback, B.: Novel Metallic Hollow Sphere Structures. Adv. Eng. Mater. 4 (2000) 192 – 195
- [34] Andersen, O.; Schneider, L.; Stephani, G.: Neue hochporöse metallische Werkstoffe. Ingenieur-Werkstoffe 4 (1998) 36 – 38
- [35] Waag, U.; Schneider, L.; Löthman, P.; Stephani, G.: Metallic Hollow Spheres - materials for the future. Metal Powder Report 55 (2000) 29 – 33
- [36] Stephani, G.; Waag, U.; Andersen, O.: New light weight structures based on low-cost metallic hollow spheres. Proceed. PM<sup>2</sup>TEC-Conference, New York, May 30 – June 3, 2000, pp 36 – 46
- [37] Allard, J.: Propagation of sound in porous media: modeling sound absorbing media. Elsevier Applied Science, 1993.
- [38] DIN EN ISO 14163: 1998: Leitlinien für den Schallschutz durch Schalldämpfer. Berlin: Beuth 1998.
- [39] DIN EN ISO 15667:2000 Leitfaden für den Schallschutz durch Kapseln und Kabinen. Berlin: Beuth 2001.
- [40] Sarradj, E.; Lerch, T.; Hübelt, J.: Input parameters for the prediction of acoustical properties of open porous asphalt. In: Acta Acustica united with Acustica (2003) (eingereicht).
- [41] Hübelt, J.; Lerch, T.; Sarradj, E.: Porous road surfaces: Acoustical characteristics, models and measurements. 17th International Congress on Acoustics (17th ICA), Rom, 2001.
- [42] Hübelt, J.; Sarradj, E.: A model for the optimization of porous road surfaces. Inter-Noise 2002, International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Detroit (USA).

- 
- [43] Pretschner, J.: Rubber crumb as granular absorptive acoustic material. Forum Acusticum, Sevilla (Spain) 2002.
- [44] VDI 2711: 1978 Schallschutz durch Kapselung. Berlin: Beuth 1978.
- [45] Champoux, Y. ; Stinson, M.: On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors. In: Journal of the Acoustical Society of America 92 (1992), Nr. 2, S. 1120–1131.
- [46] Waag, U.; Stephani, G.; Bretschneider, F.; Venghaus, H.: Mechanical and acoustical properties of highly porous materials based on metal hollow spheres. In: Proceedings of the 2002 World Congress on Powder Metallurgy and particulate Materials, June 16-21, 2002, Orlando, Florida
- [47] Venghaus, H.; Stadler, F.: Hohlkugeln für den Schall. Automobilindustrie 12/2002, S. 50-52
- [48] Probst, W.: Anwendung der Geräuschemissionsangabe in der Praxis. Forschungsbericht Fb 969 der BAuA, ISBN 3-89701-906-X, 2002
- [49] Ladner, P., Matzoyer, T. and Perissè Acoustic splitter development based on hollow spheres materials for aircraft machines
- [50] Hübel, J.: Modelling of porous asphalt as extended reacting absorber using the transmission line matrix method (TLM). In: Euronoise 2003. Naples, Italy, May 19-21 2003
- [51] Hübel, J.: About the Determination of the acoustical Properties of Surfaces in-situ using the Auto-Power-Density-Spectra. In: Forum Acusticum, Sevilla (Spain), 2002
- [52] Hübel, J.; Sarradj, E.: Zur Schallausbreitung über porösen Straßenoberflächen. In: 28. Tagung der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Akustik (DAGA 02), Bochum, Tagungsband, 2002
- [53] Hübel, J.; Zeibig, A.; Kostmann, C.; Stephani, G.: Parameter of metallic hollow spheres - a porous sound absorbing material. In: 18th International Congress on Acoustics, 2004, Kyoto, Japan

## **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Während der gesamten Laufzeit des Projektes wurde eng mit den im Projektantrag genannten Partnern zusammengearbeitet:

- Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH
- Glatt Systemtechnik GmbH
- MB Portatec GmbH
- Theegarten-Pactec GmbH & Co. KG
- ULT AG (vormals ULT Umwelt-Lufttechnik)

Weiterhin erfolgte im Rahmen der Taskgroup Bearbeitung eine sehr enge Zusammenarbeit mit dem Institut Oberflächen- und Fertigungstechnik der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden.

Es erfolgten in regelmäßigen Abständen Projekttreffen und Treffen einzelner Taskgroups.

## II. Verwendung der Zuwendung

### II.1. Erzielte Ergebnisse in der Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen

<b>Phase I: Definitionsphase</b>	
<b>1 –</b>	<b>Vorbereitende akustische und mechanisch-konstruktionstechnische Analyse von</b>
<b>2.</b>	<b>Hohlkugelstrukturen</b>
1 – IFAM / Glatt: 2.1.	
Bereitstellung von Proben für die akustische und konstruktions-technische Analyse.	<p>(1) Für eine erste grundsätzliche Bewertung und zum Kennenlernen des Werkstoffes „Metallische Hohlkugelstruktur“ wurden an die AFD und an die potenziellen Anwender einige Hohlkugelstrukturen aus Probenbeständen des IFAM geliefert.</p> <p>(2) Gemeinsam mit der Akustikforschung Dresden wurden zunächst umfangreiche Vor-Ort-Gespräche bei den drei Anwendern durchgeführt. Dabei wurden potenzielle Anwendungsfälle sowie Soll-Ist-Zustände definiert.</p> <p>(3) Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Gespräche erfolgte gemeinsam mit AFD die Erarbeitung einer ersten Probenmatrix für die akustische und</p>

		<p>konstruktionstechnische Analyse. Wegen der Vielzahl der möglichen Einflussfaktoren von Strukturparametern wurde eine statistische Versuchsplanung durchgeführt.</p> <p>Als Kugelwerkstoff fiel die Entscheidung auf nichtrostenden Stahl (1.4404), da in den meisten potenziellen Anwendungen offene, selbsttragende Strukturen zur Anwendung kommen sollten, welche im Einsatz Kontakt zur Umgebungsluft oder auch verschiedenen anderen Medien (Feuchtigkeit, Öl,...) haben.</p> <p>Folgende Strukturparameter wurden festgelegt:</p> <table border="1" data-bbox="555 703 1396 949"> <thead> <tr> <th></th> <th>Parameter</th> <th>0</th> <th>1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Kugeldurchmesser</td> <td>2 mm</td> <td>4 mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Sintertemperatur</td> <td>1200 °C</td> <td>1250 °C</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Verpressung beim Formkörper-Bau</td> <td>7 %</td> <td>15 %</td> </tr> </tbody> </table> <p>Tab. 4 Eigenschaftskombinationen der ersten Matrix</p> <p>Es wurden Strukturen aller möglichen 8 Kombinationen („000“ bis „111“) gefertigt: für akustische Untersuchungen zunächst 18 gesinterte Zylinder (Durchmesser 100mm, Höhe 80mm) sowie für mechanische Untersuchungen 12 quaderförmige Strukturen (80x70x50mm). Im weiteren Projektverlauf wurden für ergänzende Untersuchungen weitere Strukturen nachgeliefert.</p> <p>Die Proben wurden bei AFD, die ULT und die Portatec geprüft. Außerdem wurden am Fraunhofer IFAM mechanische Tests (Druck- und Zugversuche) durchgeführt.</p> <p>Abb 2 zeigt zylindrische Proben, wie sie sowohl für akustische als auch in der Folge für mechanische Untersuchungen verwendet wurden. In Abb. 3 sind beispielhaft die metallographischen Schliffe, Schalenporositäten und Strukturdichten der aus 4-mm-Kugeln gefertigten Proben dargestellt.</p>		Parameter	0	1	1	Kugeldurchmesser	2 mm	4 mm	2	Sintertemperatur	1200 °C	1250 °C	3	Verpressung beim Formkörper-Bau	7 %	15 %
	Parameter	0	1															
1	Kugeldurchmesser	2 mm	4 mm															
2	Sintertemperatur	1200 °C	1250 °C															
3	Verpressung beim Formkörper-Bau	7 %	15 %															



