

## **Entwicklung von sensorischen und adaptiven Systemen auf Basis von Elastomeren mit magnetischen Nanopartikeln**

Zur Ausschreibung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zum Thema "**Magnetische Mikro- und Nanotechnologien**" innerhalb des Rahmenprogramms "Mikrosysteme" und des Förderprogramms „IKT 2020“

Abschlussbericht F\_T610\_AD  
(Zeitraum: Juli 2009 – Juni 2013)

„Entwicklung von adaptiven Schwingungstilgern  
für die Automobilanwendung MAGAUTO“

**WEGU GmbH Schwingungsdämpfung**  
Mündener Straße. 31  
D-34123 Kassel  
Projektleiter: Dipl. Ing. Horst Zimmermann  
Tel.: 0561 / 5203-311  
Fax: 0561 / 5203-320  
Email : horst.zimmermann@wegu.de

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Übersicht</b> .....	<b>3</b>
1.1 Thema des Verbundprojektes.....	3
1.2 Gesamtziel des Einzelprojektes.....	3
<b>2. Struktureller Aufbau</b> .....	<b>5</b>
<b>3. Vorhabensbeschreibung Einzelkonzept</b> .....	<b>5</b>
<b>4. Beschreibung des Arbeitsplanes</b> .....	<b>5</b>
4.1 Gliederung des Vorhabens nach Arbeitspaketen.....	5
AP 1 – Anforderungsprofil.....	5
AP 2 – Vorbereitende Untersuchungen.....	6
AP 4 – Magnetisch aktive Elastomere.....	7
AP 5 – Physikalische magnetische Charakterisierung der MAE.....	10
AP 6 – Sensorische Systeme.....	10
AP 7 – Adaptive Systeme.....	11
AP 8 – Demonstration.....	12
<b>5. Zusammenfassung</b> .....	<b>16</b>

## Teilvorhabensbeschreibung „MAGAUTO“

### 1. Übersicht

#### 1.1 Thema des Verbundprojektes

Entwicklung von sensorischen und adaptiven Systemen auf Basis von Elastomeren mit magnetischen Nanopartikeln.

#### 1.2 Gesamtziel des Einzelprojektes

Schwingungen treten bei fast allen technischen Anwendungen, bei denen Teile bewegt werden auf und müssen zur Vermeidung von Lärm oder Strukturermüdungen unterdrückt werden. In der Automobilindustrie werden zur Schwingungsunterdrückung vielfach sogenannte Schwingungstilger eingesetzt. Schwingungstilger sind einfache Feder-Masse-Schwinger, die sich zusammen mit dem schwingenden Bauteil (das auch einen Feder-Masse-Schwinger darstellt) zu einem Koppelschwinger ergänzt. Schwingt der Tilger in der Gegenphase zu der Erregung wird im günstigsten Fall, d.h. im Resonanzfall des Tilgers, die Schwingung des Bauteils stark reduziert, da der Tilger der schwingenden Struktur Energie entziehen konnte.

Für die Schwingungsunterdrückung an KFZ-Abgassystemen eingesetzte Schwingungstilger bestehen aus einem Elastomerkörper, der als Feder fungiert und aus einem Metallkörper als schwingende Masse der auf dem Elastomer angebracht ist. Durch die Variation der Härte der Gummimischung lässt sich die Elastizität des Feder-Masse-Schwingers einstellen und somit die Eigenfrequenz des Tilgers verändern. Damit ist eine irreversible Anpassung des Tilgers an das Koppelschwingungssystem möglich. Da sich jedoch durch Materialermüdungen, Verschleiß und sonstigen Einflüssen die Frequenz der Erregung des schwingenden Bauteils verändert, ist die Wirkung der Schwingungstilgung nur noch eingeschränkt vorhanden. In der Realität bedeutet dies, dass nach einer bestimmten Lebensdauer wieder Komfortverschlechterungen wie beispielsweise Vibrationslärm im Leerlauf des KFZ auftreten.

Ziel dieses Forschungsvorhabens sollte es also sein, den Schwingungstilger als selbstadaptives Bauteil zu gestalten, d.h. der Tilger soll sich selbst an veränderte Erregungsfrequenzen anpassen.

Die Adaption wird durch eine Veränderung der Tilger-Eigenfrequenz erfolgen, die durch die gezielte reversible Veränderung der Elastizität des Elastomers gesteuert wird. Bei diesem Projekt sollte der magnetorheologische Effekt ausgenutzt werden. Magnetorheologische Materialien erhöhen durch Anlegen eines magnetischen Feldes ihre Steifigkeit stark. Diese Materialien bestehen aus einer Matrix, in der magnetische Partikel dispergiert sind. Sie lassen sich in zwei Gruppen aufteilen. Die erste und auch die ältere Gruppe sind Suspensionen, sogenannte magnetorheologische Flüssigkeiten bestehend aus den magnetischen Partikeln und einer Trägerflüssigkeit meist Öl [1,2,3]. Hier ordnen sich die Teilchen beim Anlegen eines magnetischen Feldes zu Flüssigkeitsketten, die der

Strömung einen gewissen Widerstand entgegensetzen und somit die Viskosität erhöhen. Flüssigkeiten auf der Basis dieses Effektes sind bereits kommerzialisiert worden. Die zweite Gruppe, zu der die Idee erst seit vor einigen Jahren entstanden ist, besteht aus einer Elastomermatrix in der die aktiven Partikel fest eingebettet worden sind. Sie werden analog zu den Suspensionen magnetisch aktive Elastomere (MAEs) genannt [4,5,6,7]. Durch die Anordnung der Partikel durch ein magnetisches Feld bei der Aushärtung lassen sich die Materialeigenschaften gezielt auf die Anwendung abstimmen. Der Effekt, der sich hier steuern lässt, ist die interpartikuläre Anziehung, die bei einer Deformation des Materials überwunden werden muss und somit ein verändertes Elastizitätsmodul resultieren lässt. Die bis dahin untersuchten Materialien verfügten noch über eine relativ geringe magnetische Leitfähigkeit [8]. Eine weitere Schwierigkeit dieser Materialien stellt die starke Anisotropie dar. Nur eine gezielte Ausrichtung der Teilchen und eine entsprechende Ausrichtung des Magnetfeldes in der Anwendung helfen die Funktion des Elastomerbauteils sicherzustellen. Nisher waren noch keine Optimierungen hinsichtlich der magnetischen Leitfähigkeit, der Dauerfestigkeit und der Basiselastizität erfolgt.

Es bestanden demnach noch eine Reihe an offenen Fragen und Entwicklungsrisiken, die den Einsatz von MAE's in Frage stellten.

