

1 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Einleitung

Aufgrund der fortschreitenden und sich immer mehr beschleunigenden Elektrifizierung von Personen- und Nutzfahrzeugen ändern sich die Anforderungen an die Bremssysteme dieser Fahrzeuge stark. So können die vorhandenen elektrischen Motoren ebenfalls dazu genutzt werden, die Fahrzeuge zu verzögern und einen Teil der kinetischen Energie des Fahrzeugs zurück in die Batterie der Fahrzeuge zu speisen. Ein Großteil der Bremsmanöver der Fahrzeuge können mit diesem rekuperativen Bremssystem abgedeckt werden, jedoch bleibt ein Friktionsbremssystem auch für solche elektrische Fahrzeuge unabdingbar. Dies liegt zum einen daran, dass eine Redundanz des Bremssystems zwingend erforderlich und durch den Gesetzgeber vorgeschrieben ist. Andererseits kommen die rekuperativen Bremssysteme bei hohen Verzögerungen schnell an ihre Grenzen, weshalb zusätzliche Bremsleistung durch ein Friktionsbremssystem gerade für Notbremsungen zwingend erforderlich ist. Ferner wird das Friktionsbremssystem für Bremsungen bei niedrigen Geschwindigkeiten benötigt. Insgesamt wird das Friktionsbremssystem im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor jedoch deutlich weniger genutzt.

In Verbindung mit klassischen Graugussbrems scheiben führen diese neuen Anforderungen an das Friktionsbremssystem elektrischer Fahrzeuge zu einer übermäßigen Korrosion der Brems scheiben, da der sich bildende Flugrost oder der im Winter durch Salzwasser bedingte Rost auf der Oberfläche der Reibflächen der Brems scheibe, je nach Nutzung des Fahrzeugs, durch die durchgeführten Bremsmanöver nicht hinreichend entfernt werden kann. Dies führt zu einer fortwährenden Verschlechterung der tribologischen Eigenschaften des Friktionsbremssystems, sodass, im Falle einer Notbremsung, die benötigte Reibleistung nicht oder nur mit einer starken Verzögerung abgerufen werden kann.

Neben dem problematischen Korrosionsverhalten der standardmäßig verwendeten Graugussbrems scheiben ist deren hohes Gewicht für elektrische Fahrzeuge ungünstig, da die benötigten Batterien eine sehr hohe Masse aufweisen und somit das Gewicht des restlichen Fahrzeugs so gering wie möglich gehalten werden sollte. Aus diesem Grund werden in elektrischen PKW auch vermehrt extreme Leichtbauwerkstoffe wie bspw. CFK eingesetzt.

Neben Grauguss wird ebenfalls partikelverstärktes Aluminium (Metal Matrix Composites – MMC) sowie kohlenstofffaserverstärktes Siliciumcarbid (Ceramic Matrix Composites - CMC) als Brems scheibenmaterial eingesetzt. Die sehr limitierte Temperaturbeständigkeit von Aluminium lässt jedoch einen Einsatz von MMC-Brems scheiben an der Vorderachse nicht zu, da die benötigte Bremsleistung und die damit verbundenen Temperaturen zu hoch sind. Keramische Leichtbaubrems scheiben aus CMC sind korrosionsbeständig und zeichnen sich durch ihre hervorragenden tribologischen Eigenschaften und sehr hohe Verschleißbeständigkeit aus. Allerdings sind CMC-Brems scheiben aufgrund ihres extrem hohen Herstellungspreises

nicht für die breite Anwendung geeignet und werden derzeit nur in Sport- und Luxuswagen eingesetzt.

1.2 Problemstellung

Das Bremssystem elektrischer Fahrzeuge kombiniert das rekuperative Bremssystem mit einem Friktionsbremssystem. Dabei wird das Friktionsbremssystem größtenteils für Bremsungen bei niedrigen Geschwindigkeiten und Bremsungen aus hohen Geschwindigkeiten und/oder mit einer hohen Verzögerung benötigt. Des Weiteren fungiert das Friktionsbremssystem als Redundanz für das rekuperative Bremssystem, sodass es in der Lage sein muss, in allen denkbaren Situationen, im Rahmen eines Notbremsmanövers mit einer Verzögerung von ca. 1 g, das Fahrzeug komplett zum Stillstand bringen zu können.