Abb. 2 Zylindrische Proben

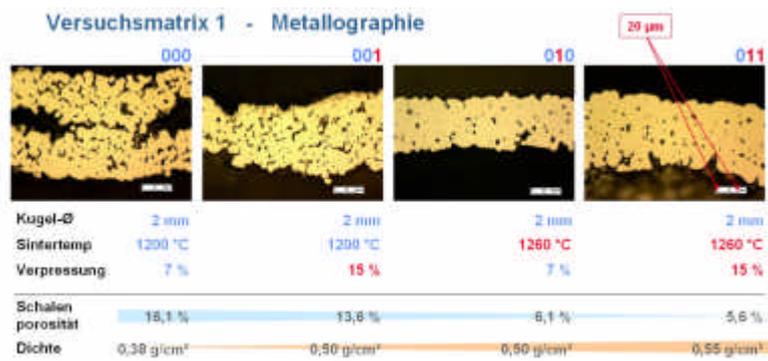


Abb. 3 Metallographie, Schalenporosität und Dichten einiger Strukturen der Versuchsmatrix 1

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Druckfestigkeiten der Proben der ersten Matrix.

<b>Druckfestigkeiten (spezifische Energieaufnahmen in kJ/kg)</b>				
<u>(1) Formkörper aus 2-mm-Kugeln</u>				
Eigenschaftskombination	000	001	010	011
Druckfestigkeit	3,00	4,50	5,75	6,00
<u>(2) Formkörper aus 4-mm-Kugeln</u>				
Eigenschaftskombination	100	101	110	111
Druckfestigkeit	4,75	4,50	6,25	6,10

Tab. 5 Druckfestigkeiten der Proben der ersten Matrix

**Meilenstein M1**

**Definition des Parameterbereiches der**

- Erhöhung der Permeabilität der Schalen erhöhen (Erzeugen von Doppelporosität), dazu
- Versuche mit anderen Trägergeometrien

<p><b>Hohlkugeln für Punkte 1.3 und 1.4</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- systematische Untersuchungen der Vorgänge beim Sinterprozess mit geplatzten Schalen</li> <li>→ Kombination Verschiedener Kugel-Durchmesser, Mischungsverhältnis 1:2, gezieltes Einbringen von Leerstellen</li> <li>→ Verringerung des Kugeldurchmessers auf 1 mm</li> <li>→ Erhöhung der Schalenporosität durch weiteres Absenken der Sintertemperatur</li> </ul>
---	--

**I – Vorbereitende akustische und mechanisch-konstruktionstechnische Analyse von 3. Hohlkugelstrukturen**

I – IFAM / Glatt:  
3.1.

Entwicklung und Herstellung von spezifischen metallischen Hohlkugeln und Strukturen

Nach Auswertung der akustischen und mechanischen Untersuchungen der Hohlkugelstrukturen der ersten Versuchsmatrix erfolgten Festlegungen und Vorgaben für neu zu entwickelnde, spezifische Hohlkugeln und Strukturen und die Festlegung einer erweiterten Probenmatrix.

Für die erweiterte Probenmatrix wurden insgesamt folgende Parameter festgelegt (neue fett gedruckt):

	Parameter	0	1	2
1	Kugeldurchm.	2 mm	4 mm	<b>1 mm</b>
2	Sintertemperatur	1200 °C	1250 °C	<b>1150°C</b>
3	Verpressung beim Formkörper-Bau	7 %	15 %	
4	D <sub>50</sub> Pulver	5 µm	<b>50 µm</b>	
5	Bindung	gesintert	<b>gelötet</b>	<b>geklebt</b>
6	Kugelmischung	<b>2 mm</b>	<b>4 mm</b>	<b>1 mm</b>
7	Mischungsverh.	<b>20:1</b>	<b>1:1</b>	<b>10:1</b>

Tab. 6 Kugelparameter der zweiten Matrix

Insgesamt (Matrix 1 und 2) wurden Proben folgender Eigenschaftskombinationen gefertigt:							
Parameter:	1	2	3	4	5	6	7
Lfd Nr.							
1	0	0	0				
2	0	0	1				
3	0	1	0				
4	0	1	1				
5	1	0	0				
6	1	0	1				
7	1	1	0				
8	1	1	1				
9	2	0	0				
10	0	2	0				
11	2	2	0				
12	0	0	0	1			
13	0	0	0	0	1		
14	0	0	0	0	0	1	1
15	0	0	0	0	0	2	1
16	1	0	0	0	0	2	0
17	1	0	0	0	0	2	2
<p>Tab. 7 Insgesamt untersuchte Eigenschaftskombinationen (Matrix 1 und 2)</p> <p>Nach der Fertigung und Messung eines Großteiles der Kombinationen der Matrix 2 wurde beschlossen, die kursiv gedruckten Varianten 13 und 15 nicht zu fertigen, da hier keine Eigenschaftsverbesserung mehr erwartet wurde.</p> <p>Alle Strukturen wurden, wie auch schon die Strukturen der ersten Matrix, aus Edelstahl 1.4404 gefertigt.</p> <p>Durch weitere <u>Absenkung der Sintertemperatur</u> bis auf 1150°C wurden Strukturen erzeugt, deren Zellen sehr poröse Schalen aufweisen. Akustisch wurde hier ein Vorteil erwartet, die mechanische Stabilität der Strukturen sank jedoch erheblich ab. Das Handling dieser Strukturen war sehr erschwert und die mechanische Bearbeitung (Sägen, Drehen, Fräsen) erforderte entsprechende Vorversuche und deutlichen Mehraufwand.</p>							