Wie bereits im Hauptantrag beschrieben, haben sich die Projektpartner mit ihrem jeweiligen technologischen Fachwissen auf die folgenden Kern-Zielsetzungen konzentriert:

- Optimierung der Partikel-Permeabilität
- Einstellung der optimalen Orientierung und Ausrichtung der Metallpartikel
- Entwicklung einer optimalen Regel- und Steuerungseinheit
- Wirkungsnachweis an einem Demonstrator.

Das für die Fa. WEGU relevante Gestaltungskonzept sieht vor, dass anstelle des konventionellen Elastomerkörpers ein MAE verwendet wird. In dem Metallkörper wird die Magnetisierungseinrichtung eingebracht, so dass sie zwei Funktionen erfüllt: Die der Masse und die der Ansteuerung des Materials. Eine endgültige Gestaltung muss aber noch erfolgen.

- |                  |   |
|------------------|---|
| [1] Rabinow J.   | The magnetic fluid clutch, AIEE Trans. 67 (1948) 1308 - 1316  |
| [2] Chrzan M.J.  | MR fluid sponge devices and ... of washing machines (2001) SPIE   |
| [3] Carlson J.D. | Low cost MR fluid sponge devices, Proc. 7 <sup>th</sup> Int. Conf. (1999)                                     |
| [4] Davis L.C.   | Model of magnetorheological Elastomers, journal of applied physics 85-6 (1999)                                |
| [5] Jolly M.R.   | A model of behaviour of magnetorheological materials, Smart Material Structure 5 (1996) 607 - 614             |
| [6] Ginder J.M.  | Magnetorheological elastomers in tunable vibration absorbers, Proceedings of SPIEE Vol. 4331 (2001) 103 - 110 |
| [7] Zhou G.Y.    | Shear properties of a magnetorheological elastomer, Smart Material Structure 12 (2003) 139 - 146              |
| [8] Stewart W.M. | European Patent EP0 784 163 B1 2002 und US Patent 5816587, 1998   |

## **2. Struktureller Aufbau**

siehe Hauptantrag

## **3. Vorhabensbeschreibung Einzelkonzept**

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist, ein magnetisch aktives Elastomer (MAE) zu entwickeln. Dieses Elastomer soll eine reversibel steuerbare Federkennlinie haben und daher einen deutlichen Vorteil gegenüber konventionellen Elastomeren, die lediglich über eine fest eingestellte Härte und somit auch nur über eine konstante Federkennlinie verfügen, bieten. Die Fa. WEGU ist hierbei vornehmlich an der Entwicklung eines steuerbaren oder adaptiv einstellbaren Schwingungstilgers interessiert. Das Gestaltungskonzept für einen solchen Schwingungstilger, der auf magnetorheologischer Basis arbeiten würde, sieht vor, dass anstelle des herkömmlichen Elastomerkörpers ein magnetisch aktives Elastomer verwendet wird.

## **4. Beschreibung des Arbeitsplanes**

Wie im Hauptantrag bereits erwähnt, besteht dieses Forschungsprojekt aus acht Arbeitspaketen.

### **4.1. Gliederung des Vorhabens nach Arbeitspaketen**

#### **AP 1 – Anforderungsprofil**

Das Arbeitspaket 1 umfasst zunächst die Erstellung eines Lastenheftes unter Berücksichtigung aller zur erfolgreichen Entwicklung eines adaptiven Schwingungstilgers erforderlichen Randbedingungen. Hierzu zählen u.a.

- die Definition der Basis-Shorehärte
- die erforderliche Gummidicke
- die Belastungsart und
- die Einsatzbedingungen, wie sie im Fahrzeug vorliegen.

Bei der Erarbeitung des Lastenheftes wurde unter Berücksichtigung des üblicherweise zur Verfügung stehenden Fahrzeug-Bauraumes zunächst die konstruktive Auslegung des Schwingungstilgers vorgenommen. Die zu tilgenden Resonanzstellen liegen meist im Bereich von 28 bis 90 Hz, so dass die Basis-Shorehärte des MAEs idealerweise bei 45 bis 50 sh.A liegen muss.

Aufgrund der hohen Temperaturentwicklung in der Nähe der Abgasanlagen muss ein Silikon oder peroxidvernetzter EPDM berücksichtigt werden.

Die Dicke der Gummifeder wird voraussichtlich bei 20 mm liegen, wobei diese Feder bei dynamischer Belastung ein Mix aus Druck-, Zug- und Schubbelastungen erfahren wird.

Das letztendlich erarbeitete Anforderungsprofil (siehe auch Bericht vom 18.09.09, AP1) sieht wie folgt aus:

## Anforderungsprofil

### 1.) Silikon VMQ

Härte	DIN EN ISO 868	45 – 50 Shore A	(Idealwert)
RF	DIN 53504	≥ 8	N/mm <sup>2</sup>
RD	DIN 53504	≥ 300	%
WW	DIN ISO 34-1	≥ 15	N/mm

Nach Wärmelagerung 168h/200°C:

Härte	DIN EN ISO 868	max. +8	Shore A
RF	DIN 53504	≥ 6	N/mm <sup>2</sup>
RD	DIN 53504	≥ 200	%

### 2.) EPDM, peroxidvernetzt, temperaturbeständig bis 150°C

Härte	DIN EN ISO 868	45 – 50 Shore A	(Idealwert)
RF	DIN 53504	≥ 8	N/mm <sup>2</sup>
RD	DIN 53504	≥ 300	%
WW	DIN ISO 34-1	≥ 15	N/mm

Nach Wärmelagerung 168h/100°C:

Härte	DIN EN ISO 868	max. +5	Shore A
RF	DIN 53504	≥ 5	N/mm <sup>2</sup>
RD	DIN 53504	≥ 100	%

Bei der Entwicklung der neuen MAEs ist ebenfalls darauf zu achten, dass die Vulkanisation der Schwingungstilger im IM-Verfahren erfolgen wird und das MAE eine chemische Anbindung an Metall- oder Kunststoffkörper zulassen muss.

## AP 2 – Vorbereitende Untersuchungen

Die Herstellung der Schwingungstilger mit einem MAE-Werkstoff wird die größte Herausforderung darstellen. Denn die in die Elastomermatrix eingebetteten magnetischen Metallpartikel werden mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht die Kraft aufbringen, sich im ausvulkanisierten Elastomerkörper noch ausrichten zu können, sobald das Magnetfeld eingeschaltet wird. Dies wiederum bedeutet, dass sich die Magnetpartikel bereits während der Vulkanisation oder des Einspritzvorganges ausrichten müssen.

Um diese Ausrichteffekte besser analysieren und beurteilen zu können, wurde ein Prototypenwerkzeug konstruiert, welches zunächst mit Permanentmagneten bestückt wurde. Die Permanentmagneten sollten dabei über unterschiedliche Feldstärken verfügen und auch in

der Form konstruiert werden, dass sie gedreht ins Werkzeug gelegt werden können. Mit diesen Varianten wurde einerseits der Einfluss unterschiedlicher Magnetfeldstärken auf die Ausrichtintensität der Magnetpartikel und andererseits das nachträgliche Ausrichten bei „falsch“ eingelegten Magneten analysiert. Das Prototypenwerkzeug war im Februar 2010 verfügbar (Bild 1).