In dieser Arbeit soll deshalb ein neues Bremsscheibenkonzept entwickelt werden, welches den Einsatz von CMC-Materialien für Bremsscheiben von elektrischen Fahrzeugen ermöglicht, indem die Menge des benötigten, teuren CMC-Materials auf ein Minimum reduziert wird. Hierzu sollen keramische C/SiC-Reibmaterialien mit einem metallischen Tragkörper kombiniert werden. Somit können die hervorragenden tribologischen Eigenschaften von CMC mit den Vorteilen von Metallen kombiniert werden, um eine kostengünstige, korrosionsbeständige Bremsscheibe für elektrische Fahrzeuge zu entwickeln, welche ein deutlich geringeres Gewicht als eine Graugussbremsscheibe aufweist.

Aufgrund der wiederkehrenden starken thermischen Belastungen einer Bremsscheibe, stellt die Kombination von Metallen und CMC eine große Herausforderung dar, da sich die Wärmeausdehnungskoeffizienten der beiden Materialien stark unterscheiden. Ferner müssen bei der Fügung von CMC zusätzlich die konstruktiven Limitationen von Keramiken bedacht werden, sodass z. B. Zugbelastungen oder Lochleibung vermieden werden.

1.3 Zielsetzung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung, Konstruktion und tribologische Prüfung einer Leichtbaubremse in Metall-Keramik-Hybridbauweise. Dabei soll diese Bremsscheibe aus einem metallischen Tragkörper bestehen, der mit einer Reibfläche aus C/SiC bestückt wird. Die Anforderungen an die Bremsscheibe lauten wie folgt:

- Bremsscheibe an der Vorderachse, welche in der Lage ist, das Fahrzeug aus der Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs abzubremsen,
- vergleichbare tribologische Eigenschaften zu einer handelsüblichen keramischen Leichtbaubremsscheibe,
- vergleichbarer Bauraumbedarf, sodass der Rest des Bremssystems nicht angepasst werden muss,
- Gewicht der Bremsscheibe < 5 kg,
- Herstellungskosten der Bremsscheibe deutlich niedriger als die einer handelsüblichen keramischen Leichtbaubremsscheibe ($\ll 600$ €).

Zudem werden folgende wissenschaftliche Zielsetzungen in dieser Arbeit verfolgt:

- Entwicklung eines Fügekonzeptes zur ausdehnungskompatiblen Verbindung zwischen C/SiC-Reibsegmenten und Metalltragkörper,
- Bauweisenstudie zur Untersuchung der Gestaltung einer Leichtbaubremse in Metall-Keramik-Hybridbauweise,
- mechanische und thermische Nachrechnung der entwickelten Bauweisen,
- tribologische Prüfung einer Bauweise im Realmaßstab sowie einer vergleichbaren keramischen Leichtbaubremsscheibe.

1.4 Lösungsweg

Der im Rahmen dieser Arbeit bestrittene Lösungsweg ist in Abbildung 1 zusammengefasst und skizziert. Ausgehend von dem Konzept der Metall-Keramik-Hybridbremsscheibe soll im ersten Schritt eine intensive Literatur- und Patentrecherche bisherige Arbeiten auf diesem Gebiet sowie deren Stärken und Schwächen beleuchten. Weiterführende Literaturrecherchen dienen der Festlegung eines Anwendungsfalls, der Auswahl eines geeigneten Tragkörper- und Reibsegmentmaterials sowie der Auswahl geeigneter Fügeverfahren.

