

# VERNADDELTE RADIALGEWEBE-SANDWICH-PREFORMEN FÜR KERAMISCHE REIBBELÄGE

Während keramische Bremscheiben bereits als Serienbauteile in High Class-Fahrzeugen verbaut werden, befindet sich die Entwicklung von keramischen Bremsbelägen noch im Anfangsstadium. Im Rahmen des BMBF-Projekts «Anforderungsgerechte hochdrapierbare Carbon-Gelege-Faser-Preformen für effiziente Faserverbundkeramiken – CaGeFa» wurden textile Preformen entwickelt, die eine Reduzierung von Prozesszeiten und -kosten bei gleichzeitiger Optimierung des Eigenschaftsprofils ermöglichen und die Kommerzialisierung keramischer Reibbeläge vorantreiben. Die Bauteile müssen dabei einen hohen, stabilen Reibwiderstand, ein schnelles, effektives Ansprechen (sog. «Initial Bite») sowie eine gezielte Wärmeabführung zur Vermeidung der Überhitzung aufweisen.



Vor dem Hintergrund der geringen kommerziellen Verfügbarkeit von Preformen für keramische Reibbeläge wurden prozess- und eigenschaftsangepasste Halbzeuge und Sandwichstrukturen aus Carbonfasern sowie die Fügung von Rundgeweben mit Sandwichstrukturen mittels der Vernadelungstechnik entwickelt. Derzeitige Beläge basieren auf Carbongeweben, die einzeln gestapelt, mit Harz imprägniert und anschließend pyrolysiert und carbonisiert werden. Dieser kosten- und zeitintensive Prozess wird bis zu acht Mal wiederholt, um die geforderten Eigenschaften zu erreichen. Durch die Vernadelung kann auf die Vorstabilisierung mittels Harzsystemen verzichtet und damit eine Reduzierung der Prozesszeiten erreicht werden. Für das benötigte Eigenschaftsprofil der Reibbeläge und die Prozessierung mittels des CVI-Verfahrens (Chemical Vapour Infiltration) sind die Preformen in einem Gleichgewicht aus Strukturdichte, ge-



**GUNAR KNÖCKEL**

Dipl.-Ing.

Hochschule für Angewandte  
Wissenschaften Hof – Institut für  
Materialwissenschaften  
DE-95028 Hof

gunar.knoeckel@hof-university.de

ringer Faserschädigung und einem definierten Anteil an Faserumlenkungen in z-Richtung entwickelt worden. Zur Ableitung des Wirkzusammenhangs wurden sowohl die Preformen als auch die Reibbeläge entsprechend der gestellten Anforderungen charakterisiert.

## Textile Halbzeuge für keramische Reibbeläge

Zur Entwicklung eines Reibbelages aus einem Kohlenstoff-faser-Rundgewebe als Funktionsschicht und einer Sandwichstruktur als Trägermaterial wurden beide Preformteile, die Fügetechnik zur Verbindung der Preformen und die dazu notwendige Prozesstechnik entwickelt. Das Rundgewebe der Firma Gustav Gerster GmbH & Co. KG zeigt einen spiralförmigen Aufbau und kann in variabler Dicke durch Erhöhung der Windungsanzahl hergestellt werden, wie Abb. 1 zeigt. Ziel des Aufbaus ist die Aufnahme der mechanischen Belastung durch die tangential angeordneten Kett-



Abb. 1: Rundgewebe der Firma Gustav Gerster GmbH & Co. KG bestehend aus mehreren Windungen (Quelle: Gustav Gerster GmbH & Co. KG).

fäden und die Wärmeableitung über die radial angeordneten Schussfäden. Weiterhin wurde ein Hybrid-Rundgewebe entwickelt, bei dem die eingesetzten Pitchfasern die Wärme in x- und y-Richtung besser abtragen. Für die Bremsbelagpreformen wurden weiterhin gehoppte Faserrovings zur Reduzierung der Materialkosten verwendet, welche mit einem auf den Sandwich-Herstellungsprozess angepassten Faserchopper geschnitten und abgelegt werden. Parallel dazu wurden an der TU Dresden Versuche zur Erzeugung einer quasi-isotropen Faserverteilung gehoppter Fasern umgesetzt, die durch Abstimmung von Fallhöhe und Fallblechwinkel eingestellt wird. Neben der quasi-isotropen Faseranordnung kann durch diese Methodik auch eine anisotrope Faserorientierung mit definierter Verteilung realisiert werden. Für eine reproduzierbare Prozessführung wurde eine Faserführungseinrichtung bestehend aus einem Spulengatter und Faserführungselementen konstruiert, die eine kontinuierliche Faserzuführung zum Faserchopper ermöglicht. Über das Zusammenspiel von Schneidgeschwindigkeit des Faserchoppers und Transportbandgeschwindigkeit kann das Flächengewicht der gehoppten Fasermatte eingestellt werden.