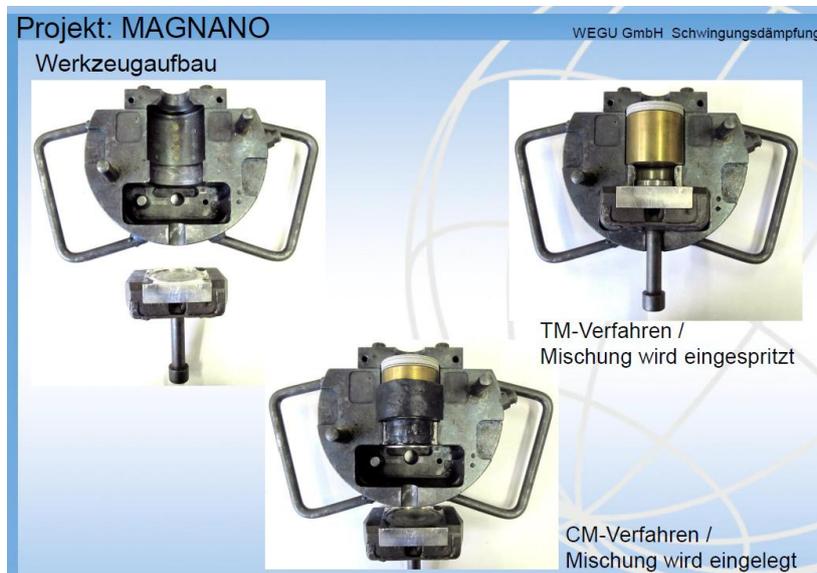


Bild 1: Photos vom ersten Prototypenwerkzeug

#### AP 4 – Magnetisch aktive Elastomere

Mit der Fertigstellung des ersten Musterwerkzeuges wurden auch erste Handmuster, bestückt mit MAE-Materialien, hergestellt.

Aufgrund einiger Fehlversuche musste das Musterwerkzeug mehrfach optimiert und weiterentwickelt werden. Zusätzlich wurden FEM-Berechnungen mit Darstellung von Magnetflusslinien beauftragt, die den jeweiligen Stand des Musterwerkzeuges abbildeten (siehe Bilder 2 und 3).

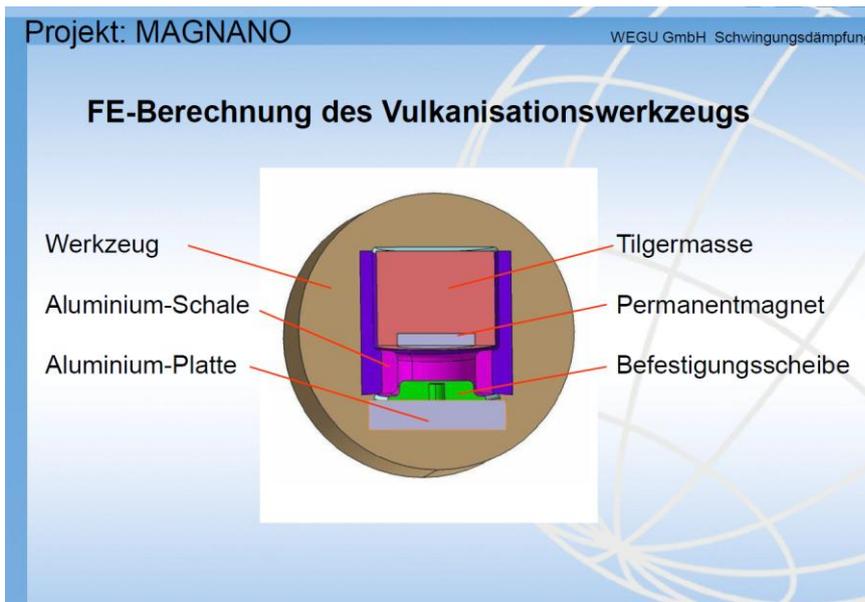


Bild 2: Darstellung des FE-Aufbaus

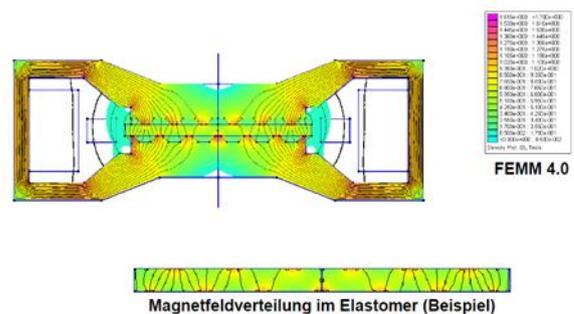
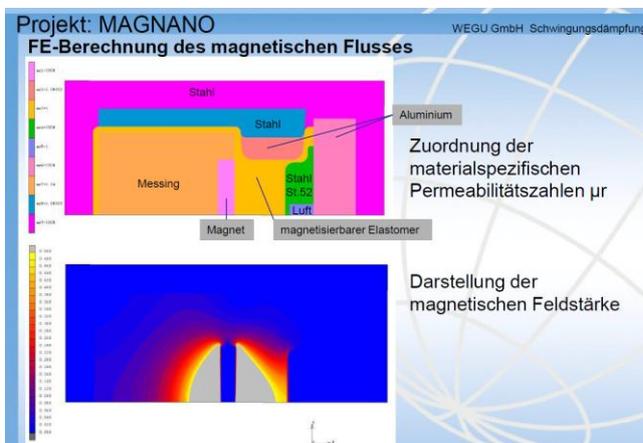


Bild 3: FE-Auswertung

Mit dem letzten Konstruktionsstand des Musterwerkzeuges konnten dann doch sehr gute Ergebnisse erzielt werden, so dass eine umfangreiche Untersuchungsreihe mit Verwendung von Permanentmagneten gestartet wurde. Die entsprechenden Ergebnisse wurden beim nächsten Projekttreffen präsentiert und mit den anderen Projektpartnern diskutiert.

Die Untersuchungsreihe verfolgte dabei das Ziel, den Einfluss der Magnetstärke auf die magnetische Feldstärke zu untersuchen, wobei eine freie Gummihöhe von 15 mm zu überbrücken war. Zum Einsatz kamen MAE's auf Basis von VMQ, die von WEGU gemeinsam mit dem DIK entwickelt wurden sowie EPDM-Werkstoffe, die uns von der Fa. Erbslöh zur Verfügung gestellt wurden.