Basierend auf dem festgelegten Anwendungsfall wird eine Vorauswahl aus den geeigneten Fügeverfahren getroffen und diese unter Berücksichtigung der Vorgaben des Anwendungsfalls intensiv charakterisiert. Nach der Entwicklung zwei geeigneter und getesteter Fügekonzepte, für die Fügung der keramischen C/SiC-Reibsegmente auf den metallischen Tragkörper, werden diese genutzt, um im Rahmen einer Bauweisenstudie drei unterschiedliche Bauweisen zu konstruieren und mit Hilfe von FE-Simulationen nachzurechnen. Auf Basis dieser Konstruktionen werden die drei unterschiedlichen Bauweisen A, B und C hergestellt. Bauweise A fungiert als Machbarkeitsstudie, die der Demonstration des Konzepts dient. Bauweise B demonstriert die Skalierbarkeit und Anpassungsfähigkeit des Konzepts. Als Prototyp dient Bauweise C, welche die Möglichkeit bietet, tribologische Tests durchzuführen.

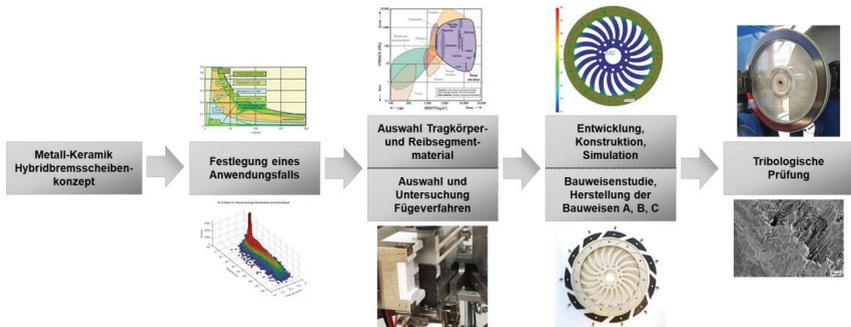


Abbildung 1: Skizze des in dieser Arbeit beschriebenen Lösungswegs. [1–3]

Die tribologische Prüfung der Bauweise C erfolgt im Realmaßstab auf dem Bremsenprüfstand der Universität Bayreuth. Als Bremsbelagsmaterial werden drei unterschiedliche Belagsmischungen untersucht und miteinander verglichen. Analoge Untersuchungen werden an einer handelsüblichen keramischen Leichtbaubremsscheibe durchgeführt, welche dem Stand der Technik entspricht. Die erhaltenen tribologischen Ergebnisse werden miteinander verglichen und die auf den Bremsbelägen entstehenden Reibflächen intensiv charakterisiert. Abschließend wird eine Kostenbetrachtung hinsichtlich der Serienfertigung, der in dieser Arbeit besprochenen Leichtbaubremse in Metall-Keramik-Hybridbauweise, durchgeführt.

2 Stand der Technik

2.1 Bremsscheiben

Als eines der wichtigsten Sicherheitsbauteile von PKW, Nutzfahrzeugen oder auch Schienenfahrzeugen ist die jederzeitige und einwandfreie Funktion von Bremsscheiben für den sicheren Betrieb dieser Fahrzeuge essentiell. Während des Bremsvorgangs wird die kinetische Energie des Fahrzeugs durch Reibung größtenteils in Wärmeenergie umgewandelt und in der Bremsscheibe vorübergehend gespeichert, um dann möglichst schnell wieder an die Umgebung abgegeben zu werden. Neben der zunehmenden Elektrifizierung der Antriebssysteme stellen auch die immer breiter angewandten elektrischen Assistenzsysteme, bspw. durch kurze Bremsungen zur Stabilisierung des Fahrverhaltens, eine Vielzahl von Anforderungen an moderne Bremssysteme. [4, 5]

Nach [4] können die wesentlichen Merkmale von Scheibenbremsen im Vergleich zu anderen Bremssystemen, wie z. B. Trommelbremsen, wie folgt zusammengefasst werden:

- hohe thermische Belastbarkeit,
- geringe Empfindlichkeit gegenüber Reibwertschwankungen des Bremsbelags,
- reproduzierbares und gleichmäßiges Ansprechverhalten,
- gleichmäßiger Verschleiß der Bremsbeläge,
- einfache, selbsttätige Nachstellung,
- sowie ein gutes Löseverhalten.