### Vernadelungs- und Prüftechnologie für Sandwich-Verbunde

Die Sandwichvarianten setzen sich aus einer Kombination verschiedener Kohlenstofffaser-Halbzeuge zusammen. Dazu zählen Gewebe, biaxiale Gelege, gehoppte Fasern sowie Krempelvliesstoffe. Zur anforderungsgerechten Entwicklung keramischer Reibbeläge sowie der Bewertung von Einflussparametern und Wirkzusammenhängen wurden folgende Parameter variiert:

- Halbzeugauswahl
- Flächenmasse
- Dichte
- Einstichdichte
- Einstichtiefe

Der Fügeprozess von Rundgewebe und Sandwichstruktur wurde mit unterschiedlichen Maschinengeschwindigkeiten und Einstichtiefen erprobt. Dabei wurde eine hohe Strukturdichte sowie eine ausreichende Verbindung der beiden Komponenten bei gleichzeitig geringer Nadelbeanspruchung angestrebt. Um den Verzug der einzelnen Windungen des Rundgewebes beim Vernadeln zu vermeiden, wurde das Rundgewebe an einzelnen Stellen mit Hilfe einer Naht fixiert. Zur Umsetzung dieses Strukturaufbaus wurde die Nadelmaschine Autefa Stylus DZ-D 1,25-12 der Hochschule Hof modifiziert, so dass Preformen mit einer Dicke von 30 mm realisiert werden können. Abb. 2 zeigt die entwi-



Abb. 2: Preform für einen Bremsbelag (Quelle: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hof).

ckelte Preform für Friktionsanwendungen. Für die Bewertung der Performance wurden Dichte, Trennfestigkeit der Einzellagen sowie der Verstärkungsgrad der neuentwickelten Materialien charakterisiert. Die Bewertung der lokalen Strukturdichte sowie der z-Verstärkung erfolgte über computertomographische Aufnahmen (CT) am Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL in Bayreuth. An der prozessierten Faserverbundkeramik wurden weiterhin die Wärmeleitfähigkeit in z-Richtung sowie der Reibwert im Kalt- und Warmbremsverhalten auf einem Bremsprüfstand ermittelt.

### Belastungsgerechte und wirtschaftliche Auslegung der Textilien

Die Faserrichtung des endkonturnahen und somit ressourcensparenden Rundgewebes entspricht der Belastungsrichtung. Der Kettfaden nimmt in tangentialer Richtung die mechanische Belastung auf, während der Schussfaden in radialer Richtung die Wärme abträgt. Die Wärmeleitfähigkeit aus der xy-Ebene des Bremsbelags wird durch die Verwendung einer Pitchfaser in Rundgeweben und Sandwichstrukturen gesteigert. Über den Faserchopper können die eingesetzten Carbonfaserrovings bei einer Schneidleistung von bis zu 180 kg/h zu Fasern mit einer Länge von 6,3–430 mm effizient geschnitten werden. Gehoppte Fasern können anisotrop und quasi-isotrop abgelegt werden. Abb. 3 zeigt exemplarisch eine quasi-isotrope Faserorientierung.