Des Weiteren dienen diese Versuche auch der Entwicklung von Herstellungsprozessen zur optimalen Ausrichtung und Orientierung der MAE-Werkstoffe während der Vulkanisation. Die entsprechenden Untersuchungsergebnisse wurden ebenfalls allen Projektpartnern zur

Verfügung gestellt und sind zusammengefasst hier nochmals dargestellt (siehe Bilder 4 bis 6).

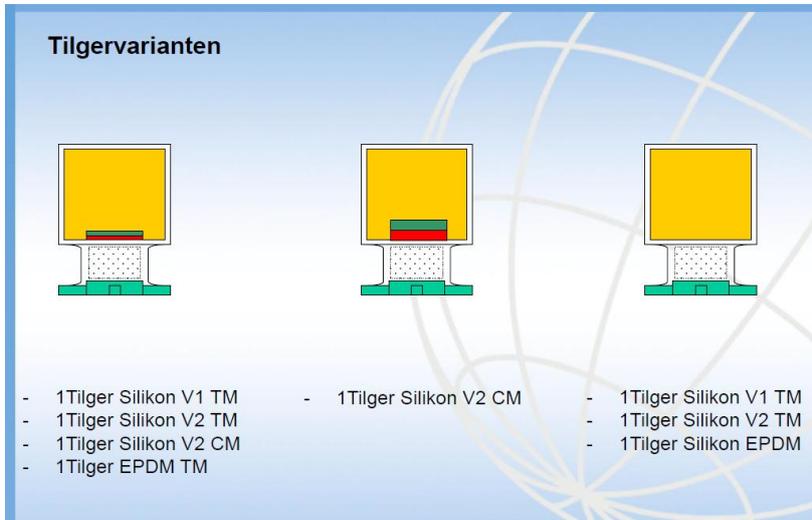


Bild 4: Darstellung unterschiedlicher Permanentmagneten, verschiedener Elastomertypen und unterschiedlicher Herstellungsverfahren

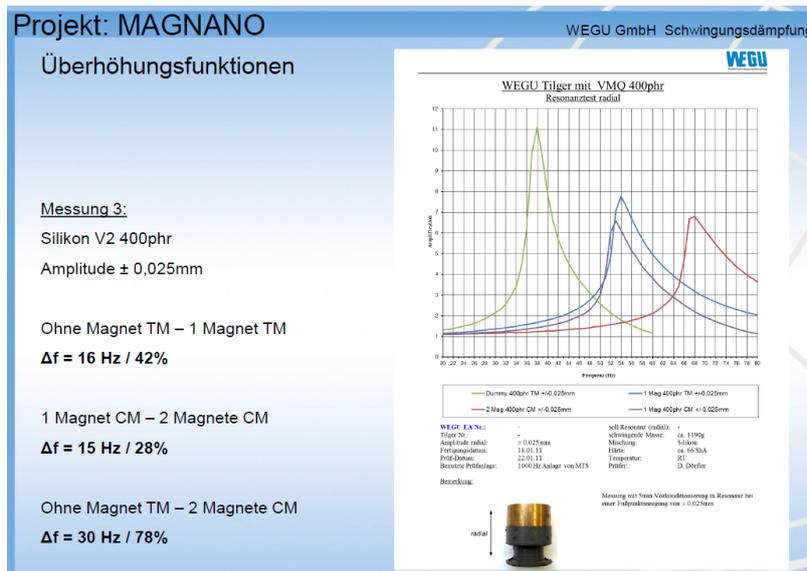


Bild 5: Auswertung von Überhöhungsfunktionen bei einer Amplitude von +/- 0,025mm

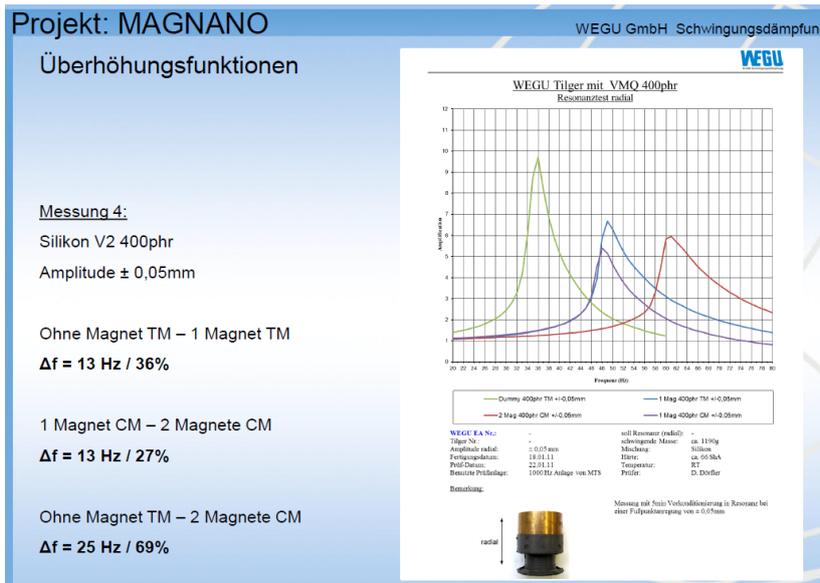


Bild 6: Auswertung von Überhöhungsfunktionen bei einer Amplitude von +/- 0,05mm

**AP 5 – Physikalische magnetische Charakterisierung der MAE**

Die dynamische Charakterisierung der MAE-Materialien hinsichtlich deren Temperatur-, Amplituden-, Dämpfungs- und Alterungsverhalten mit und ohne Feldausrichtung wurde durchgeführt.

Wie bei den anderen Projektpartnern haben auch wir während der Versuchsreihe festgestellt, dass die Magnetwirkung mit Erhöhung der Anregeramplitude nachlässt.

Die entsprechenden Ergebnisse können auch nochmal den Auswertungen auf Bild 5 und 6 entnommen werden. Zusammengefasst liegt die Schaltwirkung in folgenden Größenordnungen:

- 1 Permanentmagnet +/-0,025 mm Amplitude → 25% Wirkung
- 1 Permanentmagnet +/-0,050 mm Amplitude → 20% Wirkung
- 2 Permanentmagnete +/-0,025 mm Amplitude → 78% Wirkung
- 2 Permanentmagnete +/-0,050 mm Amplitude → 69% Wirkung.

**AP 6 – Sensorische Systeme**

Dieser Part befindet sich in der Entwicklung und Erprobung beim Projektpartner EADS.

## AP 7 – Adaptive Systeme

Nachdem mit dem ersten Versuchswerkzeug sehr gute Schaltergebnisse erzielt werden konnten, wurde ein weiteres Versuchswerkzeug gebaut (Bild 7). Mit Hilfe dieses zweiten Versuchswerkzeugs sollte nun das Ziel verfolgt werden, die Möglichkeiten optimaler Ausrichteffekte mit eingelegten Elektromagneten zu studieren.

