

# Verbundkeramische Reibpaarungen auf Basis von maßgeschneiderten 3D-Preformen

## **Ergebnisse des Forschungsprojektes IGF-Friktionswerkstoffe**

*(Dieser Artikel wird in den CU-Reports 02/2020 erscheinen)*

**Verbundkeramische C/SiC-C/SiC-Reibpaarungen werden bislang nicht industriell eingesetzt, da einerseits die Herstellung sehr kostenintensiv ist und es andererseits während der Bremsung zu starken Geräuschentwicklungen und Vibrationen (NVH – Noise Vibration Harshness) kommt. Durch die Kombination geeigneter Additive (sog. „Friction-Modifier“) und Eisen-Silicium-Legierungen in der Silicierung konnten die genannten Probleme beseitigt und gleichzeitig der Bremsbelagsverschleiß deutlich reduziert werden.**

Im Rahmen eines gemeinsamen IGF-Forschungsprojektes arbeiteten der Lehrstuhl Keramische Werkstoffe (CME, Universität Bayreuth) und das Institut für Textilmaschinen und textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der TU Dresden an der Weiterentwicklung von C/SiC-Friktionsbauteilen, die im Liquid Silicon Infiltration Verfahren (LSI-Verfahren) zeit-, energie- und damit kosteneffizient hergestellt werden.

### **Keramische Reibpaarungen**

Die auf dem Markt verfügbaren verbundkeramischen Leichtbaubrems-scheiben werden in PKW mit sog. Low-Met-Bremsbelägen kombiniert. Deren Inhaltsstoffe umfassen u. a. Buntmetalle (z. B. Kupfer, welches aufgrund seines negativen Einflusses auf die Umwelt bspw. in Amerika ab 2025 in Bremsbelägen verboten ist, vgl. US Regulations SB 6557, SB 346), Stahl oder Sulfide, welche während Bremsvorgängen als sehr kleine Feinstaubpartikel in

die Umwelt freigesetzt werden. Ziel der Substitution der LowMet-Bremsbeläge durch keramische C/SiC-Reibbeläge, ist die Reduktion der Feinstaubbildung durch geringere Verschleißkoeffizienten der Reibpaarung. Ferner ist der entstehende Feinstaub weniger umweltschädlich.

### **Entwicklung keramischer C/SiC-Bremsbeläge**

Keramische Reibpaarungen finden derzeit industriell nur selten Anwendung, da es vor allem bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten zu einem starken NVH-Verhalten, in Form von Vibrationen und Geräuschentwicklung kommt. Um das NVH-Verhalten der C/SiC-C/SiC-Reibpaarungen zu modifizieren, wurden die C/SiC-Bremsbeläge mit geeigneten Friction-Modifiern additiviert. Innerhalb des Projektes hat sich rausgestellt, dass eine Kombination von SiC- sowie Petrolkokspulver die besten Ergebnisse liefert und die NVH-Eigenschaften deutlich verbessert. Um die kostenintensive Herstellung der C/SiC-Friktionswerkstoffe reduzieren zu können, wurde ebenfalls die Silicierung mit Eisen-Silicium-Legierungen (insbesondere FeSi75) untersucht, da durch den Einsatz dieser Legierung die Silicierungstemperatur auf 1400 °C reduziert werden kann. Ferner übt die Infiltration mit FeSi ebenfalls einen positiven Einfluss auf das NVH-Verhalten sowie den Verschleiß der C/SiC-Bremsbeläge aus. Eine Korrosion bzw. Oxidation der C/SiC-Bremsbeläge findet aufgrund der

Infiltration mit FeSi nicht statt, da das Eisen nicht elementar vorliegt, sondern in FeSi<sub>x</sub>-Phasen gebunden ist.

### Herstellung durch maßgeschneiderte 3D-Preformen

Die hierfür notwendigen Preformen wurden am ITM der TU Dresden entwickelt. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine vollständig automatisierte Preforminganlage konzeptioniert, konstruktiv sowie steuerungstechnisch umgesetzt und erfolgreich erprobt. Die Preforminganlage ermöglicht es, komplexe Preformgeometrien schichtweise, ähnlich den Prinzipien der additiven Fertigung, mit einer variabel und definiert wählbaren Schnittlänge der Kurzfasern vollautomatisch herzustellen. Die Preforminganlage ermöglicht es, die Kurzfasern in alle Raumrichtungen abzulegen. Dadurch können definiert ausgerichtete Kurzfasern parallel zur Reibfläche in die Preform integriert werden, die die friktionsinduzierte Wärme im späteren Bauteil gleichmäßig auf der Reiboberfläche verteilen. Außerdem können Fasern orthogonal zur Reiboberfläche integriert werden, die eine effiziente Wärmeabführung in das Innere der Bremsscheibe zu den Kühlkanälen ermöglichen.