2.1.1 Graugussbremsscheiben

Am weitesten verbreitet sind Bremsscheiben aus Gusseisen mit Lamellengraphit, sog. Grauguss, wobei meist die Qualitäten EN-GJL-150 – 250 eingesetzt werden. Sie lassen sich besonders kostengünstig mittels Gießverfahren herstellen, wobei große Gießereien Stückzahlen > 1 Millionen St./Jahr herstellen. Das Grundgefüge dieser Werkstoffe ist größtenteils perlitisch. Ein höherer Perlitanteil kann bspw. durch erhöhte Abkühlgeschwindigkeiten sowie niedrige Siliciumgehalte erreicht werden und führt zu einer höheren Zugfestigkeit des Werkstoffs. Innerhalb des Gefüges liegt Kohlenstoff in lamellarer Form als Graphit vor. Durch Legierungszusätze wie z. B. Cr, Cu, Mo, Ni oder Sn lassen sich die Werkstoffeigenschaften beeinflussen. [6–9]

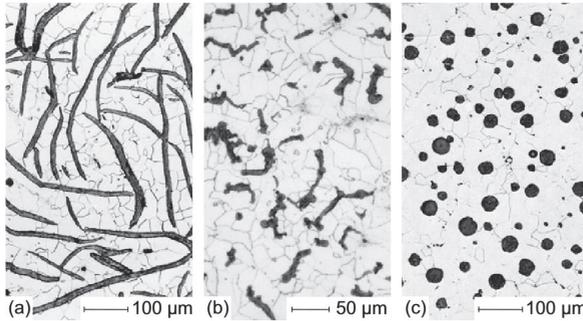


Abbildung 2: Gefüge von ferritischem Gusseisen nach der Erstarrung: a) lamellar, b) vermicular, c) kugelig. [10]

Eine Übersicht der Eigenschaften der genannten Graugussorten EN-GJL-150 – 250 kann DIN EN 1561 [11] entnommen werden (vgl. Tabelle 1). Durch den in lamellarer Form vorliegenden Graphit (Abbildung 2 a)) kommt es jedoch bei einer Zugbeanspruchung dieser Werkstoffe zu einer starken Spannungsüberhöhung an den Spitzen der Graphitlamellen [8, 12]. Folglich weist Grauguss eine niedrigere Festigkeit als Stahl auf und ist im Vergleich deutlich spröder [8, 12]. Durch den hohen Kohlenstoff- und Siliciumgehalt der EN-GJL-Legierungen wird eine niedrige Schmelztemperatur und ein schmales Erstarrungsintervall erreicht, was eine gute Gießbarkeit dieser Legierungen zur Folge hat [9]. Weiterhin zeichnet sich der Werkstoff durch einen Festigkeitsabfall ab ca. 400 °C aus [13].

Unter Thermoschockbedingungen und bei erhöhter Temperaturbelastung können sog. Thermoschockrisse auftreten, welche die Lebensdauer von Graugussbrems scheiben herabsetzen und eine deutliche Überdimensionierung der Brems scheiben bspw. für SUV notwendig machen [14]. Dieses Verhalten begründet sich durch die temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften der Graugussbrems scheiben (Abbildung 3) [15]. Weitere Nachteile von Graugussbrems scheiben sind z. B. Heiß- und Kaltrubbeln oder auch Fading (Reibwertabfall bei hohen Brems scheibentemperaturen).

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften (bei Raumtemperatur) unterschiedlicher Gusseisenlegierungen mit Lamellengraphit nach DIN EN 1561 in getrennt gegossenen Proben von 30 mm Rohdurchmesser. [16]

Eigenschaft		EN-GJL-150	EN-GJL-250	EN-GJL-350
Zugfestigkeit	R_m [MPa]	150 – 250	250 – 350	350 – 450
0,1 % Dehngrenze	$R_{p0,1}$ [MPa]	98 – 165	165 – 228	228 – 285
Bruchdehnung	A [%]	0,8 – 0,3	0,8 – 0,3	0,8 – 0,3
Druckfestigkeit	σ_{dB} [MPa]	600	840	1080
Biegefestigkeit	σ_{bB} [MPa]	250	340	490