Das erste Versuchswerkzeug wurde gebaut, um mit eingelegten Permanentmagneten den grundsätzlichen Nachweis erbringen zu können, dass die benötigten Ausrichteffekte der Metallpartikel bereits während der Vulkanisation erfolgen müssen. Aufgrund der gewählten Versuchsanordnung konnte mit den Permanentmagneten zweifelsfrei nachgewiesen werden, dass eine nachträgliche Ausrichtung (nach Vulkanisation) definitiv nicht mehr erreicht werden kann.

Da nun im zweiten Versuchswerkzeug direkt Elektromagnete eingelegt werden können, sollten nun die optimalen Fertigungsbedingungen für beste Ausrichterergebnisse erarbeitet werden. Hierbei wurde ein Versuchsplan aufgebaut, der sich sowohl auf Variation der Feldstärke als auch auf Variation der Ausrichtzeit konzentrierte. Doch egal welche Konstellation gewählt wurde, kam es stets während der Vulkanisation zu enormen Temperaturentwicklungen am frisch vulkanisierten Bauteil.

Diese hohen Temperaturen ( $> 180^{\circ}\text{C}$ ) konnten erst einige Stunden nach der Vulkanisation auf Raumtemperatur absinken. Das gleiche Phänomen ließ sich auch beobachten, wenn der Elektromagnet bereits deutlich vor Heizzeitende abgeschaltet wurde. Die Ursache scheint darin zu liegen, dass der Energieeintrag durch den Elektromagneten aufgrund der ebenfalls mit hohen Temperaturentwicklungen versehene Vulkanisationsprozess nicht abgebaut werden kann und zusätzlich der Stahlkern (Magnetspule) vom Gummiwerkstoff umschlossen ist und dadurch als ungewollter Isolator wirkt.

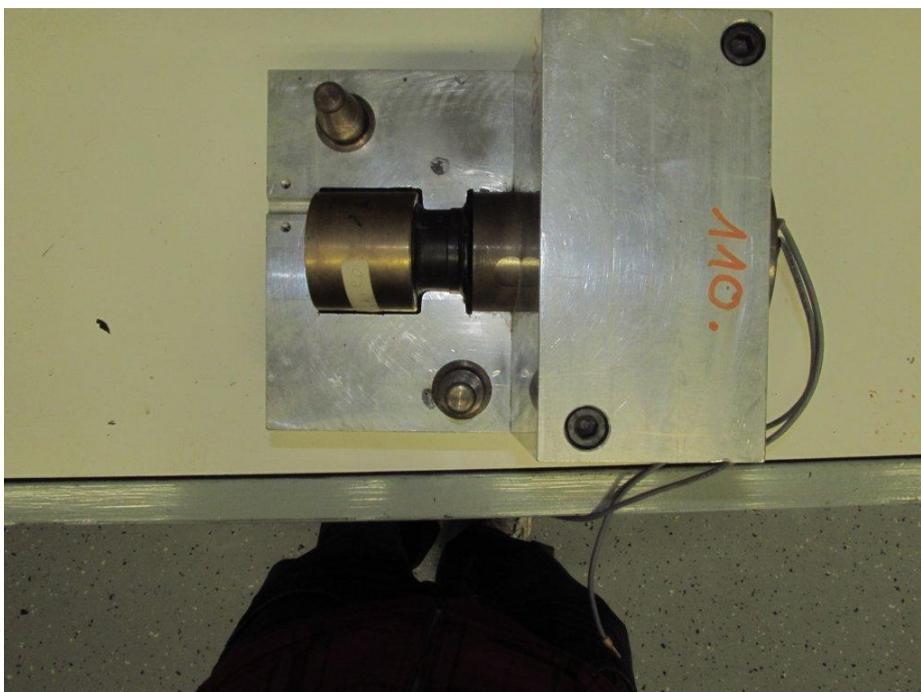


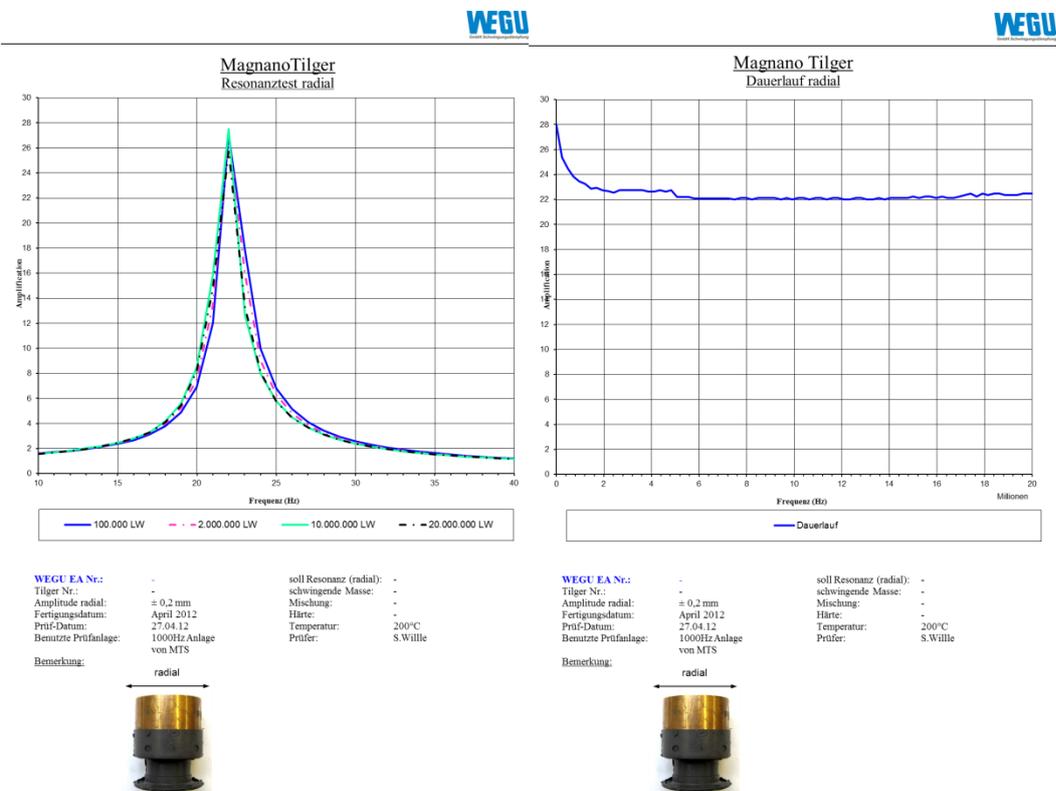
Bild 7: Darstellung des zweiten Versuchswerkzeugs (seriennah).

Selbst wenn diese Extremeffekte noch reduziert werden können, wäre ein solcher Fertigungsablauf für einen Serienbetrieb ungeeignet.