		<p>Ein anderer Weg zu Erzeugung einer akustisch wirksamen hohen Schalenporosität wurde in der Verwendung Metallpulvers mit <u>größerem Partikeldurchmesser</u> zur Herstellung der Hohlkugeln vermutet. Bedingt durch die größeren Pulverteilchen wurden einerseits von vornherein auch größere Poren in den Kugelschalen erwartet, andererseits weist grobes Pulver eine geringere Sinteraktivität auf, was zusätzlich zu höherer Porosität der Struktur führen sollte. Durch diese Maßnahme sollte auch das Innere der Hohlkugeln „akustisch wirksam“ werden, was zu einer erheblichen Verbesserung der Schallabsorption führen sollte.</p> <p>Einen erheblichen Entwicklungsaufwand forderte die Fertigung der <u>1-mm-Kugeln</u>. Eine Vielzahl von Versuchssprühungen war erforderlich, um einen gleichmäßigen Schichtaufbau auf den Kugeln unter weitgehender Vermeidung von Kugel-Agglomeraten zu erreichen. Mit einem Kugeldurchmesser um 1 mm stoßen die vorhandenen Wirbelbett-Beschichtungsanlagen an ihre untere Machbarkeitsgrenze. Erste Chargen wurden erfolgreich unter hohem Zeitaufwand im <i>Top-Spray-Verfahren</i> erzeugt. Dieses Verfahren erlaubt jedoch nur die Herstellung relativ dünnwandiger und poröser Kugeln mit vergleichsweise geringer mechanischer Stabilität.</p> <p>Problem bei Herstellungsversuchen von 1-mm-Kugeln nach der S/R-Technologie waren bisher vor allem die sehr starke Agglomeratbildung sowie Kugelverluste durch zu hohe Spaltmaße in der Anlage. Diese konnte zunächst eingedämmt werden, indem der Kugel-Charge vor Sprühbeginn ein bestimmter Anteil (ca. 30 Vol.-%) gröberes EPS beigemischt und nach Ende der Sprühung wieder abgesiebt wurde. Eine deutliche Absenkung des Agglomeratanteiles wurde nun möglich durch den Zusatz von nicht expandiertem Styropor-Granulat, welches allerdings ebenfalls nach Sprüh-Ende abgesiebt werden muss und somit immer noch zu Pulververlusten führt. Die gesinterten Kugeln / Strukturen weisen Festigkeitswerte auf, die den nach gleichem Verfahren erzeugten 2- und 4-mm-Kugeln entsprechen.</p> <p>Aus den Kugeln wurden im Hand-Verfahren mehrere grüne Formkörper erzeugt und anschließend entbindert und gesintert. Die Verfahrensrouten sind auf der Anlagentechnik des IFAM sicher und reproduzierbar.</p>
--	--	--

Die erfolgreiche Herstellung von 1-mm-Kugeln nach beiden Verfahren erfolgte bislang nur mit relativ hohem Aufwand auf den kleineren Anlagen des IFAM. Die effektivere Herstellung auf Laboranlagen sowie die Umsetzung in den kleintechnischen Maßstab erfordern weitere Arbeiten, insbesondere konstruktive Änderungen an den Beschichtungsanlagen.

Die Herstellung von Kugelmischungen verschiedener Durchmesser erfolgte per Hand. Es kam zu keiner nachweisbaren Verbesserung der akustischen Eigenschaften, die Festigkeitswerte verschlechterten sich leicht gegenüber den Proben aus der Matrix 1. Daher sollte diese Strukturvariante nicht weiter verfolgt werden.



Abb. 5 Nahaufnahme eines geschnittenen Formkörpers, hergestellt aus einer Mischung von 2- und 4-mm-Kugeln (Mischungsverhältnis 1:1)

		Eigenschaftskombination	Kurz-Beschreibung	Druckfestigkeit kJ/kg
		200	1mm/1200°C	2,50
		020	2mm/1150°C	2,20
		220	1mm/1150°C	1,85
		000.1	grobes Pulv.	2,80
		000.001.1	2mm+4mm 1:1	2,70
		100.002.0	4mm+1mm 20:1	4,25
		100.002.2	4mm+1mm 40:1	4,50
		<p>Tab. 8 Druckfestigkeiten (Plateauspannungen) von Hohlkugelstrukturen der Matrix 2</p> <p>Es erfolgte der Übergang zur Fertigung der Grünstrukturen im <u>Formteilautomaten</u>. Es wurden erste Blöcke im Format ~40*60*20 cm gefertigt. Die mechanische Bearbeitung dieser Formteile erfolgte zunächst im Grünzustand an der TU-DD (Taskgroup Bearbeitung), die Wärmebehandlung wurde am IFAM durchgeführt. Als sehr problematisch erwiesen sich zunächst Risse in den Sinterteilen sowie Verzug der Teile nach dem Sintern. Durch Modifizierung der Temperatur- und Atmosphärenregimes während des Entbinderns und Sinterns sowie durch die Wahl geeigneter Sinterunterlagen (z.B. Korund-Hohlkugeln) konnte dem im weiteren Projektverlauf entgegenget werden.</p> <p>Im Formteilautomaten erfolgte beispielsweise die Fertigung der Strukturen für die Ölverschmutzungs-Tests.</p>		
1 – 3.2	<p><u>AFD, ULT, IFAM</u></p>			
	<p>Ziel der Arbeiten ist die Entwicklung eines Modells, welches das Absorptionsvermögen der HKS in Abhängigkeit der Verschmutzung beschreibt.</p>	<p>Für Untersuchungen zur Verschmutzungs-Resistenz durch AFD und ULT am von der ULT geschaffenen Prüfstand wurde eine Reihe von Hohlkugelstrukturen verschiedener Durchmesser gefertigt. Bei der ULT wurden Verschmutzungsversuche mit Öl und Stäuben durchgeführt. Genauere Ausführungen hierzu können dem Anschlussbericht der Gesellschaft für Akustikforschung entnommen werden.</p> <p>Mit Öl oder mit brennbaren Stäuben verunreinigte Strukturen sind thermisch regenerierbar (ausbrennen der Verunreinigungen). Hierzu ist es</p>		

		<p>jedoch erforderlich, dass einerseits die Strukturen aus entsprechend korrosionsbeständigem Stahl gefertigt werden, andererseits muss eine Abgasnachreinigung (z.B. katalytisch) installiert sein. Es bietet sich an, diese Art der Regenerierung beim Strukturhersteller zum Beispiel in den für die Strukturherstellung vorhandenen Entbinder-Öfen durchzuführen (Lieferung neuer Filterelemente gegen Rückgabe verschmutzter Strukturen).</p> <p>Bei ölverschmutzten Filterelementen ist weiterhin recht einfach und unkompliziert eine Reinigung mit Lösungsmitteln möglich. Der Nachteil dieser Variante ist jedoch der Anfall größerer Volumen verunreinigter organischer Flüssigkeiten, die entweder entsorgt oder selbst aufwändig regeneriert werden müssen.</p> <p>Nichtbrennbare Stäube lassen sich aus den Elementen nur in begrenztem Umfang durch Vibration (z.B. Ultraschall) entfernen.</p>
A	<u>IFAM:</u>	
	<p>Untersuchung zu mechanischen Kennwerten (Zug-, Druck- und Biegeversuche) als Grundlage für die Erarbeitung der Konstruktionsunterlagen und Herstellungsverfahren der Labormuster</p>	<p>Die mechanischen Eigenschaften Strukturen der erweiterten Probenmatrix lagen wie in Punkt I – 3.1 ausführlicher beschrieben, bis auf die unten aufgeführten Ausnahmen im Bereich der früher untersuchten Strukturen:</p> <p>(1) Kugeldurchmesser ~ 1mm, Herstellung im Top-Spray-Verfahren: Diese Kugeln zeigten im Vergleich zu vorher hergestellten größeren Kugeln deutlich verringerte, d.h. verschlechterte Festigkeitswerte. Aus diesem Grunde und weil der bisher von AFD nachgewiesene akustische Effekt aus der Verringerung des Kugeldurchmessers nur sehr gering ausfällt, sollte diese Variante bei zukünftigen Betrachtungen eine untergeordnete Rolle spielen.</p> <p>(2) Kugeln mit hoher Schalenporosität: Die unter der sehr geringen Sintertemperatur von 1150°C hergestellten Hohlkugeln mit stark erhöhter Schalenporosität zeigen erheblich schlechtere mechanische Kennwerte (Zug- und Druckfestigkeit), als die unter 1200°C gesinterten. Da der Zugewinn an Vorteilen auf akustischer Seite vergleichsweise gering ausfällt, ist eine Anwendung dieser Kugeln nur in sehr wenigen Ausnahmefällen sinnvoll. Diese Aussagen lassen sich sinngemäß auf die anderen neuen Eigenschaftskombinationen übertragen.</p>