### Gezielte Einstellung der Preformdichte über die Vernadelung

Bei den Sandwichstrukturen nimmt die Dichte als bedeutsamer Parameter für die Infiltrierbarkeit im CVI-Prozess einen hohen Stellenwert ein. Die Preformdichte kann vor allem durch die Einstichdichte sowie die Materialauswahl beeinflusst werden. Je geringer die Einstichdichte dabei ist, desto höher ist die Preformdichte. Im Rahmen der Versuchs-

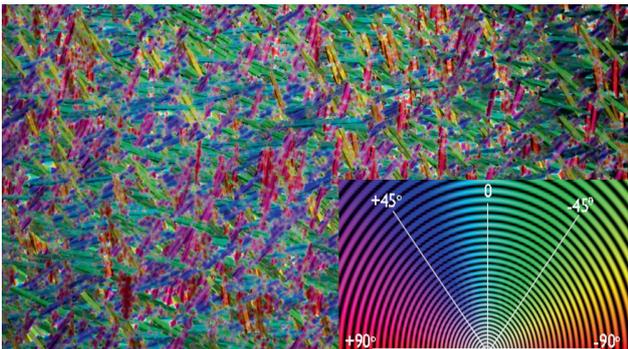
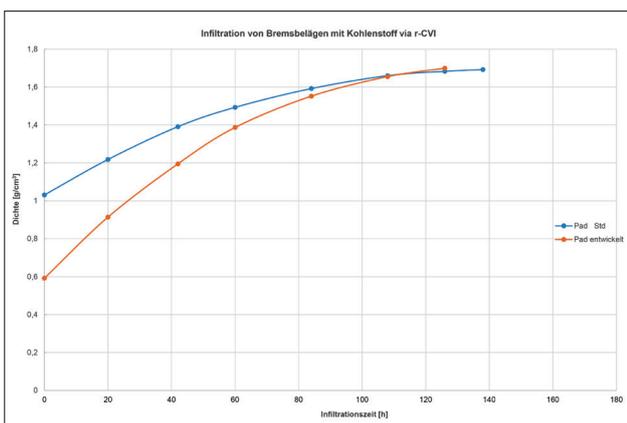


Abb. 3: Quasi-isotrope Faserorientierung der gehoppten Fasern; Fasern gefärbt nach prozentualer Häufigkeit der Faserorientierung (Quelle: TU Dresden).

reihen wurde ein Optimum der Einstichdichte ermittelt, welche die für die Keramisierung notwendige Haftung bei gleichzeitig hoher Strukturdichte garantiert. So beträgt die Preformdichte  $0,32 \text{ g/cm}^3$  bei 8 Lagen und einer Einstichdichte von  $100 \text{ Einstichen/cm}^2$ . Zum Vergleich liegt die Preformdichte bei gleicher Lagenanzahl und einer Einstichdichte von  $30 \text{ Einstichen/cm}^2$  bei  $0,47 \text{ g/cm}^3$ . Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei hoher Einstichdichte eine Volumenzunahme der Sandwichstruktur durch die Schädigung der textilen Halbzeuge auftritt. Die Lagenhaftung wird neben Einstichtiefe und Einstichdichte massgeblich von den eingesetzten Halbzeugen beeinflusst. Gelege bieten im Vergleich zu Geweben den Vorteil, dass eine Faserumlenkung durch die Anbindung mittels Bindefäden sowie eine geringere Faserreibung leichter zu ermöglichen ist. Dadurch ist eine geringere Einstichdichte notwendig, was eine reduzierte Faserschädigung nach sich zieht. Beim Fügen des Rundgewebes und der Sandwichstruktur durch Vernadelung werden die Kohlenstofffasern moderat in z-Richtung

Abb. 4: Vergleich der Infiltrationszeit eines neu entwickelten (rote Kurve) und eines früheren Bremsbelages (blaue Kurve) (Quelle: CVT GmbH & Co. KG).