### AP 8 – Demonstration

Aufgrund vorgenannter Tatsachen versuchte man anschließend den Vulkanisationsprozess mit Permanentmagneten durchzuführen, um erst danach den Elektromagneten auf das ausgerichtete Gummipaket zu adaptieren.

Parallel wurde auch das Langzeitverhalten des MAE-Werkstoffs direkt am Fertigteil geprüft. Dabei wurden Schwingungstilger wieder mit Permanentmagneten ausgerüstet, im ersten Versuchswerkzeug vulkanisiert und eine Woche später gemäß Kundenspezifikation auf deren Lebensdauerverhalten geprüft. Den Auswertungen (Bild 8 und 9) ist zu entnehmen, dass diese Schwingungstilger im Wärmeofen bei konstanten 200°C Umgebungstemperatur und einer Amplitude von +/- 0,2mm auf unserer servohydraulischen 400Hz Prüfmaschine (Bild 10) geprüft wurden.



Bilder 8 und 9: Lebensdauerprüfungen mit Darstellung der Eigenfrequenzkurven

Die Schwingungstilger waren diesen Extrembelastungen 11 Tage unentwegt ausgesetzt. Die entsprechende Lastwechselzahl betrug 20 Mio. Zyklen. Beide Tilger haben diesen Versuch schadfrei überstanden und haben auch ihr Verhalten nicht verändert, zumal wir mit

einer automatischen Resonanznachregelung prüfen. Dies bedeutet, dass die Software immer wieder nach der neuen Eigenfrequenz des Schwingungstilgers sucht und dadurch sofort erkennt, wenn am Bauteil Ermüdungen oder erste Risse auftreten. Die Eigenfrequenz ist aber, wie auf den Bildern 8 und 9 zu sehen, konstant bei 22 Hz verblieben.



Bild 10: Tilgerprüfung auf der 400 Hz Prüfmaschine

Ferner sind einige der mit Permanentmagneten ausgerüsteten Schwingungstilger, welche ebenfalls im ersten Versuchswerkzeug vulkanisiert wurden, ohne chemische Bindung zum Permanentmagneten hergestellt worden. Dadurch konnte die vulkanisierte Elastomerfeder aus MAE-Material (Bild 11) leicht und unverletzt wieder vom Permanentmagneten gelöst werden. Die ebene Oberfläche der Elastomerfeder konnte danach auf den Spulenkörper geklebt werden (Bild 12 und 13). Somit konnte eine prozesssichere Prüfung der Tilger-Eigenfrequenzen bei Variation der Stromstärke erfolgen (Bild 14).



Bild 11: Elastomerfeder mit ausgerichtetem MAE-Material



Bild 12: Spulenkörper



Bild 13: Elastomerfeder an den Spulenkörper geklebt



Bild 14: Tilgerprüfung mit Variation der Stromzufuhr

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in der nachfolgenden Tabelle (Bild 15) dargestellt. Die Eigenfrequenz konnte bei 75 Watt Leistung um 6,5 Hz erhöht werden; dies entspricht einem Schalteffekt von 20%. Nachteilig war jedoch der enorme Temperaturanstieg im Spulenkörper, der dazu führte, dass die Messungen immer schnell und ohne dem üblichen Frequenzsweep erfolgen mussten.

	Tilger Nr. 3			Tilger Nr. 4		
	Frequenz mit Strom	Frequenz ohne Strom	Differenz	Frequenz mit Strom	Frequenz ohne Strom	Differenz
5 Watt	37,5	-	-	40	38	2
10 Watt	37	36	1	40,5	37,5	3
20 Watt	37,5	-	-	40,5	36,5	4
30 Watt	37	34,5	2,5	40,5	35,5	5
50 Watt	36,5	33	3,5	39,5	34	5,5
75 Watt	35,5	31,5	4	38,5	32	6,5
100 Watt	36,5	31,5	5	-	-	-

Bild 15: Tabellarische Auswertung der Eigenfrequenzvariation bei unterschiedlichen Stromstärken

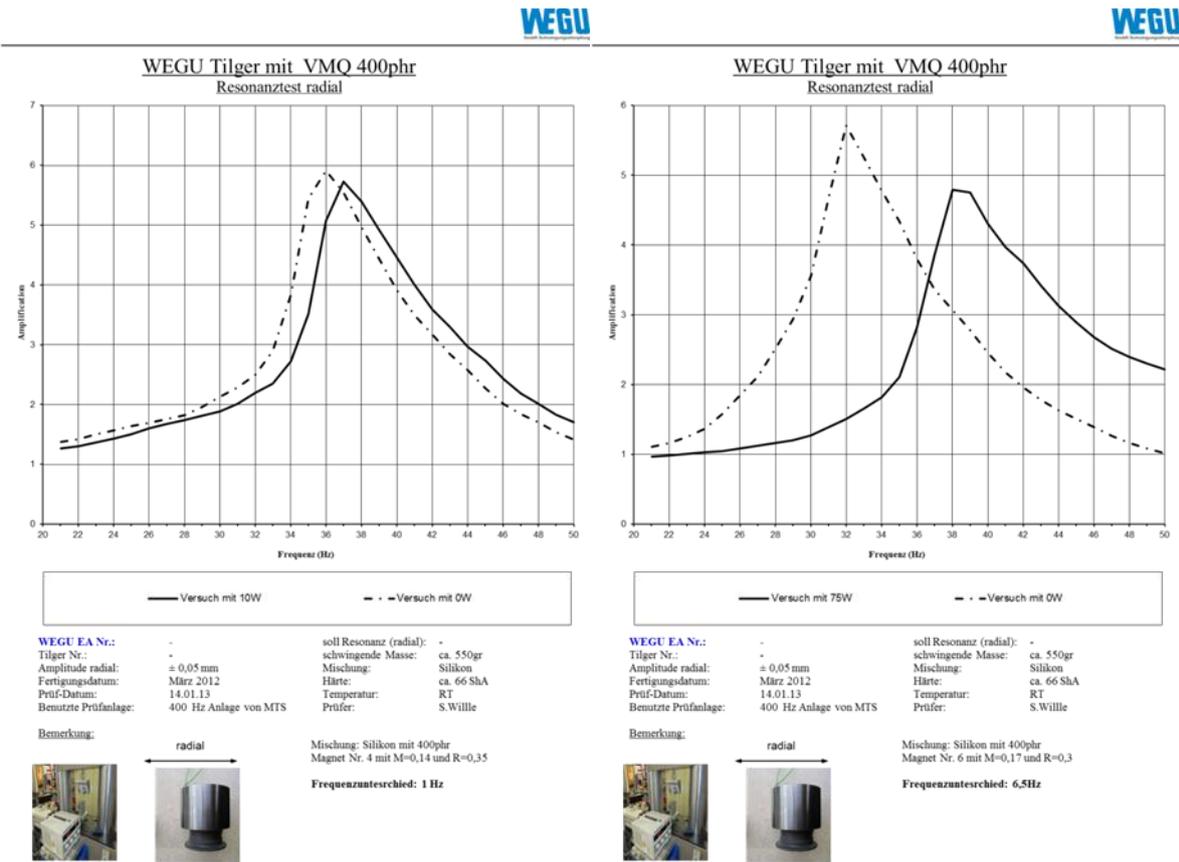
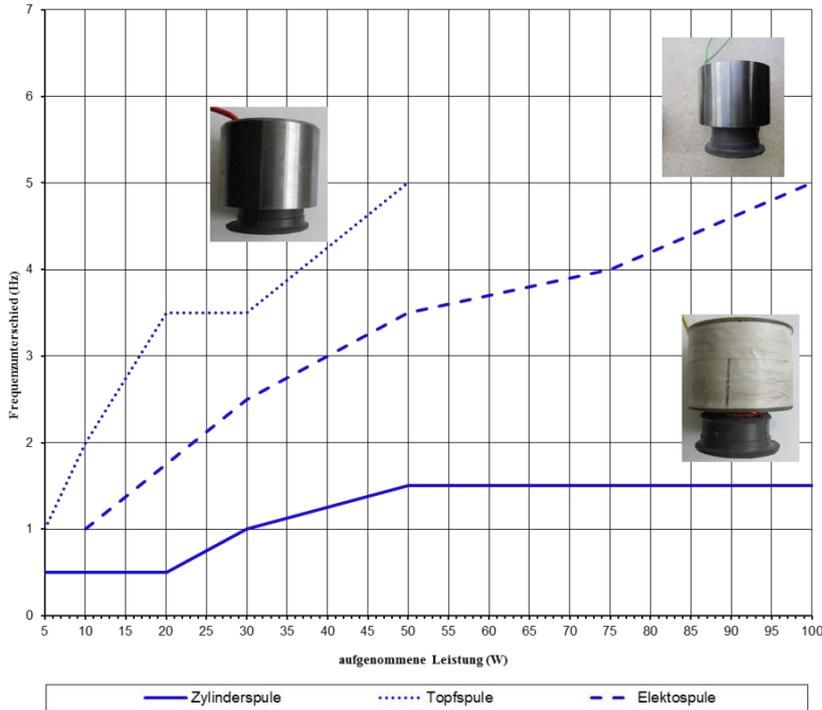