<p><b>Meilenstein M2</b></p> <p>→ In welchen Grenzen (z.B. Grad der Kontamination, Umgebungsdruck, Strömungsgeschwindigkeit) kann von einer Verschmutzungsresistenz des Werkstoffes hinsichtlich seiner akustischen Eigenschaften ausgegangen werden?</p> <p>→ Welche Bearbeitungsverfahren sollten angewendet werden, um den Werkstoff akustisch nicht negativ zu beeinflussen?</p>	<p>Verschmutzungsresistenz:</p> <p>→ Näheres siehe Bericht/Unterlagen der Gesellschaft für Akustikforschung.</p> <p>Bearbeitungsverfahren und Werkzeuge;</p> <p>→ Generell sind alle spanenden Verfahren sowie Verfahren wie Wasserstrahl- und Laserschneiden bzw. Drahterodieren geeignet. Informationen zu Bearbeitungsparametern siehe Taskgroup Bearbeitung</p>
<p><b>I – Entwicklung und Herstellung von spezifischen metallischen Hohlkugelstrukturen, 4. Untersuchungen zu anwendungsrelevanten Struktureigenschaften (II)</b></p>	
	<p>Untersuchungen zu den Schwerpunkten</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperaturverhalten</li> <li>• Verbindungsmöglichkeiten</li> <li>• Selbsttragende Elemente</li> <li>• Durchströmbarkeit</li> </ul>
<p>I – IFAM / Glatt: 4.1.</p>	
<p>Entwicklung und Herstellung von spezifischen metallischen Hohlkugelstrukturen.</p>	<p>(1) Eine Aufgabe dieses Abschnittes waren Untersuchungen zu Möglichkeiten, Hohlkugelstrukturen mechanisch mit anderen Maschinenelementen zu verbinden. Für diese <b>Befestigungs-Tests</b> erfolgte die Fertigung von Zugstäben (30x30x180mm). In die beiden schmalen Flächen der Stäbe wurden Bohrungen (Durchmesser 8mm) eingebracht, in welche Gewindebolzen bzw Dübel mit Innengewinde eingeklebt wurden (Portatec). In einer weiteren Versuchsreihe wurden durch die TU-DD Löcher mit Hinterschnitt eingebracht, um eine bessere „Verkeilung“ des Klebstoffes zu erreichen.</p>

	<p>Es wurden sowohl 2-Komponenten-Epoxidharze als auch Hochtemperaturkleber auf Keramikbasis getestet.</p> <p>(2) Weitere Untersuchungen bezogen sich auf die Ausbildung einer sogenannten <b>„schallharten Oberfläche“</b>. Ziel dieser Untersuchungen sollte es sein, den Hohlkugelstrukturen neben den guten schalldämpfenden auch verbesserte schalldämmende Eigenschaften zu verleihen. Eine schallharte Oberfläche ist gewöhnlich eine mechanisch stabile Außenhülle relativ hoher Masse. Diese schallharte Hülle trägt gleichzeitig zur Verbesserung der selbst tragenden Eigenschaften der Struktur bei.</p> <p>Folgende Wege wurden im Projekt begangen:</p> <p>(i) Herstellung von Sandwich-Strukturen durch Bekleben der Hohlkugelstrukturen mit Stahlfolie:</p> <p>Es wurden Stahlfolien unterschiedlicher Dicken (0,25 mm und 0,025 mm) vom IFAM beschafft. Die Beklebung erfolgte bei Portatec, die akustische Bewertung derselben bei der Gesellschaft für Akustikforschung. (Auswertung siehe Bericht der AFD)</p> <p>(ii) Herstellung von Sandwich-Strukturen durch thermisch gespritzte Metallschichten</p> <p>Im Auftrage des IFAM wurden bei der fremat GmbH (Freiberg) zwei zylindrische Strukturen mit Stahlschichten (Dicke 2...3 mm) durch Lichtbogenspritzen beschichtet. Für weitere Proben übernahm diese Aufgabe die Taskgroup Bearbeitung, die hierfür ebenfalls einen Fremdauftrag vergab. Diese einseitig beschichteten Strukturen wurden ebenfalls bei der AFD akustisch untersucht.</p> <p>Die gewünschte akustische Wirkung konnte erzielt werden, jedoch müssen sehr dicke Schichten von einigen Millimetern erzeugt werden, um die Oberflächengestalt der Hohlkugelstruktur auszugleichen. Erforderlichenfalls sind die gespritzten Strukturen mechanisch nachzubearbeiten.</p> <p>Abhilfe schafft ein vorheriges „Einwalzen“ der Strukturoberfläche und das damit verbundene grobe Verschließen der Unebenheiten.</p>
--	--

Abb. 6 zeigt eine durch Lichtbogenspritzen beschichtete Hohlkugelstruktur.



Abb. 6 Durch Lichtbogenspritzen beschichtete Strukturen

(iii) Herstellung von Sandwich-Strukturen durch nichtmetallische Schichten

In einigen Versuchsreihen wurden nichtmetallische Schichten auf die Hohlkugelstrukturen aufgebracht. Zur Anwendung kamen zwei Typen Spachtelmasse auf Natriumsilikat-Basis sowie ein Hochtemperatur-Silikon. Während sich das Silikon als zu weich und zu elastisch erwies, um die geforderte Wirkung zu erzielen, war mit den Natriumsilikat-Schichten der gewünschte Effekt zu erzielen. Die akustischen Untersuchungen erfolgten bei der AFD.



Abb. 7 Nichtmetallisch beschichtete Strukturen

		<p>(iii) Eingewalzte Schichten</p> <p>Unter Regie der Taskgroup Bearbeitung wurde der Versuch unternommen, durch Einwalzen der Oberfläche der Hohlkugelstrukturen eine schallharte Oberfläche zu erzielen. Diese Oberflächen brachten jedoch einen nur geringen akustischen Effekt und waren zudem nicht mechanisch stabil. Es besteht jedoch die Möglichkeit, diese Art der Schicht mit einer thermisch gespritzten (ii) zu kombinieren.</p> <p>(3) In Vorbereitung der Fertigung der Labormuster (Phase II) wurden am Formteilautomaten des IFAM Versuche zur Festlegung der geeigneten Verarbeitungsparameter durchgeführt.</p> <p>(4) <u>Strukturen mit anderer Zellgeometrie</u> („Rolly Brushes, „3D-Sternstrukturen“)</p> <p>Eine Möglichkeit, die Schallabsorption zellulärer Strukturen zu erhöhen, besteht möglicherweise in der Erhöhung der offenen Porosität solcher Strukturen. Ein möglicher Weg ist die Verwendung unregelmäßig geformter Strukturelemente anstelle von Kugeln. Das Zur Verfügung stellen solcher Strukturen scheiterte bislang einerseits an der Verfügbarkeit eines geeigneten Trägermaterials zu vertretbaren Preisen, andererseits in Schwierigkeiten der gleichmäßigen Beschichtung nicht runder Teilchen im Wirbelbettverfahren.</p> <p>Glatt führte umfangreiche Recherchen nach geeigneten Trägermaterialien durch.</p> <p>Erste Beschichtungsversuche erfolgten (durch Glatt) an sogenannten „Rolly Brushes“. Auf diese sehr unregelmäßig geformten Teile konnte nur eine ungleichmäßige Metallpulverschicht aufgetragen werden. Beim Entbindern kam es – bedingt durch die unregelmäßige Beschichtung einerseits und den hohen in die Gasphase zu überführenden Kunststoff-Anteil zur teilweisen Zerstörung der Metallschicht (Abb. 8)</p>
--	--	--