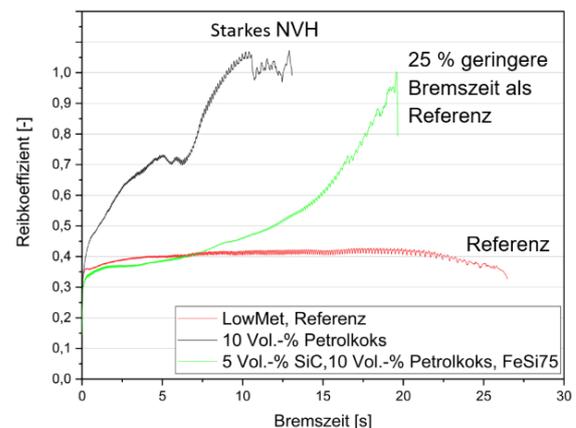
**Bild 1: Versuchsaufbau am Bremsenprüfstand der Universität Bayreuth (Schwungmasse = 800 kg ( $J = 96 \text{ kgm}^2$ ), Bremsscheibendurchmesser: 420 mm)**

### Tribologische Prüfung auf dem Bremsenprüfstand

Zur Evaluierung der tribologischen Eigenschaften wurden C/SiC-Bremssbeläge (30 x 30 x 10 mm<sup>3</sup>) hergestellt und in Verbindung mit keramischen Brems scheiben der Fa. Brembo SGL Carbon Ceramic Brakes GmbH tribologisch getestet (Bild 1). Dabei wurden Stopp-Bremssungen mit einer 800 kg Schwungmasse, bei zwei unterschiedlichen Bremsdrücken (3, 5 MPa) und drei Startgleitgeschwindigkeiten (5, 10, 20 m/s). Die Energie einer Bremsung mit 20 m/s Startgleitgeschwindigkeit entspricht dabei dem Energieäquivalent, dass eine Bremsscheibe eines 2 t schweren PKW an der Vorderachse bei einer Vollbremsung aus ca. 150 km/h aufnehmen muss.

### Ergebnisse der tribologischen Prüfung

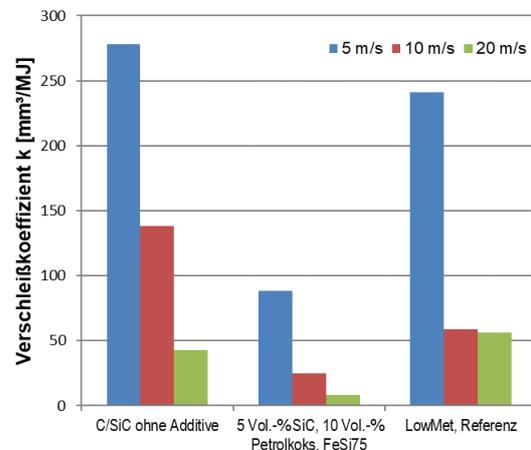
Als besonders geeignet stellten sich innerhalb des Projektes mit 10 Vol.-% Petrolkoks- sowie 5 Vol.-% SiC-Pulver additierte und mit FeSi75 infiltrierte und anschließend entsilicierte C/SiC-Bremssbeläge heraus, welche sich durch ein nahezu NVH freies Verhalten, einem geeigneten Reibwertverlauf sowie sehr niedrigen Verschleißwerten auszeichnen. In Bild 2 ist der erzielte



**Bild 2: Gemessener Reibkoeffizient dreier ausgewählter Bremsbeläge aufgetragen über die Bremszeit (Startgleitgeschwindigkeit PKW  $\approx 145 \text{ km/h}$ , Bremsdruck = 3 MPa)**

Reibkoeffizient in Abhängigkeit der Bremszeit dargestellt. Ein lediglich mit 10 Vol.-% Petrolkoks additiver Bremsbelag zeigt im Vergleich zu dem sehr konstanten Verlauf des Industriestandards „LowMet“ einen teilweise chaotischen Reibwertverlauf, welcher von teils starkem NVH-Verhalten begleitet wird. Das mit 5 Vol.-% SiC- und 10 Vol.-% Petrolkoks pulver additivierte und mit FeSi75 silicierte Material, zeigt einen mit abnehmender Gleitgeschwindigkeit nahezu konstant zunehmenden Reibwertverlauf. Durch das durchschnittlich höhere Reibwertniveau kann theoretisch die Bremszeit um ein Fünftel reduziert werden. Ein weiterer Vorteil dieser Kombination ist der deutlich reduzierte Verschleiß der Bremsbeläge (Bild 3), welcher im Vergleich zu dem

Industriestandard „LowMet“ um durchschnittlich über 65 % reduziert werden konnte.



**Bild 3: Gemessener Verschleißkoeffizient k unterschiedlicher Bremsbeläge bei 3 MPa Bremsdruck und 3 unterschiedlichen Startgleitgeschwindigkeiten (5; 10; 20 m/s)**

Das IGF-Vorhaben 19415 BG der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V., Reinhardtstraße 12-14, 10117 Berlin wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir danken außerdem dem Forschungskuratorium der DKG für die Möglichkeit der Einreichung.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

### Weitere Informationen:

**Dipl.-Ing. Thorsten Opel**

**Lehrstuhl Keramische Werkstoffe**  
Universität Bayreuth

Telefon: +49 (0) 921/55-65 25

E-Mail: thorsten.opel@uni-bayreuth.de

www.cme-keramik.uni-bayreuth.de

**Dr.-Ing. Daniel Weise**

**Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik**  
Technische Universität Dresden

Telefon: +49 (0) 351/463-34408

E-Mail: daniel.weise@tu-dresden.de

www.tu-dresden.de/mw/itm