Bild 16: Schalteffekte beispielhaft bei 10 und 75 Watt

Im nächsten Schritt wurde gemeinsam mit einem Spulenhersteller versucht, die enorme Temperaturentwicklung durch Optimierung der Spulenkonstruktion zu verringern und damit den Schalteffekt zu erhöhen und zwar dauerhaft. Die Ergebnisse mit verschiedenen Spulenkonstruktionen sind im Bild 17 zu erkennen, wobei die Topfspulenkonstruktion den mit Abstand größten Schalteffekt bei der geringsten aufgenommenen Leistung brachte.



**WEGU Tilger mit VMQ 400phr**  
Resonanztest radial



<b>WEGU EA Nr.:</b>	-	soll Resonanz (radial):	-
<b>Tilger Nr.:</b>	-	schwingende Masse:	-
<b>Amplitude radial:</b>	± 0,05 mm	Mischung:	Silikon
<b>Fertigungsdatum:</b>	März 2013	Härte:	ca. 66 ShA
<b>Prüf-Datum:</b>	04.04.2013	Temperatur:	RT
<b>Benutzte Prüfanlage:</b>	400 Hz Anlage von MTS	Prüfer:	S.Wille

**Bemerkung:**

Mischung: Silikon mit 400phr  
Magnet Nr. 4 mit M=0,14 und R=0,35

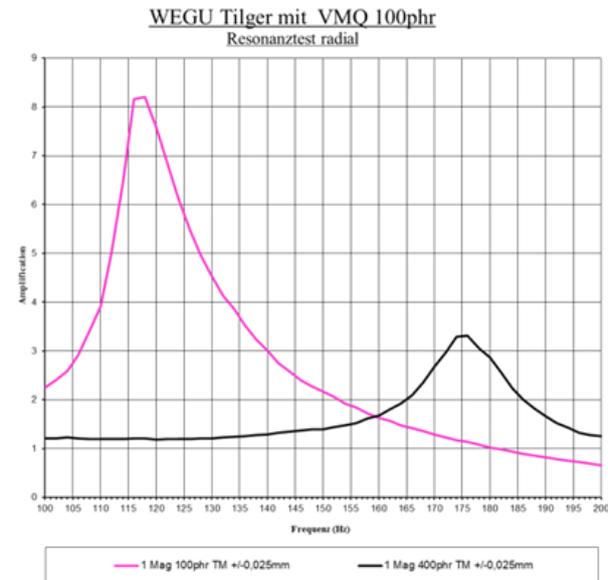
- ..... Zylinderspule mit 1020 gr schwingender Masse
- ..... Elektospule mit 550 gr schwingender Masse
- ..... Topfspule mit 900 gr schwingender Masse



Bild 17: Schalteffekt bei unterschiedlichen Spulenkonstruktionen

## 5. Zusammenfassung

Zu Beginn des Projektes wurde zunächst gemeinsam mit den Materialentwicklern (DIK, Erbslöh, Rhein Chemie) der optimale MAE-Werkstoff entwickelt, der die komplette Spezifikation erfüllen musste und gleichzeitig beste Schalteffekte zeigt. Entschieden hat man sich letztendlich für einen Silikon-Werkstoff mit 400phr Nanopartikeln trotz schlechterer physikalischer Eigenschaften (siehe Bild 18).



<b>WEGU Nr.:</b>	-	soll Resonanz (radial):	-
Tilger Nr.:	-	schwingende Masse:	ca. 1190g
Amplitude radial:	± 0,025 mm	Mischung:	Silikon
Fertigungsdatum:	18.01.11	Härte:	ca. 49 ShA
Prüf-Datum:	03.03.11	Temperatur:	RT
Benutzte Prüfanlage:	400 Hz Anlage von MTS	Prüfer:	S.Wille

**Bemerkung:**

Messung mit 5min Vorkonditionierung in Resonanz bei einer Fußpunktregung von ± 0,025mm



Bild 18: Eigenfrequenz- und Dämpfungsverhalten von Bauteilen mit unterschiedlicher Magnetpartikel-Konzentrationen

Anschließend wurden erste Schwingungstilger mit Permanentmagneten vulkanisiert und vermessen. Die dabei erzielten Schalteffekte waren mit ca. 70 bis 80% enorm, sodass im nächsten Schritt versucht wurde, diese Effekte auch mit Elektromagneten nachzustellen. Das Aussehen des Demonstrators und der Spule sind schematisch im Bild 19 und 20 zu erkennen.