Abb. 8 Entbinderte und gesinterte „Rolly Brushes“

Im Ergebnis der Recherche beschaffte Glatt ein Muster sternförmiger Kunststoff-Teilchen und führte mit diesen erfolgreich Beschichtungsversuche durch. Am IFAM wurden im Anschluss Tests zum Bau von Formkörpern und zur Entbinderung und Sinterung durchgeführt. Beim Formkörperbau waren hier vor allem die durch die von der Kugelgestalt abweichende Zellform veränderten Kontaktflächen zu beachten. Befeuchtung und Verpressung mussten angepasst werden, um mechanisch stabile Grünlinge und letztlich mechanisch stabile Sinterteile zu erzeugen. Die Bearbeitung der Sinterteile erfolgte am Fraunhofer IFAM relativ problemlos mittels Funkenerosion. Spannende Verfahren konnten noch nicht geprüft werden. Abb. 9 zeigt einen gesinterten Formkörper dieses Strukturtyps.

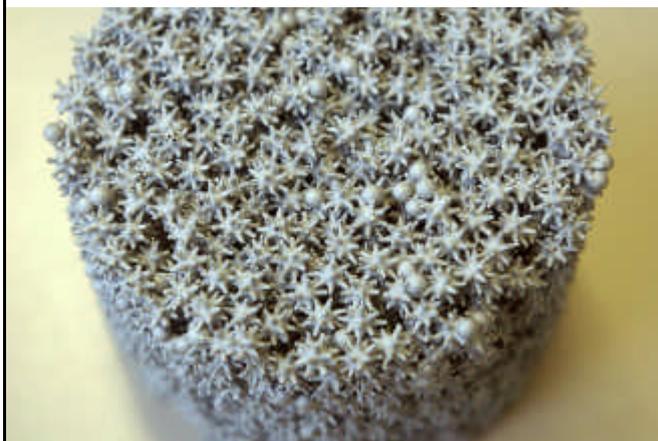


Abb. 9 Entbinderte und gesinterte „3D-Stern-Struktur“

I – 4.2.	AFD, IFAM, ULT	
	<p>Entwicklung eines Modells, welches das Absorptionsvermögen der HKS in Abhängigkeit von der Temperatur beschreibt.</p>	<p>Vom IFAM gelieferte Strukturen wurden bei AFD sowohl bei Raumtemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen untersucht. Die Messungen ergaben, dass im Bereich von 0°C bis etwa 600°C keine Beeinflussung der Schallabsorption der Strukturen durch die Temperatur stattfindet.</p> <p>Wesentlich beim Einsatz der Strukturen unter höheren Temperaturen ist jedoch die geeignete Werkstoffwahl. Neben der Einsatztemperatur ist hier zusätzlich die den Schalldämpfer umgebende Atmosphäre von großer Bedeutung.</p> <p>Während der zunächst verwendete Edelstahl 1.4404 beispielsweise in Abgasanlagen bis maximal 600°C eingesetzt werden kann, sollten für höhere Einsatztemperaturen korrosionsbeständigere Fe-Cr-Ni oder Fe-Cr-Al-Legierungen verwendet werden. (z.B. 1.4841, 1.4767)</p> <p>Die Herstellung von Hohlkugeln und –strukturen aus diesen Legierungen verlief am IFAM und bei Glatt erfolgreich.</p>
I – 4.3.	PORTATEC (+IFAM)	
	<p>Untersuchungen zur Befestigungstechnik (Löten, Schweißen, Kleben, Dübeln, Schrauben, Verbindung der Hohlkugelstrukturen untereinander und mit einem Sandwich-Blech)</p>	<p>Die Verklebung mit keramischen Hochtemperatur-Klebstoffen führte zu relativ spröden Verbindungen mit geringer Zugfestigkeit, die nur mittlere Belastungen zulassen. Der keramische HT-Kleber bricht in der Mehrzahl der Fälle vor den Strukturen. Die an der TU Dresden (Taskgroup Bearbeitung) mit Bohrungen mit Hinterschnitt versehenen Zugstäbe (vgl. Abb. 10) zeigten ein ähnlich heterogenes Zerstörungsbild. Auch hier kam es meist zur Zerstörung des Klebstoffes Epoxidharz vor der Hohlkugelstruktur. Wenn eine Struktur selbst zerstört wurde, dann nicht im Bereich der Klebestelle (Infiltrationsbereich Klebstoff-Struktur) sondern in entfernteren Bereichen der Hohlkugelstruktur. Somit kann davon ausgegangen werden, dass diese Art der Befestigung für Hohlkugelstrukturen anwendbar ist. Ausschlaggebend sind die Zugfestigkeit der jeweiligen Struktur einerseits und die Scherfestigkeit des Klebers andererseits.</p>

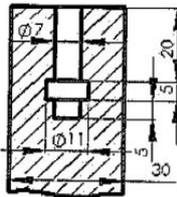


Abb. 10 Hohlkugelstruktur, Sackloch mit Hinterschnitt (Zeichnung)

Die Befestigung mittels klassischer Spreizdübel, Gipskartondübel oder Messingdübel ist ebenfalls durchführbar. Jedoch sind hier nur geringe bis mittlere Belastungen möglich.

Für die Verbindung von Hohlkugelstrukturen untereinander sowie die Laminierung mit Blechen / Folien wurden die folgenden Methoden getestet:

(1) Anlösen und Verbinden im Grünzustand, gemeinsames Sintern (geeignet für die Verbindung von zwei Hohlkugelstrukturen oder von Hohlkugelstrukturen mit pulvermetallurgisch hergestellten Grünfolien)

Bei dieser Methode ist im Herstellungsprozess der Grünstrukturen darauf zu achten, dass es nicht beim späteren Sintern zu unterschiedlichen Schwindungsraten der verbundenen Strukturen kommt, was zu Deformationen und Verwerfungen führt. Das gleiche gilt für die pulvermetallurgisch hergestellten Folien.

(2) Aufsintern von gesinterten Hohlkugelstrukturen auf Blech oder Folie

Diese Methode ist nur bedingt anwendbar und erfordert eine gute Vorbehandlung von Blech und Struktur (Reinigen, Aufrauen). Die Sinterung sollte vorzugsweise unter Wasserstoff oder Hochvakuum erfolgen. Die Verbindungen sind nicht immer mechanisch stabil.