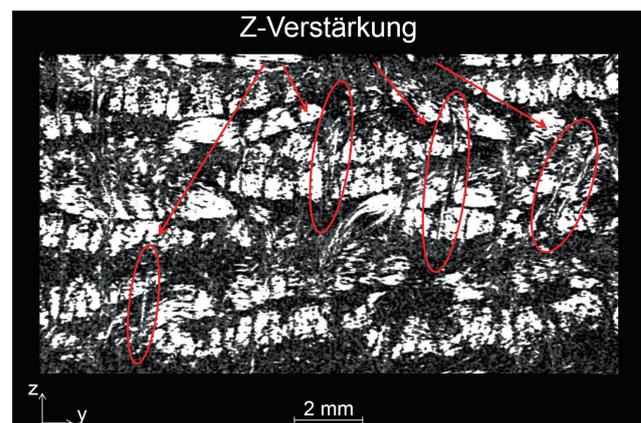


umgelenkt, so dass eine ausreichende Haftung entsteht und dabei die Wärmeleitung in z-Richtung nur geringfügig gesteigert wird. Nach dem Fügen wird die Infiltration der Preformen im CVI-Prozess bei der CVT GmbH & Co. KG vorgenommen. Mit einer Dichte von  $0,60 \text{ g/cm}^3$  kann die Preform im CVI-Prozess in einer Prozessdauer von 126 h infiltriert werden. Abb. 4 zeigt, dass die Infiltrationszeit deutlich unter der Zeit der aktuell eingesetzten Materialien liegt, womit eine wirtschaftlichere Fertigung gewährleistet werden kann.

### Wärmeleitfähigkeit und Bremsverhalten der Reibbeläge

Die Wärmeleitfähigkeit in z-Richtung soll bei den Bremsbelägen möglichst gering gehalten werden. Ziel ist dabei eine Wärmeleitfähigkeit kleiner  $15 \text{ W/mK}$ . Beeinflusst wird diese vor allem durch die Einstichdichte, die Einstichtiefe sowie durch die Zusammensetzung der Sandwichstruktur. Je mehr Fasern und je tiefer diese in z-Richtung umgelenkt werden, desto höher ist die Wärmeleitfähigkeit in z-Richtung. Die Verteilung der umgelenkten Fasern wird über CT-Aufnahmen (Abb. 5) bewertet. Eine Sandwichstruktur, welche beim Fügen eine Einstichtiefe von 2 mm erfahren hat, besitzt eine Wärmeleitfähigkeit in z-Richtung von  $23,3 \text{ W/mK}$ , wogegen die Parameterveränderung der Einstichtiefe auf  $-2 \text{ mm}$  eine deutliche Reduktion der Wärmeleitfähigkeit in z-Richtung auf bis zu  $9,2 \text{ W/mK}$  zur Folge hat. Ein weiterer Messwert zur Beurteilung der Bremsbeläge ist das Bremsvermögen. Der sogenannte «Initial Bite» wird als dimensionsloser Reibwert angegeben und bewertet das erste und stärkste Ansprechen der Bremse. Die Werte des «Initial Bite» der entwickelten Preformen sind dabei vergleichbar mit dem Stand der Technik.

Abb. 5: Analyse der umgelenkten Kohlenstofffasern in z-Richtung (Quelle: Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL).



## Zusammenfassung der Resultate

Zur Steigerung der kommerziellen Verfügbarkeit wurden anforderungsgerecht vernadelte Preformen aus Kohlenstofffasern für den Einsatz als keramische Bremsbeläge entwickelt. Die Preformen setzen sich aus einem endkonturnahen, ressourcensparenden Rundgewebe und einer kostengünstigeren Sandwichstruktur zusammen. Essentielle Preformeigenschaften können durch die Prozessparameter der Nadelmaschine sowie den Materialaufbau gezielt eingestellt werden. In Abhängigkeit von Materialauswahl, Einstichdichte und Einstichtiefe kann die geforderte Wärmeleitfähigkeit in z-Richtung von kleiner 15 W/mK gewährleistet werden. Eine Optimierung der Wärmeabführung in x- und y-Richtung wird durch den Einsatz von Pitchfasern erreicht. Bei der Infiltration der Preformen mit der Kohlenstoffmatrix aus der Gasphase konnte eine deutliche Reduzierung der Prozesszeit im Vergleich zu den aktuell eingesetzten Werkstoffen realisiert werden. In Hinblick auf das Bremsverhalten zeigen die Strukturen einen

sehr guten «Initial Bite». Auf Basis der Forschungsarbeiten konnte dabei erfolgreich ein direkter Wirkzusammenhang zwischen der textilen Preform und der Faserverbundkeramik abgeleitet werden.

## Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Projekts innerhalb der Massnahme «Technische Textilien für innovative Anwendungen und Produkte – NanoMatTextil» (Förderkennzeichen 03X0143A). ■

Ein Literaturverzeichnis kann beim Verlag angefordert werden.

## \*weitere Autoren:

Prof. Dr. F. Ficker; M. Eng. C. Anzer; Tech. Dipl. Bw. (WA) M. Bohlender; Dr. R. Hegermann; Dipl.-Wirt. Ing. D. Weise; Dr. A. Kenschak