



Thorsten Opel (Autor)

## Leichtbaubremse in Metall-Keramik-Hybridbauweise



UNIVERSITÄT  
BAYREUTH

Ceramic  
Materials  
Engineering

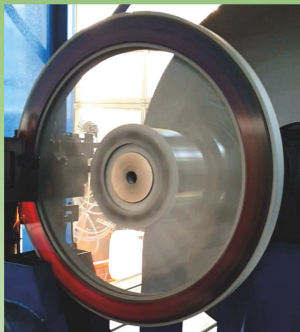


Schriftenreihe Keramische Werkstoffe  
Lehrstuhl Keramische Werkstoffe  
Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Walter Krenkel

Band 19

Thorsten Opel

### Leichtbaubremse in Metall-Keramik-Hybridbauweise



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8936>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	IV
Symbolverzeichnis .....	V
1 Einleitung und Aufgabenstellung .....	1
1.1 Einleitung .....	1
1.2 Problemstellung .....	2
1.3 Zielsetzung.....	2
1.4 Lösungsweg.....	3
2 Stand der Technik.....	5
2.1 Bremsscheiben .....	5
2.1.1 Graugussbremsscheiben .....	5
2.1.2 Aluminium-Metallmatrix-Bremsscheiben.....	7
2.1.3 Keramische Leichtbaubremsscheibe.....	8
2.1.4 Bremssysteme elektrischer Fahrzeuge.....	13
2.2 Tribologie .....	13
2.2.1 Reibungsmechanismen.....	14
2.2.2 Verschleißmechanismen .....	16
2.3 Fügeverfahren.....	20
2.4 Metall-Keramik-Hybridbremsscheiben.....	27
2.4.1 Patente.....	27
2.4.2 Veröffentlichungen .....	29
2.4.3 Zusammenfassung.....	31
3 Konzept der Metall-Keramik-Hybridbremsscheibe .....	32
3.1 Motivation.....	32
3.2 Festlegung eines Anwendungsfalls .....	34
3.3 Anforderungen an die Hybridbremsscheibe.....	35
3.4 Auswahl und Festlegung des Tragkörpermaterials .....	35
3.4.1 Anforderungen an das Tragkörpermaterial .....	35
3.4.2 Materialauswahl .....	36
3.5 Auswahl und Festlegung des Reibsegmentmaterials .....	39
3.5.1 Anforderungen an das Reibsegmentmaterial .....	39

---

3.5.2	Materialauswahl .....	39
4	Materialien und Methoden .....	42
4.1	Auswahl geeigneter Fügeverfahren .....	42
4.1.1	Bewertungsverfahren nach Kesselring .....	42
4.1.2	Bewertung der Fügeverfahren .....	44
4.1.3	Verwendete Bewertungskriterien .....	44
4.2	Untersuchung der verwendeten Fügeverfahren .....	46
4.2.1	Verschrauben .....	46
4.2.2	Verkleben .....	49
4.3	Bauweisenstudie .....	55
4.3.1	Verwendete Software und Materialien .....	55
4.3.2	Vergleichsbremsscheibe .....	56
4.3.3	Bauweisen .....	56
4.3.4	Konstruktion .....	57
4.3.5	Nachrechnung .....	57
4.4	Tribologische Prüfung .....	61
4.4.1	Bremsenprüfstand der Universität Bayreuth .....	61
4.4.2	Prüfprogramm .....	62
4.4.3	Verwendete Bremsbeläge .....	62
4.5	Charakterisierungsmethoden der Werkstoffe .....	65
4.5.1	Mechanische Prüfung .....	65
4.5.2	Lichtmikroskopie .....	65
4.5.3	Rasterelektronenmikroskopie .....	66
4.5.4	Thermogravimetrie .....	66
5	Ergebnisse und Diskussion .....	67
5.1	Auswahl geeigneter Fügeverfahren .....	67
5.2	Untersuchung der Fügeverfahren .....	72
5.2.1	Verschrauben .....	72
5.2.2	Klebstoffvorauswahl durch Stirnabzugsversuch .....	73
5.2.3	Klebstoffcharakterisierung durch Zugscherversuch .....	76
5.3	Bauweisenstudie .....	91

---

5.3.1	Charakterisierung des Reibsegmentmaterials .....	91
5.3.2	Umgesetzte Bauweisen.....	92
5.3.3	Nachrechnung der Bauweisen .....	98
5.3.4	Mechanische Nachrechnung .....	100
5.3.5	Thermische Nachrechnung .....	105
5.4	Tribologische Prüfung .....	113
5.4.1	Vergleichsbremsscheibe .....	113
5.4.2	Bauweise C.....	122
5.4.3	Vergleich der tribologischen Ergebnisse.....	133
5.4.4	Zusammenfassung der tribologischen Ergebnisse .....	135
5.4.5	Verschleiß der Bremsscheiben.....	136
5.5	Kostenbetrachtung .....	141
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	144
7	Summary and Outlook.....	147
	Literaturverzeichnis .....	149
	Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Vorträge.....	163
	Lebenslauf.....	165