		<p>(3) Verlöten oder Verkleben der Strukturen</p> <p>Beide Methoden eignen sich sehr gut für die Herstellung fester, belastbarer Verbindungen zwischen zwei (gesinterten) Hohlkugelstrukturen und zwischen Hohlkugelstrukturen und Folien/Blechen. Dem späteren Einsatzgebiet der Strukturen entsprechend (Temperaturbereich, umgebende Atmosphäre...) können Lotwerkstoffe bzw. Klebstoffe aus einer breiten Palette gewählt werden.</p>
<p><b>Meilenstein M3</b></p> <p><b>Auf welche Art und Weise kann das Luftschallabsorptionsvermögen der Struktur an die Umgebungstemperatur angepasst werden (Angaben zum Temperaturbereich)? Bis zu welcher Temperatur kann von einer Hitzebeständigkeit der Struktur ausgegangen werden?</b></p>	<p>Es erfolgt keine nennenswerte Beeinflussung des Schallabsorptionsvermögens der Strukturen durch die Umgebungstemperatur der Strukturen. Ausschlaggebend für den Einsatz der Strukturen im höheren Temperaturbereich sind maßgeblich die Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffes sowie dessen mechanischen Eigenschaften bei Einsatztemperatur.</p> <p>Strukturen aus Werkstoff 1.4404 sind bis etwa 600°C hitzebeständig. Für höhere Einsatztemperaturen können Strukturen aus Werkstoffen wie 1.4841 oder 1.4767 gefertigt werden.</p>	
<p><b>Phase II: Entwicklungsphase</b></p>		
<p><b>II – Dimensionierung und Konstruktion der Labormuster</b></p>		
<p>1.</p>		
	<p>Akustische Dimensionierung der Labormuster anhand der Ergebnisse aus Phase I</p> <p><u>IFAM:</u> Ableitung der Werkstoffeigenschaften (Kugelgeometrie, Aufbau der Strukturen, Werkstoff) und des konstruktiven</p>	<p>Es wurden für die zu fertigen Labormuster folgende Parameter festgelegt:</p> <p><u>Schalldämpfer-Modell (Abgas-Schalldämpfer):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kugel-Durchmesser 2...3 mm</li> <li>- Gesinterte Struktur,</li> <li>- Schalenporosität – im Gegensatz zu den Ergebnissen der akustischen Untersuchungen im Abschnitt I möglichst gering sein, um innere Korrosion der Kugeln möglichst zu vermeiden.</li> <li>- Werkstoff 1.4404, alternativ 1.4841 („Krümmer-Stahl“)</li> </ul>

	<p>Aufbaus der Schallschutz- elemente aus Phase 1</p>	<p><u>Ausblas-Schalldämpfer ULT:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kugel-Durchmesser 2 mm</li> <li>- Gesinterte Struktur,</li> <li>- Schalenporosität hoch (Sinterung 1200°C)</li> <li>- Werkstoff 1.4404</li> </ul> <p><u>HKS-Vorfilter (Ersatz Metallgestrick) ULT</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kugel-Durchmesser 4 mm / 8 mm (Ziel: möglichst geringer Strömungswiderstand)</li> <li>- Gesinterte Struktur,</li> <li>- Schalenporosität niedrig (Sinterung 1250°C)</li> <li>- Werkstoff 1.4404</li> </ul> <p><u>Verkleidung Gehäusetüren (Theegarten Pactec)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kugel-Durchmesser 2 mm</li> <li>- Gesinterte Struktur</li> <li>- Schalenporosität hoch (Sinterung 1200°C)</li> <li>- Werkstoff 1.4404</li> </ul> <p><u>Schalldämmende Fräskopfeinhausung (Portatec)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kugel-Durchmesser 2 mm (Vorgabe durch AFD war 1 oder 2 mm)</li> <li>- Gesinterte Struktur</li> <li>- Schalenporosität hoch (Sinterung 1200°C)</li> <li>- Werkstoff 1.4404</li> </ul>
<p>II – 1.3.</p>	<p><u>IFAM / Glatt</u></p>	
	<p>Auswertung und Analyse der Resultate aus I. Daraus resultierend: Vorbereitende Entwicklungsarbeiten zu den Hohlkugelstrukturen für die Labormuster unter Berücksichtigung der</p>	<p>Die Fertigung der geplanten Labormuster erforderte den Übergang zu relativ großflächigen Strukturen (Grundfläche 30x30 cm) sowie die Fertigung von Strukturen am Formteilautomaten.</p> <p>Die Sinterung großflächiger Platten und großvolumiger Formteile führte in der Vergangenheit wiederholt zu Deformationen dieser Teile und zu Rissbildungen aufgrund der hohen und zum Teil ungleichmäßigen Schwindung. Zur Fertigung fehlerfreier Strukturen waren somit folgende</p>

<p>Ergebnisse aus Phase I und erster Informationen der Anwender aus II – 1.2.</p>	<p>Probleme zu lösen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Erhöhung der Homogenität der Eigenschaften der Grünlinge             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verwendung von Bauteilen aus dem Formteilautomat</li> </ul> </li> <li>(2) Verhinderung der Rissbildung durch hohe Schwindungsraten und Reibung Probe – Unterlage             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Test verschiedener Keramik- und Oxidpulver sowie von Kurund-Hohlkugeln als reibungsmindernde „Zwischenschichten“ zwischen Formkörper und Unterlage</li> </ul> </li> </ul> <div data-bbox="555 609 1370 1214" data-label="Image"> </div> <p>Abb. 11 Während des Sinterns gerissene Hohlkugelstrukturen 300*300mm</p> <p>Für die Herstellung von Formkörpern im Formteilautomat wurden Überlegungen zum Aufbau eines flexibler einsetzbaren modular aufgebauten Formwerkzeuges angestellt. Dieses Werkzeug sollte quaderförmige Strukturen verschiedener Abmessungen liefern können, welche später im gesinterten Zustand mechanisch bearbeitet werden sollten. (Vorstufe zur Fertigung endformgerechter Net-Shape-Teile)</p>
<p><b>Entwicklung und Herstellung der ersten Labormuster</b></p>	
<p>II – IFAM / Glatt: 2.1. Entwicklung und Herstellung von Hohlkugeln und Strukturen nach den Vorgaben</p>	<p>Entsprechend der erarbeiteten Vorgaben erfolgte die Fertigung von Strukturen für die Fertigung der Labormuster.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Quadratische Platten 300x300(x20) mm für Portatec und ULT</li> </ul> <p>Diese Platten wurden auf verschiedene Wege gefertigt.</p>

- a) Herstellung der Grünlinge im manuellen Formwerkzeug, Sinterung der Einzelplatten am IFAM unter Verwendung einer reibungsmindernden Zwischenschicht
- b) Herstellung von Grünlingen (450x600x100...200mm) im Formteilautomaten, Schneiden dieser Grünlinge auf gefordertes Maß (Taskgroup Bearbeitung, TU DD), Sinterung der Einzelplatten am IFAM unter Verwendung einer reibungsmindernden Zwischenschicht
- c) Sägen der Platten im gesinterten Zustand aus größeren Formteilen (Taskgroup Bearbeitung, TU DD)

Abb. 12 zeigt eine Platte 300x300x20 wie sie beispielsweise an die Teegarten-Pactec für die Auskleidung der Gehäusetüren und an die ULT AG für Durchströmungsuntersuchungen geliefert wurden.