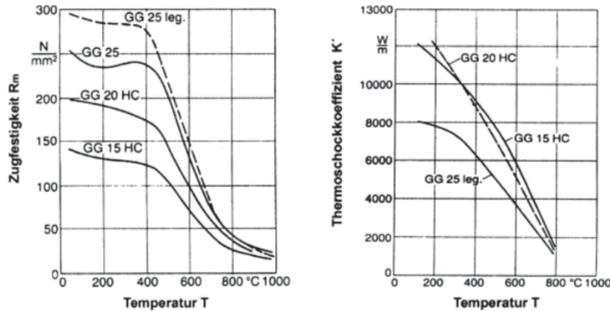


Abbildung 3: Temperaturabhängige Zugfestigkeiten sowie Thermoschockkoeffizienten unterschiedlicher Graugussqualitäten. [15]

2.1.2 Aluminium-Metallmatrix-Bremsscheiben

Aluminiumlegierungen weisen einige spezielle Eigenschaften, wie z. B. hohe spezifische Festigkeitswerte, hohe Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten und sehr hohe Korrosionsbeständigkeit, auf, weshalb sie in vielen unterschiedlichen Bauteilen (z. B. Motorkomponenten, Wärmetauscher, Felgen) eingesetzt werden [17, 18]. Aufgrund der fehlenden Verschleißbeständigkeit, der niedrigen Warmfestigkeit und auch der niedrigen Schmelzpunkte eignen sich unverstärkte Aluminiumlegierungen jedoch nicht für die Herstellung von Bremsscheiben. Für die Herstellung von Aluminiumbremsscheiben werden daher sogenannte Aluminium-Metallmatrix-Verbundwerkstoffe (Aluminium metal matrix composites – „Al-MMC“) verwendet. Diese Werkstoffklasse hat ihren Ursprung in der Entwicklung von hochfesten und hochsteifen Aluminiumlegierungen für spezielle Raumfahrtanwendungen oder auch für den Einsatz in Flugzeugtriebwerken [19]. Für die Herstellung von Al-MMC stehen eine Vielzahl von Prozessen, u. a. Kaltpressen [20], Gießen [21], Pressgießen [22], Sintern [23, 24] und thermische Spritzprozesse [25] zur Verfügung.

Als Verstärkungsphase/-partikel kommen meist Keramiken, wie bspw. SiC oder Al_2O_3 sowie Kohlenstoffasern zum Einsatz. Die Verstärkungsphase kann dabei aus Kurzfasern, Endlosfasern, Partikeln oder auch Schäumen bestehen (Abbildung 4). [18]

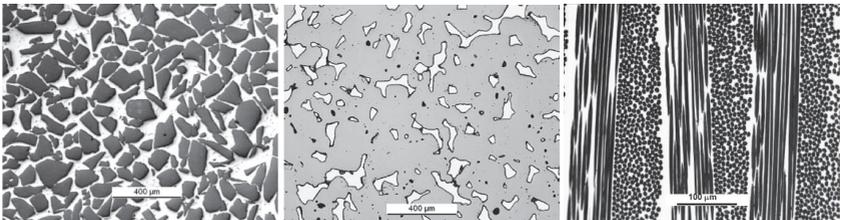


Abbildung 4: Gefüge unterschiedlicher Al-MMC: SiC -partikelverstärktes Aluminium (links), mit Aluminium infiltrierter SiC -Schaum (Mitte), Al_2O_3 endlosfaserverstärktes Aluminium (rechts). [18]

Trotz der höheren Warmfestigkeit und Verschleißbeständigkeit der partikelverstärkten Aluminiumlegierungen können diese bei PKW lediglich an der Hinterachse verwendet werden (z. B. VW Lupo 3L), da die zu dissipierenden Energien bzw. die entstehenden Temperaturen an der Vorderachse für Al-MMC zu hoch sind [26]. Breitere Anwendung finden Al-MMC Bremscheiben in Straßenbahnen oder auch Hochgeschwindigkeitszügen, da bei Schienenfahrzeugen die Bremsen hinsichtlich der thermischen Belastung fahrzeug- und streckenspezifisch ausgelegt werden können [4]. So wurden durch die Sab Wabco Bsi GmbH, Remscheid Al-MMC Bremscheiben für den ICE entwickelt, welche durch eine Gewichtseinsparung von 45 % gegenüber den Standard-Graugussbremscheiben insgesamt 12 t Gewichtseinsparungspotential ermöglichten [27]. Typische Materialeigenschaften von SiC-Partikelverstärkten Al-MMC sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

