

Geräuscharme Zahnradgetriebe durch den Einsatz von leichten und dämpfenden Werkstoffverbund-Zahnrädern

K. Dilger, S. Böhm, M. Ullmann
Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig
M. Weck, H. Schlattmeier, D. Mandt
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen

1 Einleitung

Ziel des Forschungsvorhabens „Geräuscharme Zahnradgetriebe durch den Einsatz von leichten und dämpfenden Werkstoffverbund-Zahnrädern“ ist die Entwicklung eines Werkstoffverbund-Zahnrades aus der Kombination von Epoxidharz-Schaum (EP-Schaum) und Stahl. Hierzu wird der EP-Schaum, der auf einer kreisrunden Schaumgeometrie basiert, im Bereich des Zahnradkörpers so angeordnet, dass dem durch den Zahneingriff entstehende Körperschall Energie entzogen wird und der in die Welle und damit in die Umbauteile weitergeleitete Körperschallanteil, der geräuschbestimmend ist, vermindert wird. Eine wesentliche Randbedingung hierbei ist, mit dem eingesetzten EP-Schaum ein dem Stahlzahnrad vergleichbares Drehmoment übertragen zu können und gleichzeitig das Gewicht des Zahnrades zu reduzieren.

2 Strukturelle Schäume

Bei den verwendeten Materialien handelt es sich um EP basierte strukturelle Schäume, die seit einiger Zeit in der Automobilindustrie zum Versteifen von Karosserien und Verbesserung des Crash-Verhaltens zur Anwendung kommen [1]. Im Laufe des Projektes haben sich die Untersuchungen von ursprünglich vier auf zwei strukturelle Schäume fokussiert, die von den untersuchten Polymerschäumen das größte Potential zum Einsatz in einem Verbundzahnrad haben. Zum einen Material Ein 1K Material (Material A), das bei Raumtemperatur nicht klebrig ist und als Rohling in Ringform vorliegt. Dieser Ring wird zwischen einer im Vorfeld zentrierten Nabe und einem zentrierten Zahnkranz eingebracht. Anschließend wird der Zahnrad-Schaumverbund in einem Ofen bei 170°C ausgehärtet, wobei der Rohling aufschäumt und an Nabe und Zahnkranz anbindet. Material C ist ein 2K System, das viskos in Kartuschen vorliegt. Durch ein statisches Mischrohr werden beide Komponenten kurz vor der Applikation gemischt, woraufhin die exotherme Amin/Epoxy-Reaktion beginnt, die das Ma-

terial zum Aufschäumen bringt. Dabei benetzt das Material Nabe und Zahnkranz und baut die Adhäsion zum Füge teil (Nabe, Zahnkranz) auf. Nachteil des 2K Materials ist die Abhängigkeit des Schäumungsgrades, und damit der Materialeigenschaften, vom Schaumvolumen und damit der Geometrie und Größe eines Werkstoffverbundzahn rads.

Material A sollte im Wesentlichen aus einer Epoxidharzmatrix, Poren und Glashohl kugeln bestehen, bei Material C sind Anstelle der Glashohlkugeln Aramidfasern bei gemengt. Bei beiden Systemen handelt es sich um physikalisch schäumende Sys teme. Das physikalische Treibmittel besteht aus einer polymeren Hülle welche ein Gas umschließt. Bei Temperatureinwirkung erweicht diese Hülle und das in dieser Hülle enthaltene Gas expandiert. Nach Aushärtung der Klebstoffmatrix sind die Zel len nicht mehr beweglich und bilden so eine gleichmäßige Porenstruktur, da ein Zu sammenschluss der Zellen wie bei chemisch schäumenden Systemen durch die Po lymerhüllen verhindert wird.

3 Mechanische Kennwerte

Zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte und zur Materialauswahl wurden Druck-, Zug- und Scherversuche durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse sind in Tabel le. 3.1 dargestellt [2,3]. Diese wurden dann mit FEM Rechnungen verglichen.

	Druckfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul (Druck) [N/mm ²]	Scherfestigkeit [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]
Material A	21	950	10,5	8
Material C	35	1270	5,1	5,6

Tab.: 3.1: Mechanische Kennwerte der untersuchten Schäume

Der Vergleich der in den Berechnungen ermittelten maximalen Spannungen bei ma ximalem Drehmoment mit den Versuchsergebnissen zeigt, dass für die meisten un tersuchten Nabenaußendurchmesser und Zahnkranzinnendurchmesser die statische Beanspruchung vom Polymerschaum ertragen wird. Als für das Versagen kritischer Wert ist für die meisten Materialien hierbei die Zugspannung zu sehen. Der Einfluss der Zeitfestigkeit wird zurzeit in Schwingversuchen überprüft. Bei der Auslagerung von Scherzugproben in Getriebeöl und dem Durchlauf einer Temperaturwechselbe anspruchung über 1000 h ist der Einfluss der Alterung auf den Strukturschaum un tersucht worden. Dieser Einfluss macht sich in einem Abfall der Scherfestigkeit um

13 bis 25 % bei den einzelnen Schäumen bemerkbar, wobei das 1K Material auf die Alterung nicht so stark wie die 2K Materialien reagiert.