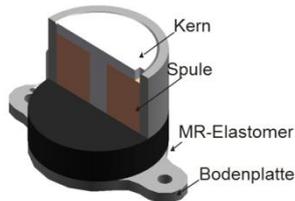


Abbildung 1: Skizze des Schwingungstilgers

Bild 19: Demonstrator



Bild 20: Spulenkörper

Schnell stellte sich jedoch sowohl bei der Vulkanisation mit aktiv geschalteten Elektromagneten sowie bei der Erfassung der Eigenfrequenzen ein unerwünschter Temperaturanstieg, verursacht durch diese Elektromagneten, ein. Die konstruktive Optimierung der Spulenkonstruktion brachte deutliche Verbesserungen.

Um solche aktiv schaltbaren Schwingungstilger am Markt anbieten zu können, wird die Fa. WEGU nun die Konstruktion der Magnetspule gemeinsam mit der Uni Kassel weiter optimieren und dabei auch die serienmäßige Produktion bewerten. Nach heutigem Stand sieht es so aus, dass die Produktion der Elastomerfedern aus MAE-Materialien mit Hilfe von Permanentmagneten erfolgen muss, die anschließend auf den Spulenkörper adaptiert werden müssen. Dennoch bedarf es einer ausgeklügelten Idee, ein innovatives Werkzeug- und Fertigungskonzept zu entwickeln und zu erproben.

Sobald diese beiden letzten offenen Fragen beantwortet sind, plant die Fa. WEGU das Gesamtkonzept in Fachzeitschriften zu veröffentlichen und die Ergebnisse den technischen Fachabteilungen unserer Kunden zu präsentieren.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Entwicklung von adaptiven Schwingungstilgern durch die Integration von magnetisch aktiven Elastomeren	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Zimmermann Horst Dörfler Dennis	5. Abschlussdatum des Vorhabens August 2013
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Fachzeitschrift
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fa. WEGU GmbH Schwingungsdämpfung Mündener Str. 31 34123 Kassel	9. Ber. Nr. Durchführende Institution F_T610_AD
	10. Förderkennzeichen 16SV3760
	11. Seitenzahl 18
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben Europ. Patent EP0 784 163 B1 2002 US Patent 5816587, 1998
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 19
16. Zusätzliche Angaben Es handelt sich hierbei um keinen Fortsetzungsbericht	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Geplant bei unseren Kunden BMW, Daimler, VW-Konzern sobald die noch verbliebenen Problemstellungen ebenfalls gelöst sind	
18. Kurzfassung Bisherige Grundlagenuntersuchungen haben zwar bereits die grundsätzliche Funktionalität des neuen Werkstoffs gezeigt. Die Verwirklichung in ein gebrauchsfähiges Material verlangte allerdings noch Aussagen zur Langzeitstabilität, Realisierbarkeit des Aufbaus im Labor- wie auch im Produktmaßstab, Dauerhaltbarkeit und natürlich auch zur Rentabilität des Endprodukts. Denn MA-Elastomere lassen keine platzsparenden Bauteile zu, sondern wurden bisher mit sehr großen Spulen ausgerüstet. Die Aufgabe der Projektpartner war es demnach, solch ein leistungsfähiges MA-Elastomere zu entwickeln, welches dann leicht bei vielen Methoden der Schwingungsunterdrückung oder Komfortverbesserung eingesetzt werden könnte und somit eine zukunftsweisende Materialgruppe darstellt. Die Kern-Zielsetzung konzentrierte sich auf die Optimierung der Partikel-Permeabilität, der Einstellung der optimalen Orientierung und Ausrichtung der Metallpartikel sowie dem Wirkungsnachweis an einem Demonstrator. Nachdem ein optimaler MA-Werkstoff auf Silikonbasis entwickelt wurde, konnte der Nachweis der grundsätzlichen Schaltfähigkeit dieses Materials mit Hilfe von Permanentmagneten erbracht werden. Dabei konnte die Eigenfrequenz des Tilgers beim Anlegen des Magnetfeldes um ca. 80% erhöht werden. Als Demonstrator sollte nun ein Elektromagnet gegen den Permanentmagnet ausgetauscht werden, wobei dann durch eine enorme Temperaturentwicklung am Spulenkörper sowohl während der Vulkanisation als auch während der Messung der Eigenfrequenz auftauchten. Eine anschließende konstruktive Überarbeitung der Spulenanordnung verbesserte die Situation deutlich. An diesem Thema muss jedoch noch weiter geforscht werden, damit die Wirkung bzw. Schaltfähigkeit auch über längere Zeiträume erhalten bleibt. Ebenfalls muss noch ein innovatives Werkzeug- und Fertigungskonzept entwickelt werden, damit eine wirtschaftliche Serienproduktion erfolgen kann.	
19. Schlagwörter Aktive Schwingungstilgung, magnetisch aktive Elastomere, Nanopartikel	
20. Verlag ---	21. Preis ---

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Development of adaptive dampers by the integration of magnetic active elastomers	
4. author(s) (family name, first name(s)) Zimmermann Horst Dörfler Dennis	5. end of project August, 2013
	6. publication date planned
	7. form of publication Technical journal
8. performing organization(s) (name, address) WEGU GmbH Schwingungsdämpfung Mündener Str. 31 D-34123 Kassel	9. originator's report no. F_T610_AD
	10. reference no. 16SV3760
	11. no. of pages 18
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references Europ. Patent EP0 784 163 B1 2002 US Patent 5816587, 1998
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 19
16. supplementary notes This is not a continuation report.	
17. presented at (title, place, date) Planned by our customers BMW, Daimler, VW-group as soon as the remaining problem tasks will be solved.	
18. abridged version The fundamental functionality of the new material was already shown by previous examinations. The realization to a usable material, however, was due to experiences of long-term stability, realizable build-up in laboratory as well as in product measures, durability and profitability. MA-elastomers were generally equipped by big magnetic spools, so they had no possibilities in order to save space. Our project partners had the task to develop such an efficient MA-elastomer which could be used with many methods of vibrational reductions or improvement of comforts and thus represents a promising group of materials. The focus was laid on optimizing the permeability of particles, on adjusting the highest possible orientation and alignment of metal parts and the effect on a demonstrator. After the development of an optimal MA-material on silicone base, it could be proved that this material was switchable by the help of permanent magnets. The natural frequency of the dumper could be increased up to 80% by connecting it to the magnetic field. As a demonstrator an electronic magnet should be exchanged by the permanent magnet and after that a high temperature developed during the vulcanization as well as during the measurement of the natural frequency. A revision of the ordering of spools evidently ameliorated the situation. On this theme investigations have to be continued, to keep a long-lasting effect and switching capability. An innovative tool concept and manufacturing shall be developed to plan an economic serial production.	
19. keywords Active vibration damping, magnetically active elastomers, nanoparticles	
20. publisher ---	21. price ---