2.1.3 Keramische Leichtbaubremsscheibe

Verbundkeramiken, auch Ceramic Matrix Composites (CMC) genannt, verbinden die positiven Eigenschaften monolithischer Keramiken, wie bspw.:

- Verschleißbeständigkeit,
- Korrosionsbeständigkeit,
- Temperaturbeständigkeit
- sowie eine geringe Dichte

mit einem schadenstoleranten Versagensverhalten und einer hohen Thermoschockbeständigkeit [28]. Ermöglicht wird dies durch das Einbringen von Verstärkungsphasen, z. B. Partikel oder Fasern, jedoch werden als Bremscheibenmaterialien lediglich kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff (C/C) und kohlenstofffaserverstärktes Siliciumcarbid (C/SiC) eingesetzt. Aufgrund ihrer Eigenschaften, wie etwa niedrige Kalt- und Nassreibungswerte sowie teils hohe Verschleißkoeffizienten, kommen C/C-Werkstoffe lediglich in Rennsport- und Flugzeugbremsen zum Einsatz [29, 30].

Entwickelt wurde das C/SiC-Material, in den 90er Jahren, in erster Linie für Raumfahrtanwendungen [31–41]. Dabei wurde auch das Potential des Materials für tribologische Anwendungen erkannt und die Entwicklung von Bremscheiben und anderen Friktionsanwendungen mit C/SiC-Werkstoffen vorangetrieben [42–55]. Im Vergleich zu Graugusswerkstoffen verfügt C/SiC über eine höhere massenspezifische Wärmekapazität (Tabelle 2). Aufgrund der deutlich niedrigeren Dichte ist die volumenspezifische Wärmekapazität von C/SiC, verglichen mit GG-20, um den Faktor 2 niedriger. Dies führt dazu, dass keramische Leichtbaubremsscheiben größer ausgelegt werden müssen als Standard-Graugussbremscheiben, um die gleiche Wärmemenge speichern zu können.

Tabelle 2: Beispielhafte Werkstoffeigenschaften unterschiedlicher Brems Scheibenwerkstoffe. [4, 11, 56–59]

		Kurzfaser C/SiC (SGL)	GG-20	Al-MMC (SiC-Partikel)	C/C
Dichte	g/cm³	2,3 – 2,45	7,25	2,7	1,7 – 1,8
Massenspezifische Wärmekapazität	J/kgK	800	500	820 – 886	700
Volumenspezifische Wärmekapazität	J/dm³K	1.800	3.600	2.350	1.200
Wärmeausdehnungs- koeffizient (in-plane)	10⁻⁶/K	1 (RT) 2 (300 °C)	9 (RT) 12 (300 °C)	14 – 21	0,3
Wärmeleitfähigkeit (transversal)	W/mK	40	54	160 – 185	13
Zugfestigkeit (in-plane)	MPa	20 – 40	150 – 250	310 – 370	70 – 100
E-Modul (in-plane)	GPa	30	90 – 110	86 – 125	40
Biegefestigkeit	MPa	50 – 80	150 – 250		
Bruchdehnung (in-plane)	%	0,3	0,3 – 0,8	0,4 – 1,2	
Thermoschock- parameter R₂	W/m	> 27.000	< 10.000	> 16.000	> 40.000
Maximale Einsatztemperatur	°C	1.350	700	400	> 1.350