4 Werkstoffdämpfung

Die wesentliche Fragestellung in diesem Projekt ist die Geräuschminderung. Daher war zu untersuchen, wie die eingesetzten Schäume durch ihre Werkstoffdämpfung zur Geräuschreduktion beitragen. Zu diesem Zweck wurde eine Dynamisch-Mechanische-Analyse (DMA) mit den in diesem Projekt verwendeten Materialien an Probekörpern mit 50 mm Länge, 10 mm Breite und 2 mm Höhe als Single Cantilever Test durchgeführt. Die DMA dient der Ermittlung der viskoelastischen Eigenschaften von Werkstoffen in Abhängigkeit der Temperatur. Beim Aufbringen einer erzwungenen sinusförmigen Last auf einen viskoelastischen Probekörper läuft die Deformation mit einem jeweils spezifischen Phasenwinkel der Last nach. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, mit einem einzigen Werkstoffkennwert die Viskosität eines Körpers zu ermitteln. In der DMA wird der Speichermodul und der Verlustmodul ermittelt, woraus der Verlustfaktor berechnet wird. Der mechanische Verlustfaktor $d = \tan \delta$ gibt an, wie weit die durch die Last verursachte Spannung der Verformung vorausleitet, d.h. er kennzeichnet das Verhältnis des durch die innere Reibung auftretenden Energieverlust (Wärme) zur Energiespeicherung, auch als Dämpfung bezeichnet. Material C und D zeigen in ihrem Einsatzbereich eine deutlich höhere Werkstoffdämpfung als Material A und B (Abb. 4.1). Allerdings ist der Einsatz von Material C und D auch nur bis zu geringeren Temperaturen möglich.

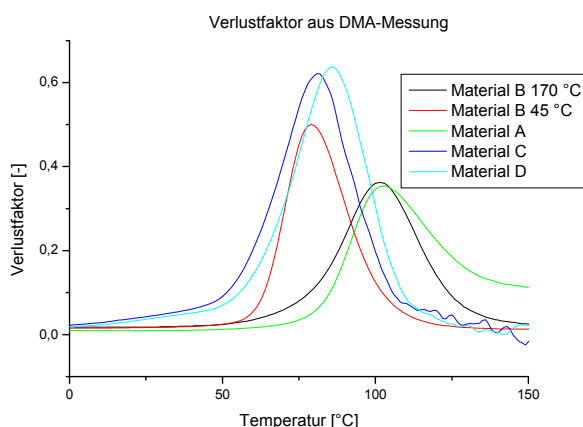


Abb. 4.1: Verlustfaktor verschiedener struktureller Schäume

5 Untersuchungen zum Lauf- und Geräuschverhalten

Die Prüfstandsuntersuchungen zum Geräuschverhalten der Werkstoffverbunde werden auf dem Stirnrad-Geräuschprüfstand des WZL Abb. 5.2 durchgeführt. Die Versuchsradsätze, bestehend aus einem Stahlritzel und einem Werkstoffverbund-Rad, werden sowohl in Form von Drehzahlreihen (M_{an} konstant, n_{an} variiert) als auch Drehmomentenreihen (n_{an} konstant, M_{an} variiert) experimentell untersucht.