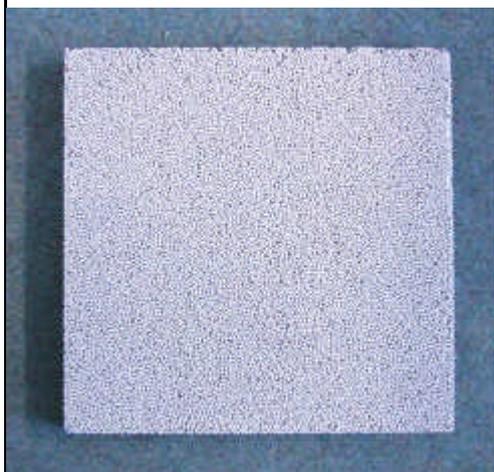


Abb. 12 Platte 300x300x20 für die Auskleidung der Gehäusetüren (Theegarten) Pactec

Abb. 13 zeigt ein aus einer Platte 300x300x20 gefertigtes Absorber-Element im Ausblasbereich einer Absaugeinrichtung der Fa. ULT. Abb 14 zeigt die Prinzipskizze hierzu. Abb. 15 stellt einen herkömmlichen Metallgestrick-Vorfilter der Fa. ULT einem aus Hohlkugelstruktur gefertigten Element gegenüber.



Abb. 13 Absorberelement aus metallischer Hohlkugelstruktur im Ausblaskanal eines Gerätes der Fa. ULT AG

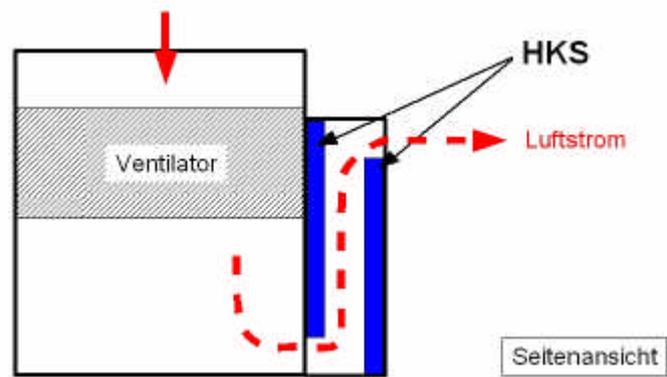


Abb. 14 Absorberelemente aus metallischer Hohlkugelstruktur im Ausblaskanal eines Gerätes der Fa. ULT AG, Prinzipskizze

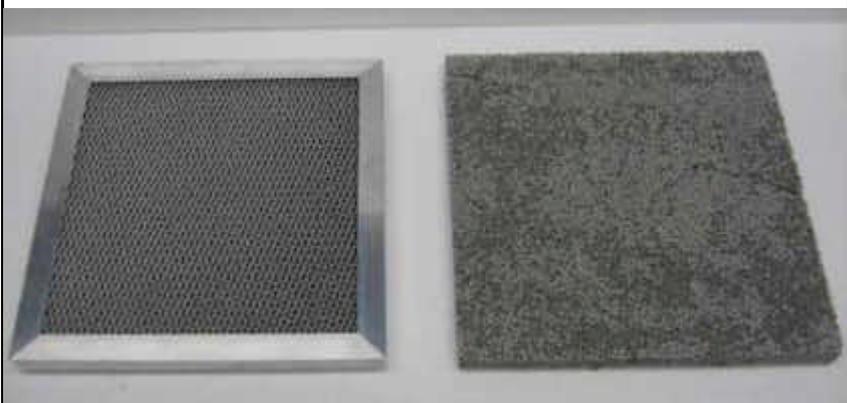


Abb. 15 Vorfilter der Fa. ULT aus Metallgestrick (links) und selbsttragendes Element aus Hohlkugelstrukturen (rechts)

Zu den akustischen und strömungstechnischen Ergebnissen wird auf die Berichte der ULT und der AFD verwiesen.

### (2) Fräskopf-Einhausung (ULT)

Für die Fertigung dieses Labormusters wurden auf dem Formteilautomaten am IFAM im kleinen flexiblen Formwerkzeug Formteile entsprechend der erarbeiteten Vorgaben erzeugt, im Grünzustand auf das erforderliche Maß geschnitten (TU DD), am IFAM gesintert und anschließend bei Portatec auf das Endmaß bearbeitet. Mit Hilfe dieses so geschaffenen Modells konnte eine deutliche Reduktion des Schallpegels der damit ausgerüsteten Maschinen erreicht werden.



Abb. 16 Fräskopf-Einhausung an einer Hochgeschwindigkeits-Fräsmaschine der Fa. Portatec

### (3) Abgas-Schalldämpfer-Modell (AFD)

Für das Abgas-Schalldämpfer-Modell erfolgte die Fertigung von Strukturen aus den Werkstoffen 1.4404 und 1.4841. Fertigung und Bearbeitung erfolgte am IFAM und der TU Dresden (Taskgroup Bearbeitung). Die Beschichtung mit einer schalldichten Außenhaut erfolgte bei AFD mit Spachtelmasse auf Natriumsilikat-Basis (siehe auch I-4.1.), die akustischen Untersuchungen wurden ebenfalls von AFD vorgenommen. In der vorliegenden Variante konnte die Schalldämpfung

	<p>gegenüber der herkömmlichen Variante um 0,8 bis 1,3 dB verbessert werden, eine weitere Optimierung ist möglich.</p>  <p>Abb. 17 Abgas-Schalldämpfer-Modell</p>
<p><b>Meilenstein M4</b></p> <p><b>Welche Lärminderung kann mit den aufgebauten Labormustern erzielt werden?</b></p> <p><b>Welche Maßnahmen zur Verbesserung sind ableitbar?</b></p> <p><b>Entsprechen die Vorgaben den Anforderungen des Marktes (Kosten)?</b></p>	<p>Es wurde nachgewiesen, dass mit den meisten der entwickelten Labormuster eine deutliche Lärminderung erzielt werden konnte:</p> <p><u>Abgas-Schalldämpfer</u>: Verbesserung um 0,8 bis 1,3 dB</p> <p><u>Kapselung Fräskopf</u>: Verbesserung drehzahlabhängig (2 bis 6 dB)</p> <p><u>Ausblasschalldämpfer ULT</u>: Verbesserung um 1,1 dB bei gleich bleibendem Ansaugdruck</p> <p><u>Ersatz Metallgestrickfilter</u>: Gleichbleibend, aber hoher Druckverlust</p> <p><u>Abgas-Schalldämpfer</u>: akustisch weitere Optimierung möglich (siehe AFD), dementsprechend Anpassung der Strukturen (Zellgeometrie, Dichte)</p> <p><u>Ersatz Metallgestrickfilter</u>: Druckverlust muss durch größere Kugeldurchmesser und geringere Filterschichtdicken verringert werden.</p> <p><u>Abgas-Schalldämpfer</u>: Nahezu gleiche Kosten bei höherer akustischer Wirksamkeit</p> <p><u>Fräskopf-Kapselung</u>: nahezu gleiche Kosten (Kostensparnis gegenüber Lärminderungsmaßnahmen auf dem Schallausbreitungsweg)</p> <p><u>Ausblasschalldämpfer</u>: Kosten zu hoch, nur bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten gerechtfertigt</p> <p><u>Metallgestrickvorfilter</u>: gleiche Kosten bei möglicherweise vorteilhafteren Eigenschaften (siehe Verbesserungsmaßnahmen)</p>