Durch die niedrigere Dichte, verbunden mit der höheren spezifischen Wärmekapazität der keramischen Leichtbaubrems Scheiben, ist eine deutliche Reduktion der Brems Scheibenmasse möglich. Da die Brems Scheiben zu den ungefederten und rotierenden Massen eines PKW zählen, hat die Reduktion des Gewichts der Brems Scheiben einen großen positiven Einfluss auf die Fahr dynamik, die Agilität und das Handling des Fahr zeugs [26]. Bei der Substitution der standardmäßig verbauten Graugussbrems Scheiben durch keramische Leichtbaubrems Scheiben konnte Porsche, bei einem 911 Carrera S, über 15 kg der ungefederten Masse einsparen, wobei 8,5 kg an der Vorderachse und 6,9 kg an der Hinterachse eingespart werden konnten [26]. Nach [4, S. 577] führt die Gewichtsreduktion ferner zu einer Steigerung des Fahrkomforts auf unebenen Fahrbahnen, einer Steigerung der Fahrleistung aufgrund geringerer translatorisch und rotorisch zu beschleunigender Massen, einer gesteigerten Regelgüte bei ABS- und ESP-Eingriffen, einer Verbesserung des Anlenkverhaltens, vor allem bei höheren Geschwindigkeiten, sowie zu einer Steigerung des Quer- und Längsbeschleunigungspotentials. Wie Tabelle 2 zeigt, verfügt das C/SiC-Material darüber hinaus über einen hervorragenden Thermoschockparameter R_2 (vergleiche auch beispielhaften Abschreckversuch (Abbildung 5, re.), welcher sich aus dem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten verbunden mit einer hohen transversalen Wärmeleitfähigkeit ergibt.

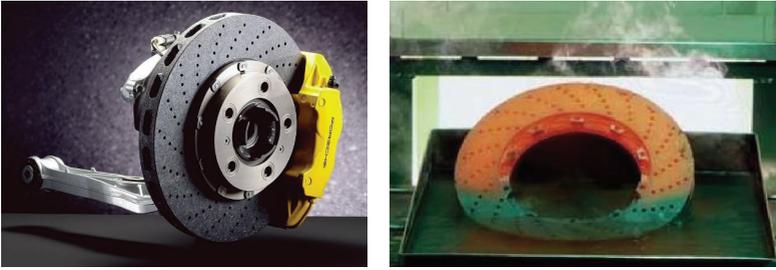


Abbildung 5: Porsche Ceramic Composite Brake eines Porsche 911 Turbo der Modellreihe 996 (links) [60], Abschreckversuch zur Demonstration der Thermoschockbeständigkeit des Reibrings der keramischen Leichtbaubremsscheibe (rechts) [61].

Wie Abbildung 5, li. zeigt, bestehen keramische Leichtbaubremsscheiben im Allgemeinen aus einem innenbelüfteten keramischen Reibring, der aus kurzfaserverstärktem C/SiC hergestellt wird. An diesem ist ein Aluminiumbremstopf montiert, dessen Aufgabe die Anbindung des Reibrings an die Achse des Fahrzeugs ist. Je nach Ausführung verfügt dieser Bremstopf im Inneren noch über einen weiteren Ring, welcher zusammen mit separaten Bremsbelägen, ähnlich einer Trommelbremse, als Feststellbremse verwendet wird. Da sich bei mehreren aufeinanderfolgenden Bremsungen eine Erwärmung des Aluminiumbremstopfs nicht vermeiden lässt, stellt der große Unterschied in der thermischen Ausdehnung zwischen dem C/SiC-Material des Reibrings und dem Aluminium des Bremstopfs besondere Anforderungen an die Fügung beider Komponenten. So ist es notwendig, dass sich der Bremstopf unabhängig vom keramischen Reibring ausdehnen kann. Dies wird im Allgemeinen über die Verwendung von sog. „Floatern“ erreicht, welche eine radiale Ausdehnung des Bremsscheibentopfes ermöglichen (Abbildung 6). Ebenso problematisch ist die Längenausdehnung der verwendeten Stahlschrauben, die zu einer Verringerung der Vorspannkraft führen kann. Dies kann durch die Verwendung von Federn ausgeglichen werden. [14]

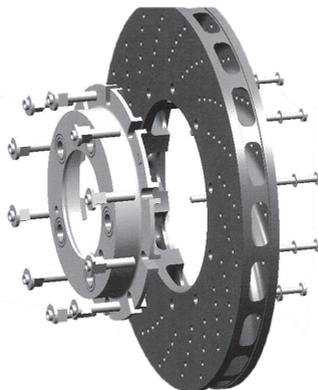


Abbildung 6: Explosionsdarstellung einer Baugruppe einer keramischen Leichtbaubremsscheibe. [62]