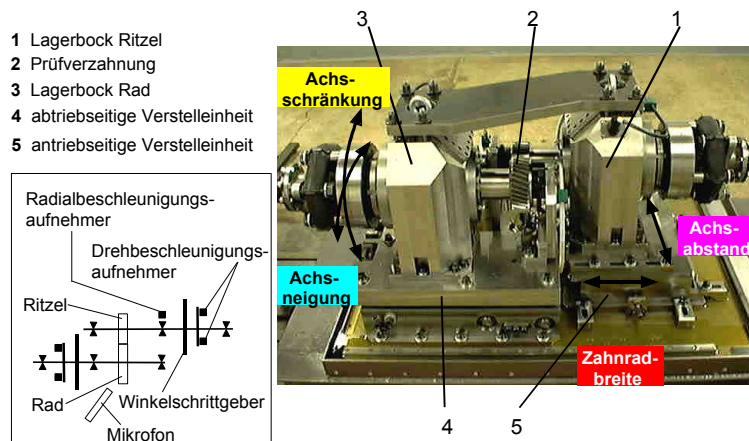


Abb. 5.2: Stirnrad-Geräuschprüfstand des WZL

Das Körperschallsignal, das im Folgenden zur Beurteilung des Geräuschverhaltens der Versuchsradsätze herangezogen wird, wird an dem Gehäuse des abtriebseitigen Lagerbocks gemessen. Somit ist im Vergleich zu der Stahlverzahnung gewährleistet eine Aussage darüber zu gewinnen, inwieweit der Werkstoffverbund durch seine Dämpfungseigenschaften eine Reduktion der weitergeleiteten Körperschallenergie ermöglicht. Als Referenzverzahnung dient in allen hier dargestellten Vergleichen eine Stahlverzahnung, die mit dem gleichen Fertigungsverfahren wie die Werkstoffverbund-Zahnräder hergestellt ist und deren Verzahnungsqualitäten mit denen der Werkstoffverbund-Zahnräder vergleichbar ist.

Hinsichtlich einer Variation des Schaumvolumens ist festzuhalten, dass die Variante mit dem geringsten Schaumvolumen in weiten Bereichen die im Vergleich zu den anderen Varianten höchsten Pegelwerte aufweist, Bild 5.3. Insbesondere bei niedrigen Drehzahlen ist bei der Variante mit dem größten Schaumvolumen auch das niedrigste Pegelniveau zu messen.

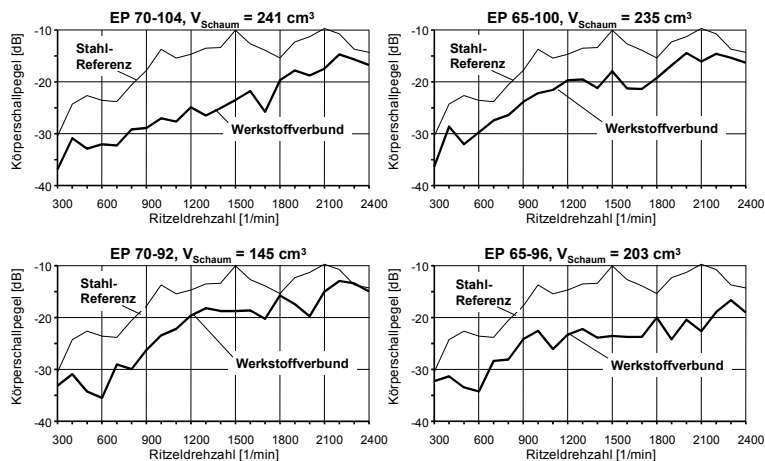


Abb 5.3: Körperschall-Gesamtamplitude, Material A, Drehzahlreihe $M_{an} = 50 \text{ Nm}$

Der Einfluss der verschiedenen untersuchten Werkstoffvarianten auf das Geräuschverhalten der Werkstoffverbund-Zahnräder ist in Bild 5.4 dargestellt. Es ist festzustellen, dass alle Werkstoffvarianten ein hohes Potenzial zur Geräuschreduktion bieten. Material A und Material B liegen auf einem ähnlichen Niveau. Das Material C erreicht Reduktionen der Körperschall-Gesamtamplitude von bis zu 15 dB. Damit bietet es die besten Möglichkeiten für eine erfolgreiche Geräuschreduktion.