	<p>Eine Verbesserung der Kostensituation kann in naher Zukunft erreicht werden durch die Verwendung preiswerterer Edelstahl-Pulver und eine effektive Produktion in hohen Stückzahlen.</p> <p>Recherchen und erste Sinterversuche zu preiswerten Alternativpulvern wurden im Rahmen des Projektes „Makomp“ durch das Fraunhofer IFAM und Glatt Systemtechnik GmbH durchgeführt. Kontakte mit weiteren Pulverherstellern wurden aufgebaut. Parallel laufend mit einer Senkung der Herstellungskosten der Hohlkugelstrukturen durch hohe Stückzahlen wird so zukünftig eine deutliche Kostensenkung erreichbar sein.</p>
<p><b>Phase III: "Bewertungsphase"</b></p>	
<p><b>III</b></p>	<p><b>Auswertung, Schlussfolgerungen</b></p>
<p>–</p>	
<p><b>1.</b></p>	
<p>III – <u>IFAM / AFD</u></p>	
<p>1.1.</p>	
<p>Aufarbeitung der Ergebnisse der einzelnen Partner für projektübergreifende Nutzbarkeit der Daten</p>	<p>→ Die Aufarbeitung erfolgte in regelmäßigen Treffen. Es wurden Statusseminare und ein Halbzeitseminar durchgeführt.</p> <p>→ Es erfolgte die Organisation eines gemeinsamen Workshops „Hochtemperaturfeste Hohlkugelstrukturen für Schall- und Schadstoffreduzierung im Abgasstrang“ (Februar 2008)</p> <p>→ Gemeinsame Veröffentlichungen und Vorträge</p>
<p>III – <u>alle:</u></p>	
<p>1.2.</p>	
<p>ABSCHLIESSENDE BEWERTUNG DER ERGEBNISSE</p>	<p>Publikation von Forschungsergebnissen in gemeinsamer Absprache:</p> <p>Über die vorliegenden Abschlussberichte hinaus wird auf die Veröffentlichungen verwiesen, die unter Federführung der AFD erfolgten (siehe Bericht Gesellschaft für Akustikforschung Dresden)</p>

## **II.2 Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Zuarbeit zu diesem Punkt erfolgt gesondert durch die Fraunhofer Zentralverwaltung München.

## **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die vom Fraunhofer IFAM Dresden durchgeführten Arbeiten dienten unter anderem

- der Bereitstellung von Proben für Ermittlungen des „Ist-Zustandes“ der Strukturen, für die akustische und konstruktionstechnische Analyse
- der Entwicklung und Herstellung auf die Anwendungen zugeschnittener spezifischer metallischer Hohlkugeln und Hohlkugelstrukturen
- der Entwicklung und Herstellung von Hohlkugeln und Strukturen für Baumuster
- der mechanischen und metallographischen Analyse der hergestellten Hohlkugeln und Strukturen
- der Verfahrensentwicklung zur Beschichtung sowie zur Entbinderung und Sinterung spezieller neuartiger Strukturen

Der Hauptanteil der Arbeiten umfasst die Werkstoff- und Verfahrensentwicklung zur Erzeugung spezieller spezifischer Hohlkugelstrukturen sowie die Herstellung und Charakterisierung derselben. In Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Akustikforschung wurden die akustischen Grundlagen hierfür geschaffen und die Kugeln und Strukturen dimensioniert. Diese Arbeiten waren die Voraussetzung für die Schaffung und den Einsatz von Demonstratoren bei den Anwendern.

Alle durchgeführten Arbeiten wurden gemäß dem eingereichten und in Punkt 2 dieses Berichtes zitierten Ablaufplanes durchgeführt.

## **II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Der Hauptnutzen des Projektes liegt zweifelsohne beim zukünftigen Hersteller der Strukturen und den Endanwendern. Im Projekt wurden Wege aufgezeigt, schalldämmende und schalldämpfende Maschinenbauteile auf der Basis metallischer Hohlkugelstrukturen herzustellen.

Zu dem im Rahmen des Projektes gewonnenen Nutzen für das Fraunhofer IFAM zählt in erster Linie die Erfahrungszunahme bezüglich der Entwicklung und Herstellung von auf spezielle

akustische und konstruktionstechnische Erfordernisse ausgelegten Hohlkugelstrukturen. Es wurde ein Wissenszuwachs erzeugt auf den Gebieten:

- Akustische Wirksamkeit metallischer Hohlkugelstrukturen
- Herstellung von mechanisch stabilen Hohlkugelstrukturen für den Einsatz in der Akustik
- Herstellung von Hohlkugelstrukturen mit sehr kleinen Zelldurchmessern (~ 1mm)
- Herstellung zellularer Strukturen mit nicht runder Zellgeometrie
- Herstellung geschlossener Oberflächen auf zellularen Metallstrukturen

Diese Erkenntnisse werden in unmittelbarer Zukunft wesentlich zur Akquisition einer Reihe weiterer Forschungsprojekte akustischer Projekte sowohl im Fahrzeugbau als auch im Maschinenbau und in der Raumakustik durch das Fraunhofer IFAM beitragen. Einige dieser Projekte wurden bereits angearbeitet, weitere Interessenbekundungen potenzieller Partner liegen vor.

Auch mit Partnern dieses Projektes wird die Zusammenarbeit ausgebaut. Eine Vielzahl gemeinsamer Aktivitäten ist mit der Gesellschaft für Akustikforschung sowie der Glatt Systemtechnik läuft bereits und ist in Zukunft vorgesehen. Mit der ULT AG wird die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Lufttechnik (Akustik, Kunkenschutz und Filtration durch zellulare Metallstrukturen) fortgesetzt. Mit der Portatec GmbH ist eine weitere Zusammenarbeit im Gespräch.

Alle diese Maßnahmen werden am IFAM nicht nur dazu dienen, die vorhandenen Arbeitsplätze zu sichern, sondern insbesondere in der Abteilung Zellulare Metalle zu weiteren Neueinstellungen von Wissenschaftlern und Technikern führen. Für 2008 sind zwei Neueinstellungen vorgesehen, für die Jahre danach weitere in Planung.

## **II.5 Während der Bearbeitung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Während der Bearbeitung des Projektes wurde kein Fortschritt anderer Stellen auf dem hier bearbeiteten Gebiet bekannt.

## **II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen**

Die folgenden Arbeiten wurden im Rahmen des Projektes veröffentlicht:

- Hübelt, J., Geyer, T., Stephani, G., Göhler, H.: Measuring characteristic values of a new metallic absorber to predict the translation loss of ducts with a porous absorbing lining. Internoise, 2006

Im unmittelbaren Anschluss an das Projekt werden anwendungsbezogene, praxisorientierte Artikel in Industriezeitschriften wie „Maschinenmarkt“ u.ä. verfasst, um die Information über den neuartigen Absorberwerkstoff insbesondere an Ingenieure in Forschung und Entwicklung relevanter Hersteller heranzutragen.