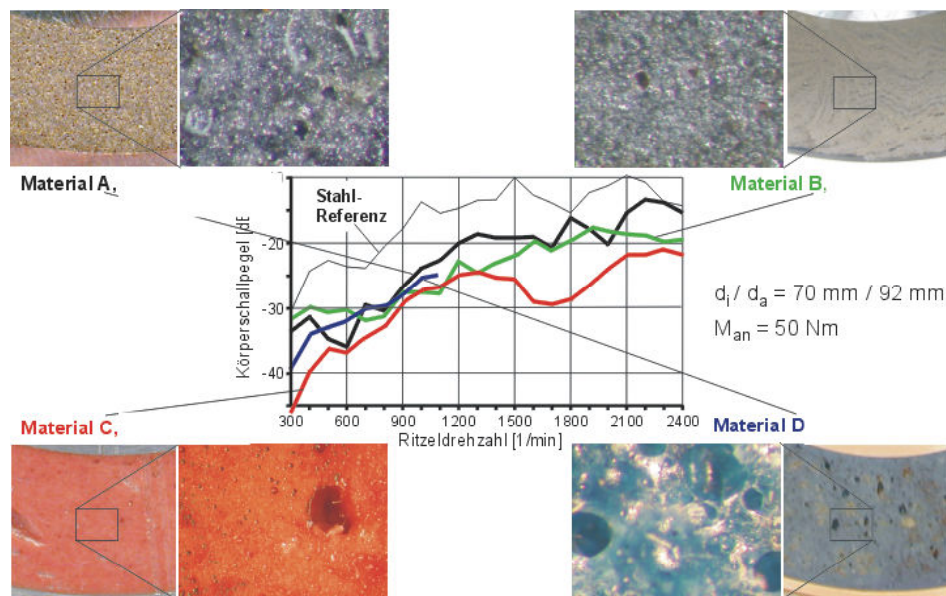


Abb. 5.4: Körperschall-Gesamtamplitude, Vergleich der Werkstoffvarianten, $M_{an} = 50 \text{ Nm}$
 Zusammenfassend ist festzustellen, dass ein negativer Einfluss der oben berechneten Verlagerungen des Zahnkranzes in den untersuchten Drehzahl- und Momentenbereichen auf das Geräuschverhalten der Werkstoffverbund-Zahnräder nicht zu erkennen ist. Wie sich die Verlagerungen bei einer Kombination von hohen Momenten und hohen Drehzahlen auswirkt, ist in weiteren Untersuchungen zu klären. Diese Versuche können jedoch insbesondere im höheren Lastbereich nur auf Verspan-

nungsprüfständen durchgeführt werden, wodurch die Bestimmung zahlreicher geräuschrelevanter Messgrößen eingeschränkt ist.

6 Zusammenfassung

In dem Forschungsvorhaben „Geräuscharme Zahnradgetriebe durch den Einsatz von leichten und dämpfenden Werkstoffverbund-Zahnrädern“ wird die Anwendung des Werkstoffes Epoxidharzschaum in einem Werkstoffverbund-Zahnrad näher betrachtet. Mit dem Epoxidharzschaum werden die Forderungen nach hoher Dämpfung in Verbindung mit niedrigem Gewicht und bei vergleichsweise hohen Werkstofffestigkeiten in idealer Weise erfüllt. Der Epoxidharzschaum bietet weiterhin den Vorteil einer einfachen Fertigung, da Kleb- und Ausschäumprozess in einem Arbeitsschritt ausgeführt werden. Der Mehraufwand gegenüber einer konventionellen Zahnradfertigung ist damit auf ein Minimum reduziert.

Mittels FE-Berechnungen konnte nachgewiesen werden, dass bei einer Variation des inneren und äußeren Schaumkörperdurchmessers der Epoxidharzschaum in weiten Bereichen ausreichende Festigkeitseigenschaften aufweist.

Mit den gefertigten Werkstoffverbund-Zahnrädern, die auf einer kreisrunden Schaumgeometrie basieren, werden Gewichtsreduktionen von bis zu 40 Prozent erreicht. Die Analyse der durchgeführten Geräuschuntersuchungen zeigt für alle betrachteten Varianten eine signifikante Verbesserung des Geräuschverhaltens. Es werden Reduktionen des Körperschallpegels von bis zu 15 dB erreicht.

Die Untersuchungen zur Tragfähigkeit zeigen für das mit den Werkstoffverbund-Zahnrädern übertragbare Drehmoment einen Bereich von durchschnittlich 50 % bis maximal 75 % des vergleichbaren Momentes der Stahl-Verzahnung.

7 Danksagung

Für die Förderung und Unterstützung bedanken wir uns bei der Stiftung Industrieforschung sowie bei folgenden Firmen: Henkel KgaA, L&L Products, ATLANTA Zahnrad- und Werkzeugfabrik Eugen Seidenspinner GmbH & Co., Reinhardt Technik GmbH & Co.

8 Literatur

1. Dilger, K.; Band, J.: Einsatz struktureller Polymer-Schäume zur Optimierung von Automobilkarossen. In: Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, WileyVCH Verlag, Weinheim, 2001

2. Dilger, K.; Boehm, S.; Ullmann, M.; Weck, M., Schlattmeier, H., Mandt, D.: Einsatz von Epoxidharzschaum in Werkstoffverbundzahnradern. In: Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2003
 3. Dilger, K.; Boehm, S.; Ullmann, M.: Noise Reduction For Gears By The Use Of Epoxy Foams. In: Proceedings, 27th Annual Meeting of the Adhesion Society, 2004
-